UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR

INSTITUT FÜR GEOTECHNIK

Wollendorfer Anita

Stud Kennz.: 431 Matr. Nr.: 9071438

"Huangtupo - Hangrutschung in Badong China (Tonmineralogie und deren Einfluss auf die Massenbewegung)"



2012

BETREUER: Prof. Dr.-Ing. Wei Wu MITBETREUER: Ao.Univ.Prof.i.R. Ing.Dr.phil.Rudolf Schwingenschlögl

DIPLOMARBEIT NR. 357

# Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meinem Betreuer Prof. Wei Wu bedanken, der diese Diplomarbeit in die Wege geleitet und in den vergangenen Jahren den Kontakt zu Prof. Wei Xiang in Wuhan hergestellt hat. So war es mir möglich, gemeinsam mit Christine Schönberger, diese Diplomarbeit über die Massebewegung in China zu schreiben.

Bei meinem Zweitbetreuer Prof. Schwingenschlögl möchte ich mich für die gute Vorbereitung auf die geologischen Hintergründe in China, und seine Erfahrung in allen Seminaren und Vorlesungen in meinem ganzen Studium bedanken.

Danke an Prof. Dr. Xiang Wei der uns vor Ort auf der "University of Geoscienses in Wuhan, China betreute. Er organisierte den Aufenthalt vor Ort und im Untersuchungsgebiet. Seine Mitarbeiter, Dr. Cui und Dr. Liu halfen uns bei der Durchführung unserer Versuche und betreuten uns bei allen Forschungsfragen.

Ein weiterer Dank gilt dem ganzen Studententeam in China, insbesondere Herrn Shun Wang der uns vom ersten Tag für alle Fragen zur Seite gestanden ist. Alle Beteiligten haben unseren Aufenthalt in China zu einer unvergesslichen Zeit gemacht.

Für die Hilfe bei der Gesamt- und Tonmineralanalyse und der Laborversuche im Institut für Geologie bedanke ich bei Prof. Franz Ottner, Dipl. Ing. Karin Wriessnig und Dipl. Ing. Theresa Bonatotzky.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Kollegin Christine Schönberger bedanken, die viele aufregende und produktive Stunden in China und Österreich mit mir verbracht hat.

Mein größter Dank geht an meine Eltern und meine Familie, die mich immer unterstützen und es mir ermöglicht haben dieses Studium abzuschließen. Danke an meinen Lebensgefährten Dr. Stefan Palkovits, der die ganze Zeit an meiner Seite ist, an mich geglaubt und mich in schwierigen Zeiten unterstützt und aufgemuntert hat.

## Vorwort

Die Diplomarbeit wurde vom Institut für Geotechnik (BOKU) in Kooperation mit der University of Geosciences in Wuhan, China ausgeschrieben. Das Vorhaben dieser Forschungsarbeit war die geotechnische Untersuchung der Huangtupo-Rutschung in der Provinz Hubei, China.

Der Arbeitsumfang dieses Projekts und die Durchführung vor Ort wurden für zwei Personen ausgelegt.

In Absprache mit Prof. Wu und Prof. Xiang konnten wir, Christine Schönberger und Anita Wollendorfer, mit großer Motivation und vollem Interesse an die Bearbeitung dieses Themas herangehen.

Die Daten wurden von uns gemeinsam erhoben und die Versuche auf der Universität in China und der Universität für Bodenkultur Wien gemeinsam durchgeführt.

Für die anschließende Niederschrift wurde das Forschungsthema in zwei Schwerpunkte getrennt und daraus jeweils eine eigenständige Diplomarbeit verfasst. Der Großteil der Themenbereiche wurde dennoch gemeinsam ausgearbeitet. Eine genaue Auflistung ist in tabellarischer Form der Diplomarbeit beigelegt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Grundlagen der Geotechnik, Massenbewegung und Tonmineralogie. Der Schwerpunkt wurde auf die geologischen und geotechnischen Laboruntersuchungen gelegt. Dafür wurde das Hauptaugenmerk auf die Methode der Röntgendiffraktrometrie gelegt. Die Schlussfolgerung bearbeitet den Einfluss der Tonmineralien auf die Huangtupo-Rutschung in China.

An dieser Stelle darf nochmals auf die Diplomarbeit von Christine Schönberger hingewiesen werden, die ihren Schwerpunkt auf die Evakuierungsplanung, und Modellierung der Standsicherheit gelegt hat.

# Kurzfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit war die geologische und geotechnische Untersuchung der Huangtupo-Rutschung in China. Das Forschungsgebiet befindet sich in der Provinz Hubei in der Kreisstadt Badong, welche ca. 100 km flussaufwärts des Drei-Schluchten-Damms am Jangtse Fluss liegt.

Die Grundlagen der Tonmineralogie, Ruschungseigenschaften und Geotechnik bilden den theoretischen Hintergrund dieser Arbeit. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf die Gesteinsmineralogie und deren Einfluss auf die Massenbewegung gelegt.

Die Laboruntersuchungen wurden teils in Wuhan und teils in Wien durchgeführt. Das untersuchte Material wurde aus der Rutschzone des Hanges entnommen und mittels Röntgendifraktometrie untersucht. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften sowie die Morphologie des Hanges haben großen Einfluss auf die Verwitterung und Erosion. Speziell die Tonminerale sind durch ihre spezifischen Eigenschaften wie Quellfähigkeit, die Wasseraufnahmefähigkeit und die Plastizität hauptverantwortlich für das mechanische Verhalten des Gesteins und letztendlich für die Stabilität des Hanges.

Die Hangstabilität wird weitgehend vom Verhältnis zwischen haltenden Kräften(Widerstand) und treibenden Kräften (Einwirkung) bestimmt, wobei die Tonminerale einen großen Einfluss auf den Widerstand hat.

Die Auswertung der Diffraktogramme der zwei untersuchten Proben ergab, dass die Tonminerale zu mehr als 90 % aus quellfähigen dreischichtigen Tonminerale bestanden. Diese lassen auf niedrige Scherfestigkeit des Gesteins schließen. Die in die Berechnung eingehenden Parameter wurden mittels geotechnischen Versuchen ermittelt.

Die Rahmenscherversuche und die Stabilitätsberechnungen sind der Diplomarbeit von Chirstine Schönberger zu entnehmen.

# Abstract

The aim of this thesis is the geological and geotechnical investigation of the Huangtupo landslide in China. The area of research is located in the Hubei province in the county of Badong, which is situated about 100 km upstream of the Three-Gorges-Dam at the Yangtse River.

The emphasis is on clay mineralogy and its influence on the slope stability. The samples were taken from the fault zone of the Huangtupo slope, and were analysed via the X-Ray diffraction test.

The safety factor of slopes can be calculated by the ratio between the resisting and driving forces. Usually the resisting force is strongly influenced by the clay minerals.strongly influence on the weathering and erosion.

During several very difficult tests, the results depicted that especially the clay minerals are primarily responsible for the mechanical properties of rocks, because of their specific characteristics such as swelling capacity, absorption of water and plasticity.

However, the results of the X-Ray diffraction test showed that the samples contained more than 90% Illit, a three layer swelling clay mineral, which has negative impact of the slope stability. The mechanical parameters obtained by laboratory tests. The of stability analysis and the technical documentation of the parameters are discussed in thesis of Christine Schönberger.

Die Diplomarbeit wurde von Anita Wollendorfer, Matrikelnummer: 9071438 und Christine Schönberger, Matrikelnummer: 0302569 gemeinsam bearbeitet. Aufgrund der Interessenschwerpunkte wurde die Arbeit in zwei Teile getrennt. Für die Vereinfachung der Beurteilung und aufgrund rechtlicher Erfordernisse mit der folgenden Tabelle die Aufteilung der Bearbeitung und Ausformulierung aufgelistet.

Kapitelnummer			Bearbeitet von		Ausformuliert von	
Anita	Christine	Kapitelbezeichnung	Anita	Christine	Anita	Christine
	•	Einlei	itung			
1	1	Einleitung	~		✓	
1.1	1.1	Gebietsbeschreibung	~	~		~
1.2	1.2	Drei Schluchten- Staudamm-Projekt	~	~		~
	·	Material une	d Method	ik		·
2.1	2.1	Grundlagen zur Massenbewegungen	~	~		~
	2.2	Aufnahmen im Feld	~	~		~
2.2 2.3 Grundlagen der Geotechnik		~	~	~		
2.3	2.4 Geotechnische Versuche		~	~	✓	
2.4		Grundlagen der Tonmineralogie	~	~	<ul> <li>✓</li> </ul>	
2.5		Untersuchungen des Gesamt- und Tonmineralbestands	~	~	~	
2.5		Berechnungen mit Modellen	~	~		~
	Fallbeispiel Huangtupo Rutschung bei Badong					
3.1	3.1	Einleitung	~	~	~	~
3.2	3.2	Geologie	~	~	~	~
3.3	3.3	Hydrologie	~	~	~	~
	3.4	Monitoringsysteme	~	~		~

	3.5	Evakuierungsplanung	~	✓	✓	
3.4	3.6	Erkundungsstollen und Probeentnahme	~	✓	~	
3.5	3.7	Durchgeführte Versuche	~	~	✓	~
		Ergeb	nisse			
	4.2	Aufnahmen im Feld 🗸 🗸			~	
4.1	4.2	Geotechnische Versuche	~	✓	~	✓
4.2		Gesamt- und Tonmineralanalyse	~	√	✓	
	4.3	Modellstudie 🗸 🗸			~	
Schlussfolgerung und Interpretation						
5	5	Interpretation	~		~	
5.1	5.1 5.1 Schlussfolgerung		~		~	
	•	Literaturve	erzeichnis	5		
6	6 6 Literaturverzeichnis		~		~	
	•	Anha	ang			
7.1	7.1	Aufnahmen im Feld	~	~		
	8.2	Messprotokolle Rahmenscherversuch				
7.2		Messergebnisse äußere Oberfläche der Tonminerale	~	✓	✓	
7.3		Messergebnisse Poreneigenschaften der Tonminerale	~	~	~	

Die Verfasserin <u>Anita Wollendorfer</u> erklärt hiermit, dass die vorliegende Arbeit und alle durchgeführten Versuche gemeinsam mit **Christine Schönberger** verfasst und ausgewertet wurden. Die Verfasserin <u>Christine Schönberger</u> erklärt hiermit, dass die vorliegende Arbeit und alle durchgeführten Versuche gemeinsam mit **Anita Wollendorfer** verfasst und ausgewertet wurden.

# Inhaltsverzeichnis

Da	anksag	ung	III
Vo	orwort .		IV
Κι	urzfass	ung	V
At	bildun	gsverzeichnis	V
Ei	nleitun	- g	1
1	Gebi	etsbeschreibung	3
	1.1.1 1.1.2 1.1.3 1.2 Da 1.2.1	Der Jangtse-Fluss Das Klima im Einzugsgebiet des Jangtse Geologische Beschreibung der Jangtse Region as Drei-Schluchten-Staudamm-Projekt	3 4 5 8 8
	1.2.2	Geschichtlicher Abriss	9
	1.2.3 1.2.4 1.2.5	Technische Bauwerksbeschreibung Vergleich mit anderen internationalen und nationalen Projekten Hochwassermanagement	
	1.2.6	Sedimentationsmanagement	
	1.2.7	Wasserquantität und Wasserqualität	
	1.2.9	Erdbeben	16
	1.2.10	Uferstabilität	
2	Mate	rial und Methodik	10
2	2.1 C	rundlagen zur Massenbewegungen	10
	2.1 0	Ursächliche und auslösende Faktoren	
	2.1.1	Probenentnahme für Laboruntersuchungen	
	2.1.3	Kornform	
	2.1.4	Kornfraktion und Korngröße	
	2.1.0		
	2.2 G		
	2.2.1	Laborversuche	
	2.3 G	rundlagen zur Tonmineralogie	40
	2.3.1 2.3.2 2.3.3 2.3.4 2.3.5	Definition und Entstehung Unterscheidung Tonfraktionen – Tonmineral Struktur der Tonminerale Spezielle Tonmineralogie Eigenschaften von Tonmineralen	40 40 41 47 49
	2.4 Ur	ntersuchungen des Gesamt und Tonmineralbestandes	53
	2.5 R	öntgendiffraktometrie "XRD"	53

	2.5.	2	Karbonatbestimmung nach Scheibler	57
3	Fa	llbe	ispiel Huangtupo-Rutschung bei Badong	59
	3.1	Ein	leitung	59
	3.2	Ge	ologie	64
	3.3	Hy	drologie	68
	3.4	Erk	undungsstollen und Probenentnahme	71
	3.5	Du	rchgeführte Versuche	74
4	Erę	geb	nisse	76
	4.1	Ge	otechnische Versuche	76
	4.1. 4.1.	1 2	Benennung und Beschreibung des Materials im Feld Geotechnische Versuche im Labor	
	4.2	Ge	samtmineral- und Tonmineralanalyse	89
	4.2.	1	Elektrische Leitfähigkeit	
	4.2.	2	Bestimmung des pH-Werts nach ÖNORM L 1083	
	4.2. 4.2.	3 4	Tonmineralanalyse	
	4.2.	5	Karbonatbestimmung nach Scheibler	100
5	Int	erp	retation und Schlussfolgerungen	101
6	Lite	erat	urverzeichnis	XV
7	An	har	ng	XXII
	7.1	Aut	nahmen im Feld	XXII
	7.2	Be	stimmung der äußeren Oberfläche	XV
	7.3	Be	stimmung der Poreneigenschaften	XVIII

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick der geographischen Lage des Jangtse (www.travelchinaguide.com)	3
Abbildung 2: Klimaklassifikation nach KÖPPEN und GEIGER (PEEL et al., 2007)	4
Abbildung 3: Entstehung des Jangtse (LIU et al., 2009)	5
Abbildung 4: Rutschungsaktivitäten in der Geschichte des Jangtse (LIU et al., 2009)	6
Abbildung 5: Geologische Karte von China (www.cgs.gov.cn)	7
Abbildung 6: Geologische Gefahrenkarte (www.zonu.com)	7
Abbildung 7: Das Jangtse-Einzugsgebiet mit eingezeichnetem Drei-Schluchten- Projekt (KING et al., 2004)	8
Abbildung 8: Lage der Drei-Schluchten und des Drei-Schluchten-Projekts (www.travelingislife.com)	9
Abbildung 9: Schematische Darstellung der geologischen Struktur des Drei- Schluchten-Gebiets (HE et al., 2008)	17
Abbildung 10: Hangbewegungen (ABRAMSON et al., 2002)	20
Abb. 11: unterschiedliche Rutschungsmöglichkeiten (VARNES, 1978)	21
Abb. 12: Schematische Darstellung der drei Zonen (VARNES, 1978)	22
Abb. 13: Definition der verschiedenen Rutschungscharakteristika (VARNES, 1978)	23
Abb. 14: Einfache, mehrfache und sukzessive Rutschungsmöglichkeit nach DIKAU et al. (1996)	24
Abb. 15: Vergleich der Bruchvorgänge in der Gleitfläche einer Böschung und in einer Bodenprobe im Labor (KEMPFERT, 2007)	27
Abb. 16: Geräte und Versuchsdurchführung des Ausrollversuchs	35
Abb. 17: Bildsamkeitsdiagramm (Plastizitätsdiagramm) nach Casagrande nach (PREGL, 1998)	36
Abb. 18: SiO₄ Komplex	41
Abb. 19: Tetraederschicht, verändert nach GRIM (1962)	41
Abb. 20: Oktaederschicht, verändert nach GRIM (1962)	42
Abb. 21: Oktaeder mit dichtesten Kugelpackung (HEIM, 1990)	42
Abb. 22: Zweischichttonmineral, verändert nach GRIM (1962)	43
Abb. 23: Dreischichttonmineral, verändert nach GRIM (1962)	44

Abb.	24:	Schema Entstehung von Dreischicht-Tonmineralen aus Glimmer, verändert nach SCHRÖDER (1992)	.45
Abb.	25:	Schema zur Beugungsgeometrie, verändert nach Wollendorfer, 2012	.53
Abb.	26:	XRD Gerät Abb. 27: XRD Gerät	.54
Abb.	28:	Probenvorbereitung für die XRD – Messung	.54
Abb.	29:	Probenvorbereitung der XRD Probe	.55
Abb.	30:	linkes Bild: Zentrifuge, rechtes Bild: UV-Bestrahlungsgerät	.56
Abb.	31:	linkes Bild: nach der Zentrifuge, rechtes Bild: Unterdruckmaschine für die Keramikplättchen	.57
Abb.	32:	linkes Bild: Scheibler Versuchsgeräte rechtes Bild: Aufbrausen der Bodenprobe durch Vermischung mit der HCI Lösung	.58
Abb.	33:	Lage von Badong und des Arbeitsgebiets (DENG et al., 2000)	.59
Abb.	34:	Rutschbereiche in Badong County (WU et al., 2009)	.60
Abb.	35:	Teilgebiete der Huangtupo-Rutschung, verändert nach WANG et al. (2009)	.61
Abb.	36:	Längsprofil 1, verändert nach WANG (2009)	.62
Abb.	37:	Längsprofil 2, verändert nach WANG (2000)	.63
Abb.	38:	graphische Darstellung der Badongformation (TANG, 2005)	.64
Abb.	39:	Schematische geologische Übersicht der Huangtupo Rutschung (China University of Geosciences, Wuhan)	.66
Abb.	40:	Korrelation zwischen dem Wasserstand des Jangtse und des Grundwasserspiegel (University of Geosciences, Wuhan)	.69
Abb.	41:	Erkundungsstollen: Ansicht von Osten nach Westen	.71
Abb.	42:	Gerüst für den Ortbeton (Bild links), Erkundungsfenster im Stollenulm (Bild rechts)	.72
Abb.	43:	Huangtupo Rutschung am südlichen Jangtse-Ufer mit skizziertem Stollenverlauf (1) ,und dem Untersuchungsstollen TP4 (2) (DENG et al., 2000; verändert nach LIENBACHER et al., 2012)	.72
Abb.	44:	Erkundungsstollen TP4, links: Tunnelabmessungen, rechts: Erkundungsfenster der Gleitzone	.73
Abb.	45:	schematische Darstellung – Untersuchungsstollen TP4	.73
Abb.	46:	Seitenwand des Probenentnahmestollens mit den korrelierenden RAL- Farben	.76
Abb.	47:	Korngrößenverteilung Probe rot	.79

Abb. 48: Korngrößenverteilung Probe weiß	79
Abb. 49: Summenkurve für die Darstellung der Korngrößenverteilung rot un weiß	d 80
Abb. 50: Konform nichtbindiger, gedrungener Körner (SCHULZE et al. 1967	')80
Abb. 51: Bilder der Kornformen – rotes Material	81
Abb. 52: Bilder der Kornformen – weißes Material	82
Abb. 53: Versuche zur Ermittlung der Fließgrenze	83
Abb. 54: Bestimmung der Bildsamkeit der roten Probe	85
Abb. 55: Bestimmung der Bildsamkeit der weißen Probe	85
Abb. 56: selbstgebauter Bodenprobenschüttler (BOKU-Wien)	90
Abb. 57: Diffraktogramm Gesamtmineralanalyse, Probe TP4AR	92
Abb. 58: Diffraktogramm Gesamtmineralanalyse, Probe TP4BW	92
Abb. 59: Gesamtmineralanalyse der Probe 12078 und 12079	94
Abb. 60: Diffraktogramm Gesamtmineralanalyse, Probe 12078	95
Abb. 61: Diffraktogramm Gesamtmineralanalyse, Probe 12079	96
Abb. 62: Diffraktogramm Tonmineralanalyse, Probe TP4AR-BH	97
Abb. 63: Diffraktogramm Tonmineralanalyse, Probe TP4BW-BH	97
Abb. 64: Diffraktogramm Tonmineralanalyse, Probe 12078	99
Abb. 65: Diffraktogramm Tonmineralanalyse, Probe 12079	100
Abb. 66: Aktivitätszahl IA von Röt-Tonsteinen, dargestellt als Beziehung zwischen Plastizitätszahl Ip und dem Tonanteil aus Sieb- und Schlämmanalyse (MEYER-KRAUL,1989)	102

# Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Überblick der längsten Flüsse der Welt (WIKIPEDIA I, 2012)	3
Tab. 2: Bauphasen und Baufortschritte mit der korrelierenden Anzahl an umgesiedelten Personen (PONSETI et al., 2006)	11
Tab. 3: Überblick der größten Wasserkraftwerke weltweit mit den höchsten Nennleistungen (Wikipedia II, 2012)	13
Tab. 4: Überblick der geplanten und in Bau befindenden Wasserkraftwerke in China (Wikipedia II, 2012)	14
Tab. 5: Überblick der Hochwasserereignisse und deren Folgen im Mittel und Unterlauf des Jangtse Einzugsgebiet (KING et al., 2000 und CTGPC, 2002-2012)	15
Tab. 6: Entwicklungsstadien von Rutschungen (IUGS, 1993)	23
Tab. 7: Aktivitätszstand von Rutschungen (IUGS, 1993)	23
Tab. 8: Arten von Rutschungen (IUGS, 1993)	24
Tab. 9: Geschwindigkeitsklassen von Rutschungen (IUGS, 1995)	24
Tab. 10: Übersichtliche Darstellung der unterschiedlichen Einteilungen der Faktoren (ABRAMSON, 2002)	26
Tab. 11: Geotechnischen Bezeichnungen und deren Beschreibung (PREGEL, 1998; ÖNORM EN ISO 14688-1:2002)	27
Tab. 12: Begriffe für die Bezeichnung der Kornform (ÖNORM EN ISO 14688-1:2002)	28
Tab. 13: Korngrößenfraktionen gemäß (ÖNORM EN ISO 14688-1:2002)	29
Tab. 14: Einteilung von Massenanteilen für Neben- und Hauptbestandteilen, (PREGEL, 1998)	30
Tab. 15: Definition der Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl (ÖNORM EN ISO 14688-2:2004)	30
Tab. 16: Beschreibung der Korngrößenverteilung und des Kurvenverlaufs mit korrelierender Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl (ÖNORM EN ISO 14688-2:2004)	30
Tab. 17: Unterscheidung der Siebe zwischen Österreich und China, verändert nach (ÖNORM EN ISO 14688-2:2004)	32
Tab. 18: Unterscheidung der Belegung der O-Schichten (HEIM, 1990)	43
Tab. 19: Strukturtypen von Tonmineralen, verändert nach HEIM (1990)	46
Tab. 20: Kaolinitgruppe verändert nach HALL (1987)	47
Tab. 21: Illitgruppe verändert nach MILLOT (1970)	47

Tab. 22: Smektitgruppe verändert nach MILLOT (1970) und HEIM (1990)	48
Tab. 23: Chloritgruppe verändert nach HALL (1987), MILLOT (1970) und HEIN (1990)	/I 49
Tab. 24: Eigenschaften und technische Bedeutung von Tonmineralen (Norm EN ISO 14688-1:2002)	52
Tab. 25: Überblick der Teilrutschungen der Huangtupo Rutschung (DENG et a 2000)	ıl., 60
Tab. 26: Übersicht der Badonggruppen, übersetzt nach QI et al. (2009) und WANG et al. (2009)	65
Tab. 27: Namen der Gesteine in Bezug auf deren CaCO <sub>3</sub> Gehalt nach CORRENS (1949)	67
Tab. 28: Namen der Gesteine in Bezug auf deren CaCO <sub>3</sub> Gehalt nach LU (200	04)68
Tab. 29: durchgeführte Versuche zur Benennung und Beschreibung des Materials im Feld	74
Tab. 30: durchgeführte geotechnische Laborversuche	74
Tab. 31: durchgeführte Tonmineralische Untersuchungen	75
Tab. 32: Auswertung der Trockensiebung für die rote und weiße Probe	77
Tab. 33: prozentuelle Auswertung der Schlämmanalyse für die rote und weiße Probe	78
Tab. 34: auf die Gesamtprobe bezogene Prozentangaben der Schlämmanalys	e78
Tab. 35: berechnete Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl für die rote und weiße Probe	ا 80
Tab. 36: berechnetes Größtkorn	80
Tab. 37: Zusammenfassung der Wassergehaltswerte und Kennzahlen der Zustandsgrenzen	84
Tab. 38: Ergebnisse der Feststoffdichte	86
Tab. 39: Ergebnisse der Trockendichte beider Proben	87
Tab. 40: Ergebnisse des Wassergehalts beider Proben	88
Tab. 41: Ergebnisse des Durchlässigkeit beider Proben	89
Tab. 42: Werte laut ÖNORM L 1099	90
Tab. 43: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen	90
Tab. 44: Ergebnisse der pH-Wert Bestimmung	91
Tab. 45: Zusammenhang der Auswertung der Diffraktogramme	91
Tab. 46: Zusammenfassung der Auswertung (China und Österreich) Tab.nforr	nat93

Tab. 47: Zusammenfassung der Auswertung der Diagramme	96
Tab. 48: Auswertung der Tonmineralanalyse für die Probe 12078-rot	98
Tab. 49: Auswertung der Tonmineralanalyse für die Probe 12079-weiß	99
Tab. 50: Ergebnisse des Kalzit Wertes in %	100
Tab. 51: Zusammenfassung der Scherparameter Huangzupo Rutschung, (WEN et al. (2007) Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China	103
Tab. 52: Gruppeneinteilung der Scherfestigkeit in 4 Gruppen nach DIN 18196 und LEUSSINK et al. (1964)	104
Tab. 53: Ergebnisse der Scherparameter, (Diplomarbeit von Christine Schönberger, 2012)	105
Tab. 54: Zusammenfassung der Scherparameter Huangzupo Rutschung, (WEN et al. (2007) Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China	105
Tabelle 55: Zusammenfassung der Scherfestigkeitsparamter	106
Tab. 56: Ergebnisse der Berechnung nach SKEPTON (1964)	107

### Einleitung

#### Forschungsaufgabe und Ziel der Arbeit

Die Forschungsaufgabe war die geotechnische und geologische Untersuchungen der Huangtupo Hangrutschung in Badong/China, mit besonderm Bezug auf die Tonmineralogie. Badong ist eine Kreisstadt in der Provinz Hubei und liegt ca. 100 km flussaufwärts des Drei-Schluchten-Staudamms am Jangtse Fluss.

Derzeit werden im Forschungsgebiet von der "University of Geosciences Wuhan, China" mehrere Diplom- und Doktorarbeiten durchgeführt. Die Verwitterung der Tonminerale spielt gerade im Einstaubereich des Drei-Schluchten-Projekts eine wichtige Rolle im Zusammenhang mit der Massenbewegung. Die Huangtupo-Rutschung ist derzeit die größte Hangbewegung in diesem Gebiet und liefert aufgrund ihrer Mächtigkeit alle Gegebenheiten für ein Forschungsareal.

### Gliederung der Diplomarbeit

Die vorliegende Forschungsarbeit gibt einen Überblick über das Forschungsgebiet in Badong und liefert einen Einblick auf das Drei-Schluchten-Projekt in Sandouping. Als Fallbeispiel dieser Arbeit wird die Huangtupo-Rutschung herangezogen. Die für die Versuchsauswertung notwendigen Grundlagen, wie die der Massenbewegung, Geotechnik, Geotechnischen Versuche, Grundlagen der Tonmineralogie und die Untersuchungen des Gesamt-und Tonmineralbestandes werden im Kapitel: Material und Methodik genau beschrieben. Des Weiteren wird auf die besonderen Eigenschaften der Tonminerale eingegangen und aufgrund der Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie Laboruntersuchungen sowie der auf die daraus resultierenden bodenmechanischen Eigenschaften geschlossen. Die Ergebnisse der Versuche und Untersuchungen in China werden im Anschluss dargestellt. Zuletzt folgt die Interpretation der Analyse und die Schlussfolgerung. Der Anhang beinhaltet die Messprotokolle sowie eine Fotodokumentation von den Aufnahmen im Feld und der Forschungsarbeit Arbeit vor Ort.

### Arbeitsmethoden

Um alle Untersuchungen im Labor der chinesischen Universität effektiv durchführen zu können wurde am Anfang des Aufenthaltes ein genauer Arbeitszeitplan mit Prof. Xiang und den chinesischen Kollegen erstellt. Die Forschungszeit über ca. 2 Wochen vor Ort in Badong, gefolgt von ca. 6 Wochen an der "University of Geoscience" in Wuhan, verlief dank vielseitiger Unterstützung mit großem Erfolg.

Die Literaturrecherche stellte sich anfangs als schwierig dar. Die meisten Informationen über das Gebiet sind derzeit nur in chinesischer Literatur vorhanden. Vieles konnte aufgrund der sprachlichen Schwierigkeiten nur mit mündlicher Übersetzungen auf Englisch und den Erklärungen der chinesischen Studenten erfolgen. In den Jahren davor wurden jedoch schon vereinzelnd Diplomarbeiten an deutschsprachigen Universitäten geschrieben die uns einen groben Einblick über das Themengebiet gaben.

Für alle durchgeführten Versuche wurden die Probenvorbereitungen, die Dokumentation, sowie die anschließende Auswertung und Interpretation der Ergebnisse aufgezeichnet. Zusätzliche Literaturrecherchen sowie Vergleiche mit ähnlichen Arbeiten an der Universität konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

# 1 Gebietsbeschreibung

### 1.1.1 Der Jangtse-Fluss

Der Jangtse Fluss hat eine Länge von etwa 6.380 km ist der längste Fluss in China und der drittlängste der Welt, siehe Tab. 1. Er entspringt dem Tibet-Plateau und verläuft in Richtung Osten bis zur Mündung in die chinesische Ostsee bei Shanghai, siehe Abbildung 1.

