

MITTEILUNGEN

**Institut für Geotechnik (IGtH)
Leibniz Universität Hannover**

Heft 73

Vulkanische Ascheböden als Straßenbaustoff

von

Cynthia Linero-Molina

Hannover 2011

Vulkanische Ascheböden als Straßenbaustoff

Von der

**Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover**

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation
von

M.Sc. Cynthia Linero-Molina

geboren am 08.11.1969, in Medellin / Kolumbien

2011

Die vorliegende Arbeit wurde als Dissertation im Rahmen des Promotionsverfahrens an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover eingereicht und angenommen.

Referent: Prof. Dr.-Ing. J. Hothan
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. M. Achmus
Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. N. A. Fouad

Tag der Promotion: 03.11.2011

Vorwort des Herausgebers

Die vorliegende Arbeit ist am Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie unter der Betreuung durch meinen Kollegen Prof. Jürgen Hothan entstanden. Dieses Fachgebiet ist seit dem Ausscheiden von Prof. Hothan in den Ruhestand nicht mehr besetzt, weshalb die Dissertation von Frau Linero in der Mitteilungsreihe des Instituts für Geotechnik veröffentlicht wird. Dies lag insofern nahe, als die Arbeit starke bodenmechanische und erdbauliche Bezüge aufweist und ich als Korreferent sowohl an der Bewertung als auch an der Entstehung beteiligt war.

Frau Linero stammt aus Kolumbien und hat sich eines in ihrem Heimatland drängenden Themas angenommen. In Südamerika sind Vorkommen vulkanischer Ascheböden im Bereich der Anden weit verbreitet. Entsprechend der großen Verfügbarkeit werden solche Böden vielfach als Baustoffe im Straßenbau eingesetzt. Dabei wurden immer wieder überraschende Phänomene hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit dieser Materialien festgestellt, woraus sich ergibt, dass die üblichen Methoden zur Untersuchung und Charakterisierung von Straßenbaumaterialien den speziellen Eigenschaften der Ascheböden nicht gerecht werden.

Frau Linero zeigt in ihrer Arbeit auf Grundlage zahlreicher experimenteller Untersuchungen die speziellen Eigenschaften und die Schwankungsbreiten der Parameter von vulkanischen Ascheböden auf und untersucht die Ursachen des speziellen Verhaltens. Darauf aufbauend erarbeitet sie Empfehlungen für die zweckmäßige Untersuchung und Charakterisierung solcher Böden. Die Arbeit trägt damit Wertvolles zum Verständnis und auch zur Lösung der spezifischen Probleme mit Vulkanascheböden bei.

M. Achmus

Danksagung

Mit dieser Arbeit möchte ich zum Verständnis eines der komplizierteren in der Geotechnik vorkommenden Böden in Kolumbien beitragen. Persönlich bedeutet diese Arbeit eine große Herausforderung, die nicht zu bewältigen gewesen wäre ohne die Hilfe und Unterstützung vieler Menschen und Institutionen.

Ich möchte in erster Linie Professor Dr.-Ing. Jürgen Hothan, meinem Doktorvater, herzlichen Dank sagen, für seine Zuwendung und sein Vertrauen während der Jahre, in denen diese Arbeit entstanden ist. Ich danke ihm für seine Hinweise, wissenschaftliche Unterstützung, kontroverse Diskussion und auch seine Bereitschaft mir bei allen Schwierigkeiten zu helfen, ebenso Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus für sein Interesse und seine Anregungen besonders im Hinblick auf die Findung des Themas. Für seine Geduld und Hilfe danke ich meinem Kollegen Dr.-Ing. Marc-Oliver Förster vielmals.

Meinen großen Dank muss ich dem „Deutschen Akademischen Austausch Dienst“, DAAD, aussprechen, der die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit geleistet hat.

Ich danke der Firma Ingeominas - Bogotá, insbesondere der Ingenieurin Y. Calderón, die mir die Nutzung des Labors ermöglicht hat und die chemische und mineralogische Analyse im experimentellen Teil dieser Arbeit maßgeblich unterstützt hat. Ich danke dem Ingenieur M.Villarraga und meinen Kollegen der Firma INTEINSA, dem Ingenieur J. Vidal, dem Laborpersonal der Universität Eafit – Medellín und dem Ingenieur O. Correa der Universität Manizales, der mir einen uneingeschränkten Zugang zu den Daten seines Labors ermöglicht hat.

Ich danke in Hannover Herrn. A. Seehausen, Prof. Dr. C. Buhl, Prof. Dr. Köpke, Dr. A. Holtz, Herrn Diedrich (Institut für Mineralogie) und Dr. T. Schnatzke (Chemielabor - Materialprüfanstalt), die mit echtem Interesse in ihren Labors wichtige Untersuchungen für mich durchgeführt haben. Prof. Dr. W. R. Fischer (Institut für Bodenkunde), Dr. F. Wolff, Dr. W. Lorenz, Dr. L. Winkelmann, Dr. L. Feldhaus und Dr. J. Hanisch (BGR Deutschland), Dr. Iskander (Polytechnic University Brooklyn), Dr. Ing. R. Verdugo (Universidad de Chile), Prof. G. Laporte (Universidad de Costa Rica) danke ich für ihre Ratschläge, hilfreichen Diskussionen und Kommentare, die mir sehr geholfen haben. Während der Bearbeitung konnte ich mit vielen Fachkollegen keinen persönlichen Kontakt aufnehmen, aber auch hier waren viele immer bereit, mich zu unterstützen und vor allem Ergebnisse zu diskutieren. In diesem Zusammenhang möchte ich mich besonders bei Dr. J.Churchman, Dr. R.L. Parfitt und Dr. L.D. Wesley für ihre Aufmerksamkeit und Unterstützung bedanken.

Besonderer Dank gilt nicht zuletzt auch den Menschen, die ich liebe, die mir über Jahre und mit Geduld bei der Diskussion über das Thema der vulkanischen Aschen zugehört haben und mich ermutigt haben die Dissertation zu Ende zu bringen.

Kurzfassung

Vulkanische Ascheböden bedecken einen weiten Teil des südamerikanischen Kontinents entlang den Anden. Hierdurch sind in diesen Regionen Aschen vor allem im Straßenbau aber auch bei anderen Baumaßnahmen ein wichtiger Baustoff. Doch es hat sich immer wieder gezeigt, dass Ascheböden ein sehr variables Verhalten aufweisen. Auf der einen Seite können mit diesem Baustoff sehr steile und stabile Böschungen oder Anschnitte im Verlauf von Straßen hergestellt werden und auf der anderen Seite gibt es sehr häufig plötzliche massive Rutschungen. Die Bestimmung der Bodenkennwerte, die für die Planung und den Bau notwendig sind, ergeben bei der Anwendung der traditionellen Verfahren der Bodenmechanik stark schwankende Laborergebnisse. Zudem kann mit diesen Daten das unterschiedliche Verhalten des Baustoffs Asche nicht ausreichend erklärt werden. Ziel der Untersuchungen ist es, die bodenspezifischen Kenngrößen der vulkanischen Ascheböden Kolumbiens differenziert zu betrachten und die Besonderheiten ihres mechanischen Verhaltens zu beschreiben. Dabei erfolgen die Untersuchungen vor dem Hintergrund der Übertragung der Ergebnisse auf die Anwendbarkeit in situ.

Aus Spektral- und Mikroskopanalysen ist bekannt, dass vulkanische Aschen auch Mineralien wie Allophan, Halloysit und Imogolit enthalten. Diese können unter bestimmten klimatischen Bedingungen aus der Verwitterung von vulkanischem Glas entstehen. Durch gezielte Laboruntersuchungen werden die Einflüsse dieser Mineralien auf die Bestimmung geotechnischer Eigenschaften eruiert. Hierfür standen Bodenproben aus der Kaffee-Region Kolumbiens zur Verfügung, einer Region mit starker Vulkanaktivität im Quartär. Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse wurden weitere Laboruntersuchungen durchgeführt, um das unvorhersehbare Verhalten der Ascheböden in situ zu untersuchen. Hierbei wird besonderer Wert auf den Einfluss des äußeren und inneren Wassers sowie der zementierenden Wirkung der in den Aschen vorkommenden Mineralien gelegt.

Aus den Untersuchungen folgt, dass eine eindeutige Charakterisierung der Ascheböden mit den traditionellen Methoden sehr schwierig ist, da anders als bei konventionellen Böden, die besondere Zusammensetzung der Aschen Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. In erster Linie werden die Ergebnisse durch den Wassergehalt aber auch durch die sehr empfindliche Struktur der Aschen geprägt. Für die Charakterisierung von Ascheböden werden aufgrund der Versuchsergebnisse Empfehlungen ausgesprochen. Aus den Untersuchungen des mechanischen Verhaltens in Anlehnung an reale Bedingungen resultieren zudem einige Handlungsanweisungen, die einerseits bei der Erkundung und der Planung im Umgang mit vulkanischen Aschen hilfreich sein können und andererseits ganz allgemein helfen, das mechanische Verhalten von Aschen besser zu verstehen.

Schlagwörter: vulkanische Aschen, Allophan, Wassergehalt, Standfestigkeit

Abstract

Volcanic ash soils cover a large part of the South American continent along the ridge of the Andes. Consequently, in these regions volcanic soils are involved, mainly in road construction and also in other projects as a very important material. It has been always shown that these soils have very different behaviors. On the one hand can be built very steep and stable slopes and on the other side, sudden massive landslides are developed frequently. The determination of soil parameters that are necessary for the planning and construction, shown in the application of traditional methods of soil mechanics large deviations in the laboratory results. For this reason, the different behaviors of the material can not be described adequately with these data. The objective of the investigation is to re-consider specific soil parameters and describe the particulars of their mechanical behavior. This exploration can apply the results in a better understanding of the behavior of the material in situ.

From spectral and microscopic analysis is well known that volcanic soils may also contain minerals such as allophane, halloysite and imogolite, which are formed from the weathering of volcanic glass under certain weather conditions. Through specific laboratory analysis are identified the influence of these minerals on the determination of geotechnical properties. For this purpose there were used some ash soils samples of the coffee region of Colombia, an area with strong volcanic activity in the Quaternary. Taking into account the observations were performed additional tests to investigate the unpredictable behavior of the ash soils in situ. In this process special emphasis is placed on the influence of external and internal water and the effect of cementing minerals present in the soil.

From this investigation it follows that a single unequivocal characterization of the ash soils with traditional methods is very difficult, because unlike conventional sedimentary and residual soils, the special mineralogical composition of volcanic ash soils has a great influence on the results. Primarily, the results are influenced by the water content at the time of the test, but also by the very sensitive soil structure. From these observations have been made recommendations with regard to characterization. The studies of mechanical behavior based on actual conditions also result in some suggestions that may be useful in the exploration, planning and material handling on site, as well as contribute to the understanding of the functioning of these soils in-situ.

Keywords: volcanic ashes, Allophan, water content, stability

Resumen

Los suelos de ceniza volcánica cubren buena parte del continente suramericano a lo largo de la cordillera de los andes. En estas regiones se ven por lo tanto involucrados en la construcción de vías y en otro tipo de proyectos como un material muy importante.

Se ha visto siempre que este tipo de suelo tiene diferentes comportamientos; de un lado es posible construir con el taludes de gran altura y alta pendiente, pero también es frecuente que se desarrollen repentinamente deslizamientos de gran magnitud. El estudio de la determinación de las propiedades básicas de este material con los procedimientos tradicionales ha permitido observar que pueden generarse grandes desviaciones en los resultados de laboratorio. Por esta razón no es posible a partir de estos datos definir claramente los diferentes comportamientos del material. El objetivo de esta investigación es poner en consideración los parámetros específicos del suelo y describir las particularidades de su comportamiento mecánico. Esta exploración permite aplicar los resultados en una mejor comprensión del comportamiento del material in Situ.

A partir de análisis de Rayos X y microscopía se conoce que los suelos de origen volcánico poseen minerales como el Allofán, la Haloisita y la Imogolita, que son formados a partir de la meteorización del vidrio volcánico bajo determinadas condiciones climáticas. A través de específicos análisis de laboratorio ha sido posible observar la influencia de estos minerales en la determinación de las características geotécnicas de este material. Con esta finalidad fueron utilizados suelos de ceniza de la región cafetera de Colombia, zona de gran actividad volcánica en el cuaternario. Considerando las anteriores observaciones se realizaron ensayos adicionales con el fin de estudiar el comportamiento inesperado de estos materiales in –situ. En este proceso adquiere una singular importancia la influencia del agua interna y externa así como el efecto cementante de las sustancias minerales presentes en el suelo.

De esta investigación se concluye que una caracterización definitiva de los suelos de ceniza volcánica a través de los métodos tradicionales resulta muy difícil, ya que a diferencia de los suelos residuales y sedimentarios convencionales, la especial composición mineralógica tiene una gran influencia en los resultados. Los datos están en primer lugar determinados por el contenido de agua en el momento de la prueba, y adicionalmente, por la sensible estructura del suelo. A partir de estas observaciones se formulan entonces recomendaciones con relación a la caracterización. El análisis del comportamiento mecánico, basado en condiciones reales, da lugar también a algunas sugerencias que pueden ser útiles en la exploración, planeación y manejo del material en obra, así como contribuir en la comprensión del funcionamiento de estos suelos in –situ.

Palabras claves: cenizas volcánicas, Alófana, contenido de agua, estabilidad

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	VII
1. EINFÜHRUNG	1
1.1. Hintergrund	1
1.2. Zielstellung	2
1.3. Vorgehensweise	2
1.4. Inhalt	3
2. CHARAKTERISIERUNG VON VULKANISCHEN ASCHEBÖDEN	5
2.1. Allgemeines	5
2.1.1. Geographische Verteilung	5
2.1.2. Physikalische und chemische Entstehung	6
2.2. Mineralogische Eigenschaften	8
2.2.1. Allgemeines	8
2.2.2. Besondere Bestandteile Allophane, Imogolite und Halloysite	9
2.2.3. Struktur der besonderen Bestandteile	10
2.2.4. Mineralogische Charakterisierung	12
2.2.4.1. Experimentelle Untersuchung der andischen Eigenschaften	15
2.2.4.2. Experimentelle Bestimmung des Allophananteils	18
2.2.4.3. Röntgenbeugungsanalyse XRD des Bodens	26
2.2.4.4. Bestimmung der mineralogischen Bestandteile	29
2.3. Physikalische Eigenschaften	31
2.3.1. Wassergehalt und Permeabilität	32
2.3.2. Korngrößenverteilung	33
2.3.3. Zustandsgrenzen	33
2.3.3.1. Experimentelle Untersuchung der Zustandsgrenzen	35
3. MECHANISCHES VERHALTEN	41
3.1. Veränderung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens durch Verdichtung	41
3.1.1. Literaturübersicht	41
3.1.2. Wirkung der Strukturveränderung des Bodens	43
3.1.3. Sensitivität der vulkanischen Aschenböden	45

3.1.3.1.	Experimentelle Untersuchung der Strukturveränderung	49
3.2.	Die Zusammendrückbarkeit und die Festigkeitserzeugung durch Zementation	57
3.2.1.	Literaturübersicht	57
3.2.2.	Experimentelle Überprüfung der Zementation	60
3.2.2.1.	Druckversuch mit verhinderter Seitendehnung (Ödometerversuch)	60
3.2.2.2.	Kastenscherversuche	65
3.3.	Festigkeitserzeugung und Festigkeitsverlust	71
3.3.1.	Literaturübersicht	71
3.3.2.	Experimentelle Untersuchung der Festigkeitserzeugung	73
3.3.3.	Die Veränderung der Festigkeit in situ	85
4.	ANALYSE VON LABORERGEBNISSEN	101
4.1.	Allgemeines	101
4.2.	Clustering mit WEKA	102
4.3.	Analyse von vulkanischen Ascheböden	103
4.3.1.	Auswahl der Daten	103
4.3.2.	Übersicht der Daten	103
4.3.3.	Clustering	104
5.	ERGEBNISSE UND EMPFEHLUNGEN	121
6.	ZUSAMMENFASSUNG	125
	LITERATUR	129
	ANHANG	

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Verteilung von vulkanischen Ascheböden in der Welt [Mo72].....	6
Abbildung 2:	Verwitterung primärer gesteinsbildender Mineralien. Nach Fields und Swindale, 1954 [To85].....	7
Abbildung 3:	Modell der Struktur von Allophan- Partikeln vor und nach Remoulding (nach [Ma77])......	11
Abbildung 4:	Elektronenmikroskopbilder von Al – reichen Allophanen. Äußere Durchmesser der Sphären 4–5 µm [Pa90].....	12
Abbildung 5:	Links: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Imogolit [Pa09]. Rechts: Halloysite – röhrenförmige Morphologie. [Ro34].....	12
Abbildung 6:	Andosol von den Azoren- Portugal. Ungestörte Klumpen auf der linken Seite und gestörte Klumpen auf der rechten Seite. Der Boden erreicht die Fließgrenze, wenn er mit starkem Druck gestört wird, obwohl er im originalen Zustand relativ trocken aussieht [En08]......	13
Abbildung 7:	Vergleich der Ergebnisse nach der Methode von Cascaredo und Parfitt.....	21
Abbildung 8:	Fließ- und Ausrollgrenze versus Allophananteil für die Proben aus Circasia (nach der Methode von Cascaredo [Ca01]. Zustandsgrenzen nach alternativer Methode).....	22
Abbildung 9:	Fließ- und Ausrollgrenze versus Allophananteil für die Proben aus Circasia (nach der Methode von Cascaredo [Ca01]. Zustandsgrenzen nach konventioneller Methode).....	23
Abbildung 10:	Allophananteil (nach verschiedenen Methoden) – Einaxialdruckfestigkeit.....	23
Abbildung 11:	Allophananteil (nach verschiedenen Methoden) vs. Wassergehalt.....	24
Abbildung 12:	Allophananteil (nach verschiedenen Methoden) vs. Trockendichte.....	24
Abbildung 13:	Beziehung von Allophananteil vs. Schrumpfen und Fließgrenze [Wa02].....	25
Abbildung 14:	Beziehung von Allophananteil vs. Wassergehalt und Fließgrenze [So98].....	25
Abbildung 15:	Beziehung von Allophananteil vs. Ausrollgrenze und Liquiditätszahl. [So98].....	26
Abbildung 16:	X-Ray Diffraktogramm eines Karbonat Bodens [Si02].....	27

Abbildung 17: XRD Untersuchung einer Bodenprobe mit verschiedenen Bearbeitungen. Bilder: Prof. Dr. Christian Buhl. Institut für Mineralogie. Universität Hannover	28
Abbildung 18: Veränderung der Plastizität durch Trocknung [We10].....	34
Abbildung 19: Klassifizierung von vulkanischen Ascheböden im Casagrande Plastizitätsdiagramm [Ra95].....	35
Abbildung 20: Klassifizierung mit und ohne Voraustrocknung	36
Abbildung 21: Komparatives Schema von Fließ- und Ausrollgrenze von Probe C2M3 in unterschiedlichen Zuständen.	37
Abbildung 22: Komparatives Schema von Fließ- und Ausrollgrenze von Probe C1M8 in unterschiedlichen Zuständen.	38
Abbildung 23: Komparatives Schema von Fließ- und Ausrollgrenze von Probe C6M3 in unterschiedlichen Zuständen.	39
Abbildung 24: Verdichtungsprüfung nach verschiedenen Behandlungen [We73]	42
Abbildung 25: Ergebnisse mit dem Cone Penetrometer im Vergleich zur Verdichtungsenergie.	43
Abbildung 26: Allophan-Boden in seinem ungestörten Zustand [Ja89].....	44
Abbildung 27: Spannungs –Verformungskurven für gestörtes und gelagertes Material aus Waitui [Ja89].....	44
Abbildung 28: Allophan-Boden in seinem gestörten Zustand. Imogolit-Fäden sind mit Pfeilen gekennzeichnet [Ja89]	45
Abbildung 29: Sensitivität vs. ungestörte Einaxialdruckfestigkeit von vulkanischen und nicht vulkanischen Materialien [Ja89].....	46
Abbildung 30: Spannungs- Verformungskurven für hoch sensitive vulkanische Asche- Materialien aus Waitui [Ja89].	46
Abbildung 31: Festigkeitsverlust beim Zusammenbruch der flockulierten Struktur [La03].	47
Abbildung 32: Feinschliff des repräsentativen interkristallinen Zwischenraums von Cangahua	48
Abbildung 33: Ergebnisse Bodenprobe F6-1	50
Abbildung 34: Ergebnisse Bodenprobe F3-9.....	51
Abbildung 35: Ergebnisse Bodenprobe A1-7	52
Abbildung 36: Ergebnisse Bodenprobe A1-2	52
Abbildung 37: Ergebnisse aller Bodenproben	53
Abbildung 38: Scherfestigkeit von verdichteten Proben im Vergleich zum optimalen Wassergehalt bei traditionellen Böden [We09].....	54
Abbildung 39: Alternative Verdichtungskontrolle nach Wesley [We08][We09]	55

Abbildung 40:	Interpretation des Konsolidierungsverhaltens; Gegenüberstellung der logarithmischen und linearen Darstellung [We10]	59
Abbildung 41:	Ergebnisse Ödometerversuch Bodenprobe C2	61
Abbildung 42:	Ergebnisse Ödometerversuch Bodenprobe C3	62
Abbildung 43:	Ergebnisse Ödometerversuch Bodenprobe C4	62
Abbildung 44:	Ergebnisse Ödometerversuch aller Bodenproben	63
Abbildung 45:	Veränderung von Zustandsgrenzen mit der Temperatur im Casagrande- Schema	64
Abbildung 46:	Halblogarithmisches Zusammendrückungs-Diagramm ($\sigma'_z(\log) - e$), und linear (Stauchung - $\sigma'_z(\text{linear})$) Kurven für Bodenprobe C2	65
Abbildung 47:	Ergebnisse Kastenscherversuch Bodenprobe C2	66
Abbildung 48:	Ergebnisse Kastenscherversuch Bodenprobe C3	66
Abbildung 49:	Ergebnisse Kastenscherversuch Bodenprobe C4	67
Abbildung 50:	Verlauf von Wassergehalt und Zustandsgrenzen bei der Trocknung	68
Abbildung 51:	Bildung von Rissen an der Oberfläche	70
Abbildung 52:	Böschung in der Nähe von Quimbaya- Kolumbien (links) [IN00]. Ecuador (rechts) siehe ungefähre Skala	71
Abbildung 53:	Variationen von ϕ' peak und ϕ' rest mit Plastizitätszahlen für allophanreiche und sedimentäre Böden [Ra95]	72
Abbildung 54:	Ergebnis der Mischung F6-1 und A1-3	74
Abbildung 55:	Ergebnis der Mischung F3-7 mit G7-4	75
Abbildung 56:	Ergebnis der Mischung A1-3 mit F3-9	77
Abbildung 57:	Ergebnis der Mischung G7-5 mit C4-5	78
Abbildung 58:	Ergebnis der Mischung G7-5 und e C5-7	80
Abbildung 59:	Ergebnis der Mischung G7-4 mit F3-2	82
Abbildung 60:	Wirkung der Verarbeitung oder der Extraktion von Sesquioxiden auf die Festigkeit von fünf kürzlich kalkbehandelten laterithischen Böden [To85]	84
Abbildung 61:	Situation eines Bodens, die nach Bauarbeiten dem natürlichen Klima ausgesetzt wird	85
Abbildung 62:	Versuchsphasen des mehrstufigen Triaxialversuchs	87
Abbildung 63:	Bilder der Bodenerkundung für die Entnahme der Probe AP1-2	88
Abbildung 64:	Bilder der Bodenprobe AP1-2 (1) vor und nach dem Versuch	90
Abbildung 65:	Bilder der Bodenprobe AP1-2 (2) vor und nach dem Versuch	92

Abbildung 66:	Bilder der Bodenerkundung für die Entnahme der Probe AP1-5	93
Abbildung 67:	Bilder der Bodenprobe AP1-5 (1) vor und nach dem Versuch.....	96
Abbildung 68:	Bilder der Bodenprobe AP1-5 (2) vor und nach dem Versuch.....	98
Abbildung 69:	Verfahren der Clusteranalyse.....	102
Abbildung 70:	Übersicht der Daten	104
Abbildung 71:	Beziehungen als Resultat des ersten Clusterings	106
Abbildung 72:	Messskala für die Liquiditätszahl, Konsistenzzahl und Un- Konsistenzzahl	108
Abbildung 73:	Beschreibung der Daten Cluster 0	110
Abbildung 74:	Beschreibung der Daten Cluster 1	111
Abbildung 75:	Beschreibung der Daten Cluster 2	112
Abbildung 76:	Beziehungen als Resultat der Clustering mit Trockendichte	114
Abbildung 77:	Beziehung Fließgrenze und Wassergehalt.....	115
Abbildung 78:	Beziehung Fließgrenze und Wassergehalt.....	116
Abbildung 79:	Beziehung Wassergehalt und Trockendichte ohne SM - Bodenproben.....	117

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Überprüfung von Phosphor	16
Tabelle 2:	Überprüfung von Aluminium und Eisen	17
Tabelle 3:	Überprüfung von Alp/Alo	18
Tabelle 4:	Al/Si Atomverhältnisse und Faktor für die Abschätzung des Allophananteils [Pa85]	19
Tabelle 5:	Allophananteil nach Cascaredo [Ca01]	20
Tabelle 6:	Allophananteil nach Parfitt [Pa85]	20
Tabelle 7:	Eigenschaften der Böden aus Circasia	22
Tabelle 8:	Mineralogische Analyse durch X-Ray-Diffraction	30
Tabelle 9:	Typische Werte der Permeabilität	32
Tabelle 10:	Ergebnisse von Laborversuchen an vulkanischen Ascheböden [We73]	34
Tabelle 11:	Untersuchte Bodenproben	36
Tabelle 12:	Skala von Sensitivitätswerten (Skempton 1952) [Ja89]	47
Tabelle 13:	Einige Eigenschaften der Bodenproben	49
Tabelle 14:	Konsolidationsbeiwert (Cv), Verdichtungsziffer (mv) und Permeabilität (k) von ungestörten Bodenproben [We77]	57
Tabelle 15:	Grundmerkmale der Bodenproben	60
Tabelle 16:	Ergebnisse Ödometerversuch	63
Tabelle 17:	Scherfestigkeitsdaten	71
Tabelle 18:	Merkmale der Böden für die Mischung F6-1 und A1-3	74
Tabelle 19:	Verlauf und Ergebnisse der Mischung F6-1 und A1-3	74
Tabelle 20:	Merkmale des vulkanischen Bodens F3 -7	75
Tabelle 21:	Verlauf und Ergebnisse der Mischung F3-7 mit G7-4	76
Tabelle 22:	Merkmale der Böden für die Mischung A1-3 mit F3-9	77
Tabelle 23:	Verlauf und Ergebnisse der Mischung A1-3 mit F3-9	77
Tabelle 24:	Verlauf und Ergebnisse der Mischung G7-5 mit C4-5	79
Tabelle 25:	Merkmale der Aschenboden C5-7	80
Tabelle 26:	Verlauf und Ergebnisse der Mischung G7-5 und Aschebodenprobe C5-7	81
Tabelle 27:	Merkmale des Aschenbodens F3-2	82

Tabelle 28:	Verlauf und Ergebnisse der Mischung G7-4 mit F3-2	82
Tabelle 29:	Grundmerkmale der Probe AP1-2 „La Ceja“	88
Tabelle 30:	Ergebnisse Muster Versuch AP1 -2 (1) „La Ceja“	89
Tabelle 31:	Daten der drei Phasen des Versuches	90
Tabelle 32:	Ergebnisse Versuch AP1 -2 (2) mit verschiedenen Zuständen.....	91
Tabelle 33:	Grundmerkmale der Probe AP1-5 „Sonson“	94
Tabelle 34:	Ergebnisse Muster Versuch AP1 -5 (1) „Sonson“	95
Tabelle 35:	Daten der drei Phasen des Versuches	96
Tabelle 36:	Ergebnisse Versuch AP1 -5 (2) mit verschiedenen Zuständen.....	97
Tabelle 37:	Zentroide der ersten Klassifizierung	105
Tabelle 38:	Beispiele von Konsistenz und “Un-Konsistenzzahl”	108
Tabelle 39:	Clustering von Daten bis 10 m Tiefe	109
Tabelle 40:	Clustering von Daten bis 10 m Tiefe mit Trockendichte.....	113
Tabelle 41:	Bodenkenngrößen für bindige und organische Böden (Rechenwerte) aus DIN 1055	118
Tabelle 42:	Korrelationen für Konsolidierungsparameter [Bo97].....	119

1. EINFÜHRUNG

1.1. HINTERGRUND

In mehreren Ländern Lateinamerikas finden sich verwitterte Ablagerungen von Aschen der andischen Vulkane. Auf Baustellen zeigen diese Böden gegenüber sedimentären Materialien stark unterschiedliches Verhalten (in ungestörtem Zustand sind sie außergewöhnlich standfest, aber beim Verarbeiten können gänzlich andere Eigenschaften auftreten).

Vulkanische Ascheböden in Kolumbien, wie auch in anderen Ländern, sind häufig für massive Erdbeben verantwortlich, welche mit erheblichen strukturellen und wirtschaftlichen Schäden an Straßen und anderer Infrastruktur verbunden sind.

Die Fragestellungen, die diese Arbeit motiviert haben, sind durch meine Erfahrungen aus mehreren Projekten entstanden, die ich zwischen 1992 und 2010 in Kolumbien betreut habe. Diese Projekte wurden alle durch vulkanische Aschen geprägt, entweder, weil sie als Baumaterial verwendet werden sollten oder sie Erdbeben und Strukturversagen verursacht hatten. Besonders problematisch sind diese Böden in Kolumbien im Bereich des Straßenbaus wegen der Setzungen im Untergrund, der Böschungsbrüche und der großen Schwierigkeiten bei der Verdichtung.

Ziel war es, die charakteristischen Eigenschaften der vorgefundenen Böden sicher und korrekt zu beschreiben. Große Probleme ergaben sich dabei aus den sehr unterschiedlichen Untersuchungsergebnissen des Verhaltens auf der Baustelle und denen im Labor.

Ascheböden unterscheiden sich sehr stark von Sedimentböden; zum einen aufgrund ihrer Herkunft und zum anderen durch die besonderen Prozesse, denen sie bei der Entstehung unterworfen waren. Ihre Eigenschaften haben mit dem Verwitterungsprozess und den Tonmineralien (Allophane, Halloysite, Imogolite, Zeolite u.a.), die sie enthalten, zu tun und nicht mit der Spannungsgeschichte wie bei den traditionellen sedimentären Böden.

Die innere Struktur und die besonderen Bestandteile dieser Böden spielen vermutlich bei dem besonderen Verhalten eine Rolle. Sie sind sowohl für die hohe Standfestigkeit aber auch für die Empfindlichkeit und das Versagen des Bodens auf der Baustelle verantwortlich.

Die möglichen physikalischen oder chemischen Veränderungen, die bei der Verarbeitung dieser Böden stattfinden zu beobachten, zu analysieren und zu modellieren, sind das Thema dieser Arbeit.

1.2. ZIELSTELLUNG

Zur Verifizierung der beobachteten Zusammenhänge bei der Veränderung der Ascheböden unter verschiedenen Bearbeitungsmethoden in situ oder im Labor, werden folgende Vorstellungen untersucht:

- a) Wird die Bestimmung der Kennwerte dieser Böden im Labor aufgrund dessen Empfindlichkeit beeinflusst und sind die Werte der Parameter der Ascheböden wie bei traditionellen Böden zu interpretieren?
- b) Welche Aspekte der Struktur und der chemischen oder mineralogischen Bestandteile steuern das Verhalten dieses Bodens und wie kann der zugrunde liegende Mechanismus beobachtet werden?
- c) Ist die Veränderung der Eigenschaften des Bodens durch die Bearbeitung im Labor auf die Baupraxis übertragbar und für die Erklärung der Mechanismen des Versagens anwendbar?

Es ist mit dieser Arbeit nicht möglich, eine Beschreibung aller Eigenschaften aller vulkanischen Ascheböden (auch nicht aller in Kolumbien vorkommenden), zu erstellen. Dazu ist die Vielfältigkeit der Erscheinungsformen zu komplex. Diese Untersuchung hat deshalb zum Ziel, grundsätzliche Elemente des Verhaltens von Ascheböden darzustellen, um möglicherweise als Ansatzpunkt für weitere Forschung zu dienen.

1.3. VORGEHENSWEISE

Zur zielgerichteten Bearbeitung der oben dargestellten Fragestellungen wird folgender Arbeitsablauf verfolgt:

- a) Anhand der traditionellen Methoden der Bodenmechanik und mittels kleiner Veränderungen dieser Verfahren werden die Veränderungen des Materials durch die Bearbeitung sichtbar gemacht.

Der Effekt von unterschiedlichen Trocknungsniveaus, zusätzlich mit der Zerstörung der Struktur des Bodens im Labor überlagert, wird durch die Bestimmung von Zustandsgrenzen, sowie Einaxialdruck-, Ödometer-, und Kastenscherversuchen untersucht. Dazu werden Bodenproben mit ursprünglichem Wassergehalt, an der Luft oder im Ofen getrocknet, ungestört oder verdichtet verwendet.

- b) Die Bedeutung der besonderen mineralogischen Zusammensetzung für die Festigkeit des vulkanischen Materials wird durch die Mischung mit sandigen kohäsionslosen Bodenproben getestet.
- c) Um die Probleme der Veränderung der Standfestigkeit zu erfassen, wird durch mehrstufige Triaxialversuche die typische Situation einer Bodenprobe an der Oberfläche simuliert. Eine gewisse künstliche Verwitterung soll hier

nachgebildet werden, wenn sie auch im Vergleich mit natürlichen Prozessen zeitgerafft ist.

- d) Zum Schluss wird eine große Anzahl von Labor-Ergebnissen mit der Absicht analysiert, in der Dispersion dieser Daten die Anomalien, die im Labor entstanden sind, zu erkennen und die Verhältnisse zwischen Ausgangsmerkmalen und Tendenzen (zum Beispiel im Bezug auf die Entnahmetiefe) zu identifizieren.

1.4. INHALT

Die Arbeit besteht aus vier Kapiteln, die jeweils eine theoretische Darstellung sowie eine bzw. zwei empirische Untersuchungen beinhalten.

Kapitel 2 fasst die Grundlagen der mineralogischen und geotechnischen Charakterisierung zusammen. In erster Linie wird der Prozess der Entstehung von vulkanischen Ascheböden erläutert. Die Mineralien, die aufgrund der Herkunft dieser Böden besondere Bestandteile sind und der Vorgang, wie diese zu anderen Mineralien durch einen Verwitterungsprozess führen, werden kurz beschrieben. Studien aus dem Bereich der Bodenkunde geben hier Informationen über wichtige Stoffe wie Allophane, Imogolite und Halloysite.

Mit einer eigenen experimentellen Untersuchung wird dieses Kapitel ergänzt. Zuerst wird durch eine chemische Untersuchung der Allophananteil einer Gruppe von Bodenproben geschätzt und mit einigen geotechnischen Merkmalen dieser Böden verglichen. Danach wird eine Röntgenanalyse durchgeführt, um die mineralogische Zusammensetzung zu ermitteln, sowie die Auswirkung der Trocknung auf die Ergebnisse zu beobachten. Der zweite Teil dieses Kapitels bezieht sich auf die allgemeine geotechnische Charakterisierung und wird mit einer eigenen Untersuchung der Wirkung der Trocknung ergänzt.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit den Besonderheiten des mechanischen Verhaltens dieser Böden. Das Problem bei der Verdichtung wird vom Gesichtspunkt der Empfindlichkeit der Struktur und der Beanspruchung durch die Trocknung aus untersucht. Eine weitere Analyse soll Aufschluss darüber geben, woraus die Festigkeit der Böden resultiert. Zum Schluss stellt der experimentelle Teil dieses Kapitels das Verhalten von ungestörten Bodenproben dar, die im Verlauf mehrstufiger Triaxialversuche mit unterschiedlichen Wassergehalten getestet werden.

Das vierte Kapitel widmet sich der Analyse einer großen Anzahl von Laborergebnissen typischer Ascheböden aus der Kaffee-Region Kolumbiens. Dafür wird ein Softwarewerkzeug aus dem Bereich des Data Minings genutzt.

Im Anhang werden einige ergänzende Labor-Bestimmungen vorgestellt und die Details einiger Laboruntersuchungen und der geprüften Bodenproben zusammengefasst.

2. CHARAKTERISIERUNG VON VULKANISCHEN ASCHEBÖDEN

2.1. ALLGEMEINES

Die Besonderheit der Böden, die aus vulkanischen Aschen durch Verwitterung entstanden sind, liegt an vielen außergewöhnlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften, die sie von den traditionellen Böden unterscheiden. Eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit (ein Wassergehalt bis etwa 200% und manchmal höher als die Fließgrenze ist möglich), hohe Zustandsgrenzen (Fließgrenzen bis 250% und Ausrollgrenzen bis 150% [Ma83], unumkehrbare Veränderung der Plastizität nach der Trocknung, niedrige Trockendichte ($\gamma_d < 1,5 \text{ g/cm}^3$), hohe Permeabilität in ungestörtem Zustand, hohe Werte der Porenzahl (bis $e = 7$, gegenüber gewöhnlichen Werten zwischen 0,3 und 2,0) und trotzdem eine hohe Scherfestigkeit mit Reibungswinkeln (φ') bis 50° und Kohäsionswerten (c') bis 50 kPa, sind einige dieser Eigenschaften.

Vulkanische Ascheböden werden normalerweise nach dem internationalen Unified Soil Classification System (USCS) [AS11] als „Schluff niedriger Plastizität“: ML (MH, wenn sie vor dem Versuch nicht getrocknet wurden), manchmal auch als SM, SC, oder CL-ML klassifiziert. In Bezug auf die Korngrößenverteilung werden traditionell feine Böden durch den Anteil an Tonmineralien identifiziert, weil deren Eigenschaften dem mechanischen und chemischen Verhalten des Bodens zu Grunde liegen. Bei vulkanischen Ascheböden ist diese Angabe (abgesehen von den Schwierigkeiten und der Ungenauigkeit der Bestimmung im Labor) kein Erkennungsmerkmal [Wa72].

Die japanische Gesellschaft für Bodenmechanik und Grundbau hat dem Unified Classification System drei weitere Gruppen hinzugefügt: OV (organische vulkanische Ascheböden), VH1 und VH2 (vulkanische Ascheböden) [Wa84].

Das Vorkommen dieser besonderen Böden auf der Welt und ihre Beschaffenheit werden im Folgenden genauer dargestellt.

2.1.1. Geographische Verteilung

Vulkanische Ascheböden befinden sich in Regionen mit starker vulkanischer Aktivität. Bedeutende globale Tektonik und vulkanische Aktivität kommen hauptsächlich in der zirkum-pazifischen Zone vor (Indonesien, Philippinen, Japan, Zentral- und Süd-Amerika sowie Afrika), aber auch in Island, Spanien, Italien, Rumänien und den kanarischen Inseln (Abbildung 1). In Kolumbien bedecken die Ascheablagerungen 11,6% der Oberfläche des Landes [Fo00], überwiegend in der Nähe der Anden, einer Region, die (nach der ökonomischen Aktivität), die Kaffee-Achse genannt wird.

In den kolumbianischen Anden gibt es etwa 35 Vulkane. Die Ablagerungen auf der Kaffee-Achse stammen von den Ausbrüchen einer bestimmten Kette von Vulkanen: (Nevado del Quindío, Nevado del Ruiz, Nevado Santa Isabel, Páramo de Santa Rosa, Cerro Bravo Nevado del Cisne, Machín und Nevado del Tolima) während des Quartärs

vor ca. 25.000 Jahren. Diese Ablagerungen kommen dort in variierenden Schichten bis zu 25 m Dicke vor [Ja86] [Du97].

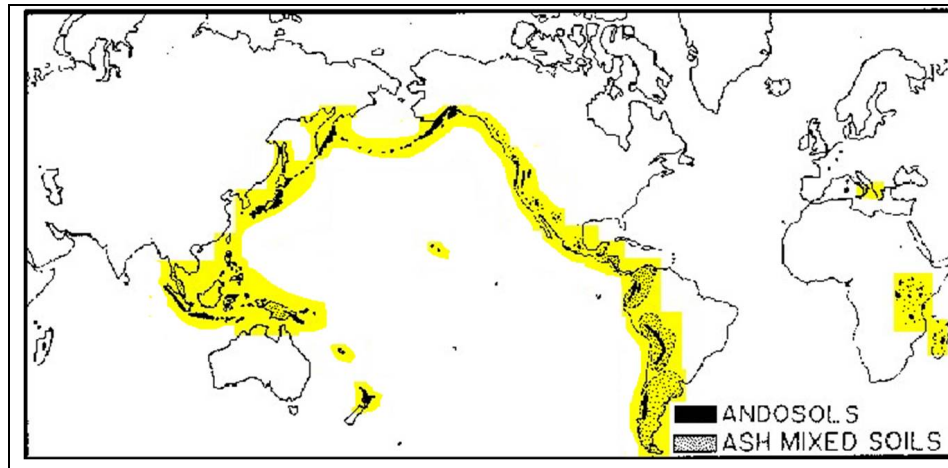


Abbildung 1: Verteilung von vulkanischen Ascheböden in der Welt [Mo72]

2.1.2. Physikalische und chemische Entstehung

Der besondere Entstehungsprozess der vulkanischen Ascheböden liegt den spezifischen Merkmalen, die diese Böden von sedimentären unterscheiden, zu Grunde. Hier werden die wichtigsten Prozesse dieses Vorganges zusammengefasst.

Nach einem vulkanischen Ausbruch werden außer der Lava große Mengen kleiner Partikel ausgeworfen, die als Wolken aufsteigen und sich später ablagern. Die Entstehung der Wolken, ihre Zusammensetzung, und die erreichte Höhe, sind von der Energie des Ausbruches abhängig. Windströmungen können die Aschewolken viele Kilometer weit transportieren. Mit der Ablagerung der Asche verliert die Wolke an Dichte, was Tage, sogar Monate dauern kann [Ri03].

Viele Faktoren bestimmen die Eigenschaften der sich ergebenden Ascheablagerung. Die physikalischen und chemischen Merkmale, die Form, Rauheit, spezifische Oberfläche und elektrostatische Ladung der Partikel [Ri03] sowie Flüssigkeiten und Gase, die in den Wolken enthalten sind, beeinflussen die Eigenschaften der Aschen und später die des verwitterten Produktes.

Nach der Ablagerung fängt der Prozess der Verwitterung an. Die alkalischen Gesteine und Mineralien (Olivin, Pyroxen, Kalzium, Plagioklas) sind verwitterungsempfindlicher als saure Gesteine wie Quarz, Feldspat, Hornblende und Glimmer. Abbildung 2 zeigt die Verwitterungssequenzen dieser Mineralien [To85]. Es kann auch Augit, Magnetit, Biotit, Apatit, und vulkanisches Glas vorhanden sein, diese sind wenig verwitterungsempfindlich [Sh93]. Die Umweltfaktoren Regen, Temperatur, Feuchte und Wind beeinflussen die Synthese der Mineralien, die durch chemische Prozesse

stattfindet. In dem Prozess der chemischen Umwandlung lösen sich Si, Ca und Na auf und Al verbleibt für die Entstehung von neuen Mineralien [Na04].

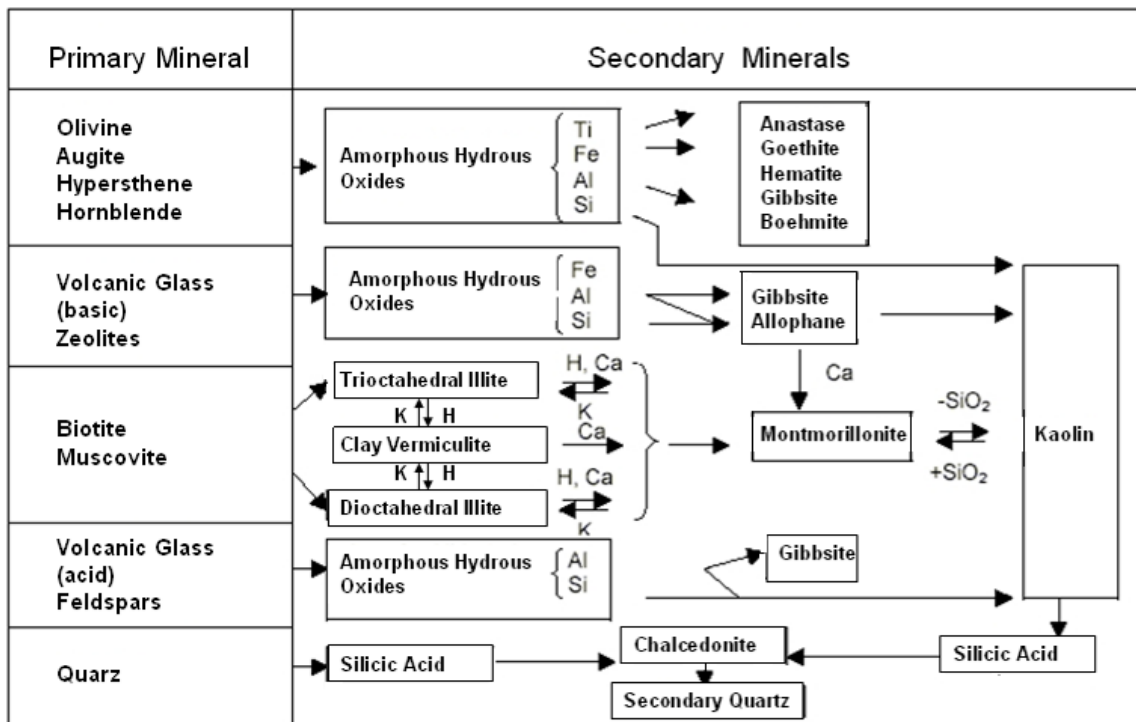


Abbildung 2: Verwitterung primärer gesteinsbildender Mineralien. Nach Fields und Swindale, 1954 [To85]

Chadwick [Ch03] hat nach Studien auf Hawaii einige Beobachtungen in Bezug auf die Veränderung der mineralischen Bestandteile an der Oberfläche durchgeführt. In trockener Umgebung werden die löslichen Verwitterungsprodukte wie basische Kationen und Si von der Oberfläche in geringfügig tiefere Schichten transportiert. Die nicht so gut löslichen Elemente wie Al verbleiben oberflächennah. In feuchten Regionen werden fast alle chemischen Elemente an der Oberfläche gelöst. Basische Kationen und Si werden aufgebraucht, wobei die Abnahme der Konzentration vom Ausgangsmaterial abhängt. Gleichzeitig kann sich die Al-Konzentration bis auf 60% reduzieren [Ch03]. In dieser Umgebung kann, wegen der organischen Anteile, die Entstehung von Gipsita und Aluminosilikaten abnehmen. Organische Anteile binden Aluminium [Sh93]. Alle diese Merkmale sind von Bedeutung, um die unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen der Bodenproben und deren verschiedene Verhaltensweisen zu verstehen.

Die Ablagerungen bestehen aus einer Reihe von Schichten, welche der Verwitterung ausgesetzt worden sind, bevor sich eine neue Schicht abgelagert hat. Die Verwitterung findet so bis in sehr tiefe Schichten statt und entwickelt auf diese Weise verschiedene Sorten feiner Böden. Die Natur des Ascheniederschlages verändert sich sowohl zeitlich als auch räumlich. Vulkanische Ereignisse können kurz oder als kontinuierliche Ausbrüche über mehrere Jahre andauern. Die Größe der ausgestoßenen Partikel können an einem Tag grob und am nächsten fein sein, in Abhängigkeit von der Richtung und der Geschwindigkeit des Windes [Bu91].

Mit der Zeit und wegen der Klimaexposition, bekommt der Boden verschiedene Beschaffenheiten. Alte stark verwitterte Aschen haben große Anteile feiner Komponenten und tonige, junge und leicht verwitterte Böden werden schluffig oder sandig [Sh93].

Auf diese Weise entsteht, je nach Entfernung zur Quelle und der Art des ausgeworfenen Materials sowie den klimatischen Faktoren, eine breite Auswahl an Ascheböden. Jeder auf einer Baustelle vorgefundene Horizont kann deshalb eine unterschiedliche Dicke, Textur, Mineralogie, und andere Merkmale haben. Viele Details dieser Mineralogie werden in dem nächsten Kapitel erläutert.

2.2. MINERALOGISCHE EIGENSCHAFTEN

2.2.1. Allgemeines

Normale Bestandteile der vulkanischen Ascheböden sind: vulkanisches Glas, Feldspat, Quartz, Hornblende, Hiperestena, Augite, Magnetite, Biotite und Apatita [Na04]. Die vulkanischen Ascheböden in der Kaffee-Region sind reich an Plagioklas, vulkanischem Glas, Amphibol, Pyroxen, und Quarz [Ar93]. Vulkanische Ascheböden sind durch ihre Tonmineralien charakterisiert, die aus den genannten Komponenten entstehen. Als Resultat finden sich zwei Gruppen von Mineralien. In einer Gruppe sind Allophane, Imogolite, Halloysite und Ferrihidrita, Mineralien, die in einer Umgebung mit einem pH-Wert zwischen 5 und 7 (mit geringen organischen Anteilen) vorkommen. In der zweiten Gruppe sind die Komplexe Al/Fe und opale Silika, welche in saurer (pH-Wert<5) Umgebung entstehen, die reich an organischen Anteilen sind [Ug04].

Die besonderen Bedingungen, wie hohe Temperaturen und Druck, die bei der Entstehung von vulkanischen Aschen herrschen, erzeugen Mineralien, die fast exklusiv in vulkanischen Ascheböden zu finden sind, wie Halloysite, Allophane und Imogolite. Allophanreiche Böden sind als Andisols oder Andosols in der Bodenkunde bekannt [Ta84]. Diese Böden sind am häufigsten in Kolumbien zu finden, weshalb sich diese Arbeit nur mit dieser Sorte Boden beschäftigt.

Vulkanisches Glas ist eines der wichtigsten Bestandteile der vulkanischen Ascheböden. Dieses Mineral ist thermisch instabil und verwittert als erstes. Das Verwitterungsniveau ist von der chemischen Zusammensetzung, der Oberfläche der Partikel, der Temperatur, dem Infiltrationspotential, dem Säuregehalt und der Konzentration der Lösungsmittel im Boden abhängig [Fi84]. Vulkanisches Glas ermöglicht die Entstehung nicht kristalliner Mineralien (Allophan, Aluminiumoxid und andere), weil sich während der Verwitterung einige chemische Elemente mit größerer Geschwindigkeit lösen als es für die Entstehung kristalliner Mineralien (wie Kaolinite und Halloysite) notwendig ist [Sh93].

Nachfolgend werden zunächst die wichtigsten Eigenschaften der Allophane, Imogolite und Halloysite beschrieben, welche die Struktur der vulkanischen Ascheböden stark beeinflussen.

2.2.2. Besondere Bestandteile Allophane, Imogolite und Halloysite

Allophane, Imogolite und Halloysite sind die dominanten Bestandteile im Tonanteil der meisten vulkanischen Ascheböden der Welt. Diese Mineralien sind hydratisierte Aluminium-Silikate, die in der Natur durch die Verwitterung von vulkanischem Glas entstehen.

Allophan wurde zum ersten Mal zusammen mit Silberkupferglanz (später Stromeyerit genannt) auf der Versammlung der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften Göttingen am 13. Juli 1816 vorgestellt [Gö16]. Imogolite wurden von Yoshinaga und Aomine in einem vulkanischen Ascheboden aus „Imogo“ in Kyushu-Japan entdeckt [Wa87]. Halloysite wurden 1826 zum ersten Mal von P. Berthnier beschrieben [Ch75]. Der Name leitet sich aus dem Name des Geologen Omalius d’Halloy (1707-1789) ab, der dieses Mineral erstmals in belgischem Gestein studiert hat [AP05].

Für Allophan liegt das Verhältnis von Al/Si zwischen 1 und 2, und manchmal unter 1 [Pa89]. Das Mineral entsteht besonders unter feuchten Bedingungen durch Auswaschung und wird von pH-Werten zwischen 5 und 7 begünstigt [Pa89][Sh93]. Wenn Allophan vorkommt, bedeutet das in der Regel, dass auch Imogolite vorhanden sind. Imogolite weisen ein Al/Si Verhältnis von etwa 2 auf. Imogolit und Allophan sind vergleichbar in ihrer spezifischen Oberfläche, aber Imogolit kann viel größere Mengen an Wasser und Gel speichern, bedingt durch eine Interaktion zwischen den Röhren in der mineralischen Struktur [Wa87]. Halloysit entsteht, wenn die Konzentration von Aluminium und Silizium ungefähr gleich ist.

Die chemische Zusammensetzung der Allophane ist in der Literatur als $x \text{Al}_2\text{O}_3$, $y \text{SiO}_2$, $z \text{H}_2\text{O}$, definiert. Die zwei Hauptarten: aluminiumreiches Allophan, $\text{Al/Si} \triangleq 2:1$, und siliziumreiches Allophan, $\text{Al/Si} \triangleq 1:1$, (wie bei Halloysiten) entstehen je nach der Verfügbarkeit der Stoffe im Boden.

Es wird angenommen, dass Halloysite mit der Zeit als Verwitterungsprodukt von Allophanen entstehen [Wa89][Ar93][Sh93]. Andere Studien zeigen aber, dass vulkanische Aschen direkt zu Halloysiten oder zu Allophanen verwittern können [Pa83][Pa84][Pa85]. Es wird vermutet, dass die Silikat-Aktivität in der Bodenlösung der ausschlaggebende Faktor für die Bildung von Halloysiten oder Allophanen ist [Ze03].

Die Plastizitätseigenschaften der Böden, die Halloysite enthalten, sind von dem Hydratationsniveau abhängig. Die Plastizität ist normalerweise hoch. Die Fließgrenze liegt zwischen 70 und 110% und die Ausrollgrenze zwischen 55 und 75% [We73].

In Bezug auf die Umgebungsbedingungen kann allgemein festgestellt werden, dass der Allophananteil in niedrigen Höhenlagen zunimmt und in Gebieten, die über 2000 m liegen, praktisch nicht mehr vorhanden ist [Pa89]. Aluminiumreiche Allophane entwickeln sich unter stark feuchten klimatischen Bedingungen [Wa74], [Wa02]. Diese Allophane wurden in Böden in Japan, Chile, Ecuador und den Kanarischen Inseln

gefunden. Die Bildung von Halloysiten wird demgegenüber eher von trockenen Bedingungen begünstigt [Sh93].

Singleton [Si89] und Bakker [Ba96] berichten, dass eine behinderte Drainage die Entstehung von Halloysiten begünstigt, während Allophane mit gut dränierten Bodenhorizonten verbunden sind [Pa89]. Unabhängig von der Situation der Drainage hat Parfitt [Pa83] für Aschen ein Verwitterungsschema vorgeschlagen: Halloysite sind das vorherrschende Tonmineral in Regionen, in denen der durchschnittliche jährliche Niederschlag weniger als ungefähr 1500 mm beträgt, und Allophane oberhalb von 1500 mm. Viele nachfolgende Studien an verschiedenen Orten der Welt haben die Bedeutung von Niederschlag und Auslaugung (leaching) bei der Mineralbildung bestätigt [Pa84][St85][Ta93][Ni97][Ni00]. Die pedologischen Aspekte der Entstehung von vulkanischen Ascheböden sind in Japan und Neuseeland intensiv studiert worden aber über Verwitterung und Bodenbildung auf den Gipfeln der Anden ist bis jetzt wenig bekannt [Ze03].

Im Bereich der Kaffee-Achse Kolumbiens, einer Region von etwa 10000 km², sind etwa 600 km² fast ausschließlich mit vulkanischen Aschen bedeckt, die als „Glasis del Quindio“ bekannt sind. Die Kaffee-Achse weist Höhenlagen zwischen 1300 und 2000 m ü.d.M. auf. Dort herrscht ein mildes feuchtes Klima mit Temperaturen zwischen 18 und 24°C. Unabhängig vom Klima variieren die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagshöhen stark. In einige Zonen mit hohen Werten liegt die durchschnittliche Niederschlagshöhe im Jahr zwischen 2100 und 3300 mm, in anderen Zonen zwischen 800 und 1600 mm im Jahr [IN00]. Deshalb ist eine Vielfältigkeit an vulkanischen Ascheböden zu erwarten.

2.2.3. Struktur der besonderen Bestandteile

In früheren Forschungen über vulkanische Aschen wurde über die nicht kristalline Struktur der Allophane berichtet, die durch die schnelle Verwitterung verursacht wird und damit die Entstehung von komplizierten Mischungen von Glas, Allophan, Imogolit, Halloysit und Kaolinit bedingt. Später wurde festgestellt, dass die Struktur nicht immer und nicht vollständig amorph ist. Die schnelle Abkühlung der ursprünglich pyroklastischen Materialien kann keine kristallinische Struktur ergeben, mit der Zeit aber können kristalline Produkte wie Halloysite und Kaolinite entstehen.

Die Struktur von Allophanen wurde von Wells und Theng [We85] und Maeda [Ma77], nach ihren Untersuchungen beschrieben. (Abbildung 3). Nach ihrer Hypothese besteht Allophan aus hohlen, kugelförmigen Teilchen (Sphären) in unregelmäßiger Anordnung mit äußeren Durchmessern von 50 Å, und inneren von 30 Å. Durch hochauflösende Elektronenmikroskopie hat Wada [Wa87] bestätigt, dass die hohlen Sphären einen Durchmesser von 3,5 bis 5 µm haben. Darüber hinaus besitzen die Teilchen viele Öffnungen, die den Eintritt und den Austritt von Wassermolekülen erlauben [He76].

Die hohlen Sphären haben einen internen Wasserinhalt. Sphären binden sich zu Domänen zusammen (Durchmesser 0,01 bis 10 µm). Domänen werden in Form von Clustern oder Aggregaten (Größe von 1 bis 100 µm) schwach gebunden [We73]

[Ma77]. Soweit die Verbindungen halten, bleiben die Cluster intakt. Jedes Cluster gilt als ein einzelnes Partikel mit eigenem Wassergehalt.

Infrarotspektren [Pa80] zeigen, dass die Wände von Allophansphären aus Imogoliten bestehen, und Wada [Wa87] vermutet, dass die Sphären möglicherweise aus AL-O, OH und Si, Al-O, OH bestehen und tetrahedrale Blätter bilden. Wie aus der Größe und Form der Partikel zu vermuten ist, hat Allophan eine große spezifische Oberfläche (etwa $1000 \text{ m}^2/\text{g}$) und eine große Wasseraufnahmefähigkeit (etwa $0,5 \text{ g/g}$) [Wa87].

Durch Remoulding (bzw. das Zerschneiden der ursprünglichen Struktur des Bodens z.B. durch Kneten und Formen im Labor oder bei Bauarbeiten) zerbrechen die Cluster und das Wasser zwischen den Domänen wird frei [Ra95]. Wenn keine Trocknung stattfindet, besteht Allophan aus gelähnlichen Fragmenten der Aluminium-Silikate, die nur durch eine kleine Anzahl von Punkten zusammen gehalten werden. Bei Trocknung nimmt die Anzahl von Verbindungen zwischen den Fragmenten ständig zu, was schließlich zur Formation harter Körner führt [Fi66].

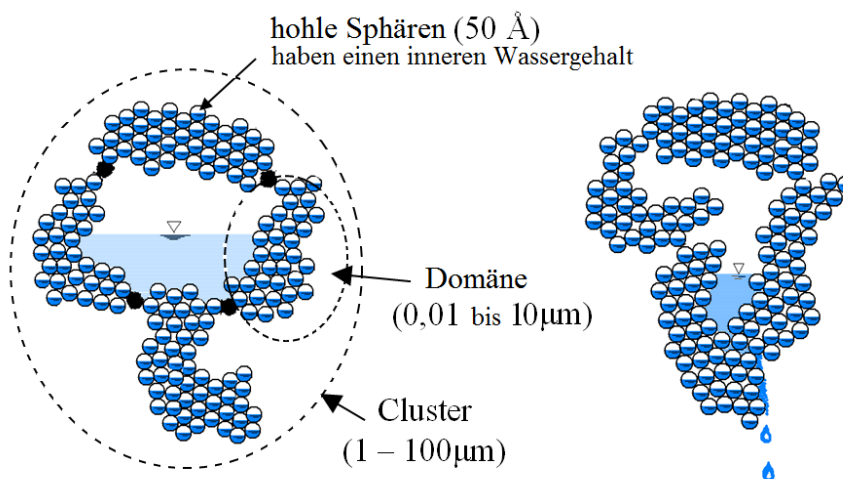


Abbildung 3: Modell der Struktur von Allophan- Partikeln vor und nach Remoulding (nach [Ma77]).

Untersuchungen mit dem Elektronenmikroskop [Wa89][Ja89] [Pa90] bestätigen diese Art von Struktur (Abbildung 4). Die Imogolite der Zellwände bestehen aus dünnen und gekrümmten Fäden (Abbildung 5), mit Durchmessern zwischen 1 und 3 µm und einigen Mikrometern Länge [Na04]. Die Fäden bilden Brücken zwischen den Allophan-Aggregaten. Halloysite beinhalten Wasserschichten und besitzen entweder eine röhrenförmige [Bu91] oder eine kugelförmige Morphologie [Wa90]. Kugelförmige Partikel der Halloysite haben einen Durchmesser zwischen 0,04 und 1 µm, oder kommen als gekrümmte Teile ähnlicher Größe vor [Qu88][Wa87][Wa90]. Bei rohrförmigen Morphologien von Halloysiten sind Durchmesser von 0,1 bis 1 µm zu finden [Si96].

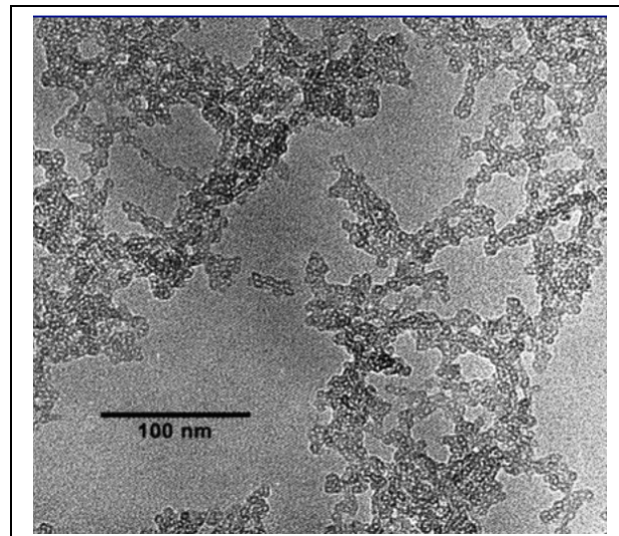


Abbildung 4: Elektronenmikroskopbilder von Al – reichen Allophanen.
Äußere Durchmessern der Sphären 4–5 μm [Pa90]

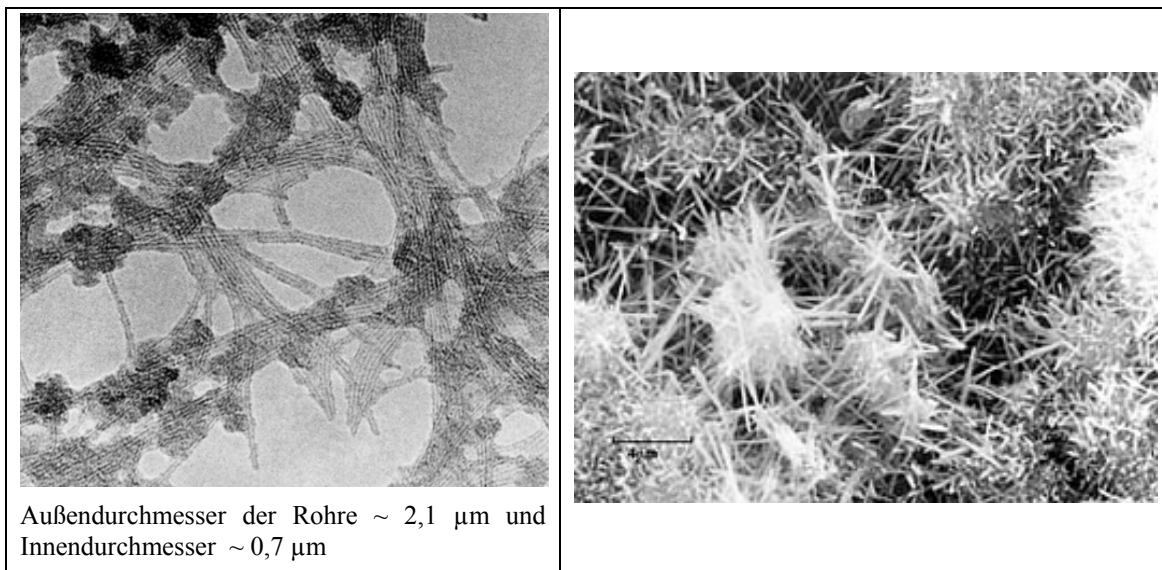


Abbildung 5: Links: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Imogolit [Pa09].
Rechts: Halloysite – röhrenförmige Morphologie. [Ro34]

2.2.4. Mineralogische Charakterisierung

Vulkanische Ascheböden können in situ durch ihre charakteristische fettige Textur identifiziert werden. Bei hohen Wassergehalten ist die Konsistenz stark schmierig, leicht plastisch, leicht klebrig und breiig [We88] (Abbildung 6). Wenn es nur darum geht, die vulkanische Herkunft eines Bodens zu identifizieren, gibt es einfache

Merkmale, wie erhöhten Wassergehalt und höhere Zustandsgrenzen sowie unwiderrufliche Änderungen der Kenngrößen infolge Luft- oder Ofentrocknung.

Darüber hinaus gibt es in der Literatur der Bodenkunde einige chemische Methoden, um die vulkanische Herkunft zu erkennen und einen Boden als *Andosol* (oder *Andisol*) zu identifizieren.



Abbildung 6: Andosol von den Azoren- Portugal. Ungestörte Klumpen auf der linken Seite und gestörte Klumpen auf der rechten Seite. Der Boden erreicht die Fließgrenze, wenn er mit starkem Druck gestört wird, obwohl er im originalen Zustand relativ trocken aussieht [En08].

Diese Methoden basieren im Allgemeinen auf dem Nachweis der Anwesenheit und den Verhältnissen verschiedener chemischer Elemente wie Phosphor, Aluminium und Eisen (letztere mit Ammonium Oxalat-Säure extrahiert). In der Taxonomie werden diese Verfahren zur Bestimmung der Andisol- Eigenschaften verwendet [Bu91]“.

Die quantitative Abschätzung des Allophananteils in einer Bodenprobe wird normalerweise durch die Bestimmung der Al/Si- Relation festgestellt. Die Menge an Al, Fe und Si wird mit Oxalat-Säure und Al zusätzlich mit Diphosphat aus der Probe extrahiert. Allophan in der Tonfraktion kann auch durch Infrarot-Spektroskopie identifiziert werden [Pa82], während Imogolit quantitativ durch Elektronenmikroskopie und Differential-Thermoanalyse abgeschätzt werden kann [Pa90b] [Pa09].

Um Allophane zu identifizieren, gibt es darüber hinaus noch weitere Methoden. Diese Methoden und chemischen Analysen werden selten im Zusammenhang mit geotechnischen Untersuchungen durchgeführt. Einerseits wegen der hohen Kosten, andererseits wegen der seltenen Verfügbarkeit der benötigten Laborausstattung im geotechnischen Umfeld, aber auch weil der Allophananteil in der Geotechnik bis jetzt keine anwendbare Bedeutung hat. Einige Autoren, die sich im Bereich der Bodenkunde mit dem Thema der Allophan- Identifizierung beschäftigt haben und ihre verwendeten Analysemethoden, sind nachfolgend aufgeführt [Pa09].

Autor

Hashimoto & Jackson, 1960
Mitchell & Farmer, 1962
Segalen, 1968
Higashi & Ikeda, 1974
Wada & Greenland, 1970
Farmer et al., 1983
Parfitt & Wilson, 1985
Parfitt, 1990a und
Parfitt & Childs, 1988
Parfitt & Wilson, 1985

Basis der Methode

Auflösung in kochendem NaOH
Heißes Na₂CO₃
HCl/NaOH
Oxalat- Säure
Selektive Dissolution
Quantitative Analyse der Auflösung in Oxalat-
Reagens und Messung der Konzentrationen von
Al und Si in der Lösung.

Durch das Multiplizieren von Si mit einem von
dem Al:Si Verhältnis abhängigen Faktor.
Si und Al durch Oxalat- Säure und Al aus Al-
Humus Komplex durch Pyrophosphate (Al_p)
extrahieren.

Campbell & Schwertmann 1985
H. M. Rietveld (1969)
Cascaredo et al (2001)

Differentiale XRD und Oxalat- Säure.
Rietveld XRD technique
Allophananteil in den Horizonten A und B durch
die Bestimmung von Al und Fe, und auch
mittels des Wertes von Si und pH.

Die Methoden von Parfitt und Wilson [Pa85] sowie von Cascaredo [Ca01] werden in dieser Arbeit eingesetzt, um die vulkanische Herkunft der Bodenproben und die Aussagekraft der Kriterien eindeutig zu bestätigen.

2.2.4.1. Experimentelle Untersuchung der andischen Eigenschaften

Zielvorstellung

Bei den Bodenproben, die in dieser Arbeit als vulkanischer Ascheboden klassifiziert sind, ist die vulkanische Herkunft offensichtlich. Eine visuelle Untersuchung der Struktur, das Gewicht und die Farbe weisen in allen Fällen auf die typischen Charakteristiken solcher Böden hin. Um einen Boden eindeutig als Andosol zu kennzeichnen, gibt es in der Mineralogie einige Kriterien. Diese Kriterien werden hier für einige Böden, die in dieser Arbeit verwendet werden, bestimmt. Zusätzlich werden Böden aus anderen Regionen untersucht, die keine offensichtliche vulkanische Herkunft haben, um die Aussagefähigkeit der Kriterien überprüfen zu können.

Bodenproben

Es werden Ascheböden verschiedener Herkunft (aus verschiedenen Regionen, verschiedener Höhe und klimatischen Bedingungen wie Circasia (C), Filandia (F), Tebaida (T), Quimbaya (QS) und Armenia (A) der Kaffee-Region Kolumbiens) verwendet. Darüber hinaus werden zum Vergleich auch Böden, die keinen vulkanischen Ursprung haben (aus von Vulkanen weit entfernten Regionen, mit den Namen Sabana und Barranquilla (G)) untersucht.

Methode

Folgende Kriterien [So96] werden untersucht, um die andischen Eigenschaften eines Bodens festzustellen:

- PO_4 (Phosphor) $\geq 85\%$
- $Al_0 + 0,5Fe_0 \geq 0,4\%$ (Aluminium und Eisen, beide mit Ammoniumoxalat-Säure extrahiert)
- $Al_p/Al_0 < 0,5$ (Al_p =Aluminium mit Pyrophosphat-Natrium extrahiert, Al_0 = Aluminium mit Ammoniumoxalat-Säure extrahiert).
- Scheinbare Dichte $< 0,90 \text{ g/cm}^3$

Die Bodenproben wurden hinsichtlich der ersten drei Kriterien überprüft. Die Dichte konnte nicht festgestellt werden, da keine ungestörten Proben vorhanden waren.

Zuerst wurden die einzelnen Mineralien im chemischen Labor bestimmt. Die Ergebnisse sind im Anhang dargestellt.

Ergebnisse

Überprüfung der Kriterien von andischen Eigenschaften.

Phosphor Bedingung: $P \geq 85\%$

Die Bodenproben aus Armenia, Tebaida und Quimbaya erfüllen das Kriterium nicht. Ebenso wie die Probe F3-7, obwohl andere Proben aus der gleichen Sondierung (F3-2 und F3-9) das Grenzkriterium erfüllen. Das könnte bedeuten, dass dieses Kriterium die vulkanische Herkunft nicht garantiert, zumal die visuelle Prüfung im Labor eine offensichtliche vulkanische Herkunft vermuten lässt. Die Böden, die auch augenscheinlich keinen vulkanischen Ursprung haben, wie die aus „Sabana“ und „Barranquilla“, zeigen tatsächlich kleine Werte zwischen 20,4 und 27,3% (Tabelle 1).

Tabelle 1: Überprüfung von Phosphor

	Bodenprobe	Region	Retention PO ₄ %	Bedingung erfüllt?
Ascheböden	C1M8	Circasia	99,0	√
	C2M3	Circasia	99,4	√
	C5M5	Circasia	98,1	√
	C6M3	Circasia	99,2	√
	C6M7	Circasia	96,4	√
	AI-2	Armenia	52,7	X
	AI-3	Armenia	33,2	X
	AI-7	Armenia	49,2	X
	T2-7	Tebaida	37,4	X
	F3-2	Filandia	90,4	√
	F3-7	Filandia	71,6	X
	F3-9	Filandia	85,7	√
F6-1	Filandia	93,1	√	
QS14-4	Quimbaya	47,7	X	
Andere Ursprung	AI-5	Sabana	27,3	X
	G6-3	Barranquilla	21,8	X
	G7-4	Barranquilla	20,4	X

√ Kriterium erfüllt

X Kriterium nicht erfüllt

Mit Ammonium Oxalat-Säure extrahierbares Aluminium und EisenBedingung: $Al_0 + 0,5Fe_0 \geq 0,4\%$

Dieses Kriterium hat eine deutlichere Übereinstimmung mit der visuellen Bestimmung der vulkanischen Herkunft. Der einzige unerwartete Wert ist der für die Probe T2-7. Tebaida ist eine Region der Kaffezone Kolumbiens, in der fast alle Böden an der Oberfläche einen vulkanischen Ursprung haben. Es ist aber nicht auszuschließen, dass es möglicherweise Schichten mit einer anderen Entstehungsgeschichte gibt. Wie in dem Fall der Phosphorbestimmung weisen die Bodenproben aus Circasia die höchsten Werte auf, die diese Bedingung erfüllen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Überprüfung von Aluminium und Eisen

Bodenprobe	Region	Aluminium%	Eisen%	Alo +0,5Feo	Bedingung erfüllt?
C1M8	Circasia	6,2	0,27	6,33	✓
C2M3	Circasia	5,7	0,99	6,19	✓
C5M5	Circasia	4,2	0,35	4,37	✓
C6M3	Circasia	5,0	0,92	5,46	✓
C6M7	Circasia	3,6	0,48	3,84	✓
A1-2	Armenia	1,2	0,32	1,36	✓
A1-3	Armenia	0,86	0,13	0,93	✓
A1-7	Armenia	1,3	0,19	1,40	✓
T2-7	Tebaida	0,09	0,14	0,16	X
F3-2	Filandia	3,1	0,73	3,47	✓
F3-7	Filandia	2,0	0,44	2,22	✓
F3-9	Filandia	2,8	0,42	3,01	✓
F6-1	Filandia	2,9	0,65	3,23	✓
QS14-4	Quimbaya	0,47	0,32	0,63	✓
A1-5	Sabana	0,19	0,30	0,34	X
G6-3	Barranquilla	0,03	0,11	0,09	X
G7-4	Barranquilla	0,02	0,07	0,06	X

✓ Kriterium erfüllt

X Kriterium nicht erfüllt

Mit Pyrophosphat-Natrium extrahierbares Aluminium (Alp) und mit Ammoniumoxalat-Säure extrahierbares Aluminium (Alo)

Bedingung: $Alp/Alo < 0,5$

Dieses Kriterium wird von den Böden erfüllt, bei denen auch visuell die vulkanische Herkunft bekannt war. Die Proben, die aus anderen Regionen kommen (Sabana und Barranquilla) überschreiten den geforderten Grenzwert. Auch bei dieser Untersuchung zeigen sich die eindeutigsten Werte für die Böden aus Circasia (Tabelle 3).

Tabelle 3: Überprüfung von Alp/Alo

Muestra	Region	Alp %	Alo %	Alp/Alo	Bedingung erfüllt?
C1M8	Circasia	0,36	6,2	0,058	✓
C2M3	Circasia	0,49	5,7	0,085	✓
C5M5	Circasia	0,48	4,2	0,114	✓
C6M3	Circasia	0,47	5,0	0,094	✓
C6M7	Circasia	0,36	3,6	0,10	✓
A1-2	Armenia	0,06	1,2	0,05	✓
A1-3	Armenia	0,06	0,86	0,07	✓
A1-7	Armenia	0,05	1,3	0,04	✓
T2-7	Tebaida	0,01	0,09	0,11	✓
F3-2	Filandia	0,08	3,1	0,03	✓
F3-7	Filandia	0,06	2,0	0,03	✓
F3-9	Filandia	0,11	2,8	0,04	✓
F6-1	Filandia	0,17	2,9	0,06	✓
QS14-4	Quimbaya	0,04	0,47	0,09	✓
A1-5	Sabana	0,21	0,19	1,11	X
G6-3	Barranquilla	N,D	0,03	-	X
G7-4	Barranquilla	0,03	0,02	1,5	X

✓ Kriterium erfüllt

X Kriterium nicht erfüllt

Folgerungen

Bodenproben, deren vulkanische Herkunft visuell bestätigt wurde, haben die Bedingungen der einzelnen Nachweismethoden für andische Eigenschaften erfüllt. Nur eine Bodenprobe (T2-7) hat bei einem Kriterium die entsprechenden Grenzwerte nicht erreicht. Deshalb wird dieser Boden für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Für die anderen Bodenproben, die aus anderen Regionen stammen und offensichtlich keine vulkanische Herkunft hatten, bestätigen die großen Abweichungen zu den Grenzwerten, dass es sich tatsächlich nicht um Ascheböden handelt.

2.2.4.2. Experimentelle Bestimmung des Allophananteils

Zielvorstellung

Im Folgenden wird zunächst der Allophananteil unterschiedlicher Bodenproben anhand von Methoden bestimmt und verglichen, die von verschiedenen Autoren in der Literatur beschrieben werden. Hierfür werden Bodenproben verwendet, die teilweise auch in den nachfolgenden Kapiteln wieder verwendet werden. Abschließend wird der nach den verschiedenen Methoden ermittelte Allophananteil mit einigen Eigenschaften dieser Bodenproben aus den standardisierten geotechnischen Untersuchungen verglichen.

Bodenproben

Es werden dieselben Ascheböden des Kapitels 2.2.4.1 untersucht.

Verfahren: Methode von Cascaredo et al. 2001

In einem ersten Ansatz wird der Methode einer mexikanischen Forschung gefolgt [Ca01]. Hierbei wird der Allophananteil [$\text{g/kg}_{\text{Boden}}$] mittels zweier Formeln bestimmt. Dazu werden die Anteile an Aluminium und Eisen in der jeweiligen Probe benötigt. Im Rahmen ihrer Untersuchungen haben die Autoren erkannt, dass ein Zusammenhang zwischen dem Allophananteil und dem Verwitterungsgrad der Probe besteht. Je nach Verwitterungsgrad unterscheiden sie verschiedene Horizonte, die mit den Buchstaben A (Formel A) und B (Formel B) gekennzeichnet sind.

$$\text{Formel Horizont A: } \textit{Allophan} = -12,7 + 2,4(\textit{Alo} + 0,5\textit{Feo}) \quad (1)$$

$$\text{Formel Horizont B: } \textit{Allophan} = -8,9 + 2,9(\textit{Alo} + 0,5\textit{Feo}) \quad (2)$$

Wobei *Alo*, *Feo* mit Ammoniumoxalat-Säure extrahierbares Aluminium und Eisen bedeuten.

Für die eigenen Untersuchungen werden beide Formeln benutzt und verglichen, weil die Herkunft in Bezug auf den Verwitterungshorizont nicht bekannt ist. Aluminium und Eisen wurden dann für eine erste Gruppe Bodenproben bestimmt.

Verfahren: Methode von Parfitt und Wilson 1985

Im zweiten Ansatz wird die Methode von Parfitt [Pa85] benutzt. Diese Methode errechnet einen Wert des Allophananteils [%] aus dem Gehalt an Aluminium, Eisen und Silizium.

Zur Bestimmung des Allophananteils wird das Verhältnis von Aluminium zu Silizium herangezogen. Dieses Verhältnis wird nach der Formel $(\textit{Alo}-\textit{Alp})/\textit{Sio}$ berechnet. (*Sio* = mit Ammoniumoxalat, *Alo* = mit Ammoniumoxalat, *Alp* = mit Natrium-Pyrophosphat extrahierbares Silizium/Aluminium). Mit diesem Verhältnis wird ein Faktor bestimmt (Tabelle 4), der, multipliziert mit dem Anteil an *Sio*, den Allophananteil definiert. Der Siliziumgehalt der Bodenproben aus Circasia wurde nicht bestimmt, deshalb wird für diese Gruppe nur die Methode von Cascaredo [Ca01] benutzt.

Tabelle 4: Al/Si Atomverhältnisse und Faktor für die Abschätzung des Allophananteils [Pa85]

Al/Si	Faktor ^A	Al/Si	Faktor ^A
1,0	5	2,5	10
1,5	6	3,0	12
2,0	7	3,5	16

Ergebnisse

Die einzelnen Ergebnisse der Aluminium-, Eisen-, und Silizium- Bestimmung, so wie die ermittelten Werte des Allophananteils nach den beschriebenen Methoden sind in Tabelle 5 und 6 zusammengestellt.

Tabelle 5: Allophananteil nach Cascaredo [Ca01]

Probe	Alo g/kg	Feo g/kg	Alo +0,5Feo g/kg	Allophananteil g/kg	
				Formel A	Formel B
C6M7	36	4,8	38,4	79	102
C5M5	42	3,5	43,7	92	118
C6M3	50	9,2	54,6	118	149
C2M3	57	9,9	61,9	136	171
C1M8	62	2,7	63,3	139	175
A1-2	12	3,2	13,6	19,9	30,5
A1-3	8,6	1,3	9,3	9,5	17,9
A1-7	13	1,9	14,0	20,8	31,6
T2-7	0,9	1,4	1,6	-8,9	-4,3
F3-2	31	7,3	34,7	70,5	91,6
F3-7	20	4,4	22,2	40,6	55,5
F3-9	28	4,2	30,1	59,5	78,4
F6-1	29	6,5	32,3	64,7	84,6
QS14-4	4,7	3,2	6,3	2,4	9,4
A1-5	1,9	3	3,4	-4,5	1,0
G6-3	0,3	1,1	0,9	-10,7	-6,4
G7-4	0,2	0,7	0,6	-11,4	-7,3

Tabelle 6: Allophananteil nach Parfitt [Pa85]

Probe	Alo g/kg	Alp g/kg	Sio g/kg	(Alo-Alp) Sio	Faktor	Allophan g/kg
A1-2	12	0,6	7,2	1,58	6,16	44,4
A1-3	8,6	0,6	6,4	1,25	5,5	35,2
A1-7	13	0,5	8,7	1,44	5,88	51,2
T2-7	0,9	0,1	0,9	0,89	4,8	4,3
F3-2	31	0,8	25	1,21	5,42	135
F3-7	20	0,6	14	1,39	5,8	81,2
F3-9	28	1,1	24	1,12	5,2	124,8
F6-1	29	1,7	21	1,3	5,6	117,6
QS14-4	4,7	0,4	2,5	1,72	6,4	16
A1-5	1,9	2,1	0,5	-0,4	-	-
G6-3	0,3	ND*	0,5	-	-	-
G7-4	0,2	0,3	0,4	-0,25	-	-

*ND: nicht feststellbar

(für die Proben C1-C6 sind keine Daten verfügbar)

Nach den Formeln von Cascaredo [Ca01] ergeben sich für jede Bodenprobe zwei Werte. Mangels hinreichender Information über den Entnahmehorizont wird von einer eindeutigen Zuordnung des Allophananteils abgesehen. Wichtiger sind die Tendenzen der Werte untereinander, die in diesem Fall sehr ähnlich sind (Abbildung 7) und gegenüber anderen Eigenschaften (wie Plastizität, Druckfestigkeit, u.a.), welche im Folgenden untersucht werden.

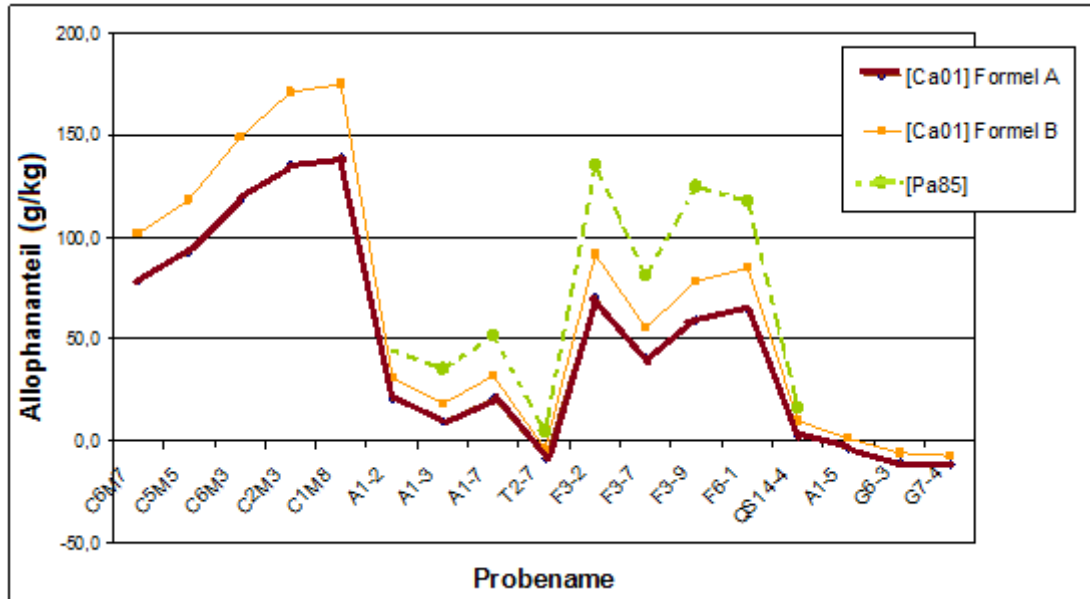


Abbildung 7: Vergleich der Ergebnisse nach der Methode von Cascaredo und Parfitt

Die Ergebnisse für die Böden, die keine vulkanische Herkunft haben (A1-5, G6-3 und G7-4), weisen deutliche Unterschiede auf. Sie sind zum größten Teil negativ. Die negativen Werte nach [Ca01] sowie die sehr geringen Werte nach [Pa85] für die Bodenprobe T2-7 deuten auch für diesen Boden auf einen nicht vulkanischen Ursprung hin.

Folgerungen

Unabhängig von der Methode haben die Bodenproben aus Armenia, Quimbaya und Tebaida einen niedrigen Allophananteil. Den höchsten Anteil an Allophanen haben die Bodenproben aus Circasia und aus Filandia.

Die Beziehungen zwischen dem Allophananteil, bestimmt nach der Methode von Cascaredo [Ca01], und den Zustandsgrenzen ist in Abbildung 8 dargestellt. In dem Diagramm ist eine proportionale Abhängigkeit der Zustandsgrenzen vom Allophananteil zu erkennen. Diese Abhängigkeit ist besonders zur Fließgrenze deutlich ausgeprägt. Für die Fließgrenze jeder Bodensorte wurde eine Probe nach der konventionellen Methode (an der Luft getrocknet und durch die Masche No. 40 (0,425 mm) abgesiebt) vorbereitet. Die andere Probe wird mit dem ursprünglichen Wassergehalt getestet.

Tabelle 7: Eigenschaften der Böden aus Circasia

Probe	Tiefe	W %	WL Konv*	WL Alt*	WP Konv*	WP Alt*	Allophan g/kg	
							Formel A	Formel B
C6M7	4,05-4,5	88,1	34,3	62,3	27,9	41,8	79	102
C5M5	5,0-5,4	86,7	39,4	74,6	36,5	46,9	92	118
C6M3	2,3-2,7	84,8	45,5	93,5	39,5	70,8	118	149
C2M3	2,55-2,8	80,0	44,5	109,0	37,2	75,0	136	171
C1M8	4,6-5,0	101,6	31,1	105,6	25,7	70,7	139	175

***Alt**: Alternative Methode, bei der die Proben vor dem Versuch nicht getrocknet werden.

***Konv**: Konventionelle Methode, bei der die Proben getrocknet werden.

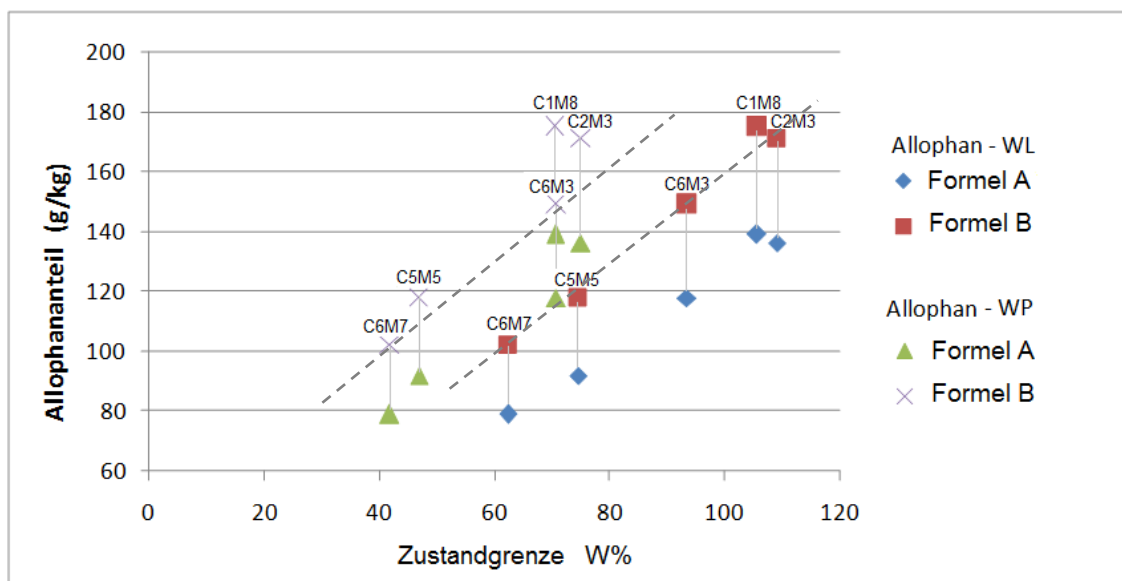


Abbildung 8: Fließ- und Ausrollgrenze versus Allophananteil für die Proben aus Circasia (nach der Methode von Cascaredo [Ca01]. Zustandsgrenzen nach alternativer Methode)

Die hier betrachteten Werte der Zustandsgrenzen wurden mit der alternativen Methode bestimmt, d.h. die Proben wurden vor dem Versuch nicht getrocknet. Bei Anwendung der konventionellen Methode, d.h. mit Trocknung, ist die Proportionalität nicht zu erkennen (siehe Abbildung 9).

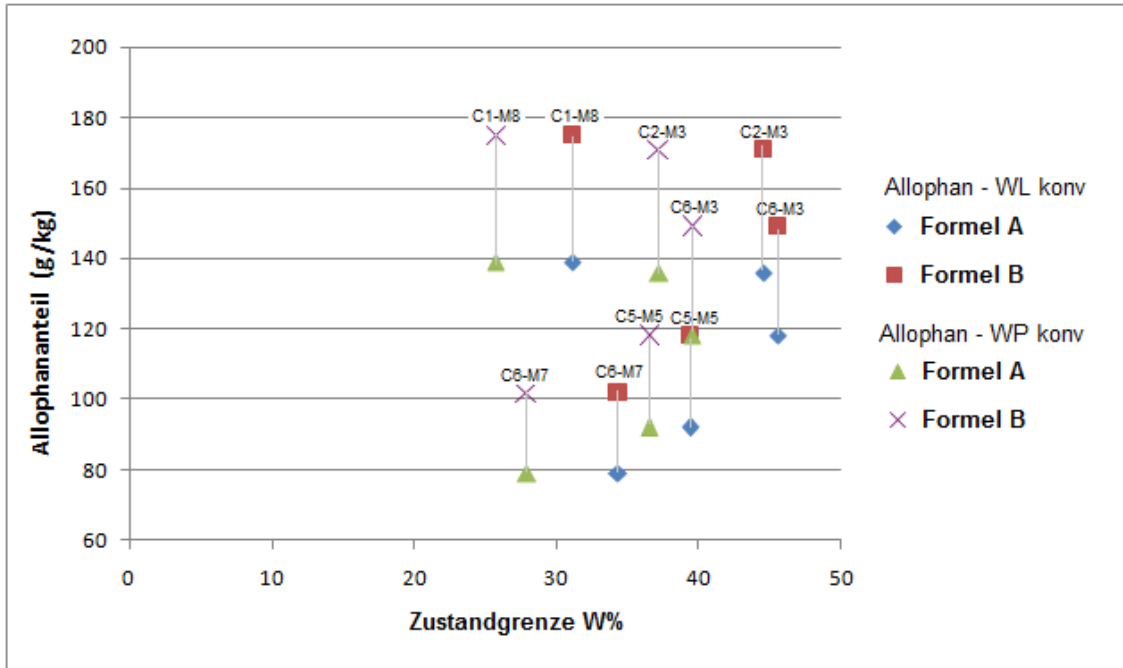


Abbildung 9: Fließ- und Ausrollgrenze versus Allophananteil für die Proben aus Circasia (nach der Methode von Cascaredo [Ca01]. Zustandsgrenzen nach konventioneller Methode)

Die Untersuchung der Festigkeit der Aschen ist in Abbildung 10 dargestellt. Obwohl die Datenbasis schmal ist, ist eine deutliche Tendenz zwischen den höheren Werten der Einaxialdruckfestigkeit (von mit originalem Wassergehalt verdichteten Bodenproben) und den höheren Allophananteilen ablesbar.

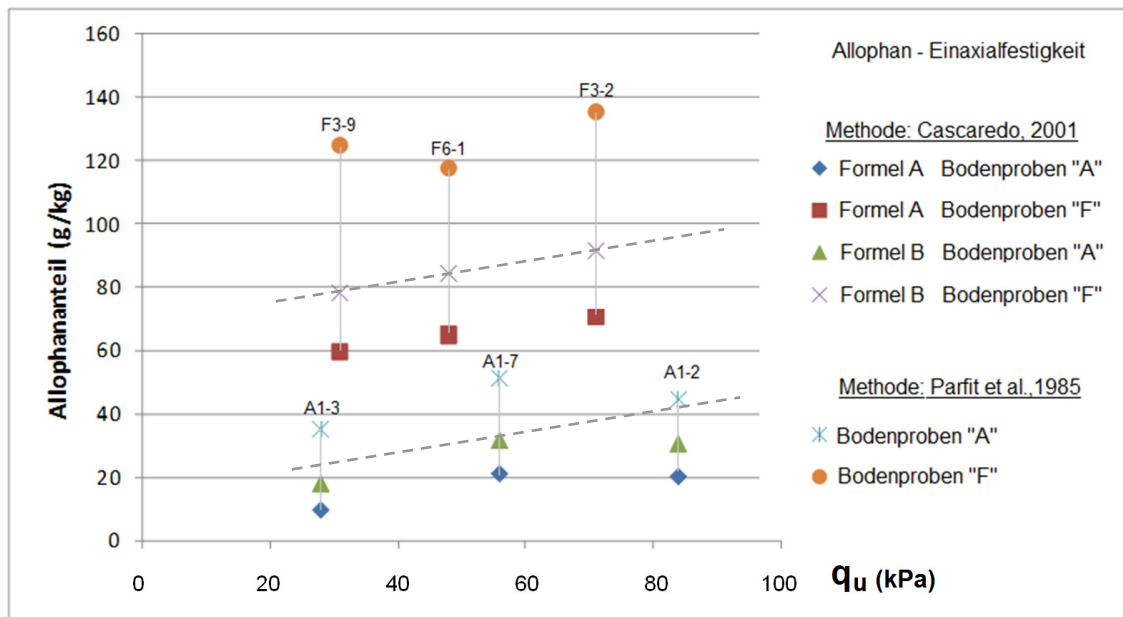


Abbildung 10: Allophananteil (nach verschiedenen Methoden) – Einaxialdruckfestigkeit

Ähnlich deutliche Tendenzen zeigen sich auch beim Zusammenhang von Wassergehalt und Allophananteil (Abbildung 11)

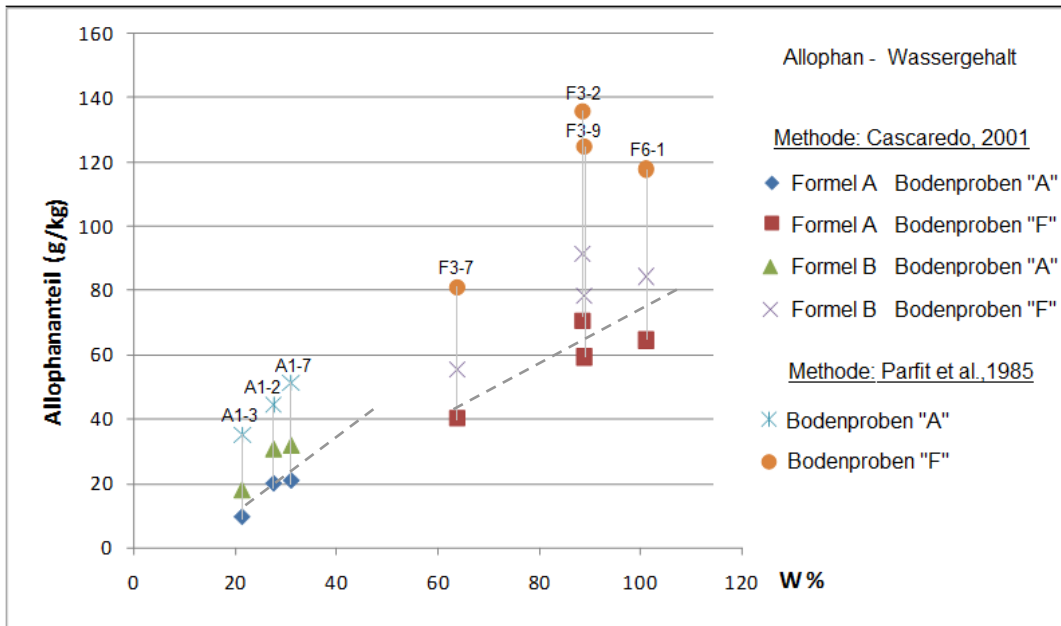


Abbildung 11: Allophananteil (nach verschiedenen Methoden) vs. Wassergehalt

Die Beziehung der Trockendichte zum Allophananteil ist ebenfalls deutlich ablesbar. Mit steigendem Allophananteil reduziert sich die Trockendichte (Abbildung 12).

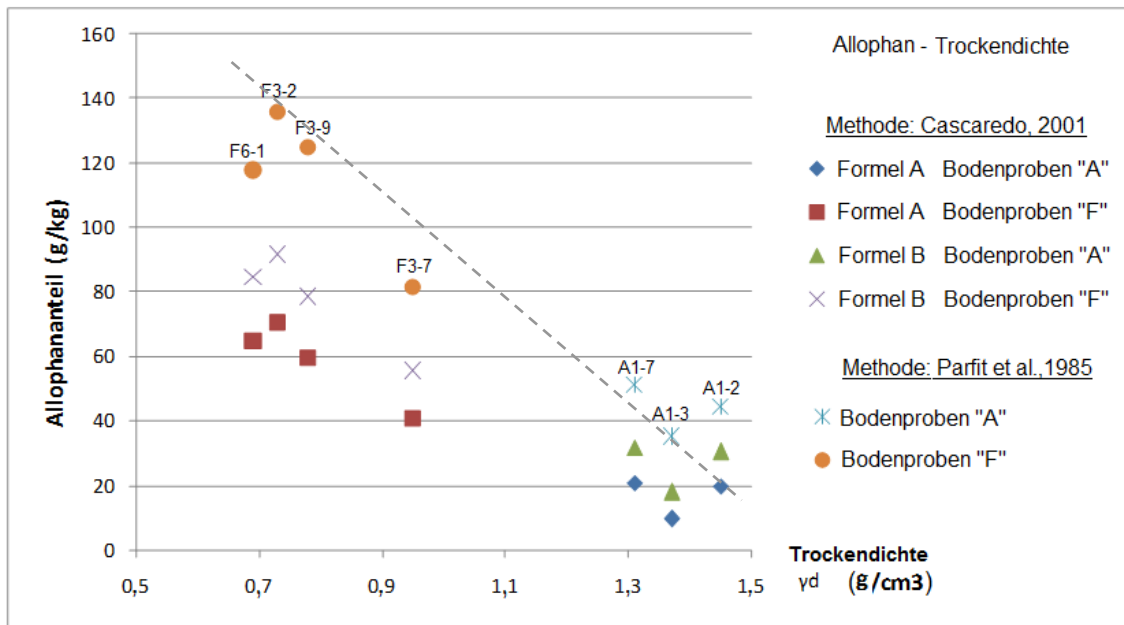


Abbildung 12: Allophananteil (nach verschiedenen Methoden) vs. Trockendichte

Praxis- Erfahrungen

Einige Autoren aus dem Bereich der Bodenkunde haben sich mit dem Thema beschäftigt, wie der Allophananteil einen bestimmten Einfluss auf physische oder mechanische Eigenschaften haben kann. Einige dieser Erfahrungen sind in den folgenden Diagrammen zusammengefasst.