Nr.	Länge in km	Name	Quellgebiet	Mündung	Einzugs- gebiet in km²	Abfluss in m³/s
1	6.852	Nil mit Kagera-Nil	Ruanda- berge	Mittelmeer	3.254.853	2.660
2	6.448	Amazonas mit Ucayali und Apurimac	Anden	Atlantischer Ozean	6.112.000	209.000
3	6.380	Jangtse mit Tingtian He	Tibet	Ost- chinesisches Meer	1.722.155	31.900
4	6.051	Mississippi River und Missouri River mit Red Rock River	Rocky Mountains	Golf von Mexiko	2.981.076	16.4000

Tab. 1: Überblick der längsten Flüsse der Welt (WIKIPEDIA I, 2012)



Abbildung 1: Überblick der geographischen Lage des Jangtse (www.travelchinaguide.com)

Der Flusslauf des Jangtse kann nach PONSETI et al. (2006) und HARTMANN (2002) aufgrund seiner geomorphologischen Charakteristika in drei Abschnitte unterteilt werden:

- Der Oberlauf entspringt im Tibet Plateau und verläuft bis nach Yichang, ca.
   4.500 km, mit einem Einzugsgebiet von ca. 1.000.000 km<sup>2</sup>.
- 2) Der Mittellauf beginnt bei Yichang bis Hukou, ca. 950 km, mit einem Einzugsgebiet von ca. 680.000 km<sup>2</sup>.
- Der Unterlauf führt von Hukou bis zur Mündung in die chinesische Ostsee, ca. 940 km, mit einem Einzugsgebiet von ca. 120.000 km<sup>2</sup>.

### 1.1.2 Das Klima im Einzugsgebiet des Jangtse

Zur Beschreibung des Klimas wird die effektive Klimaklassifikation nach W.P. KÖPPEN und R. GEIGER, (PEEL et al., 2007) herangezogen (siehe Abbildung 2). Die Klassifikation geht auf die Jahre 1884 und 1936 zurück und orientierte sich an der potentiellen natürlichen Vegetation. Die natürliche Vegetation ist selten bis gar nicht mehr vorzufinden ist, meist durch menschliche Eingriffe verursacht, bringt aber die Schwierigkeit mit sich, dass inzwischen stattgefundene Änderungen des Mikroklimas großräumig nicht erfasst werden können, und daher in der Klassifikation nicht eingehen (SCHÖNWIESE, 2008).



Abbildung 2: Klimaklassifikation nach KÖPPEN und GEIGER (PEEL et al., 2007)

Nach der ursprünglichen Einteilung nach KÖPPEN und GEIGER gehört der Großteil des Mittel- und Unterlaufs des Jangtse zum Klimatyp  $C_{fa}^{*1}$ . Dies bedeutet ein warmgemäßigtes Regenklima mit deutlichen temperaturbestimmenden Jahreszeiten und Frösten, welche zwar nicht extrem ausfallen aber jedoch regelmäßig vorkommen. Die Monatsmitteltemperaturen der kältesten Monate liegen zwischen - 3°C< M<sub>min</sub> >+18°C. Der Niederschlag liegt bei 1.000 mm/Jahr und fällt meist als Regen an (HÄCKEL, 2005). Im Oberlauf des Jangtse lassen sich zwei Klimatypen unterscheiden. Zum einen findet man im östlichen Einzugsgebiet überwiegend den

Klimatyp  $C_{wa}^{*2}$ , welcher durch ein wintertrockenes Klima gekennzeichnet ist. In der wärmeren Jahreszeit ist der Niederschlag des regenreichsten Monats zehnmal so hoch wie der des regenärmsten Monats. Das westliche und höchstgelegenste Einzugsgebiet wird mit dem Klimatypen  $D_{wc}^{*3}$ , als boreales oder Schnee-Wald-Klima mit nur ein- bis dreimaligen Monatsmitteltemperaturen über 10°C, charakterisiert (HÄCKEL, 2005).

* <sup>1</sup> C <sub>fa</sub>	C = warmgemäßigtes Regenklima, f = immer feucht, a = Temperaturmonatsmittel des wärmsten Monats über 22°C
* <sup>2</sup> C <sub>wa</sub>	C= warmgemäßigtes Regenklima, w = winter trocken, a = Temperaturmonatsmittel des wärmsten Monats über 22°C
* <sup>3</sup> D <sub>wc</sub>	D = boreales-/ Schnee-Wald-Klima, w = winter trocken (transsibirisches Klima), c = Temperaturmonatsmittel nur ein bis dreimal über 10°C

#### 1.1.3 Geologische Beschreibung der Jangtse Region

Die Entstehung des Jangtse wird mit Hilfe der Abbildung 3 geologisch erörtert. Die Kreisstadt Fengji war vormals Einzugsgebietsgrenze des Flusses Chuanjing, Fließrichtung nach Westen Richtung Yibin und des Flusses Xianjiang, Fließrichtung in den Osten, Richtung Yichang. Zugleich befindet sich in Fengji auch die geologische Grenze zwischen den roten Juragesteinsschichten im Westen und den Triaskarbonatgesteinen im Osten (CHEN, 1993). Im Laufe der Geschichte (60x10<sup>4</sup>-10x10<sup>4</sup> Jahre v.Chr.) kam es zu einem gewaltigen Ereignis. Durch ein Erdbeben folgte ein Unterwasserfluss- / Karstkollaps. Durch das veränderte Gefälle kehrte der Chuanjiang River seine Flussrichtung um und mündete bei Fengj in den Xiajiang River. Von diesem Zeitpunkt sprach man zum ersten Mal vom Jangtse River.



Abbildung 3: Entstehung des Jangtse (LIU et al., 2009)

Durch dieses einschneidende Ereignis entstand auch eine sehr komplexe Geologie, welche sich besonders in den Regionen um Yunyang- Fengjie- Wushan- Badong bemerkbar macht. Hinzu kamen noch erwähnenswerte Bewegungen in der Erdkruste ab dem mittleren Pleistozän. Erkennbar an der unterschiedlichen Charakteristik der Terrassenformationen im Vergleich zu den Gebieten flussaufwärts, welche parallel verlaufen, sind die Terrassen von Fengji nach Wushan plötzlich ansteigend, ab Yichang wieder steil abfallend. Ebenfalls steigt das Wasserspiegelgefälle von 0,16-0,17 m in dem Bereich von Fengjii nach Wushan um ca. 0,4 m an. Des Weiteren befinden sich auf einer Länge von 200 km, von Fengji nach Yichang mehr als die Hälfte aller Gräben, Senken und Untiefen des Jangtse Flusses. Der Abbildung 4 ist zu entnehmen, dass es in der Geschichte vier erwähnenswerte Perioden von Rutschungsaktivitäten gab. Speziell die Aktivitäten um ca. 40 und 12x10<sup>4</sup> Jahre v.Chr. waren von großer Bedeutung (LIU et al., 2009).



Abbildung 4: Rutschungsaktivitäten in der Geschichte des Jangtse (LIU et al., 2009)

Abbildung 5 und Abbildung 6, geben einen Gesamtüberblick über die geologische Vielfalt der Republik und deren momentanen potentiellen Gefährdungen, welche zum einen durch Massenbewegungen wie Muren oder Rutschungen und zum anderen durch Tagverbrüche von Kohlenbauwerken oder generellen Oberflächenkollapsen bedingt sind. Des Weiteren werden erdbebengefährdete Gebiete und geologische Störungslinien ausgewiesen. Ebenso lassen sich fünf verschiedene Regionen unterscheiden, welche nach Grad der Gefährdung (von gelb nach rot) eingestuft wurden.



Abbildung 5: Geologische Karte von China (www.cgs.gov.cn)



Abbildung 6: Geologische Gefahrenkarte (www.zonu.com)

### 1.2 Das Drei-Schluchten-Staudamm-Projekt

### 1.2.1 Lagebeschreibung

Die Lage des Drei-Schluchten-Projekts in Sandouping mit den Koordinaten 29°16'-31°25'N und 106°50'-110°50'E. Für diesen Bereich beläuft sich das Einzugsgebiet des Jangtse Flusses auf ca. 100.000 km<sup>2</sup> das der Abbildung 7 zu entnehmen ist. Diese wurde, obwohl es einige kritische Stimmen über die Beschaffenheit komplizierte der Geologie, und deren verschiedensten Störungszonen gab, siehe Kapitel 1.1.3, gewählt und nachdem nach langen Untersuchungen und Messungen von Geologen als bautechnisch günstiges Granitgestein für die Gründung vorgefunden wurde (HE et al., 2008). Nur in diesem Bereich, bei Sandouping besteht das Flussbett über 20 km lang aus Granit während der restliche Abschnitt der Drei-Schluchten nur aus Kalken besteht, die weniger geeignet gewesen wären. Ebenfalls gehört dieses Gebiet zu den von Erdbeben wenig bedrohten Regionen, da laut uns bekannten Statistiken nur selten Beben mit einer Magnitude von vier auf der Richterskala vorkommen. Des Weiteren war eine kleine Insel in mitten des Flusses von Vorteil, die den Jangtse in einen 900 m und einen 300 m breiten Teil trennte (LI, 2005).



Abbildung 7: Das Jangtse-Einzugsgebiet mit eingezeichnetem Drei-Schluchten-Projekt (KING et al., 2004)

Die Abbildung 8 gibt einen detaillierten Überblick der Lage der drei Schluchten (Qutang, Wu, Xiling) und des Drei-Schluchten-Projekts. Des Weiteren sind die großen Städte Chongqin, Yichang und Wuhan sowie Badong markiert.



Abbildung 8: Lage der Drei-Schluchten und des Drei-Schluchten-Projekts (www.travelingislife.com)

### 1.2.2 Geschichtlicher Abriss

Es folgt ein geschichtlicher Abriss über die Planung und den Bau des Drei-Schluchten-Projekts nach LI (2005) und KING et al. (2004):

- 1919 Dr. Sun Yat-sen, Vorfahre der chinesischen demokratischen Revolution stellte einen Entwurf zur Erschließung der Wasserkraft der Drei-Schluchten vor.
- 1944 China beauftrage Wasserbauingenieure des US Bureau of Reclamation mit der Planung, die eine geeignete Stelle bei Sandouping nahe dem heutigen Standort vorschlugen. Diese Pläne verfielen jedoch 1947 wegen des chinesischen Bürgerkrieges.
- 1950 Gründung des Komitees für die Wasserwirtschaft des Jangtse in Wuhan.
- 1956 Mao Zedong, der Gründer der Volksrepublik China, schrieb bereits Gedichte über die Entwürfe des Drei-Schluchten-Projekts.
- 1958.04.25 Sitzung in Chengdu der KP China mit der Annahme des Vorschlags des Zentralkomitees der KP China über das "Drei-Schluchten-Schlüsselprojekt".
- 1960er Planung des Projekts mit Unterstützung der Sowjetunion mit fast 10.000 technischen Fachleuten und 200 Fakultäten bis zum Jahr 1960. Danach Grundlagenforschung seitens chinesischer Wissenschaftler für das Drei-Schluchten-Projekt. Zur Zeit der Kulturrevolution 1966 bis 1969 wurden die Forschungsarbeiten unterbrochen.
- 1970 Bau des kleineren Gezhouba-Staudamm bei Yichang, ca. 40 km flussabwärts des heutigen Drei-Schluchten-Projekts.

- 1992.04.03 Unter Ministerpräsident Li Peng hat der nationale Volkskongress mit einer Zweidrittelmehrheit den Beschluss zum Bau des Drei-Schluchten-Projekts genehmigt. Es bringe mehr Vorteile als Nachteile.
- 1994.11.08: War der Beginn der Bauarbeiten nach einem Drei-Phasen-Konzept. In der ersten Konstruktionsphase von 1994 – 1997 wurde der, in Fließrichtung rechten Seitenarm des Jangtse bis zu der kleinen Insel inmitten des Flusses mit einem provisorischen Damm geschlossen. Auf der linken Seite wurde eine temporäre Schiffsschleuse eingerichtet. Des Weiteren wurde ein Flussbett ausgebaggert, welches in der zweiten Bauphase, die von 1998 bis 2003 dauerte, für den Schiffsverkehr geöffnet wurde. Der Hauptstrom wurde durch zwei transversale Dämme gesperrt, um mit dem Bau des Kraftwerksgebäudes, der Grundablässe und dem Überlaufwehr zu beginnen. In der dritten Konstruktionsphase wurden die Schiffsschleuse und das Schiffshebewerk fertiggestellt und im Umleitungskanal das rechte Kraftwerk errichtet.
- 2003 Am 1.Juni wurden die Schleusentore des Drei-Schluchten-Projekt geschlossen. Der Wasserstand des Jangtse wurde bis zum 10.Juni von 66 m ü. M. auf 135 m ü. M. aufgestaut. Am 16. Juni wurde die fünfstufige Doppelschleuse für die Schifffahrt eröffnet. Am 24. Juni wurde erstmals Strom erzeugt und an das staatliche Stromnetz geliefert.
- 2009 Fertigstellung des Projekts mit einer Einstauhöhe von 175 m ü. M.

Tab. 2 zeigt die Bauphasen und Baufortschritte mit der korrelierenden Anzahl an umgesiedelten Personen.

Phase	Year	Construction stage	Water level* (m)
Preparatory Phase	1993		66
Phase I (1994-1997)	1994	Earthmoving starts; inauguration ceremony.	66
	1995	Concrete longitudinal cofferdam building starts; resettlement program is launched.	66
	1996	Xiling bridge, four-line highway from Yichang, and Yichang airport are into service; transverse cofferdams building starts.	66
	1997	Closure and diversion of the river; about 100,000 people have been resettled.	66
	1998	Temporary ship-lock is put into operation	66
	1999	Excavation of the double-lane ship-lock is finished; about 230,000 people have been resettled.	66
Dhace II	2000	About 295,000 people have been resettled.	66
(1998-2003)	2001	About 325,000 people have been resettled.	66
	2002	The diversion channel is closed; left bank concrete pouring completed, about 640,000 people resettled.	66
	2003	The reservoir is filled up to 135 m pool level; first trials with the double- lane ship-lock; the four first generators are connected to the grid.	135 (139)
Phase III (2004-2009)	2004	The double-lane ship-lock is put into operation, ten turbines are already connected to the grid.	139
	2005	Left bank powerhouse completed (14 turbines in operation); about 1,000,000 people have been resettled.	139
	2006	Concrete pouring on the right bank is finished; the reservoir is filled up to 156 m; about 1,200,000 people relocated.	156
	2007	The ship-lift building starts (expected); original plan to fill the reservoir up to 156 m.	156
	2008	The reservoir will be filled up to 175 m pool level (expected); 26 turbines fully operational (expected)	175
	2009	1997 target for completion of the whole project; ship-lift will put into operation (expected).	175
	2011	The underground power plant will be connected to the grid (expected).	175
	2013	Water level should be risen to 175 m according to the original plans.	175

\*Water level corresponds to the dam site, in Sandouping.

Tab.2:Bauphasen undBaufortschritte mit der korrelierenden Anzahl anumgesiedelten Personen (PONSETI et al., 2006)

### 1.2.3 Technische Bauwerksbeschreibung

Die Bauwerksbeschreibung erfolgt nach LI (2005). Die Gewichtsmauer hat eine Länge von 2.335 km. Die Basis beträgt 115 m und die Dammkrone weist eine breite von 40 m auf. Die Höhe inklusive "Fundament-gesteinshöhe" beträgt 185 m.

Das Wasserkraftwerk besteht aus 26 Francis-Turbinen mit einer Sollkapazität von je 700 MW, dies entspricht einer Gesamtleistung von 18.200 MW. Des Weiteren wurden sechs Aggregate ebenfalls mit je 700 MW installiert.

Mit diesen zusätzlich möglichen 4.200 MW kann eine Stromproduktion von über 100 GWh/Jahr erzielt werden, welche in die verschiedensten Regionen Chinas geleitet wird. Für den Schifftransport wurde eine fünfstufige Doppelschiffsschleuse und ein vertikales Schiffshebewerk eingeplant. Mit dem Schleusenbauwerk kann eine maximale Wasserstanddifferenz von 113 m zwischen dem maximalen Wasserstand von 175 m oberhalb des Staudamms und einem minimalen Wasserstand von 66 m unterhalb des Damms in 160 Minuten überwunden werden. Um den Staudamm rascher zu passieren steht das Schiffshebewerk zur Verfügung, welches ein 3.000 Tonnen schweres Fracht- oder Passagierschiff in 30 Minuten heben kann.

Für alle Bauwerke wurden ca. 103 Mio. m<sup>3</sup> Bodenmaterial mit unterschiedlichen Wechsellagerungen wie z.B.: Kalkstein, Mergel, kalkreichem Schieferton sowie Tonmergel ausgehoben. Um die 32 Mio. m<sup>3</sup> wurden danach wieder mit Bodenmaterial, ca. 28 Mio. m<sup>3</sup> mit Beton aufgefüllt. 463.000 t Bewehrungsstahl und weitere 256.500 t für Metallkonstruktionen für den Bau verwendet.

Die Speicherkapazität des Stausees mit einer Fläche von 1.084 km², mit einer durchschnittlichen Breite von 1,1 km und einer Länge von ca. 660 km, beträgt 39.3 Mrd. m<sup>3</sup>, wobei eine Speicherkapazität von 22,1 Mrd. m<sup>3</sup> für Hochwassersituationen vorgesehen ist. Dieses reduzierte Speichervolumen kann erreicht werden, wenn der Wasserstand von 175 m vor einem Hochwasser auf einen Stand von 145 m oder 135 m abgesenkt wird. Dabei werden drei Wasserstände, nach CTGPC (2000) unterschieden: der Normal Pool Level (NPL) mit 175 m ü. M., der Dry Season Control Level (DCL) mit 155 m ü. M. und der Flood Control Level (FCL) mit 145 m ü. M.Für den Hochwasserablauf sind 22 Überlauföffnungen und 23 Grundablassöffnungen mit je einer Größe von 7 x 9 m vorgesehen. Die größtmögliche Hochwasserablasskapazität liegt demnach bei 102.500 m³/s.

### 1.2.4 Vergleich mit anderen internationalen und nationalen Projekten

Im Vergleich mit den größten Wasserkraftwerken der Welt und den geplanten Bauvorhaben ist das Drei-Schluchten-Projekt mit einer Nennleistung von 18.200 MW noch immer führend. Tab. 3 gibt dazu einen Überblick der ersten zehn gelisteten Wasserkraftwerke, gereiht nach den höchsten Nennleistungen. Demnach gehört China neben Brasilien, Russland, Venezuela, Myanmar und den Vereinigten Staaten zu den führenden Nationen. Aber auch im Vergleich der zukünftigen Projekte hat China neben Argentinien, den Vereinigten Staaten, Russland, Nepal, Äthiopien, Pakistan, Iran, Vietnam, Kirgisistan, Myanmar, Tadschikistan, Taiwan und Brasilien einige geplant oder schon im Bau, siehe dazu Tab. 4.

Talsperre	Nennleistung in MW	Fertigstellung	Staat	Fluss
Drei Schluchten Projekt	18.200	2008	China	Jangtse
Itaipú	14.000	1983	In Brasilien, ■ Paraguay	Río Paraná
Xiluodu	12.600	in Bau	💴 China	Jinsha Jiang
Baihetan	12.000	geplant 2020	💴 China	Jinsha Jiang
Turuchansk	12.000 (20.000)	in Planung	Russland	Untere Tunguska
Belo Monte	11.000	in Planung	📀 Brasilien	Xingu
Guri (Simón Bolívar)	10.300	1986	📥 Venezuela	Río Caroní
Tucuruí	7.960	1984	오 Brasilien	Rio Tocantins
Tasang	7.110	in Bau	💶 Myanmar	Saluen
Grand Coulee	6.495	1941	usa 🗾	Columbia River

Tab. 3: Überblick der größten Wasserkraftwerke weltweit mit den höchsten Nennleistungen (Wikipedia II, 2012)

Talsperre Nennleistung in MW		Fertigstellung	Staat	Fluss
Baihetan	12.000	geplant 2020	💴 China	Jinsha Jiang
Nuozhadu	5.850	geplant 2017	💴 China	Mekong
Xiluodu	12.600	in Bau	💴 China	Jinsha Jiang
Xiangjiaba	6.000	in Bau	💴 China	Jinsha Jiang
Longtan	4.200	in Bau	💴 China	Hongshui He
Xiaowan	4.200	in Bau	💴 China	Mekong
Laxiwa	3.723	in Bau	💴 China	Huang He
Jinping	3.600	in Bau	📒 China	Yalong Jiang
Goupitan	3.000	in Bau	💴 China	Wujiang

Jinanqiao	2.400	in Bau	E China	Jinsha Jiang
Xiaolangdi	1.800	in Bau	💴 China	Huang He
Tianhuangping	1.800	in Bau	💴 China	Daxi
Gongbaixia	1.500	in Bau	📒 China	Huang He

Tab. 4: Überblick der geplanten und in Bau befindenden Wasserkraftwerke in China (Wikipedia II, 2012)

Ausschlaggebend den Bau des Drei-Schluchten-Projekts für waren die Verbesserung des Schiffsfahrtsweges zwischen Yichang und Chongqing. Weiter wurde die Erschließung der Wasserenergie des Jangtse genutzt. Die Strecke von 660 km innerhalb der Drei Schluchten charakterisierte sich bis zu diesem Zeitpunkt durch die reißenden Strömungen, 139 Stellen mit hohen Fließgeschwindigkeiten und Untiefen, 46 Orte mit nur einspurigen Schifffahrtswegen und einigen Orten, in deren die Nachtfahrt nicht erlaubt war, weil diese als schwer zu befahren galten. Durch die Errichtung der Staumauer konnten diese Nachteile beseitigt werden. Speziell die Nutzung der Wasserkraft war von Politikern und Experten mit dem Hintergrund "dem chinesischem Volk Wohlstand zu gereichen" verbunden. Als weiterer Vorteil wurde die große Speicherkapazität des Stausees angesehen um Hochwässer des Oberlaufes aufnehmen und besser kontrollieren zu können.

Die Länge des Stauseeufers, die Speicherkapazität, die Anzahl der Umsiedlungen, die ökologischen Veränderungen und die Instabilitäten der Uferhänge sind bisher allerdings mit keinem anderen Projekt vergleichbar (XIA et al., 2004/2005). In den folgenden Unterkapiteln wird daher auf einzelnen wichtigen Punkt kurz eingegangen.

### 1.2.5 Hochwassermanagement

Nach GEMMER (2004) wurden in den Jahren 950 bis 1999 im gesamten Jangtse Einzugsgebiet 332 Hochwässer und 302 Dürreperioden dokumentiert. Einige dieser Hochwässer des Mittel- und Unterlaufes des Jangtse sind in der Tab. 5 mit den Folgewirkungen, der Zahl der betroffenen Bewohnern in Millionen, der Zahl der Todesopfer, den beschädigten Häusern und dem wirtschaftlichen Verlust dargestellt. Extreme Ereignisse reichen von lokalen Sturzfluten über regionale Hochwässer an Vorflutern bis hin zu überregionale Hochwasserkatastrophen. Bei dem Hochwasser von 1931 wurde bei Yichang ein Abfluss von 64.400 m<sup>3</sup>/s gemessen und im Jahr 1954 ein Abfluss von 66.800 m<sup>3</sup>/s.

Nach WANG (2002) wurde schon vor 1000 Jahren mit Hochwasserschutzmaßnahmen in Form von Deichsystemen begonnen, die ab dem 15. Jhdt. systematisch ausgebaut wurden. Durch diesen Bau gingen Retentionsflächen verloren. Auch weitere flussbauliche Maßnahmen wie beispielsweise Begradigungen, Seeflächenreduzierungen und Drainagierungen von Speichersystemen, beispielsweise des Dongting Sees dienten zur Gewinnung von landwirtschaftliche Flächen. Aufgrund dieser Maßnahme ist jedoch das Hochwasserrisiko angestiegen (PONSETI et al., 2006 und WANG, 2002).

Nach PONSETI et al. (2006) können in Zukunft durch das Drei-Schluchten-Projekt auch 100-jährliche Hochwässer kontrolliert werden. Zumindest die Hochwasserwellen bei einigen Hochwasserereignissen, z.B. von 1931 und 1954, hätten durch die Hochwasserabläufe des Drei-Schluchten-Projekts gekappt werden können (WANG, 2002).

Jahr	Betroffene Fläche in km²	Anzahl der betroffene Personen in Mio.	Todes- opfer	Anzahl der zerstörten Häuser	Wirtschaftliche Verluste
1931	130.000	28,55	145.000	1.796.000	1.345 Billionen YinYuan
1935	89.000	10,00	142.000		0.355 Billionen YinYuan
1949	1.810.000	8,10	5.699		
1954	3.180.000	18,81	33.169	4.300.000	
1996		70,81	827	324.100	8.536,6 Mio. US\$
1998	2.390	2.316,00	1.526	6.850.000	20.000 Mio. US\$

Tab. 5: Überblick der Hochwasserereignisse und deren Folgen im Mittel und Unterlauf des Jangtse Einzugsgebiet (KING et al., 2000 und CTGPC, 2002-2012)

### 1.2.6 Sedimentationsmanagement

Die Grundablässe des Drei-Schluchten-Damms sind auch für die Ausspülung der abgelagerten Sedimente im Stausee wichtig. Der Jangtse ist ein geschiebeführender Fluss mit einer durchschnittlichen Sedimentationsrate von 1,2 kg/m<sup>3</sup> ist, und erreicht eine Sedimentationsmenge von bis zu 530 Mio. t (LI, 2005). Einen großen Beitrag zu dieser Geschiebemenge liefern Erosionseintragungen der Hänge, die durch Abholzungen von bewaldeten Gebieten im Einzugsgebiet sowie durch landwirtschaftliche Nutzungen an den Steilhängen des Jangtse verursacht werden wirtschaftliche (WANG, 2002). Dadurch würde die Leistung und die Speicherkapazität des Stausees vermindert werden, weshalb es zu jährlichen Ablässen vor den Hochwassermonaten auf einen Wasserstand von 145 m bzw. 135 m kommt. Die folgende Ableitung der gigantischen Wassermassen in den Monaten von Juni bis September soll ein Gleichgewicht zwischen Sedimentablagerungen und den Ausspülungen herstellen um das Fassungsvermögen des Stausees weitere Jahre beibehalten zu können (LI, 2005).

### 1.2.7 Umsiedelungsprojekte

Ein Kritikpunkt dieser riesigen Investition lag in den Umsiedelungsprojekten der Einwohner, die durch die Einstauung ihren Besiedelungsraum verloren. Betroffen davon waren zahlreiche Großstädte und Städte in 116 Bezirken. Des Weiteren mussten 1600 Unternehmen ihre Standorte verlassen. Tausende Arbeitsplätze gingen dadurch der Bevölkerung verloren.

Die Bevölkerungszahl in der tatsächlichen überfluteten Region beträgt ca. 846.200 wovon 360.000 einer landwirtschaftlichen Bevölkerung entsprechen (LI, 2005). Die Anzahl der umgesiedelten und neu angesiedelten Bewohner beläuft sich auf über eine Million (PONSETI et al., 2006). Die Fläche aller überfluteten Felder beträgt 2,1 hm<sup>2</sup>, Um eine "reibungslose" Durchführung des Projekts zu garantieren, wurden für die Betroffenen Entschädigungszahlungen festgesetzt. Die Finanzierung des Gesamtprojekts erfolgte einerseits von großen Banken, wie der US Export-Import Bank, der Weltbank oder der Asian Development Bank und anderseits von der China Development Bank, der China Construction Bank, aus den Steuergeldern sowie auch aus den Einnahmen der Stromerzeugung des Gezhouba Wasserkraftwerks (PONSETI et al., 2006). Ebenfalls in Kauf genommen wurden Verluste von Kulturgütern und Naturräumen.

### 1.2.8 Wasserquantität und Wasserqualität

Quantitativ betrachtet, kann mit dem Bau des Drei-Schluchten-Projekts stromaufwärts von Yichang der Mindestdurchfluss in trockenen Perioden von 3.000 m<sup>3</sup>/s auf 5.000 m<sup>3</sup>/s angehoben werden. Des Weiteren kann Wasser für Bewässerungen, für Industriewässer und für die Trinkwasserversorgung entnommen werden. Die Nachfrage nach Trinkwasser ist im Norden so hoch, dass ein eigenes geplantes Wassertransportprojekt ins Leben gerufen wurde (HARTMANN et al., 2003).

Aufgrund der Aufstauung der Wassermassen und der infolge bedingten geringerer Fließgeschwindigkeit des Flusses und der geringeren Durchlüftung wird sich die Wassergualität dennoch deutlich verschlechtern. Die zwei Kläranlagen in Chongping, die bereits mit einem budgetärem Aufwand von 375 Mill. US\$ gebaut wurden, haben eine Kapazität von 60%. Weitere 18 Kläranlagen mit einem budgetären Rahmen von 262 Mill. US\$ im Einzugsgebiet des Drei-Schluchten-Projekts, beispielsweise in bereits Wushan. sind geplant oder schon in Bau (FAN, 2006). Bis zu den Fertigstellungen dieser werden die Abwässer weiterhin ohne Behandlung direkt in den Jangtse geleitet.

### 1.2.9 Erdbeben

Das Drei-Schluchten-Projekt liegt in einer potentiellen Erdbebenregion. Nach FAN (2006) wurden einige Beben entlang der Jiuwanxi Störung, die nur 17 km stromaufwärts des Drei-Schluchten-Projekts verläuft, gemessen. Entlang der Zigui-

Badong Störung, die 80 km flussaufwärts verläuft aber als die aktivere gilt, kam es zu Beben der Magnituden fünf bis sechs auf der Richterskala. Im Jahre 2003 erreichte das Beben einen Wert von 3,4. Des Weiteren werden Bebenwellen gemessen, die durch Zusammenbrüche von Karsthöhlen oder früheren Bergbauen ausgelöst werden. Die Wellen sind weniger stark und verlaufen nahe der Erdoberfläche. Als Beispiele werden die Orte Badong, Guandukou, Mazongshan angeführt, in denen solche Bebenwellen im Dezember 2003 mit Magnituden von 1,8 und 2,5 gemessen wurden, und auch Risse an den Häusern verursacht haben. Nach CHEN et al. (1998) können allein durch die Aufstauung der gewaltigen Wassermassen Erdbeben ausgelöst werden (reservoir induced seismicity (RIS)).

### 1.2.10 Uferstabilität

Aus wirtschaftlicher Sicht gehen durch den Aufstau Ackerflächen verloren. Durch die Erschließungen neuer und steileren Hangflächen für den Anbau und durch neue Einschnitte von Straßen, kommt es in weiterer Folge zu immer häufigeren Erosionen und Hangrutschungen.

So kam es zu zwei großen Erdrutschen in Jipazi, bei der Kreisstadt Yunyan und in Xintan bei Zigui. Dies, obwohl die geologischen Untersuchungen und Messungen im Bereich des Drei-Schluchten-Projekt zu dem Schluss kamen, dass es keine Probleme mit Erosionen an den Stauseeufern geben soll. Die Lage von Zigui und die geologischen Gegebenheiten in der Umgebung können der Abbildung 9, mit 1: Quartär-System, 2: Kreide-System, 3: Jura-System, 4: Trias-Sinian System, 5: Presinian-System, 6: Granit, 7: Basalt, 8: Aktive Bewegung, 9: Bruch, entnommen werden.



Abbildung 9: Schematische Darstellung der geologischen Struktur des Drei-Schluchten-Gebiets (HE et al., 2008)

Aufgrund der Flusslandschaftsform und den unterschiedlichen Strukturen können die Erdrutsche räumlichen gut beschrieben werden. Bei nachfolgenden Untersuchungen der Stauseeufer konnten mehrere Erdrutsche bzw. Felsstürze mit Dimensionen von mehr als 1 Mio. m<sup>3</sup> festgestellt werden. Instabilitäten entlang des Jangtse können sich auf den Schiffsverkehr negativ, beispielsweise mit zeitlichen Unterbrechungen, auswirken. Massenbewegungen innerhalb des 26 km langen Abschnitts vor dem Staudamm können Staudammeinrichtungen gefährden (LI, 2005).

Das Risiko an Felsstürzen und Hangrutschungen entlang des Jangtse Ufers ist hoch. Nach HE et al. (2008) gab es insgesamt 1.736 Erdrutsche mit einem Gesamtvolumen von ca.  $1,339 \times 10^{11} m^3$ , wovon 428 ein Volumen von mehr als  $1,0 \times 10^5 m^3$  hatten. 94% dieser Massenbewegungen können auf die Einstauungen bzw. auf korrelierende Niederschlagsereignisse zurück geführt werden (ZHONG, 1998). Insgesamt 25 Hangrutschungen, mit einem Volumen von jeweils ca.  $1,0\times 10^8 m^3$ , werden derzeit von der chinesischen Regierung mittels eines Monitoringsystems überwacht (HE et al., 2008).

#### 1.2.11 Drohende Flutwelle

Nach FAN (2006) kam es am 13. Juli 2003 um 00:20 in der Ortschaft Qianjiangping zu einem Bergrutsch von 24 Mio. m<sup>3</sup>. Die Gesteinsmassen, die in den Nebenfluss des Jangtse - Qinggan-Fluss stürzten blockierten die gesamte Flussbreite von ca. 100 Metern und lösten eine 20 m hohe Welle aus. In wenigen Minuten wurden vier Fabriken, 300 Häuser und 67 ha Weideland zerstört. Es gab 14 Tote und weitere 10 Vermisste. Als Auslöser dieses Bergrutsches wurden einerseits die schweren Niederschläge der vergangenen Tage genannt andererseits konnte der Einfluss der Einstauung durch das Drei-Schluchten-Projekt nicht verneint werden. Der Wasserstand des Qinggan-Flusses wurde im Zuge der Aufstauung um mehr als 30 Meter angehoben. Eine alte Rutschfläche wurde dadurch wieder durchfeuchtet und somit instabil.

# 2 Material und Methodik

### 2.1 Grundlagen zur Massenbewegungen

Nach PREGL (1998) sind natürliche Böschungen und Hänge geneigte Geländeflächen, die durch endogene oder exogene geologische Prozesse entstanden sind.

Verlieren höher gelegene Gesteinsmassen aus den verschiedensten Gründen ihren Halt, beispielsweise aufgrund von Strömungskräften des Wassers, bewegen sich diese der Schwerkraft folgend zu tieferen Geländestellen. Nach dem Alter kann zwischen prähistorischen, historischen und rezenten Massenbewegungen unterschieden werden (PREGL, 1998).

Grundlegendes Wissen über Massenbewegungen und deren Mechanismen gehen auf VARNES (1978) zurück. Von ihm wurde die Basis für verschiedene Einteilungen, die noch bis heute angewendet werden, gelegt. Weiter kann nach HUTSCHINSON (1988 – in SELBY, 1993)die Klassifikation der Bewegungen in zwei Teile gegliedert werden. Zum einen eine morphologische Klassifikation die den Mechanismus, das Material und die Bewegungsrate miteinschließt zum anderen können acht zweitrangige Hauptbewegungsarten unterschieden werden.

Englisch	Deutsch
Rebound	Reaktion auf den Aushub, erodierte Täler
Сгеер	Kriechen
Sagging of Mountain Slopes	Sackungen von Berghängen
Landslides	Rutschungen
Debris Movements of Flow-Like Form	Murgänge
Topples	Felskippungen
Falls	Felsstürze, Bergstürze
Complex Slope Movements	Kombination aus mehreren Typen

Nach ABRAMSON et al. (2002) können in der Abbildung 10 die Hangbewegungen grafisch dargestellt und beschrieben werden. Sie unterscheiden sich in ihren kinematischen Eigenschaften.



Abbildung 10: Hangbewegungen (ABRAMSON et al., 2002)

Nach GENSKE (2006) stehen dabei folgende Mechanismen im Hintergrund: Fallen, Kriechen, Kippen, Knicken, Rotieren, Gleiten, Fließen. Im anschließenden Kapitel wird das Hauptaugenwerk auf die Rutschungen gelegt und die einzelnen Definitionen genauer erläutert.

Die Definition nach SKEMPTON und HUTCHINSON (1969) besagt: "Rutsche sind hangabwärtsgerichtete Bewegungen von Hangteilen, bestehend aus Fels- und/oder Lockergesteinsmasse oder aus Böden mäßig geneigten bis steilen Böschungen, die hauptsächlich als Ergebnis eines Scherbruches an der Grenze der bewegten Masse stattfinden.

Definition nach VEDER (1979): "Rutschungen, speziell Hangrutschungen, sind schwerkraftbedingte, manchmal durch die bodenverflüssigende Wirkung von Erdbeben hervorgerufene und sowohl nach abwärts als nach außen gerichtete Bewegungen von Bodenmassen."

Einleitend soll die Abb. 11 die unterschiedlichen Möglichkeiten der Ausbildungen von Rutschungen zeigen. :



Abb. 11: unterschiedliche Rutschungsmöglichkeiten (VARNES, 1978)

Die verschiedenen Bewegungen entstehen durch die unterschiedlichen lokalen Gegebenheiten und durch die ungleichmäßige Verteilung der wirkenden Kräfte, die die Rutschung auslösen.

Bevor es zu einer Rutschung kommt, zeigen sich meist Verformungen im Hangbereich des Materialkörpers, die durch zu hohe Spannungen von einwirkenden Lasten oder Porenwasserdrücken hervorgerufen werden. Können diese Spannungszustände im Material nicht mehr gehalten werden, wird die Scherfestigkeit
überschritten und die Masse löst sich entlang einer Gleitfläche, in der die Scherfestigkeit versagt hat.

Im klassischen Fall kommt es zu einem Böschungsbruch, bei dem die Einwirkungen (die Eigenlast des Gleitkörpers, Lasten auf dem Gleitkörper und Wasserdrucklasten) die Widerstände (Normal- und Tangentialkräfte, Scherkräfte) längs der ungünstigsten Gleitfläche übersteigen (SCHMIDT, 1996).

Vereinfacht kann eine Rutschung in die Abschnitte der Anrisszone, der Anbruchsfläche und der Ablagerungszone gegliedert werden (BUNZA et al., 1982). Die und Abb. 13 veranschaulichen diese.



Abb. 12: Schematische Darstellung der drei Zonen (VARNES, 1978)



1. Risse

2. Hauptanbruchsfläche

3. rotierte Rutschschollen

- 4. sekundäre Anbruchsflächen
- 5. Hauptrutschkörper

. . . . . . . . . . . . .

- 6. transverse Zugspalten
- 7. Ablagerungs-/Fußzone

Abb. 13: Definition der verschiedenen Rutschungscharakteristika (VARNES, 1978)

Des Weiteren kann der Entwicklungs- und Aktivitätsstatus eines Prozesses beurteilen werden, siehe Tab. 6 und Tab. 7.

Entwicklung
nach hinten schreitend
nach vorne schreitend
breiter werdend
Entwicklung beschränkt
größer werdend
kleiner werdend

Aktivitätszustand	
aktiv	
reaktiv	
zeitweilig ausgesetzt	
inaktiv	ruhend
	abgeschnitten
	stabilisiert
	Relikt

Tab. 6: Entwicklungsstadien von Rutschungen (IUGS, 1993)

Tab. 7: Aktivitätszstand von Rutschungen (IUGS, 1993)

Bezogen auf die Rutschungsaktivität und Entwicklung von Rutschungen werden nach GENSKE (2006) verschiedene Möglichkeiten an Rutschungen (Einzelrutschungen, sukzessive Rutschungen, Mehrfachrutschungen, zusammengesetzte Rutschungen oder komplexe Rutschungen) unterschieden. Die Tab. 8 und die Abb. 14 verdeutlichen diese Einteilung.

successive

slið surface



Tab. 8: Arten von Rutschungen (IUGS, 1993) Abb. 14: Einfache, mehrfache und sukzessive Rutschungsmöglichkeit nach DIKAU et al. (1996)

Bezüglich des zeitlichen Verlaufs von Massenbewegungen lassen sich diese in unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen einteilen, siehe Tab. 9.

Klasse	Geschwindigkeits- beschreibung	Geschwindigkeits- grenzen	[mm/s]
7	extrem schnell	ab 5 m/s	ab 5 x 10 <sup>3</sup>
6	sehr schnell	5 m/s – 3 m/min	5 x 10 <sup>-3</sup> - 50
5	schnell	3 m/min – 1,8 m/h	50 - 0,5
4	moderat	1,8 m/h – 13 m/Monat	0,5 - 5 x 10 <sup>-3</sup>
3	langsam	13 m/Monat – 1,6 m/Jahr	5 x 10 <sup>-3</sup> - 50 x 10 <sup>-6</sup>
2	sehr langsam	1,6 m/Jahr – 16 mm/Jahr	50 x 10 <sup>-6</sup> – 0,5 x 10 <sup>-6</sup>
1	extrem langsam	geringer als 16 mm/Jahr	< 0,5 x 10 <sup>-6</sup>

Tab. 9: Geschwindigkeitsklassen von Rutschungen (IUGS, 1995)

Nach BUNZA et al. (1982) ist die Geschwindigkeit einer Rutschung vor allem von der Morphologie und den Eigenschaften der Materialien, in denen die Scherfläche liegt, abhängig. Es können Geschwindigkeiten der Klassen vier–sieben, von moderat bis sehr schnell, vorkommen. Die Bewegungen laufen meist nicht kontinuierlich ab sondern kommen häufig in Schüben vor, welche ebenfalls zeitlich und örtlich stark variieren können. Häufig gibt es aber einen korrelierenden Zusammenhang mit Niederschlagsereignissen und Niederschlagsmengen.

## 2.1.1 Ursächliche und auslösende Faktoren

Des Weiteren soll ein kurzer Überblick über mögliche Faktoren gegeben werden, da die Kenntnis darüber, welche von diesen die Rutschung ausgelöst hat, in Bezug auf die Anforderungen der notwendigen Stabilisierungsmaßnahmen und zukünftigen technischen Baumaßnahmen wichtig ist.

Unterschieden wird zunächst zwischen ursächlichen und auslösenden Faktoren. Diese Unterteilung ist aber nicht immer eindeutig, da sie von Rutschung zu Rutschung verschieden sein kann. Oft ist erst eine Kombination von ursächlichen Faktoren und auslösenden Faktoren ausschlaggebend, manchmal kommen mehrere in Frage. Der Unterschied wird kurz erläutert.

1. Ursächliche Faktoren

Ursächliche Faktoren beziehen sich auf die Beschaffenheit der Grundverhältnisse, welche eine Rutschung verzögern oder beschleunigen können (SMOLTCYZK, 2001). ABRAMSON et al. (2002) nennt treibende Kräfte wie zum Beispiel das Gewicht und die Durchlässigkeit einer Böschung als ursächliche Faktoren.

2. Auslösende Faktoren

Ein auslösender Faktor grenzt sich von der Summe der Ursachen klar ab und steht in einem engen zeitlichen Bezug zum Ereignis (SMOLTCYZK, 2001), beispielsweise eine Explosion kurz vor der Rutschung.

Die nachstehende Gliederung von Faktoren erfolgt an Anlehnung an VEDER (1979) und dem Vorschlag der WP/WLI (1994). Ursächliche und auslösende Faktoren werden dabei gemeinsam unter verschiedenen Gruppen erwähnt.

#### Geo-/ Morphologische Auslöser

Dazu zählen exogene und endogene Kräfte so wie natürliche Änderungen der Natur. Beispielhaft zu erwähnen sind Erdbeben, Vulkane, Schneeschmelze, Flusserosion, Vegetationsbeseitigung durch Wind, Feuer, Erosion, Trockenheit usw.

#### Chemische und physikalische Auslöser

Dazu zählt der chemische und physikalische Alterungsprozess von Materialien, der mit der Verwitterung beginnt und fortwährend bis hin zu Um- und Abbau an Substanzen eine Änderung in der Struktur verursacht. Dies führt zu Unterschieden im Eigengewicht und der Scherfestigkeit. Diese Ursachen unterliegen sehr stark zeitlichen Vorgängen, beispielsweise der saisonalen Schwankungen von (Stark-) Niederschlagsereignisse und des Porenwasserdrucks.

#### Anthropogene Einflüsse nach (BUNZA et al., 1982)

Dazu zählen kurzzeitige oder lang andauernde, anthropogene Handlungen, welche die Hänge in ihrer Standsicherheit gefährden. Beispiele dafür sind die Übersteilung der Böschungsneigung, Einschneidungen, Erschütterungen durch Maschinen, Feuer

oder Explosionen. Der Bau schlechter Entwässerungsanlagen oder anderer technischer Eingriffe beeinflussen ebenfalls die Hangstabilität negativ.

ABRAMSON et al. (2002) sieht die Hauptgründe der auslösenden Faktoren in dem Versagen durch steigenden Scherstress und in der Abnahme der Scherfestigkeit. Die wichtigsten Faktoren werden in der Tabelle 7 nach Art und zusammengefasst.

Art Hauptgründe	Steigerung der Scherspannung	Abnahme der Scherfestigkeit
Geomorphologisch	Erosion, Erdbeben, Vulkanausbrüche,…	
Chemisch-/ Physikalisch	Druckerhöhung durch Sickerwasser oder Schneeschmelze Erhöhung des Eigengewichtes durch Regen	chemische / physikalische Ab- und Umbauprozesse Zunahme an Gas-/ Porenwasserdruck Strukturänderung Grundwasserzunahme Gasexplosion
Anthropogene	Erhöhung des Eigengewichtes durch Anschüttungen Errichtung von Gebäuden Einschnitte, Übersteilungen der Böschungen	Feuer Explosionen

Tab. 10: Übersichtliche Darstellung der unterschiedlichen Einteilungen der Faktoren (ABRAMSON, 2002)

#### 2.1.2 Probenentnahme für Laboruntersuchungen

Um weiterführende Untersuchungen im Labor, geotechnische Versuche, chemische Analysen und tonmineralische Untersuchungen durchführen zu können, müssen Gesteins-/Bodenproben entnommen werden. Diese dienen zum einen für die korrekte Benennung und Bezeichnung des Materials, zum anderen um bestimmte Eigenschaften des Untergrunds zu definieren. Um den Zusammenhang von denen im Feld entnommenen Bodenproben mit den durchgeführten geotechnischen Scherversuchen im Labor zu verdeutlichen, sind in der Abb. 15 auf der linken Seite die Beanspruchungen auf die Bodenelemente in der Gleitfläche zu erkennen und auf der rechten Seite die korrelierende Beanspruchung in Dreiaxialversuchen und Scherversuchen.



Abb. 15: Vergleich der Bruchvorgänge in der Gleitfläche einer Böschung und in einer Bodenprobe im Labor (KEMPFERT, 2007)

Des Weiteren werden Wasserproben entnommen, um nach chemischen Analysen Aufschluss über die Gesamtmineralzusammensetzung, den pH-Wert und die Leitfähigkeit des Untergrunds zu erlangen.

Mit Tonmineralanalysen können nicht nur die vorkommenden Tonminerale und deren Anteile am Material sondern auch die Poreneigenschaften (Größe und Verteilung) bzw. die innere- und äußere Oberfläche bestimmt werden. Nach RIEDMÜLLER (1972) kann auch das genaue Alter und die Lage der Gleitfläche in bindigen Böden ermittelt werden, da es im Bereich der aufgelockerten Gleitfläche durch Wassereintrag zu Mineralumwandlungen kommt, die in den Untersuchungen eindeutig interpretiert werden können.

Um den Untergrund geotechnisch ansprechen zu können, gibt es folgende Einteilung, siehe Tab. 11.

Einteilung /Bezeichnung	Beschreibung
geotechnische Bodenbezeichnung	Darunter wird die verbale Beschreibung eines Bodens hinsichtlich Bodenart und des Bodenzustandes aufgrund verschiedener Kriterien verstanden.
geotechnische Bodenklassifizierungen	Bei der geotechnischen Bodenklassifizierung wird der Boden in einzelne Klassen und Klassifizierungssysteme eingeteilt.
geotechnische Bodenkennwerte	Bodenkennwerte werden quantitativ durch Zahlenwerte angegeben.

Tab.11:GeotechnischenBezeichnungenundderenBeschreibung(PREGEL, 1998;ÖNORM EN ISO 14688-1:2002)

Es werden nun die wichtigsten geotechnischen Begriffe für die Bezeichnungen und Klassifizierungen von Materialien mit den häufigsten Kennwerten erläutert.

## 2.1.3 Kornform

Die Kornform wird visuell im Labor oder vor Ort bestimmt. Durch eine Analyse der Formen kann auch auf die Entstehung des Bodens rückgeschlossen werden. Die Tab. 12 gibt einen Überblick der verschiedenen Möglichkeiten.

Kornform		
Rundung	scharfkantig	
	kantig	
	kantengerundet	
	angerundet	
	gerundet	
	gut gerundet	
Form	kubisch	
	flach (plattig)	
	länglich (stängelig)	
Oberflächenstruktur	rau	
	glatt	

Tab. 12: Begriffe für die Bezeichnung der Kornform (ÖNORM EN ISO 14688-1:2002)

#### 2.1.4 Kornfraktion und Korngröße

Nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2002 wird die Korngröße als die Grundlage für die Benennung mineralischer Böden nach Kornfraktionen herangezogen.

Die Korngröße ist bei der Siebanalyse durch die Maschenweite der Siebe definiert. Im speziellen Fall dieser Diplomarbeit muss darauf hin gewiesen werden, dass die Maschenweite der Siebe in China anders genormt ist (siehe Kapitel 2.2.2). Bei der Schlämmanalyse wird für die Bestimmung der Korngröße der äquivalente Kugeldurchmesser herangezogen.

In der Tab. 13 sind die einzelnen Bereiche der Kornfraktionen, deren Untergruppen und deren genauen Benennung und symbolische Kurzbezeichnung mit den dazugehörigen Korngrößenbereich beschrieben.

Develop	Demonstration	Kurzzeichei	Korngröße	
Bereich	вепеппипд	neu / Englisch	alt	[mm]
sehr	großer Block	LBo	Y	>630
grobkörniger	Blöcke	Во	~	>200 - 630
Boden	Steine	Со		>63 - 200
	Kies	Gr	G	>2,0 - 63
	Grobkies	CGr	gG	>20 - 63
	Mittelkies	MGr	mG	>6,3 - 20
grobkörnige Böden	Feinkies	FGr	fG	>2,0 - 6,3
	Sand	Sa	S	>0,063-2,0
	Grobsand	CSa	gS	>0,63-2,0
	Mittelsand	MSa	mS	>0,2-0,63
	Feinsand	FSa	fS	>0,063-0,2
	Schluff	Si	U	>0,002-0,063
feinkörniger Boden	Grobschluff	CSi	gU	>0,02-0,063
	Mittelschluff	MSi	mU	>0,0063-0,02
	Feinschluff	FSi	fU	>0,002-0,0063
	Ton	CI	Т	< 0,002

Tab	13. Korngrößenfraktionen	gemäß	(ÖNORM	EN ISO	14688-1.2002)
rap.	13. Noringroßenmaktionen	gemais			14000-1.2002)

#### 2.1.5 Korngrößenverteilung und deren Kennwerte

Die Korngrößenverteilung wird mittels einer Summenkurve dargestellt, wobei auf der Abszisse die Korngröße (d) logarithmisch und auf der Ordinate der Durchgang (D) linear angegeben wird. Die Verteilung dient der Benennung und Klassifizierung der Böden sowie der empirischen Beziehungen zwischen Bodenklassen und bestimmten bodenmechanischen Kennwerten. Die Kornverteilung des Bodens bezieht sich immer auf die anorganischen und die zersetzten organischen Bestandteile. Die einzelnen Massenanteile beziehen sich auf die Gesamttrockenmasse und sind ein wesentliches Charakterisierungsmerkmal zur Bestimmung der Bodeneigenschaften. Für eine einheitliche Angabe der Massenanteile wird der Boden in Hauptbestandteile und Nebenbestandteile eingeteilt, siehe Tab. 14 (PREGEL, 1998; ADAM, 2009).

Kategorien	Massenanteile [%]	Symbole
Hauptbestandteile	≥ 40	Y, X, G, S, U, T
Nebenbestandteil		
stark	30 – 40	y, x, g, s, u, t
mittel	15 - 30	<u></u> y, x, g, s, u, t
schwach	5 - 15	y', x', g', s', u', t'

Tab. 14: Einteilung von Massenanteilen für Neben- und Hauptbestandteilen, (PREGEL, 1998)

Die Korngrößenverteilung wird über die Ungleichförmigkeitszahl und die Krümmungszahl bestimmt. Die Ungleichförmigkeit im Korngrößenverteilungsdiagramm ist ein Maß für die Kurvensteigung im Bereich von  $d_{10}$  bis  $d_{60}$ . Die Krümmungszahl gibt die Krümmung und den Verlauf in der Kurve in diesem Bereich an. Die Angaben  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  und  $d_{60}$  sind diejenigen Korngrößen, die in den Ordinaten 10%, 30% bzw. 60% des Massenanteils der Körnungslinie entsprechen. In der Tab. 15 werden die Beziehungen der Formeln untereinander verdeutlicht.

Konnahl	Bezeichnung		Formal	
Kennzani	neu alt		Former	
Ungleichförmigkeitszahl	Cu	U	d <sub>60</sub> / d <sub>10</sub>	
Krümmungszahl	C <sub>c</sub>	C <sub>c</sub>	(d <sub>30</sub> )²/ (d <sub>10</sub> * d <sub>60</sub> )	

Tab. 15: Definition der Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl (ÖNORM EN ISO 14688-2:2004)

Nach ÖNORM B4810:2006 und RVS 8S.05.11:1997 wir das rechnerische Größtkorn GK wie folgt angegeben: GK in mm = d85x√2Die Tab. 16 gibt einen Überblick des Zusammenhangs der Korngrößenverteilung mit der Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl.

Korngrößenverteilung	Kurvenverlauf	Kennzahlen
enggestuft	steil verlaufend	$C_u$ < 6 und $C_c$ < 1
gut gestuft	mäßig steil verlaufend	$6 < C_u < 15 \text{ und } C_c < 1$
weitgestuft	flach verlaufend	$C_u > 15$ und $1 < C_c < 3$
intermittierend gestuft	treppenförmig verlaufend, Fehlkorn	i.A. C <sub>u</sub> groß und C <sub>c</sub> = beliebig

Tab. 16: Beschreibung der Korngrößenverteilung und des Kurvenverlaufs mit korrelierender Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl (ÖNORM EN ISO 14688-2:2004)

# 2.2 Geotechnische Versuche

Die geotechnischen Versuche werden wie folgt den Feldversuchen und Laborversuchen zugeteilt.

#### 2.2.1 Feldversuche

#### Bestimmung der Farbe

Für die Bestimmung der Farbe wird zwischen Helligkeit und Intensität unterschieden. In der Bodenkunde ist die Bodenfarbe ein sehr wichtiges Klassifizierungsmerkmal, bei der oftmals schon beim ersten Eindruck auf die Art des Bodens geschlossen werden kann. Für die Beurteilung und die einzelnen Farbunterschiede muss eine frische Bruchfläche der Probe verwendet werden. Um eine genaue Kennzeichnung der Farbe bestimmen zu können, werden in der Geotechnik die Farbtafel RAL-F2 verwendet. Herausgeber der Farbtafeln ist das Deutsche Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., Bonn, früher auch bekannt als <u>R</u>eichs-<u>A</u>usschuss für <u>L</u>ieferbedingungen.

#### Trockenfestigkeitsversuch

Aus dem Trockenfestigkeitsversuch ergeben sich nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2002 Hinweise auf die Plastizität des Bodens. Je nach Verhalten können auf Tonbzw. Schluffanteile geschlossen werden. Die zu untersuchende Bodenprobe wird zuerst getrocknet und danach zwischen den Fingern zerdrückt. Der Widerstand gegen zerbröckeln und pulverisieren gibt einen Hinweis auf die Trockenfestigkeit des Bodens, welche von der Art und der Menge des Feinkornanteils abhängig ist.

Es lassen sich dabei nachstehende Festigkeiten unterscheiden:

- geringe Trockenfestigkeit: der getrocknete Boden zerfällt bei leichtem bis mäßigem Fingerdruck;
- mittlereTrockenfestigkeit: die getrocknete Probe zerbricht erst bei erheblichem Fingerdruck und es verbleiben noch zusammenhängende Bruchstücke;
- **hohe Trockenfestigkeit:** die getrocknete Probe kann nicht mehr durch Fingerdruck zerstört werden; sie lässt sich lediglich zerbrechen.

#### Plastizitätsversuch

Für den Plastizitätsversuch, auch Knetversuch genannt, wird nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2002 auf einer glatten Oberfläche eine feuchte Bodenprobe zu Walzen von etwa 3 mm Durchmesser ausgerollt. Aus diesen formt man einen Klumpen, die erneut ausgerollt werden. Dieser Vorgang wird sooft wiederholt, bis die Probe aufgrund des Wasserverlustes nicht mehr ausgerollt, sondern höchstens noch geknetet werden kann, da die Ausrollgrenze erreicht ist.

Es lassen sich dabei nachstehende Plastizitäten unterscheiden:

- **geringe Plastizität**: eine bindige Bodenprobe kann nicht zu Walzen von 3 mm Durchmesser ausgerollt werden;
- **ausgeprägte Plastizität**: die Bodenprobe lässt sich zu dünnen Walzen ausrollen.

#### 2.2.2 Laborversuche

#### Bestimmung des Kalkgehalts nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2002

Durch die Reaktion der mit verdünnter Salzsäure (Wasser zu Salzsäure im Verhältnis 3:1) betropfen. Durch diesen Vorgang kann der Kalkgehalt im Boden bestimmt werden werden.

Es lassen sich dabei nachstehende Kalkgehalte unterscheiden:

- **kalkfrei** (O): kein Aufbrausen;
- **kalkhaltig** (+): schwaches bis deutliches, aber nicht anhaltendes Aufbrausen;
- **stark kalkhaltig** (++): starkes, langandauerndes Aufbrausen.

Hierbei ist zu beachten, dass bei nassen und feuchten tonigen Böden das Aufbrausen meist etwas verzögert auftritt. Es muss ebenfalls darauf geachtet werden, dass durch chemisch verunreinigte Böden bei Verwendung von HCl giftige Gase entstehen können.