Wan [Wa02] zeigt die Bedeutung des Allophananteils bei der Bestimmung der linearen Schrumpfung, des Schwellens, der Fließgrenze und dem Zusammenhang mit der Ton-Aktivität¹. In diesen Fällen gibt es eine Beziehung zum Allophananteil des Bodens (Abbildung 13).

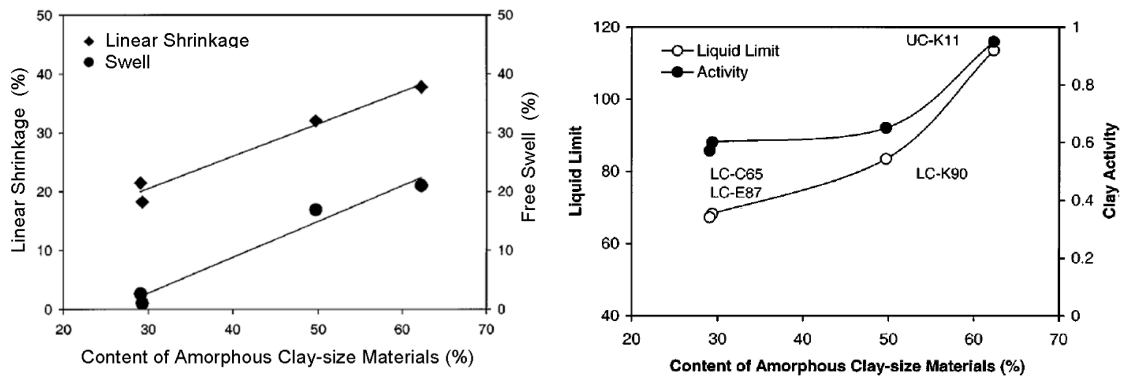


Abbildung 13: Beziehung von Allophananteil vs. Schrumpfen und Fließgrenze [Wa02]

Ei-Kon So [So98] fand unter Anderem folgende Beziehungen zwischen dem Allophananteil und dem Wassergehalt, der Fließgrenze (Abbildung 14) und der Ausrollgrenze. Zur Liquiditätszahl konnte kein Zusammenhang erkannt werden (Abbildung 15).

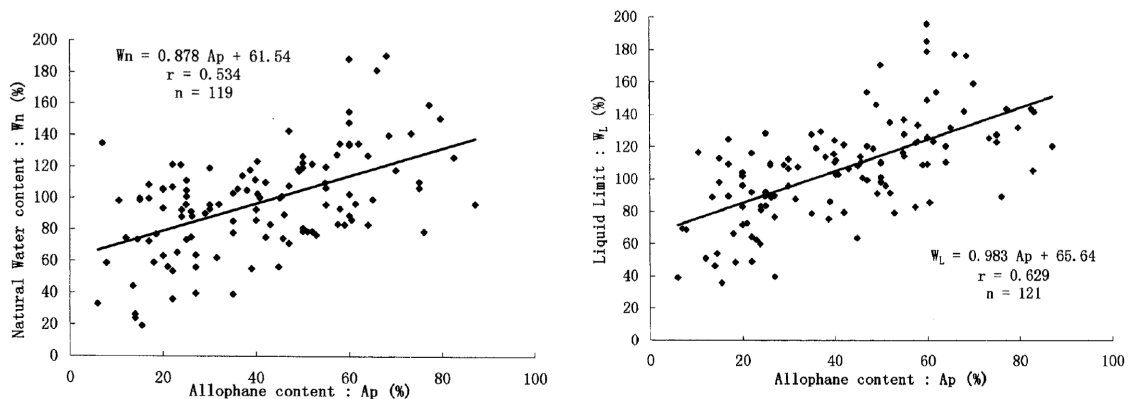


Abbildung 14: Beziehung von Allophananteil vs. Wassergehalt und Fließgrenze [So98]

¹ Je höher die Anteile der quellfähigen Tonminerale in der Tonfraktion sind, desto größer ist das Wasserbindungsvermögen und damit auch die Plastizität eines Bodens. Aktivitätszahl $I_A = I_p/q^*$. I_p = Plastizitätszahl, q^* = prozentuale Anteil der Fraktion < 0,002mm, bezogen auf ein Maximalkorn von 0,5mm. Inaktiv: $I_A < 0,75$; normal aktiv: $0,75 < I_A < 1,25$; aktiv: $I_A > 1,25$. [La03].

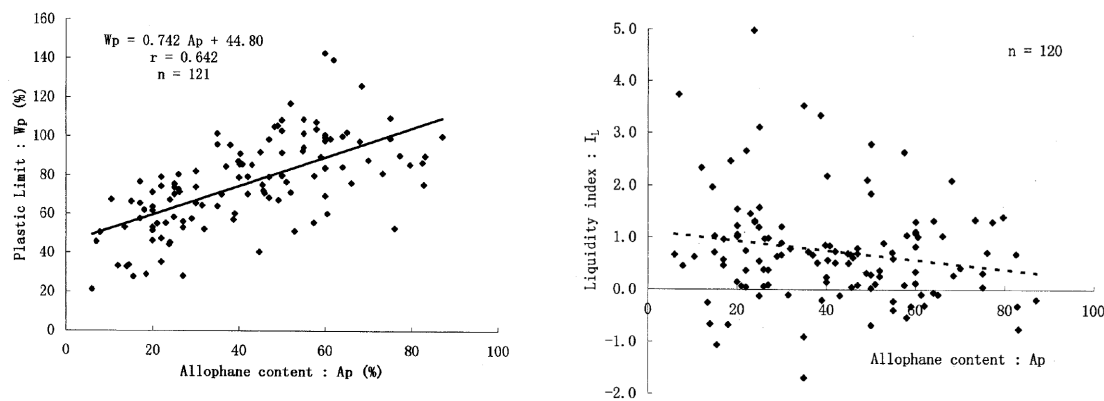


Abbildung 15: Beziehung von Allophananteil vs. Ausrollgrenze und Liquiditätszahl. [So98]

Mit dem Allophananteil nehmen parallel auch Porosität und spezifische Oberfläche zu [So98] [Va02].

2.2.4.3. Röntgenbeugungsanalyse XRD des Bodens

Zielvorstellung

Angesichts der Komplexität der Struktur und der Zusammensetzung der vulkanischen Ascheböden werden in diesem Kapitel Untersuchungen beschrieben, die mit den traditionellen Verfahren der mineralogischen Untersuchung durchgeführt wurden, um zu überprüfen, ob der Zustand der Bodenprobe einen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Verfahren

Bei einer Röntgenbeugungsanalyse XRD, die in der Mineralogie zur Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung durchgeführt wird, werden bei dem traditionellen Verfahren Röntgen- oder Gammastrahlen auf die zerkleinerte, polierte oder in eine bestimmten Form gebrachte Bodenprobe geleitet. Als Ergebnis einer XRD - Untersuchung wird ein Spektrum bestimmt, das es dem Mineralogen erlaubt, die verschiedenen Bestandteile der Probe zu erkennen. Die Spektren üblicher Bodenproben zeigen normalerweise im Ergebnisdiagramm eine fast flache oder leicht gekrümmte Linie, die an verschiedenen Punkten der horizontalen Achse unterschiedliche Amplituden aufweist.

Das Untersuchungsergebnis eines nicht vulkanischen Bodens (nach der traditionellen Behandlung) ist in Abbildung 16 dargestellt.

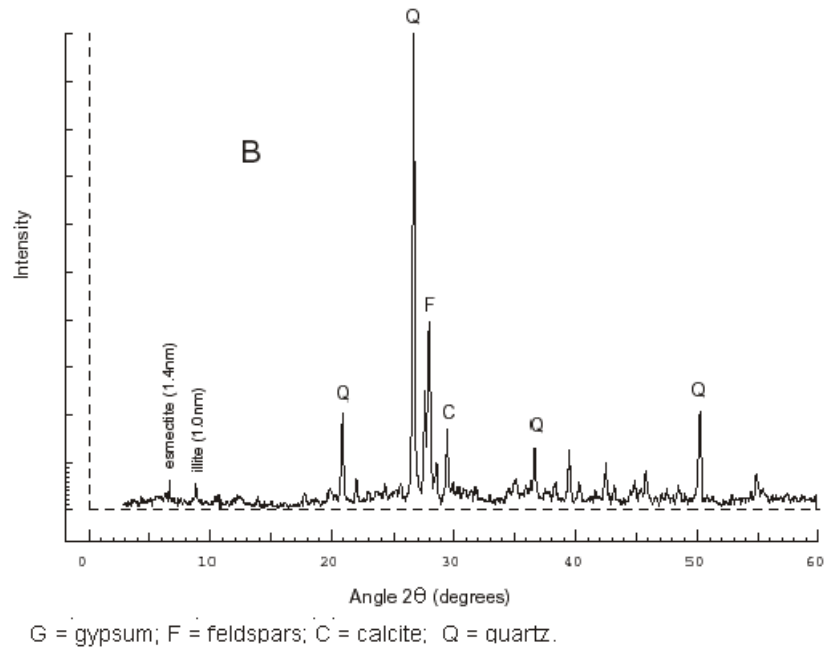


Abbildung 16: X-Ray Diffraktogramm eines Karbonat Bodens [SiO₂]

Auf der horizontalen Achse sind die verschiedenen 2-Theta Werte (der Beugungswinkel) aufgetragen, mit der die Röntgenstrahlen von der Oberfläche der Kristalle eines bestimmten Minerals reflektiert werden. Auf der vertikalen Achse werden die Werte der relativen Intensität der Strahlung aufgetragen. Durch die Kenntnis des charakteristischen Abstrahlwinkels können die wichtigsten Komponenten, aus denen der Boden zusammengesetzt ist, an Hand der relativen Häufigkeit identifiziert werden.

Ergebnisse eigener Untersuchungen

In diesem Fall werden von den vulkanischen Ascheböden eine ungestörte, eine an der Luft getrocknete, eine zermahlene und getrocknete Probe untersucht.

Die Grafiken in Abbildung 17 zeigen deutliche Unterschiede, die durch die Behandlung der Proben hervorgerufen werden. In der ungestörten Probe zeigen sich die meisten Spitzen. Dies deutet darauf hin, dass die Probe einen großen Anteil an amorphen Substanzen beinhaltet. Durch das Trocknen bzw. Trocknen und Mahlen wird die Bodenprobe stark verändert, so dass –vermutlich- ein Teil der amorphen Bestandteile abgebaut wird.

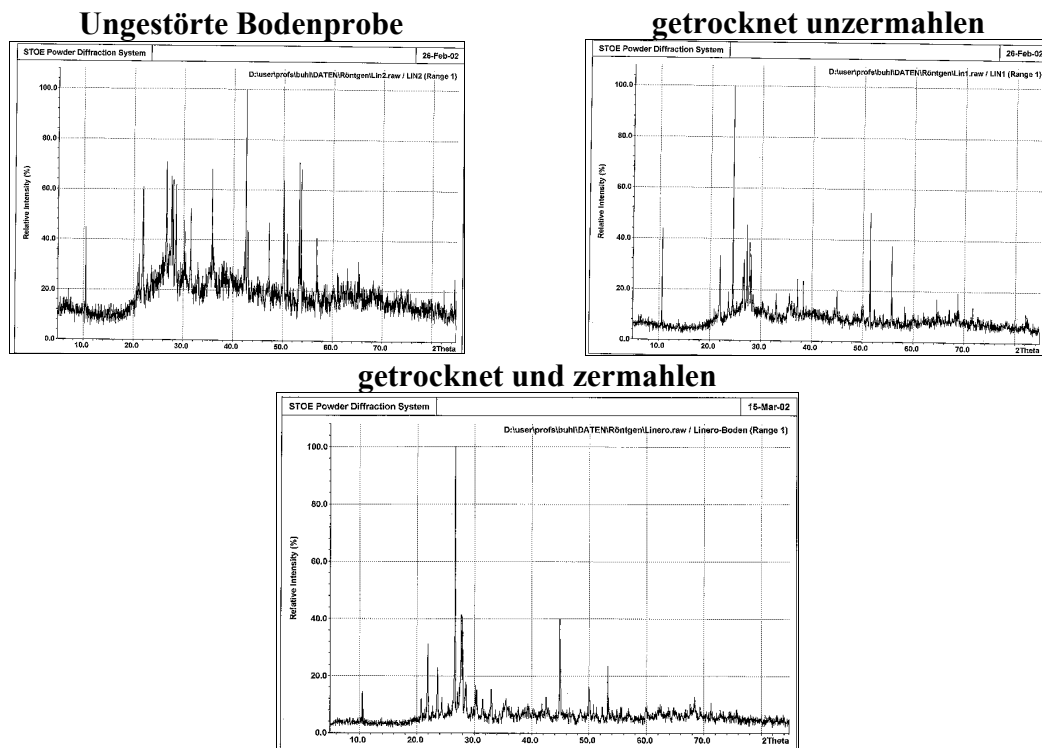


Abbildung 17: XRD Untersuchung einer Bodenprobe mit verschiedenen Bearbeitungen. Bilder: Prof. Dr. Christian Buhl. Institut für Mineralogie. Universität Hannover

Auswertung der Untersuchung

- Die relative Intensität bei einer XRD - Untersuchung wird durch die Veränderung der Probe massiv beeinflusst. Das Verfahren zeigt die Empfindlichkeit der Struktur der Ascheböden. Die Zusammensetzung der Probe nach unterschiedlichen Behandlungen ist deutlich zu erkennen.
- Bei einer normalen XRD-Bestimmung wird die Probe nie ungestört analysiert, Deshalb werden normalerweise die Einflüsse unterschiedlicher Probenzustände nicht bemerkt.
- Die Zustandsgrenzen werden in erster Linie dazu verwendet, eine Abschätzung der Menge der Tonmineralien zu bekommen und in dieser Form dem Material eine entsprechende Identifizierung zu geben. Bei dem internationalen System USCS sind anhand der Zustandsgrenzen die feinen Anteile zwischen Ton und Schluff und die Plastizität zwischen hoch und niedrig differenziert.

Da die Zustandsgrenzen durch die Behandlung der Bodenproben beeinflusst werden können und in vielen Fällen das Ausmaß der Störung einer entnommenen Probe nicht bekannt ist, können mineralogische Analysen mittels XRD schnell und zuverlässig durchgeführt werden. Speziell bei vulkanischen Böden sollten geotechnische Charakterisierungen hierdurch unterstützt werden, um die Tonmineralien, Allophane und den Zustand der Bodenprobe eindeutig zu identifizieren.

Durch den Einsatz der XRD-Methode werden detaillierte Informationen über die mineralogische Zusammensetzung der vulkanischen Ascheböden bestimmt, die durch das im Bereich der Bodenkunde (Fließgrenze, Ausrollgrenze) verwendete System nicht ermittelt werden können.

Einige Autoren aus dem Bereich der Mineralogie haben über Veränderungen des Röntgenbeugungsschemas durch die Trocknung (nicht durch das Zermahlen) berichtet [Be68] und zur Erkennung von amorphen Anteilen benutzt.

2.2.4.4. Bestimmung der mineralogischen Bestandteile

Die Bestandteile einiger vulkanischer Ascheböden dieser Arbeit sind mit Hilfe der XRD - Analyse bestimmt worden. Bodenproben in den verschiedenen Zuständen (ungestört oder getrocknet) wurden dann dem Labor übergeben, mit der besonderen Anweisung, die Proben möglichst vorsichtig zu behandeln, um sie zerstörungsarm untersuchen zu können.

Wegen der notwendigen Vorbereitungen der Versuche ist es jedoch unumgänglich, dass die Proben einer gewissen Störung ausgesetzt wurden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Mineralogische Analyse durch X-Ray-Diffraction



INGEOMINAS

ANALISIS MINERALOGICO POR DIFRACCION DE RAYOS-X

1/3

(Diffractometro RIGAKU Rint 2200)

RG4-03

2 de Noviembre del 2004

Solicitud No 218/2004

PROBE	MINERALIEN	ZUSAMMENSETZUNG	MENGE
MUESTRA	MINERALES	COMPOSICION	ABUNDANCIA
C2M3 UNGESTÖRT	Quarz	SiO ₂	++
	Feldspat (ND)	(Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	++++
	Amphibole (ND)	-----	+
	Pyroxene (ND)	-----	*
	Cristobalit	SiO ₂	+
	Illit (ND)	KAl ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
	Vermiculit	-----	*
	Illit /Vermiculit interbedded	-----	*
	Illit / Chlorit interbedded	-----	*
	Illit / Esmecht interbedded	-----	*
	Amorphes Material	-----	*
	Organisches Material	C	*
	C2M3 Luft getrocknet	Quarz	SiO ₂
Feldspat (ND)		(Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	++++
Amphibole (ND)		-----	++
Pyroxene (ND)		-----	+
Cristobalit		SiO ₂	++
Epidot (ND)		-----	*
Illit (ND)		KAl ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
Chlorit (ND)		-----	*
Illit /Vermiculit interbedded		-----	*
Illit / Chlorit interbedded		-----	*
Amorphes Material		-----	*
Organisches Material		C	*
C2M3 Ofen getrocknet		Quarz	SiO ₂
	Feldspat (ND)	(Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	+++
	Amphibole (ND)	-----	+++
	Pyroxene (ND)	-----	*
	Cristobalit	SiO ₂	+
	Illit (ND)	KAl ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
	Vermiculit ?	-----	*
	Chlorit (ND)	-----	*
	Kaolinit (ND)	-----	*
	Illit / Vermiculit interbedded	-----	*
	Amorphes Material	-----	+
	Organisches Material	C	*

PROBE	MINERALIEN	ZUSAMMENSETZUNG	MENGE
MUESTRA	MINERALES	COMPOSICION	ABUNDANCIA
C5M5 UNGESTÖRT	Quarz	SiO ₂	++++
	Feldspat (ND)	(Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	+++
	Amphibole (ND)	-----	++
	Pyroxene (ND)	-----	+
	Cristobalit	SiO ₂	++
	Epidot (ND)	-----	*
	Illit (ND)	KAl ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
	Vermiculit ?	-----	*
	Kaolinit (Halloysite)	-----	+
	Illit / Vermiculit interbedded	-----	*
	Amorphes Material	-----	+
	Organisches Material	C	*
	C5M5 Luft getrocknet	Quarz	SiO ₂
Feldspat (ND)		(Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	++++
Amphibole (ND)		-----	++
Pyroxene (ND)		-----	+
Cristobalit		SiO ₂	++
Epidot (ND)		-----	*
Illit (ND)		KAl ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
Vermiculit ?		-----	*
Kaolinit (ND)		-----	*
Chlorit		-----	*
Illit / Vermiculit interbedded		-----	*
Amorphes Material		-----	+
Organisches Material		C	*
C5M5 Ofen getrocknet	Quarz	SiO ₂	+++
	Feldspat (ND)	(Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	++++
	Amphibole (ND)	-----	++
	Pyroxene (ND)	-----	+
	Cristobalit	SiO ₂	++
	Epidot (ND)	-----	*
	Illit (ND)	KAl ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
	Vermiculit	-----	*
	Chlorit	-----	*
	Illit / Vermiculit interbedded	-----	*
	Illit / Chlorit interbedded	-----	*
	Amorphes Material	-----	+
	Organisches Material	C	*

PROBE	MINERALIEN	ZUSAMMENSETZUNG	MENGE
MUESTRA	MINERALES	COMPOSICIÓN	ABUNDANCIA
C6M3 UNGESTÖRT	Quarz	SiO ₂	++
	Feldspat (ND)	(Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	++++
	Amphibole (ND)	-----	++
	Pyroxene (ND)	-----	+
	Cristobalit	SiO ₂	+
	Illit (ND)	KAl ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
	Vermiculit	-----	*
	Chlorit (ND)	-----	*
	Illit / Vermiculit interbedded	-----	*
	Illit / Chlorit interbedded	-----	*
	Amorphes Material	-----	+
	Organisches Material	C	*
C6M3 Luft getrocknet	Quarz	SiO ₂	+++
	Feldspat (ND)	(Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	+++
	Amphibole (ND)	-----	+
	Pyroxene (ND)	-----	*
	Cristobalit	SiO ₂	++
	Illit (ND)	KAl ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
	Vermiculit	-----	*
	Kaolinit (ND)	-----	*
	Illit / Vermiculit interbedded	-----	*
	Illit / Chlorit interbedded ?	-----	*
	Amorphes Material	-----	+
	Organisches Material	C	*
C6M3 Ofen getrocknet	Quarz	SiO ₂	+++
	Feldspat (ND)	(Ca,Na)AlSi ₃ O ₈	++++
	Amphibole (ND)	-----	++
	Pyroxene (ND)	-----	+
	Cristobalit	SiO ₂	++
	Illit (ND)	KAl ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	*
	Vermiculit	-----	*
	Chlorit (ND)	-----	*
	Illit / Vermiculit interbedded	-----	*
	Amorphes Material	-----	*
	Organisches Material	C	*

++++ reichlich (> 40%)
 +++ häufig (20 - 40%)
 ++ schwach (10 - 20%)
 + knapp (3 - 10%)
 * Spuren (< 3%)
 ? unklar
 ND: nicht differenziert

CONDICIONES DE OPERACIÓN:
 Tubo de rayos-X: Cu.
 Velocidad de escaneo: 5 grados/min.
 Paso: 0.02 y 0.01 grados
 Rango: 2.0 a 70.0 grados y 2.0 a 30 grados 2teta
 Voltaje: 40kV Amperaje: 30mA.
 Analista: Jaime Mojica

Ergebnisse

Die wichtigsten Komponenten einiger der in dieser Arbeit verwendeten Bodenproben sind: Quarz, Feldspat, Amphibole, Pyroxene, Cristobalit, Epidot, Illit, Vermiculit und amorphe Materialien. Die Ergebnisse zeigen keinen besonderen Einfluss der unterschiedlichen Zustände. Es gibt keine Mineralien, die die Tone zu besonderer Aktivität veranlassen wie z.B. Montmorillonit, Micas (Glimmer oder Moskovit) oder Smektit. Organische Anteile konnten nur in geringen Mengen festgestellt werden.

2.3. PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Die Entwicklung der klassischen Konzepte der Bodenmechanik hat sich fast ausschließlich auf die Untersuchung von unverwitterten Sedimentböden konzentriert. Diese Konzepte sind für die Beschreibung des Verhaltens von residualen Böden unzureichend und führen zu falschen Aussagen. Ein Beispiel für ungeeignete Schlussfolgerungen finden sich bei der Analyse tropischer Böden, wenn diese Tonmineralien, Halloysite und Allophane enthalten [Va88].

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Merkmale für die Charakterisierung von vulkanischen Ascheböden zusammengefasst. Zusätzlich werden die Schwierigkeiten beschrieben, die bei der Untersuchung im Labor auftreten können.

2.3.1. Wassergehalt und Permeabilität

Wegen der außergewöhnlichen Fähigkeit der Wasserretention kommen in vulkanischen Ascheböden hohe Wassergehalte in einer breiten Spanne von 30 bis 200 % vor. Das Wasser, das zur Struktur des Bodens gehört, ist dabei in den Bodenporen fixiert und kann weder durch Verdampfung noch durch Saugdrainage entfernt werden.

Ascheböden haben im ungestörten Zustand eine hohe Permeabilität und eine niedrige im gestörten (verdichteten) Zustand. Nach Tausend [To85] resultieren diese hohen Permeabilitäten (die für hohe Zustandsgrenzen nicht zu erwarten wären) durch die Auslaugung infolge kräftiger Niederschläge. Ermittelte Werte der Porenzahl von 2,5 bis 7 können ebenfalls ein Indiz hierfür sein [We01] [So98].

Yong [Yo75] berichtet über die Erhöhung der Permeabilität durch Trocknung und De [De73] vermutet, dass dieses Phänomen zu Piping (innere Erosion) führen kann. In diesem Fall hätte dies einen Einfluss auf die Stabilität von Böschungen [Pe91]. Einige typische Werte der Permeabilität von Ascheböden sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Typische Werte der Permeabilität

Bodenart und Ursprung	Permeabilität [cm/s]		Quelle
	in-situ	verdichtet	
Red residual andosol, Kenya	10^{-4}	10^{-7}	Foss, 1973 - [To85]
Andosol	4×10^{-6}	$3,2 - 2,7 \times 10^{-8}$	Wesley, 1974 - [To85]
Andosol		$5,7 - 2,4 \times 10^{-7}$	Wallace, 1973 - [Pe91]
Andosol (getrocknet und dann verdichtet)		$3,9 \times 10^{-5} - 5,1 \times 10^{-4}$	Wesley, 1974 - [Pe91]
Halloysite		$1 - 9 \times 10^{-7}$	Wesley, 1977 - [Pe91]
Normal London Clay (als Vergleich)		2×10^{-9}	[Pe91]

Die hohen Durchlässigkeitsbeiwerte widersprechen dem allgemeinen Konzept, dass eine höhere Plastizität und höhere Feinanteile immer mit einer niedrigeren Permeabilität verbunden sind.

Aus eigenen Erfahrungen kann vielmehr festgestellt werden, dass die Drainage, um zum Beispiel die Konsolidierungsprozesse zu beschleunigen und/oder einen Porenwasserüberdruck abzubauen, eine komplizierte Aufgabe ist. Möglicherweise bieten Durchlässigkeitsbestimmungen besondere Bedingungen (kürzere Wege für das strömende Wasser oder höhere hydraulische Gefälle), die die Sickerströmung begünstigen. Das innere Wasser lässt sich für die genannten Zwecke aber nur schwer aus dem Boden durch Filtern entfernen.

2.3.2. Korngrößenverteilung

Bei der Durchführung einer Schlämmanalyse von Böden mit hohen Allophananteilen sind Probleme in der Art abzusehen, dass diese Materialien bei der Dispersion Flocken bilden, die zu einer Unterbewertung der Tonanteile führen.

Die Verwitterungsprodukte vulkanischer Aschen unterscheiden sich deutlich von denen der meisten anderen mineralischen Böden. Als Folge bekommt bei den Andosols auch eine grundlegende Eigenschaft wie die Textur eine neue Bedeutung. Viele der Verwitterungsprodukte, vor allem in feuchter Umgebung, neigen dazu, als Gel und nicht als diskrete Ton-Partikel vorzukommen. Dies, verbunden mit hoher variabler chemischer Ladung, macht eine vollständige Dispersion dieser Materialien schwierig. Nicht überraschend ist die Tatsache, dass Korngrößenanalysen im Labor auf weniger toniges Material hinweisen als Feldabschätzungen. (Ping et al.1989) [Bu91].

Die konventionelle Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Nasssiebung und Schlämmanalyse führt deshalb zu unzutreffenden Ergebnissen bei der Analyse von vulkanischen Aschen. Zudem haben die Randbedingungen, unter denen die Bodenproben vorbereitet werden, einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse. Die Trocknung einer Probe verursacht z.B. unwiderrufliche Umwandlungen (Dehydration, Aggregation, usw.) der Tonmineralien (Halloysite, Allophane und Imogolite). Diese Mineralien zeigen, wie bereits erwähnt, eine starke Tendenz zur Flockung, die die Ergebnisse der Schlämmanalyse verfälschen. Auf der anderen Seite werden die Ergebnisse der Siebanalyse bei diesen Böden, die zu Aggregatbildung neigen, vom Grad der Zerkleinerung des Materials beeinflusst [We73][Ma77][Ro86][Ra95].

Das Problem liegt dabei nicht so sehr in der Dispersion der Partikel, vielmehr ist es nicht möglich, die erneute Ausflockung zu verhindern. Auch der Einsatz von Lösungen mit Natriumsilikat, Natriumhydroxid oder Chlorwasserstoffsäure, die hierfür eingesetzt werden, führen zu keiner Verbesserung des Verhaltens. Diese Probleme gehören zum täglichen Erscheinungsbild in den geotechnischen Laboren Kolumbiens.

2.3.3. Zustandsgrenzen

Die Bestimmung der Plastizitätskennwerte bei vulkanischen Ascheböden ist schwierig, weil das Material umgewandelt wird, wenn es an der Luft oder im Ofen getrocknet wird. Die Ergebnisse konventioneller Klassifikationsversuche der Zustandsgrenzen werden von der Vorbehandlung dabei ebenso stark beeinflusst wie die Korngrößenverteilung.

Laborergebnisse zeigen, dass die Fließgrenze nach Trocknung unumkehrbar abnimmt (Abbildung 18). Wesley hat zudem festgestellt, dass aus sehr feinkörnigen kohäsiven Tonen können so nichtplastische feine Sande werden können [We73]. Wegen der Veränderung der Materialeigenschaften durch Luft- oder Ofentrocknung wird seit Jahren im Labor die Fließ- und Ausrollgrenze von Ascheböden mit dem ursprünglichen Wassergehalt bestimmt.

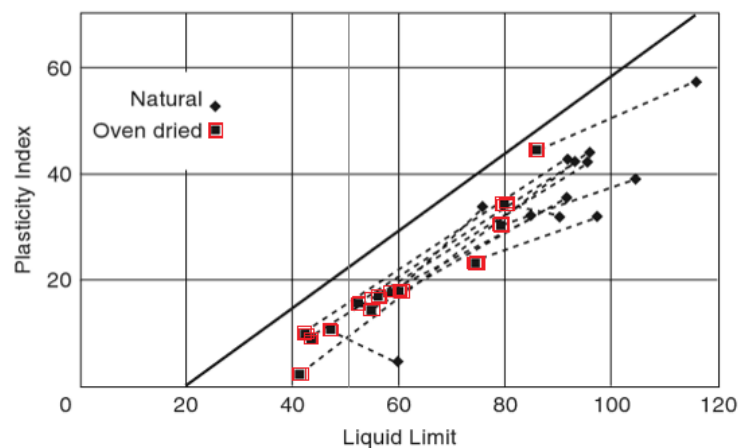


Abbildung 18: Veränderung der Plastizität durch Trocknung [We10]

Der Grund für die unterschiedlichen Prüfungsergebnisse vor und nach der Trocknung der Bodenproben ist in der Literatur nicht abschließend behandelt. Es haben sich aber zwei Faktoren herauskristallisiert, die dafür verantwortlich zu sein scheinen. Einer ist die mögliche Umwandlung hydratisierter Halloysite zu Metahalloysiten und der andere ist der Einfluss des Allophans [We73], das anscheinend amorphe Mineral, das in den meisten Ascheböden in Kolumbien und auch in anderen Ländern anzutreffen ist. Bei der Trocknung finden Umwandlungen statt, die zu einer Aggregation der Partikel führt. Dies resultiert in einer Veränderung der Plastizität, bleibenden Verformungen und der Entstehung von Rissen. Je höher dabei der ursprüngliche Wassergehalt ist, desto bedeutsamer ist die Umwandlung durch die Trocknung [We88]. In der Tabelle 10 sind einige Merkmale in Folge unterschiedlicher Behandlung aufgelistet. Dabei ist die Veränderung des Materials durch die Behandlung offensichtlich.

Tabelle 10: Ergebnisse von Laborversuchen an vulkanischen Ascheböden [We73]

Sample	Natural water content, %	Test condition	Atterberg limits			Specific gravity	Particle size		Standard compaction test	
			LL	PL	PI		Passing No. 200	Clay fraction	Optimum water content, %	Maximum dry density, g/cm ³
Y1	146	Natural	156	129	27	2.76	89	—	127	0.555
		Air-dried (w=39)	110	95	15	2.71	67	17	95	0.692
		Oven-dried	non-plastic			2.55	52	8	80	0.790
Y2	151	Natural	184	146	38	2.75	96	—	135	0.545
		Air-dried (w=33)	79	73	6	2.73	14	2	68	0.875
		Oven-dried	non-plastic			2.56	18	1	38	1.130
Y3	180	Natural	213	167	46	2.58	97	—	160	0.450
		Air-dried (w=28)	86	78	8	2.65	29	6	70	0.880
		Oven-dried	non-plastic			2.57	26	4	40	1.110
TJ1	128	Natural	165	119	46	2.80	96	65	20	0.61
		Air-dried (w=30)	60	53	7	2.78	37	11	55	0.96
		Oven-dried	44	42	2	2.54	16	4	40	1.19
TJ2	68	Natural	95	65	30	2.88	96	76	64	0.965
		Air-dried (w=28)	74	57	17	2.84	94	69	53	1.084
		Oven-dried	61	46	15	2.74	81	61	44	1.145

Wenn die Fließgrenze vor der Trocknung bestimmt wird, werden Ascheböden nach dem System USCS, als MH - Schluffe höherer Plastizität klassifiziert. Im Casagrande-Plastizitätsdiagramm befinden sie sich in einem breiten Bereich unterhalb der A-Linie. Wenn der Boden (nach Norm) einer Trocknung ausgesetzt wird, ergibt die Klassifikation in der Regel einen Schluff niedrigerer Plastizität - ML. Die hohe Streuung der Daten in der Klassifikation (Abbildung 19) entspricht der Praxis.

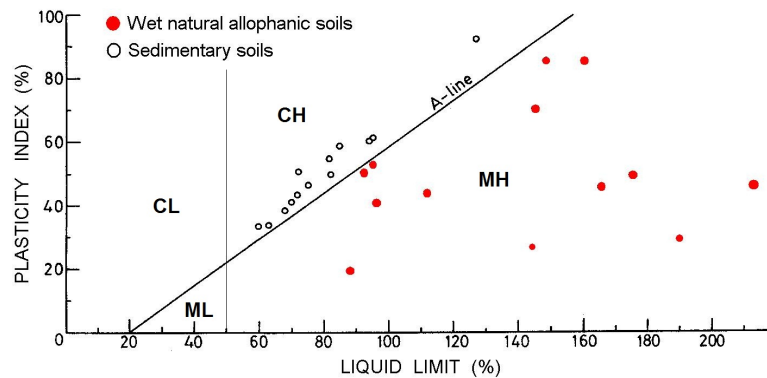


Abbildung 19: Klassifizierung von vulkanischen Ascheböden im Casagrande Plastizitätsdiagramm [Ra95]

Mitchell und Coutinho [Mi91] haben für diese Böden festgestellt, dass die Zustandsgrenzen durch Mischen eine leichte Abnahme zeigen. Als Erklärung vermuten sie, dass das „starre Wasser“ in der Struktur beim Mischen befreit worden ist und so die Veränderung bewirkt hat. Die Klassifizierung und die Bestimmung von Parametern dieser speziellen Böden im Labor mittels traditioneller Versuche der Geotechnik können von den Besonderheiten und den Empfindlichkeiten stark beeinflusst werden. Hierin sind die Gründe für das unterschiedliche Verhalten der Böden im Labor und in situ zu suchen. Die Untersuchung der Frage, was passiert, wenn man das Freiwerden des Wassers verhindert, wird in den folgenden Kapiteln behandelt.

2.3.3.1. Experimentelle Untersuchung der Zustandsgrenzen

Zielvorstellung

Der Effekt der Trocknung einer Probe ist in der Literatur in gewissem Umfang schon bekannt. Im Folgenden soll überprüft werden, ob eine leichte Trocknung, die während der normalen Behandlung einer Probe im Labor für die Bestimmung der Zustandsgrenzen stattfindet, schon ausreichend ist, um die Ergebnisse zu beeinflussen.

Verfahren

An drei vulkanischen Ascheböden in verschiedenen Zuständen (original, getrocknet an der Luft, wieder befeuchtet und im Ofen getrocknet) werden die Zustandsgrenzen bestimmt. Mit der Probe im Originalzustand werden zwei Varianten untersucht: bei der ersten wird der Boden traditionell behandelt, bei der zweiten wird der Boden immer in

doppelten, luftdicht verschlossenen Plastikbeuteln zerkleinert bis der Versuch durchgeführt wird. Einzelheiten des Verfahrens sind im Anhang dargestellt.

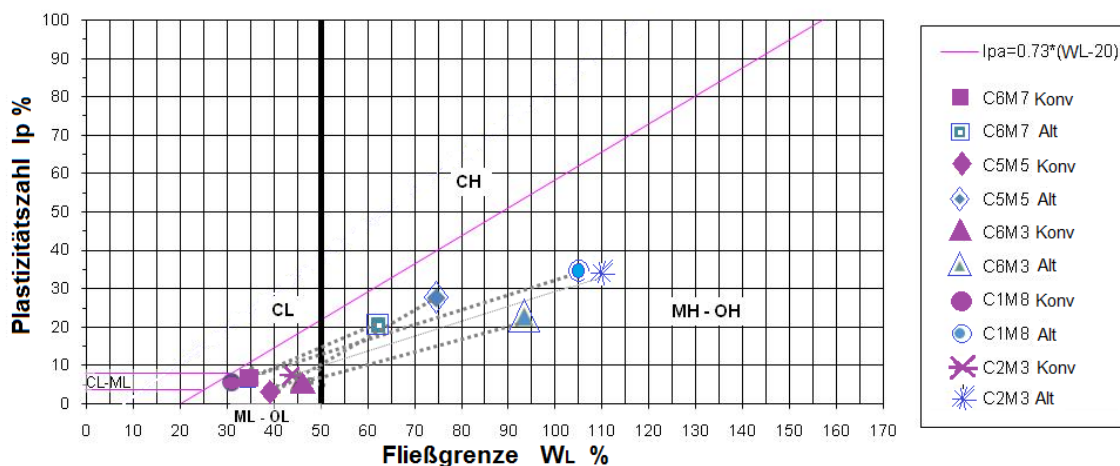
Bodenproben: Die Bodenproben kommen aus der Kaffee-Region Kolumbiens. In Tabelle 11 sind die für diesen Teil der Arbeit benutzten Bodenproben mit ihren wichtigsten Merkmalen aufgelistet. Für die Fließgrenze jeder Bodensorte wurde eine Probe nach der konventionellen Methode (an der Luft getrocknet und bei 0,42 mm abgesiebt) vorbereitet. Die andere Probe wird mit dem ursprünglichen Wassergehalt getestet. Der erste Wert ist in der Tabelle mit der Abkürzung *Konv* (Konventionell), der zweite mit *Alt* (Alternativ) gekennzeichnet.

Tabelle 11: Untersuchte Bodenproben

Probe name	Klassifizierung		W%	WL Konv	WL Alt	WP Konv	WP Alt
	Luft getrocknet	Nicht getrocknet					
C2M3	ML	MH	80	44,5	109	37,2	75
C1M8	ML	MH	101,6	31,1	105,6	25,70	70,7
C6M3	NP*	MH	84,8	45,5	93,5	39,5	70,8

*NP= nicht plastisch

In der Abbildung 20 wird anhand des Casagrande - Plastizitätsdiagramms gezeigt, in welchem Maße sich diese Materialien mit der Trocknung umwandeln und sich die Fließ- und Ausrollgrenze mit (konventioneller Methode) oder ohne Trocknung (alternativer Methode) verändern.



Alt: Alternative Methode, in der die Proben vor dem Versuch nicht getrocknet werden.

Konv: Konventionelle Methode in der die Proben getrocknet werden.

Abbildung 20: Klassifizierung mit und ohne Voraustrocknung

Ergebnisse

In dem folgenden Diagramm (Abbildung 21) werden nur die Ergebnisse der Probe C2M3 dargestellt. Die vertikale Achse zeigt den zur Fließ- und Ausrollgrenze gehörenden Wassergehalt in %. Jede Bodenprobe (bzw. jeder Zustand) wird durch eine unterschiedlich farbige Linie gekennzeichnet. Auf der horizontalen Achse ist keine

Skala angegeben, sie dient dazu, um den Abstand zwischen den Linien offensichtlich zu machen. Oberhalb der einzelnen Linien wird für jedes Ergebnis die entsprechende USCS- Klassifizierung angegeben.

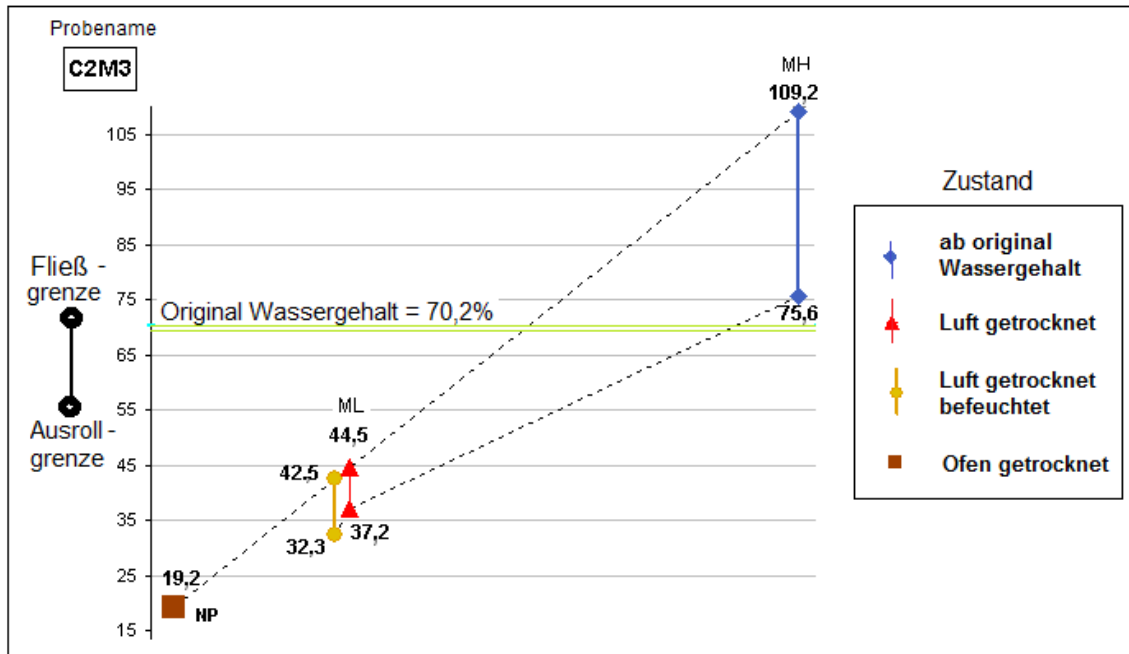


Abbildung 21: Komparatives Schema von Fließ- und Ausrollgrenze von Probe C2M3 in unterschiedlichen Zuständen.

Die Ergebnisse für diesen Boden entsprechen den Erwartungen, deshalb werden sie als Vergleichsergebnisse für die zwei weiteren Untersuchungen definiert. Die Fließ- und Ausrollgrenze bei der alternativen Methode (blaue Linie) sind viel höher als bei der luftgetrockneten Bodenprobe (rote Linie). Zudem liegen die zuerst ermittelten Zustandsgrenzen oberhalb des ursprünglichen Wassergehaltes (waagerechte grüne Linie). Nachdem die Bodenprobe getrocknet und erneut befeuchtet wurde (gelbe Linie), sinkt die Plastizität und erreicht nicht mehr das Niveau der ersten Untersuchung. Die im Ofen getrocknete Bodenprobe verliert an Plastizität, und besitzt nur eine geringe Fließgrenze (brauner Punkt). Die Ausrollgrenze kann mit dieser Bodenprobe nicht mehr bestimmt werden.

Bei der Probe C2M3 war der ursprüngliche Wassergehalt nicht hoch genug, um die Fließgrenze ohne Wasserzugabe zu erreichen. Dies stellt sich bei den nächsten Bodenproben, C1M8 und C6M3 (Abbildung 22 und Abbildung 23) anders dar.

Wenn der Versuch mit der alternativen Methode durchgeführt wird, wird die Bodenprobe in der Vorbereitung von Anfang an der Luft ausgesetzt. Eine Wasserzugabe ist dann notwendig, um die Fließgrenze zu erreichen. Bei diesen beiden Bodenproben liegt die, auf diese Weise bestimmte Fließgrenze (105,6% für C1-M8 und 93,5% für C6M3) oberhalb des originalen Wassergehalts (101,6% für C1M8 und 84,8 % für C6M3).

Es ist aber auch möglich, ohne Wasserzugabe die Fließgrenze zu erreichen. Hierfür ist es notwendig, den Boden mit dem originalen Wassergehalt noch im Beutel zu zerkleinern und für den Versuch vorzubereiten, um diesen so wenig wie möglich der Luft auszusetzen. Wenn die Bodenproben im Beutel vorbereitet werden, liegt die Fließgrenze (98,8% für C1M8, und 80,6% für C6M3) unterhalb des ursprünglichen Wassergehaltes und kann ohne Wasserzugabe erreicht werden.

In diesem Fall ergibt sich für die Konsistenzzahl $I_c = \frac{(W_L - w)}{(W_L - W_P)}$ ein negativer Wert.

Häufig wird im Labor eine negative Konsistenzzahl bestimmt, obwohl die Probe nicht gegen Wasserverlust durch Verdunstung geschützt wurde. Dies bedeutet, dass die ursprünglichen Wassergehalte außergewöhnlich hoch liegen (siehe Kapitel 4).

Es ist aber normalerweise notwendig Wasser zuzugeben, wenn die Probe an der Luft vorbereitet wird. Möglicherweise wird dieses Wasser gebraucht, um das verdunstete Wasser zu ersetzen. Aus diesem Grund ähneln diese Ergebnisse denen von traditionellen Böden (Fließgrenze über dem Originalwassergehalt); deshalb werden in der Praxis immer diese Werte verwendet, ohne die Ergebnisse zu hinterfragen.

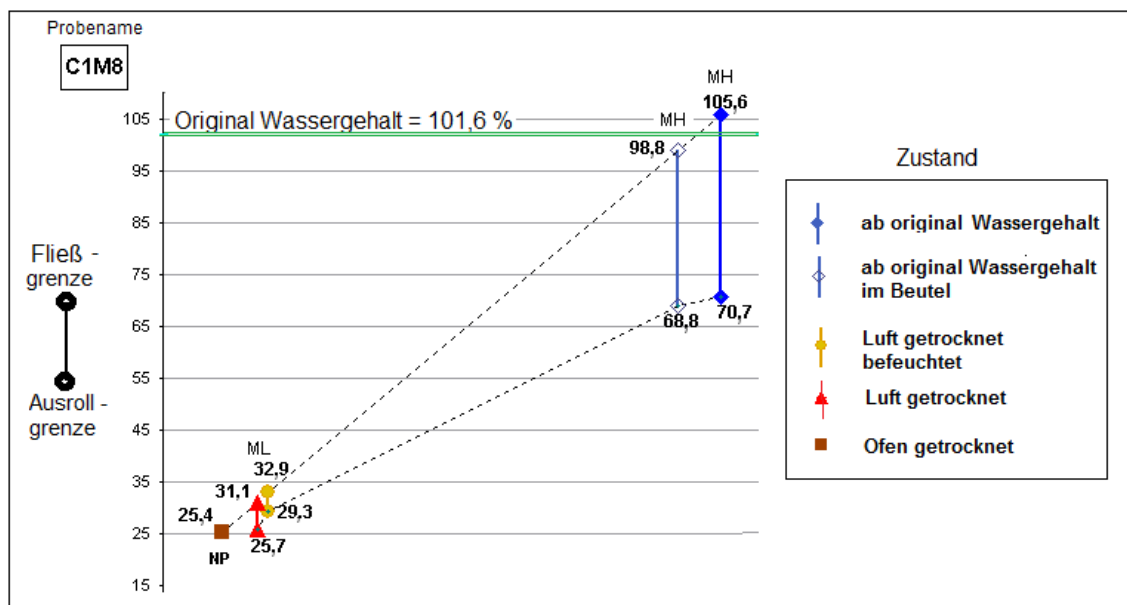


Abbildung 22: Komparatives Schema von Fließ- und Ausrollgrenze von Probe C1M8 in unterschiedlichen Zuständen.

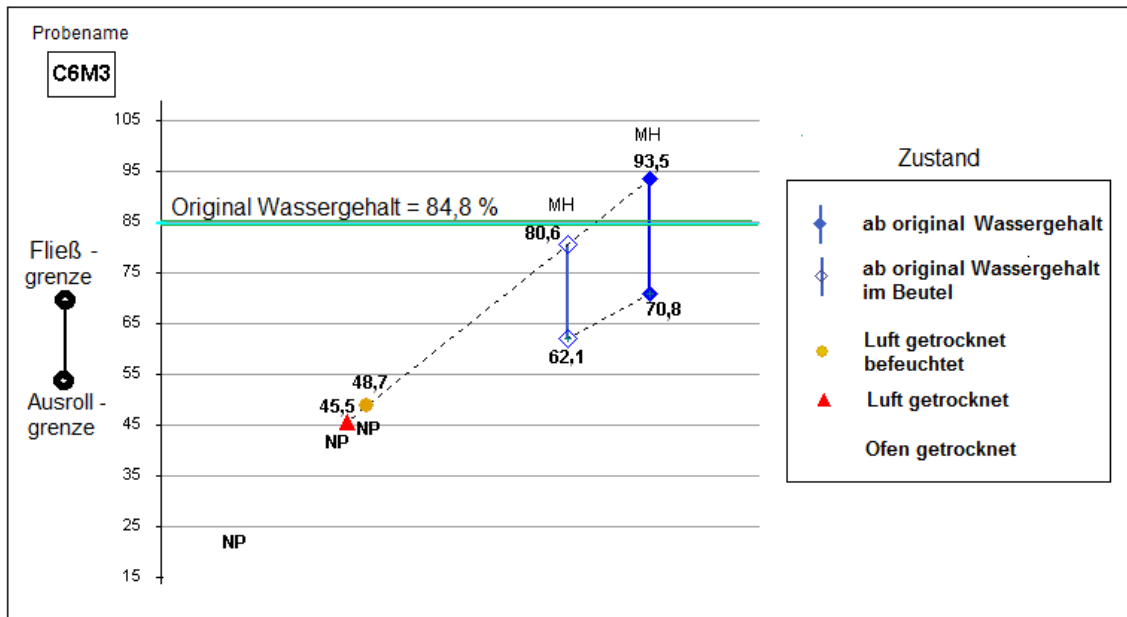


Abbildung 23: Komparatives Schema von Fließ- und Ausrollgrenze von Probe C6M3 in unterschiedlichen Zuständen.