#### Bestimmung der Siebanalyse nach ÖNORM B4412

Die Siebanalyse wird im Labor mit einem Korndurchmesser kleiner gleich 100 mm durchgeführt. Der Anteil an Material, welcher größer als 100 mm ist, sollte vor Ort abgeschätzt werden. Der Versuch kann mit einer Trocken- oder Nasssiebung durchgeführt werden, wobei sich bei hohem Tonanteil eine Nasssiebung empfiehlt. Mittels Maschen- oder Quadratlochsiebe können die jeweiligen Rückstände bzw. Durchgänge ermittelt werden. Die Tab. 17 zeigt den Unterschied zwischen österreichischem und chinesischem Standard. Die Versuche werden aber in beiden Ländern gleich durchgeführt.

Art der Siebung	Quadrat- / Maschenlochsiebe in Österreich (ÖNORM B4412)	Kreislochsiebe in China
Grobsiebung	> 8 mm	> 10 mm
Mittelsiebung	4 - 0,4mm	5 - 0,5 mm
Feinsiebung	0,2mm - 0,063mm	0,25 - 0,074mm

Tab. 17: Unterscheidung der Siebe zwischen Österreich und China, verändert nach (ÖNORM EN ISO 14688-2:2004)

Die erforderliche Probenmenge kann aufgrund der Korngröße und deren Verteilung abgeschätzt werden. Eine Faustregel laut PREGL (1998) besagt, dass für die Grobund Mittelsiebung eine Masse ( $m_s$ ) von ca. 200 x dem maximalen Korndurchmesser (d in mm) angenommen werden kann. Bei der Feinsiebung sollte die Masse 50 g nicht unterschreiten. Nach der Durchführung des

# Schlämmanalyse nach ÖNORM B4412 (1974)

Die Schlämmanalyse erfolgte mittels dem Absetzverfahrens. Dieser Versuch benötigt ein Material mit einer Korngröße zwischen 0,001 mm und 0,1 mm. Die Probe wird mittels einer Suspension aufgerührt, die die Feinanteile von den gröberen Anteilen trennt. Die Absetzung der Partikel erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Dichten in verschiedene Zeitabstände. Im Anschluss können über die Absenkgeschwindigkeit die Anteile der verschiedenen Korngrößendurchmesser mittels dem "STOKE'schen Gesetz" berechnet werden, siehe nachstehende Formel

$$v = \frac{d^2 \times (s - 1) \times g}{md18 \times s}$$

 $v = Fallgeschwindigkeit [ <math>cm \times s^{-1}$  ]

*d* = äquivalenter Korndurchmesser [*cm*]

 $s = mittlere Feststoffdichte [g \times cm^{-3}]$ 

<sup>1</sup> = Dichte der Dispergierungsflüssigkeit (ohne Feststoff) wird konstant mit 1,00 [ $g \times cm^{-3}$ ] angenommen

 $g = \text{Fallbeschleunigung} [cm \times s^{-2}]$ 

= Dynamische Viskosität [ $g \times s^{-1} \times cm^{-1}$ ]der Suspension, abhängig von der Temperatur

# Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen

Nach PREGL, (1998) verändert sich ein bindiger Boden je nach Wassergehalt. in verschiedenen Zustandsformen. Nimmt der Wassergehalt durch Konsolidation infolge Belastung oder Austrocknung ab, so durchläuft der Boden folgende Zustände:

- Flüssiger Zustand: Aufgrund geringem Zusammenhalt neigt der Boden zum fließen und ausbilden einer waagrechten Oberfläche.
- **Bildsamer Zustand:** Der Boden weist eine gegenüber dem flüssigen Zustand größere Kohäsion auf. Er wird größeren Verformungen unterworfen zerbricht aber nicht in Einzelteile. Der Vorgang wird als plastisches Fließen, plastischer

Bruch bezeichnet. Die Bildsamkeit entsteht wird durch den Ab- und Aufbau von Bindungskräften im Adsorptionswasser.

- Halbfester Zustand: Der Boden zerbricht durch Verformungen in mehrere Teile. Durch die Volumsveränderung wird hauptsächlich Adsorptionswasser abgegeben. Im flüssigen, bildsamen und halbfesten Zustand ist der Boden wassergesättigt.
- **Fester Zustand:** Der Boden bricht scherbenartig aufgrund von Verformung. Bei abnehmendem Wassergehalt bleibt das Volumen konstant wodurch der Boden nur noch teilweise wassergesättigt ist.

Nach ATTERBERG (1905) können die unterschiedlichen Konsistenzgrenzen durch Verformungswiderstände anhand von Fließgrenzen-, Ausrollgrenzen- und Schrumpfgrenzenversuch festgelegt werden.

Aufgrund dieser Versuche können die Fließgrenze  $w_L$ , die Ausrollgrenze  $w_P$  und die Schrumpfgrenze  $w_S$  ermittelt werden. Die Fließgrenze beschreibt den Übergang vom flüssigen zum bildsamen Bereich, die Ausrollgrenze beschreibt den Übergang vom bildsamen zum halbfesten Bereich und die Schrumpfgrenze liegt im Bereich vom halbfesten in den festen Zustand.

Für die Bestimmung der Fließgrenze muss das Material getrocknet und anschließend in einem "Mörser" zerkleinert werden. Die Gesamte Probe wird gesiebt und das Material < 2,0 mm für den Versuch herangezogen. Für den Versuch nach Atterberg sollte eine Probenmenge von 100-200 g aufbereitet und mit destilliertem Wasser angesetzt werden. Es muss darauf geachtet werden, dass das Material nicht zu flüssig wird, da sonst der Wassergehalt der Probe über der Fließgrenze liegt. Weiter sollte die Probe in einem Vakuumverschlossenen Gefäß ca. 24 Stunden aufbewahrt werden bis mit dem Versuch begonnen werden kann.

Nach der Wartezeit kann mit der Durchführung der Atterberg'schen Grenzen begonnen werden. Die Probe wird mit einer kleinen Spachtel durchgerührt und anschließend in das Gerät eingebaut. Das Material sollte ca. bis 2/3 auf der Schalenfläche verteilt und 1,5-2 cm hoch sein.

Anschließend wird mit dem Furchenspartel in der Mitte des Versuchsgerätes eine Furche gezogen. Die Vorbereitungen der Probe gelten für alle Versuche. Durch die an dem Gerät angebrachte Kurbel wird mit ca. zwei Umdrehungen in der Sekunde die Schale in die Höhe gehoben und wieder auf die Platte fallen gelassen bis sich auf einer Länge von 10 mm die Furche schließt. Wichtig ist dabei die Anzahl der Umdrehungen (Schlaganzahl) genau zu zählen. Es soll darauf geachtet werden, dass das Versuchsgerät auf einer rutschfesten Platte steht oder bei der Durchführung festgehalten wird. Von dieser Stelle wird eine Probe von ca. 5-10 g genommen und in eine beschriftete und abgewogene Schale gestrichen. Anschließend wird der Behälter noch mal gewogen und in einer Tabelle notiert. Der Versuch wird insgesamt drei Mal nach jeweiliger Zugabe von destilliertem Wasser durchgeführt. Somit bekommt man anschließend drei Ergebnisse mit unterschiedlichen Wassergehalten. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Schlagzahl zwischen 15 und 40 liegt. Bei Auftreten eines höheren oder niedrigeren Werts muss dieser aus der Versuchsreihe herausgenommen werden. Nach Beendung der Versuche müssen die Behälter mit der feuchten Masse bei 105°C 24 Stunden im Trockenofen getrocknet werden.

Für die Bestimmung der Ausrollgrenze, siehe Abb. 16, muss das angetrocknete Material in einer Schale solange bearbeitet werden, bis die richtige Materialfestigkeit erreicht wird. Mit einem Teil des Materials wird auf einer aufsaugenden Unterlage eine ca. 3-5 mm dicke Walze ausgerollt. Der Vorgang wird so oft wiederholt bis die Probe zerbröckelt. Anschließend wird das Material in einer kleinen Schale für die Bestimmung des Wassergehaltes in den Trockenofen gestellt.



Abb. 16: Geräte und Versuchsdurchführung des Ausrollversuchs

#### Bildsamkeitszahl IP

Genauere Aussagen über die Plastizitätseigenschaften können mittels der Bildsamkeitszahl (Plastizitätszahl I<sub>P</sub>) getroffen werden. Sie wird als Differenz zwischen dem Wassergehalt der Fließgrenze und dem der Ausrollgrenze definiert (PREGL, 1998):

$$I_P = W_L - W_P$$

Mit ansteigender Fließgrenze und mit abnehmender Korngröße nimmt die Bildsamkeitszahl zu. Die Unterteilung in Ton und Schluff erfolgt aufgrund des Bildsamkeitsdiagrammes von Casagrande siehe

Abb. 17.



Abb. 17: Bildsamkeitsdiagramm (Plastizitätsdiagramm) nach Casagrande nach (PREGL, 1998)

Die in dem Diagramm dargestellten Berechnungsformeln für die Bildsamkeit  $I_p$  wurden für die Ermittlung der Ergebnisse in Kapitel 4.1 verwendet.

#### Aktivitätszahl I<sub>A</sub>

Die Aktivitätszahl ( $I_A$ ) bezieht sich auf die ermittelte Fließgrenze. Da nicht nur aktive Tonminerale im Probenmaterial enthalten sind werden mit der Aktivitätszahl die inaktiven Mineralien angegeben. Sie kann mit folgender Formel berechnet werden:

Berechnungsformel:

 $I_A = \frac{I_p}{D0,002 mm}$ 

*I<sub>P</sub>*= Bildsamkeitszahl

I<sub>A</sub>= Aktivitätszahl

D =Durchmesser des Kornes

Im speziellen Fall der Tonminerale wird eine Zuordnung im Bezug der Aktivitätszahl laut PREGL (1998) folgender maßen definiert. Bei Kaolinit ist diese <0,75, bei Illit  $\geq$ 0,75 und bei Montmorillonit  $\geq$  1,25. Die Einteilung ist nur als Richtwert gedacht, kann daher keines Falls eine röngtendiffraktometrische Analyse ersetzen.

#### Bestimmung der Feststoffdichte nach ÖNORM ISO/TS 17892-2:2004

Die Feststoffdichte wird mit einem Pyknometer durchgeführt. Die Anwendung ist auf die Größe des Pyknometerhalses beschränkt (Kapillar- und Flaschenpyknometer). Das leere trockene Pyknometer muss vor dem Versuchsbeginn inklusive Glasstoppel gewogen werden. Das Gefäß wird bis zu etwa einem Drittel mit luftgetrockneten Feinboden gefüllt und nochmal mit Verschluss gewogen. Weiter wird destilliertes Wasser zugegeben und die eingeschlossene Luft im Vakuumexsikkator entfernt. Nach dem Vorgang wird das Pyknometer wiederum mit destilliertem Wasser aufgefüllt.

Die Wassertemperatur muss im Pyknomter auf 0,1°C genau festgestellt und dokumentiert werden. Anschließend wird mittels der unten dargestellten Formel die Masse und in weitererfolge die Feststoffdichte bestimmt.

Berechnungsformel:

$$s = \frac{m_s}{V_s}$$

 $m_s$ = Feststoffmasse der Bodenprobe [g]

 $V_s$  = Feststoffvolumen der Bodenprobe [cm<sup>3</sup>]

[= Feststoffdichte der Bodenprobe [g×cm⁻³]

#### Bestimmung der Trockendichte nach ÖNORM ISO/TS 17892-2:2004

Für die Bestimmung der Trockendichte wird das Volumen der Gesamtprobe herangezogen. Dafür kann mittels einem Stechzylinder eine Probe direkt vom Untersuchungsort genommen und anschließend in einem Ofen getrocknet werden. Für die Berechnung wird die getrocknete Feststoffmasse in g durch das Gesamtvolumen der Bodenprobe bzw. des Stechzylinders dividiert. Die Einheit der Trockendichte  $\rho_d$  wird in g×cm<sup>3</sup> angegeben.

#### **Bestimmung des Wassergehalts**

Der Wassergehalt wird als Verhältnis der Masse des im Boden vorhandenen Wassers definiert. Für die Bestimmung des Wassergehalts ist eine frische Probe erforderlich. Die Probenmenge für toniges Material beträgt 10-50g. Für Ermittlung des Wassergehalts wurde die Probe vor und nach dem Trockenen gewogen. Die Trocknung erfolgte in einem Ofen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz. Anschließend kann durch die Subtraktion von Massewasser und Massetrocken der natürliche Wassergehalt berechnet werden. Dieser wird in Prozent angegeben.

Berechnungsformel:

$$w = \frac{mw}{md}$$

W = Wassergehalt [%]

 $m_w$  = Masse-Wasser [g]

 $m_d$  = Trockenmasse [g]

#### Bestimmung der Durchlässigkeit mit fallender Druckhöhe

Zylinder-Durchlässigkeitsversuch wird die Bestimmung Der für des Durchlässigkeitsbeiwertes durchgeführt. Die Probe wird mit dem Ausstechzylinder in das Gerät eingebaut und dicht verschlossen. Das Standrohr wird mit Wasser gefüllt. Durch das Öffnen der Verriegelung kann das Wasser durch die Probe dringen. Es muss mit dem Versuchsbeginn solange gewartet bis die Probe ihren erforderlichen Sättigungsgrad erreicht hat und Wasser aus dem unten abgebrachten Schlauch gedrückt wird. Danach wird das Standrohr nochmals mit Wasser gefüllt, und ab diesem Zeitpunkt die fallende Drückhöhe in definierten Zeitintervallen mitdokumentiert. Die Abstände der Ablesung sind von der jeweiligen Bodenprobe abhängig.

Danach kann mit der Formel von Darcy, der k-Wert (= Durchlässigkeitskoeffizient in m/s) bestimmt werden:

1 1

$$k = \frac{v}{i} \times \frac{l}{(t^2 - t^1)} \times \ln\left(\frac{h^1}{h^2}\right)$$
  
k = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]  
v = Fließgeschwindigkeit [m/s]  
i = hydraulische Gradient  
zum Zeitpunkt t<sub>1</sub>  $\rightarrow$  Wasserspiegelhöhe h<sub>1</sub>  
zum Zeitpunkt t<sub>2</sub>  $\rightarrow$  Wasserspiegelhöhe h<sub>2</sub>

#### Wasseranalyse

Die Analysen dienen zur Bestimmung der chemischen und physikalischen Parameter. Bei tonigem Material kann mittels pH-Wert, Leitfähigkeit und den jeweiligen Wasserinhaltsstoffen wie z.B.: Karbonat, Chlorit usw. auf die jeweiligen Bodeneigenschaften geschlossen werden.

Die Wasseranalyse setzt sich aus mehreren Teilanalysen zusammen. Zum einen werden die Leitfähigkeit und der pH-Wert gemessen, zum anderen die Gesamthärte und die Karbonathärte bestimmt. Durch weitere chemische Tests, beispielsweise den Clorittest, können noch genauere Aussagen bezüglich der Inhaltsstoffe des Wassers getroffen werden. Um einzelne Elemente gezielt nachweisen zu können, stehen ebenfalls unterschiedliche Versuchsmethoden zur Verfügung. Um eine aktuelle Wasserprobe zu analysieren sind die Messungen der Temperatur und dem pH-Wert vor Ort oder noch am selben Tag bzw. am nächsten Tag erfolgen, um einen Verlust bzw. eine Veränderung der Ionen zu vermeiden. Falls der Versuch nicht gleich durchgeführt werden kann, können durch das Einfrieren der Wasserprobe diese Probleme verhindert werden.

#### Bestimmung der Leitfähigkeit

Laut ÖNORM L1099 wird die Fähigkeit eines wässrigen Extraktes Strom zu leiten, als elektrische Leitfähigkeit bezeichnet. Die elektrische Leitfähigkeit kann auch als Kehrwert des spezifischen Widerstandes verstanden werden.

#### Bestimmung des pH-Werts

Bei der pH-Wert Messung muss zuerst die aktuelle Acidität (H<sup>+</sup>) gemessen werden. Durch die Beigabe von CaCl2 kann auch die austauschbare Acidität (H+) gemessen werden. Zu beachten ist, dass sich der pH-Wert bei der Wassermessung langsamer einstellt (bis zu 10 min Wartezeit) als bei der Messung mit der CaCl2-Lösung. Diese Wartezeit ist einzuhalten, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten. Bei Bodenproben steht das Ergebnis schneller fest, da die Probe schon durch den Boden "vorgepuffert" wurde. Aufpassen muss man allerdings auch bei langen Messzeiten, dass eine Verfälschung der Ergebnisse durch eine Wechselreaktion mit der lode ausgeschlossen werden kann. Des Weiteren soll noch vermerkt werden, dass der pH-Wert ein log-Wert ist und daher zwei ermittelte Werte nicht einfach gemittelt werden dürfen. Der pH-Wert ist nach dem Erreichen einer stabilen Anzeige abzulesen.

Das Messergebnis kann als stabil angesehen werden, wenn der Wert nicht über einen Zeitabschnitt von 5 Sekunden und um nicht mehr als 0,02 pH-Einheit schwankt (ÖNORM L1083).

Eine weitere Möglichkeit der pH-Messung ist die Verwendung von Teststreifen. Der Teststreifen ist zwischen 2 und 10 Minuten in der Probe zu belassen. Die Ablesung sollte danach möglichst rasch gemacht werden, da die Teststreifen an der Luft die Farbe ändern.

# 2.3 Grundlagen zur Tonmineralogie

## 2.3.1 Definition und Entstehung

Minerale sind natürlich vorkommende, stofflich einheitliche kristalline Festkörper, meist anorganisch, die durch natürliche Vorgänge entstehen und maßgebend an der Bildung von Gesteinen beteiligt sind (PRESS et al., 1995).

Es wird zwischen Primär- und Sekundärmineralen unterschieden. Silikate werden als die wichtigsten Primärminerale der Erdkruste gesehen und entstehen unter hohem Druck und Temperatur aus Magma. Die Sekundärminerale entstehen durch Verwitterung, also Umbildung und Neubildung von Primärmineralen. Die kleinsten Teilchen sind die Tonminerale. Sie gehören zu den wichtigsten neu gebildeten Silikatmineralen (BLUM, 2007 und PRESS et al., 1995)

Nach HEIM, (1990) tragen folgende Prozesse zur Bildung von Tonmineralen bei:

- Prozesse, die zur Zerkleinerung primärer Gesteine und Minerale führen
- Transport und Sedimentationsprozesse
- Selektions- und Differenzierungsprozesse
- Neu- und Umbildungsprozesse im wässrigen Verwitterungs- und Sedimentationsmilieu

Die Verwitterungsvorgänge nach HEIM (1990) können in drei Gruppen eingeteilt werden.

- Das terrestrische Verwitterungsmilieu: Es ist wichtig f
  ür die Bodenbildung zwischen Lithosph
  äre und Atmosph
  äre. In diesem Bereich dominieren haupts
  ächlich die physikalischen, chemischen und biologischen Verwitterungsprozesse.
- Das sedimentäre Verwitterungsmilieu: In diesem wird das vom terrestrischen Bereich stammende Material aufgrund von Umweltbedingungen im Austausch von Ca<sup>2+</sup> gegen Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> ersetzt.
- Das diagenetische hydrothermale Milieu: In diesem Bereich beginnt der Übergang zur Metamorphose wo die Tonminerale einem erhöhten Druck und einer erhöhten Temperatur ausgesetzt sind, und daher keine hohe Stabilität mehr aufweisen.

Die Mineralgruppen unterscheiden sich in drei großen Hauptgruppen: der Smektite, der Vermikulite und der Kaolin-Mineralgruppe (ADAM, 2009 und HEIM, 1990).

# 2.3.2 Unterscheidung Tonfraktionen – Tonmineral

Der Begriff Ton lässt sich im wesentlichen auf zwei Arten definieren: einerseits Ton in Form einer Kornfraktion und andererseits Ton in Form von Schichtsilikaten als Tonmineral. Wenn man von "Ton" spricht ist daher immer deutlich erkennbar zu machen von welcher Art und Weise gesprochen wird. Wesentlich ist jedoch, dass beide Arten der Tone eine Korngröße von <0,002mm aufweisen und besondere Eigenschaften besitzen (ADAM, 2009 und HEIM, 1990).

#### 2.3.3 Struktur der Tonminerale

Wie schon in den oben angeführten Kapiteln erwähnt sind Tonminerale Schichtsilikate, die wiederum in drei Strukturelemente aufgeteilt werden können: Tetraeder, Oktaeder und Zwischenschichten.

#### Tetraeder und Tetraederschicht

Sie bestehen aus den Hauptbauelementen von SiO<sub>4</sub>-Teraedern. Die chemische Formel ist Abb. 18 zu entnehmen. Der SiO<sub>4</sub> Komplex ist der Grundbaustein der silikatischen Minerale.



Abb. 18: SiO<sub>4</sub> Komplex

Im Zentrum befindet sich das Siliziumion und an den vier Ecken des Tetraeders jeweils das Sauerstoffion. Durch die Flächenvernetzung ergeben sich daraus die **Tetraederschichten (T-Schichten)**, wie in Abb. 19 ersichtlich wird.



Abb. 19: Tetraederschicht, verändert nach GRIM (1962)

Die Lücken werden meist mit, aus der Erdkruste stammenden Elementen von Al<sup>3+</sup>lonen (mit einem Ionenradius von 0,51 Å) und in selteneren Fällen bei hohem Eisenangebot Fe<sup>3+</sup> (mit einem Ionenradius von 0,64 Å) belegt. Ein weiteres Atom wäre auch z.B. Silizium mit einem Ionenradius von 0,42 Å, dadurch kommt es zu einer Aufweitung der T-Schichten und zur weiteren Folge einer Störung des Gitters. Es kann allerdings nur eine begrenzte Anzahl an SiO<sub>4</sub>-Tetraeder mit anderen Zentralionen in den T-Schichten ausgetauscht werden. Wenn Al<sup>3+</sup>auftritt wird von Aluminiumsilikaten gesprochen (HEIM, 1990).

#### Oktaeder und Oktaederschicht

Das zweite Bauelement der Schichtsilikate ist die **Oktaederschicht** (O-Schicht) Abb. 20.



Abb. 20: Oktaederschicht, verändert nach GRIM (1962)

Im Zentrum der O-Schichte befindet sich meist ein Aluminium-, Magnesium- oder Eisenion. Dieses wird von sechs OH<sup>-</sup>-Ionen umgeben und an den Eckpunkten mit anderen Ionen verbunden. Die OH<sup>-</sup>-Ionen sind, wie in Abb. 21 dargestellt als Kugelpackung gelagert. Die dichteste Packung von sechs Kugeln in zwei Lagen führt zu einem Oktaeder mit einer oktaedrischen Lücke (HEIM, 1990).



Abb. 21: Oktaeder mit dichtesten Kugelpackung (HEIM, 1990)

Nach HEIM (1990) bleiben bei O-Schichten die tetraedrischen Lücken grundsätzlich Kationen unbelegt. Oktaedrische Lücken enthalten die als partieller Ladungsausgleich für den Zusammenhalt der (OH-)-Anionen wirkt. Die Kationen werden aufgrund ihres Ionenradius nach Angebot und Häufigkeit ausgesucht. Sie sollten jedoch den Kationenradius von 0,580 Å möglichst nicht unter oder oberschreiten. Folgende Kationen können auftreten: Fe<sup>3</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ti<sup>4+</sup>, Mn<sup>4+</sup>. Eine Belegung der O-Schichten mit Kationen unterschiedlicher Größe führt zu verschiedenen Aufweitungen der (OH)-Packungen, die eine inhomogene Belegungen hervorrufen. Daraus resultieren Deformationen und Gitterspannungen, welche zum Verlust der Strukturstabilität führen können. Belegungen mit mehreren Kationen lassen sich folgendermaßen unterscheiden (siehe Tab. 18).

Struktur	Anzahl der Belegungen der Kationen	Struktur
dioktaedrische	Dreiwertig (2 Kationen auf 3 Lücken)	T O 1:1 Zweischichtstruktur
trioktaedrisch	Zweiwertig (3 Kationen auf 3 Lücken)	T O T 2:1 Dreischichtstruktur

Tab. 18: Unterscheidung der Belegung der O-Schichten (HEIM, 1990)

#### Verknüpfung der Tetraeder- und Oktaederschichten

Schichtsilikate verknüpfen sich über ihre freien Tetraederecken zu mehreren Schichten. So können sich T- und O-Schichten zu Zwei- oder Dreischichtstrukturen in besonderen Fällen auch Vierschichtstrukturen verbinden, die als sogenannte beschrieben Elementarschichten werden. Die spezifische Abfolge von Tonmineralschichten kann zwischen der Elementarschicht und den Zwischenschichten unterschieden werden. Die Zwischenschichten bestehen aus Kationen, Wasser oder sind als leer anzunehmen. Der Zusammenhalt durch die Atombindung ist bei den Elementarschichten größer als bei den Zwischenschichten. Dies wird auch durch die Spaltbarkeit der Schichtsilikate deutlich (HEIM, 1990).

#### Zweischicht-Tonminerale T-O

1:1 Elemetarschicht



Abb. 22: Zweischichttonmineral, verändert nach GRIM (1962)

Zweischichttonminerale sind durch Wasserstoffbrücken miteinander verbundene Schichten, siehe Abb. 23 die aus einer Si-O Tetraeder und einer Al-OH-Oktaeder Schicht bestehen. Der Abstand zwischen den zwei Schichten ist sehr klein und nicht variabel. Der Zusammenhalt ist durch eine OH-O-Bindung gegeben. Die Ionenadsorption entsteht nur an Außen-, Spalten-, und Bruchflächen. Eines der wichtigsten Minerale dieser Gruppe ist der Kaolinit, mit der chemische Bezeichnung ist Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> (BLUM, 2007).

## Dreischicht-Tonminerale T-O-T

2:1 Elementarschicht

Die Schichtsilikate bestehen aus SiO<sub>4</sub> und Al(OH<sub>3</sub>)- Oktaeder im Verhaltnis 2:1.



Abb. 23: Dreischichttonmineral, verändert nach GRIM (1962)

# Verwitterung

Bezogen auf das Untersuchungsmaterial der Huangtupo Rutschug wird an dieser Stelle speziell auf die Verwitterung von Glimmer eingegangen.

Durch die Spaltbarkeit kann die Verwitterungslösung in das Material eindringen und dadurch den Glimmer mittels Ionenaustausch verwittern. Es erfolgt ein Strukturumbau von Schichtsilikaten zu Sekundärmineralen. Bei der Verwitterung entstehen durch den Zerfall kleine Partikel und es kommt zur Hydrolyse. K<sup>+</sup> Ionen werden gelöst und H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> Ionen werden ausgetauscht. Aus diesen Vorgängen resultieren diese Eigenschaften: spezifische Oberfläche wird erhöht, die Korngröße nimmt ab, der Kaliumgehalt wird verringert und der Wassergehalt steigt an. Dadurch entstehen neue Minerale aber mit der gleichen Grundstruktur wie die Primärminerale.



Zunahme von  $H_2O$ , spezifische Oberfläche und KAK

# Abb. 24: Schema Entstehung von Dreischicht-Tonmineralen aus Glimmer, verändert nach SCHRÖDER (1992)

#### Vierschichttonminerale

Diese werden auch 14 Å-Minerale genannt und häufig den 2:1-Schichttypen zugeordnet. Zu dieser Gruppe zählen beispielsweise die Chlorite, sie besitzen eine eigene Oktaederschicht als Zwischenschicht (HEIM, 1990).

#### Wechsellagerungsminerale (Mixed Layer) – Wechsellagerung

Mixed Layer kennzeichnen sich dadurch, dass Abfolgen von zwei oder drei verschiedenen Struktureinheiten regelmäßig oder unregelmäßig vorkommen (HEIM, 1990). Die häufigsten Bestandteile von Mixed Layer sind Illit, Smektit, Vermikulit und Chlorit (MILLOT, 1970). Die Minerale besitzen Dicken zwischen 24 und 33 Å, wobei die Ladung den jeweiligen Komponenten entspricht (HEIM, 1990).

HEIM, (1990) beschreibt Illit-Smektit-Wechsellagerungen die mittels Neubildung durch Verwitterung vulkanischer Gesteine oder Umwandlung aufgrund von Diagenese erfolgt. Desweiteren werden Chlorit-Vermikulit und Chlorit-Smektit Wechsellagerungen durch Chloritverwitterung oder diagenetische Neubildung unter hohem Einfluss von Mg<sup>2+</sup> Konzentration gebildet. Die Tab. 19 gibt einen Gesamtüberblick über die Typen der Tonminerale.

	Zweischicht- minerale	Dreischicht- minerale	Vierschicht- minerale
Struktur-Symbol	T O	T O T	0 T 0 T
Dicke in Å	7,0 -7,4	9,3 -10,2	14,1-14,4
Zwischenschicht Kationen	keine	fast immer vorhanden	keine
Bindung der Elementarschicht	durch H- Brücken, nur im Fall von Halloysit durch H₂O- Molekühle	mittels Zwischenschicht- Kationen	durch W H-Brücken entgegengesetzte Ladung beider Elementarschichten zusätzlich möglich
Ladung der Elementarschicht	Keine Gesamtladung der T- und O- Ladungen, die sich kompensieren	Tonminerale meist negative Ladung, kompensiert die positive der Z- Schichten	Gesamtladung
Innerkristalline Quellfähigkeit	beschränkte Quellfähigkeit beim Halloysit, sonst keine	Unter bestimmten Grenzwerten der Gesamtladung gut bis sehr gut, darüber keine	keine
Austausch- möglichkeit der Zwischenschicht- Kationen		Unter bestimmten Grenzwerten der Gesamtladung gut bis sehr gut, darüber keine	

Tab.	19: Strukturtypen von	Tonmineralen.	verändert nach HE	M (1990)
Tub.	io. On antartypen von			

## 2.3.4 Spezielle Tonmineralogie

In diesem Kapitel werden ausschließlich die Tonmineraleigenschaften angeführt, die bei den Versuchsdurchführungen ermittelt wurden.