- Auch eine kleine Verdunstung, die während der Verarbeitung im Labor auftritt, hat einen Einfluss auf die Ergebnisse. Wenn der Boden genügend Wasser enthält und während der Vorbereitung der Luft nur wenig ausgesetzt wird, ist es möglich die Fließgrenze ohne Wasserzugabe zu erreichen.
- Bei der Bestimmung der Fließgrenze mit dem ursprünglichen Wassergehalt (alternative Methode) können Abweichungen auftreten. Einerseits wegen der Schwierigkeit, die noch feuchte Bodenprobe durch das Sieb mit der Masche No.40 (0,425 mm) zu sieben, und andererseits, weil ein Teil des ursprünglichen Wassers bereits ab der Probenahme verdunstet und jeder Wasserverlust einen Einfluss auf das Ergebnis hat.
- Die Werte, die in der Praxis bis jetzt bekannt sind, sollten nur untereinander verglichen werden und nicht der Versuch unternommen werden, diese parallel auch mit den Ergebnissen von traditionellen Böden zu interpretieren.

Folgerungen

Hohe Wassergehalte, die bei vulkanischen Ascheböden in der Natur sehr häufig auftreten, können ausreichen, um die Fließgrenze zu erreichen. Möglicherweise geben die besondere Struktur der Böden, und die Form, wie dieses Wasser in dem Gerüst des Bodens gelagert ist, dem Material im ungestörten Zustand seine Beständigkeit. Durch eine Störung wird das Wasser frei und der Boden verliert dann seine Konsistenz.

Diese Beobachtung erklärt, warum fast senkrechte Böschungen, die in situ (in ungestörtem Zustand) zu finden sind, auch mit einem so hohen Wassergehalt stabil sind.

Die hohen Wassergehalte, die bei vulkanischen Ascheböden vorhanden sind, haben keine Auswirkungen auf das mechanische Verhalten eines ungestörten Bodens. Deshalb muss eine sorgfältige Interpretation aller Werte, die einem solchen Material zugeordnet werden, erfolgen. Hohe Fließgrenzen und natürliche Wassergehalte, häufig über 100% und oberhalb der Fließgrenze, können nicht wie bei traditionellen Materialien interpretiert werden, und sollten deshalb nicht in gleicher Form für Korrelationen oder zum Ableiten anderer Parameter benutzt werden.

Die Ergebnisse von vulkanischen Ascheböden zeigen im Casagrande-Plastizitätsdiagramm immer eine große Streuung, so dass man vermuten könnte es handele sich um eine Vielzahl von unterschiedlichen Bodenarten. Dennoch ist zu erwarten, dass angesichts der Empfindlichkeit des Materials, die Bestimmung der Konsistenzgrenzen sich unterschiedliche Ergebnisse ergeben werden. Von ein und derselben Bodenprobe könnte man so im Labor verschiedene Ergebnisse ermitteln, je nachdem wie die Probe vorbereitet wurde.

Auch nach einer Trocknung im Ofen kann der tatsächliche Wassergehalt unterschätzt werden. Limura [Li70], hat einen höheren Wassergehalt nach der sogenannten "Karl-Fischer-Methode" ermittelt als durch Ofentrocknung bei 110 ° C. Diese Methode wird aber in der Praxis der Bodenmechanik nicht benutzt, deshalb könnte der Wert des Wassergehaltes, der im Versuch ermittelt wird (z.B. Fließgrenze), kleiner als der tatsächliche Wassergehalt sein.

Es wird vorgeschlagen, dass dieser Boden nicht durch eine einzelne Klassifikation beschrieben wird. Die Benennung sollte von den Anforderungen, denen der Boden ausgesetzt ist, abhängig sein. Es muss auch bedacht werden, dass der Zustand, in dem die Probe entnommen wird, kein originaler oder ungestörter Zustand ist, sondern ein besonderer, vorübergehender Zustand. Dieser ist von der Entstehungsgeschichte, dem Klima und dem Trocknungsgrad bis zur Entnahme abhängig. Außerdem kann sich dieser Zustand nach der Verarbeitung im Labor verändern. Deshalb sind in situ-Versuche, wie z.B. Ramm-, Druck-, Flügelsondierungen zu empfehlen.

3. MECHANISCHES VERHALTEN

Böden aus vulkanischen Aschen zeigen in der Regel atypische – gute - mechanische Eigenschaften, obwohl sie normalerweise hohe Wassergehalte und Plastizitätswerte aufweisen. Diese Eigenschaften werden bis heute der Struktur und der Zementierung zwischen den Partikeln zugeschrieben. Auf Grund dieser Eigenschaften sind hohe, steile Böschungen in der Natur und bei künstlichen Bauwerken zu finden. Genauso häufig finden aber auch massive Erdbeben statt.

Vermutlich ist die Ursache für dieses Verhalten in der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften im Labor zu sehen, in ähnlicher Weise wie bei der Ermittlung der Zustandsgrenzen in Kapitel 2.3.3. Infolge dessen stimmen die Ergebnisse der Prüfung von vulkanischen Ascheböden im Labor nicht mit dem Verhalten dieser Böden auf der Baustelle überein. Zudem fällt die Interpretation der Laborwerte schwer, weil die Ergebnisse nicht den üblichen Korrelationen folgen, die bei anderen Bodenarten zu erkennen sind.

Wie schon zuvor beschrieben, wird die Struktur des natürlich anstehenden Aschebodens dadurch verändert, dass dieser an der Luft getrocknet und zermahlen wird. Daraus folgt, dass die Ergebnisse der Versuche, die die Festigkeit oder das Verformungsverhalten prüfen, nicht immer für den Entwurf von künstlichen Böschungen oder Dämmen verwendet werden können.

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Aspekte des mechanischen Verhaltens der Ascheböden zusammengestellt. Viele dieser Eigenschaften können an den vulkanischen Ascheböden Kolumbiens beobachtet werden und stellen die Motivation für diese Arbeit dar.

3.1. VERÄNDERUNG DES FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGSVERHALTENS DURCH VERDICHTUNG

3.1.1. Literaturübersicht

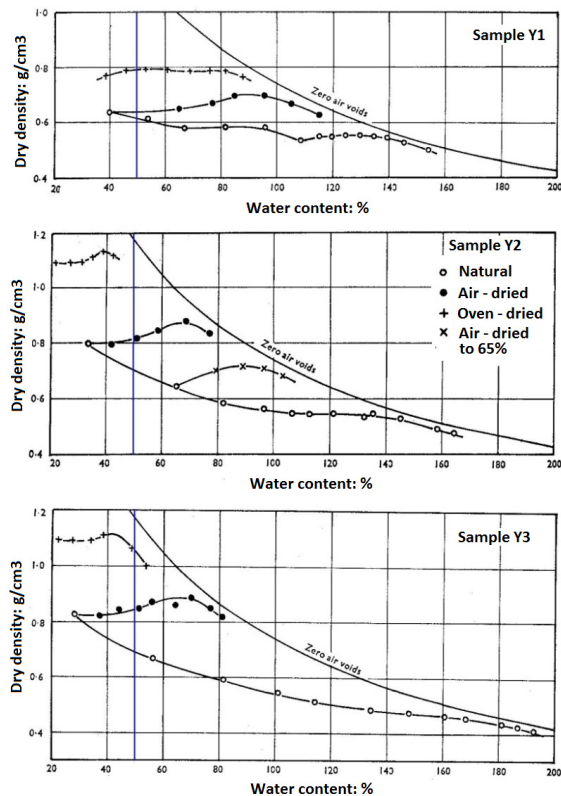
Das Ziel der Verdichtung von Böden besteht darin, die Hohlräume in der Struktur des Bodens zu verringern. Damit werden die Eigenschaften des Bodens verbessert und normalerweise vermindert sich so auf der einen Seite die Setzungsempfindlichkeit und die Durchlässigkeit und auf der anderen Seite wird die Scherfestigkeit erhöht.

Bei Böden aus vulkanischen Aschen wird die Verdichtungsfähigkeit vor allem von der Vorbehandlung und der Trocknung des Bodens beeinflusst. Der optimale Wassergehalt ist schwer festzustellen. Die Ergebnisse wechseln je nach Vorbehandlung der Bodenproben. Ein Beispiel hierfür gibt Wesley [We73] in Abbildung 24.

Sample	WL	WP	IP	W	
Natural	Y1	156	129	27	146
	Y2	184	146	38	151
	Y3	213	167	46	180
Air dried	Y1	110	95	15	39
	Y2	79	73	6	33
	Y3	86	78	8	28
Oven dried	Y1	Non plastic			
	Y2	Non plastic			
	Y3	Non plastic			

Die im Ofen getrockneten Bodenproben haben eine höhere maximale Trocken-dichte und einen niedrigeren optimalen Wassergehalt im Vergleich zu dem der luftgetrockneten Bodenproben.

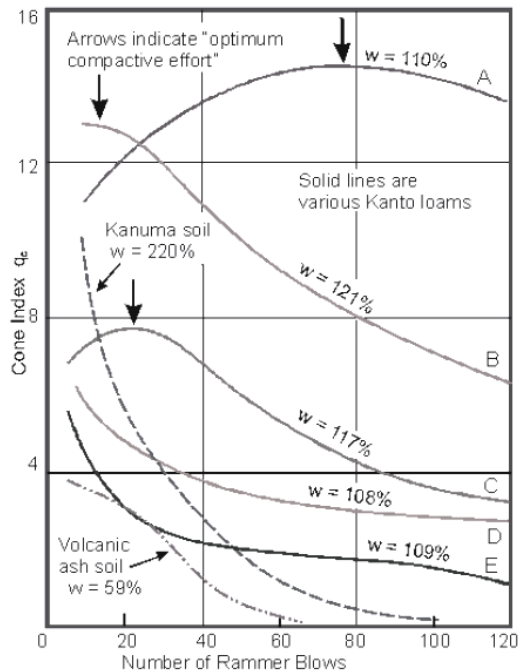
Im Fall der Bodenproben mit ursprünglichem Wassergehalt ist dies anders. Die Kurven sind normalerweise flach, und die Bestimmung des optimalen Wassergehaltes ist nicht eindeutig.



(siehe Ergebnisse in Tabelle 10)

Abbildung 24: Verdichtungsprüfung nach verschiedenen Behandlungen [We73]

Beispielhaft seien die Ergebnisse von Residualböden in Japan in Abbildung 25 vorgestellt, wonach die Festigkeit mit steigender Verdichtungsenergie sinkt. Bemerkenswert sind die hohen Wassergehalte [We03].



Kanuma Soil: Erodierter vulkanischer Bimsstein aus Tochigi (Kanuma Region und Ibaragi Küste), Japan. Dieser Boden weist eine hellgelbe-braune Farbe im trockenen Zustand auf, die sich bei Nässe zu gelbbraun verändert. Der Boden ist leicht sauer und sehr porös trotz eines guten Wasserrückhaltevermögens.

Kanto loam besteht hauptsächlich aus Allophan. Kanto Schluff hat einen sehr hohen Wassergehalt und eine hohe Empfindlichkeit gegenüber einer Zerstörung der Struktur, verursacht durch das allophan Tonmineral.

Abbildung 25: Ergebnisse mit dem Cone Penetrometer im Vergleich zur Verdichtungsenergie.

[We03]

Einige Laborversuche, die im Kapitel 3.1.3 ausführlich beschrieben werden, zeigen deutlich, wie empfindlich Proben von Ascheböden bei der Verdichtung sind. Sie zeigen auch, wie höhere Trockendichten nicht immer eine höhere Druckfestigkeit zur Folge haben.

Die Sensitivität der Ascheböden begünstigt bei der Verdichtung die Zerstörung der besonderen Struktur dieses Bodens. Um die inneren Vorgänge verständlich zu machen, werden diese im Folgenden näher beschrieben.

3.1.2. Wirkung der Strukturveränderung des Bodens

Beim Remoulding wird die Struktur der Ascheböden zerstört und damit die Eigenschaften, wie Porosität, Durchlässigkeit, Druckfestigkeit und der gemessene Wassergehalt bei der Plastizitätsbestimmung verändert. Anders als andere feine Böden neigen Ascheböden nicht dazu, durch Feuchtigkeitsänderung anzuschwellen. Allerdings können sie durch wiederholte Belastung verflüssigen, weil die hervorgerufenen Verformungen eine unwiderrufliche Zerstörung der Mikrostruktur verursachen.

Abbildung 26 zeigt zwei Rasterelektronenmikroskopbilder der Struktur vulkanischer Ascheböden im ungestörten Zustand. Wabenstrukturen und Aggregate von Partikeln wie auf den Bildern sind häufig zu erkennen, wenn Halloysite, Imogolite und Allophane vorhanden sind.

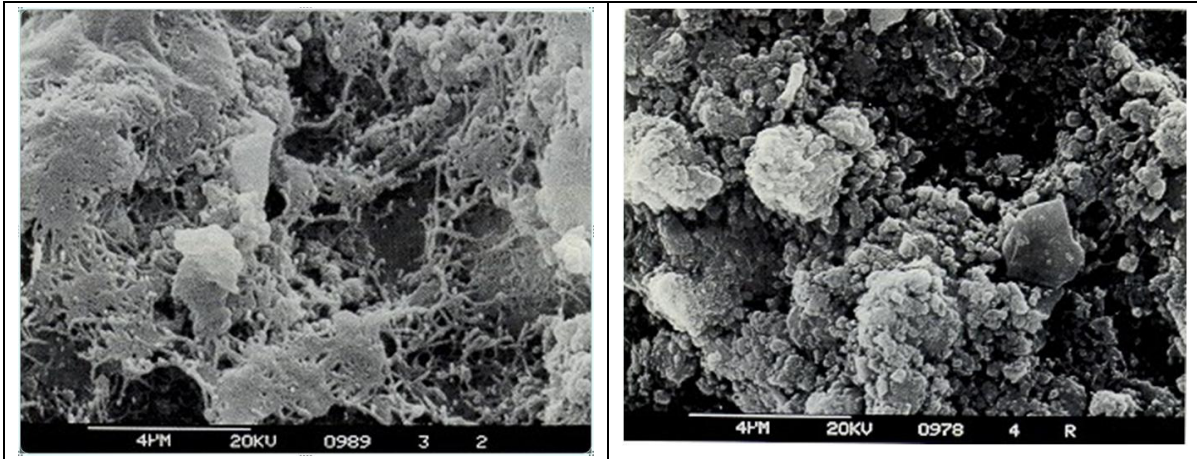


Abbildung 26: Allophan-Boden in seinem ungestörten Zustand [Ja89]

Allophan- Aggregate sind dadurch gekennzeichnet, dass sie von einem Netz aus Imogolit-Fäden bedeckt sind. Diese Fäden bilden Brücken zwischen den Partikeln und Aggregaten. Die Verbindungen aus Imogolit-Fäden zwischen Allophan- Partikeln können durch ein Remoulding zerstört werden. Diese Verbindungen werden selbst durch eine lange ungestörte Lagerung nicht wiederhergestellt, so dass diese Böden nach einer Störung ihren ursprünglichen Zustand nicht wieder zurückerlangen. Jaquet [Ja89] gibt für die wiedergewonnene Festigkeit des Bodens nach der Störung Werte von 2 bis 9 % der Festigkeit des ungestörten Bodens an.

Einige Autoren haben über Thixotropie in vulkanischen Ascheböden berichtet [Bu91][Na93]. Thixotropie, wie in der traditionellen Geotechnik angenommen, bezieht sich auf eine reversible Gel-Sol-Umwandlung, bei der auch nur ein leichter Druck das flüssige Verhalten eines Bodens verursacht.

Allerdings bedeutet dieses im Falle von Ascheböden nur, dass eine Verflüssigung durch wiederholte Belastung entstehen kann. Eine Wiedergewinnung von Festigkeitseigenschaften (die normalerweise mit Thixotropie einhergeht) ist bei vulkanischen Ascheböden, angeblich erst nach Monaten festzustellen (Abbildung 27).

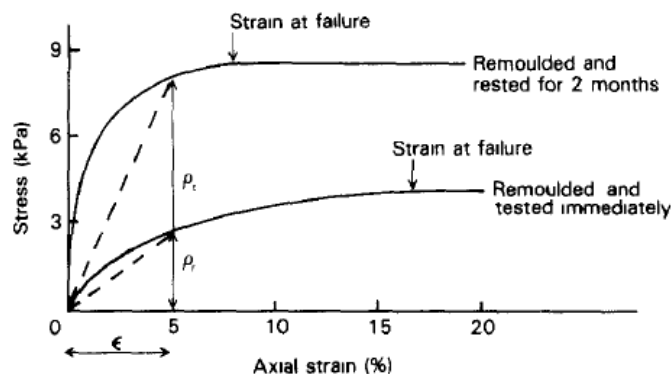


Abbildung 27: Spannungs – Verformungskurven für gestörtes und gelagertes Material aus Waitui [Ja89]

Abbildung 28 zeigt ein allophanes Material im gestörten Zustand. Ein uniformes und strukturloses Gel bedeckt den gesamten Stoff und einzelne Imogolit-Fäden (gekennzeichnet durch die Pfeile) sind noch sichtbar.

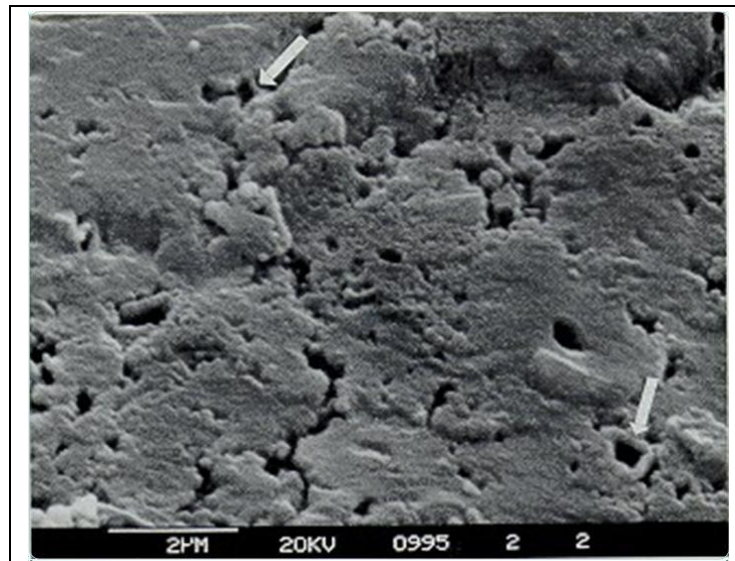


Abbildung 28: Allophan-Boden in seinem gestörten Zustand. Imogolit-Fäden sind mit Pfeilen gekennzeichnet [Ja89]

Zudem gibt es, wie bereits im letzten Kapitel beschrieben, Berichte in der Literatur über die Veränderung der Zustandsgrenzen infolge der Zerstörung der Struktur in Ascheböden. Nach Wesley [We73] gibt es eine Tendenz dahingehend, dass die Werte der Zustandsgrenzen vulkanischer Ascheböden leicht abnehmen je mehr das Material gemischt wird (zumindest wenn die Bodenproben ohne Trocknung geprüft werden), da das Mischen das in der Bodenstruktur gehaltene Wasser freisetzt.

3.1.3. Sensitivität der vulkanischen Aschenböden

Die Sensitivität bezeichnet das Verhältnis zwischen der Scherfestigkeit der ungestörten und der gestörten Probe. Vulkanische Ascheböden z. B. in Neuseeland haben Sensitivitätswerte von 5 bis 55 [Ja89].

Im Fall der vulkanischen Aschen resultiert die hohe Sensitivität weniger aus einem Verlust der Festigkeit im gestörten Zustand als primär aus der hohen Festigkeit der ungestörten Probe. Demgegenüber ist die Sensitivität bei den traditionellen hochsensitiven sedimentären Tonen („Quick Clays“), auf die geringen Festigkeiten im gestörten Zustand zurückzuführen [Ja89].

Bei vulkanischen Aschen kann eine lineare Beziehung der Druckfestigkeit zur Sensitivität beobachtet werden (Abbildung 29).

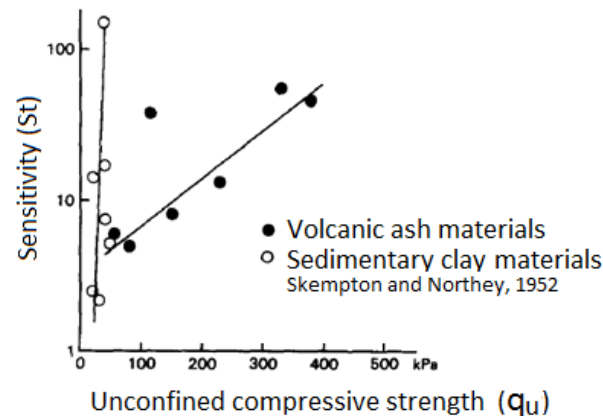


Abbildung 29: Sensitivität vs. ungestörte Einaxialdruckfestigkeit von vulkanischen und nicht vulkanischen Materialien [Ja89].

Ungestört ist der Boden nur in seiner natürlichen Umgebung, d.h. wie er in situ vorgefunden wird. Nach einer sorgfältigen Probenentnahme gehört der Boden zur „Güteklasse 1²“. Gestört wird der Zustand des Bodens nach einer Behandlung benannt, die die ursprüngliche Struktur zerbricht, z.B. wenn die Bodenprobe zerkleinert und wieder verdichtet wird. Die aus den unterschiedlichen Zuständen resultierenden Abweichungen in der Festigkeit der Materialien sind in der Abbildung 30 dargestellt.

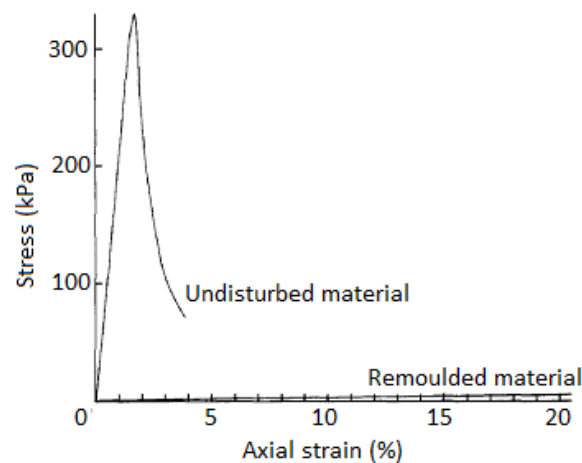
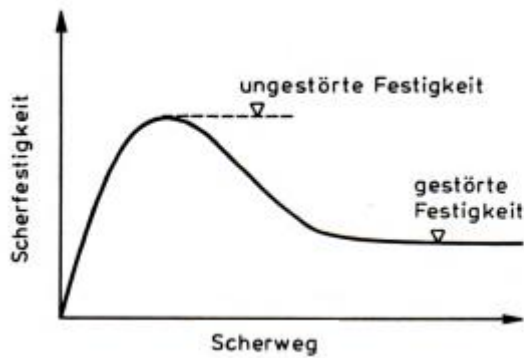


Abbildung 30: Spannungs- Verformungskurven für hoch sensitive vulkanische Asche- Materialien aus Waitui [Ja89].

In der traditionellen Geotechnik werden häufig die Begriffe ungestört und gestört dazu verwendet, den Zustand eines Bodens vor und nach der Entwicklung der maximalen Scherfestigkeit (in Englisch „peak“ und „rest“) zu bezeichnen [La03]. (Abbildung 31).

² Eine Bodenprobe der Güteklasse 1 wird in DIN 4021 (Tabelle 4) beschrieben als: unverändert in Kornzusammensetzung, Wassergehalt, Dichte des feuchten Bodens, Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, Steifemodul und Scherfestigkeit.



Vorbelastete Tone haben eine Sensitivität von etwa 1, während normal konsolidierte Tone Werte von etwa 2 bis 4 aufweisen. Böden mit Sensitivitäten von 4 bis 8 nennt man empfindlich (gegen Strukturzerstörung).

$$\frac{\text{ungestörte Festigkeit}}{\text{gestörte Festigkeit}} = \text{Sensitivität.}$$

Abbildung 31: Festigkeitsverlust beim Zusammenbruch der flockulierten Struktur [La03].

In Tabelle 12 wird ein Überblick der Sensitivitäten, nach diesem traditionellen Konzept, für bekannte Bodenkategorien gegeben.

Tabelle 12: Skala von Sensitivitätswerten (Skempton 1952) [Ja89].

Sensitivitätswerte	Kategorien
1	Insensitive clays
1 - 2	Low sensitive
2 - 4	Medium
4 - 8	Sensitive clays
8 - 16	Extra sensitive
> 16	Quick clays

Die Abbildung 30 beschreibt die Ergebnisse von Versuchen an ungestörten Ascheböden im ersten Versuch und nach Remoulding im zweiten Versuch. Dem gegenüber ist der Unterschied zwischen „Maximal“ und „Rest“ (oder Gleit) -Festigkeit durch einmalige Scherbelastung ungestörter Ascheproben normalerweise sehr klein (siehe Abbildung 53). Die unterschiedlichen Versuchsbedingungen finden in der Literatur über vulkanische Ascheböden bis jetzt keine Beachtung.

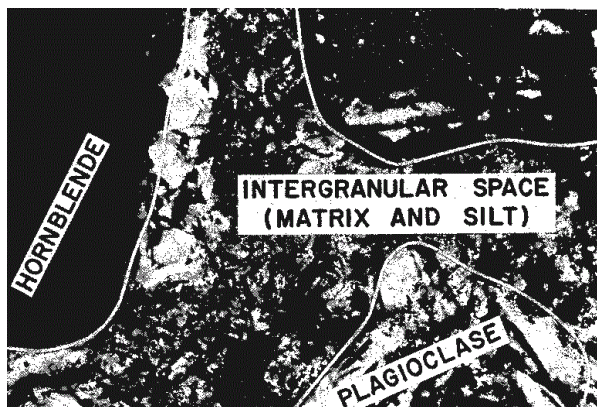
Verantwortlich hierfür ist vermutlich, dass eine Neuorientierung der amorphen Bestandteile beim Scheren verhindert wird [Ra95] [We77]. Das Thema wird im Kapitel 3.3 näher behandelt (siehe Tabelle 17).

Die hohe ungestörte Festigkeit kann mit der Zementierung zwischen den Partikeln begründet werden.

In der Geologie bezeichnet die Zementation einen bestimmten Prozess der Diagenese, also der Veränderung von sedimentären Ablagerungen. Die Zementation ist ein vorwiegend chemischer Prozess, der zur Lithifizierung (griech. Versteinigung) des ursprünglichen locker abgelagerten Materials führt. Diese Verfestigung wird durch die Zufuhr mineralischer Zemente erreicht“ [Pr07]. Bei traditionellen Böden sind

Kalziumkarbonat, Kalziumoxid, Siliziumdioxid, Schluff-, Tonpartikel, Magnesiumoxid, Aluminium und Eisen als Zementierungsagenten zu finden. In halbtrockenen und tropischen Umgebungen können auch leicht kristallisierte Mineralien aus Silizium die Zementation verursachen. [Wa97]. Bei vulkanischen Materialien sind möglicherweise die Allophan- Mineralien für die Zementierung verantwortlich.

In einer Arbeit von O'Rourke in Ecuador [OR88] wurden Partikel eines vulkanischen Materials – in Ecuador Cangahuas genannt- unter einem Elektronenmikroskop untersucht. Hierbei wurden deutlich sichtbare Punkte aus Silizium-Gel entdeckt, die intergranulare Verbindungen aufbauen (Abbildung 32).



„Die Abbildung zeigt einige Mineralkörner von der Größe feinen Sandes, der von Matrizen – Material umhüllt ist. Die größeren Mineralkörner sind nicht in direktem Kontakt, sondern werden in das Matrizen-Material eingebettet. Diese Anordnung bedeutet, dass die Festigkeit des Cangahuas mehr eine Folge der Festigkeit der Matrize ist. Mikroskopische Aufnahmen vom aufgelockerten Material haben gezeigt, dass gebrochene Körner an die Matrize gebunden bleiben. Dieses deutet darauf hin, dass die Matrize eine höhere Festigkeit als die einzelnen Körner hat.“ Zitat aus. [OR88]

Abbildung 32: Feinschliff des repräsentativen interkristallinen Zwischenraums von Cangahua

Die Mineralogie und die Bodenkennwerte haben nur wenig mit dem Verhalten eines Bodens mit einer zementierten Struktur zwischen den Partikeln zu tun [Ja89]. Diese sind unter statischer Belastung besonders fest. In diesem Fall ist der Unterschied zur Festigkeit im gestörten Zustand besonders stark ausgeprägt.

Die Festigkeit eines solchen Materials kann sehr leicht überschätzt werden, wenn zur Dimensionierung von Böschungen und Dämmen die guten aber labilen Untersuchungsergebnisse der ungestörten Probe herangezogen werden.

Bei anderen Böden, die traditionell als sensitiv eingestuft werden, wird bei der Dimensionierung berücksichtigt, dass unter bestimmten Umständen die Festigkeit verloren gehen kann. Bei vulkanischen Ascheböden tritt in der Regel keine Verflüssigung, wie z.B. bei „Quick Clays“, auf. Die Laborparameter können von den Kennwerten auf der Baustelle erheblich abweichen.

3.1.3.1. Experimentelle Untersuchung der Strukturveränderung

Zielvorstellung: Im einaxialen Druckversuch wird unter wiederholter Verdichtung (ohne Wasserzugabe) untersucht, ob die Zerstörung der Struktur einen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Verfahren: Insgesamt werden vier Bodenproben unterschiedlicher Bodenarten mehrmals verdichtet und im einaxialen Druckversuch getestet. Dabei wird die Veränderung des Verhaltens im Versuch überprüft und mit den Ergebnissen aus den anderen Bodenproben verglichen. Eine genaue Beschreibung der Untersuchungsmethodik ist im Anhang dargestellt.

Bodenproben: Zwischen den Proben der einzelnen Ascheböden können sehr unterschiedliche Verhalten festgestellt werden. Dieses wurde schon in den vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit beschrieben. Als Hauptgruppen gab es in den bisherigen Untersuchungen vorwiegend sandige und sehr plastische Proben, von denen auch in dieser Untersuchung jeweils zwei getestet werden. Ob es sich bei den Bodenproben um sandige oder plastische Böden handelt, ist abhängig vom Allophananteil in dem jeweiligen Material. Höhere Allophananteile bedeuten einen höheren Wassergehalt und eine höhere Plastizität.

In Tabelle 13 werden die wichtigsten Eigenschaften der geprüften Bodenproben, sortiert nach dem Allophananteil, zusammengefasst.

Tabelle 13: Einige Eigenschaften der Bodenproben

Sample	Tiefe m	W %	Wl konv	Wp konv	Allophan g/kg (nach Formel A*)
F6-1	0,90 – 1,10	100,9	60,7	54,1	64,1
F3-9	5,80 – 6,05	88,7	85,3	70,1	59,5
A1-7	3,30 – 3,50	30,9	31	26,1	20,8
A1-2	1,20 – 1,50	27,5	NP	NP	19,9

*Nach Cascardo [Ca01]. Formel A. Kapitel 2.

NP: Nicht plastisch

Ergebnisse: Zunächst fällt auf, dass durch die wiederholte Verdichtung der Böden das gespeicherte Wasser frei werden kann. Durch dieses Phänomen wird die Verdichtung sowohl im Labor als auch in situ erschwert. Dieser Prozess läuft allerdings nicht kontrolliert ab und eine gewisse Menge Wasser verdunstet während des Verdichtungsvorganges. Weil die natürlich vorkommenden Ascheböden manchmal sandig, manchmal schluffig sind, werden diese nach wiederholter Verdichtung entweder plastischer oder steifer, ohne dass dabei eine deutliche Beziehung (Zunahme oder Abnahme) zur Trockendichte erkennbar wäre.

Die folgenden Grafiken zeigen die Ergebnisse der einzelnen Versuche.

Das Material F6-1 zeigt die typische Textur eines plastischen Bodens (Abbildung 33). Der Allophananteil in dieser Probe ist der höchste aller hier untersuchten Bodenproben. Mit der Behandlung (wiederholte Verdichtung) verliert die Bodenprobe an Steifigkeit. Die Festigkeit liegt zwischen 42 und 48 kPa, und nimmt mit jeder Wiederholung der Verdichtung leicht ab. Die Trockendichte zeigt eine geringe Tendenz zur Abnahme. Die eingebrachte Verdichtungsenergie reicht also nicht aus, um die Partikel in ihrer Anordnung so zu verändern, dass sie eine dichtere Lagerung erhalten. Bemerkenswert ist auch die Tatsache, dass der Wassergehalt bis zur dritten Wiederholung leicht zunimmt. Es ist zu vermuten, dass in der Struktur gebundenes Wasser durch die Verdichtungsarbeit freigesetzt wird. Die Zunahme der Stauchung mit Abnahme der ertragbaren Spannung deutet auf einen Festigkeitsverlust hin.

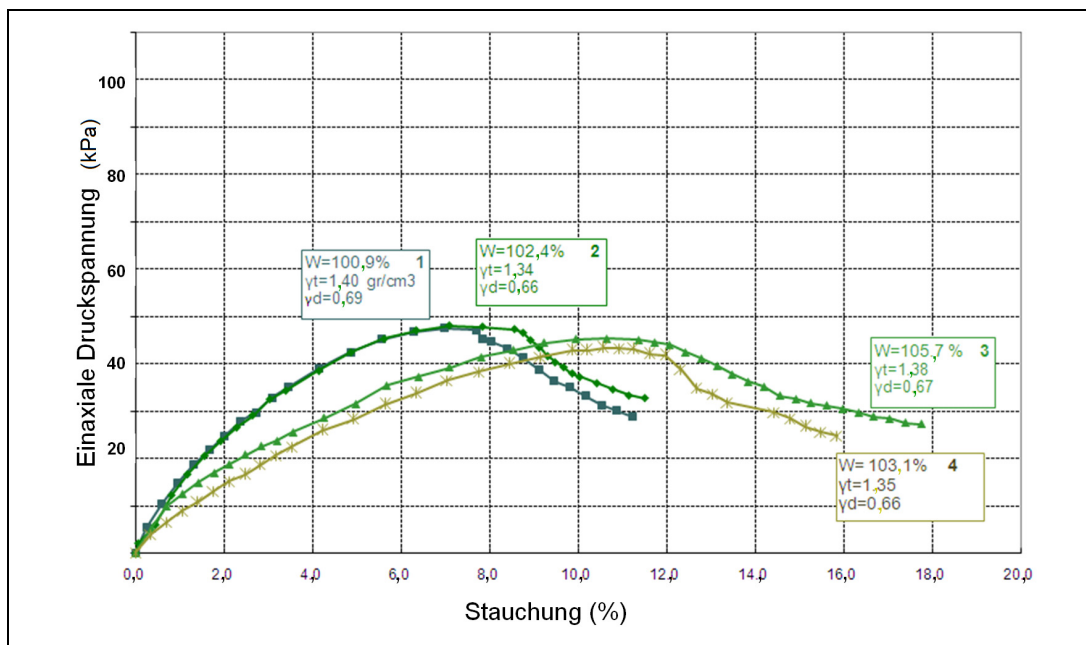


Abbildung 33: Ergebnisse Bodenprobe F6-1

Die Probe F3-9 kann als plastisch beschrieben werden (Abbildung 34). Der Allophananteil ist auch in dieser Probe ebenfalls hoch. Im Unterschied zu der

vorherigen Probe F6-1 nimmt die Festigkeit ohne wesentliche Veränderung der Stauchung mit jeder Wiederholung ab. Es ist keine Tendenz in der Veränderung der Trockendichte erkennbar. (Auf Grund von Problemen im Verlauf der Untersuchungen mit der Bodenprobe 4 wurde diese vor dem Versuch einen Tag ruhen lassen; damit wurde eine leichte Zunahme der Festigkeit erreicht).

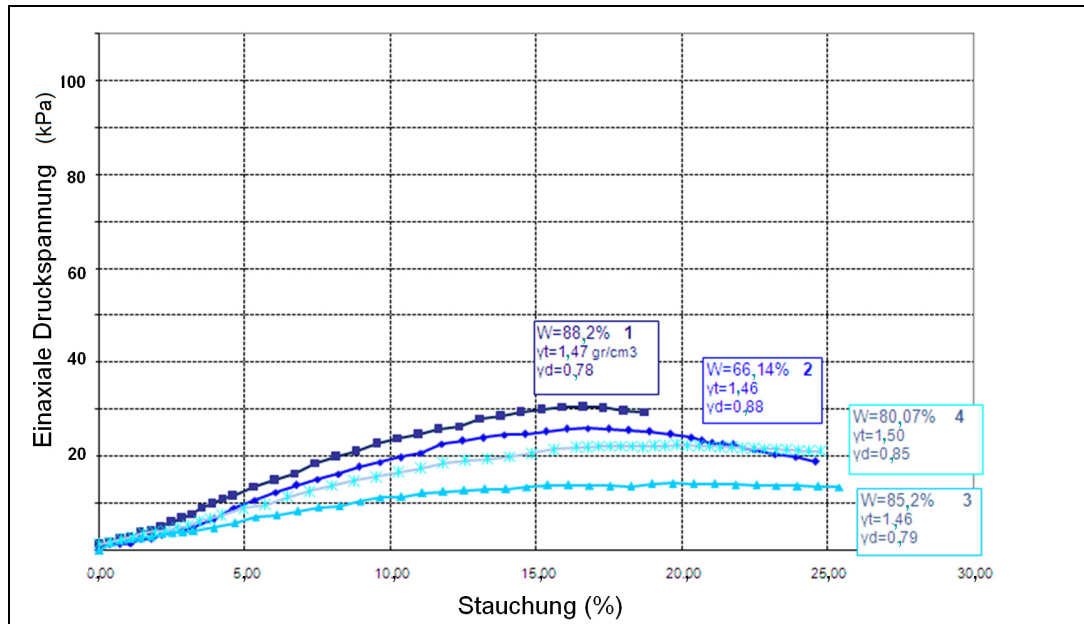


Abbildung 34: Ergebnisse Bodenprobe F3-9

Nach visueller Einschätzung im Labor handelt es sich bei dieser Probe A1-7 um einen sandigen Ascheboden. Dieser wird augenscheinlich während der Mischung immer feuchter, obwohl die Bestimmung des Wassergehalts niedrigere Werte zeigt (das Wasser verdunstet). Der Allophananteil ist klein im Vergleich zu den plastischeren Bodenproben F6-1 und F3-9. Im Druckversuch erträgt die Probe höhere Belastungen und zeigt geringere Verformungen als die vorgenannten. Mit der zweiten und dritten Belastung wird der Boden plastischer und erfährt größere Stauchungen bei etwa gleichbleibender Maximalspannung (~ 60 kPa). Die Trockendichte steigt in diesem Fall mit jeder Wiederholung, d.h. unter einer leichten Änderung des Wassergehaltes erfolgt eine neue, dichtere Anordnung der einzelnen Partikel (Abbildung 35).

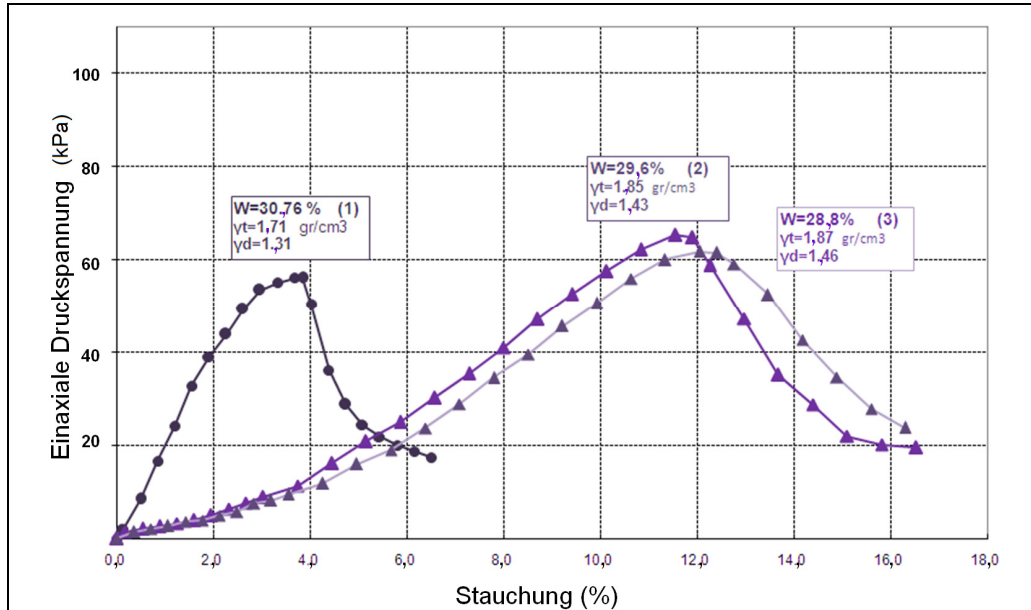


Abbildung 35: Ergebnisse Bodenprobe A1-7

Der Allophananteil von A1-2 ist der kleinste im Vergleich aller Bodenproben. Wie bei A1-7 zeigt der Boden nur geringe plastische Eigenschaften. Mit jeder Versuchswiederholung nimmt die Steifigkeit und in gleichem Maße auch die Festigkeit zu. Das Spannungsmaximum steigt von 82 auf 105 kPa, gleichzeitig nehmen die zugehörigen Stauchungen erheblich ab. Man würde erwarten, dass mit steigender Trockendichte ein Festigkeitsgewinn verbunden ist, stattdessen zeigt sich aber mit dem Festigkeitsgewinn eine Tendenz zur Abnahme der Trockendichte (Abbildung 36).

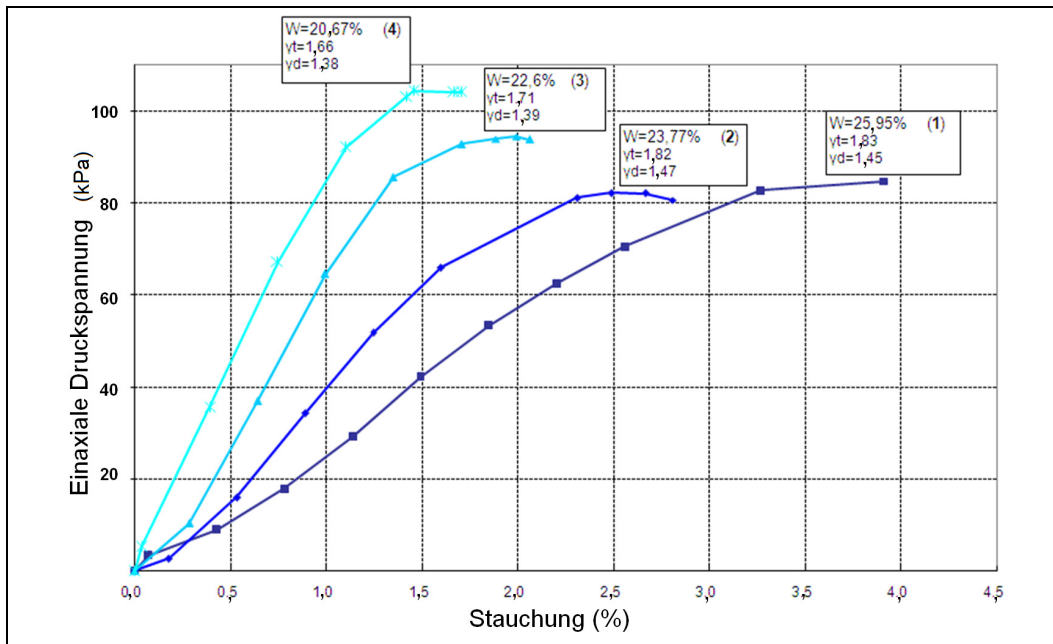


Abbildung 36: Ergebnisse Bodenprobe A1-2

In der folgenden Abbildung werden alle Versuche zusammen dargestellt

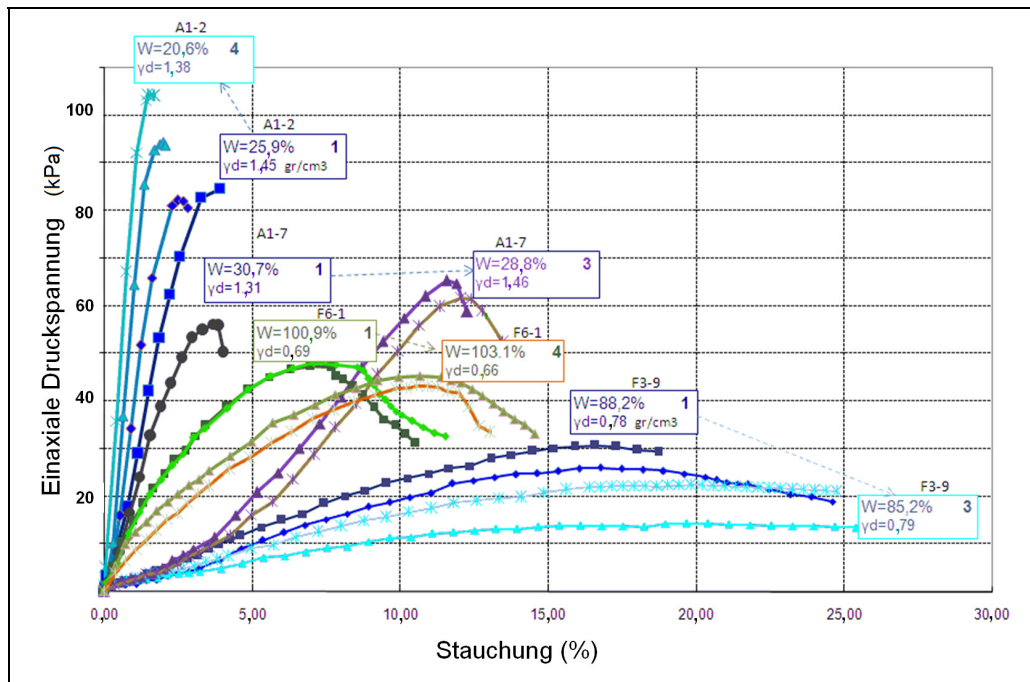


Abbildung 37: Ergebnisse aller Bodenproben

Die sandigen Bodenproben mit einem geringeren Allophananteil haben eine höhere Festigkeit als die Böden mit einem hohen Allophananteil und einem gleichzeitig niedrigeren Wassergehalt (als ob sie nicht vulkanischer Herkunft wären). Mit wiederholter Verdichtung erfahren sie eine leichte bis deutliche Verbesserung der Maximalspannung. Bindige (allophanreiche) Bodenproben haben höhere Wassergehalte, niedrigere Trockendichten und verlieren mit jeder Versuchswiederholung an Festigkeit.

Ergebnisse

Die in dieser Arbeit verwendeten sandigen und stark plastischen Proben zeigen bei der Verdichtung und mehrmaliger Belastung unterschiedliche Verhaltensweisen, die mit dem Allophananteil begründet werden können.

Im Allgemeinen verlieren bindigere Bodenproben (F6-1, F3-9) auch bei zunehmender Trockendichte an Festigkeit. Die Festigkeit sandiger Ascheböden kann bei Versuchswiederholung trotz sinkender Trockendichte zunehmen (A1-2). Andererseits kann bei gleichbleibender Maximalspannung die zugehörige Stauchung zunehmen und damit die Steifigkeit sinken (A1-7). Diese Fakten bestätigen die Komplexität der Analyse von Ascheböden.

Der bei sedimentären Böden übliche Zusammenhang von Trockendichte, Scherfestigkeit und Wassergehalt entsprechend Abbildung 38, ist bei Ascheböden so nicht gegeben. Vielmehr lassen sich keine festen Relationen der Parameter untereinander ausmachen.

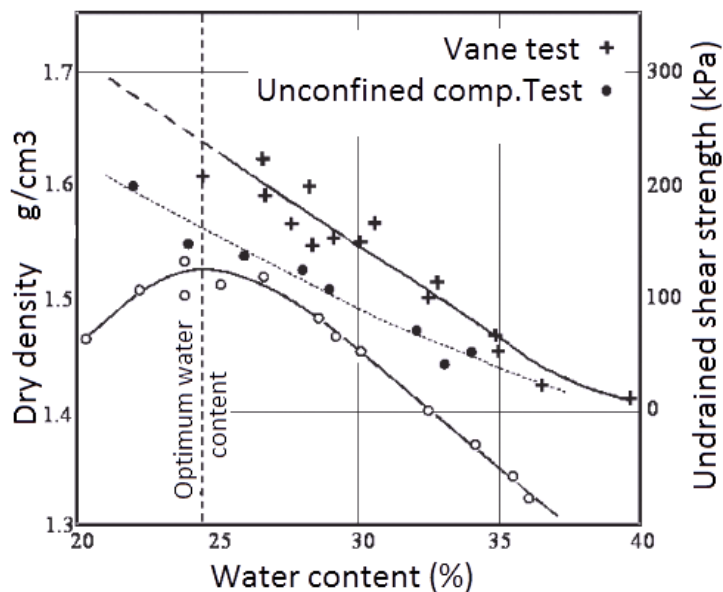


Abbildung 38: Scherfestigkeit von verdichteten Proben im Vergleich zum optimalen Wassergehalt bei traditionellen Böden [We09].

Praxis- Erfahrungen

Auf Baustellen in Kolumbien wird versucht, das Problem der Veränderung der Eigenschaften von Ascheböden bei der Verdichtung auf zwei Wegen zu lösen. Normalerweise wird eine Bodenverbesserung mit Kalziumoxid – CaO oder Kalziumhydroxid – Ca[OH]₂ (Lime-Treatment) durchgeführt. Oftmals wird auch versucht mit einer besonders niedrigen Verdichtungsenergie bei der Herstellung von Dämmen auszukommen. Das Ziel ist somit nicht die optimale Dichte des Bodens zu erreichen, sondern durch die Reduzierung der Verdichtungsenergie die Veränderung der mechanischen Eigenschaften zu vermeiden.

Dass Versuche mit anderen Methoden nicht unbedingt zum Ziel führen, zeigt das Beispiel der Verdichtung von mehreren Dämmen für den Flughafen von Palestina in der Kaffee-Region Kolumbiens. In diesem Fall wurde das Aschematerial mit anderen Bodenarten vermischt und es wurden zahlreiche Drainagen (horizontal und vertikal) installiert. Die Ergebnisse waren außerordentlich negativ. Millionen Kubikmeter Boden haben sich gesetzt, was den Kollaps der Drainagen verursachte und damit die Setzungen noch verschlimmerte.

Trotz der vielen gesammelten Erfahrungen in der Region, bleiben noch erhebliche Schwierigkeiten, das Material sachgerecht zu behandeln.

In der Literatur wird die Anwendung von CaO bevorzugt [To85], weil die Mischung mit Portlandzement oder bituminösen Additiven manchmal zu Erweichungen geführt haben. CaO ermöglicht eine Wasserabnahme durch die Entwicklung von Reaktionswärme. Laboruntersuchungen zur Bestimmung des CaO - Anteils haben ergeben, dass der Festigkeitsgewinn eigentlich auf die Trocknung des Bodens während der Mischung zurückzuführen ist [Ku78] [Pe91].

In der Literatur werden ebenfalls gute Erfahrungen beschrieben, bei denen das Material vor der Verdichtung getrocknet wurde [To85][Th95]. Durch die Trocknung werden die Ascheböden umgewandelt und verhalten sich in diesem Zustand wie ein normaler schluffiger Boden mit einer niedrigen Plastizität. Mit den Eigenschaften verändert sich dementsprechend auch die Form der Verdichtungskurve, die eine traditionelle Form bekommt. Zudem verringert sich der optimale Wassergehalt gegenüber dem ursprünglichen erheblich. Dennoch ist die Trocknung eines Aschebodens eher als Ausnahme zu sehen, da der Zeitaufwand in situ erheblich ist und damit natürlich auch die Kosten steigen.

Zum Thema Verdichtung und den damit verbundenen Problemen schlägt Wesley [We08] vor, die undrained Festigkeit und das Porenvolumen, anstelle der Trockendichte zu kontrollieren (Abbildung 39).

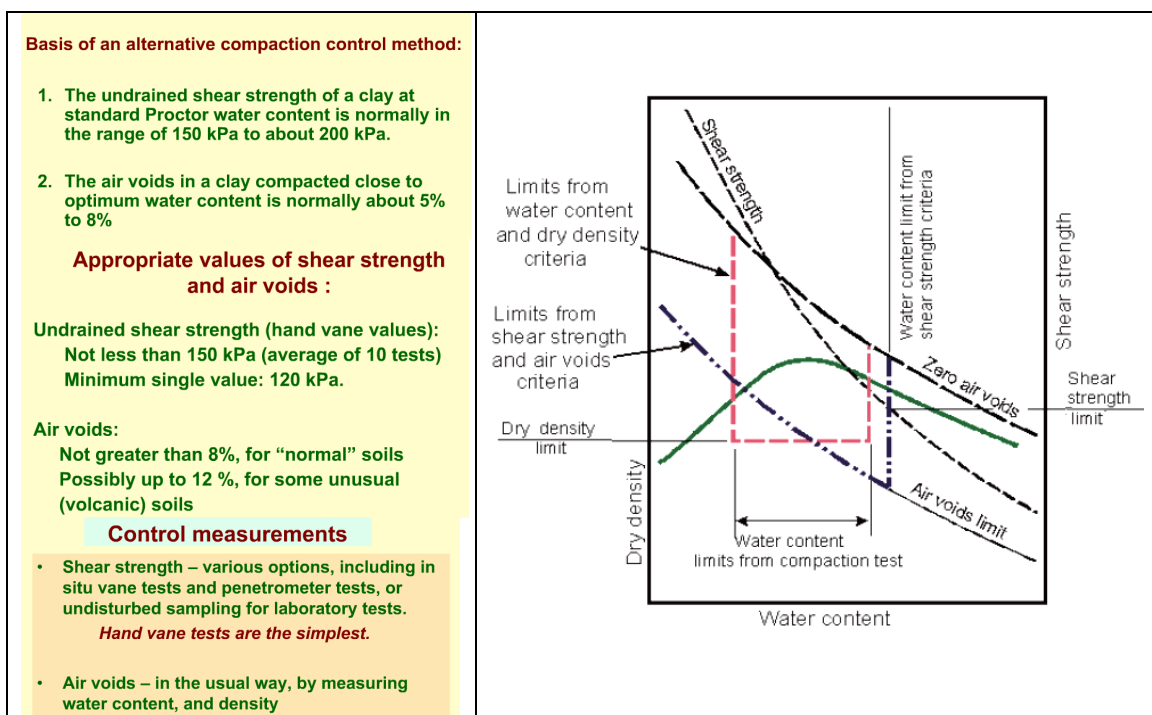


Abbildung 39: Alternative Verdichtungskontrolle nach Wesley [We08][We09]

Anmerkungen

Nach eigenen Erfahrungen zeigt die Methode von Wesley einige Beschränkungen:

- Die Darlegung geht davon aus, dass höhere Scherfestigkeiten mit höheren Trockendichten verbunden sind. Es ist schon bekannt, dass im ungestörten Zustand hohe Festigkeiten auch bei außergewöhnlich hohem Porenraum möglich sind. Die Hypothese dieses Kapitels nimmt deshalb an, dass beide Eigenschaften auch bei verdichteten Bodenproben nicht immer proportional sind, und dass dieses Verhältnis durch den Prozess der Verdichtung des Materials verändert wird.

- Die schlechte Korrelation zwischen Festigkeit und Trockendichte ist darauf zurückzuführen, dass bei der eingebrachten Energie im Proctorversuch die originale Struktur des Bodens beeinträchtigt wird. Auch wenn möglicherweise eine bessere Anordnung der Partikel erreicht wird, nimmt die Festigkeit nicht gleichermaßen zu. In Abbildung 25 ist dieser Fall für eine steigende Verdichtung dargestellt.
- Weiterhin ist anzunehmen, dass die Poren dieses Materials nicht nur mit Luft und Wasser gefüllt sind, sondern auch mit amorphen Materialien (Gel), die bei den traditionellen Bestimmungen und Formulierungen nicht in Betracht gezogen werden.
- Die Bestimmung der Scherfestigkeit sollte in situ stattfinden [We08]. Es ist damit zu rechnen, dass bei Luftkontakt die amorphen Materialien teilweise austrocknen. Bei der Ermittlung des Luftporenvolumens kann durch die Entnahme, den Transport und die Vorbehandlung im Labor eine Veränderung des Materials stattfinden, die in den meisten Fällen auch den Wassergehalt betrifft.

Folgerungen

Ergebnisse dieses Teils der Arbeit sind:

- ✓ Ascheböden reagieren sehr unterschiedlich. Der Allophangehalt ist sicher eine einflussnehmende Größe, aber auch bei fast gleichem Allophangehalt kann das mechanische Verhalten sehr verschieden ausfallen. Mit geringem Allophangehalt geht nach den hier vorliegenden Untersuchungen zwar eine Verbesserung der Festigkeit einher, die aber in Abhängigkeit von den Lastwiederholungen gegenläufige Tendenzen zeigen kann, so dass sich keine allgemein gültige Methode erschließt, wie solche Böden zielgerichtet aufbereitet werden können.
- ✓ Obwohl diese Aschen normalerweise als MH (Schluff höherer Plastizität) klassifiziert werden, können sie das Verhalten eines feinen als auch eines sandigen Bodens zeigen, speziell dann, wenn Trocknung und Bearbeitung auf der Baustelle eine Materialveränderung verursacht haben.
- ✓ Eine Erhöhung der Trockendichte bedeutet nicht unbedingt eine höhere Festigkeit, wie man es im Allgemeinen erwarten würde.
- ✓ Angesichts der amorphen Natur der Allophane, die in sich selbst Wasser binden, was die Ursache für hohe Wassergehalte ist, können die traditionellen Methoden, wie die Drainage des Bodens (mit Schottersäulen, Geotextilien, usw.) zur Beschleunigung der Konsolidation nicht angewendet werden. Das Wasser liegt nicht frei in den Poren, sondern eingekapselt in der Struktur der Allophane und kann nicht durch einen mechanischen Prozess aus dem Boden abgeführt werden.

3.2. DIE ZUSAMMENDRÜCKBARKEIT UND DIE FESTIGKEITSERZEUGUNG DURCH ZEMENTATION

3.2.1. Literaturübersicht

Das mechanische Verhalten hängt bei vulkanischen Aschen nicht so sehr von der Spannungs-Geschichte ab. Vielmehr spielen hierbei die Zusammensetzung und Struktur des Bodens sowie die Veränderungen, denen der Boden ausgesetzt war, die wesentliche Rolle.

Obwohl Ascheböden sehr hohe Porenzahlen aufweisen (von 2,5 bis 7 [We01][So98][Va02], von 1 bis etwa 7 in Kolumbien [Fo99]) sind vulkanische Ascheböden normalerweise nur geringfügig zusammendrückbar. Dies zeigt sich besonders im ungestörten Zustand, wenn die natürliche Struktur noch unverändert ist. Einige Ergebnisse aus Ödometerversuchen sind in Tabelle 14 zusammengestellt. Die Parameter Konsolidationsbeiwert (C_v), Verdichtungsziffer (m_v), und Permeabilität (k), sind normalerweise größer als bei anderen feinen Böden. Das bedeutet, dass die Zusammendrückung in der Regel schnell stattfindet, weil auch die Permeabilität größer ist. Eigene Erfahrung in Kolumbien und Costa Rica zeigen jedoch, dass die Permeabilität dieser Böden nicht immer hoch ist.

Tabelle 14: Konsolidationsbeiwert (C_v), Verdichtungsziffer (m_v) und Permeabilität (k) von ungestörten Bodenproben [We77]

Soil	Atterberg limits			Clay fraction, %	c_v , cm ² /s	m_v , cm ² /kg	k , cm/s	Comments and references
	LL	PL	PI					
Indonesian residual soils with halloysite as predominant clay mineral	70–110	55–75	20–45	55–90	$1-9 \times 10^{-2}$	$1-2.5 \times 10^{-2}$	$1-13 \times 10^{-7}$	Results from eight tests
Indonesian residual soils with allophane as predominant clay mineral	85–190	65–150	20–50	60–90	$0.8-9 \times 10^{-2}$	$1-3.0 \times 10^{-2}$	$0.8-27 \times 10^{-7}$	Results from four tests
London Clay	70–76	30	40–46	55–60	$0.8-3 \times 10^{-4}$	$0.5-2.5 \times 10^{-2}$	$1-3.5 \times 10^{-9}$	Garga (1970)
Boulder clay (Selset)	32	13	19	24	$2-6 \times 10^{-4}$	—	—	Bishop and Al-Dhahir (1970)
Boulder clay (Diddington)	58	20	38	38	$0.8-3.5 \times 10^{-4}$	—	—	Bishop and Al-Dhahir (1970)

Es ist typisch für Ödometerversuche mit vulkanischen Aschen, dass kleine Zusammendrückbarkeiten bei kleiner Belastung ermittelt werden, obwohl große Porenzahlen vorliegen. Die Zusammendrückbarkeit bei leichten Belastungen ist gering und die Kompressionsbeiwerte (C_c) liegen zwischen 0,2 und 0,35. Wird eine bestimmte („kritische“) Last überschritten, kommt es aber zu einer schnellen Zunahme der Zusammendrückbarkeit ($C_c = 0,8$ bis 1,5). Diese Last wird als „scheinbarer“ Überkonsolidationsdruck angenommen [We73], wobei diese unabhängig ist von der Vorgeschichte oder der Vorbelastung.

Normalerweise ist der Überkonsolidationsdruck höher als der gegenwärtige Überlagerungsdruck. Dabei sind Überkonsolidationsverhältnisse OCR^3 zwischen 2,5 und 17 normal.

In Fall der vulkanischen Ascheböden gibt es einen wichtigen zusätzlichen Faktor, der das mechanische Verhalten beeinflusst. Dies ist die Zementation zwischen den Partikeln

³ $OCR = \text{früherer max. Überlagerungsdruck} / \text{heutiger Überlagerungsdruck}$

(siehe Kapitel 3.2.2). Die Zementation ist für das Gerüst des Bodens entscheidend. Sie hat Einfluss auf die volumetrische Verformung, das Scherverhalten, die Steifigkeit und weitere Eigenschaften.

Dazu hat Wells [We85] herausgefunden, dass die starke Aggregation von allophanreichen mineralischen Partikeln durch Van-der-Waals- und Coulombsche Kräfte und Wasserstoffbindungen hervorgerufen wird. Neben der Aggregationstendenz der Allophanpartikel tragen die Oberflächeneigenschaften dieser auch zur großen Restscherfestigkeit der allophanhaltigen Böden bei [Ra95].

Die Eigenschaft der Zementation und der Partikelbindung hat aber eine negative Seite. Viele Wissenschaftler [Na98][Na00][We03] beschreiben, dass es zu einem Kollaps der Struktur kommen kann, wenn die Zementation auf Grund von Druck oder Befeuchtung schnell zerbricht. Dabei zeichnen sich die Böden mit einem höheren Kollapspotential durch eine sehr offene Wabenstruktur sowie stark wasserlösliche Zementierungsmittel aus.

Durch den Kollaps wird eine unwiderrufliche volumetrische Verformung (Kontraktion) des Bodens hervorgerufen. Dieses Phänomen findet durch das Versagen der Verbindungen zwischen den Partikeln statt. Die durch Wasserzufuhr feuchtere Struktur ist nicht mehr in der Lage, die vor dem Anfeuchten aufgenommene Last zu übernehmen. Während des Kollapses verschieben sich bzw. gleiten die einzelnen Partikel abrupt und bilden eine dichtere Struktur.

Townsend [To85] berichtet über irreversible Erhärtung von Latherit und Allophan und nennt als mögliche Gründe: (a) die Erhöhung der Zementierung durch Oxidation des Eisens und Aluminium- Sesquioxiden⁴, (b) Dehydratisierung von Allophanen und Halloysiten oder (c) beide Phänomene gleichzeitig. Der Effekt der Zementierung wird auch deutlich bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung mit dem Aräometer (siehe Kapitel 2.3.2).

Wesley [We74] beschreibt demgegenüber, dass bei vulkanischen Ascheböden eine Zementierung nicht vorhanden sei, und dass die Struktur nur einen geringfügigen Einfluss auf die Bestimmung der Konsolidierungseigenschaften hat. Eine Begründung für seine Annahmen leitet Wesley aus Abbildung 40 ab.

Wesley [We01] ist der Meinung, dass die niedrigen Volumenänderungen in den ersten Druckstufen darauf zurückzuführen sind, dass Allophan das Wasser in seiner mineralischen Struktur speichert. Für Wesley ist der Beweis erbracht, dass es sich um keine wirkliche Zementierung der Partikel handelt, wenn das halblogarithmische Zusammendrückungs-Diagramm ($\sigma'_{z(\log)} - e$) und die lineare Darstellungsform ($\sigma'_{z(\text{linear})}$ - Stauchung) (Abbildung 40) gegenübergestellt betrachtet werden. Er behauptet, dass eine wirkliche Zementierung auch in der linearen Darstellung zu

⁴ Sesquioxide sind chemische Verbindungen, genauer Oxide, die ein Verhältnis des Metalls oder Halbmetalls zu Sauerstoff von 1 zu 1,5 aufweisen (sesqui "eineinhalbfach")[Fi11]

erkennen ist. Diese würde sich durch eine sprunghafte Veränderung in der Neigung der Ergebniskurve auszeichnen.

Die Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse von drei Ödometerversuchen mit vulkanischen Ascheböden in beiden Darstellungsformen nebeneinander. Betrachtet man die halblogarithmische Darstellung, so kann man für alle Bodenproben eine ähnliche Form erkennen, die das Vorhandensein eines gewissen (scheinbaren) „Überkonsolidationsdrucks“ erwarten läßt. Allerdings kann dieses bei Auswertung der linearen Darstellung nur für eine Probe (A) bestätigt werden.

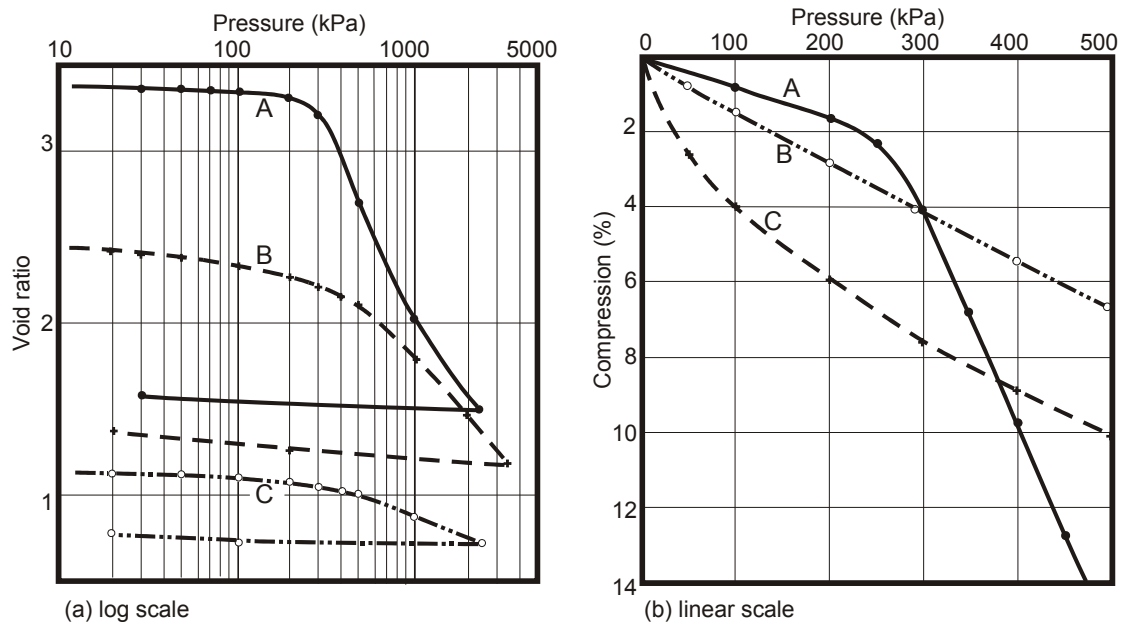


Abbildung 40: Interpretation des Konsolidierungsverhaltens; Gegenüberstellung der logarithmischen und linearen Darstellung [We10]

Wesley [We08] nahm an, dass durch das Wasser kleine Veränderungen der Zusammendrückbarkeit bei niedrigen Lasten in der Struktur des Allophans vorkommen und dieses Wasser die Funktion eines Dämpfers übernehmen könnte. Die Erfahrungen, die in den letzten Kapiteln beschrieben wurden, können diese Annahmen nicht bestätigen. Es wird deshalb die Hypothese aufgestellt, dass eine Zementierung stattfindet, deren Effekt sich aber erst dann bemerkbar macht, wenn ein bestimmter Trocknungsgrad erreicht ist.

Auf Grund der großen Bedeutung wird im Folgenden der Effekt der Trocknung auf das mechanische Verhalten untersucht, um die oben aufgestellte Hypothese zu überprüfen. Nachfolgend wird ein Programm von Laborprüfungen entwickelt und beschrieben, welches im Rahmen einer Abschlussarbeit an der Universität Los Andes in Bogotá – Kolumbien durchgeführt wurde. Die hier untersuchten Bodenproben stammen aus anderen Entnahmestellen als die bisher beprobten Böden.

3.2.2. Experimentelle Überprüfung der Zementation

3.2.2.1. Druckversuch mit verhinderter Seitendehnung (Ödometerversuch)

Zielvorstellung: Durch Ödometer- und Kastenscherversuche (ohne Sättigung) wird überprüft, ob eine allmähliche Veränderung der Zusammendrückbarkeit und der Scherfestigkeit zu erkennen ist, wenn ein vulkanischer Ascheboden unter verschiedenen Prozeduren getrocknet wird.

Verfahren: Bodenproben aus Vulkanaschen sowie zum Vergleich ein „normaler“ schluffiger Boden werden 24 Stunden unterschiedlichen Trocknungstemperaturen ausgesetzt (entweder 25, 30 oder 40°C; entsprechend normalen Temperaturen in einer tropischen Umgebung). Diese Proben werden im Ödometerversuch und im Kastendruckversuch (ohne Sättigung) getestet.

Die Untersuchungen wurden ohne Wasser durchgeführt, um die Ergebnisse der Zusammendrückbarkeit und Scherfestigkeit einzeln beobachten zu können, d.h. ohne einen zusätzlichen Einfluss durch das Wasser auf die ausgetrockneten Strukturen des Bodens. Dies wird in späteren Kapiteln noch behandelt werden.

Die Bodenproben: Es wurden zwei vulkanische Böden (C2 und C3) und ein toniger Schluff anderer Herkunft (C4) getestet. Von jedem Boden werden vier Ödometer- und vier Scherkastenversuche durchgeführt, wobei die Proben jeweils unterschiedlichen Behandlungen ausgesetzt werden.

Nach dem System USCS werden die vulkanischen Ascheböden (C2, C3; getestet mit dem ursprünglichen Wassergehalt) als ein Schluff höherer Plastizität MH klassifiziert, der tonige Schluff (C4; nach der konventionalen Methode getestet) ist ein CL-ML.

Es kann vorkommen, dass Bodenproben aus der gleichen Entnahmestelle unterschiedliche Zustandsgrenzen aufweisen. Die Eigenschaften der verwendeten Bodenproben im originalen Zustand sind in Tabelle 15 zusammengestellt.

Tabelle 15: Grundmerkmale der Bodenproben

Bodenproben für Ödometerversuch						
	Probe	G_s	W_n	W_l	W_p	I_p
Vulkanische Ascheböden	C2	2,26	87,37	80,91	41,93	38,98
	C3	2,29	61,86	85,33	40,05	45,28
toniger Schluff	C4	2,61	18,93	21,16	17,76	3,40
Bodenproben für Kastenscherversuch						
Vulkanische Ascheböden	C2	2,29	87,18	81,27	41,27	40,00
	C3	2,28	62,98	94,49	50,40	44,09
toniger Schluff	C4	2,61	25,64	27,98	18,27	9,71

Ergebnisse Ödometerversuch

Die Ergebnisse aus den Ödometerversuchen zeigen für die Ascheböden mit steigenden Trocknungstemperaturen veränderte Kurven. Dabei verringert sich die Porenzahl proportional. Der Überkonsolidationsdruck erhöht sich, allerdings ohne eine direkte Beziehung zur Temperatur (siehe Tabelle 16).

Bei normalen schluffigen Böden gibt es nur geringe Unterschiede zwischen dem Verhalten bei verschiedenen Trocknungstemperaturen.

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen für jede Probe, im halblogarithmischen Zusammendrückungsdiagramm ($\sigma'_{z(\log)}$ - e) dargestellt.

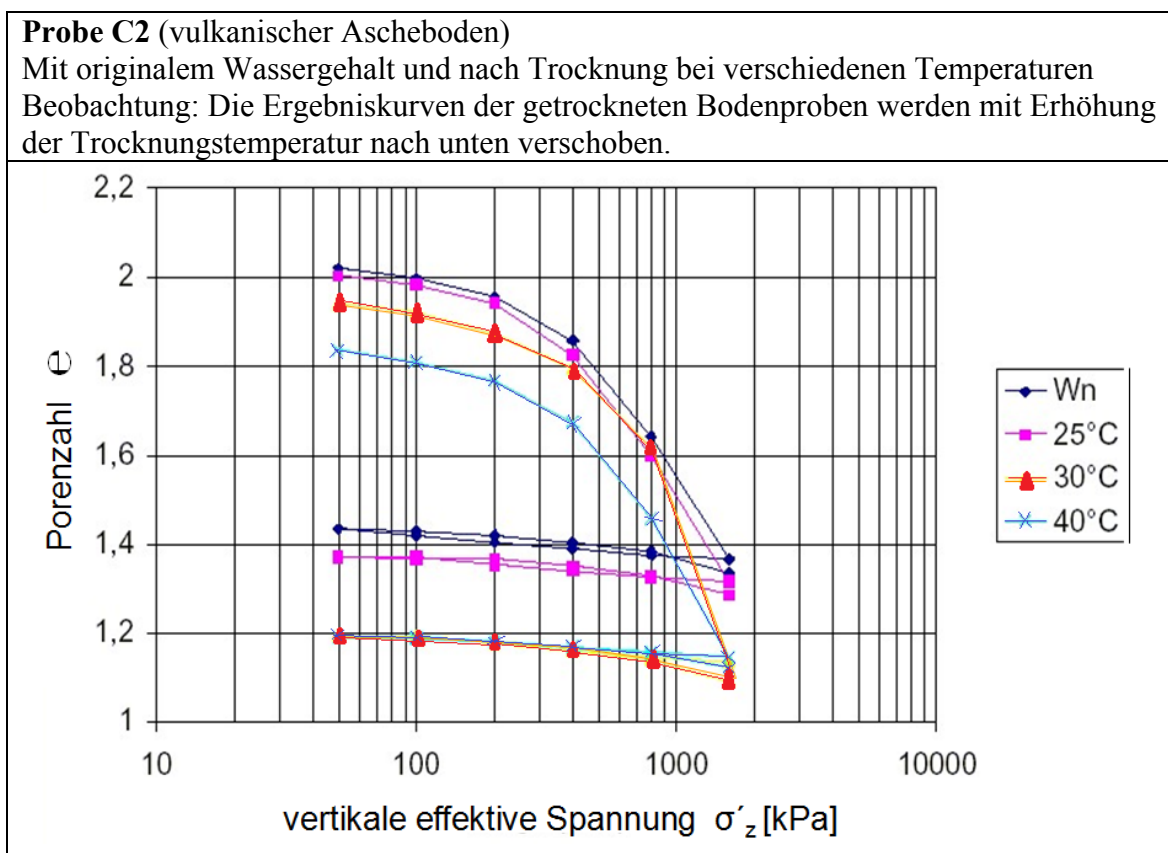


Abbildung 41: Ergebnisse Ödometerversuch Bodenprobe C2

Probe C3 (vulkanischer Ascheboden)

Mit originalem Wassergehalt und nach Trocknung bei 25°C.

Bodenproben 30 und 40°C wurden beschädigt und werden nicht dargestellt.

Beobachtung: Die Ergebniskurve der getrockneten Bodenprobe verschiebt sich wie bei C2 nach unten.

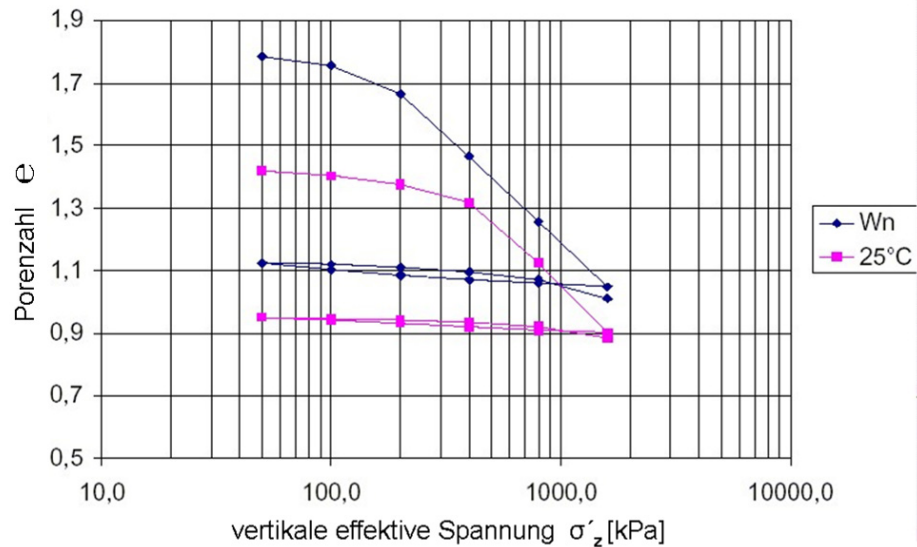


Abbildung 42: Ergebnisse Ödometerversuch Bodenprobe C3

Probe C4 (Schluff anderer Herkunft)

Mit originalem Wassergehalt und nach Trocknung mit verschiedenen Temperaturen.

Beobachtung: Die Kurven der Bodenproben verschieben sich infolge der Erhöhung der Trocknungstemperatur, sowohl nach oben wie auch nach unten, ohne dass eine Systematik erkennbar wäre.

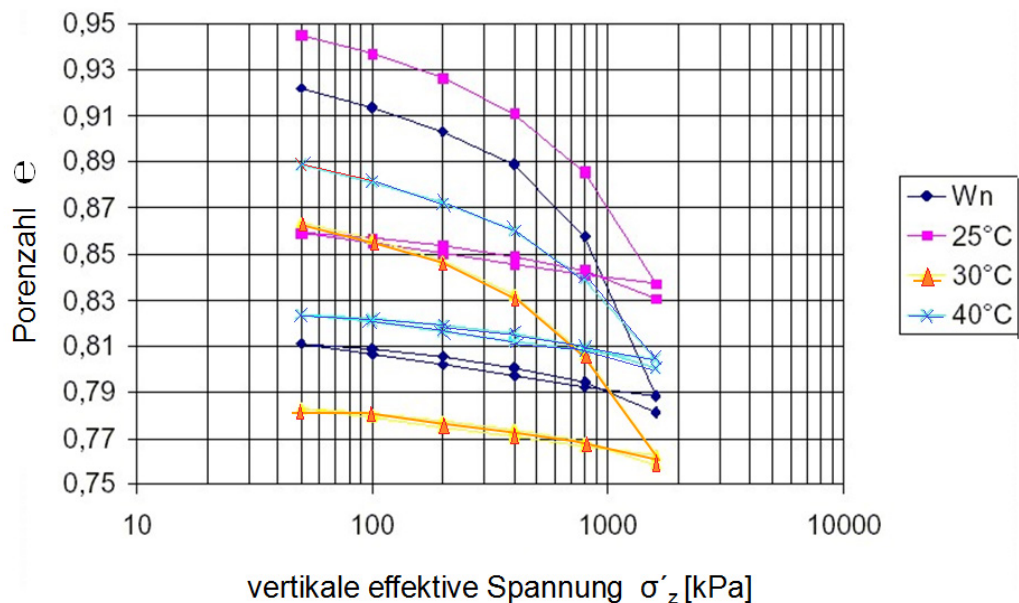


Abbildung 43: Ergebnisse Ödometerversuch Bodenprobe C4

Proben C2, C3, und C4

Beobachtung: Die Kurven der vulkanischen Ascheböden bewegen sich in einem breiten Bereich von Porenzahlen

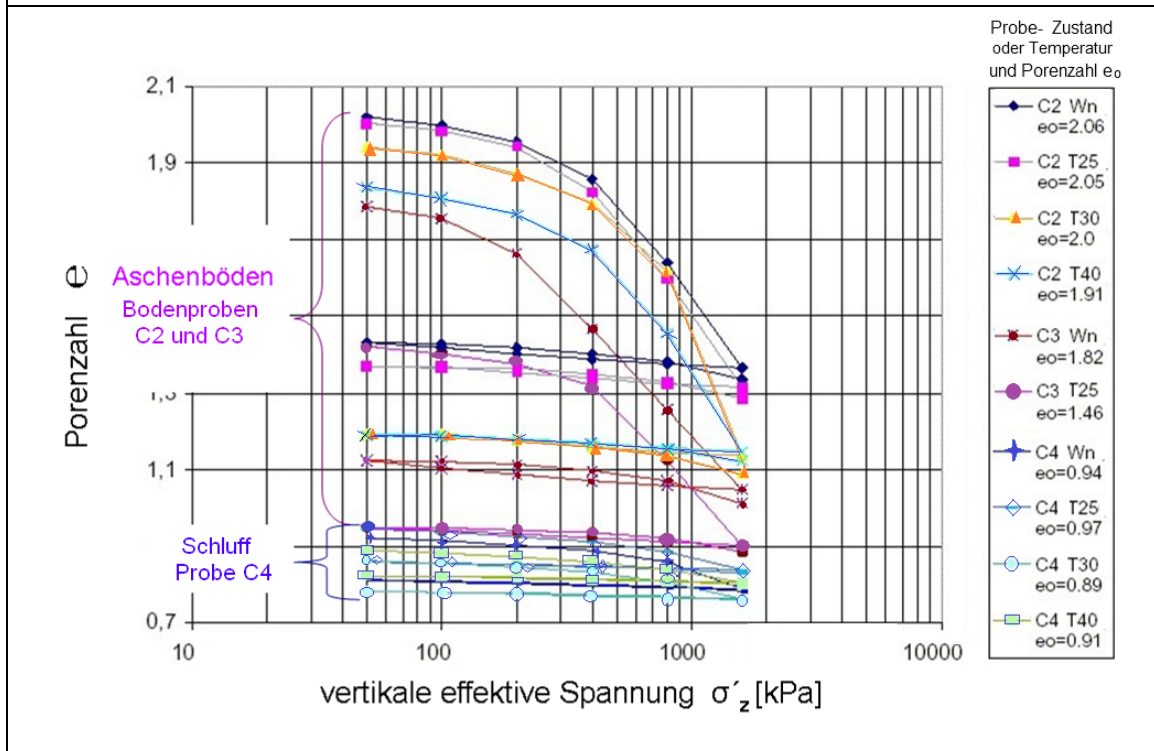


Abbildung 44: Ergebnisse Ödometerversuch aller Bodenproben

In Tabelle 16 werden noch einmal alle Ergebnisse zusammengefasst und zusätzlich die Überkonsolidierungsdrücke aufgeführt.

Tabelle 16: Ergebnisse Ödometerversuch

Bodenprobe	Gs	Zustand oder Temperatur °C	Wassergehalt %	Überkons. kPa	WL %	WP %	Ip %
C2	2,29	Wn	87,4	315	80,9	41,9	39,0
		25	87,5	310	68,8	42,5	26,2
		30	83,0	550	72,2	54,9	17,3
		40	56,6	380	77,2	37,1	40,1
C3	2,28	Wn	61,9	180	85,3	40,0	45,3
		25	45,0	380	70,0	38,9	31,1
		30	36,1	*	66,4	40,5	25,9
C4	2,61	Wn	18,9	580	21,2	17,8	3,4
		25	8,9	515	25,3	19,6	5,8
		30	8,6	515	22,1	18,5	3,7
		40	3,6	545	20,0	16,1	3,8

* Probe beschädigt

Ergebnisse

Wassergehalt, Fließ- und Ausrollgrenze, sowie die Plastizitätszahl der vulkanischen Bodenproben C2 und C3 liegen viel höher als die des schluffigen Bodens C4. Im Fall

von C2 liegen die Werte des Wassergehalts über den entsprechenden Werten der Fließgrenze.

Wie erwartet verändern sich die Zustandsgrenzen der vulkanischen Ascheböden mit der Trocknung. Diesen Effekt kann man sehr deutlich im Plastizitätsdiagramm (Abbildung 45) erkennen. Die Veränderungen sind durch Pfeile gekennzeichnet. Demgegenüber zeigt der nicht vulkanische Boden dieses Verhalten nicht.

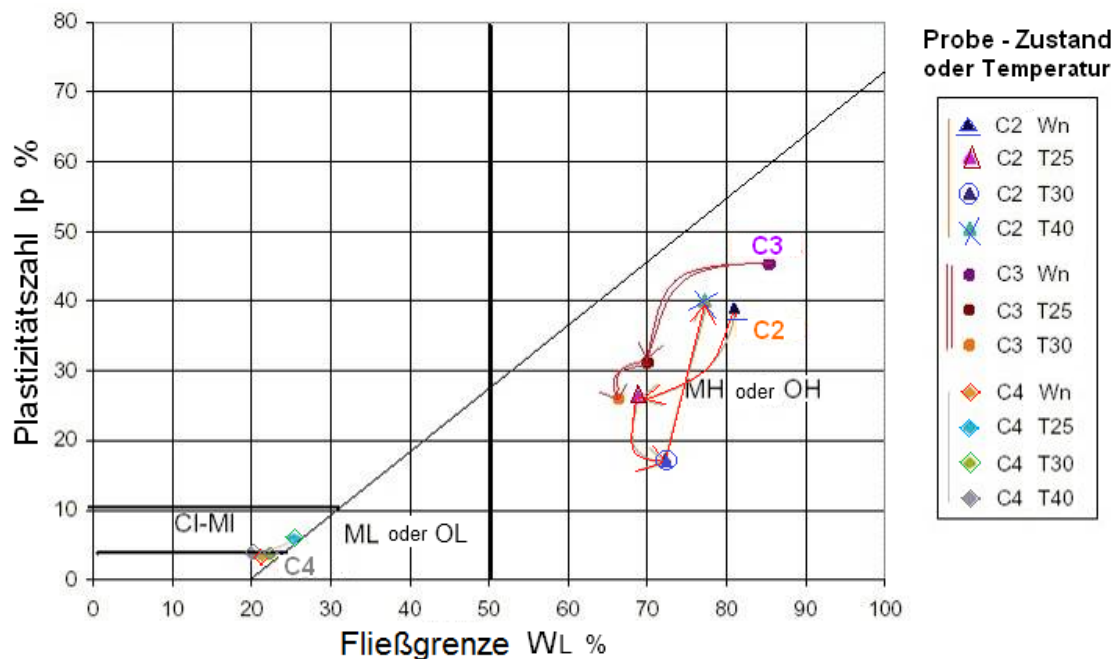


Abbildung 45: Veränderung von Zustandsgrenzen mit der Temperatur im Casagrande- Schema

Infolge der Trocknung ergeben sich für die vulkanischen Ascheböden bei steigenden Temperaturen kleinere Porenzahlen (Parameter e). Für den tonigen Schluff kann lediglich eine kleine Veränderung der Porenzahl ermittelt werden, diese lässt aber keinen Zusammenhang mit der Temperatur erkennen. Es konnte im Labor eine Verminderung des Volumens der Poren in den Ascheböden in Abhängigkeit von der Temperatur durch ein leichtes Schrumpfen der Proben registriert werden.

Bei den vulkanischen Ascheproben steigt der Überkonsolidationsdruck mit der Trocknung, allerdings ist die Steigerung nicht proportional zur Temperatur. Für das Material C2, zum Beispiel, schwankt der Überkonsolidationsdruck zwischen dem Minimum von 310 kPa bei 25°C und dem Maximum von 550 kPa bei 30°C. Im Vergleich dazu liegen die Überkonsolidationsdrücke des schluffigen Bodens zwischen 515 und 580 kPa, die unabhängig von der Temperatur sind.

Werden die Ergebnisse im linearen Maßstab aufgetragen, sind keine zusätzlichen Besonderheiten hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Überkonsolidationsdruck, Belastung und Trocknungstemperatur zu erkennen. Als Beispiel sind die Kurven von

der Bodenproben C2 in der Abbildung 46 parallel auf dem halblogarithmischen Zusammendrückungs-Diagramm ($\sigma'_{z(\log)} - e$) und in linearer Darstellungsform (Stauchung $\varepsilon - \sigma'_{z(\text{linear})}$) abgebildet.

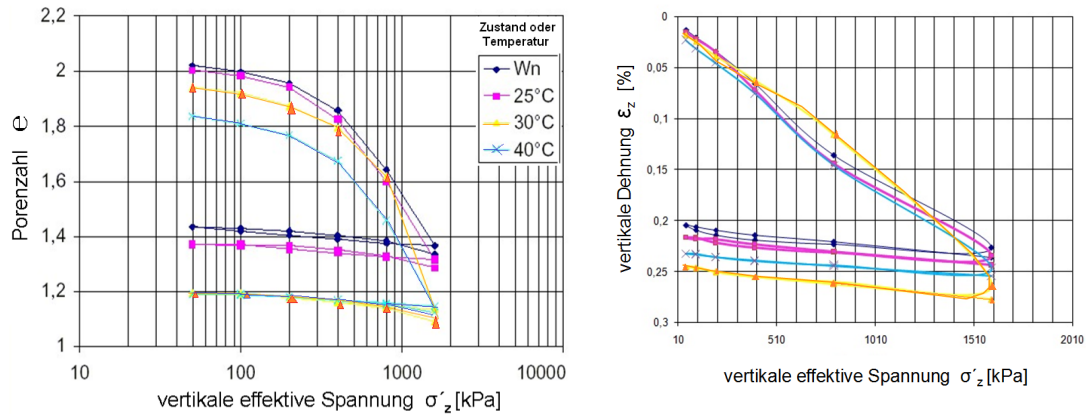


Abbildung 46: Halblogarithmisches Zusammendrückungs-Diagramm ($\sigma'_{z(\log)} - e$), und linear (Stauchung - $\sigma'_{z(\text{linear})}$) Kurven für Bodenprobe C2.

Da die Anzahl der vorhandenen Proben nur sehr gering ist, ist eine generelle Aussage, dass die Erhöhung des Überkonsolidationsdrucks als Folge einer Verfestigung des Materials z.B. durch eine Zementierung zwischen den Partikeln erzeugt wird, nicht sinnvoll. Zum jetzigen Zeitpunkt kann die Erhöhung des Überkonsolidationsdrucks nur als Konsequenz der Zunahme der Dichte der Bodenproben durch Schrumpfen angesehen werden.

Da auf diese Weise eine Zementierung in Folge der Trocknung, die die Hypothese von Wesley verwerfen könnte, nicht deutlich nachgewiesen war, soll im Folgenden durch Kastenscherversuche diese Wirkung der Trocknung weiter untersucht werden.

3.2.2.2. Kastenscherversuche

Beim Kastenscherversuch zeigen vulkanische Aschen eine deutlichere Verbesserung der Festigkeit mit der Zunahme der Trocknungstemperatur. Hierbei fallen vor allem die Kohäsionswerte auf. Dieses Verhalten kann für den tonigen Schluff nur in geringem Maße festgestellt werden. In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse getrennt für jede Probe, die bei unterschiedlichen Temperaturen getrocknet wurden, im Scher- Vertikalspannungs ($\tau - \sigma$)- Diagramm dargestellt.

Probe C2 (vulkanischer Ascheboden) Mit originalem Wassergehalt und nach Trocknung bei verschiedenen Temperaturen.

Die Linien verschieben sich tendenziell nach oben mit zunehmender Trocknungstemperatur. Ähnliches gilt für die Kohäsion, die von 0 auf 35 kPa ansteigt.

Die maximale Zunahme der Scherspannung, die bei einer Vertikalspannung von 150 kPa stattfindet, beträgt etwa 60 kPa (zwischen den Linien von Wn und 40°C).

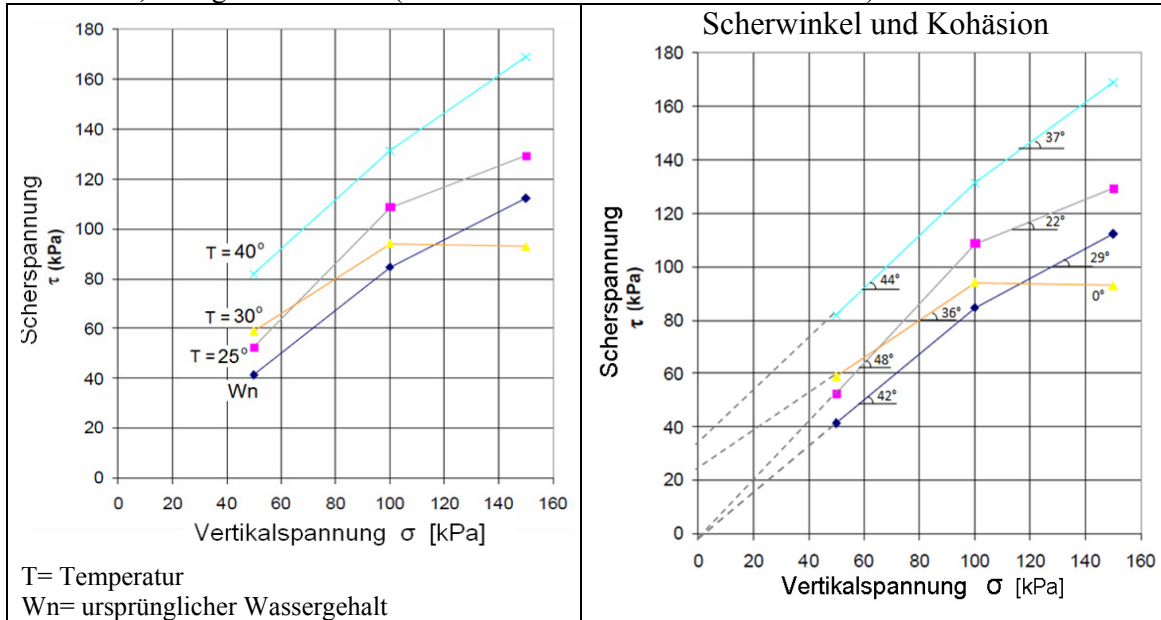


Abbildung 47: Ergebnisse Kastenscherversuch Bodenprobe C2

Probe C3. (vulkanischer Ascheboden) Mit originalem Wassergehalt und nach Trocknung unter 25°C und 30°C. Der Versuch bei 40°C wurde beschädigt.

Die erreichbaren Scherspannungen steigen generell mit der aufgebrauchten Vertikalspannung, die maximale Zunahme der Scherspannung beträgt etwa 80 kPa (zwischen Wn und T25°C bei 100 kPa Vertikalspannung). Die Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur ist uneinheitlich.

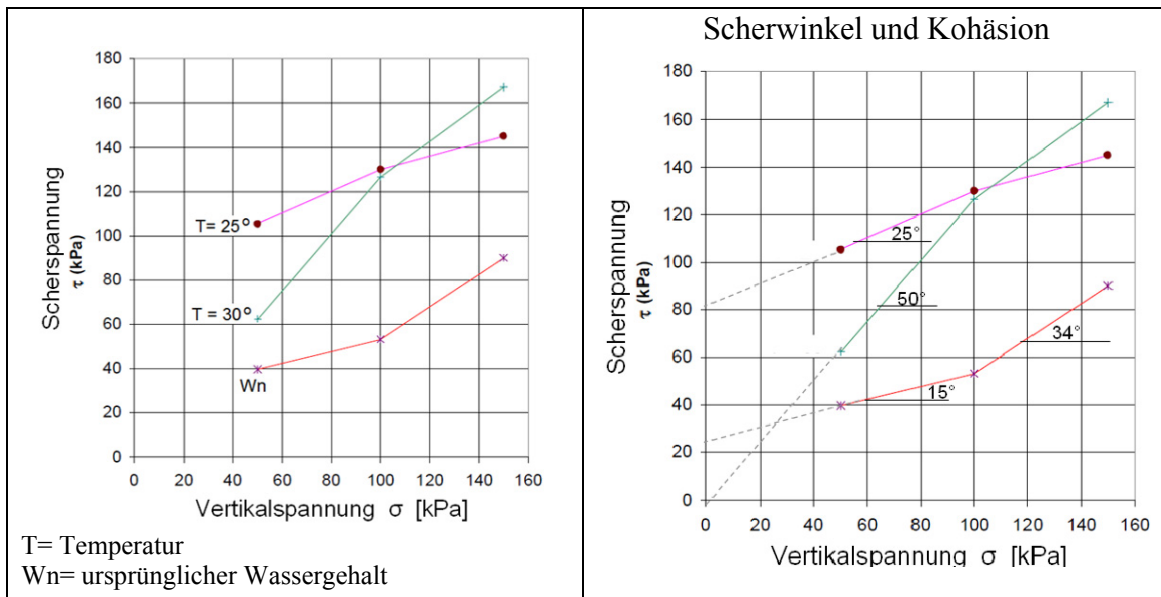


Abbildung 48: Ergebnisse Kastenscherversuch Bodenprobe C3

Probe C4 (Schluff anderer Herkunft)

Mit Originalwassergehalt und nach Trocknung mit verschiedenen Temperaturen.

Es bildet sich keine deutliche Tendenz der Scherspannung in Abhängigkeit von der Temperatur aus. Die maximale Zunahme der Scherspannung beträgt etwa 40 kPa (zwischen W_n und $T_{25^\circ\text{C}}$ bei 100 kPa Vertikalspannung). Die Scherspannung bei der Vertikalspannung 100 kPa, tritt von W_n zu T_{25} (und auch zu T_{30}) zurück, womit der Scherwinkel der ersten Phase erheblich zunimmt. Die Tendenzen der Linien vor und nach 100 kPa der Vertikalspannung, sind sehr unterschiedlich.

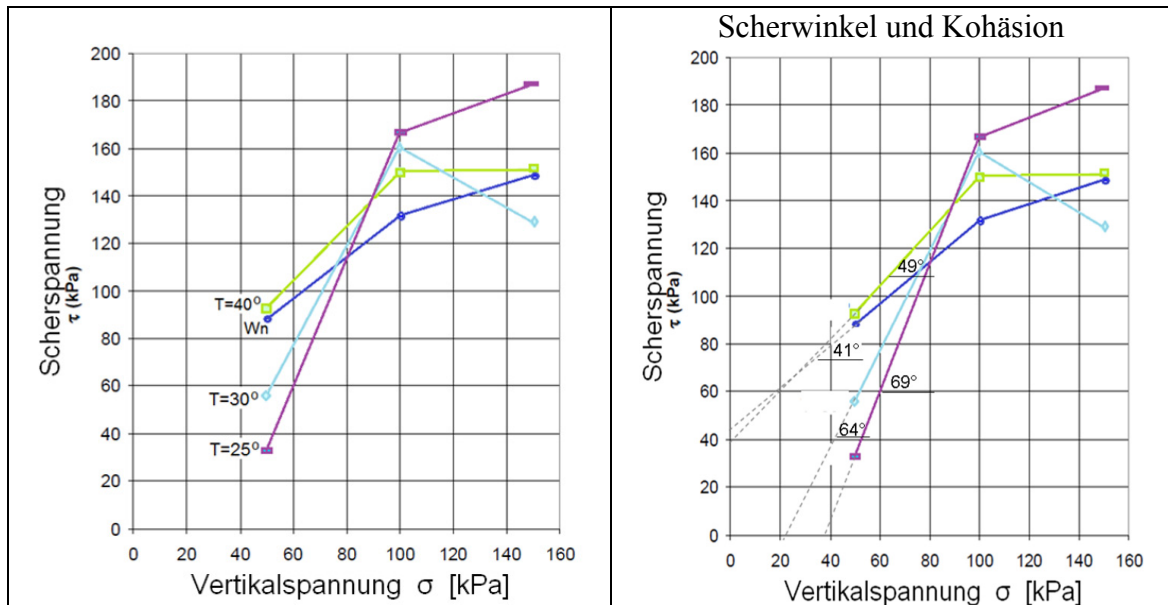


Abbildung 49: Ergebnisse Kastenscherversuch Bodenprobe C4

Ergebnisse

Bei vulkanischen Ascheböden steigt die Scherfestigkeit mit der Vertikalspannung. Es sind aber keine eindeutigen Tendenzen im Bezug auf die Trocknungstemperatur erkennbar.