#### Zweischichttonminerale

	chemische Formel	Vertreter	Eigenschaften
Kaolinitgruppe	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Kaolinit Dickit Nakrit Halloysit	<ul> <li>dioktaedrisch Tetraeder (Si,AI) Oktaeder (Al,Mg)</li> <li>keine Ladung</li> <li>kein isomorpher Ersatz</li> <li>keine Zwischenschicht</li> <li>keine Quellfähigkeit</li> <li>7 Å-Minerale</li> <li>chemisch sehr stabil</li> </ul>

Tab. 20: Kaolinitgruppe verändert nach HALL (1987)

#### Dreischichttonminerale

	chemische Formel	Vertreter	Eigenschaften
	KAI <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> AI)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	verwitterter Glimmer mit einer Korngröße von <2µm	<ul> <li>di-trioktaedrisch Tetraeder (Si,Al) Oktaeder (Al,Mg)</li> <li>Ladung vorhanden</li> </ul>
Illitgruppe			<ul> <li>Isomorpher Ersatz in Tetraeder und Oktaeder</li> </ul>
			<ul> <li>K<sup>+</sup> in der Zwischenschicht</li> </ul>
			• 10 Å-Minerale
			Chemisch relativ stabil
			Nicht quellfähig

Tab. 21: Illitgruppe verändert nach MILLOT (1970)

# Dreischichttonminerale

	chemische Zusammensetzung	Eigenschaften
	Monmorillonit – Mg-reich	<ul> <li>di-trioktaedrisch</li> <li>Tetraeder (Si Al Fe)</li> </ul>
	(Ca,Mg,K,Na) (Si <sub>4</sub> )[Al <sub>x</sub> Mg]O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Oktaeder (Al,Mg,Fe)
	Beidellit – Al- reich	Ladung vorhanden
Smektitgruppe	(Ca,Mg,K,Na)	isomorpher Ersatz in
	(Si <sub>3</sub> AI)[AI <sub>2</sub> ]O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	l etraeder und Oktaeder
	Nontronit – Fe-reich	Zwischenschichtkationen sind
	(Ca,Mg,K,Na)	
	$(Si_3AI)[Fe_2]O_{10}(OH)_2$	• sehr hohe Quellfähigkeit
	Saponit – trioktaedrisch	
	(Ca,Mg,K,Na)	sehr hohe Plastizität
	(Si <sub>3</sub> AI)[Mg <sub>3</sub> ]O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	• sehr große Oberfläche
Vermikulitaruppe	(Ca,Mq,K,Na)	(800 m²/g)
0 11	(Si <sub>3</sub> Al)[Mg,Al,Fe]O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	chemisch mäßig stabil
		• 14/18 Å-Mineral
		<ul> <li>chemisch/technologisch wichtiger Rohstoff, wichtiges Adsorbens in der Umwelttechnologie</li> </ul>

Tab. 22: Smektitgruppe verändert nach MILLOT (1970) und HEIM (1990)

	chemische Zusammensetzung	Eigenschaften
		<ul> <li>di-trioktaedrisch Tetraeder (Si,Al,Fe) Oktaeder (Al,Mg,Fe)</li> </ul>
Chloritgruppe		<ul> <li>Ladungsausgleich durch fixe Zwischenschicht, Zwischenschichtkationen sind MgOH bzw. AIOH</li> </ul>
		<ul> <li>isomorpher Ersatz in Tetraeder und Oktaeder</li> </ul>
		keine Quellfähigkeit
		chemisch sehr stabil
		<ul> <li>14 Å-Mineral</li> </ul>

#### Vierschichttonmineral

Tab. 23: Chloritgruppe verändert nach HALL (1987), MILLOT (1970) und HEIM (1990)

#### 2.3.5 Eigenschaften von Tonmineralen

Die Fähigkeiten der Tonminerale können sich sehr stark auf die Bodeneigenschaften auswirken. Im wesentlichen bestehen Tongesteine aus mineralischen Relikten kristalliner Ausgangsgesteinen. Die Komponenten setzen sich Großteils aus Anteilen von Glimmer, Quarz, teilweise Chlorite und Alkalifeldspäte zusammen (ADAM, 2009 und HEIM, 1990).

Tonminerale haben die Fähigkeit der reversiblen An- und Einlagerung von  $H_20$ -Molekülen, und besitzen sie die Eigenschaften von quellen und schrumpfen. Des Weiteren können sie Ionen in austauschbarer Form adsorbieren (BLUM, 2007).

Deshalb haben sie einen großen Einfluss auf die Massenbewegungen. In den nächsten Kapiteln werden die Eigenschaften genauer beschrieben.

#### Spezifische Oberfläche und Oberflächenladung

Die Mineralgruppe Ton hat eine Partikelgröße von < 2  $\mu$ m, weist aber eine große spezifische Oberfläche auf. Je kleiner der Durchmesser der Teilchen desto größer ist die Gesamtoberfläche. Die spezifische Oberfläche wird definiert als die auf eine Gewichtseinheit bezogene Fläche in m²/g, die mit abnehmender Korngröße zunimmt. Bei Tonmineralen kann die Oberfläche bis zu 1.100 m²/g betragen (HEIM, 1990).

Quellbare Tonminerale haben zusätzlich zur spezifischen Oberfläche eine innerkristalline Oberfläche, die meist um ein vielfaches größer ist als die Äußere. Die

innere und äußere Ladung der Oberflächen ist abhängig von der permanenten Ladung, die durch Substitution (in den T- und O-Schichten) der Struktur hervorgerufen wird. Die permanente Ladung ist milieuunabhängig und vorwiegend negativ und wird durch die Zwischenschichtkationen ausgeglichen.

Die variable Ladung entsteht durch Protonierung oder Deprotonierung von O, (OH)und (OH2)- Gruppen. Die T-Schichten sind negativ geladen und daher von größerer Bedeutung als die positiv geladenen O-Schichten, da sie die positive Ladung komplett von der T-Schicht aufgenommen werden kann (HEIM, 1990).

#### Quellfähigkeit einiger Tonminerale

Die Quellfähigkeit von Tonen ist ein reversibler Vorgang und vor allem bei innerkristallinen Dreischichtmineralen ein wichtiger Prozess. Bei aufweitbaren Zwischenschichten wie zum Beispiel Smektit und Vermikulit werden die eingelagerten Kationen je nach Feuchtigkeit von unterschiedlichen Mengen Wasser umgeben. Dieser Vorgang wird auch Hydratisierung genannt. Durch die Aufnahme von Wasser füllen sich zuerst die Porenräume, das Wasser wird in der Tonmineralstruktur eingelagert und es kommt zu einer Volumsvergrößerung. Falls dies nicht möglich ist kommt es zu einem Quelldruck. Die Stabilität wird durch diesen Vorgang stark angegriffen und kann zu einem Festigkeitsverlust führen. Bei Wasserabminderung verändert sich das Volumen der Tonminerale und es können Trockenrisse entstehen. Dieser Vorgang variiert in einem zeitlichen Rahmen von einigen Tagen bis zu mehreren Wochen. Die Permeabilität sinkt durch die Wasseraufnahme fast bis auf Null und ist ein signifikanter Faktor bei der Beurteilung von Hangstabilitäten und Massenbewegungen (HEIM, 1990).

Der Begriff osmotische Quellung wird bei nicht aufweitbaren Zwischenschichten verwendet, und bedeutet eine geringfügige Quellung der Tonminerale. Dieser Prozess beruht laut HEIM (1990) auf dem Gefälle der Ionenkonzentration von den Teilchenoberflächen zur Porenlösung. Ein Konzentrationsausgleich kann nur durch eine Wasseraufnahme in den Raum zwischen den Tonmineralteilchen bewirkt werden.

#### lonenaustauschkapazität

In den Zwischenschichten aber auch an der Oberfläche können Ionen sehr leicht ausgetauscht werden. Das ist für die Bindung von Schwermetallen und organischen Schadstoffen von großem Vorteil. In einem elektrolythaltigen wässrigen Milieu werden Kationen und Anionen in der Zwischenschicht aufgrund ihrer Ladung adsorbiert. Tone besitzen daher die Eigenschaft in wässrigen Lösungen überschüssige Kationen adsorptiv zu binden. Die Schutz- bzw. Pufferfunktion wird durch chemische Eigenschaften wie Ionenadsorption und Ionenaustausch über Kapazitätsgrenzen bestimmt. Die Kationenaustauschkapazität (KAK) wird in Milliäquivalent pro Gewichtseinheit (mval) oder pro 100g Trockensubstanz angegeben. Die Kationenaustauschkapazität ist abhängig von der Korngröße, Strukturtyp und auch von individuellen Ausbildungen der jeweiligen Tonmineralen. Außerdem ist sie direkt proportional zum pH-Wert (ADAM, 2009 und HEIM, 1990).

#### Thixotropie

Als Thixotropie wird die Eigenschaft von Materialien beschrieben die in Folge mechanischer Beanspruchung und ohne Änderung des Wassergehalts die Beweglichkeit der Teilchen verliert. Bei diesem Vorgang geht die Suspension vom plastischen Zustand in den flüssige Konsistenz über (HEIM, 1990 und NEHR, 2008).

#### Plastizität von Tonen

In Zusammenhang mit Ton-Wasser-Gemischen spielt die Plastizität eine wichtige Rolle. Wenn Tone Wasser aufnehmen durchlaufen sie eine plastische Phase. Die Grenzen zwischen diesen Zuständen können durch bestimmte Verformungswiderstände festgelegt werden. Dafür werden nach ATTERBERG (1905) der Fließgrenzenversuch und Schrumpfgrenzenversuch verwendet.

#### Mechanische und technische Eigenschaften von Tonen

In der unten dargestellten Tab. 24 werden die technischen Eigenschaften und die Bedeutung der Tonminerale zusammenfassend erörtert.

Eigenschaften	Technische Beschreibung
Wasseraufnahme und – abgabe Je größer der Anteil an aktiven Tonmineralien ist, desto langsamer trocknet der Boden aus, desto mehr Wasser kann er aber auch aufnehmen.	Fundamentaushub nur kleinflächig und sofort abdeckend z.B. mit Magerbeton
<b>Durchlässigkeit</b> Die Durchlässigkeit des Bodens nimmt mit zunehmendem Anteil an aktiven Tonmineralien ab.	Verwendung als Dichtschicht bei Deponien und Staudämmen.
Plastizität Plastizitätsindex I <sub>p</sub> steigt mit zunehmendem Anteil an aktiven Tonmineralien Fließgrenze w <sub>I</sub> steigt mit zunehmendem Anteil an Tonmineralen.	verminderte Tragfähigkeit von Böden, durch Bodenstabilisierung mittels Kalk und/oder Zement können solche Böden verbessert werden.
<b>Bindevermögen von Schadstoffen</b> (Schadstoffadsorptionsvermögen) Das Vermögen Schadstoffe zu binden, steigt mit zunehmendem Anteil an aktiven Tonmineralen.	Verwendung als Dichtschicht bei Deponien zur Schadstoffbindung.
<b>Scherfestigkeit</b> Die Scherfestigkeit sinkt mit zunehmendem Anteil an aktiven Tonmineralen.	Vorsicht bei Rutschhängen. (!)
Thixotropie Abhängigkeit der Viskosität von der mechanischen Krafteinwirkung	Verwendung von Bentonit als Stützflüssigkeit bei der Schlitzwandbauweise.

Tab.24:EigenschaftenundtechnischeBedeutungvonTonmineralen(Norm EN ISO 14688-1:2002)

# 2.4 Untersuchungen des Gesamt und Tonmineralbestandes

Das zweite Kapitel der Laboruntersuchungen bezieht sich auf das Gestein und die Mineralogie sowie deren Zusammensetzung. Zur Bestimmung des Mineralbestandes werden die Röntgendiffraktometrie und die Karbonatbestimmung nach Scheibler angewendet.

# 2.5 Röntgendiffraktometrie "XRD"

Das Röntgendiffraktometer funktioniert auf Basis der Bragg'schen Reflexionsbedingung. In Abb. 25 werden die eingehenden Parameter für das Bragg'sche Gesetz graphisch dargestellt.

Das Bragg'schen Gesetz lautet:





Die Bragg-Bedingung wurde 1912 von William Lawrence Bragg entwickelt und besagt dass ein Röntgenstrahl mit einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda$  an einer bestimmten Schar von Netzebenen und einem konstanten Abstand d nur unter einem einzigen Winkel θ gebeugt wird (WIKIPEDIA III, 2012). Mittels Messung der reflektierten Strahlung an der Probe kann der jeweilige Netzgitterabstand bestimmt werden. Jedes Mineral besitzt ein eigenes, spezifisches Kristallgitter, so dass es durch die Kenntnis ihrer d-Werte (Netzebenabstände) eindeutig bestimmbar ist. Nur wenn die Bragg-Gleichung erfüllt ist, kann eine Reflexion beobachtet werden. Die Messung erfolgte in einem Winkelbereich von 2° bis 70° mit einem X'Pert PRO PANalytical. Ergebnis Diffraktometer der Firma Als werden Diagramme (Diffraktogramme) erstellt.

Lage der Peaks (Winkel) und die relative Intensitäten ermöglichen die Identifikation der verschiedenen Minerale. Mithilfe der Daten (d-Werte) kann das Mineral bestimmt werden.





Abb. 27: XRD Gerät

Abb. 26: XRD Gerät

## 2.5.1.1 Gesamtmineralanalyse

Für die allgemeine Materialbestimmung wurde zuerst die Probe bei 70°C getrocknet. Bei höheren Temperaturen von ca.  $100 - 110^{\circ}$  entwässert Gips, und das Zwischenschichtwasser der Tonminerale geht verloren. Die getrocknete Probe wird in einer Scheibenschwingmühle zu einem Pulver mit einer Korngröße <  $10 \div 20 \mu m$ , vermahlen. Das Pulver wird in die zylindrische Öffnung des Probenträgers gefüllt, mit einem Stempel gut verdichtet und für eine glatte Oberfläche mit einer Klinge abgezogen. Überschüssiger Staub wird entfernt und abgedeckt.



Abb. 28: Probenvorbereitung für die XRD – Messung



Abb. 29: Probenvorbereitung der XRD Probe

#### 2.5.1.2 Tonmineralanalyse

#### Vorbereitung der Proben in China

Für die Untersuchung der speziellen Tonminerale wurde die rote und weiße Bodenprobe (Kornverteilung <  $2\mu$ m) in China mittels pipettieren auf Glasplättchen aufgetragen und 48 Stunden luftgetrocknet. Anschließend wurde die Messung im Labor vorgenommen.

#### Vorbereitung der Proben in Österreich

Der erste Schritt der Probenvorbereitung erfolgte im Labor der Universität für Geowissenschaften Wuhan. Die Probe wurde wie in Kapitel 2.5.1.1 beschrieben getrocknet und aufbereitet. Die Probe wurde mit 10% Wasserstoffperoxid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dispergiert. Dadurch oxidiert die organische Substanz in der Probe. Überschüssiges Peroxid wird durch Auskochen im Wasserbad entfernt. Die Dauer des Vorganges beträgt zwei Tage bei einer Temperatur von 95°C. Im nächsten Schritt wurde die Probe gesiebt. Aufgrund anderer Siebgrößen in China wurde statt einer Korngröße von < 63  $\mu$ m die Fraktion < 74  $\mu$ m durch Nasssiebung gewonnen. Die Tonfraktion konnte durch Abtrennen erfolgen. Dazu wurden ~250ML Suspension < 74 µm und 3ml Na-Polyphosphat in einem Zentrifugenbecher aufgeteilt. Danach auf 300g aufgefüllt, damit alle Zentrifugenbecher gleich schwer sind. Das Probenmaterial wurde anschließend 4 Minuten bei 1000 rpm abzentrifugiert um Teilchen < 2 µm = Ton-Fraktion zu erhalten. Durch den Vorgang setzt sich der Schluff am Boden des Röhrchens ab. Die Tonsuspension wird mit einer 200ml Pipette herausgesaugt und in ein 1-Literglas gefüllt. Der Zentrifugenbecher wird mit deionisiertem H<sub>2</sub>O aufgefüllt und erneut abzentrifugiert. Dieser Vorgang wurde zweimal wiederholt.



Abb. 30: linkes Bild: Zentrifuge,

rechtes Bild: UV-Bestrahlungsgerät

Die Umbelegung erfolgte mit einer MgCl<sub>2</sub> bzw. KCl- Lösung. Zur Bestimmung des Abdampfrückstandes wurden 50 ml in ein tariertes Porzellanschälchen pipettiert und bei 105°C getrocknet und anschließend gewogen. Für die Belegung wurden 40 ml der Tonsuspension und 10ml 4n KCl Lösung bzw. 4N MgCl<sub>2</sub>Lösung vermischt und in ein 50ml Zentrifugenröhrchen gefüllt. Über die darauffolgende Nacht wurde die Flüssigkeit 12 Stunden in einem dafür vorgesehenen Gerät geschüttelt.

Am darauffolgenden Tag wurde die Salzlösung durch Zentrifugieren entfernt. Dieser Vorgang wurde in der Zentrifuge 15 Minuten bei 3000 Umdrehungen durchgeführt. Nach dem Vorgang wurde die Salzlösung weggeschüttet, ohne dass Partikel verloren gingen, und neues destilliertes Wasser bis auf 40 ml aufgefüllt. Anschließend erfolgte die Ultraschall Bestrahlung (impulsmäßig dispergiert) pro Probenröhre ca. 2 Minuten. Der Vorgang wurde ein zweites Mal wiederholt, wobei sich die Anzahl der Umdrehungen auf 3.600 und die Zeit auf 30 Minuten erhöhte.

Mittels einem Plättchengerät mit integrierten Glasröhrchen (siehe Abb. 31) wurden die Keramikplättchen dicht eingelegt. Die vorbereitete Suspension wurde in das Röhrchen gefüllt und mit Hilfe von Unterdruck auf das Keramikplättchen aufgebracht. Anschließend wurden die Texturpräparate im Exsikkator mit NH<sub>4</sub>-NO<sub>3</sub> luftfeucht getrocknet und anschließend im Röntgendiffraktometer gemessen. Für die genaue Unterscheidung der Tonminerale wurden die Plättchen weiter behandelt.



Abb. 31: linkes Bild: nach der Zentrifuge, rechtes Bild: Unterdruckmaschine für die Keramikplättchen

Für die Bestimmung von Smektit und Vermikulit wurden die Mg+K belegten Proben einer Ethylenglykol-Atmosphäre ausgesetzt und anschließend im Diffraktometer getrocknet. Die mit Kalium belegten Proben kamen in eine Dimethylsulfoxid-Atmosphäre (DMSO), um eine Unterscheidung von gut und schlecht kristallisierten Kaolinit zu erzielen. Die Präparate wurden wiederum im Diffraktometer gemessen.

Die genauere Unterscheidung von primären und sekundären Chlorit erfolgte mit Magnesium belegten Proben. Die Proben wurden je 2 Stunden bei 300C° bzw. 550C° getempert und anschließend nochmal gemessen.

Die Daten wurden nach MOORE et al., (1997) manuell ausgewertet.

#### 2.5.2 Karbonatbestimmung nach Scheibler

Bei der Karbonatbestimmung nach Scheibler werden die Karbonate durch Beigabe von Salzsäure zerstört. Das dabei entstehende Kohlenstoffdioxid wird gasvolumetrisch bestimmt (ÖNORM L1084, 1989).

Für den Versuch wird die trockene, feingemahlene Bodenprobe mit 15%iger HCl versetzt. Die verwendete Probenmenge muss je nach Kalkgehalt unterschiedlich bestimmt werden, um ein Überbrausen im Gefäß zu vermeiden. Diese schwankt zwischen 0,5 – 10 g. Um den Versuch genauer durchführen zu können, sollte der Kalkgehalt vor dem Versuch abgeschätzt werden. Dies wurde über die Fläche des XRD-Diagramms durchgeführt. Des Weiteren wird KCI als Sperrflüssigkeit verwendet, um zu verhindern, dass Wasser CO<sub>2</sub> aufnehmen und so das Ergebnis verändern könnte. Da die Volumsverdrängung abhängig vom Druck und der Temperatur ist, müssen diese bei der Berechnung berücksichtigt werden.

Wenn die Bodenprobe und die HCI Lösung in das Scheiblergerät eingebracht sind, muss darauf geachtet werden, dass die Salzsäure nicht mit der Probe in Berührung kommt, solange das Gefäß noch nicht mit dem Stoppel verschlossen ist. Das Niveau der Sperrflüssigkeit muss mit dem "0" Punkt der Messröhre im Gleichgewicht stehen,
siehe Abb. 32 linkes Bild. Anschließend wird die Salzsäure (5ml) mit der Bodenprobe (1g) in Kontakt gebracht, siehe Abb. 32 rechtes Bild. Das entstehende Kohlenstoffdioxid drückt die Flüssigkeit aus der Röhre heraus, welches in einen Auffangbehälter abgelassen werden kann. Der Glasbehälter ist solange zu schütteln bis keine Veränderung in der KCL-Lösung mehr sichtbar ist. Nach Einstellen der Niveaugleichheit wird auf der Skala die Volumsveränderung abgelesen.

Laut ÖNORM L1084, 1989 sind 3 Versuchsdurchgänge vorgeschrieben, die aber aufgrund der geringen Probenmenge nicht durchgeführt werden konnten.





Abb. 32: linkes Bild: Scheibler Versuchsgeräte rechtes Bild: Aufbrausen der Bodenprobe durch Vermischung mit der HCI Lösung

Der enthaltene Karbonatanteil der Probe wird über die Formel:

% Karbonatanteil = 
$$\frac{ml CO_2 x pT Faktor x stöchiometrischer Faktor}{mg Einwage} x 100$$

mit einem stöchiometrischer Faktor (Kalzitfaktor), beispielsweise von 2,274 bei 100% Kalzit und 0% Dolomitanteil, und einem pt Faktor, der abhängig ist von Lufttemperatur *t* und Luftdruck *p*, beispielsweise von 1,83 bei einer Temperatur von 23° und einem Luftdruck von 750 mm errechnet.

Anmerkung: Der stöchiometrische Faktor hängt vom relativen Kaolinit- und Dolomitfaktor der Probe ab, der pt Faktor dient zur Berechnung der Veränderung des Gasvolumens mit Druck und Temperatur.

Diese Anmerkung bezieht sich auf das Boyle-Mariotte-Gay Lusac'sche Gesetz)

# 3 Fallbeispiel Huangtupo-Rutschung bei Badong

# 3.1 Einleitung

Im Jahr 1982 wurde in der Stadt Yichang der Gezhouba Staudamm errichtet. Durch den Aufstau des Jangtse gingen Teile der Stadt verloren und es musste eine Umsiedlungsfläche gefunden werden, um diese wieder neu errichten zu können. Der Hang Huangtupo wurde besiedelt. Huangtupo liegt südlich der "Guandukou" Synklinale und gehört zur Kreisstadt Badong, welche im südwestlichen Teil der chinesischen Provinz Hubei, direkt am Jangtse Fluss, ca. 80 km flussaufwärts des Drei-Schluchten-Projekts liegt, siehe Abb. 33 (DENG et al., 2000).



Abb. 33: Lage von Badong und des Arbeitsgebiets (DENG et al., 2000)

Bei der Errichtung des neuen Stadtteils stieß man auf eine alte Gleitfläche, die aber nicht weiter berücksichtigt wurde. Im Jahre 1995 wurden im Gebiet von Huangtupo zwei Hangrutschungen beobachtet. Die Fläche wurde von Geologen und Geotechnikern untersucht. Im nächsten Schritt galt es die Eigenschaften der Hangrutschung zu untersuchen. Handelt es sich um eine alte oder neue Rutschung ? Gibt es einen Zusammenhang mit der "alten Rutschfläche" und dem Ereignis von 1995? Lässt sicher Hang durch bauliche Schutzmaßnahmen, beispielsweise den gegen die Wasserspiegel-Schwankungen gesicherten Böschungsfuß zum Jangtse, stabilisieren.

Mit Hilfe eines Algorithmus, genannt "box counting", konnten nach WU et al. (2009) elf verschieden Rutschbereiche alleine in der Kreisstadt Badong unterscheiden, siehe Abb. 34. Es folgt eine kurze Aufzählung der Rutschungsflächen, vom Westen nach Osten: Huanglashi, Xixiangkou, Tongjiaping, Tanjiawan, Zhaoshuling, Zhafangping, Tanjiaping, Baiyangou, Hongshibao, Liangshuixi und Huangtupo.



Abb. 34: Rutschbereiche in Badong County (WU et al., 2009)

Die Huangtupo-Rutschung ist nicht nur eine der mächtigsten Hangrutschungen in der Kreisstadt Badong, sondern auch eine der Größten im gesamten Reservoir des Drei-Schluchten-Projekts. Die Rutschung umfasst eine Fläche von 135x10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> und ein Volumen von ca. 6934x10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> (WANG et al., 2009). Die morphologischen Gegebenheiten lassen sich vorerst mit steil-gemäßigt bis steil–sehr steil beschreiben. Die Rutschung gliedert sich in vier große und wenige kleinere Teil-Rutschungen, siehe Tab. 25 und Abb. 35. In der Abb. 36 und Abb. 42 werden die zu Rutschung NO. 1 und Rutschung NO. 2 dazu gehörigen Längsprofile gezeigt.

Bezeichnung	Lage	Volumen [m³]	Seehöhe in m ü.S.	Prozentanteil
NO. 1	Ufer des Jangtse	2.255,5×10 <sup>4</sup>	Norden:220-240 Süden: 520	61% yop dor
NO. 2	Ufer des Jangtse	1.992,0×10 <sup>4</sup>	Norden:160- 20m Süden: 600	Gesamtfläche
Garden Spot	Über NO. 1	1.352,9×10 <sup>4</sup>		
Transformer Substation	Über NO. 2	1.333,5×10 <sup>4</sup>		
HP	kleinere Rutschungen			

Tab. 25: Überblick der Teilrutschungen der Huangtupo Rutschung (DENG et al., 2000)



In der Abb. 35 sind die Längsprofile der Untersuchungsstollen TP4 und die genauen Teile der Rutschung ersichtlich.





Abb. 37: Längsprofil 2, verändert nach WANG (2000)

# 3.2 Geologie

Der Untergrund in der Region Badong besteht aus der Badong-Gruppe, die sich im mittleren Trias Zeitalter bildete (LIU et al., 2009). Die Abb. 38 zeigt eine graphische Darstellung der Badongformation, während der Tab. 26 die detailierte Beschreibung der jeweiligen Gruppen zu entnehmen ist.



Abb. 38: graphische Darstellung der Badongformation (TANG, 2005)

Zeit-	Gruppe	Bezeichnung	Beschreibung der	Mächtigk

alter				Hauptbestandteile	eit in m
Trias	Badong- Gruppe T₂b	dong- uppe T <sub>2</sub> b	T₂b⁴	Roter Lehm, geringes Vorkommen an mergeligem Kalkstein mit kalkreichem Schieferton. Der oberste Teil besteht aus rot bis grau-grünen kalkreichen Schieferton und schluffigem Schieferton mit fein gekörntem Sandstein. Im mittleren Teil kommen zwischen dem roten Ton kalkreicher Schluff und grau- grüner feingekörnter Sandstein mit rotem Schieferton vor. Der unterste Teil besteht aus rotem Ton und tonigem Schluff mit Vorkommen von grauem Chlorit-Schluff.	354,50
			T <sub>2</sub> b <sup>3~2</sup>	Lockergestein: Kalkstein mit grau tonigem Zwischenmaterial, Mergel, kalkreicher Schieferton zwischengeschichtet mit rotem kalkreichen Schluff, grau grüner kalkreichem Schluff und kalkreicher Ton. Zwischenschicht mit von grau-gelb bis grau-grünem Schluff und schluffigem Ton sowie kalkreichen Schieferton	153,00
			T <sub>2</sub> b <sup>3~1</sup>	Festgestein: von grau bis grau- schwarzem Kalkstein, Kalkstein mit tonigem Material, Mergel mit kalkreichem Schieferton und Tonmergel	229,30
		T <sub>2</sub> b <sup>2</sup>	Roter Lehm, leicht grau-gelber bis grau- grüner Lehm, teilweise mit sandigem Ton, schluffigem Ton und Tonmergel mit schluffigen Zwischenmaterial, fein gekörnter Sandstein und kalkreicher Sandstein	418,87	
			$T_2b^1$	grauer, grau-gelber bis gelb-grüner Mergel, Tonmergel und kalkreicher Schieferton	79,66
	Jialingjia ng - Gruppe	T₁j <sup>3</sup>		kalkreicher Sandstein	

Гаb. 26: Übersicht der Badonggrupper	n, übersetzt nach QI et al. (2009) und WANG et al. (2009)
--------------------------------------	---

Die Huangtupo Rutschung setzt sich, siehe Abb. 39, im hinterem Bereich aus den Gesteinen der  $T_2b^2$  Schicht und im vorderem Bereich aus den Gesteinen der  $T_2b^3$  Schicht der Badong-Gruppe zusammen. Dazwischen sind immer wieder kleinere geologische Einheiten aus dem Quartär Zeitalter zu erkennen.