Dass sich in den Untersuchungen keine deutlichen Tendenzen zeigen, kann mit der praktischen Umsetzung im Labor zusammenhängen. Zum einen ist es sehr schwierig, geringe Wasserverluste genau zu bestimmen und zum anderen trocknet die Probe auch während der Versuchsdurchführung weiter aus. Diese Vermutung wird bestätigt, wenn man zusätzlich das Verhalten der Fließgrenze während des Versuches berücksichtigt. Die deutliche Abnahme der Fließgrenze durch die Trocknung bei vulkanischen Aschen ist bereits beschrieben worden. Auf Grund der geringen Veränderungen in den Trocknungstemperaturen kann das bekannte Verhalten, der deutlich absteigende Verlauf des Wassergehaltes und der Zustandsgrenzen bei diesen Untersuchungen nicht festgestellt werden.

Das Verhalten der verschiedenen Materialien unterscheidet sich aber deutlich. Bei nicht vulkanischen Böden liegen die Zustandsgrenzen normalerweise oberhalb des ursprünglichen Wassergehaltes und bleiben fast unverändert nach der Trocknung, wie in diesem Fall der Boden C 4. Im Verlauf der Trocknung bei 25, 30, und 40 C sinkt der

Wassergehalt um 15 % (von 18,9 % auf 3,6 %) für diesen Boden (siehe graue Linien in Abbildung 50).

Bei vulkanischen Ascheböden kann der ursprüngliche Wassergehalt höher liegen als die Fließgrenze und der Verlauf in Bezug auf die Trocknungstemperatur ist nicht konstant (siehe blaue und grüne Linien von Bodenproben C2 und C3 Abbildung 50). Der Wassergehalt sinkt hier um insgesamt 31% ab (von 87,4% zu 56,6% für C2).

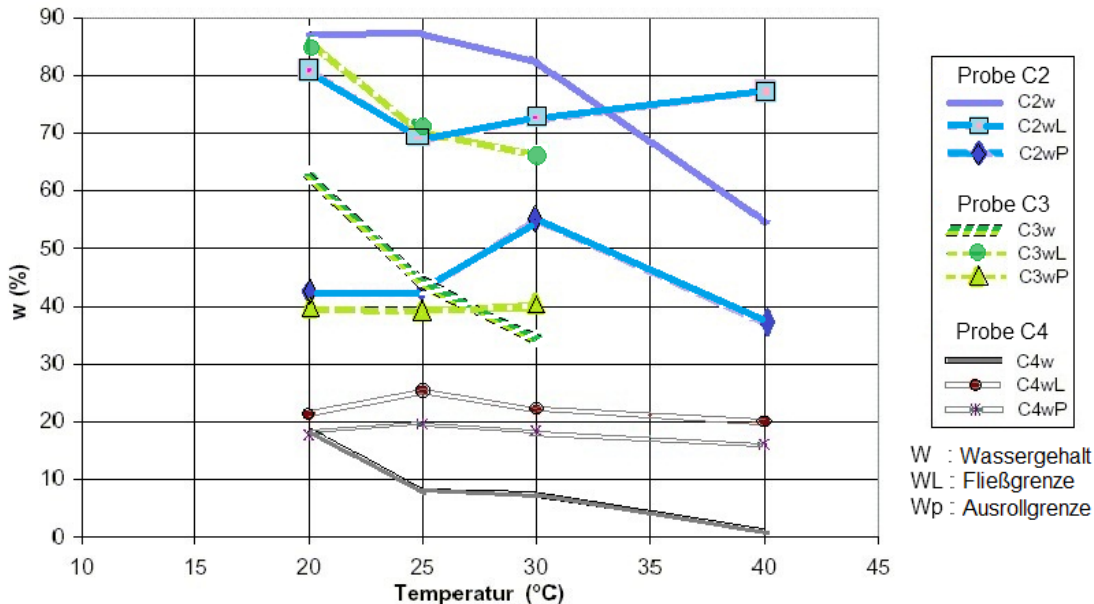


Abbildung 50: Verlauf von Wassergehalt und Zustandsgrenzen bei der Trocknung

Trotz der möglichen Schwierigkeiten der Versuchsdurchführung ist die Zunahme der Festigkeit mit der Trocknung messbar. Ob es sich um eine Steigerung der Kohäsion oder des Scherwinkels handelt, ist durch diese Untersuchung nicht festzustellen. Die besondere Bedingung, die für diese Versuche gewählt wurde, in dem die Bodenproben nicht in Wasser gesättigt wurden, erlauben es nicht, über den Scherparameter eine Aussage zu treffen. Man kann aber aus den Ergebnissen dieses Versuches ablesen, dass durch Trocknung mit einer Verfestigung des Materials zu rechnen ist und diese vermutlich durch eine Zementierung zwischen den Partikeln stattfindet.

Wenn die kleine Zusammendrückbarkeit des Bodens im ungestörten Zustand nur ein Anzeichen für die Funktion des Wassers oder der amorphen Substanzen als Dämpfer wäre, müsste dieser Effekt mit der Trocknung abnehmen und als Festigkeitsverlust feststellbar sein.

Anmerkungen

- In diesen Untersuchungen dienten Ödometer und Schergeräte dazu, um den Einfluss der Trocknung zu überprüfen. Die Reaktion der ausgetrockneten Bodenprobe im Kontakt mit Wasser ist ein Thema, welches in den folgenden Kapiteln dieser Arbeit noch behandelt wird.

- Da die Proben nicht unter Wasser gelagert werden, ist eine Aussage über die Konsolidierung oder das Scherverhalten selbst nicht möglich. Hier wären die Untersuchungskonzepte für teilgesättigte Böden zu verwenden, um den Beitrag der Saugspannung zur Festigkeit zu jedem Zeitpunkt des Versuches berücksichtigen zu können. Die Versuche sollten dann in Einrichtungen mit Suktionskontrolle durchgeführt werden, welche für die vorliegende Arbeit nicht zur Verfügung standen.
- Die Laboruntersuchungen wurden im Rahmen einer Abschlussarbeit in Kolumbien durchgeführt. Dadurch ergab sich eine Beschränkung auf nur drei Proben. Wegen der Empfindlichkeit des Materials wurden mehrere Bodenproben während der Vorbereitung im Labor beschädigt, was den Umfang der Versuche ebenfalls reduzierte.
- Die Bodenproben waren zu dem Zeitpunkt, an dem sie für eine bestimmte Phase des Ödometerversuchs ausgetrocknet wurden, schon in die Ringe eingebaut. Das Schrumpfen der Bodenprobe, auch wenn die Volumenveränderung berücksichtigt wurde, kann Einfluss auf die Ergebnisse haben.
- Als offene Frage aus den Untersuchungen bleibt, ob der Effekt der Verfestigung, der durch die Trocknung ausgelöst wird, durch den erneuten Kontakt mit Wasser oder die Sättigung des Materials beschädigt wird.

Folgerungen

- ✓ Nicht nur die plastischen Eigenschaften, sondern auch das mechanische Verhalten eines vulkanischen Aschebodens kann sich verändern. Hierfür ist aber nicht allein die Behandlung und/oder die Verdichtung maßgebend, sondern auch die Trocknung. Um eine Veränderung zu bewirken, ist es nicht nötig, dass der Boden komplett getrocknet wird, vielmehr ist es ausreichend den Boden der Sonne auszusetzen, da die Trocknung bei ganz normalen Temperaturen in tropischen Ländern, zwischen 20 und 40°C (häufig im Laufe desselben Tages) ausreicht, um andere Eigenschaften hervorzurufen.

Schon ein leichter Verlust von Wasser kann bei der Entnahme der Probe in situ, während des Versuchs im Labor und zum Beispiel der Verarbeitung auf der Baustelle, z. B. ab dem Beginn eines Böschungsbaus, stattfinden.

- ✓ Durch die bisher gewonnenen Kenntnisse sind sowohl die Ergebnisse aus den Laborversuchen (G_s , e , γ_d , usw.) wie auch die der Zustandsgrenzen und Korngrößenverteilung in Frage zu stellen.
- ✓ Andererseits kommen durch die Tatsache, dass sich die Eigenschaften eines Bodens in situ mit der Zeit verändern können, berechtigte Zweifel auf über die Relevanz einer einzelnen Klassifikation, wie sie traditionell mit den Zustandsgrenzen und der Korngrößenverteilung vorgenommen wird.

- ✓ Die Trocknung ist ein Weg, die Festigkeit von Ascheböden zu erhöhen. Diese Erhöhung der Festigkeit kann als ein Signal der Zementierung zwischen den Partikeln angesehen werden, was zumindest eine Zunahme an Kohäsion zur Folge hat.
- ✓ Die Trocknung verursacht aber auch ein Schrumpfen des Materials, dadurch sind an der Oberfläche vieler Böschungen in situ zahlreiche Risse zu finden. Diese Risse fördern den Eintritt von Wasser und machen den Boden an der Oberfläche stark erodierbar. Trotzdem stellt die Erosion bis heute nicht das Hauptproblem in der Stabilität dieser Böden dar (Abbildung 51).

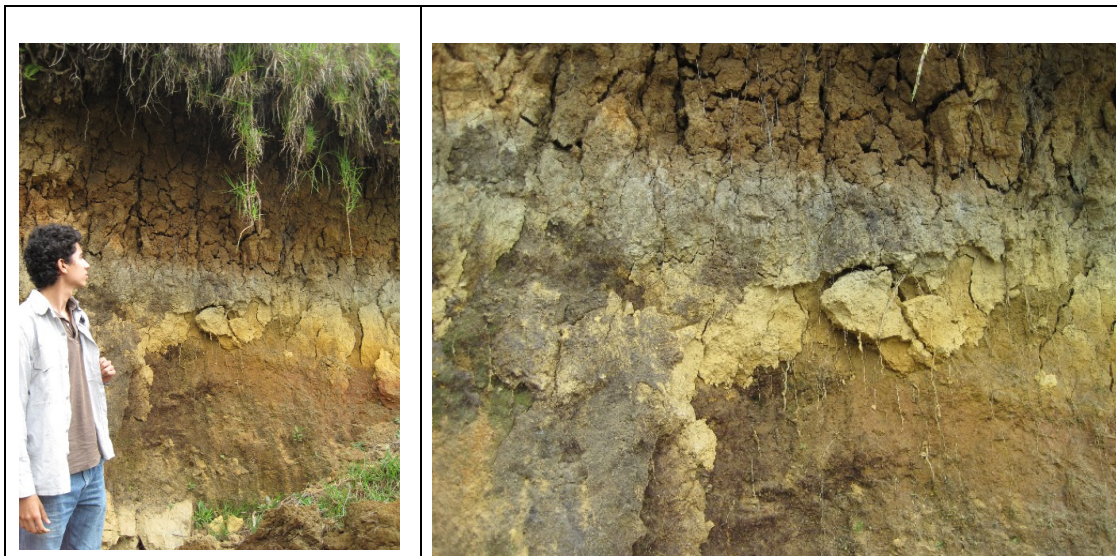


Abbildung 51: Bildung von Rissen an der Oberfläche

3.3. FESTIGKEITSERZEUGUNG UND FESTIGKEITSVERLUST

3.3.1. Literaturübersicht

Natürliche Böschungen aus vulkanischen Aschen sind normalerweise viel steiler als jene aus sedimentären Böden [We77]. Es gibt fast senkrechte künstliche Böschungen, die über 10 m hoch sind (Abbildung 52). Hohe Reibungswinkel ϕ' zwischen 29° und 41° sind keine Seltenheit, trotz außergewöhnlich hoher Wassergehalte und Plastizitätsgrenzen. Die residualen Werte der Scherfestigkeit sind im Vergleich mit sedimentären Böden ebenfalls hoch (Abbildung 53). Beispiele von Scherparametern sind im Tabelle 17 aufgelistet.

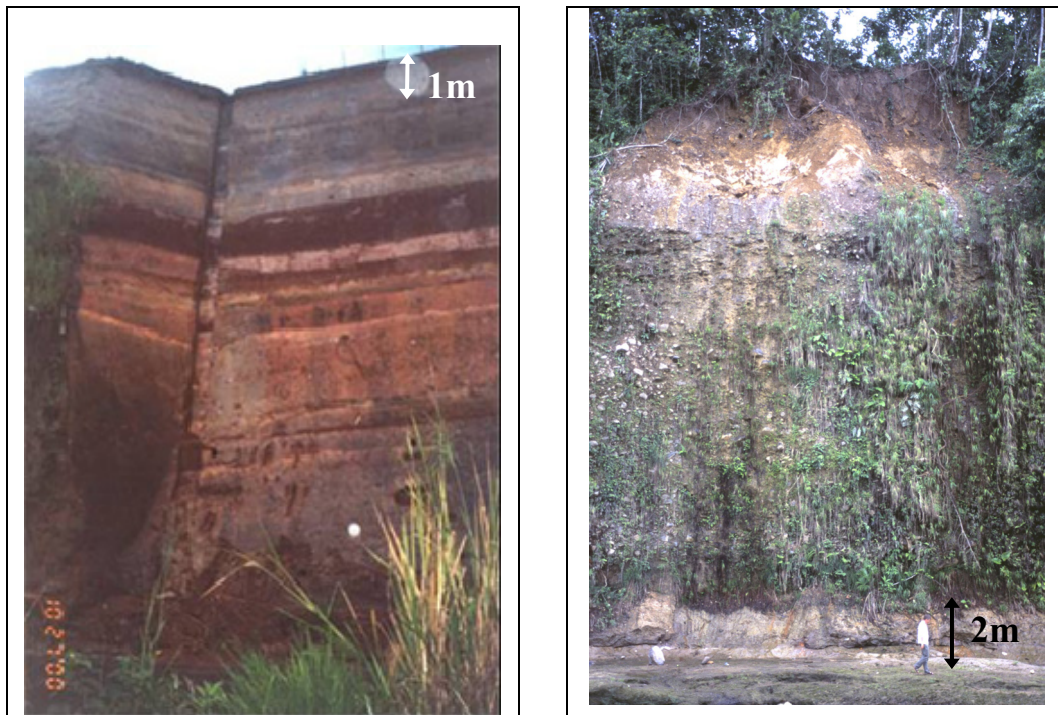


Abbildung 52: Böschung in der Nähe von Quimbaya- Kolumbien (links) [IN00]. Ecuador (rechts) siehe ungefähre Skala.

Tabelle 17: Scherfestigkeitsdaten

Location	Sample identification	Description	Sample type	Water content, %	Atterberg limits			Clay fraction, %	Peak		Residual	
					LL	PL	PI		c'_s , kg/cm ²	ϕ'_s , degrees	c'_{rs} , kg/cm ²	ϕ'_{rs} , degrees
Tjipanundjang dam (site 8)	TJ1	Yellowish brown clay	Compacted	128	165	119	46	65	0-15	40	0	39
	TJ2	Yellowish brown clay	Compacted	68	95	65	30	76	0-18	38	0-04	35
	Y3	Yellowish brown clay	Compacted	180	213	167	46	—	0-15	40	0	39
Mt Telomojo (site 7)												
Bandung-Sumedang Rd (site 1)	R1	Reddish brown clay	Compacted	38	76	36	40	68	0-23	31	—	—
Jakarta-Bogor Rd (site 3)	Bore 1 (1-0 m)	Reddish brown clay	Undisturbed	61	117	68	49	68	0-14	37	—	—
	Bore 2 (1-0 m)	Reddish brown clay	Undisturbed	55	104	61	43	88	0-14	37	—	—
	R3	Reddish brown clay	Compacted	50	101	44	57	83	—	—	0-05	24-5
Bandung-Pengalengen Rd (site 6)	Bore 1 (1-0 m)	Light yellowish brown clay	Undisturbed	58	88	69	19	—	0-13	37	—	—
	Bore 2 (1-0 m)	Light yellowish brown clay	Undisturbed	58	88	69	19	—	0-13	37	—	—

Shear strength properties of Halloysite and Allophane clays in Java, Indonesia. [We77]

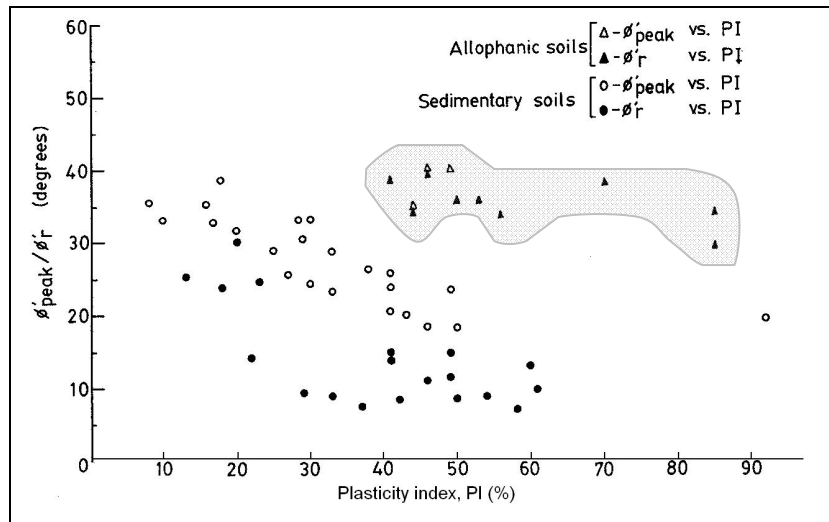


Abbildung 53: Variationen von ϕ'_{peak} und ϕ'_{rest} mit Plastizitätszahlen für allophanreiche und sedimentäre Böden [Ra95]

Aber trotz offensichtlicher Stabilität dieser Böden im natürlichen Zustand kommen häufig Erdbeben vor. In Kolumbien ereignen sich diese insbesondere nach einem Böschungsbau und normalerweise in Form von translatorischen Bewegungen.

Zur Beschreibung der besonderen Schereigenschaften dieser Böden gibt es vielfältige Erklärungsansätze. Nach Rao [Ra95], enthalten die allophanreichen Böden zusätzlich zu den Allophanen Tonmineralien wie Halloysite und Kaolinite (besonders in stark verwitterten Schichten), Zementierungsmineralien wie Gibbsite und Eisenoxide und steinbildende Mineralien wie Quarz, Feldspat, Hornblende und Plagioklase. Diese geben dem Material mit dem amorphen Allophan eine Gel-Natur, die die Neuorientierung der Partikel während des Schereignisses verhindert. [Ra95] [We77].

Für die schlechte Korrelation zwischen Scherverhalten und Zustandsgrenzen sind in der Literatur nur Hypothesen formuliert. Eine dieser Hypothesen bezieht sich auf die Struktur des Materials und das Wasser der mikroskopischen Sphären (50 Å), die einen „inneren Wassergehalt“ beinhalten [We74][Va88]. Es ist möglich, dass dieses Wasser (von Wesley „rigidly held water“ genannt) während der Verformung inaktiv bleibt und so keine Wirkung auf das mechanische Verhalten des Materials hat. Das ist vielleicht die Erklärung der ähnlichen Werte für ϕ'_{peak} und ϕ'_{rest}). Das starr gehaltene Wasser würde jedoch bei der Wassergehaltsbestimmung erscheinen und so bei den Atterbergschen Zustandsgrenzen eine Rolle spielen [Ra95].

Mit den im Folgenden beschriebenen experimentellen Untersuchungen wird versucht, in erster Linie die Bedeutung der besonderen Bestandteile der vulkanischen Aschen zu identifizieren. Danach wird die Veränderung der Eigenschaften in der Natur oder wegen der besonderen Umstände bei Bauarbeiten im Labor modelliert und beobachtet.

3.3.2. Experimentelle Untersuchung der Festigkeitserzeugung

Zielvorstellung: Durch die Zugabe von Ascheböden zu sandigen Bodenproben, soll der Beitrag der feineren Böden auf die Festigkeit des größeren Bodens beobachtet werden.

Verfahren: Nicht vulkanische sandige Böden und Ascheböden werden in verschiedenen Verhältnissen gemischt und in einem einaxialen Druckversuch geprüft. Für die Zugabe von Asche zu den sandigen Böden werden möglichst feine Fraktionen aus der Asche gewonnen. Dafür ist es manchmal notwendig, die noch feuchten Ascheklumpen zu zerkleinern und durch einfaches Streichen mit einem Spachtel und ohne Druck durch die Maschen zu sieben.

In einem iterativen Prozess sollen so während der Untersuchungen die Proportionen in den Anteilen so verändert werden, dass sich eine Verbesserung der Festigkeit einstellt. Dabei bleibt die Versuchsdurchführung während der gesamten Untersuchungen konstant.

Im Folgenden werden die Untersuchungen und die Ergebnisse ausführlich beschrieben. Zuerst werden die bodenspezifischen Merkmale: Trocken- und Feuchtdichte, Wassergehalt, Fließ- und Ausrollgrenze jedes Bodens (Sand/Asche) zusammengefasst. Danach werden die Mischungsverhältnisse jeder untersuchten Probe und die entsprechenden Ergebnisse im einaxialen Druckversuch zusammengefasst, grafisch dargestellt und erläutert.

1. Mischung eines sandigen Aschebodens A1-3 mit einem plastischen Ascheboden F6-1.

Die Bodenprobe F6-1 (Tabelle 18), die aus einem plastischen Ascheboden besteht, wird mit einem sandigen vulkanischen Ascheboden A1-3 gemischt. Der Ascheboden F6-1 besitzt einen, von außen nicht erkennbaren Wassergehalt von 100,9 %. Es werden drei Versuchsmischungen (M11, M12, M13) hergestellt.

Für die Probe M11 wird der plastische Ascheboden F6-1 6 Tage lang (unter Raumtemperatur und nur mit der Absicht, den Wassergehalt abzubauen) getrocknet und anschließend durch das Sieb No.40 (0,5 mm) abgesiebt, um nur mit dem feinen Anteil des Materials zu arbeiten. Durch einen Gewichtsvergleich der Probe wird der Wasserverlust während der Mischung festgestellt. Dieser entspricht etwa 8 g Wasser, welches der Mischung wieder zugegeben wird.

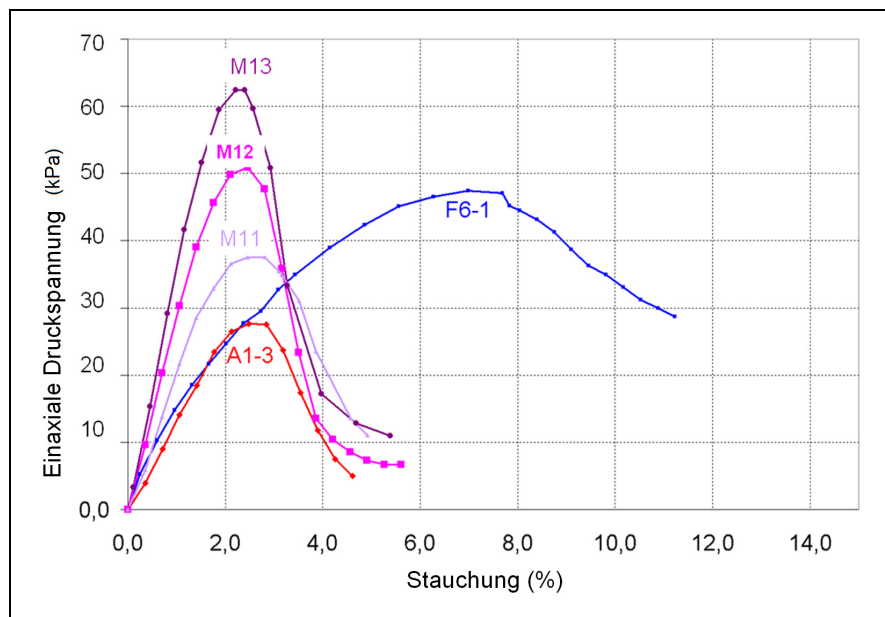
Die Prozedur wird bei Mischung M12 wiederholt, allerdings wird der Aschenboden vor der Siebung nur 2 Tage lang getrocknet. Hierbei gehen 5 g Wasser während der Mischung verloren, das dann wieder ersetzt wird. Die ersten Versuche zeigen, dass auch schon bei einer kürzeren Trocknungszeit der Asche eine leichte Verbesserung der Festigkeit erreicht wird.

Die Mischung M13 hat einen höheren Anteil des plastischen Bodens (etwa 30%), der 2 Tage lang getrocknet wurde. Der Wasserverlust wurde mit 7,3 g ermittelt und ersetzt. In diesem Versuch wurde nochmals eine Verbesserung der Festigkeit erreicht, die die ursprüngliche Festigkeit der Sandprobe verdoppelt, obwohl die Trockendichte kleiner ist als die ursprüngliche Trockendichte der Sandprobe.

Tabelle 18: Merkmale der Böden für die Mischung F6-1 und A1-3

Proben name	Tiefe m	γ_d g/cm ³	W %	WL konv*	WP konv*
A1-3	1,50 – 1,80	1,37	21,4	50,7	38,8
F6-1	0,90 – 1,10	0,69	100,9	60,7	54,1

* Zustandsgrenzen nach konventionellem Verfahren

**Abbildung 54: Ergebnis der Mischung F6-1 und A1-3****Tabelle 19: Verlauf und Ergebnisse der Mischung F6-1 und A1-3**

Probe	W%	Verfahren	γ_d g/cm ³	qu kPa
F6-1	100,9	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt.	0,69	48
A1-3	20,1	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt.	1,37	28
M11 87 g A1-3+ 22g F6-1+ 8 g Wasser	25,9	Aschenboden <u>6 Tage</u> getrocknet und durch Masche No40 (0,425mm) gesiebt. Es soll die Wirkung der Trocknung des Aschenbodens überprüft werden.	1,34	38
M12 87 g A1-3+ 22g F6-1+ 5 g Wasser	28,1	Aschenboden <u>2 Tage</u> getrocknet und durch die Masche No40 (0,425mm) gesiebt. Es soll die Wirkung einer kürzeren Trocknung des Aschenbodens überprüft werden.	1,23	50
M13 76 g A1-3+ 33 g F6-1 + 7,3 g Wasser	31	Aschenboden <u>2 Tage</u> getrocknet und durch die Masche No40 (0,425mm) gesiebt. Wiederholung von M12 mit einem größeren Anteil des Aschenbodens, auf der Suche nach einer besseren Wirkung.	1,19	62

2. Mischung von Sandprobe G7-4 und Aschebodenprobe F3-7.

Die Bodenprobe F3-7 (Tabelle 20) stammt aus der gleichen Bohrung wie die Probe F3-9, weshalb diese Probe einen vergleichbar hohen Allophananteil besitzen sollte (siehe Kapitel 2). Die Bodenprobe G7-4 ist ein sandiges Material mit enggestufter Sieblinie.

Die Sandprobe wird zuerst mit dem Originalwassergehalt hergestellt und geprüft. Danach wird der Prozess mit einer Zugabe von 6 g Wasser wiederholt, um den Einfluss der veränderten Feuchtigkeit auf die Festigkeit der Mischung zu bestimmen. Es wurde durch diesen Prozess keine Verbesserung der Festigkeit erreicht.

Mit dem Ascheboden wurden drei Mischungen (M21, M22, M23) vorbereitet, bei denen dieser in allen Fällen 2 Tage getrocknet wurde (entspricht den Bedingungen für die höchste Festigkeit der vorherigen Mischung). In jeder Stufe des Versuches traten wieder unterschiedliche Wasserverluste auf, die den Proben wieder zugegeben wurden.

Für die Proben M21 und M22 erfolgte die Absiebung (nach der Trocknung) des Materials durch die Masche No.50 (0,3 mm), mit der Absicht, die feineren Fraktionen des Materials zu bekommen. Für die Probe M23 wurde der Ascheboden durch die Masche No.200 (0,075 mm) gesiebt. Dem liegt die Vorstellung zu Grunde, dass sich mit den feinsten Fraktionen höhere Festigkeiten erzielen lassen. Die hieraus resultierende Probe erreichte eine höhere Festigkeit, die auch die ursprüngliche Festigkeit der Sandprobe verdoppelte. Diese Wirkung kann mit der Verwendung kleinster Aschepartikel begründet werden.

Tabelle 20: Merkmale des vulkanischen Bodens F3 -7

Probe-name	Tiefe m	γ_d g/cm ³	W %	WL konv	WP konv
F3-7	4,10 – 4,40	0,95	63,8	51	38,5

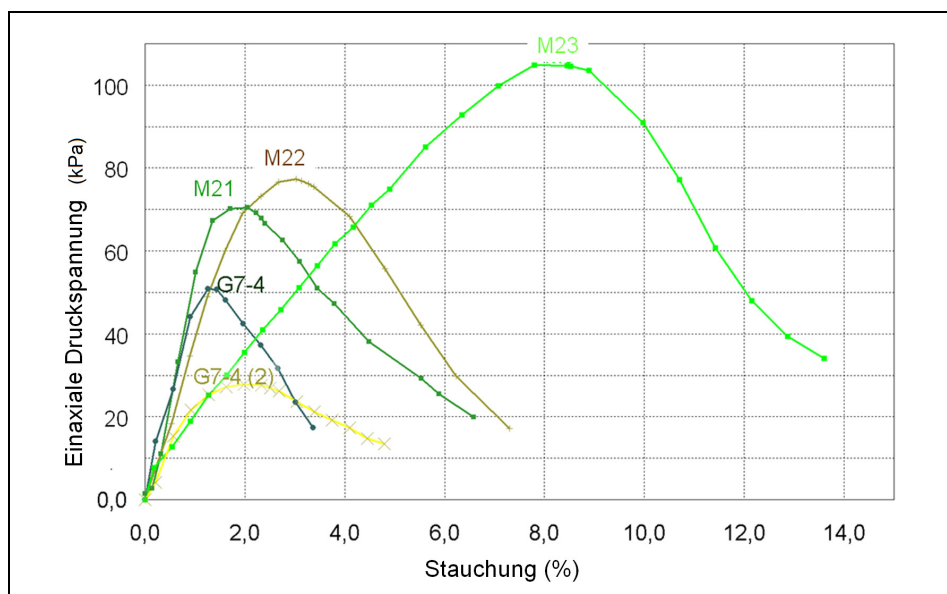


Abbildung 55: Ergebnis der Mischung F3-7 mit G7-4

Tabelle 21: Verlauf und Ergebnisse der Mischung F3-7 mit G7-4

Probe	W%	Verfahren	γ_d g/cm ³	qu kPa
F3-7	63,8	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt	0,93	*
G7-4	4,30	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt.	1,46	50
G7-4 (2) 124 g G7-4+ 6 g Wasser	8,68	Wasserzugabe, um die Wirkung des Wassers in der originalen Sandprobe zu bestimmen.	1,13	28
M 21 87 g G7-4+ 22 g F3-7+ 5,6 g Wasser	10,3	Ascheboden <u>2 Tage</u> getrocknet, und durch Masche No50 (0,3 mm) gesiebt, um die Wirkung der feineren Zerkleinerung zu überprüfen.	1,49	70
M 22 87 g G7-4+ 22g F3-7+ 10 g Wasser	14,4	Ascheboden <u>2 Tage</u> getrocknet, und durch No50 (0,3 mm) gesiebt. Es ist eine Wiederholung von M 21 wobei mehr Wasser durch die Trocknung verloren geht und nachher ersetzt wird.	1,64	77
M 23 91 g G7-4+ 24 g F3-7+ 13 g Wasser	16	Ascheboden <u>2 Tage</u> getrocknet, und durch No200 (0,075mm) gesiebt, um die Wirkung der noch feineren Zerkleinerung zu überprüfen. .	1,74	105

* nicht festgestellt

3. Sandige Aschenbodenprobe A1-3 und plastische Aschebodenprobe F3-9.

Wie bei den ersten Untersuchungen, werden auch hier wieder ein sehr plastischer vulkanischer Ascheboden, der einen hohen Allophananteil besitzt (siehe Kapitel 2), mit einem sandigen Boden, der aus derselben Bohrung wie der Boden A1-2 stammt, gemischt.

Zuerst werden die Bodenproben mit dem natürlichen Wassergehalt untersucht. Der plastische Ascheboden hat einen hohen Wassergehalt von 88% und eine niedrige Trockendichte von 0,78 g/cm³. Die sandige Probe hat einen niedrigen Wassergehalt von 20% und eine hohe Trockendichte von 1,37 g/cm³. Beide Bodenproben erreichen eine Druckfestigkeit von etwa 30 kPa. Dabei ist der sandige Boden erwartungsgemäß steifer und der bindige Ascheboden verformt sich stärker.

Danach werden die Mischungen M31 und M32 hergestellt. Der Unterschied dieser beiden Proben liegt in der unterschiedlichen Trocknungsdauer des Aschebodens. Für M31 wird der Ascheboden 7 Tage und für M32 2 Tage lang getrocknet, bevor er durch das Sieb No. 40 gesiebt wird. Nach dem Versuch wird eine leichte Verbesserung der Festigkeit für Probe M32 festgestellt. Auffällig ist, dass die Probe M32 trotz kürzerer Trocknungszeit (höherer Wassergehalt) während der Mischung, weniger Wasser verliert als die Probe M31.

Nach dieser Erfahrung werden die Bodenproben M33 und M34 gemischt, bei denen der Ascheboden nur einen Tag lang getrocknet wird, bevor er durch das Sieb No. 40 (0,4250mm) gesiebt wird. Ein weiterer Unterschied ist in diesem Fall das Mischungsverhältnis. Die Mischung M33 beinhaltet 11 g Ascheboden (etwa 10% des gesamten Gewichtes) und M34 33 g (etwa 30% des Gesamtgewichtes). Keine dieser Mischungen erreicht eine deutliche Verbesserung der Festigkeit im Vergleich zu den Mischungen M31 und M32, aber es kann festgestellt werden, dass ein großer Anteil an

Aschenboden eine gute Wirkung auf die Festigkeit des Bodengemisches hat, obwohl die Probe einen höheren Wassergehalt und eine niedrigere Trockendichte hat.

Tabelle 22: Merkmale der Böden für die Mischung A1-3 mit F3-9

Proben name	Tiefe m	γ_d g/cm ³	W %	WL konv	WP konv
F3-9	5,80 – 6,05	0,78	88,7	85,3	70,1
A1-3	1,50 – 1,80	1,37	21,4	50,7	38,8

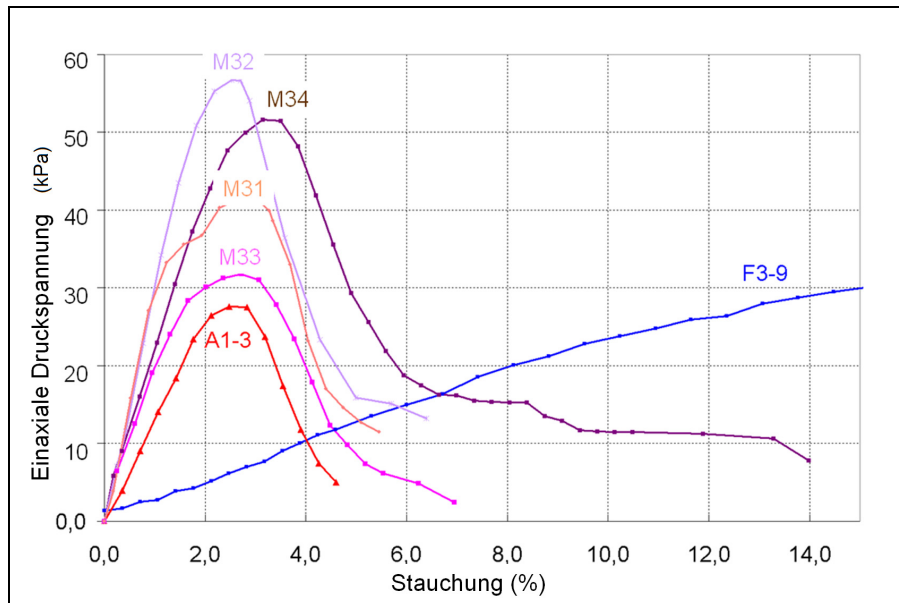


Abbildung 56: Ergebnis der Mischung A1-3 mit F3-9

Tabelle 23: Verlauf und Ergebnisse der Mischung A1-3 mit F3-9

Probe	W %	Verfahren	γ_d g/cm ³	qu kPa
F3-9	88,2	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt	0,78	30,7
A1-3	20,1	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt	1,37	28
M 31 87 g A1-3+ 22 g F3-9+ 8 g Wasser	25,1	Aschenboden <u>7 Tage</u> getrocknet und durch Masche No40 (0,425mm) gesiebt. Der Wassergehalt wird damit abgebaut und die Wirkung überprüft.	1,24	41
M 32 87 g A1-3+ 22g F3-9+ 5 g Wasser	27,3	Aschenboden <u>2 Tage</u> getrocknet, und durch die Masche No40 gesiebt. Es soll die Wirkung einer kürzeren Aussetzung an der Luft überprüft werden.	1,30	55
M 33 98 g A1-3+ 11 g F3-9+ 1,3g Wasser	23,4	Aschenboden <u>1 Tag</u> getrocknet, und durch die Masche No40 gesiebt. Die Aussetzung an der Luft ist auf einen Tag beschränkt, ein anderes Verhältnis sandig – plastisch wird überprüft.	1,40	32
M 34 76 g A1-3+ 33 g F3-9+ 4 g Wasser	31,1	Aschenboden <u>1 Tag</u> getrocknet, und durch die Masche No40 gesiebt. Die Aussetzung an der Luft ist auf einen Tag beschränkt, ein anderes Verhältnis sandig – plastisch wird überprüft.	1,28	51

4. Sandprobe G7-5 und Aschebodenprobe C4-5.

Die Bodenprobe G7-4 ist ein sandiges Material, mit enggestufter Sieblinie. C4-5 ist ein Ascheboden aus Circasia (wie die anderen Bodenproben, die im Kapitel 2 mit dem Buchstaben C gekennzeichnet sind).

Zunächst wird die Ascheprobe C4-5 einen Tag lang an der Luft getrocknet und der Wasserverlust anschließend wieder zugegeben. Danach wird die Probe eingebaut, eingehüllt und in der Feuchteammer 28 Tage gelagert. Dieser Versuch (C4-5 (2)) hatte zum Ziel, die Wirkung der Trocknung, der Wasserzugabe und der Lagerung des Aschebodens festzustellen. Es zeigte sich eine Verbesserung der Festigkeit in diesem Fall von 79 kPa auf bis zu 132 kPa.

Danach werden drei Mischungen untersucht. Für die Untersuchungen M41 und M42 wurde der Ascheboden drei Tage lang getrocknet, um ihn durch das Sieb mit der Masche No.200 (0,075 mm) sieben zu können. Die Probe M41 wird 7 g und der Probe M42 13 g Wasser zugegeben. Die für die Prüfung vorbereiteten Proben werden 28 Tage gelagert. Die Ergebnisse zeigen ein proportionales Verhältnis zwischen Wassergehalt und Festigkeit. Die Probe M41 ist steifer, während M42 dehnbarer ist, aber eine höhere Beanspruchung aufnehmen kann.

M43 entspricht der Mischung der zwei Bodenarten mit ursprünglichem Wassergehalt. Obwohl der Wassergehalt so gering ist wie bei der Probe M41 und die Trockendichte vergleichbar ist mit der Probe M42, nimmt die Festigkeit zu. Sie beträgt 282 kPa. Durch die Untersuchung kann festgestellt werden, dass Ascheböden als "Bindemittel" dienen und hierbei die Wirkung der Asche ohne Trocknung besser ist. Im Vergleich mit den vorherigen Bodenmischungen (A1-3 mit F6-1, A1-3 mit F3-9) steigt die Festigkeit der Proben an, bei denen der Ascheboden durch das Sieb mit der Masche No.200 (0,075 mm) gesiebt wurde.

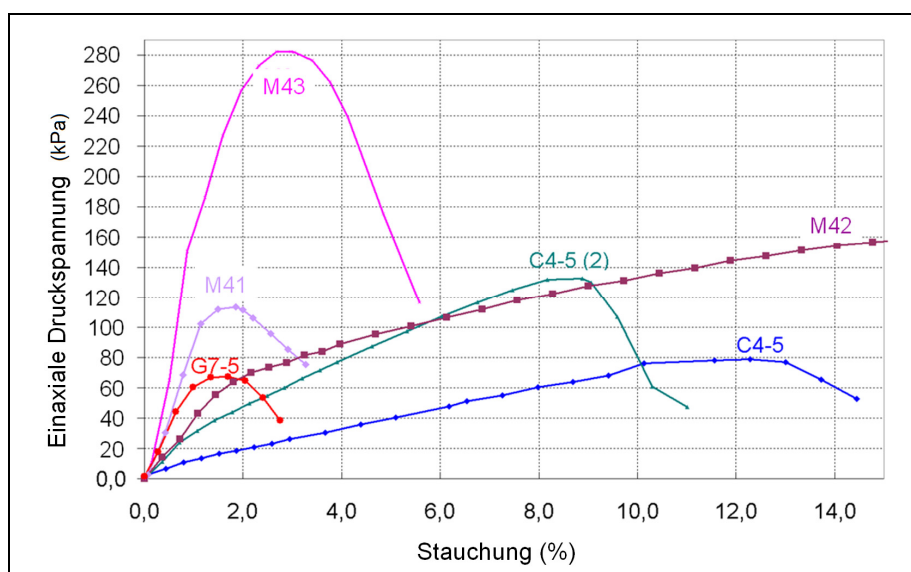


Abbildung 57: Ergebnis der Mischung G7-5 mit C4-5

Tabelle 24: Verlauf und Ergebnisse der Mischung G7-5 mit C4-5

Probe	W %	Verfahren	γ_d g/cm ³	qu kPa
C4-5	41,7	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt	1,22	79
G7-5	6,0	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt	1,38	67
C4-5 (2) 161 g C4-5 +3 g Wasser	37,1	<u>Ein Tag</u> an der Luft getrocknet, mit 3 g Wasserzugabe eingebaut. 28 Tage in Ruhe gelagert, um die Wirkung der Lagerung zu untersuchen.	1,26	132
M 41 95 g G7-5 + 25 g C4-5 + 7 g Wasser	13,2	Ascheböden <u>3 Tage</u> getrocknet, und durch die Masche No200 (0,075mm) gesiebt. Kurze Austrocknungszeit erschwert Siebung. Eingebaut wird die Probe 28 Tage gelagert.	1,47	113
M 42 95 g G7-5 + 25 g C4-5 + 13 g Wasser	18,2	Ascheböden <u>3 Tage</u> getrocknet, und durch No200 gesiebt. 28 Tage gelagert. Es ist eine Wiederholung von M41, aber mit höherer Wasserzugabe.	1,69	158
M 43 95 g G7-5 + 25 g C4-5 + 2 g Wasser	13,1	Beide Böden wurden mit ursprünglichem Wassergehalt gemischt. Eingebaut 28 Tage gelagert, dann geprüft. Es soll die Wirkung des originalen Wassergehalts und der Lagerung überprüft werden.	1,68	282

5. Sandprobe G7-5 und Aschebodenprobe C5-7.

Die Bodenprobe G7-5 ist dasselbe sandige Material wie im vorhergehenden Versuch. C5-7 ist (wie C4-5) ein Aschenboden aus Circasia.

Die Bodenproben G7-5 (1), G7-5 (2), und G7-5 (3) wurden erstellt, um die Wirkung der Befeuchtung und der entsprechenden Austrocknung der Sandprobe festzustellen und ihre Lage im Bezug auf einen „optimalen Punkt“ zu erkennen. Mit einem Wassergehalt von 9,8 % wird die größte Trockendichte und bei niedrigeren Wassergehalten (hier 7,2 %) das Maximum der Festigkeit erreicht.

Die Mischung M51 hatte das Ziel, die Festigkeit der Bodenprobe zu ermitteln, wenn beide Bodenarten ihren ursprünglichen Wassergehalt beibehalten. Um den natürlichen Wassergehalt konstant zu halten, wurden der Mischung insgesamt 2g Wasser zugeführt, die während der Herstellung verdunstet waren. Wie im Fall der Mischung der Bodenproben G7-5 und C4-5 wird mit dem originalen Wassergehalt eine deutliche Steigerung der Festigkeit erreicht. Der Wassergehalt der Mischung liegt bei 14 %. Nach den Versuchen mit den Bodenproben G7-5 (1), G7-5 (2), und G7-5 (3) war zu erwarten, dass mit einem höheren Wassergehalt auch eine höhere Festigkeit erreichbar wäre; die Steigerung ist in diesem Fall besonders groß. Überraschend ist, dass die Trockendichte nicht stark ansteigt.

Nach dieser Erfahrung wurden zwei Mischungen mit 9 g Wasserzugabe gemischt, die Proben M52 und M53. Hierbei sollte der Einfluss der Feinheit des Aschebodens geprüft werden. Der Ascheboden wird durch die Masche No.200 (0,075 mm) gesiebt (die Trocknung des Bodens dauerte mindestens 2 Tage). Der Durchgang durch das Sieb mit

der Masche No.200 wurde für die Mischung M52 verwendet. Der Rückstand wurde in der Mischung M53 genutzt.

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass die Feinheit eine positive Wirkung auf die Festigkeit hat. Die Festigkeit von M52 ist mit der der Bodenprobe M51 vergleichbar, bei der die beiden Böden mit dem ursprünglichen Wassergehalt, ohne Siebung, gemischt wurden. Allerdings verhält es sich für die sich einstellenden Trockendichte genau umgekehrt. Die Probe mit der höchsten Festigkeit hat die niedrigste Trockendichte. Dies wirft die Frage auf, ob der größere Feinanteil mehr Hohlräume zur Folge hat. Diese Frage wird im Weiteren noch behandelt.

Abschließend wird eine zu M52 identische Probe hergestellt mit Ascheboden, der durch die Masche No.200 (0,075 mm) gesiebt wurde, dem aber 15 g Wasser zugegeben wurde. Das Ziel war festzustellen, ob der optimale Wassergehalt der Mischung noch höher liegt. Es zeigte sich aber, dass die Festigkeit auf 91 kPa reduziert wird. Demgegenüber steigt das Trockendichte minimal auf bis zu 1.67 g/cm^3 .

Tabelle 25: Merkmale der Aschenboden C5-7

Proben name	Tiefe m	W %	WL konv	WP konv
C5-7	0,50 – 0,85	72	90,2	58,3

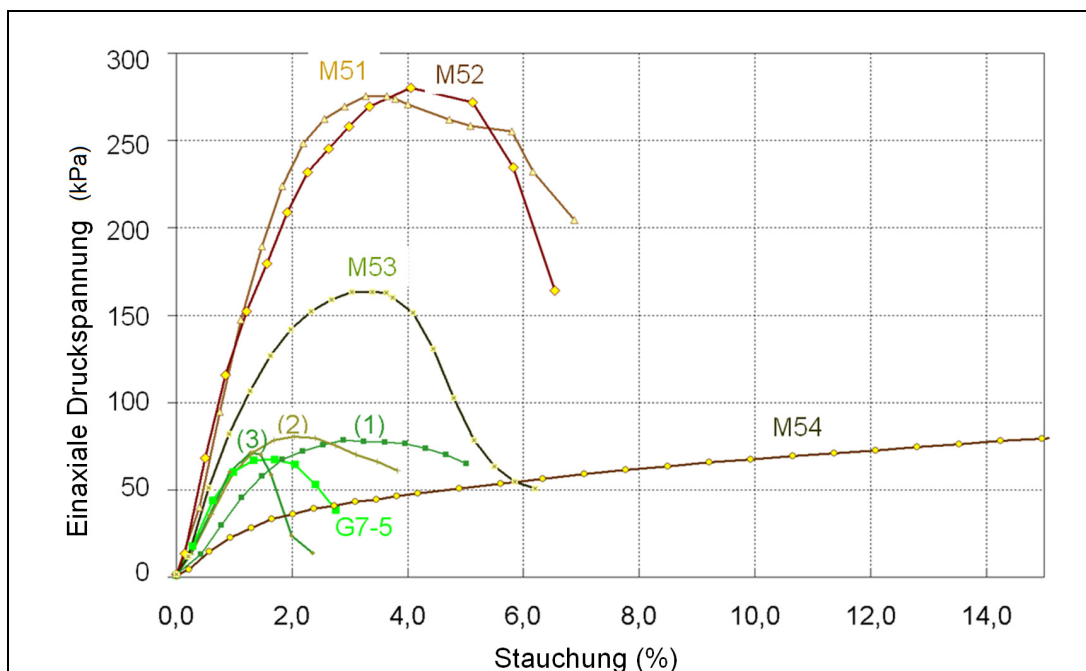


Abbildung 58: Ergebnis der Mischung G7-5 und e C5-7

Tabelle 26: Verlauf und Ergebnisse der Mischung G7-5 und Aschebodenprobe C5-7.

Probe	W %	Verfahren	γ_d g/cm ³	qu kPa
G7-5	6,0	Gebaut mit ursprünglichem Wassergehalt	1,38	67
C5-7	72,0	Nicht genug Material vorhanden	*	*
G7-5(1) 130 g G7-5+ 6 g Wasser	9,8	Sand wird befeuchtet und eingebaut, um die Wirkung der Befeuchtung zu beobachten.	1,63	78
G7-5(2) 3 Stunden getrocknet	7,2	Das Material für Probe 1 wird 3 Stunden an der Luft ausgesetzt, um einen Wasserverlust zu erzeugen.	1,49	80
G7-5(3) mehrere Stunden getrocknet	5,04	Das Material für Probe 2 wird mehrere Stunden an der Luft ausgesetzt.	1,37	71
M 51: 95 g G7-5 + 25 g C5-7 + 2 g Wasser	13,8	Beide Böden werden mit ursprünglichem Wassergehalt gemischt. 28 Tage gelagert	1,70	275
M 52: 95 g G7-5 + 25 g C5-7 + 9 g Wasser	14,6	Ascheböden <u>2 Tage</u> getrocknet, und durch No200 gesiebt. 28 Tage gelagert. Mit dem Verhältnis von M51 wird hier die Wirkung der Zerkleinerung untersucht.	1,65	280
M 53: 95 g G7-5 + 25 g C5-7 + 9 g Wasser	14,0	Ascheböden <u>2 Tage</u> getrocknet, Rückstand von Masche No200 (Körner größer als 0,075mm). Probe eingebaut und 28 Tage gelagert. Es soll mit M52 verglichen werden.	1,75	163
M 54: 95 g G7-5 + 25 g C5-7 +15 g Wasser	19,6	Ascheböden <u>2 Tage</u> getrocknet und durch Masche No200 (0,075mm) gesiebt. 28 Tage gelagert. Wiederholung von M52, aber mit höherer Wasserzugabe.	1,67	91

*nicht festgestellt

6. Sandprobe G7-4 und Aschebodenprobe F3-2

Sandprobe G7-4 ist dasselbe Material wie in Versuch 2. F3-2 ist ein Ascheboden mit demselben Ursprung wie die anderen Bodenproben, die mit dem Buchstaben F gekennzeichnet sind.

In diesen Untersuchungen wird eine Sandprobe mit Ascheboden gemischt, um die Wirkung der Lagerung (nach dem Einbau) festzustellen. Der Ascheboden wird nur einen Tag an der Luft getrocknet, bevor er mit der Masche No.200 (0,075 mm) zerkleinert wird. Die verschiedenen Proben werden hergestellt und dann 24 Stunden, 7, 14 und 21 Tage in Ruhe gelagert.

Die steifen Eigenschaften des Sandbodens und das Verformungsverhalten des Aschebodens wurden auf die Mischung übertragen. Die Festigkeit verbesserte sich mit der Länge der Lagerung. Der Einfluss der Dauer der Lagerung scheint, bei einer Lagerung bis zu 14 Tagen, proportional zur Festigkeit zu sein. Nach 21 Tagen wird keine höhere Festigkeit mehr erreicht, allerdings verändert sich die Neigung der Linie, und die Probe zeigt zu Versuchsbeginn ein steiferes Verhalten.

Tabelle 27: Merkmale des Aschenbodens F3-2

Proben name	Tiefe	γ_d	γ_t	W %	WL konv	WP konv
F3-2	0,50 - 1,00	0,73	1,36	88,5	72,5	60

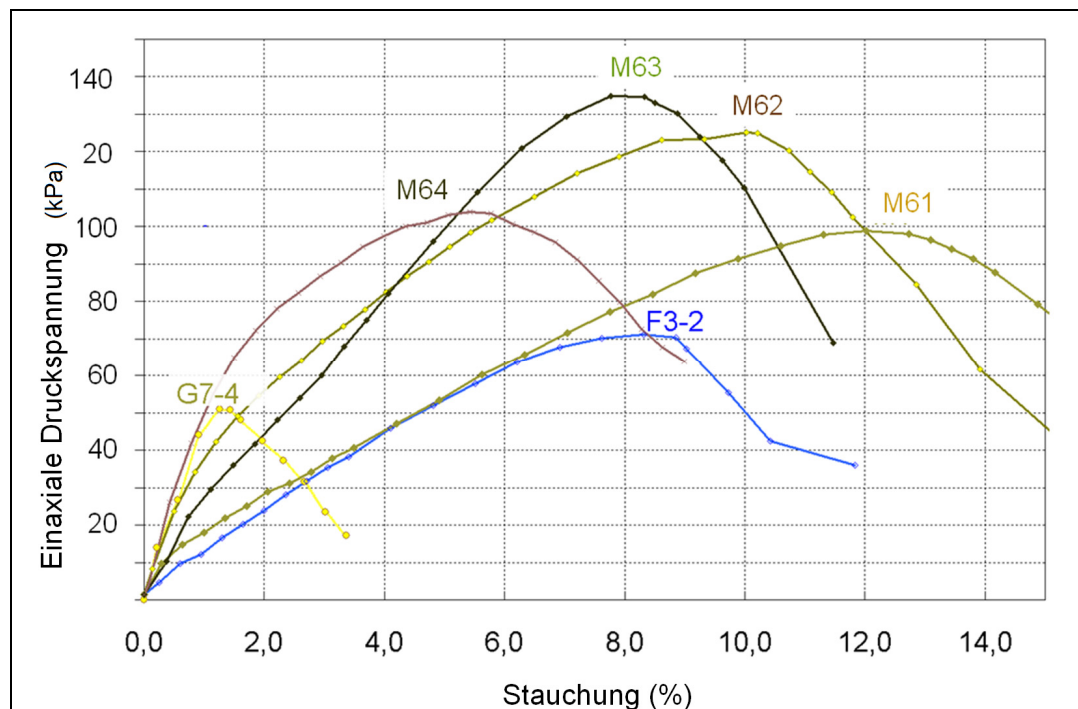


Abbildung 59: Ergebnis der Mischung G7-4 mit F3-2

Tabelle 28: Verlauf und Ergebnisse der Mischung G7-4 mit F3-2

Probe	W %	Verfahren	γ_d g/cm ³	qu kPa
G7-4	4,3	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt	1,46	50
F3-2	84,7	eingebaut mit ursprünglichem Wassergehalt	0,76	71
M61 (24 Stunden) 94 g G7-4 + 23 g F3-2 + 12 g Wasser	18,85	Ascheboden wird 1 Tag ausgetrocknet und durch die Masche N.200 (0,075mm) gesiebt. Die Probe schon eingebaut wird 24 Stunden gelagert.	1,70	99
M62 (7 Tage) 93 g G7-4 + 23 g F3-2 + 12 g Wasser	18,3	Ascheboden wird 1 Tag getrocknet und durch Masche N.200 (0,075mm) gesiebt. Die Probe wird eingebaut 7 Tage gelagert.	1,68	125
M63 (14 Tage) 93 g G7-4 + 23 g F3-2 + 12 g Wasser	17,26	Ascheboden wird 1 Tag getrocknet und durch Masche N.200(0,075mm) gesiebt. Die Probe wird eingebaut 14 Tage gelagert.	1,75	135
M64 (21 Tage) 93 g G7-4 + 23 g F3-2 + 12 g Wasser	19,96	Ascheboden wird 1 Tag getrocknet und durch Masche N.200(0,075mm) gesiebt. Die Probe wird eingebaut 21 Tage gelagert.	1,60	103

Ergebnisse

Bei Ascheböden sind besondere Eigenschaften zu erkennen. Diese Eigenschaften sind wahrscheinlich chemischer Natur und verantwortlich für die eigene Festigkeit, die sogar einen Verfestigungseffekt auf andere Böden haben kann.

Parfit [Pa90] erklärte, dass Allophane wegen der hohen spezifischen Oberfläche und der niedrigen Partikelgröße besonders chemisch reaktiv sind. Diese chemischen Eigenschaften machen die Ascheböden so empfindlich auf die Feuchtigkeit, die spezifische Oberfläche (die von der Feinheit der Zugabe abhängig ist) und die Einwirkungszeit.

Als weitere Fragestellung bleibt noch zu untersuchen, ob diese Eigenschaften mit der Zeit, auf Grund von Sättigung oder unter anderen Umständen, verändert werden.

Wie im Kapitel 3.1.3.1 bereits bemerkt, zeigt sich auch hier, dass eine höhere Festigkeit nicht in einer direkten Beziehung zu höheren Trockendichten steht, wie dieses zu erwarten wäre, und zum Beispiel bei Wesley [We08] in Abbildung 39 dargestellt ist.

Anmerkungen

Die Entnahme der Proben, damit sie für die geplanten Untersuchungen brauchbar ist, erfordert besondere Sorgfalt. Für diese Laboruntersuchung wurden die verbleibenden Proben eines Projektes in der Kaffee-Region Kolumbiens genutzt. Aus diesem Grund gab es viele Bodenproben, die aber nur in kleinen Mengen vorhanden waren, so dass Fehler bei der Behandlung im Labor die Anzahl der möglichen Untersuchungen reduzierten.

Während des Mischens wurde verlorenes Wasser wieder zugeführt, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen.

Des Weiteren wurde die Wirkung von Feuchtigkeit und Feinheit untersucht. Aber aus dem bekannten Grund konnte auch hier keine ausreichende Anzahl an Versuchen durchgeführt werden, um endgültige und belastbare Aussagen treffen zu können. Ebenso wenig konnten bis jetzt die Basismerkmale wie z.B. die Korngrößenverteilung der sandigen Böden berücksichtigt werden.

Grundsätzlich sind alle Vorgänge bei vulkanischen Ascheböden, wie die Trocknung, Wasserzugabe und Verdichtung, schwer zu kontrollieren, weil das Material sehr empfindlich ist. Auch wenn während der Laboruntersuchungen alle diese Prozesse sehr sorgfältig durchgeführt und wiederholt wurden, können Fehler nicht gänzlich und evtl. nur durch einen wesentlich größeren Probenumfang, der im Rahmen dieser Arbeit nicht leistbar war, statistisch ausgeschlossen werden.

Praxis- Erfahrungen

In Kolumbien ist das Mischen von vulkanischen Ascheböden mit anderen Materialien bereits gängige Praxis. Allerdings wird dies gemacht, um die Verdichtbarkeit der Ascheböden zu verbessern. Aus ökonomischen Gründen werden nur Böden zugegeben, welche in der Region vorhanden sind und das richtige Mischungsverhältnis wird nicht im Labor, sondern vor Ort während des Herstellungsprozesses in situ bestimmt.

Der Einsatz von vulkanischen Aschen als puzzolanische Mittel für die Verbesserung anderer Böden ist derzeit in der Praxis kein Thema. Townsend [To85] zeigte aber, mittels einer chemischen Entfernung von Sesquioxide und Allophan, dass amorphes Silizium (Allophan) in einem gestörten lateritischem Ton eine höhere puzzolanische Festigkeit erzeugt (Abbildung 60).

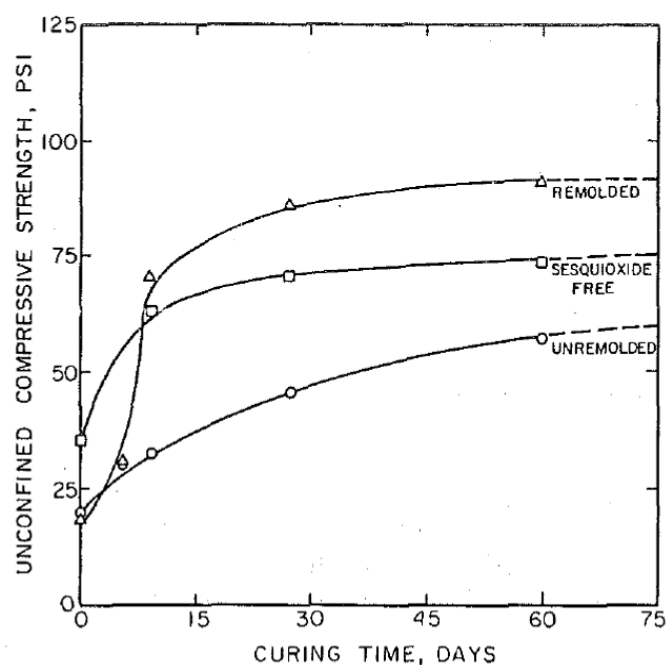


Abbildung 60: Wirkung der Verarbeitung oder der Extraktion von Sesquioxiden auf die Festigkeit von fünf kürzlich kalkbehandelten laterithischen Böden [To85]

Folgerungen

Vulkanische Ascheböden könnten bei der Verarbeitung und der Verdichtung für die Verbesserung von anderen Bodenarten verwendet werden. Das Mischungsverhältnis sollte dabei erst im Rahmen des Bauprojektes ermittelt werden, weil die klimatischen Bedingungen einen großen Einfluss hierauf haben und dies an den zu behandelten Boden angepasst werden muss. Eine Zerkleinerung der Zugabe wäre aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll.

3.3.3. Die Veränderung der Festigkeit in situ

Zielvorstellung

Mit diesen Untersuchungen soll festgestellt werden, in welchem Maße sich die Schereigenschaften eines vulkanischen Aschebodens, der in situ ungestört ist und z.B. wegen Bauarbeiten einer Trocknung und Befeuchtung ausgesetzt wird, in wenigen Tagen verändern können.

Die im Labor zu modellierende Situation ist im folgenden Schema dargestellt.

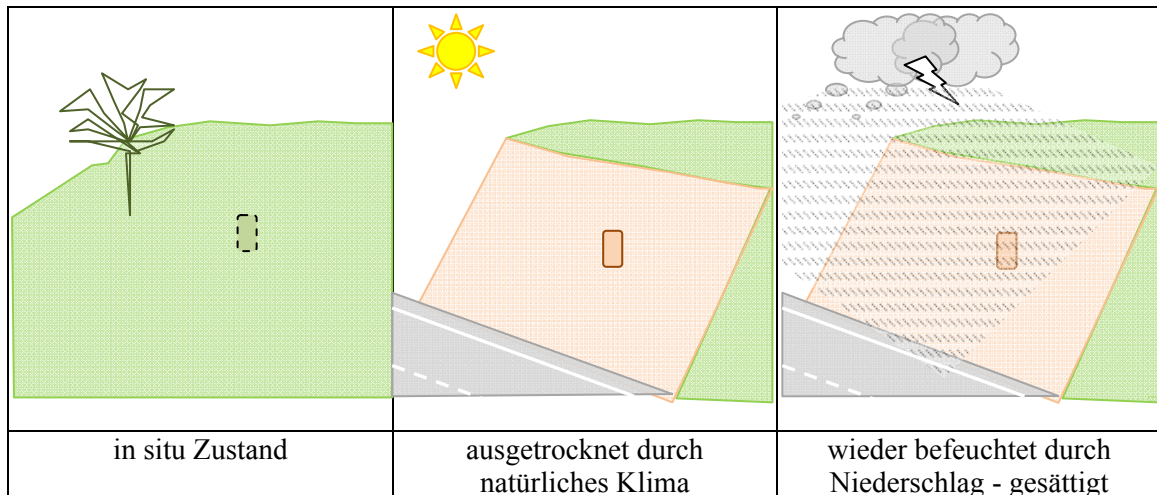


Abbildung 61: Situation eines Bodens, die nach Bauarbeiten dem natürlichen Klima ausgesetzt wird

Verfahren: eine ungestörte vulkanische Aschebodenprobe wird durch drei gleiche Zyklen eines mehrstufigen weggesteuerten Triaxialversuchs belastet. Im ersten Zyklus wird der ungestörte Boden, im zweiten ein für zwei Tage getrockneter Boden und im dritten ein anschließend wieder befeuchteter Boden untersucht.

Vor dem Versuch wird eine Musterprobe getestet, bei der in den drei Zyklen derselbe Zustand (ohne Trocknung oder Befeuchtung) beibehalten wird. Dieser Versuch hat als Ziel, den Effekt der mehrfachen Lastaufbringung auf die Festigkeit zu ermitteln.

Das Verfahren wird mit einer zweiten Bodenprobe wiederholt.

Bei einem üblichen mehrstufigen Triaxialversuch können die Versagenskurve und die elastischen Parameter (E-Modul, Poissonzahl) eines Probekörpers ermittelt werden. Im computergesteuerten Versuchsablauf wird die Entwicklung der Hauptspannungsdifferenz – Axialstauchungskurve verfolgt, um das Erreichen der Bruchgrenze zu vermeiden. Vor Erreichen der maximal ertragbaren Vertikalspannung (σ_1) bei konstant gehaltenem Seitendruck (σ_3), wird die Probe axial entlastet und gleichzeitig der Seitendruck erhöht. Die nächste axiale Belastungsstufe beginnt bei einer Deviatorspannung ($\sigma_1 - \sigma_3$) gleich Null. Dadurch wird gewährleistet, dass die Kornstruktur der Probe durch mehrmaliges Belasten kaum gestört wird [GU07].

In einer eigenen vorherigen Arbeit [Li91] wurde festgestellt, dass durch diese Methode gute Ergebnisse im Vergleich mit einem normalen Triaxialversuch, der drei Probekörper benutzt, erzielt werden können, insbesondere bei bindigen Böden.

In dieser Arbeit wird die Methode des mehrstufigen Triaxialversuchs verwendet. Allerdings wird der Versuchsablauf verändert. Um die Situation in situ zu modellieren, wird die Probe nach einem Zyklus ausgebaut und an der Luft getrocknet. Zwischen dem zweiten und dritten Zyklus wird die Probe in der Triaxialzelle befeuchtet.

Beschreibung des Vorganges im Labor

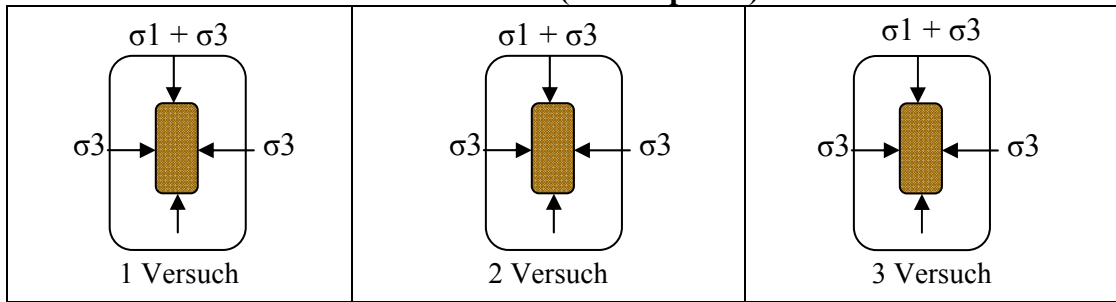
1. Als Muster wird ein mehrstufiger UU Triaxialversuch mit einer Aschebodenprobe durchgeführt, immer mit demselben Zellendruck, aber ohne Veränderung des Zustandes. Diese Ergebnisse dienen dazu, den Effekt der Wiederholung der Belastung zu beobachten und diese als Vergleich für die weiteren Untersuchungen zu verwenden.

Mit einer Bodenprobe derselben Sorte wird danach ein mehrstufiger UU - Triaxialversuch durchgeführt. Auch hierbei wird in allen drei Stufen ein identischer Zellendruck benutzt. Die drei Stufen unterscheiden sich aber von einander durch den Zustand der Probe (Abbildung 62):

- a) Bei der ersten Stufe wird die Bodenprobe ungestört (im Feuchtraum – Normalklima 20°C / 65% Luftfeuchtigkeit) vorbereitet und in den Triaxialversuchsstand eingebaut). Der Versuch wird fast bis zum Versagen durchgeführt (kontrolliert durch den Quotienten aus Hauptspannungsdifferenz und Stauchung) und dann gestoppt. Der Probekörper wird aus dem Versuchsaufbau herausgenommen und für einige Zeit – in diesem Fall 54 Stunden – an der Luft getrocknet. Der Gewichtverlust wird kontrolliert.
- b) Für die zweite Stufe wird die getrocknete Bodenprobe erneut in den Versuchsstand eingebaut, der Versuch mit demselben Zellendruck erneut fast bis zum Versagen durchgeführt.
- c) Für die dritte Stufe wird die Probe, noch in der Triaxialzelle, mit Wasser angereichert. Während der Befeuchtungsphase (12 Stunden) wird die innere Spannung etwas höher als der vorhandene Zellendruck eingestellt, um die Befeuchtung zu gewährleisten. Danach wird der innere Überdruck abgebaut. Schließlich wird der UU-Triaxialversuch normal durchgeführt.

Der Versuch wird mit demselben Zelldruck bis zum Versagen durchgeführt.

Erste Probe (Musterprobe)



Zweite Probe

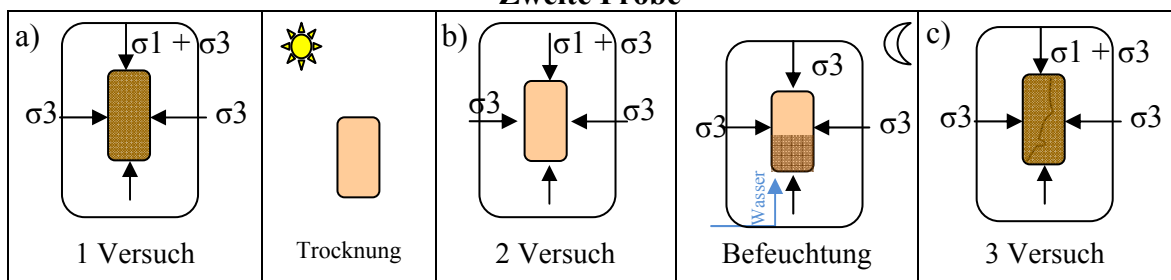


Abbildung 62: Versuchsphasen des mehrstufigen Triaxialversuchs

Bodenprobe AP1-2

Herkunft: Retiro-La Ceja (40 km östlich vom Medellín)

Durch die Zuordnung der geologischen Zone und durch die offensichtlichen physikalischen Eigenschaften wie Gewicht, Farbe und Struktur der Proben in situ, wird die Probe als eine oberflächliche Schicht von vulkanischen Aschen identifiziert.



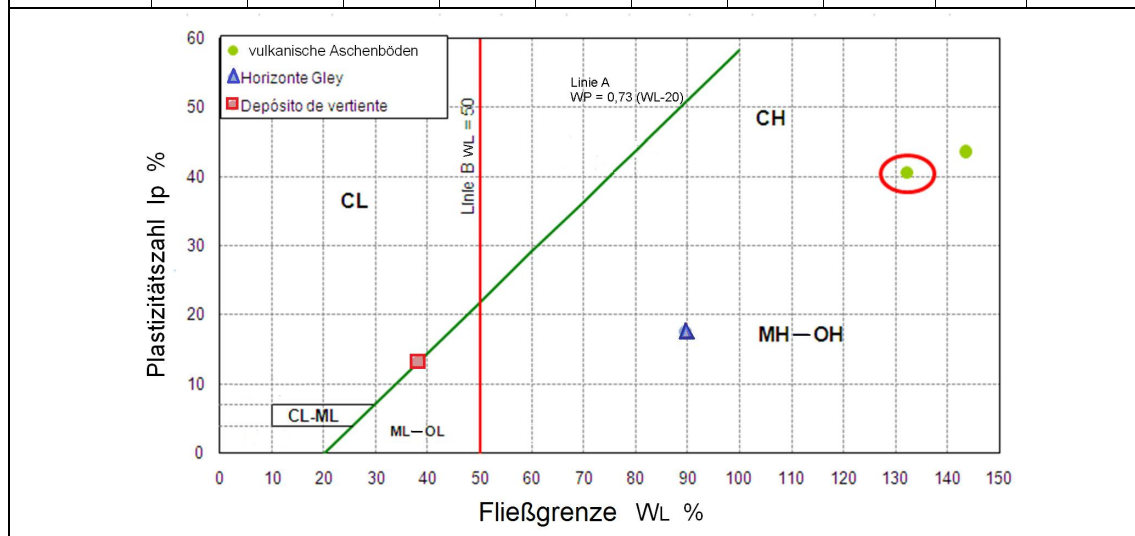
Abbildung 63: Bilder der Bodenerkundung für die Entnahme der Probe AP1-2

Charakterisierung

Die Bodenprobe ist in der Tabelle 29 dargestellt und im Casagrande-Diagramm eingekreist. Als Ergänzung wurde ein Proctorversuch durchgeführt (siehe Anhang).

Tabelle 29: Grundmerkmale der Probe AP1-2 „La Ceja“

Sondierung	Probe	Tiefe (m)	W %	WI %	Wp %	Ip %	Kies %	Sand %	Fein %	Klassif. USCS
AP1	2	1,30	96,98	132,3	91,67	40,62	0,00	13,33	86,7	MH



1) Muster-Versuch Bodenprobe AP1-2 (1)

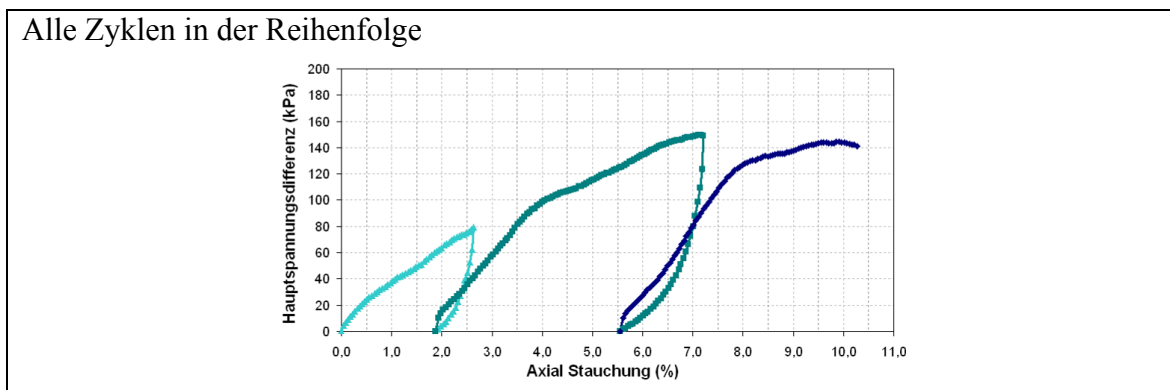
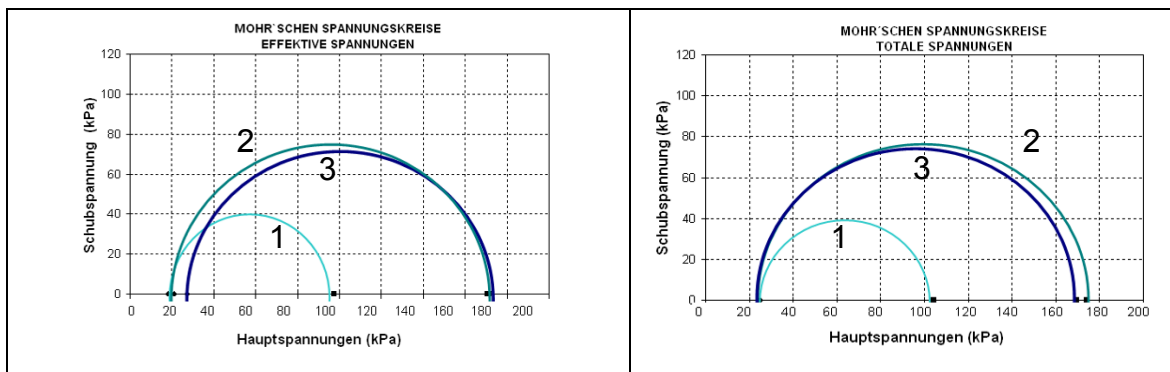
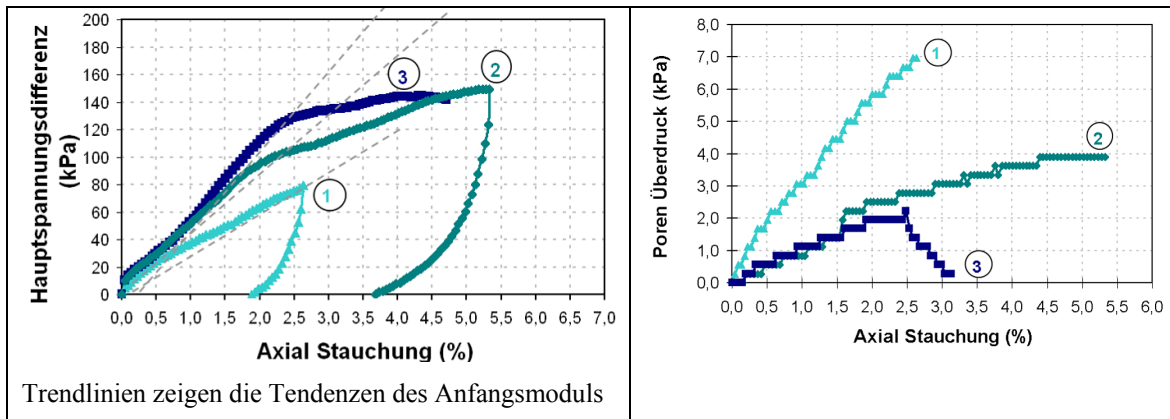
Mehrstufiges UU- Triaxial

Zelldruck: 25 kPa

Wassergehalt vor dem Versuch = 140%

Ergebnisse

Tabelle 30: Ergebnisse Muster Versuch AP1 -2 (1) „La Ceja“



Es findet eine Zusammendrückung statt und eine Zunahme des Steifemoduls ist zu beobachten. Bei einem UU-Versuch ist die Ursache für die Setzung nicht ein Konsolidierungsprozess, weil das Wasser nicht fließen kann. Es handelt sich hierbei um das in den Partikeln gelagerte Wasser, das in die Poren strömt und einen Porenüberdruck erzeugt.

Das Verhalten der Probe entspricht dem normalen Verhalten eines schluffigen Bodens im mehrstufigen Triaxialversuch. Es ist festzustellen, dass die Wiederholung der Belastung nicht zum Bruch der Bodenprobe führt.

Auf den Bildern ist die Bodenprobe vor und nach dem Versuch zu sehen.



Abbildung 64: Bilder der Bodenprobe AP1-2 (1) vor und nach dem Versuch

2) Versuch mit verschiedenen Zuständen Bodenprobe AP1 -2 (2)

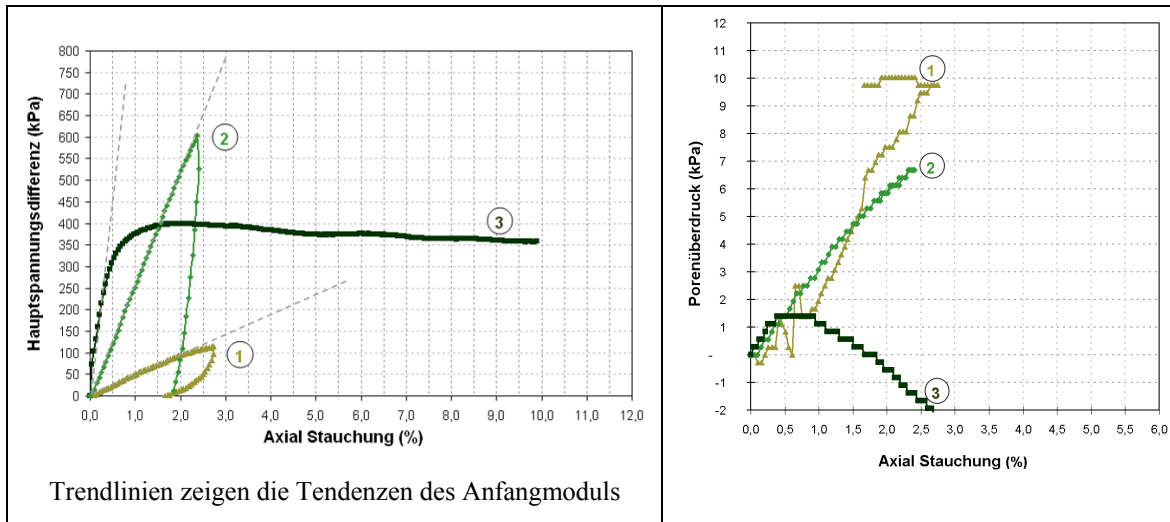
Zelldruck: 25 kPa

Tabelle 31: Daten der drei Phasen des Versuches

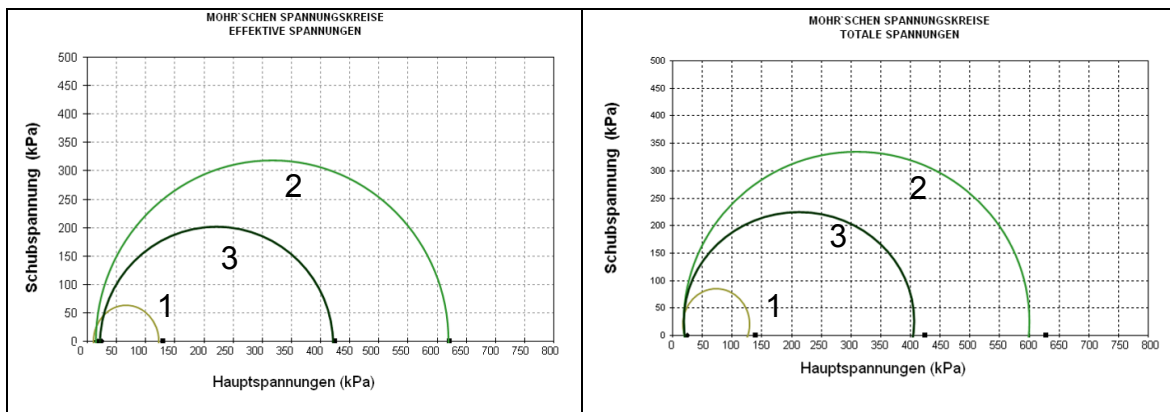
Erste Phase:	Zweite Phase:	Dritte Phase:
original Wassergehalt W = 140,2%	Wassergehalt: W = 86,7%	Wassergehalt(am Ende): 119,3%
Durchschnitt der Fläche: 18,65 cm ²	Durchschnitt der Fläche: 16,12 cm ²	Durchschnitt der Fläche: 16,39 cm ²
Volumen: 187,37 cm ³	Volumen: 150,14 cm ³	Volumen: 150,14 cm ³
Die Bodenprobe wird abmontiert und 54 Stunden der Luft ausgesetzt, bis zu 22,3% Gewichtsverlust	Die Bodenprobe wird 12 Stunden gesättigt, Expansionskraft: 0,125 kN	

Ergebnisse

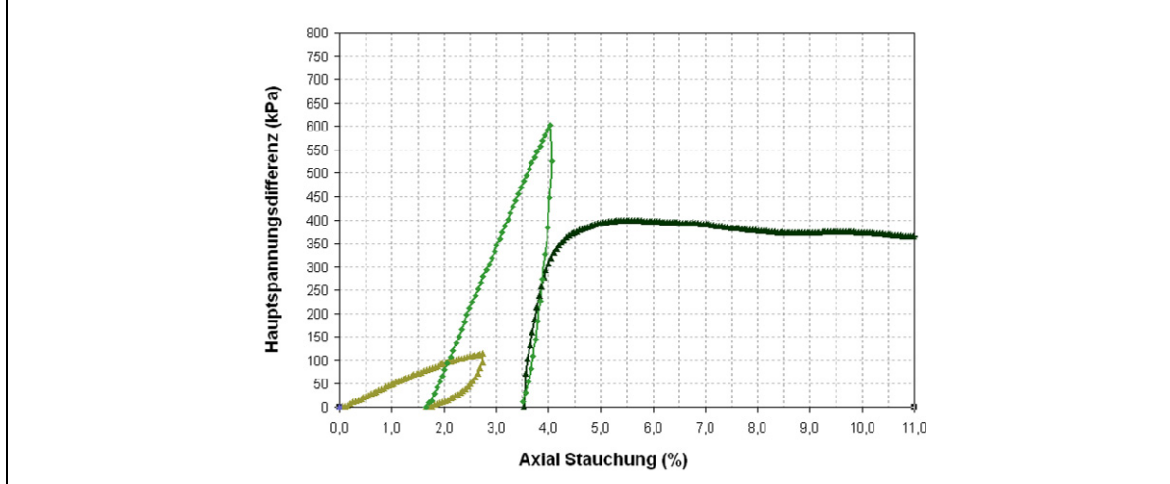
Tabelle 32: Ergebnisse Versuch AP1 -2 (2) mit verschiedenen Zuständen



Trendlinien zeigen die Tendenzen des Anfangmoduls



Alle Zyklen in der Reihenfolge



Durch die Trocknung gewinnt die Probe an Festigkeit. Da die Gefahr groß ist, die Probe bis zum Bruch zu führen und wegen der starken Zunahme der Steifigkeit wird die Probe

in dieser zweiten Phase nicht höher belastet. Es hat sich aber gezeigt, dass die Festigkeit bis zu fünfmal höher liegt, wenn die Probe über 54 Stunden an der Luft getrocknet wird.

Durch die Befeuchtung während einer Nacht geht etwa ein Drittel der gewonnenen Festigkeit wieder verloren. Trotzdem liegt die Festigkeit deutlich über der des Ausgangsmaterials.

In den ersten beiden Phasen wird ein Porenüberdruck erzeugt. In der dritten Phase steigt der Porendruck am Anfang der Belastung und fällt dann ab, obwohl die Verformung bis zum Bruch sehr klein ist.

Auf den Bildern ist die Bodenprobe vor und nach dem Versuch zu sehen.

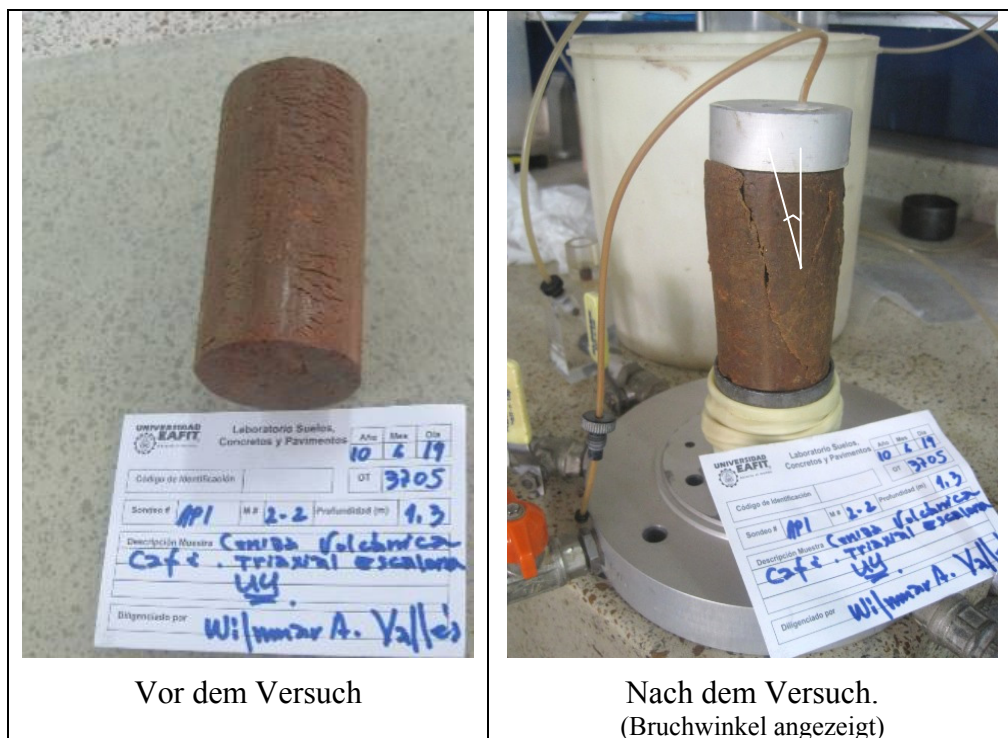


Abbildung 65: Bilder der Bodenprobe AP1-2 (2) vor und nach dem Versuch

Bodenprobe P1-5

Herkunft: Sonson (95 km südlich von Medellín)

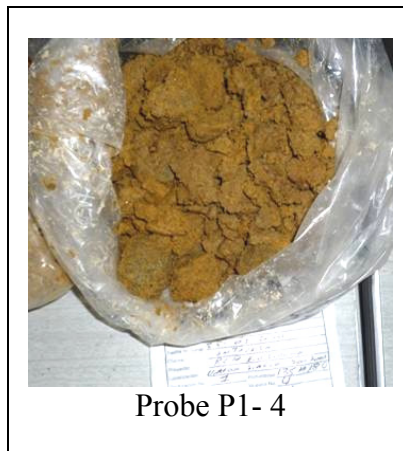
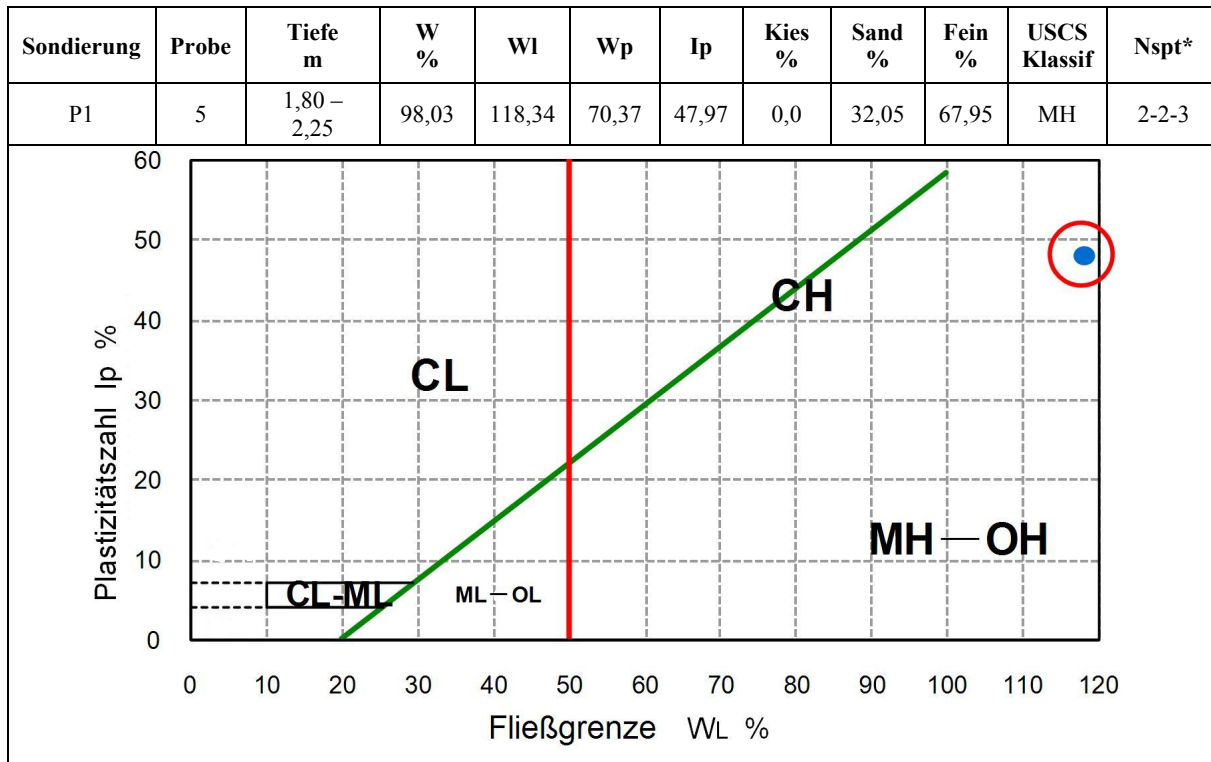


Abbildung 66: Bilder der Bodenerkundung für die Entnahme der Probe AP1-5

Charakterisierung

Die Bodenprobe ist in der Tabelle 33 dargestellt, und im Casagrande-Diagramm eingekreist.

Tabelle 33: Grundmerkmale der Probe AP1-5 „Sonson“



* Standard Penetration Test: Anzahl der Schläge für je 15 cm Eindringung (3 Wiederholungen).
In diesem Fall weist der Boden nur eine geringe Festigkeit in situ auf.

1) Muster-Versuch Bodenprobe AP1-5 (1)

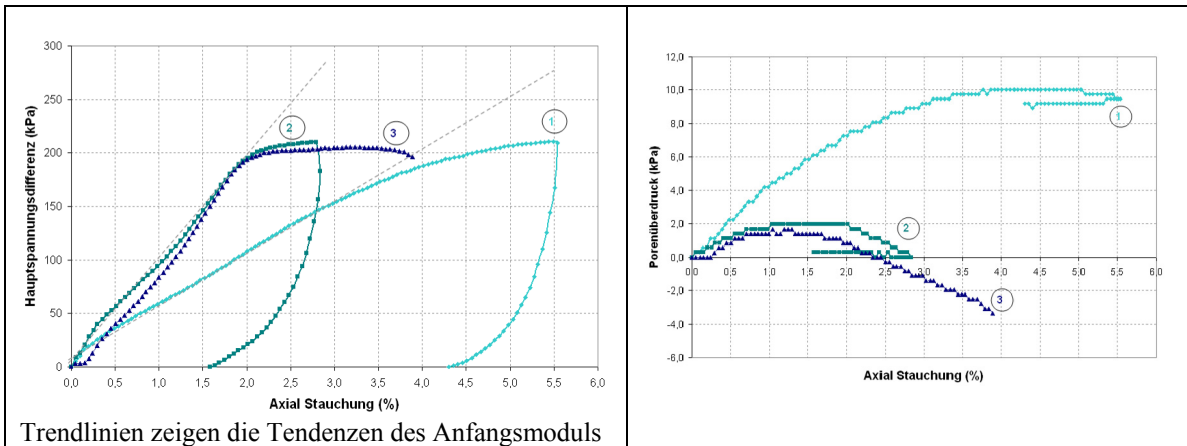
Mehrstufiges UU- Triaxial

Zelldruck: 25 kPa

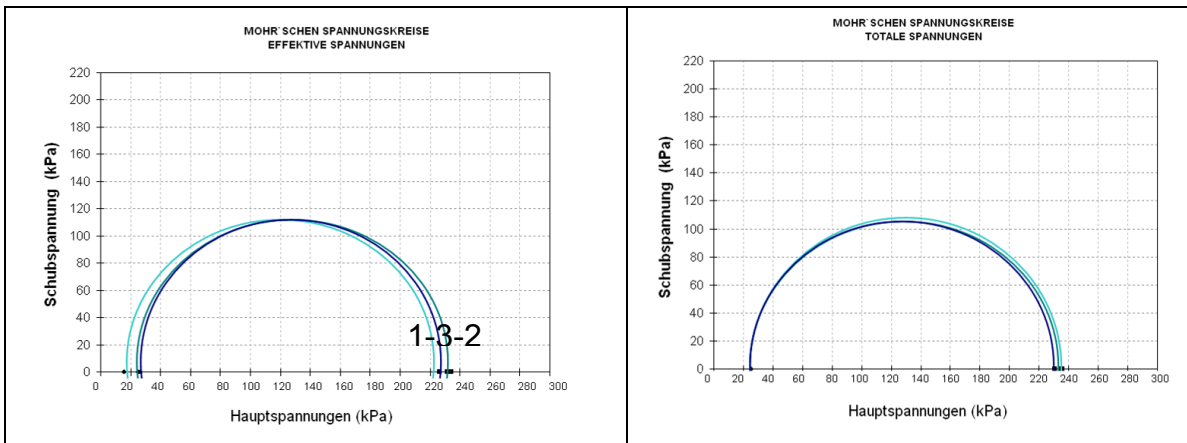
W % = 81,7%

Ergebnisse

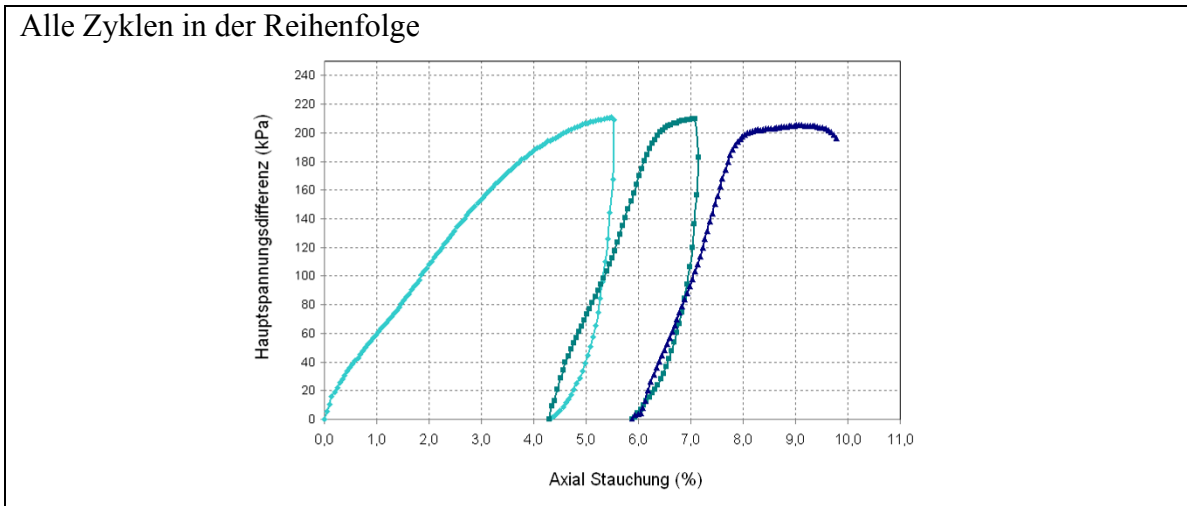
Tabelle 34: Ergebnisse Muster Versuch AP1 -5 (1) „Sonson“



Trendlinien zeigen die Tendenzen des Anfangsmoduls



Alle Zyklen in der Reihenfolge



In der ersten Phase findet eine Zusammendrückung statt, die die Festigkeit der Probe vom ersten Zyklus zum zweiten ein wenig erhöht. Durch die Entwicklung des Porenüberdrucks ist sichtbar, dass die Probe möglicherweise schon im ersten Zyklus bis zum Versagen belastet wurde.

Die Wiederholung der Belastung führt nicht zu einem Bruch der Bodenprobe. Allerdings deutet die Entwicklung des Porendruckes darauf hin, dass die Bodenprobe schon vor dem zweiten Zyklus nicht mehr die ursprüngliche (ungestörte) Probe war.

Eine andere Interpretation wäre, dass wegen der großen Porenzahl das freie innere Wasser in luftgefüllte Poren fließt und so kein Überdruck mehr zu erkennen ist. Allerdings wäre dann zu erwarten gewesen, dass in allen Zyklen ein ähnlicher Porendruck entstände.