Abb. 39: Schematische geologische Übersicht der Huangtupo Rutschung (China University of Geosciences, Wuhan)

Die Gleitzone der Rutschung NO.1 befindet sich komplett in der T<sub>2</sub>b<sup>3</sup> Formation. Dies bedeutet, dass hier hauptsächlich Mergel und teils stark verwitterter mergeliger Kalk vorkommt.

QI et al. (2009) hat mit sich diesem Thema befasst, als es in den letzten 20 Jahren zu vermehrten Hangbewegungen in der Jangtse Region kam und, als an den Hängen neue Siedlungen entstanden. Ursprünglich ging man davon aus, dass das Material der  $T_2b^3$  Formation, stark verwitterter mergeliger Kalk und Mergel, als Untergrund eine ausreichende Scherfestigkeit besitzt und besser geeignet sei als die roten Tonsteine der  $T_2b^2$  Schicht. Untersuchungen zeigten jedoch, dass sich verwitterter mergeliger Kalk schneller und leichter zersetzt, sobald er mit Luft in Berührung kommt. Innerhalb zwei Jahre ab Offenlegung des Materials kann der stark verwitterte mergelige Kalk vollständig verwittert sein. Diese Problematik zeigt sich auch an der Huangtupo Rutschung. Durch die zahlreichen Bauarbeiten und Aushubarbeiten für Straßen und Häuser im Rahmen der Neubesiedelung ab dem Jahre 1982 wurde das Untergrundmaterial frei gelegt. Die Festigkeiten des Gesteins

wurden dadurch herabgesetzt und die Gefahr für eine Bewegung innerhalb dieser Materialschicht, welche doch einige Meter hoch sein kann, steigt. Nach ZHANG (2004) verringert sich die einaxiale Druckfestigkeit vom frischen auf stark verwitterten mergeligen Kalk von 105 MPa auf 57 MPa und der Reibungswinkel sinkt auf 12,7°. Der E-Modul geht von 16 GPa auf 4 GPa zurück und beträgt bei einem vollständig verwitterten Zustand mehr 20-80 MPa. Der Rückgang der Festigkeit hängt ebenfalls mit der Abnahme des CaCO<sub>3</sub> Anteils zusammen.

Der chemischen Analyse zufolge haben die Schichten  $T_2b^1$  und  $T_2b^3$  eine ähnliche Zusammensetzung mit 55-95% Kalzit- und Dolomitgehalt und 20-35% Tonanteil, während die Schichten  $T_2b^2$  und  $T_2b^4$  einen Tonanteil von 85-90% und einen Kalzitanteil von 5% haben. Die chemische Löslichkeit der Gesteine der Gruppen  $T_2b^1$  und  $T_2b^3$  ist höher als die Gesteine der Gruppen  $T_2b^2$  und  $T_2b^4$ . Nach ZHANG (2004) hat frischer mergeliger Kalk einen CaCO<sub>3</sub> Anteil von über 90%, während leicht bis moderat verwitterte mergelige Kalke einen CaCO<sub>3</sub> Anteil von 70-65% haben. Der Verwitterungsgrad kann ebenfalls an der Farbe erkannt werden. So ändert sich diese von frischem mergeligem Kalk zu stark verwittertem mergeligem Kalk aufgrund der Änderung der Fe-Oxide, Fe<sup>2+</sup> zu Fe<sup>3+</sup>, von dunkelgrau über grau bis zu grau-grün, gelb-grün, gelb und braun-rot.

Name des Gesteins	CaCO₃ Gehalt [%]	Ton Gehalt [%]
Hochprozentiger Kalkstein	> 95	< 5
Mergeliger Kalk	> 85	< 15
Mergelkalk	> 75	< 25
Kalkmergel	> 65	< 35
Mergel	> 35	< 65
Tonmergel	> 25	< 75
Mergelton	> 15	< 85
Mergeliger Ton	> 5	< 95
hochprozentiger Ton	0	100

Die Tab. 27 und Tab. 28 geben einen kurzen Überblick der geologische Namensgebungen von Gesteinen bezogen auf deren CaCO<sub>3</sub> Gehalt.

Tab. 27: Namen der Gesteine in Bezug auf deren CaCO<sub>3</sub> Gehalt nach CORRENS (1949)

Name des Gesteins Englischer Name		CaCO₃ Gehalt [%]
Kalkstein	limestone	95-100
Mergeliger Kalk	argillaceous limestone	75-95
Mergel	marl	50-75
Tonmergel	calcareous mudstone	25-50
mergeliger Ton	calcareous bearing mudstone	5-25
Tonstein	mudstone	0-5

Tab. 28: Namen der Gesteine in Bezug auf deren CaCO<sub>3</sub> Gehalt nach LU (2004)

## 3.3 Hydrologie

In diesem Unterkapitel soll die Problematik der Wasserspiegelschwankungen des Jangtse, infolge der jährlichen Reservoir Auffüllungen und Absenkungen des Drei-Schluchten-Staubereichs, angesprochen werden.

Porenwasserdruck spielt eine wichtige Rolle bei Standsicherheiten. Wie sich der Grundwasserspiegel infolge der Wasserspiegelschwankungen des Jangtse verhält, kann der Abb. 40 entnommen werden. Seit dem 31.10.2010 wurden Grundwassermessungen an verschiedenen Messstellen an der Huangtupo Rutschung durchgeführt. Als Beispiel wurde die Messstation ZK4 herangezogen. Die Lage dieser Grundwassermessstelle ist in der Fotodokumentation im Anhang 7.1 dargestellt. Die Daten des Wasserstandes des Jangtse bei Badong werden von der China Three Gorges Corporation (CTGPC) täglich aufgezeichnet und sind auf der Homepage, www.ctgpc.com, online abrufbar.



Abb. 40: Korrelation zwischen dem Wasserstand des Jangtse und des Grundwasserspiegel (University of Geosciences, Wuhan)

Die rosa gefärbte Datenreihe der Abb. 40 kennzeichnet den Wasserstand des Drei-Schluchten-Reservoir auf der Höhe Badong und beginnt mit dem 31.10.2010 und geht bis zum 31.07.2011. Innerhalb dieses Jahres ist die deutliche Senkung des Jangtse Wasserspiegel erkennbar. In den ersten Monaten, von Ende Oktober bis Anfang Jänner bleibt der Wasserstand bei ca. 175 m ü. M. konstant. Danach nimmt er bis auf 145 m ü. M. ab. Die zwei kleinen Anstiege vom 24.06.2011 und vom 07.07.2011 sind auf Niederschlagsereignisse im Einzugsgebiet zurückzuführen.

In den nächsten drei Monaten bis hin zum Oktober wird der Wasserstand wieder kontinuierlich bis zu 175 m angehoben. Seit dem Beginn des Einstaues im Jahre 2004 kam es nach Aussagen von Anrainern vor Ort schon dreimal zu Wasserspiegelschwankungen von ca. 30 m.

Die blaue Datenreihe der Abb. 40 kennzeichnet die Grundwasserstände der Messstelle ZK4, welche im Gegensatz zu den Wasserständen des Jangtse stärkeren Schwankungen unterliegen. Für den erste Einbruch der Kurve, mit dem Tiefstpunkt von 207,26 m, am 04.12.2010, ist nach Aussagen und Aufzeichnungen der Tunnelbaumitarbeitern vor Ort ein Wassereinbruch im Tunnel und die darauf eingetretene Drainagierungswirkung verantwortlich. Die weiteren Schwankungen des Grundwasserspiegels können ebenfalls auch auf die Arbeiten im Tunnelbetrieb zurückgeführt werden. Trotzdem ist eine tendenzielle Abnahme des Grundwasserspiegels ersichtlich, die auf die Korrelation mit dem Wasserstand des Jangtse schließen lässt.

Steigt der Wasserspiegel des Flusses an, ist auch ein Anstieg in den Messungen des Grundwasserspiegels erkennbar, welcher allerdings zeitlich verzögert eintritt. Dieses Verhalten zeigt sich auch im umgekehrten Fall dann, wenn der Wasserspiegel vom Reservoir von 175 m ü. M. auf 135 m ü. M. abgesenkt wird. Dies ist immer im Frühjahr der Fall, um genügend Rückhalteplatz für Hochwässer zu schaffen. Der Grundwasserspiegel in der Böschung folgt dem Gradienten der Absenkung in zeitlichem Abstand. Dadurch entsteht ein Porenwasserüberdruck im Gelände, welcher die Böschung instabiler macht.

Es folgt ein Vergleich mit der Rutschung in Vajont, Italien im Jahre 1963, die als Katastrophe von Longarone bekannten wurde, als ein Hang in den Vajontstausee rutschte und eine Flutwelle auslöste. Im Vorfeld sah man schon Anzeichen einer Hangbewegung, der man entgegenwirken wollte. Um eine Katastrophe zu vermeiden, versuchte man so viel Wasser wie möglich rechtzeitig aus dem Stausee abzulassen. Nicht bedacht wurden die, aufgrund der raschen Absenkung des Stausees, auftretende Porenwasserüberdrücke bzw. Strömungsdrücke in der Böschung. Diese verminderten die Stabilität der Böschung so rasch, dass es erst recht zu einer Hangrutschung mit schweren Folgen kam. Bei der Flutwelle starben im darunter liegenden Dorf Longarone ca. 2.000 Menschen. Die geologischen Grundverhältnisse unterscheiden sich allerdings zu jenen in Badong durch den geringeren Anteil an Tonmineralien (WIKIPEDIA, III).

# 3.4 Erkundungsstollen und Probenentnahme

### Erkundungsstollen – Hauptröhre und Sekundärstollen

Die Probenennahme wurde in Badong durchgeführt. Die Kreisstadt liegt am Fuße von 700-1.230 m hohen Bergen. Der von West nach Ost fließende Jangtse erreicht dort eine Breite von etwa 300 – 600 und einer Wassertiefe von etwa 90 m. Das Risiko der Massenbewegungen wurde bis 2002 zwar beobachtet aber nicht genauer untersucht. Mit Hilfe der Universität für Geowissenschaften in Wuhan 2002 können in weiterer Zukunft die Bewegungen des Hanges und die geologischen und geotechnischen Gegebenheiten vor Ort genau überprüft und kartiert werden. Damit die Bewegungen des Hanges, die bis zu einem halben Meter pro Jahr reichen, genau zu untersuchen wurde in einer Bauzeit von ca. 2 Jahren ein Erkundungsstollen mit einer Länge von ca. 900 m und einem Ausbruchsquerschnitt von ca. 25 m<sup>2</sup> mittels der Neuen Österreichischen Bauweise (NÖT) vorgetrieben. Die genaue Lage des Stollens ist in der

Abb. 43 ersichtlich. Bei dem Bauverfahren handelte es sich um einen Baggervortrieb mit Spritzbetonausbau (siehe Abb. 41). Die Hauptröhre des Tunnels hat für zusätzliche Erkundungen Untersuchungsfenster die in bestimmten Abständen, je nach geologischen Vorkommnissen in den Ulmen angeordnet sind. Bis zum November 2012 wurden drei Querschläge – Sekundärstollen mittels Baggervortrieb errichtet um auf die Gleitzone der Massenbewegung zu stoßen. Für weitere Aufschlüsse des Untersuchungsmaterials wurden auf der Rutschung verteilt ca. 20 Bohrungen abgeteuft. Die Entwässerung des Tunnels erfolgt mittels seitlicher Drainagenrinnen. Details über das Monitoring und die Messdaten können der Diplomarbeit von Christine Schönberger entnommen werden. Fotos sind aber auch im Anhang 7.1 enthalten. Nach Aussagen von Prof. Xiang soll nach Fertigstellung der Untersuchungen und der letzten Bauphasen auf dem Rutschkörper ein geologischer und geotechnischer "Park" für Studenten der entstehen.



Abb. 41: Erkundungsstollen: Ansicht von Osten nach Westen



Abb. 42: Gerüst für den Ortbeton (Bild links), Erkundungsfenster im Stollenulm (Bild rechts)



Abb. 43: Huangtupo Rutschung am südlichen Jangtse-Ufer mit skizziertem Stollenverlauf (1) ,und dem Untersuchungsstollen TP4 (2) (DENG et al., 2000; verändert nach LIENBACHER et al., 2012)

### **Untersuchungsstollen TP4**

Der Erkundungstollen TP4 liegt wie in Abb. 35 ersichtlich östlich auf der Huangtupo Rutschung. Dieser Stollen hat eine Breite von ca. 1,20 m und eine Höhe von 1,60 m. Der Stollen dient derzeit für Untersuchungen der Hangbewegung und Probeentnahmen in der Gleitzone. Die Gleitzone liegt ca. auf einer Höhe von 200.7 m. Für die Probeentnahme wurde ein Erkundungsfenster freigelegt, um gestörte wie auch ungestörte Proben zu entnehmen.



Abb. 44: Erkundungsstollen TP4, links: Tunnelabmessungen, rechts: Erkundungsfenster der Gleitzone

### Probenentnahme

Zur Beschreibung und näheren Charakterisierung des Rutschmaterials aus der T<sub>2</sub>b<sup>3</sup> Badong Schichtung wurde Material aus dem TP4 Stollen entnommen. Es wurden ungestörte Proben für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit und der Scherfestigkeit und zusätzlich 2-3 kg Material aus der Gleitfläche für die Korngrößenverteilung und für die Bestimmung weiterer Bodeneigenschaften entnommen. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Entnahme an repräsentativen Stellen erfolgte. Das gesamte Probenmaterial wurde sorgfältig in Frischhaltefolie verpackt und in luftundurchlässigen Behältern, zur Universität für Geowissenschaften Wuhan transportiert. Die anschließenden Versuche wurden im Geotechniklabor und anderen Institutslaboratorien durchgeführt. Ein Plan für die genaue Darstellung der Probenentnahme Aufnahmen Feld ersichtlich. ist im Anhang im 7.1



Abb. 45: schematische Darstellung – Untersuchungsstollen TP4

## 3.5 Durchgeführte Versuche

Die durchgeführten Versuche lassen sich in drei grobe Bereiche einteilen. Unterschieden wird zwischen der Benennung und Beschreibung des Materials im Feld, der geotechnischen Laboruntersuchungen und den tonmineralischen Untersuchungen, siehe Tab. 29, Tab. 30 und Tab. 31.

Versuche	Durchführung mit/nach	Kenngrößen
Farbanalyse	RAL	
Bestimmung der Trockenfestigkeit	Druckversuch	
Bestimmung der Plastizität	Knetversuch	

Tab. 29: durchgeführte Versuche zur Benennung und Beschreibung des Materials im Feld

Versuche	Durchführung mit/nach	Kenngrößen
Bestimmung des Kalkgehalts	НСІ	
Korngrößenanalyse	Trockensiebung	
Schlämmanalyse	Aräometer	
Bestimmung der Kornform		
Bestimmung der Zustandsgrenzen	Atterberg	w <sub>L</sub> , w <sub>P</sub> , I <sub>P</sub> , I <sub>C</sub> , I <sub>A</sub>
Bestimmung der Feststoffdichte	Kapillar- und Flaschenpyknometer	ρ <sub>s</sub>
Bestimmung der Trockendichte	Volumen der Gesamtprobe	ρ <sub>D</sub>
Bestimmung des Wassergehalts	Ofentrocknung 105°C	mw, w
Bestimmung der Durchlässigkeit	mit fallender Druckhöhe	k-Wert
Scherversuch	Rahmenschergerät	σ, ρ
Wasseranalyse		pH-Wert, Leitfähigkeit

Tab. 30: durchgeführte geotechnische Laborversuche

Für die Theorie der Wasseranalyse und die Ausführungen der tonmineralische Untersuchungen, welche in China und in Österreich durchgeführt wurden (siehe anschließende Auflistung) sowie deren Ergebnisse, darf an dieser Stelle nochmals auf die Diplomarbeit von Anita Wollendorfer hinweisen werden.

Versuche	Durchführung mit/nach	Kenngrößen
Gesamtmineralanalyse	XRD	
Bestimmung des Tonmineralgehalts	XRD und	
Karbonatbestimmung	Scheibler	
Bestimmung der Poreneigenschaften	Mikroskopfotos	
Bestimmung der inneren Oberfläche	Wasseranalyse	KAK
Bestimmung der äußeren Oberfläche	Autosorb iQ, F-Sorb 3400	BET

Tab. 31: durchgeführte Tonmineralische Untersuchungen

# 4 Ergebnisse

## 4.1 Geotechnische Versuche

### 4.1.1 Benennung und Beschreibung des Materials im Feld

### Farbanalyse nach RAL

Die Farbanalyse nach RAL ergab eine ausgeprägte farbliche Differenzierung des in der Gleitzone vorkommenden Materials. Das entnommene Probenmaterial des TP4 Tunnelstollen weist die Farben RAL Sandgelb, und RAL Orangebraun auf, siehe Abb. 46. Aufgrund dieser Unterscheidung wird für die weiteren Versuche die Bezeichnungen "rotes Material" oder nur "rot" für die eher rot gefärbten Proben und die Bezeichnungen "weißes Material" oder nur "weiß" für die eher weißlich gefärbten Probe verwendet.



Abb. 46: Seitenwand des Probenentnahmestollens mit den korrelierenden RAL-Farben

### Trockenfestigkeit

Der Trockenfestigkeitsversuch nach ÖNORM EN ISO 14688-1:2002 ergab für beide Materialien eine *mittlere Trockenfestigkeit.* 

### Plastizität

Der Plastizitätsversuch nach ONORM EN ISO 14688-1:2002 ergab für beide Materialien eine *ausgeprägte Plastizität.* 

### 4.1.2 Geotechnische Versuche im Labor

### Bestimmung des Kalkgehalts

Die Zugabe von verdünnter Salzsäure ergab ein starkes, langandauerndes Aufbrausen der Bodenprobe, und kann daher als <u>stark kalkhaltig (++)</u> beschrieben werden.

### Korngrößenanalyse

Die Ergebnisse der Korngrößenanalyse mittels Trockensiebung können der Tab. 32 entnommen werden. Das zur Siebanalyse herangezogenen Größtkorn des weißen Materials betrug 8 cm, das des roten Materials 4 cm. Die nach ÖNORM B4412 (1974) erforderlichen Mindestprobenmengen von 700 g bzw. von 300 g wurden in beiden Fällen beachtet. Die Verwendung unterschiedlicher Materialmengen hat für die prozentuelle Auswertung keinen Einfluss.

Probe weiss: weißes Material TP4	
Probe rot: rotes Material TP4	

Probe	[g]	[%]
weiss	1525,06	100,00
rot	682,52	100,00

Korngröße	Probe weis [g]	Probe weiss [%]	Probe rot [g]	Probe rot [%]
> 20 mm	273,15	17,91	78,38	11,48
> 10 mm	121,63	7,98	35,15	5,15
> 5 mm	131,61	8,63	46,85	6,86
> 2 mm	157,28	10,31	71,23	10,44
> 1 mm	44,42	2,91	21,01	3,08
> 0,5 mm	115,13	7,55	51,63	7,56
> 0,25 mm	78,44	5,14	38,41	5,63
> 0,074 mm	72,44	4,75	39,62	5,80
Summe	994,10	65,18	382,28	56,01
< 0,074 mm	530,96	34,82	300,24	43,99

aus dem Aräometer Versuch

< 0,074 mm	17,34	27,35
< 0,002 mm	17,48	16,64

Tab. 32: Auswertung der Trockensiebung für die rote und weiße Probe

### Schlämmanalyse

Die Schlämmanalyse wurde nach dem Sedimentationsverfahren mit dem Aräometer durchgeführt. Dabei wurden jeweils 30 g von dem. Bodenmaterial mit Korndurchmesser < 0,074 mm verwendet. Die Mindestprobenmenge wurde nach ÖNORM B4412 (1974) in Abhängigkeit der Bodenart bestimmt. Nach vorheriger Eichung des Aräometers und nach 24 stündiger Versuchsdauer konnten folgende Ergebnisse auf zwei verschiedene Arten (chinesische und österreichische Rechenmethode) errechnet werden, siehe Tab. 33. Anzumerken ist, dass die Aräometergleichung und deren Parametern und Messmethode in China und Österreich Unterschiede aufweisen. Diese Unterschiede führen beim roten Material nur zu geringfügigen Abweichungen. Beim weißen Material wurde jedoch relativ großer Unterschied beobachtet. Für eine vollständige Auswertung des gesamten Probematerials der roten und weißen Proben wurden die prozentuellen Ergebnisse der Tab. 33 gemittelt und auf die Gesamtprobenmenge bezogen, siehe Tab. 34.

rotes Material	Chinesische Rechenmethode	österreichische Rechenmethode
Korngröße	[%]	[%]
< 0,074 mm	62,16	61,89
< 0,002 mm	37,84	38,11

weißes Material	chinesische Rechenmethode	österreichische Rechenmethode
Korngröße	[%]	[%]
< 0,074 mm	49,80	58,45
< 0,002 mm	50,20	41,55

Tab. 33: prozentuelle Auswertung der Schlämmanalyse für die rote und weiße Probe

Korngröße	Probe weiss [%]	Probe rot [%]		
< 0,074 mm	17,34	27,35		
< 0,002 mm	17,48	16,64		

#### Tab. 34: auf die Gesamtprobe bezogene Prozentangaben der Schlämmanalyse

In der Abb. 48 und Abb. 47 wird die Korngrößenverteilung mit eingezeichneten Linien bei Massenanteilen von 10%, 30% und 60% graphisch dargestellt. Diese werden zur Bestimmung der dazugehörigen Korndurchmesser benötigt, um die Ungleichförmigkeitszahl C<sub>U</sub> und die Krümmungszahl C<sub>C</sub> zu berechnen, siehe Tab. 35. In beiden Fällen kann man aufgrund des Kurvenverlaufs und den Errechneten Kennwerten von einer intermittierend gestuften Korngrößenverteilung sprechen. Die Linie bei einem Massenanteil von 80% gilt der Berechnung des Größtkorn nach ÖNORM B4810:2006 und RVS 8S.05.11:1997mit dem d<sub>85</sub>, siehe Tab. 36.



# Korngrößenverteilung

Probe: rot

Ergebnisse



Insgesamt ergab die Analyse einen gering plastischen Ton - stark sandig, mittel schluffig, mit geringen Anteilen von Kies T, *s*, u', g, (Ci, sagrSi). Der Boden wurde nach den Hauptbestandteilen laut ÖNORM ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 ausgewertet.

Korngröße d in mm	Durchgang summiert [%]	Durchgang summiert [%]
	Probe weiß	Probe rot
	100,00	100,00
<20 mm	82,09	88,52
<10 mm	74,11	83,37
<5 mm	65,48	76,50
< 2 mm	55,17	66,07
<1 mm	52,26	62,99
< 0,5 mm	44,71	55,42
<0,25 mm	39,57	49,79
< 0,074 mm	34,82	43,99
< 0,002 mm	17,48	16,64

Abb. 49: Summenkurve für die Darstellung der Korngrößenverteilung rot und weiß

Konnzahl	Bezeicl	nnung	rot	woi0	
remizani	neu	alt	TOL	wens	
Ungleichförmigkeitszahl	Cu	U	357,50	1750,00	
Krümmungszahl	C <sub>c</sub>	C <sub>c</sub>	0,23	0,08	

Tab. 35: berechnete Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl für die rote und weiße Probe

Kennzahl	Bezeichnung	rot	weiß	
Größtkorn	GK	17,39	35,35	

Tab. 36: berechnetes Größtkorn

#### Kornform

Nach SCHULTZE et al. (1967) handelt es sich vorwiegend um <u>kantiges bis</u> <u>rundkantiges Material</u> (siehe Abb. 50). Stark gerundetes Material wurde bei der Probenentnahme nicht bis sehr vereinzelnd gefunden.



Abb. 50: Konform nichtbindiger, gedrungener Körner (SCHULZE et al. 1967)

Dies kann unabhängig von der jeweiligen Korngröße festgestellt werden. Abgerundete Kanten findet man sehr selten. Die nachfolgenden (Abb. 51 und Abb. 52) zeigen die Kornformen des roten und des weißen Materials.



Gesamtüberblick der Kornformen von > 10 mm bis > 0,5 mm



Kornformen > 5 mm



Kornformen > 1 mm



Kornformen > 10 mm



Kornformen > 2 mm



Kornformen > 0,5 mm

#### Abb. 51: Bilder der Kornformen – rotes Material



Gesamtüberblick der Kornformen von > 10 mm bis > 0,5 mm



Kornformen > 10 mm



Kornformen > 5 mm



Kornformen > 2 mm



Kornformen > 1 mm



Kornformen > 0,5 mm

Abb. 52: Bilder der Kornformen – weißes Material

### Bestimmung der Zustandsgrenzen

Die Versuchsergebnisse zur Ermittlung der Fließgrenze sind in Abb. 58 dargestellt. Für jedes Probenmaterial wurden drei Versuche bei unterschiedlichem Wassergehalt durchgeführt. Die jeweils benötigten Umdrehungen liegen in einem Rahmen von 16 bis 36 Schlägen. Der daraus gemittelte Wassergehalt der Fließgrenze (bei einer Schlaganzahl von 25) ergab für das rote Material eine Fließgrenze von 32,50% und für das weiße Material von 28,20%.



## Abb. 53: Versuche zur Ermittlung der Fließgrenze

Die Konsistenzgrenzen können der Tab. 37 entnommen werden. Die Ergebnisse nach den Normen in China und in Österreich unterscheiden sich nur geringfügig.Die Versuchsergebnisse Fließgrenzen liegen aus chinesischer Sicht bei 28,62% für das rote Material und bei 26,50% für das weiße Material, aus unserer bei 32,50% für das rote Material und 28,20% für das weiße Material. Die Plastizität nach ÖNORM B4400-1 (2008) lässt sich für alle Werte w<sub>L</sub>  $\leq$  35%, mit *gering plastisch* beschreiben. Zu diesem Ergebnis kommt auch die Auswertung anhand des Plastizitätsdiagramms nach Casagrande. Dazu werden die bekannten Wassergehalte der Fließgrenze und die dazugehörigen berechneten Plastizitätszahlen beider Proben in das Diagramm eingezeichnet, siehe Abb. 54 und Abb. 55. Die im Diagramm definierte A-Linie soll eine Abgrenzung der Bereiche zwischen Ton und Schluff graphisch verdeutlichen. In beiden Fällen kann man von *gering plastischen Tonen*, *bzw. schwach bildsamen Tonen* sprechen.

Ebenfalls der Tab. 37 zu entnehmen ist der Wassergehalt der Ausrollgrenze mit 13,86% für das rote Material und mit 14,46% für das weiße Material sowie die aus den Versuchsergebnissen errechneten Plastizitätszahlen. Diese betragen 18,64 für das rote Material bzw. 13,87 für das weiße Material. Wird die Plastizitätszahl mit den Werten der chinesischen Methode berechnet so weichen die Ergebnisse nur geringfügig ab und ergeben für das rote Material einen Wert von 14,76 und für das weiße Material einen Wert von 11,92.

Die aus den Versuchsergebnissen errechneten Konsistenzgrenzen, siehe Tab. 37, betragen 1,07 für das rote Material bzw. 0,98 für das weiße Material. Werden die Konsistenzgrenzen mit den Werten der chinesischen Methode berechnet so weichen die Ergebnisse ebenfalls geringfügig ab. Die Konsistenzgrenze für das rote Material beträgt 1,10, die für das weiße Material 0,98. Das rote Material, dessen Konsistenzzahl nach beiden Methoden <1,0 ist, kann nach ÖNORM EN ISO 14688 (2004) mit ebenfalls mit bildsam bezeichnet werden. Eine genauere Beschreibung mit I<sub>C</sub> zwischen 0,75-1,0, lässt eine Benennung von *bildsam steif* zu. Für das weiße Material mit einer Konsistenzzahl I<sub>C</sub> zwischen 1,0–1,25 trifft eine Bezeichnung von *halbfest* zu.

Die Berechnung der Aktivitätszahl, siehe Tab. 37, ergab für das rote Material Werte zwischen 0,39 und 0,49 und für das weiße Material Werte zwischen 1,12 und 0,794. Die Ergebnisse lassen auf <u>normal bis *aktive Tone*</u> schließen. Dies ist ein weiteres Anzeichen, dass es sich hauptsächlich um quellfähige Tone handelt. Die Quellfähigkeit der Tone sind im Kapitel Material und Methodik genauer erläutert.

	Fließgrenze w∟		Ausroll- grenze <sub>WP</sub>	Plastizitätszahl I <sub>P</sub>		Konsistenz grenze I <sub>C</sub>		Aktivitätszahl I <sub>A</sub>	
Probe	А	China	А	А	China	А	China	А	China
rot	32,50	28,620	13,858	18,642	14,762	0,978	0,971	1,120	
weiß	28,20	26,498	14,455	13,873	11,915	1,073	1,104	0,794	

Tab. 37: Zusammenfassung der Wassergehaltswerte und Kennzahlen der Zustandsgrenzen

Plastizitätsdiagramm Casagrande

Ergebnisse Probe: rot Datum: 27.11.2011



Abb. 55: Bestimmung der Bildsamkeit der weißen Probe

## **Feststoffdichte**

Die Feststoffdichte  $\rho_s$  wurde unter Verwendung des Kapillarpyknometers bestimmt. Für das rote Material konnte so eine Feststoffdichte von 2,53 g/cm<sup>3</sup> ermittelt werden, für das weiße Material gilt ein Wert von 2,73 g/cm<sup>3</sup>. Die Ergebnisse sind der Tab. 28 zu entnehmen.

Pyknometer - Feststoffdichte											
Datum: 14.11.2011Temperatur in °C18Volumen Pyknometer in mlStartzeit: 15:30pw in g/cm³0,999Korndurchmesser							100 < 2mm				
Probe weiss: weißes Material TP4 < 2mm Probe rot: rotes Material TP4 < 2 mm											
Probe Nr.	Probe	Probe [g]	m₅ [g]	т <sub>р</sub> [9]	m <sub>p</sub> + <sub>s</sub> + <sub>w</sub> [g]	m <sub>p</sub> + <sub>s</sub> + <sub>w</sub> +W [g]	V <sub>w</sub> [g/cm³]	V <sub>w</sub> [g/cm³]	V <sub>s</sub> [g/cm³]	ρ <sub>s</sub> [g/cm³]	mittel ρ <sub>s</sub> [g/cm³]
1	weiss	15,096	13,755	37,991	53,087	144,050	1,342	91,074	7,584	1,814	weiß
2	weiss	15,006	13,673	30,594	45,600	140,393	1,334	94,909	3,757	3,639	2,727
3	rot	15,019	13,747	34,665	49,684	142,564	1,274	92,993	5,733	2,398	rot
4	rot	15.001	13.730	33.672	48.673	142.130	1.272	93.571	5.157	2.663	2.530

# Extern ermittelter Wassergehalt w der luftgetrockneten Proben in g/g

Probe	Box [g]	m₁ [g]	m [g]	m₂ [g]	m <sub>s</sub> [g]	m <sub>ω</sub> [g]	w [%]	w [g/g]
weiss	11,316	34,562	23,246	32,498	21,182	2,064	9,746	0,097
rot	10,950	31,046	20,096	29,344	18,394	1,702	9,255	0,093

Tab. 38: Ergebnisse der Feststoffdichte

Mittel

2,628

### Trockendichte

Die Trockendichte  $\rho_d$  wurde anhand eines definierten Volumens eines Stechzylinders ermittelt. Für das rote Material konnte eine Trockendichte von 2,07 g/cm<sup>3</sup>, für das weiße Material eine Trockendichte von 2,08 g/cm<sup>3</sup> ermittelt werden, siehe Tab. 40.

Probe 2-1: weißes Material TP4, vom Scherversuch σ=200kPa	
Probe 2-2: rotes Material TP4, vom Scherversuch σ=200kPa	
Probe 2-3: rotes Material TP4, vom Scherversuch $\sigma$ =300kPa und 400kPa	
Probe 2-5: weißes Material TP4, vom Scherversuch $\sigma$ =300kPa und 400kPa	

Probe	vor Einbau [g]	Ring [g]	m <sub>s</sub> [g]	]Volumen Ring [cm <sup>3</sup> ]
2-1, weiss	180,46	42,993	137,467	58,449
2-2, rot	181,10	43,862	137,238	58,449
2-3, rot	183,63	43,945	139,685	58,449
2-5, weiss	173,26	43,857	129,403	58,449

Ring Nr.	Box [g]	Probe weiss /rot	Entnahme oben / unten	m nach Ausbau [g]	nach 105° [g]	m₀ [g]
213	11,480	2-1, weiss	oben	62,346	56,547	45,067
273	11,192	2-1, weiss	unten	52,249	48,246	37,054
69	12,164	2-1, weiss	unten	49,239	45,690	33,526
13	10,748	2-2, rot	oben	44,425	40,973	30,225
289	10,660	2-2, rot	unten	63,625	58,265	47,605
40	12,329	2-2, rot	unten	53,526	49,685	37,356
66	11,896	Rest		25,946	24,064	12,168
254	10,961	2-3, rot	oben	52,555	48,491	37,530
0 0	11,313	2-3, rot	unten	54,448	50,696	39,383
203	11,131	2-3, rot	unten	51,722	47,974	36,843
302	11,100	2-5, weiss	oben	37,35	35,141	24,041
22	12,664	2-5, weiss	unten	60,058	55,365	42,701
265	11,257	2-5, weiss	unten	62,05	57,603	46,346
45	12,212	Rest		29,971	27,372	15,160
Gesamt		2-1, weiss				121,731
		2-2, rot				121,270
		2-3, rot				121,336
		2-5, weiss				120,668

Probe	Wasser masse: m <sub>w</sub> [g]	Wasser gehalt: <sub>w</sub> [%]	Trocken dichte: δ <sub>D</sub> [g/cm³]	mittel: <sub>w</sub> [%]	mittel: δ <sub>D</sub> [g/cm³]
2-1, weiss	15,74	12,93	2,083	weiss	weiss
2-2, rot	15,97	13,17	2,075	10,08	2,074
2-3, rot	18,35	15,12	2,076	rot	rot
2-5, weiss	8,74	7,24	2,064	14,14	2,075

Tab. 39: Ergebnisse der Trockendichte beider Proben

### Wassergehalt

Um den Wassergehalt w der beiden Probenmaterialien festzustellen wurden die Proben vor und nach einer Ofentrocknung, bei 105°C bis zur Massenkonstanz, gewogen. Für das rote Material konnte ein Wassergehalt von 14,28%, für das weiße Material ein Wassergehalt von 13,34% ermittelt werden, siehe Tab. 40. Ebenfalls angegeben ist der Sättigungsgrad Sr mit 3,61% für das rote Material und 2,18% für das weiße Material.

Probe weiß: weißes Material TP4
Probe rot: rotes Material TP4

Nr.	Probe	Box [g]	m₁ [g]	m [g]	m <sub>d +s</sub> [g]	m <sub>d</sub> [g]	m <sub>w</sub> [g]	w [g/g]	w [%]	mittel w [%]
1	weiß	11,076	45,164	34,088	41,338	30,262	3,826	0,126	12,643	weiß
2	weiß	11,183	27,829	16,646	26,017	14,834	1,812	0,122	12,215	13 3/3
3	weiß	10,671	36,831	26,160	33,385	22,714	3,446	0,152	15,171	13,343
4	rot	10,927	30,066	19,139	27,680	16,753	2,386	0,142	14,242	rot
5	rot	12,193	33,593	21,400	31,004	18,811	2,589	0,138	13,763	1/ 280
6	rot	11,233	32,274	21,041	29,556	18,323	2,718	0,148	14,834	14,200
									Mittel	13,811

Probe	ρ <sub>d</sub> [g/cm³]	ρ <sub>s</sub> [g/cm³]	ρ <sub>w</sub> [g/cm³]
weiß	2,0736	2,3744	1,0000
rot	2,0754	2,2608	1,0000

Sr
[%]
2,1842
3,6131

### Wasserdurchlässigkeit

Für den Versuch wurden ungestörte Proben aus dem TP4 Tunnel entnommen und im Durchlässigkeitsgerät der Universität für Geowissenschaften Wuhan eingebaut. Bei der Durchführung des Versuchs kam es aufgrund des stark tonigen Materials zu sehr geringen Durchlässigkeitsbeiwerten. Für das rote Material konnte eine Durchlässigkeit von 1x10<sup>-6</sup> m/s, für das weiße Material eine Durchlässigkeit von 9x10<sup>-6</sup> ermittelt werden (siehe Tab. 41). Die vollständigen Protokolle sind dem Anhang beigelegt.

Probenbezeichnung	Durchlässigkeit in m/s
Probe rot	1×10 <sup>-6</sup>
Probe weiß	9×10 <sup>-6</sup>

Tab. 41: Ergebnisse des Durchlässigkeit beider Proben

### 4.2 Gesamtmineral- und Tonmineralanalyse

Für jeden geologischen Laborversuch sind die Präparationen der Materialien besonders wichtig. Eine Auswertung der Ergebnisse, auch ohne EDV-Programme, sollte möglich sein. Nach einer detaillierten Besprechung und Interpretation der einzelnen Ergebnisse wird aber dennoch zum Vergleich eine Auswertung mittels EDV-Unterstützung durchgeführt. Für alle Versuche ist ent-/deionisiertes Wasser, destilliertes Wasser oder Wasser vergleichbarer Qualität zu verwenden.

Für alle Versuche wurden dasselbe Probenmaterial verwendet. Der geringfügige Unterschied der Ergebnisse ist auf das unterschiedliche Gerät und die Vorbereitung der Probe vor der Messung zurückzuführen. Die unten dargestellten Ergebnisse wurden mittels Röntgendiffraktometer, pH-Wert Messgerät und elektrische Leitfähigkeitsmessgerät gemessen und ausgewertet. Die genaue Bezeichnung der Geräte ist in Kapitel 2.5 beschrieben.

### 4.2.1 Elektrische Leitfähigkeit

Für die Vorbereitung der Bodenproben wurde der luftgetrockneter Feinboden im Extraktionsverhältnis 1 Massenanteil Feinboden +2,5 Volumenanteile entionisiertem Wasser extrahiert, um die Elektrolyten in Lösung zu bringen.

Die Raumtemperatur sollte dabei 22°C +/- 2°C nicht überschreiten. Wenn genug Bodenprobe vorhanden ist, sollte das Verhältnis mit 5 Volumensteilen Wasser extrahiert werden (ÖNORM L1099).

Im nächsten Schritt wurde die Probe ca. 1 Stunde in einem Gerät geschüttelt. Es muss darauf geachtet werden, dass der Boden vollkommen benetzt ist und nicht an der Gefäßwand klebt. Danach wird die flüssige Bodenprobe filtriert. Das filtrierte Wasser konnte schließlich als Probe herangezogen werden.

Die spezifische elektrische Leitfähigkeit wird im Filtrat gemessen und das Ergebnis auf eine Temperatur von 25°C umgerechnet. Die Leitfähigkeit des Wassers darf 0,2mS\*m<sup>-1</sup> bei 25°C nicht überschreiten. Die Temperatur spielt eine wichtige Rolle und muss daher exakt gemessen und dokumentiert werden. Die Messung des pH-Wertes erfolgt mittels des Gerätes des Geologischen Labors WTW, LF 191. Es ist zu beachten, dass die Messioden vollständig im filtrierten Wasser eingetaucht sind.

Elektrische Leitfähigkeit mS*m <sup>-1</sup> bei 25°C	Maximal zulässige Abweichung
0 bis 50	5 mS*m⁻¹
>50 bis 200	20 mS*m <sup>-1</sup>
>200	10 %

#### Tab. 42: Werte laut ÖNORM L 1099

Probenbezeichnung	Temperatur T [°C]	Leitfähigkeit [µS]
Probe rot	21,5	134,9
Probe weiß	21,1	136,0

Tab. 43: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen

### 4.2.2 Bestimmung des pH-Werts nach ÖNORM L 1083

Für die Messung des pH-Wertes muss je nach Zustand der Bodenprobe ein Zwischenschritt der Aufbereitung eingeschoben werden. Die Probenaufbereitung der Huangtupo-Rutschung aus China wurde einen Tag vorher angesetzt. Dazu wurden ein Extrakt mit 5g Feinboden plus 12 ml entionisiertem Wasser hergestellt.



Abb. 56: selbstgebauter Bodenprobenschüttler (BOKU-Wien)

Nach der Bearbeitung konnte die Probe für den Versuch verwendet werden. Falls nicht anders gefordert wird die Probe des Bodens mit 1 Volumsanteil Boden 5 Volumsanteile Suspensionslösung in Wasser (Calciumchlorid-Lösung (Ca) oder Kaliumchloridlösung) hergestellt. Vor der pH-Wert Messung muss das Gerät, beim Gerät des Geologischen Labor der Universität für Bodenkultur Wien handelt es sich um das WTW, pH 196 mit lode, vor der Verwendung ca. ½ Std. eingeschalten sein und je nach Hersteller mit einer Eichlösung (z.B.: pH Wert 4 oder pH-Wert 7) kalibriert werden.

Probenbezeichnung	pH-Wasser	pH-CaCl <sub>2</sub> -Lösung	
Probe rot	8,3	7,5	
Probe weiß	8,4	7,6	

Tab. 44: Ergebnisse der pH-Wert Bestimmung

### 4.2.3 Gesamtmineralanalyse

Die Probennamen TP4AR und TP4BW sind chinesische Bezeichnungen die sich aus dem Untersuchungsstollen TP4, die nach dem Alphabet gereihten Probe A, B und den jeweiligen Farben (rot, weiß) zusammensetzen. Diese sind den österreichischen Labornummern rot -12078 und weiß-12079 gleichzusetzen.

Zur Beurteilung der Mengen wurde folgende Einteilung verwendet

***	Viel
**	Mittel
*	Wenig
o	Spuren
Leeres Feld	Nicht nachgewiesen

### 4.2.3.1 Ergebnisse aus China

In der Untersuchung beider Sedimentproben TP4AR und TP4BR wurde festgestellt, dass der Hauptbestandteil zu 45% und 38 % aus Kalzit (CaCO<sub>3</sub>) besteht. Die prozentanteilsmäßig zweitgereihten Minerale mit jeweils 35% sind Schichtsilikate. Diese sind definiert als die Summe der Tonminerale und Anteile von Glimmer. Weiter sind in der Probe TP4AR Quarz (SiO<sub>2</sub>) zu 20% und in der Probe TP4BW Quarz (SiO<sub>2</sub>) zu 27% vertreten.

Proben- nummer	Quarz	Kalzit	Feldspat	Tonminerale	
TP4AR	20	45	0	35	
TP4BW	27	38	0	35	

Tab. 45: Zusammenhang der Auswertung der Diffraktogramme



Abb. 57: Diffraktogramm Gesamtmineralanalyse, Probe TP4AR

File Name: TP4BW





### 4.2.3.2 Ergebnisse aus Österreich

Bei der Auswertung der Gesamtmineralanalyse der untersuchten Sedimentproben wurde mit einem halbautomatischen Programm "FPS" (Fast Pattern Search) Aufgrund einer fundierten Datenbank mit über 200 gearbeitet. Vergleichsdiffraktogrammen werden mittels Handauswertung die Abstände der Elementarschichten (Å) miteinander verglichen einzelnen und somit die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Minerals angezeigt.

Die Untersuchung der Probe 12078 und der Probe 12079 ergaben jeweils drei gleiche Hauptbestandteile. Die Auswertung mit FPS zeigte in beiden Proben 98% Wahrscheinlichkeit ein Kalzit (CaCO<sub>3</sub>) Vorkommen und zu 81% Wahrscheinlichkeit ein Quarzvorkommen(SiO<sub>2</sub>). Unterschied gab es nur bei dem Chlorit, wo sich die Wahrscheinlichkeit zwischen 39% und 42% bewegt.

Proben- nummer	Quarz	Kalzit	Tonminerale	Muskovit	Chlorit	Hämatit
12078-China	*	**	***	o	*	
12079-China	*	**	***	o	*	o

Tab. 46: Zusammenfassung der Auswertung (China und Österreich) Tab.nformat

In der Abb. 59 sind beide Proben in einem Diagramm dargestellt um den geringfügigen Unterschied der zwei Proben aufzuzeigen. Es unterscheiden sich nur die Intensitäten der Mineralien. Die Hauptbestandteile sind gleich.


Abb. 59: Gesamtmineralanalyse der Probe 12078 und 12079







Abb. 61: Diffrakto

### 4.2.4 Tonmineralanalyse

### 4.2.4.1 Ergebnisse aus China

Die Auswertung der Tonmineralanalyse der untersuchten Sedimentproben wurde von der Universität Wuhan in China durchgeführt. Die Untersuchung der Probe TP4AR-BH und der Probe 9 TP4BW-BH ergaben jeweils drei gleiche Hauptbestandteile. Eine Auflistung der Minerale sind der Tab. 47 zu entnehmen. Die Proben lassen sich hauptsächlich an Ihren Montmorillonit- und Illitgehalt unterscheiden.

Proben- nummer	Tonminerale	Montmorillonit	III	Chlorit
TP4AR	35	20	80	0
TP4BW	35	55	45	0

Tab. 47: Zusammenfassung der Auswertung der Diagramme



Abb. 62: Diffraktogramm Tonmineralanalyse, Probe TP4AR-BH

File Name: TP4BW-BH



Abb. 63: Diffraktogramm Tonmineralanalyse, Probe TP4BW-BH

#### 4.2.4.2 Ergebnisse aus Österreich

Im Diffraktogramm der Probe 12078 ist ersichtlich, dass das der Illit sehr dominiert. Er hat einen Basaltabstand von 10Å und ist stabil. In allen Belegungen ist ein deutlicher Reflex zu erkennen. Die Peaks der Diagramme zeigen, dass je höher der Peak desto geringer ist die Verwitterung des Illits. Weiter lässt sich durch die Reaktion mit Kalium der Chlorit erkennen. Chlorit hat seinen Reflex bei 7Å und 14Å und kann nur bei der Belegung mit DMSO (Dimethylsulfoxid) vom Kaolinit unterschieden werden. Der Kaolinit erfährt mit der Magnesium- und Kalium-Chlorid Belegung keine deutliche Reaktion daher kann man davon ausgehen, dass er nur in Spuren vorhanden ist. Bei der Auswertung der Minerale wurde festgestellt, dass bei Benennung der Daten ein Fehler aufgetreten ist. Die Dateinamen Kalium-Ethylenglykol (KE) und Magnesium-Ethylenglykol (ME) wurden vertauscht. Daher wurde KE ausgewertet. Über die Flächen können die jeweiligen Materialien bestimmt und die Prozentanzahl berechnet werden.

	Probe 12078 - rot					
Nr.	Mineral	Fläche in E	Korrekturfaktor	E*Korr	Prozent	
1	Vermiculit	16,3	0,3	5	14%	
2	Illit	28	1	28	79%	
3	Kaolinit + Chlorit (Mixed Layer)	4,2	0,6	2,5	7%	
			Summe	35,5	100%	

Tab. 48: Auswertung der Tonmineralanalyse für die Probe 12078-rot



Abb. 64: Diffraktogramm Tonmineralanalyse, Probe 12078

In Abb. 65 ist zu erkennen, dass durch die Belegung mit Magnesium der Illit bei 10 Å aufgeht. Dieser wiederholt sich jeweils in den Intervallen 10/2, 10/3 und 10/4. Bei der Belegung mit Kalium ist bei 7 und 14 Å der Chlorit deutlich zu erkennen. Der Smektit lässt sich bei der Übereinanderlegung von Magnesium (M) und Magnesium-Ethylenglykol (ME) erkennen. Die Linien in den Diffraktometern werden von 14 Å auf 17 Å aufgeweitet. Das ME ist in die Zwischenschichte eingedrungen dadurch ist nur mehr Smektit und Vermikulit erkennbar. Kaolinit ist bei 7Å nicht deutlich erkennbar daher nur in Spuren vorhanden. Man kann davon ausgehen, dass er sehr schlecht kristallisiert ist. Über die Flächen können die jeweiligen Materialien bestimmt und die Prozentanzahl berechnet werden.

	Probe 12079 - weiß					
Nr.         Mineral         Fläche in E         Korrekturfaktor         E*Korr         Proze						
1	Smektit	8	0,3	2,4	11%	
2	Illit	18,3	1	18,3	81%	
3	Kaolinit + Chlorit (Mixed Layer)	3,2	0,6	1,9	8%	
			Summe	22,6	100%	

Tab. 49: Auswertung der Tonmineralanalyse für die Probe 12079-weiß



Position ( 2 metal (copper (cu))

Abb. 65: Diffraktogramm Tonmineralanalyse, Probe 12079

### 4.2.5 Karbonatbestimmung nach Scheibler

Der Versuch nach Scheibler ergab folgende Ergebnisse.

Probenbezeichnung	Messwert	Kalzitgehalt %
Probe rot-12078	87	61,2
Probe weiß-12079	50	42,0

Tab. 50: Ergebnisse des Kalzit Wertes in %

## 5 Interpretation und Schlussfolgerungen

### Allgemein

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine der mächtigsten Hangrutschungen wie der Huangtupo-Rutschung in Badong viele Fragestellungen aufwirft. Die Frage nach dem Einfluss von Tonmineralien auf die Massenbewegung wird in dieser Diplomarbeit behandelt. Die Fragestellung nach der Stabilität des Hanges kann der Partnerdiplomarbeit von Christine Schönberger entnommen werden die am selben Institut für Geotechnik geschrieben wurde. Der Aufenthalt im Forschungsgebiet China war auf zwei Monate begrenzt. In dieser Zeit konnten vor Ort Proben aus der Rutschzone (Tunnel TP4) entnommen werden. Die Aufteilung der Proben erfolgte im Labor und wurde in zwei Untersuchungsreihen eingeteilt (rote und weiße Proben), um anschließend beide Materialien miteinander vergleichen zu können. Durch Feldversuche und Fachkundige Studenten vor Ort konnte auf ein tonreiches Material geschlossen werden.

### Ergebnisse

Durch geotechnischen Laboruntersuchungen wie die Korngrößenverteilung, die Bestimmung der Zustandsgrenzen nach Atterberg sowie die Bestimmung der Bildsamkeit nach Casagrande konnte der Boden klassifiziert werden. Die Korngrößenverteilung war anhand der Ergebnisse von Krümmungszahl und Ungleichförmigkeitszahl intermittierend gestuft. Insgesamt ergab die Analyse einen gering plastischen Ton - stark sandig, mittel schluffig, mit geringen Anteilen von Kies  $(T,\bar{s}, u', g)$ . Das Ergebnis ist aufgrund der schon vorhandenen geologischen Einteilung der Badong-Gruppen, (siehe Tab. 26) einzuteilen in  $T_2b^4$  und  $T_2b^{3-2}$ . Die *Fließgrenze* beider Materialien deutet mit 32,5% und 28,6% ebenfalls auf ein guellfähiges toniges Material hin. Nach MEYER-KRAUL lassen sich anhand der Ergebnissen von den Plastizitätszahlen, den Konsistenzzahlen und den Aktivitätszahlen Beziehungen zueinander aufstellen. Genauer bestehen Korrelationen zwischen Plastizitätszahl Ip und dem Tonanteil aus der Sieb- und Schlämmanalyse. In Abb. 66 sind die Versuchsergebnisse aus China eingearbeitet. Die Aktivitätszahl I<sub>A</sub> liegt zwischen 0,75 - 1,25. Deshalb können die Tone als normal bis aktiv beschrieben werden.



Abb. 66: Aktivitätszahl IA von Röt-Tonsteinen, dargestellt als Beziehung zwischen Plastizitätszahl Ip und dem Tonanteil aus Sieb- und Schlämmanalyse (MEYER-KRAUL,1989)

Die Resultate sind mit der Diplomarbeit von WANG, (2011) vergleichbar. Dadurch lässt sich die Aussage treffen, dass keine erheblichen Veränderungen aufgrund von Erosion und Niederschlägen in kurzer Zeit entstehen.

#### Tonmineralanalyse

das eindeutige Ergebnis von tonhaltigem Material wurde für die Durch weiterführenden Versuche die Methode der Röntgendiffraktometrie (XRD) angewendet. Für die Interpretation der erhobenen Daten werden die Ergebnisse aus China und Österreich gegenübergestellt. Es ist zu erwähnen, dass die Messung der Proben in China nicht selbstständig durchgeführt werden konnte. Die fast 100% Übereinstimmung der Diffraktogramme (Ergebnisse) lassen aber darauf schließen, dass die Vorgangsweise der Untersuchung und Messung mittels XRD-Gerät annähernd identisch abgelaufen ist. Deshalb wird für die weitere Diskussion nur auf Ergebnisse der selbstständig durchgeführten Versuche in Österreich die eingegangen.

Aus der Gesamtmineralanalyse lässt sich erkennen das sich das Untersuchungsgebiet aus drei großen Hauptbestandteilen zusammensetzt. Zu <u>45 %</u> <u>Tonminerale, 35 % Kalzit und 20% Quarz</u>. Die Tonmineralanalyse ergab bei der <u>roten Probe 14% Vermikulit, 79% Illit und nur 7 % Kaolinit</u> bzw. Mixed Layer. Die <u>weiße Probe</u> unterscheidet sich mit <u>11% Smektit, 81% Illit und 8% Kaolinit</u> bzw. Mixed Layer nur geringfügig. Zusammenfassend lässt sich ein mehr als 90% Anteil an quellfähigen Tonmineralen aufzeigen.

Für den direkten Vergleich können aus der Studie nach WEN et al. (2007) die Ergebnisse herangezogen werden.

Bodenprobe	Smektit	Illit	Kaolinit
Huangtupo 1	0	67	12
Huangtupo 2	0	73	16

Tab. 51: Zusammenfassung der Scherparameter Huangzupo Rutschung, (WEN et al. (2007)Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China

Der höhere Anteil an Kaolinit und der nicht vorhandene Smektit und Vermikulit Gehalt ist auf die unterschiedliche Probenentnahmestelle und die unterschiedliche Auswertung zurückzuführen. Speziell bei der Untersuchung Tonmineralogie ist die idente Probenherstellung, Bearbeitung und Auswertung ein wichtiger Punkt. Durch diese Vorgänge können die Schwankungen gering gehalten werden.

Man erkennt ferner, dass das weiße Material stärker verwittert ist als das rote Probenmaterial. Grund dafür ist, dass bei Verwitterung der effektive Smektit nicht mehr mit dem Kalzit gebunden werden kann und daher der Smektit freigesetzt wird. Allgemein lässt sich sagen, dass quellfähige Tone wie Illit, Vermikulit und Semektit Wassermoleküle in den Zwischenschichten lagern und dadurch eine große Wasseraufnahmefähigkeit aufweisen. Speziell das Quellen von Tonen wird als physikalischer Vorgang der Wasseraufnahme bei Druckentlastung verstanden. Dabei unterscheidet PRINZ (1997) zwei Mechanismen die für die Diskussion der Parameter keine unwesentliche Rolle spielen. Zum einen die osmotische Schwellung bei der Wasser in die Poren des Tons aufgenommen und an der Tonmineraloberfläche in weitererfolge die Entlastungsdeformation herbeiführt, andererseits die innerkristalline Quellung bei der das Wasser in den Zwischenschichten aufgenommen wird. Bei der Huangtupo Hangrutschung in China handelt es sich aufgrund der Aufstauung des Jangtse um eine osmotische Schwellung aber aufgrund der aktiven Tonminerale auch um eine innerkristalline Quellung.

Nach PRINZ (1997), ist die Quellerscheinung abhängig von folgenden Punkten:

- Art der Tonminerale
- Anteil und Orientierung der quellf\u00e4higen Tonminerale, (z.B.: Quellverformungsversuch nach PREGL et al., 1980)
- vom Spannungszustand
- von der Wasserwegigkeit
- vom Quellvorgang (in welcher Phase sich der Vorgang befindet)

Der Quellvorgang lässt sich durch die Plastizität des Tons und aus der Art der Tonminerale erkennen. Nach PREGL, et al. 1980:6 ist der Vorgang des Quellens auch vom Karbonatgehalt abhängig. Dieser Versuch wurde in der Forschungsarbeit mittels der Karbonatbestimmung nach Scheibler Kapitel 2.52. durchgeführt. Die rote probe hatte mit 61,2% einen höheren Karbonatanteil als die weiße Probe mit 42,0%.

Weiter ist nach der Literatur von CZURDA & GINTHER, 1983:159 und SCHETELIG, (1994) der Elektrolytgehalt des Porenwassers ein weiteres Merkmal für die Quelleigenschaft der Tonminerale. Dieser Versuch wurde ebenfalls durchgeführt. Die Messung ergab bei beiden Proben eine Leitfähigkeit von ca. 135-136  $\mu$ S.

#### Diskussion der Scherfestigkeitsparameter

Bei Erreichung der maximale Scherfestigkeit und Überschreitung der verbleibenden Restscherfestigkeit des Materials tritt der Versagenszustand des Bodens ein. Nach MORGENSTERN (1990) tritt die Restscherfestigkeit nicht nur bei hochplastischen Tonen sondern auch bei allen Bodenarten die zur Entfestigung neigen auf. Die veranschaulicht Überschreitung anhand eines Scherwegdiagramms mit der Ordinate  $\tau$  (Scherspannung) und der Abszisse s (Scherweg).

Nach SALDEN (1989) ist die Scherfestigkeit von der Kornverteilung im Feinkorn- und im Grobkornbereich abhängig. Bei Mischböden sind auch die Lagerungsdichte und die Wassersättigung für die Scherparameter relevant. Bei Mischböden nimmt die Scherfestigkeit gegenüber den feinkörnigen Böden zu.

Boder	nart nach	Ton- und Schluffanteil	Reibungswinkel Φ in °	Kohäsion c in kN/m²
sandig- Mischboden	kiesiger	< 5-8%	35°- 40°	0 – 5 kN/m²
schwach gemischtkörn Sand- oder K	tonig-schluffiger iger iesboden	5-8% und 15- 20%	32,5° - 37,5°	0 – 10 kN/m²
Stark gemischtkörn Sand.oder Ki	tonig-schluffiger iger esboden	15-20% bis 40%	30° - 35°	10 – 30 kN/m²
Bindiger Mischboden	(feinkörniger)	>40%	25° - 30°	20 – 40 kN/m²

# Tab. 52: Gruppeneinteilung der Scherfestigkeit in 4 Gruppen nach DIN 18196 und LEUSSINK et al. (1964)

Die Restscherfestigkeit von Massenbewegungen ist einer der wichtigsten Parameter für die Stabilität des Hanges und entscheidend für das Verständnis des Rutschmechanismus. Verantwortlich dafür sind in erster Linie der Boden die vertikalen Belastungen und die Scherfestigkeitsparameter. Durch die Aufnahme von Wasser kommt es zu hohen Reibungsverlusten. Alle Hintergrundinformationen zu den Ergebnissen und die Interpretation zum Thema der Hangstabilität kann der Diplomarbeit von Christine Schönberger entnommen werden. Die Messungen der Scherversuche und der Tonmineralanalyse ergaben Zusammenfassend folgende Werte.

Bodenprobe	<b>Reibungswinkel</b> φ [°]	Kohäsion c [kN/m²]	Tongehalt [%]
Probe rot	17	9	16,6
Probe weiß	15	30	17,5

Tab. 53: Ergebnisse der Scherparameter, (Diplomarbeit von Christine Schönberger, 2012)

Für einen Vergleich der Ergebnisse kann die Literatur nach WEN et al. (2007) herangezogen werden. In dieser Studie wurden mehrere Massenbewegungen die im Einstaubereich der Drei-Schluchten-Staumauer liegen analysiert und zusammengefasst.

Bodenprobe	<b>Reibungswinkel</b> φ [°]	Kohäsion c [kN/m²]	Tongehalt [%]
Huangtupo 1	13 -18	-	20
Huangtupo 2	18 -22	-	14
Huangtupo 3	nicht vorhanden	-	28
Huangtupo 4	nicht vorhanden	-	19

 Tab. 54: Zusammenfassung der Scherparameter Huangzupo Rutschung, (WEN et al. (2007)

 Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China

Tabelle 55 zeigt einen Ausschnitt von Scherparameterbereichen (Reibungswinkel und Kohäsion) und Bodenkennwerten unterschiedlicher Bodenart bzw. Bodengruppen. Die Parameter wurden aus unterschiedlichen Laborversuchen ermittelt. Es handelt sich bei dem Auszug der Werte hauptsächlich um die Bodenart Schluff und Ton. Weiter sind in der Tab. alle Literaturangaben angeführt. In der Auflistung ist zu erkennen, dass es einen deutlichen der Schwankungsbereich der Ergebnisse gibt. Zum genauen Vergleich werden Bodenarten im gering plastischen bis mittelplastischen Ton herangezogen. In diesem Bereich kann zusammenfassend ein Reibungswinkel  $\varphi$  in ° von 20° bis 28° und eine Kohäsion c in kN/m<sup>2</sup> von 20 – 100 angenommen werden. Grund für die großen Unterschiede der Parameter ist die veränderliche Durchführung der Feld- und Laborversuche menschliche sowie maschinelle Fehlerquellen aber hauptsächlich die unterschiedlichen natürlichen Gegebenheiten, das Bodenmaterial.

Interpretation und Schlussfolgerung

Bodenart	Bodenzustand Bodenbezeichnung	Reibungswinkel φ [°]	Kohäsion c [kN/m²]	
ÖNC Die Tabelle wurde m	DRM B 4400-1:2010, DIN 18196 it den Werten der Kohäsion nach	und LEUSSINK et al. (1964). 1 der Tabelle von SCHNELL (1984	) erweitert.	
Schluff, oder Ton organisch	or Si, or Cl	18° - 26°	20-70	
Ton, ausgeprägt plastisch	CI, A	12° - 20°	30-100	
Ton, mittelplastisch	CI, M	20° - 28°	20-80	
Ton, leicht plastisch	CI, L	24° - 32°	15-60	
Schluff, ausgeprägt und mittelplastisch	Si, A, M	25° - 33°	10-30	
Schluff, leicht plastisch	Si, L	28° - 35°	5-20	
	ÖNORM B 4435-2 und Ö	NORM B4431-1	<i></i>	
Schluff, Ton	steif	22,5	0	
	halbfest	22,5	10	
Ton	Steif	20	0	
	halbfest	20	10	
Durchschnittswerte der Scherfestigkeitsparameter (PRINZ, 1997)				
schwach bindiger Boden		25°- 27,5°	0 - 5 kN/m² - 0 - 40 kN/m²	
stark bindiger Boden		15°- 20°	10 - 25 kN/m² - 20 - 100 kN/m²	
organische Böden		5°- 15°	0 - 5 kN/m² -	

Tabelle 55: Zusammenfassung der Scherfestigkeitsparamter

Eine weitere Möglichkeit ist die Berechnung der Restscherfestigkeit. Für ein Beispiel wird die Berechnung nach SKEMPTON (1964) herangezogen. Für diesen Ansatz wurde davon ausgegangen, dass der Tongehalt einen beträchtlichen Einfluss auf die Bestimmung der Restscherfestigkeit hat. Damit lässt sich mittels der Formel

 $\tan \theta = 0.74 \times e^{-1.6 \mathrm{s} x T}$ 

SKEMPTON (1964) Stability oft he foundations of Monar Dam. Trans 8th Cong. Large Dams1, 425-441. Edingburgh - Residual strength of clay

der Reibungswinkel annäherungsweise berechnen.

Das Ergebnis aus der Berechnung brachte ein Resultat von:

Bodenprobe	Reibungswinkel φ [°]	Tongehalt [%]
rote Probe	28	17
weiße Probe	29	18

Tab. 56: Ergebnisse der Berechnung nach SKEPTON (1964)

Aufgrund der Veranschaulichung der oben angeführten Scherfestigkeitsparameter lässt sich erkennen, dass der Streuungsbereich sehr weitläufig ist. Es ist jedoch zu erkennen, dass nicht nur die aktuellen Vorkommnisse vor Ort, sondern auch die Untergrundinformationen geschichtlichen wichtige Hinweise über das Untersuchungsgebiet liefern. Eine Belastung in der Vergangenheit (Konsolidation des Bodens) ist für die Auswertung und Berechnung der Stabilität von großer Bedeutung. Weiter spielen die eingehenden Paramter eine wichtige Rolle. So lassen sich variable von konstanten Parametern unterscheiden. Die variablen Parameter wie beispielsweise das Klima und der Niederschlag sind äuslösende Faktoren. Infolge dessen Aussage steigt auch gerade im Gebiet des Drei-Schluchten-Projekts das Risiko der Massenbewegungen. Wasser ist eines der hauptauslösenden Faktoren in diesem Gebiet. Durch den Aufstau der wechselnden Wasserstände von 135 m auf 175m gelangt das Wasser in die Poren des Bodens. Dadurch wird Porenwasserdruck erzeugt. Dieser breitet sich in den Spalten und Klüften des Felsens und des rutschfreudigen tonigen Materials aus. Daraus resultiert ein Strömungsdruck und führt zu einem Reibungsverlust.

Durch das Auftreteten der oben erwähnten Parameter kommt der Hang in Bewegung, und kann derzeit nur durch technische Maßnahmen wie stabilisierende Uferschutzbauwerke und der Böschungssicherung aufgehalten werden.

### 6 Literaturverzeichnis

ADAM D.: Grundbau und Bodenmechanik. Studienunterlagen zur Vorlesung SS2009, 1. Auflage, Institut für Geotechnik, Fachbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, März 2009

ABRAMSON L.W., LEE T.S., SHARMA S., BOYCE G.M.: Slope Stability and Stabilization Methds. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002

ATTERBERG A.: Die rationelle Klassifikation der Sande und Kiese. Chemiker-Zeitung, Band 29, S. 195–198, 1074, 1905

BLUM W.E.H.: Bodenkunde in Stichworten. 6. Auflage, Hirts Stichwortbücher, Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart 2007

BUNZA G., KARL J., MANGELSDORF J.: Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde. 2. Auflage, Schriftreihe des Bayrischen Landesamt für Wasserwirtschaft, Heft 17, 1982

CHEN L., TALWANI P.: Reservoir-induced Seismicity in China. Published in Pure and Applied Geophysics, pp: 133-149, Birkhäuser Verlag, Basel 1998

CHEN X.C.: Slope type and stability in the Three Gorges Reservoir. Published in Sichuan Science and Technology Press, 1993 [in Chinese with English Abstract]

CORRENS C.W.: Einführung in die Mineralogie (Kristallographie und Petrologie). Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1949

CZURDA & GINTHER, und SCHETELIG, 1994,: Quellverhalten der Molassemergel im Pfänderstock bei Bregenz, Österreich. – Mitt. Öster. Geol. Ges., 76, 141-160, 5 Abb. Wien, 1983: 159

DENG Q.L., ZHU Z.Y., CIU Z.Q., WANG X.P.: Mass rock creep and landsliding on the Huangtupo slope in the reservoir area of the Three Gorges Projekt, Jangtse River, China. Engineering Geology, No.: 58, S.67-83, 2000

DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L., IBSEN M.L.: Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. John Wiley & Sons, 1996

FAN X.: Three Gorges revisited. Published in Chinese National Geographic, Issue 4, 2006

GEMMER M.: Decision Support fpr Flood Risk Management at the Jangtse River by GIS/RS-based Flood Damage Estimation. Dissertation an der Justus-Liebig-Universität Gießen, 2004

GENSKE D.D.: Ingenieurgeologie. Grundagen und Anwendung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006

GRIM R. E., Applied Clay Mineralogy., McGraw-Hill Book Company, 1962

HÄCKEL H.: Meteorologie. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, UTB, 2005

HALL P.L., Clays: their significance, properties, origins and uses. In: M.J. Wilso. A Handbook of determinative methods in clay mineralogy. Glasgow: Blackie&Son, S.1-25, 1987

HARTMANN H.: Das Drei-Schluchten-Projekt und sein Einfluss auf die Hochwassersituation am Mittellauf des Jangtse. Diplomarbeit an der Justus-Liebig-Universität Gießen, 2002

HARTMANN H., BECKER S.: Critical discussion of the Three Gorges Project's Consequences, published in Journal of Lake Sciences, pp 249-254, 2003

HEIM D., Tone und Tonminerale: Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie., Stuttgart: Enke, 1990

HE K., LI X., YAN X., GUO D.: The landslides in the Three Gorges Reservoir Region, China and the effets of water storage and rain on their stability. Published online: Springer-Verlag, 2007

HE K., YU G., LI X.: The regional distribution regularity of landslides and their effects on the environments in the Three Gorges Reservoir Region, China. Published online: Springer-Verlag, 2008

INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES WORKING GROUP ON LANDSLIDES.: A Suggested Method for Describing the Rate of Movement of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 52, S. 75-78, Paris, 1995

KEMPFERT H.-G., RAITHEL M.: Bodenmechanik und Grundbau. Band 1 Bodenmechanik, BauwerkVerlag, Berlin, 2007

KING L., GEMMER M.: Methodical Approaches for Flood Research as Part of Sustainable Development in the Jangtse River Valley, P.R. China. Published in Ecosystem Service and Systainable Watershed Management in North China, International Conference, Beijing, P.R. China, 2000

KING L., HARTMANN H., GEMMER M., BECKER S.: Der Drei-Schluchten-Staudamm am Jangtse – Ein Großbauprojekt und seine Bedeutung für den Hochwasserschutz. Veröffentlicht in PGM Petermanns Geographische Mitteilungen, 148, 2004/5

LI J.: Das größte Wasserprojekt auf der Welt. Das grosse Drei-Schluchten-Projekt. China, 2005

LIENBACHER F., SCHWINGENSCHLÖGL R., PERFLER D.,: Spezialexkursion China, Reisebericht der Universität für Bodenkultur Wien, 2012

LIU C., LIU Y., WEN M., LI T., LIAN J., QIN S.: Geo-hazard Initiation and Assessment in the Three Gorges Reservoir. Published in Landslide Disaster

Mitigation in Three Gorges Reservoir, China, Environmental Science and Engineering, WANG F., LI T. (Eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009

LU F.X., SANG L.K.: Petrology. Bejing, China, Geology Press, 2004

MEYER-KRAUL N.: Geomechanische Eigenschaften von von Röttonsteinen. – Diss. FB Bauing. GhK Kassel, 110S., Abb. U. Taf. Kassel (GhK)

MILLOT G.:Geology of clays., Paris: Masson et C<sup>ie</sup>, 1970

MOORE D.M. & REYNOLDS R.C.: X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, Oxford University Press, 1997

NEHR, H.P.: Doktorarbeit: Zeitabhängige Materialverhalten und Anisotropie von weichen Böden – Theorie und Anwendung, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, 2008

OTTNER, F., GIER, S., SCHWAIGHOFER, B. (1997): Vorläufige Ergebnisse eines Methodenvergleiches (Ringversuches) zur quantitativen Tonmineralanalyse. – In: WAGNER J.-F. [Hrsg.]: Quantitative Tonmineralanalyse, Beiträge zur Jahrestagung Trier. S.45-51, Trier

PEEL M.C., FINLAYSON B.L., McMAHON T.A.: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. publiziert im Hydrology and Earth System Sciences, 11 pp. 1633-1644, 2007

PRINZ H.: Abriss der Ingenieurgeologie, mit Grundlagen der Boden und Felsmechanik, des Erd-, Grund- und Tunnelbaus sowie der Abfalldeponien. Ausgabe 3, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1997

PONSETI M., LÓPEZ-PUJOL J.: The Three Gorges Dam Projectin China: history and consequences. Published in ORIENTATS-2006, ISSN 1696-4403, 2006

PREGEL O.: Handbuch der Geotechnik. Zusammensetzung, Zustand und Struktur von Gesteinen. Band 7, Eigenverlag des Institutes für Geotechnik, Universität für Bodenkultur, 1998

PREGEL O.: Handbuch der Geotechnik. Böschungen. Band 10, Eigenverlag des Institutes für Geotechnik, Universität für Bodenkultur, 1998

PRESS F., SIEVERS R.: Allgemeine Geologie: Eine Einführung. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1995

QI S., YUE Z.Q., WU F., CHANG Z.: Deep weathering of a group of thick argillaceous limestone rocks near Three Gorges Reservoir, Central China. Published in the International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, No. 46, pp. 929-939, Elsevier LTd., 2009

SALDEN D.: Bestimmung der Scherfestigkeit künstlich verdichteter Schüttungen aus Ton- und Schluffsteinen,.-Ber.7.Nat. Tag. Ing.Geol. Bensheim 99-106. 11 Abb.; Essen (DGGT), 1989 SCHÖNWIESE C.-D.: Klimatologie. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, UTB, 2008

SCHRÖDER, D.: Bodenkunde in Stichworten, Berlin-Stuttgart, 1992

SCHULTZE, E., MUHS, H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, New York, 1967

SELBY M.J.: Hillslope Materials and Procsess, 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Oxford University Press, 1993

SKEMPTON A.W., HUTCHINSON J.: Stability of Natural slopes and Embankment Foundation. Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1969

SMOLTCYZK U.: Grundbuch- Taschenbuch. Teil: 1 Geotechnische Grundlagen. Sechste Auflage, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und rechnische Wissenschaften GmbH, Berlin, 2001

SCHMIDT H.H.: Grundlagen der Geotechnik. Bodenmechanik-Grundbau-Erdbau. B.G.Teubner Verlag, Stuttgart, 1996

SCHNELL W.: Grundbau und Bodenmechanik. Studienunterlagen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der technischen Universität Braunschweig, Braunschweig, 1984

TANG H.M., DENG Q.L.: Research Report of deformation characteristics a mechanism of slopes with Badong formation in the Three Gorges Reservoir. China University of Geosciences, Wuhan. Published in WU F. et al., editors: Research report of some significant landslides existing hot disputations in the Wanzhou County, the Fengjie County, the Wushan County and the Badong County, the Three Gorges Reservoir, Vol. IV, Bejing, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, 2005 [in Chinese with English Abstract]

VARNES D.J.: Slope Movement Types and Processes. In: Schuster R.L. & Krizek R.J. Ed., Landslides, analysis and control. Transportation Research Board Sp. Rep. No. 176, National Academy of Science, pp. 11-33, 1978.

VEDER C.: Rutschungen und ihre Sanierung. Springer-Verlag, Wien New York, 1979

WANG R.: Hochwasserschutzplanung am Mittleren Jangtse: Hintergründe, Vergleich und neue Lösungsansätze. Dissertation an der Justus-Liebig-Universität, Gießen, 2002

WANG S.: Test Methods on the Impact of Residual Strength of Sliding Zone Soil in Huangtupo Landslide in the Three Gorges Area, China. Dissertation submitted to China University of Geosciences, China, 2010

WANG Y., ZHOU C., ZHOU Y., HUANG H., HUANG Z., LI Y., YU J., XU L., XIE H., REN Z., SUN G., ZHAO G., NI Z.: Geological Engineering and Survey Report of

Badong large-scale Field Test Spot in Three Gorges Reservoir Area, Chang Jiang Institute of Survey Planning Design and Research, 2009

WEN P.P B.P. Wen a, A. Aydin b, N.S. Duzgoren-Aydin b, Y.R. Li b, H.Y. Chen c, S.D. Xiao, Residual strength of slip zones of large landslides in the, Three Gorges area, China, Engineer Geology, 2007

WP/WLI (THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETIES UNESCO WORKING PARTY ON WORLD LANDSLIDE INVENTORY), POPESCU M.E.: A suggested method for reporting landslide causes. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 41, S. 5-12, Paris, 1990

WP/WLI (THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETIES UNESCO WORKING PARTY ON WORLD LANDSLIDE INVENTORY), POPESCU M.E.: A suggested method for describing the causes of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 50, S. 71-74, Paris, 1994

WU J., HUANG J., HAN X., GAO X., HE F., JIANG M., JIANG Z., PRIMACK R.B., SHEN Z.: The Three Gorges Dam: an ecological perspective. Published in Frontiers in Ecology and the Environment, pp. 241-248, 2003

WU S., WANG H., HAN J., SHI J., SHI L., ZHANG Y.: The Application of Fractal Dimensions of Landslide Boundary Trace for Evaluation of Slope Instability, 2009

WU W.: Geotechnik I. Arbeitsunterlagen zur Lehrveranstaltung, Universität für Bodenkultur, 2010

ZHANG J.: Variation of mechanical Property of marlite in Process of Karstification and weathering in the Three Gorges Region. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, pp. 1073-1077, 2004 [in Chinese with English Abstract]

ZHANG T., YAN E., CHENG J., ZHENG Y.: Mechanism of Reservoir Water in the Deformation of Hefeng Landslide. Published in Lournal of Earth Science, Vol. 21, No. 6, pp. 870-875, China University of Geosciences and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010

XIA.Y., KAUFMANN. H.,: D-INSAR-Forschung in China: Monitoring und Analyse von Absenkungen und Hangrutschungen, GeoForschungszentrum - Zwischenbericht, 2004/2005

#### NORMEN:

ÖNORM CEN ISO/TS 17892-2, Geotechnische Erkundung und Untersuchung -Laborversuche an Bodenproben - Teil 2: Bestimmung der Dichte von feinkörnigem Boden (ISO/TS 17892-2:2004)

EN ISO 14688-1:2002 (Deutsche Fassung): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1:Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2002) (August)

EN ISO 14688-2:2004 (Deutsche Fassung): Geotechnische Erkundung und Untersuchung Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden . Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO 14688-2:2004)

DIN 18 196: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2006

ÖNORM B4412: Erd- und Grundbau. Untersuchung von Bodenproben, Korngrößenverteilung, 1974

ÖNORM B4400-1: Geotechnik, Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden, 2008

ÖNORM prEN ISO 14688-2: Geotechnische Erkundungen und Untersuchung-Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil2: Grundlagen von Bodenklassifizierung (ISO 14688-2:2004), 2004

ÖNORM L 1083: Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Acidität (pH-Wert), 2006

ÖNORM L 1099: Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit, 2007

ÖNORM L1086: Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung von austauschbaren Kationen und Austauschkapazität (Kationenaustauschkapazität), 1989

ÖNORM L1084: Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung von Carbonat, 1989

ÖNORM B 4435-2 und ÖNORM B4431-1 Erd- und Grundbau – Flächengründungen Teil 1: Berechnung der Tragfähigkeit bei einfachen Verhältnissen

ÖNORM B4810:2006 und RVS 8S.05.11:1997 ÖNORM B 4810 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Frostsicherheit von Gemischen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau

#### INTERNET:

CHINA THREE GORGES PROJECT CORPORATION (CTGPC) ©2000: <u>http://www.ctg.com.cn/en/owner/owner\_a.php</u>,

abgerufen am 24.11.2011, 10:00

CHINA THREE GORGES PROJECT CORPORATION (CTGPC) ©2002-2010: http://www.ctg.com.cn/en/owner/owner\_a.php,

abgerufen am 03.04.2011, 10:00

Wikipedia I, Die freie Enzyklopädie: Flüsse mit einer Länge von mindestens 1.000 km:

http://de.wikipedia.org/wiki/Liste\_der\_I%C3%A4ngsten\_FI%C3%BCsse\_der\_Erde, abgerufen am 24.01.2012, 16:00

Wikipedia II, Die freie Enzyklopädie: Liste der größten Wasserkraftwerke der Erde: <u>http://de.wikipedia.org/wiki/Liste\_der\_gr%C3%B6%C3%9Ften\_Wasserkraftwerke\_de</u> <u>r\_Erde</u>,

abgerufen am 10.01.2012, 16:00

WikipediaIII,DiefreieEnzyklopädie:Braag-Gleichung:<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Bragg-Gleichung">http://de.wikipedia.org/wiki/Bragg-Gleichung</a>Braag-Gleichung:abgerufen am 06.08.2012, 9:00

Traveling ist Life: Lage der Drei-Schluchten und des Drei-Schluchten-Projekts: <u>http://www.travelingislife.com/images/map\_sx11.jpg</u>,

abgerufen am 24.11.2011, 10:00

China Geological Survey: Geologische Karte von China: http://www.cgs.gov.cn/Ev/English.htm, abgerufen am 24.11.2011, 10:00

Travel China Guide: Überblick über die geographischen Lage des Jangtse: <u>http://www.travelchinaguide.com/images/map/Jangtse-river/location.jpg</u>, abgerufen am 03.04.2012, 10:00

World Maps and Satellite Photos ZONU: Geologische Gefahrenkarte von China: http://www.zonu.com/detail-en/2011-08-03-14242/Geological-hazard-map-of-China.html

abgerufen am 24.11.2011, 10:00

Wikipedia III, Die freie Enzyklopädie: BET-Messung http://de.wikipedia.org/wiki/BET-Messung, abgerufen am 25.05.2012, 14:45

## 7 Anhang

### 7.1 Aufnahmen im Feld



Abb. I: linkes Bild: Tunneleingang (1) stromaufwärts des Jangtse (~Westen) Abb. II: rechtes Bild: Tunneleingang (2) stromabwärts des Jangtse (~Osten)



Abb. III: Draufsicht auf einen Teil der Rutschung, Tunneleingang 1



Abb. IV: Huangtupo Rutschung, Betrachtung vom Gegenhang



Abb. V: linkes Bild: Massive Uferverbauungent unterhalb der Rutschung, rechtes Bild: Hangsicherung



Abb. VI: linkes Bild und

rechtes Bild: Begehung des Hanges



Abb. VII: linkes Bild und rechtes Bild: Wohnhäuser auf der Hangrutschung, (Lage: über dem Tunnelportal stromaufwärts des Jangtse)



Abb. VIII: Zwei von den insgesamt sieben GPS-Messpunkten



Abb. IX: links: Messstelle für den Grundwasserspiegel Abb. X: rechts: Wetterstation



Abb. XI: links: Einrichtung zur Messung von Verformungen im Hangbereich Abb. XII:rechts: Messhacken an der Tunnelwand



### Eindrücke des Drei-Schluchten-Projekts

Abb. XIII: Grundriss-Plan des Drei-Schluchten-Projekts



Abb. XV: fünf Stufen Doppelschleuse



Abb. XVII: Dimensionen der nördlichen Schleusenkammer



Abbildung XIV: Gründungsgestein (Granit)



Abbildung XVI: Besucherareal



Abb. XVIII: Schwergewichtsmauer mit Blick auf die Aufstauung



Abb. XIX: Drei-Schluchten-Staumauer



Abb. XX: Wasserseite der Drei-Schluchten-Staumauer

### Eindrücke vor Ort in Badong



Abb. XXI: Auf dem Weg zur Gegenhangbesichtigung



Abb. XXII: Vorbereitungen zur Hangbegehung



Abb. XXIII: Arbeitsraum des Außendepartements der Universität Wuhan





Abb. XXIV: Sicht auf den Jangtse-Strom

Abb. XXV: Sicht auf die Rutschung beim Tunneleingangsbereich





Abb. XXVI: Wohnhäuser auf der Abb. XXVII: Andere Rutschung in Badong Huangtupo-Rutschung

### Eindrücke vom Untersuchungstunnel



Abb.XXIX: Tunnelbegehung (Oktober 2011)



Abb. XXX: Ortsbrust eines Sekundärtunnels



Abb. XXXII: Tunnelportal stromaufwärts



Abbildung XXVIII: geologische Begutachtung von ao. Univ-Prof.i.R. Dr. R. Schwingenschlögl



Abbildung XXXI: Ausleuchtung

### Eindrücke vom Untersuchungsstollen TP4



Abb. XXXIII: Stollen TP4



Abbildung XXXIV: Beispiel einer Probenentnahme inklusive Beschreibung der Lage



Abbildung XXXVI: Stolleneingang des Erkundungstunnels



Abb. XXXV: Tunnelfirste



Abb. XXXVII: Kalkausfällungen an den Wänden

Abb. XXXVIII: Vorbereitungen zum Rahmenscherversuch



Abb. XXXIX: Probenvorbereitungen zur Siebanalyse



Abb. XL: Vorbereitungen für die XRD-Untersuchung

### Eindrücke aus dem Labor

### 7.2 Bestimmung der äußeren Oberfläche

Die Versuche der roten und weißen Proben wurden auf der Universität in Wuhan durchgeführt. Unten dargestellten Protokolle zeigen die daraus resultierten Ergebnisse. Für die Durchführung wurde das BET – Verfahren angewendet. BET ist die Abkürzung für die Namen der Entwickler des Modells. Diese lauten: Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett und Edward Teller (WIKIPEDIA III, 2012). Das Verwendetet Gerät hat die Bezeichnung Autosorb iQ,F-Sorb 3400.



洋桥信官

#### 比表面积测试报告

#### F-Sorb 3400比表面积及孔径测试化

样品名称	TP4AR	仪器型号	F-Sorb 3400比表面积及孔径测试		
送检单位	cug	检测单位	cug		
测试人员	Cui Deshan	送检日期	2011-11-10		

#### 测试信息

样品重量	1008.00 (mg)	样品预处理	105 D for 10h	
测试方法	多点BET			
环境温度	18		13 200096 (m2/a)	
报告日期	2011-11-10	00 PAPER 76	13.235000 (m2/g)	



National Agent	100.0	2.0	dial -	1000
11237	344	14	377	सर
1 - H	1000	100	250	211

www.app-one.com.cn

P/P0	实际吸附量V(ml)	(P/P0)/(V*(1-P/P0))	单点BET比表面积
0.261888	3.428740	0.104309	10.926598
0.204130	2.902098	0.089087	9.972007
0.156851	2.475832	0.075740	9.012676
0.104384	2.074081	0.056643	8.020029
斜率	截距	单层饱和吸附量Vm(ml)	吸附常数C
0.300416	0.026825	3.055856	12.199128
线性拟合度	比表面积(m <sup>*</sup> /g)	碳黑外比表面积	Langmuir比表面积
0.996784	13.299086		26.457973

核对签章: 编号:

制造商:北京金续谱科技有限公司 F-Sorb 3400比表面积及孔径测试仪 技术支持: 010-88099139

#### Abb. XLI: Versuchsprotokoll für die Bestimmung der äußeren Oberfläche – Probe rot



迷路停车

#### 比表面积测试报告

#### F-Sorb 3400比表面积及孔径测试化

AQ12(17/05				
	样品名称	TP4BW	仪器型号	F-Sorb 3400比表面积及孔径测试
	送检单位	cug	检测单位	cug
	测试人员	Cui Deshan	送检日期	2011-11-10

#### 测试信息

样品重量	914.00 (mg)	并且苏州博	105 D for 10h	
测试方法	多点BET	件前顶处理		
环境温度	18	<b>劉治於年</b> 田	0 546550 (m2/a)	
报告日期	2011-11-10	网络和米	5.540530 (m2/g)	



#### 详细测试数据

P/P0	实际吸附量V(ml)	(P/P0)/(V*(1-P/P0))	单点BET比表面积
0.261888	2.090512	0.155127	7.347122
0.204130	1.745930	0.134271	6.616248
0.156851	1.432209	0.118720	5.749810
0.104384	1.182284	0.090102	5.041809
斜率	截距	单层饱和吸附量Vm(ml)	吸附常数C
0.404940	0.050932	2.193601	8.950636
线性拟合度	比表面积(m²/g)	碳黑外比表面积	Langmuir比表面积
0.992919	9.546550		20.978513

	核对签章:	
www.app-one.com.cn	编号:	
制造商:北京金埃谱科技有限公司	F-Sorb 3400比表面积及孔径测试仪	技术支持: 010-88099139

#### Abb. XLII: Versuchsprotokoll für die Bestimmung der äußeren Oberfläche – Probe weiß
## 7.3 Bestimmung der Poreneigenschaften

Die Mikroskopfotos wurden auf der Universität in Wuhan durchgeführt. Die Ergebnisse der roten und weißen Proben sind in der unten dargestellten Fotodokumentation ersichtlich.



Abb. XLIII: Mikroskop der University of Geosciences

Fotodokumentation der roten Probe - TP4R





Abb. XLIV: Mikroskopfotos rote Probe





Abb. XLV: Mikroskopfotos rote Probe Fotodokumentation der weißen Probe - TP4BW







Abb. XLVI: Mikroskopfotos weiße Probe



11:32:01 PM 9.7 mm 2000x 20.0 kV 3.5 ETD

11:33:30 PM 9.7 mm 5000x 20.0 kV 3.5 ETD





Abb. XLVII: Mikroskopfotos weiße Probe