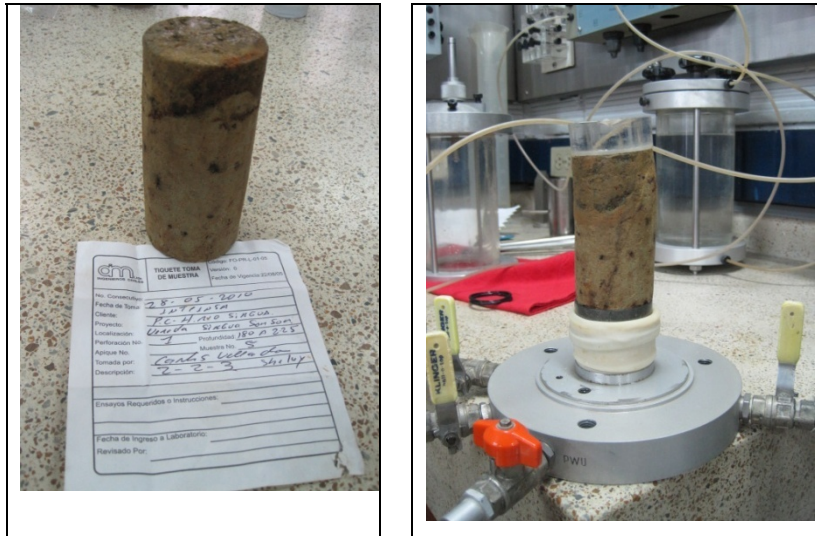


Abbildung 67: Bilder der Bodenprobe AP1-5 (1) vor und nach dem Versuch

3) Mehrstufiges UU- Triaxial unter verschiedenen Zuständen Probe AP1 -5 (2)

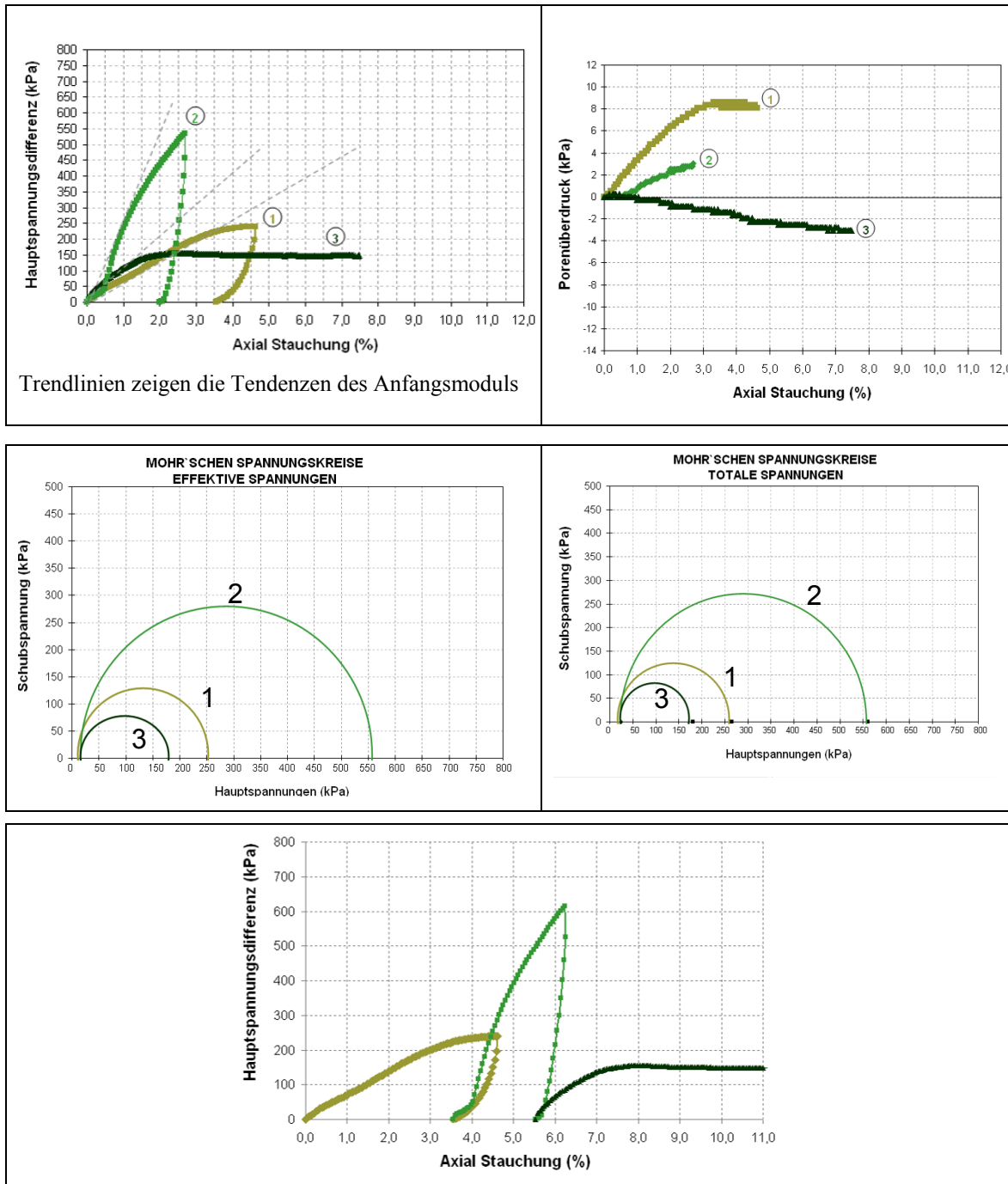
Zelldruck: 25 kPa

Tabelle 35: Daten der drei Phasen des Versuches

<p>Erste Phase: original Wassergehalt $W\% = 81,66\%$ Durchschnitt der Fläche: $18,98 \text{ cm}^2$ Volumen: $190,26 \text{ cm}^3$</p> <p>Die Bodenprobe wird abmontiert und 56 Stunden an der Luft ausgesetzt.</p>	<p>Zweite Phase: Wassergehalt: $46,91\%$ Durchschnitt der Fläche: $16,12 \text{ cm}^2$ Volumen: $155,4 \text{ cm}^3$</p> <p>Die Bodenprobe wird 14 Stunden gesättigt. Expansionskraft: $0,098 \text{ kN}$</p>	<p>Dritte Phase: Durchschnitt der Fläche: $16,38 \text{ cm}^2$ Volumen: $150,14 \text{ cm}^3$</p>
---	--	--

Ergebnisse

Tabelle 36: Ergebnisse Versuch AP1 -5 (2) mit verschiedenen Zuständen



Nach Befeuchtung der Probe sinkt die Festigkeit unter den ursprünglichen Wert. Theoretisch wäre es möglich in der zweiten Phase noch mehr Last aufzubringen, aber dann würde man das Risiko eingehen die Probe bis zum Bruch zu führen. Der trockene Boden ist fragil, man würde deshalb während des Versuchs nicht erkennen, dass der Bruch begonnen hat. Deshalb wurde die Last auf den fünffachen Wert der ersten Phase begrenzt.

Da in der letzten Phase die Bodenproben fast gesättigt sind, wird angenommen, dass die Kapillarkräfte bezüglich der Festigkeit keine Rolle spielen.

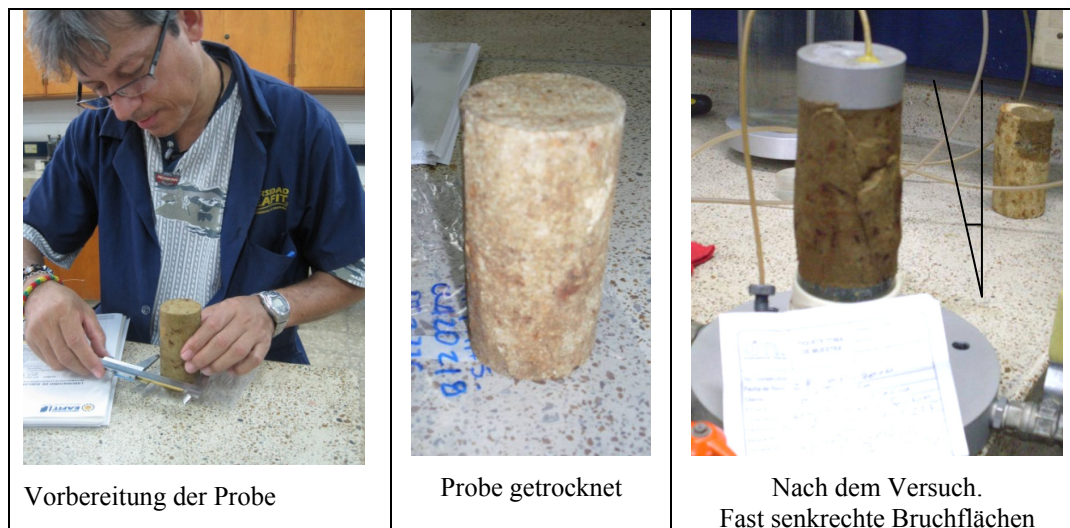


Abbildung 68: Bilder der Bodenprobe AP1-5 (2) vor und nach dem Versuch

Anmerkungen

Bei der Untersuchung hat sich gezeigt, dass sich die ersten zwei Phasen kaum von den Untersuchungen im einaxialen Druckversuch unterscheiden. Als Porendruck wird nicht nur der Druck des Wassers, sondern zusätzlich der der Luft in den Poren gemessen. Einrichtungen mit Saugspannungskontrolle sind in diesem Zusammenhang vorzuziehen, um die Rolle und Verwandlung des Porenwasserdrucks besser dokumentieren zu können.

Durch die Verwendung der Triaxialdruckzelle war es möglich, einen allseitig gleichen Druck aufzubringen, um so unter identischen Druckbedingungen, die Veränderung des Verhaltens bei Sättigung zu beobachten.

Folgerungen

Durch den Musterversuch ist ein Bruch des Materials unter wiederholter Belastung ausgeschlossen.

Die verschiedenen Phasen dieses Versuchs zeigen eine Absenkung des Porenüberdrucks, auch wenn eine Zusammendrückung stattfindet.

Aus den Versuchen kann man dann ablesen, dass eine Baugrundverbesserung durch Aufbringen von Lasten möglich ist (wie es schon in der Praxis gemacht wird). Die häufig parallel eingesetzten Schottersäulen zur Drainage haben aber fast keine Wirkung.

Die Trocknung erzeugt eine erhebliche Verbesserung der Festigkeit und des Steifemoduls. Dieser Effekt kann jedoch durch eine kurze Befeuchtung negativ beeinflusst werden.

Die Eigenschaften der Böden in situ werden sich in Folge von Bauarbeiten mit der Zeit verändern, was innerhalb von wenigen Tagen möglich ist.

Die Scherfestigkeitsparameter, die für ein Böschungsdesign bestimmt werden, sind nur vorläufige Werte; Zustandsgrenzen werden ebenfalls für die Klassifikation benutzt.

Eine Zunahme der Festigkeit entsteht durch Zementierung der Partikel. Dieser Effekt kann aber durch ein starkes Regenereignis reduziert werden.

Durch die Sättigung nach der Trocknung wird ein wichtiger Expansionsdruck erzeugt. Diese Belastung stellt einen wichtigen Faktor bei den Stabilitätsproblemen und der Erosion dieser Böden in situ dar.

Um repräsentative Parameter für ein Design zu bekommen, muss der Boden vor den Untersuchungen in den Zustand überführt werden, der dem Zustand des Bodens in situ, nach den Bauarbeiten, entspricht (trocknen, wenn er getrocknet wird, zermahlen wenn er zermahlen wird, usw.). In diesem Kapitel wurde aufgezeigt, wie dieses im Labor geschehen kann, aber auch in wie weit sich hierdurch die Ergebnisse verändern können. Am besten sollte man für eine Bemessung einer Böschung den Boden so stark wie möglich "künstlich verwitern", bevor die Scherparameter bestimmt werden.

4. ANALYSE VON LABORERGEBNISSEN

4.1. ALLGEMEINES

In den letzten Kapiteln wurden mehrere Situationen beschrieben, die eine richtige Charakterisierung von vulkanischen Ascheböden verhindern können. Es ist eindeutig, dass die Empfindlichkeit gegen Austrocknung und Beschädigung der Struktur (Remoulding) die Laborergebnisse beeinflusst. Hieraus ergibt sich eine Reihe von Fragen:

- Ist die Streuung der Daten bedeutsam, oder sind die Ergebnisse der Zustandsgrenzen trotz einer Abweichung zu dem „richtigen Wert“ verwendbar?
- Gibt es zu anderen Merkmalen, wie dem ursprünglichen Wassergehalt, der Festigkeit oder zu der Entnahmetiefe der entsprechenden Bodenprobe eine erkennbare Beziehung?
- Sind nach der Analyse von Laborergebnissen Unterschiede im Verhalten solcher Böden im Vergleich zu tieferen Schichten zu erwarten, weil oberflächennahe Schichten in der Natur schon eine gewisse Austrocknung erlitten haben können?

Mit der Zielvorstellung, diese Aspekte zu analysieren, wird im Folgenden nicht mehr nur eine einzelne Laboruntersuchung berücksichtigt - welche aufgrund der Empfindlichkeit des Materials nur Einzelfälle widerspiegeln kann -, sondern vielmehr das Verhalten einer großen Menge von Labordaten analysiert und bewertet.

Da die Beziehungen sehr komplex sein können und keine exakten Werte, sondern Wertebereiche betrachtet werden müssen, wird als Werkzeug ein Data Mining - Programm benutzt. Data Mining ermöglicht die gleichzeitige Suche nach Relationen zwischen mehreren Parametern, auch wenn diese nicht numerisch sind, und erleichtert die Visualisierung solcher Beziehungen, wenn keine einfache mathematische Beschreibung vorhanden ist.

Sind viele Daten aus der Erfahrung in einem bestimmten Fachgebiet vorhanden, so kann „Maschinelles Lernen“ in der Forschung eine wichtige Rolle spielen. In der Geotechnik kann dies eine große Bedeutung haben, weil in der Natur eine „organisierte Unregelmäßigkeit“ vorherrscht und weil in der Praxis über viele Jahre genug Daten gesammelt worden sind. Seit einigen Jahren sind Methoden der „Künstlichen Intelligenz“ unter dem Schlagwort Data Mining bekannt und gewinnen für die Analyse, Bewertungen und Prognose von großen Datenmengen immer mehr an Bedeutung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Programm WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis⁵) gewählt. WEKA bietet eine Reihe von Klassifikationsalgorithmen, mit denen eine bestimmte Beziehung (wenn sie denn vorhanden ist) zwischen den Daten erkannt werden kann. Hierzu werden sowohl lineare Beziehungen als auch kompliziertere Regeln, Assoziationen, Entscheidungsbäume, Gruppierung (Clustering) und weitere verwendet.

⁵ <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>

Der Erfolg bei der Entwicklung eines Modells, welches in diesem Fall für die zukünftige Abschätzung bestimmter Eigenschaften von Ascheböden benutzt werden soll, hängt im Wesentlichen von der Behandlung der Daten und von der Interpretation ab.

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde die Software nur in einer Basisversion verwendet, da es das Ziel ist Beziehungen oder Unabhängigkeiten verschiedener Merkmale zueinander zu erkennen und keine komplizierten Modelle oder Algorithmen zu entwickeln. Hierzu bietet die Methode des Clusterings eine einfache Möglichkeit, die im Weiteren verfolgt wird.

4.2. CLUSTERING MIT WEKA

Clustering bedeutet, dass innerhalb einer Klassifikation verschiedene Gruppen gebildet werden, deren Elemente ein bestimmtes Verhältnis zueinander haben. Dieses Verhältnis wird dabei vom Programm gebildet. Das Modell bestimmt aleatorisch ein Attribut, welches einen Gleichgewichtspunkt in einem mehrdimensionalen Raum darstellt. Zu diesem Punkt („Zentroid“) werden die Entfernungen zu jedem anderen Wert oder Attribut berechnet. Die Daten, die gewisse Ähnlichkeiten besitzen, werden in Gruppen zusammengefasst. In einem iterativen Prozess können die verschiedensten Daten als Zentroid dienen. Die Iteration wird abgebrochen, wenn die Zugehörigkeit jedes Elements zu einer gewissen Gruppe eindeutig ist. Als Ergebnis können die verschiedenen Datenwolken verschiedenfarbig in zweidimensionalen Diagrammen dargestellt werden (Abbildung 69).

Eine besondere Bedeutung kommt bei den Untersuchungen dem Operator zu. Dieser muss aus verschiedenen Methoden, die für das Clustering bereitstehen, die wählen, die die besten Ergebnisse erreicht und darüber hinaus die Anzahl der Cluster und die Interpretation der gefundenen Gruppierungen übernehmen.

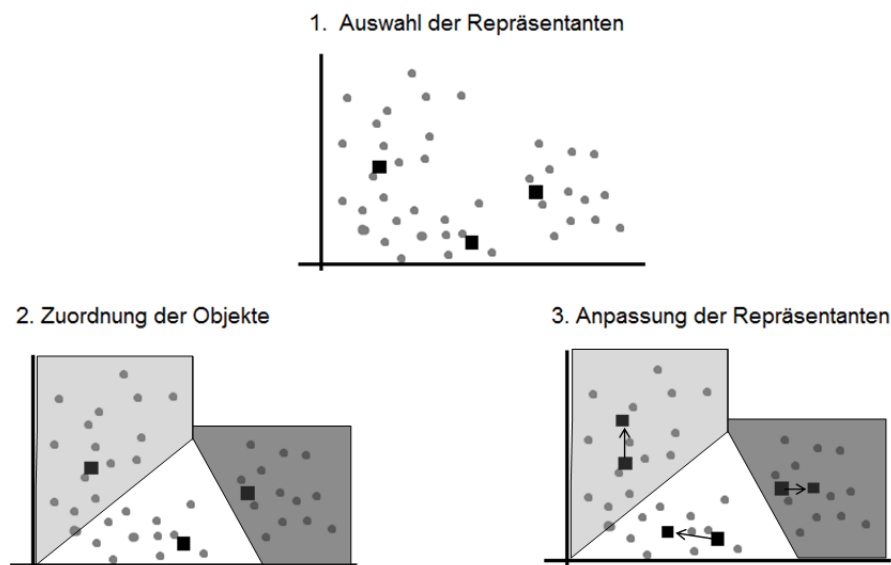


Abbildung 69: Verfahren der Clusteranalyse

4.3. ANALYSE VON VULKANISCHEN ASCHEBÖDEN

4.3.1. Auswahl der Daten

Die Informationen stammen von der Universität Nacional in Manizales –Kolumbien [Lo02]. Insgesamt ist hier eine Datenbasis mit 1617 Untersuchungsergebnissen vorhanden. Hierin sind für jede Bodenprobe die folgenden Attribute enthalten: Tiefe (m), Wassergehalt (%), Fließgrenze (%), Ausrollgrenze(%), Klassifizierung (nach USCS), Einaxialdruckfestigkeit (kPa) und Trockendichte (g/cm^3).

Als Festigkeitskennwert wurde die Einaxialdruckfestigkeit gewählt, weil dieser Parameter in den meisten Fällen untersucht und die ungestörte Bodenprobe vor dem Versuch kaum behandelt wird, d.h. weder getrocknet noch gesättigt wird.

Die Daten wurden aus einer Datenbasis mit etwa 10.000 Einträgen aus Laborversuchen ausgewählt, die an Bodenproben aus der Kaffee– Region Kolumbiens durchgeführt worden sind. Da nicht auszuschließen war, dass im Labor auch Bodenproben anderer Herkunft untersucht wurden, und dass bestimmte Randbedingungen die Ergebnisse beeinflussen können, wurde die gesamte Datenbasis nach den folgenden Kriterien gefiltert:

- Niedrige Trockendichte. Erfahrungsgemäß weisen vulkanische Ascheböden Trockendichte bis maximal $1,3 \text{ g/cm}^3$ auf. Bei der Auswahl wurde eine sichere obere Grenze von $1,09 \text{ g/cm}^3$ gewählt.
- Keine Berücksichtigung organischer Böden. Bodenproben, die als OL (nach dem USCS) klassifiziert wurden, wurden aussortiert.
- Die Versuche wurden in einem Labor von denselben Operatoren durchgeführt. Es werden keine Datenbasen verschiedener Herkunft verwendet.

4.3.2. Übersicht der Daten

Um eine Übersicht über die verwendeten Daten zu bekommen, sind in den folgenden Diagrammen unterschiedliche Abhängigkeiten der Daten dargestellt.

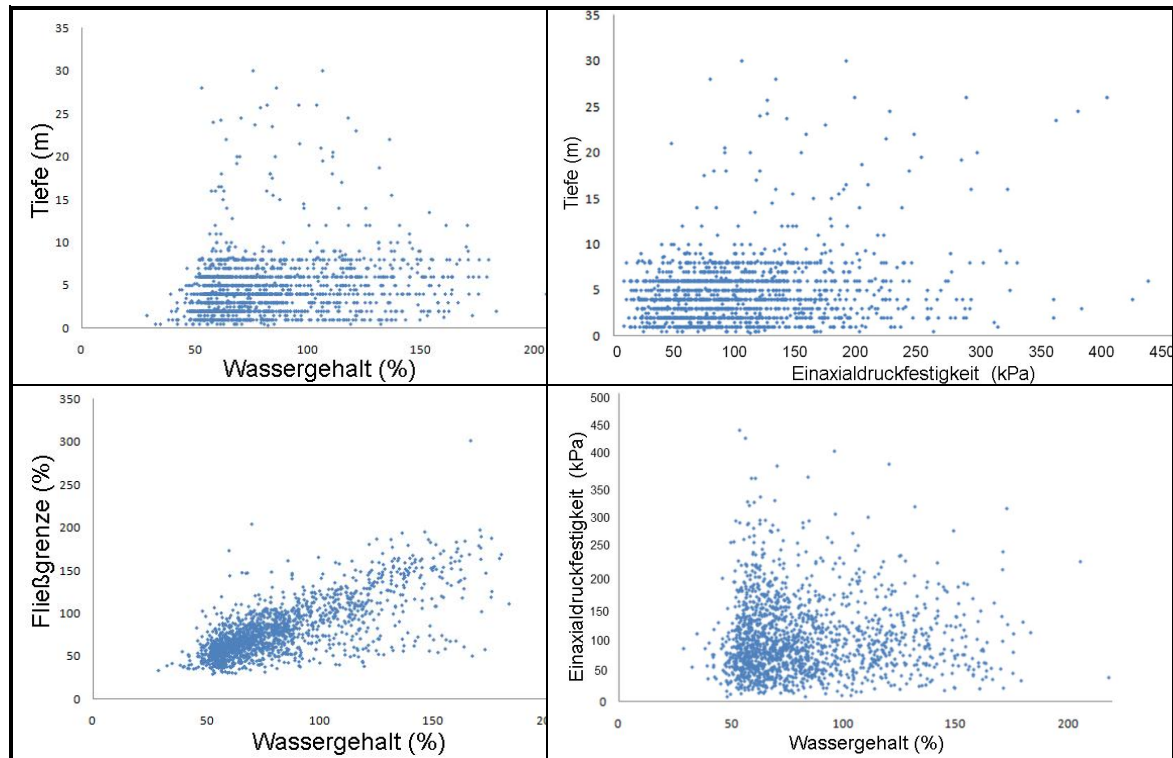


Abbildung 70: Übersicht der Daten

In den Diagrammen ist außer bei der Gegenüberstellung der Fließgrenze und dem Wassergehalt keine deutliche Beziehung zu erkennen. Die nahezu lineare Beziehung deutet darauf hin, dass durch die Behandlung im Labor die Werte der Fließgrenze nicht stark beeinflusst werden. Auch wenn Wasserverluste auftreten, bleibt die Beziehung Wassergehalt – Fließgrenze bestehen.

4.3.3. Clustering

Durch das Clustering wird eine erste Klassifizierung der Daten durchgeführt. In einem iterativen Prozess werden hierbei verschiedene Gruppen gebildet, bis sich die Gruppen zum einen gut von einander unterscheiden und zum anderen keine unnötigen Gruppen gebildet werden. Die beste Verteilung wurde mit drei Gruppen erreicht. Die Zentroide der gefundenen Gruppen (Cluster 0, 1 und 2), die Merkmale dieser Zentroide, sowie die Anzahl der Proben in jeder Gruppe sind in der Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Zentroide der ersten Klassifizierung

Cluster centroids:				
Attribute	Full Data (1618)	Cluster#		
		0 (217)	1 (904)	2 (497)
Tiefe	4,692	5,1889	3,7256	6,2328
Wassergehalt	82,2333	132,724	64,4118	92,6036
Fließgrenze	80,652	142,2258	60,9803	89,5487
Ausrollgrenze	52,5853	93,106	40,0066	57,7726
Klassifizierung	MH	MH	MH	MH
Einaxialdruckf	103,26	102,52	98,09	112,98
Clustered Instances				
0	217 (13%)			
1	904 (56%)			
2	497 (31%)			

Das Schema von Abbildung 71 ermöglicht eine erste Analyse der Daten.

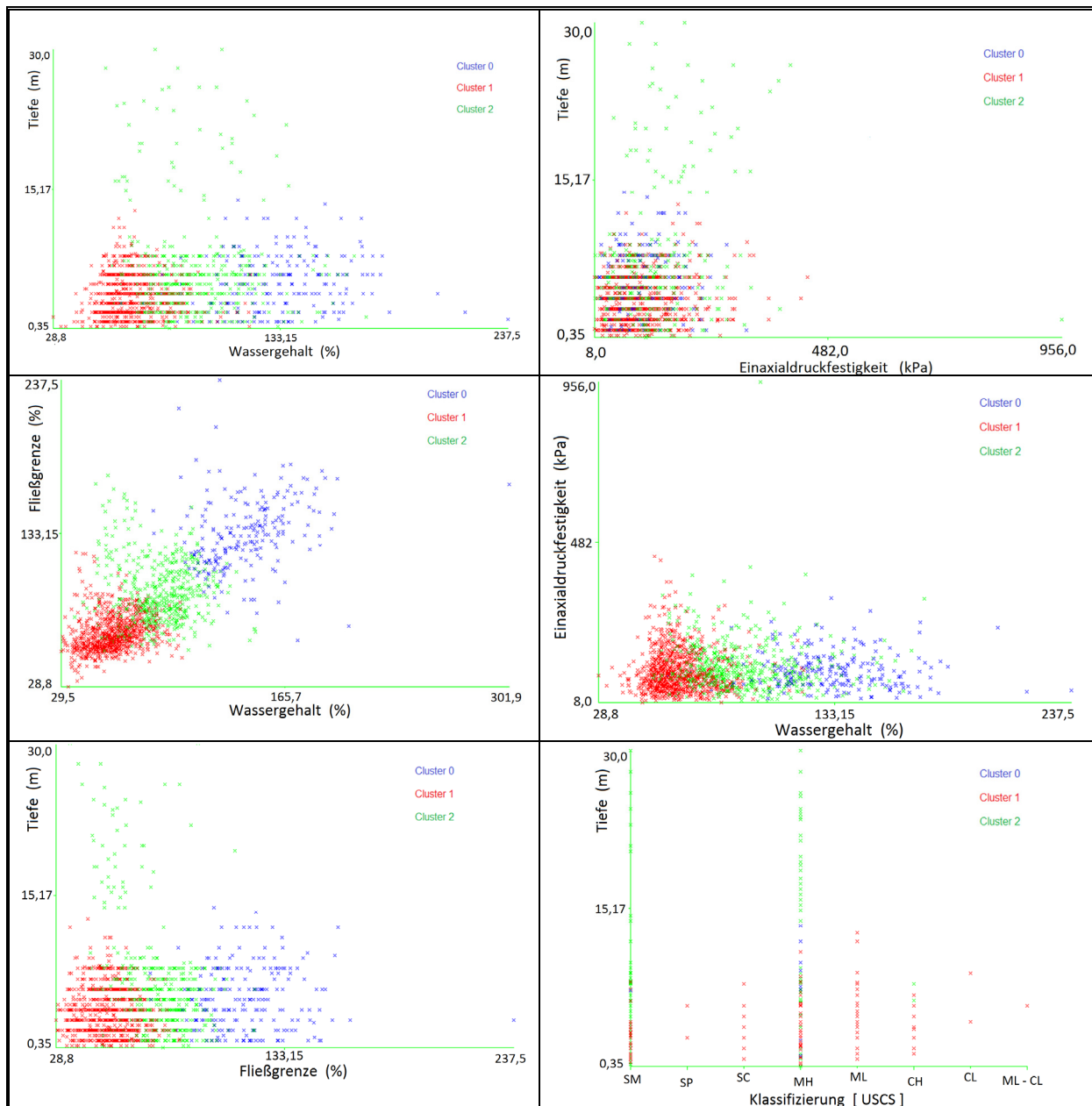


Abbildung 71: Beziehungen als Resultat des ersten Clusterings

Die drei Gruppen werden besonders nach der Größe der Zustandsgrenzen und dem Wassergehalt unterschieden.

Die Proben aus tieferen Schichten (ungefähr ab 10 m Tiefe) weisen eine größere Streuung des Wassergehaltes und der einaxialen Druckfestigkeit auf. Diese Proben werden dem Cluster 2 zugeordnet. Die Fließgrenzen dieser aus tieferen Schichten entnommenen Proben sind kleiner als die der anderen Proben im gleichen Cluster.

Die Klassifizierung nach USCS beschreibt die meisten Proben als MH (Schluff hoher Plastizität). Unter diesen Böden befinden sich die Bodenproben aus den tieferen Schichten.

Die höhere Dichte von Daten für Proben aus den oberen Schichten und die geringe Anzahl von Daten für Proben aus den tieferen Schichten resultiert aus der Vielzahl an kleineren Bauprojekten, bei denen tiefere Schichten (>10m) selten untersucht werden.

Clustering von Daten bis 10 m Tiefe

Die erste Untersuchung der Daten zeigt die Notwendigkeit, die Daten der oberflächennahen Schichten separat zu analysieren. Zudem werden einige Ausreißer (mit extremen Werten für den Wassergehalt und die Festigkeit) entfernt, damit der Prozess durch diese Werte nicht beeinflusst wird.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass für viele Bodenproben der Wassergehalt über dem entsprechenden Wert der Fließgrenze liegt. Es werden deshalb zwei neue Parameter eingeführt, die den Abstand und das Verhältnis dieser beiden Werte berücksichtigen. Für Bodenproben, bei denen die Fließgrenze höher ist als der Wassergehalt (wie es normalerweise ist) wird die Konsistenzzahl benutzt.

$$I_c = \frac{(W_L - w)}{(W_L - W_p)} \quad (3)$$

Für Bodenproben, die eine negative Konsistenzzahl haben (weil der Wassergehalt größer ist als die Fließgrenze) wird die Konsistenzzahl gleich Null gesetzt. Um in diesem Fall aber eine Aussage darüber treffen zu können, wie viel höher der Wassergehalt über der Fließgrenze liegt, wird für die Bodenproben mit negativer Konsistenzzahl eine „Un-Konsistenzzahl“ berechnet. Dieser Wert ist der Betrag der Konsistenzzahl.

$$I_u = |I_c| \quad (4)$$

Es kann in diesem Fall auch die Liquiditätszahl

$$I_l = \frac{(w - W_p)}{(W_L - W_p)} \quad (5)$$

benutzt werden. Mit der neuen Maßzahl wird betont, dass auch bei Wassergehalten oberhalb der Fließgrenze, der Boden sich nicht verflüssigt. Das Konzept der Klassifizierung ist in Abbildung 72 dargestellt.

bei anderen Böden		plastisch (bildsam)				
		* halb fest	steif	weich	breiig	flüssig
Liquiditätszahl	I_L	0	0,25	0,5	1,0	> 1,0
Konsistenzzahl	I_c	1,0	0,75	0,5	0	< 0

Wassergehalt % = WP WL

bei vulkanischen Böden	
"Un-Konsistenzzahl" I_u	> 0 halb fest bis breiig (störungsabhängig)

- * halb fest: bröckelt und reißt beim Versuch, ihn zu 3mm dicken Walzen auszurollen, läßt sich aber erneut zu Klumpen formen.
- steif: schwer knetbar, zu 3mm dicken Walzen ausrollbar
- weich: läßt sich leicht kneten
- breiig: quillt beim Pressen in der Faust zwischen den Fingern durch
- flüssig: fließt aus der Hand [Gr01]

Abbildung 72: Messskala für die Liquiditätszahl, Konsistenzzahl und Un-Konsistenzzahl

Ein beispielhafter Auszug der Datentabelle ist in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38: Beispiele von Konsistenz und "Un-Konsistenzzahl"

Tiefe m	W %	WL %	Wp %	I_c	I_u	Klasse USCS	qu kPa
7,5	81,7	96,8	62,2	0,4	0	MH	83
4	92,3	75,8	41,2	0	0,5	MH	70

Mit diesen Daten wird das Clustering für die Bodenproben bis 10 m Tiefe erneut durchgeführt. Insgesamt sind dies 1553 Datensätze. Hierbei werden die Eigenschaften Plastizität, Entnahmetiefe, Wassergehalt, Klassifizierung und einaxiale Druckfestigkeit untersucht und in Beziehung zueinander gesetzt. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt:

Tabelle 39: Clustering von Daten bis 10 m Tiefe

Cluster centroids:				
Attribute	Full Data (1553)	Cluster#		
		0 (480)	1 (491)	2 (582)
Tiefe	4,1454	3,5316	6,6146	2,5684
Wassergehalt	81,7562	73,1631	91,099	80,9613
Fließgrenze	80,6645	64,7398	90,4786	85,5187
Ausrollgrenze	52,5249	43,7279	58,2189	54,9765
Konsistenzzahl	0,2085	0,1515	0,1807	0,279
Un-Konsistenzzahl	0,618	1,1994	0,4059	0,3175
Klas	MH	SM	MH	MH
Einaxialdruckf	99,0	82,35	108,08	107,55

Clustered Instances	
0	480 (31%)
1	491 (32%)
2	582 (37%)

Nach dieser Verteilung wurde beobachtet:

- Die Gruppen unterscheiden sich deutlich voneinander.
- Die Konsistenzzahl ist im Allgemeinen klein
- Dank der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens haben viele Bodenproben einen Wassergehalt über der Fließgrenze
- Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass in der vorliegenden Datenbasis insgesamt höhere Un-Konsistenzzahlen (I_u Zentroid= 1,19; Cluster 0) als Konsistenzzahlen (I_c Zentroid = 0,28; Cluster 2) auftreten.
- Bodenproben mit hoher „Un-Konsistenzzahl“ sind meistens als SM klassifiziert.
- Solche Bodenproben haben die kleinsten Einaxialdruckfestigkeiten.
- Kein Merkmal hat eine erkennbare Abhängigkeit zur Entnahmetiefe der Bodenprobe.

Die statistische Beschreibung der Daten von jedem Cluster wird in den folgenden Abbildungen dargestellt. Auf diesen Bildern wird die Anzahl der zugehörigen Bodenproben durch die Höhe der jeweiligen Säule und die numerische Angabe beschrieben. Auf der x- Achse und in einigen Säulen sind die Werte der Attribute angegeben.

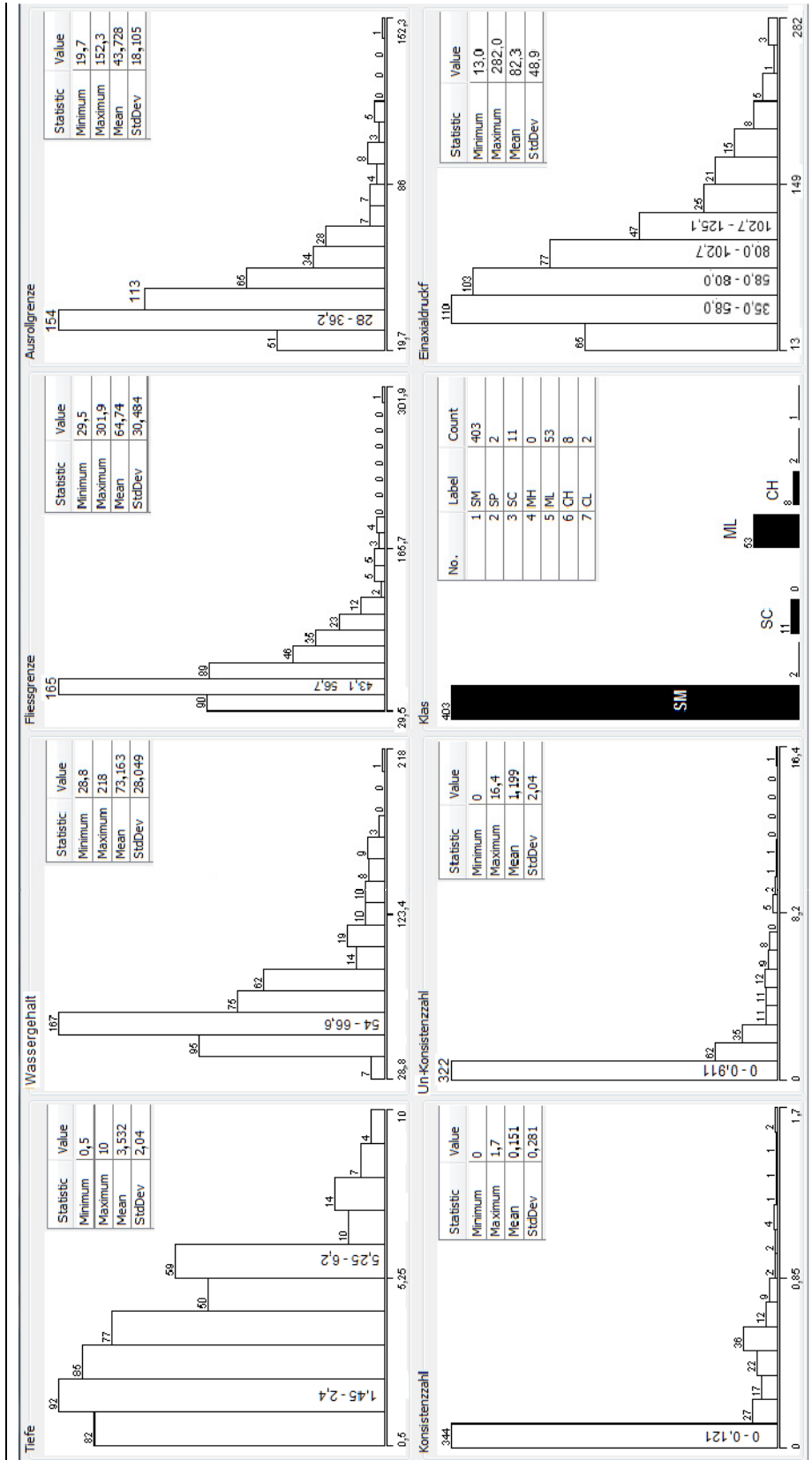


Abbildung 73: Beschreibung der Daten Cluster 0

Auf diesem Schema ist die Zusammensetzung der ersten Gruppe „Cluster 0“ zu sehen. Wassergehalt und Zustandsgrenzen zeigen einen deutlichen „Mittelpunkt“ ähnlich einer Gauß – Verteilung. In Bezug auf die Konsistenzzahl findet sich die Mehrheit (344 Daten) zwischen 0 und 0,121. Ähnliches zeigt mit der Un-Konsistenzzahl mit Werten zwischen 0 und 0,911. Bei der Einaxialdruckfestigkeit ist die Tendenz nicht so deutlich. Für diese Gruppe wurden Bodenproben aus verschiedenen Tiefen bis etwa 6,2 m gewählt. Fast alle Proben sind schluffige Sande (SM)

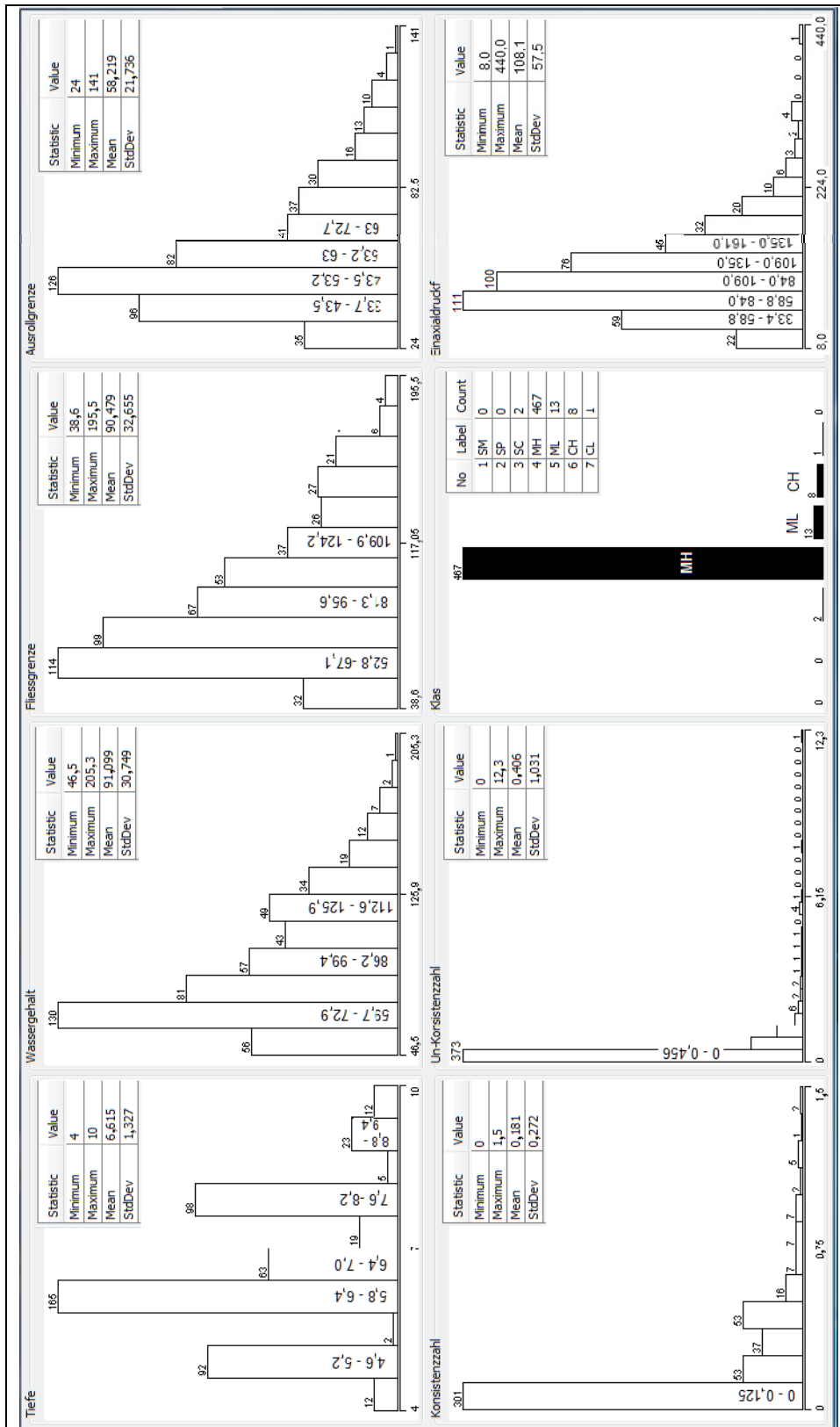


Abbildung 74: Beschreibung der Daten Cluster 1

Bei Cluster 1 sind die Tendenzen von Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Konsistenzzahl und Unkonsistenzzahl deutlich. Die Einaxialdruckfestigkeit neigt zu einem höheren Niveau in Vergleich zu Cluster 0. Die Bodenproben sind im Allgemeinen aus tieferen Schichten als die von Cluster 0. Sie wurden aus verschiedenen Niveaus zwischen 4,6 und 9,4 m unter der Oberfläche für diesen Cluster gewonnen. Fast alle sind schluffige Böden hoher Plastizität (467 Proben von 491, siehe Tabelle 39)

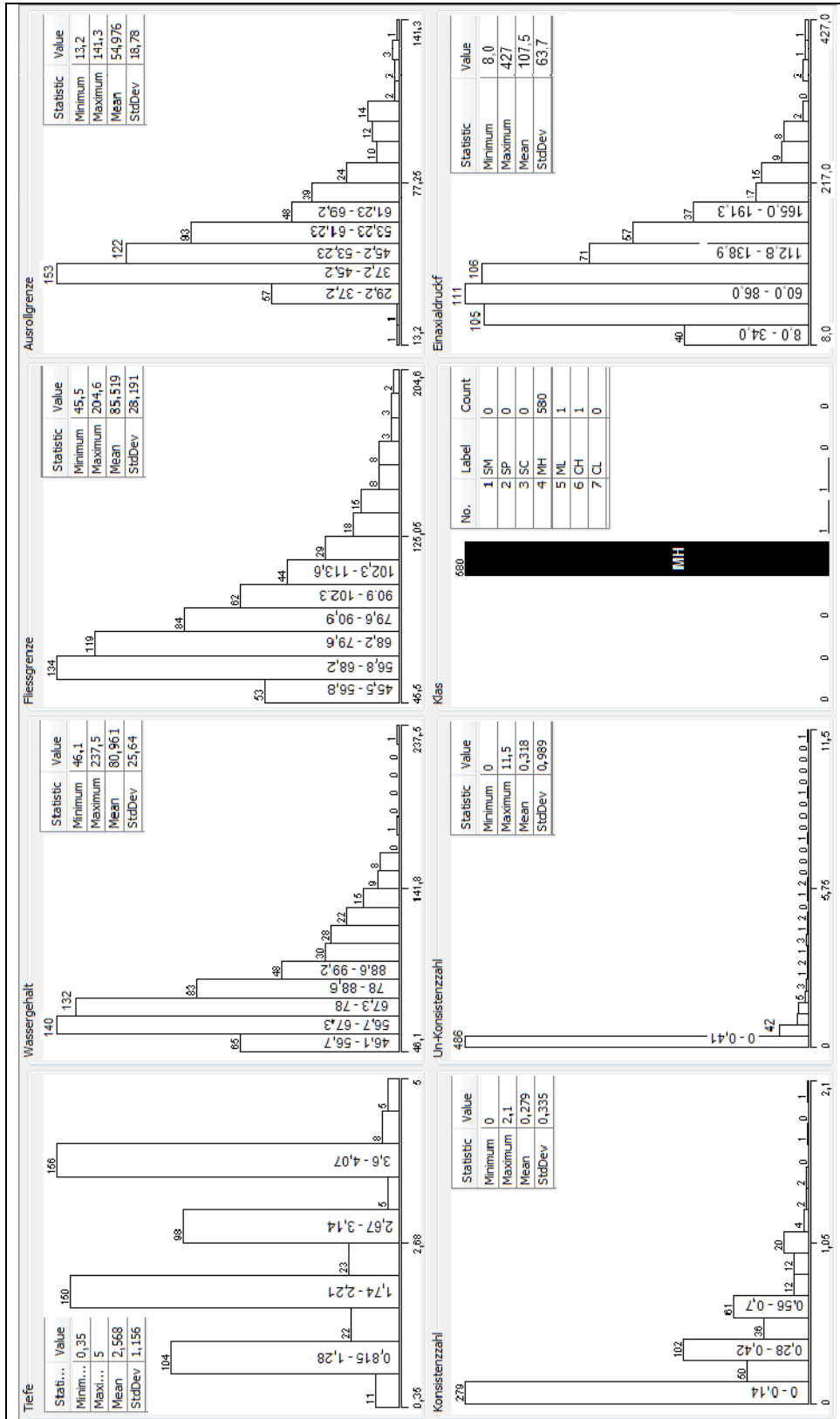


Abbildung 75: Beschreibung der Daten Cluster 2

Wie in Cluster 1 haben Wassergehalt, Zustandsgrenzen und Konsistenz eine Tendenz. Die Konsistenzzahl liegt ein wenig höher, was aber für eine höhere Einaxialdruckfestigkeit nicht ausreicht. Die Proben sind praktisch alle MH –Böden und stammen aus Schichten zwischen 0,8 und 4,0 m Tiefe.

Aus den Abbildungen können noch weitere Details festgestellt werden.

- Anscheinend war die Plastizität der Böden, also die Klassifizierung, das Kriterium um Cluster 0 von den Clustern 1 und 2 zu unterscheiden. Die mögliche Spannweite der Wassergehalte, der Fließ- und Ausrollgrenzen ist gering, weshalb die Unterschiede dieser Attribute zwischen den Clustern ebenfalls klein sind.
- Die Mehrheit (445) der Bodenproben von Cluster 0 -vorwiegend SM Böden- gehören meistens zu oberflächennahen Schichten, zwischen 0,5 und 6,2 m Tiefe. Die Mehrheit (418) Bodenproben von Cluster 1 -in der Regel MH Böden- kommen aus Schichten zwischen 5,2 und 8,2 m Tiefe. Ihre Verteilung in der Tiefe ist aber nicht so uniform wie die der Bodenproben aus Cluster 0. Bodenproben von Cluster 2 kommen aus geringeren Tiefen zwischen 0,8 und 4,07 m, sind aber als MH klassifiziert.
- Im Bezug auf die Konsistenz unterscheidet sich Cluster 0 deutlich von Cluster 1 und 2. Die Konsistenzzahl ist kleiner und bei negativen Konsistenzzahlen ist der Wassergehalt höher als der der Fließgrenze.
- Die einaxiale Druckfestigkeit der Cluster 1 und 2 ist daher, wie erwartet, höher als die von Cluster 0. Damit sind die höheren Festigkeiten meistens in MH Bodenproben (verschiedener Tiefen) zu finden.

Clustering von Daten bis 10 m Tiefe mit dem Merkmal Trockendichte

In einer weiteren Untersuchung soll das Merkmal Plastizität vernachlässigt werden. In diesem Fall wird die Trockendichte anstatt der Zustandsgrenzen in der Datenbasis berücksichtigt. Nach den Ergebnissen von vorangegangenen Iterationen reichen drei Cluster, um die folgende Ergebnisse erzeugen (Tabelle 40).

Tabelle 40: Clustering von Daten bis 10 m Tiefe mit Trockendichte

Cluster centroids:				
Attribute	Full Data (1555)	Cluster# 0 (745)	1 (388)	2 (422)
Tiefe	4,1484	2,4296	4,9552	6,4411
Wassergehalt	81,7851	67,5511	122,8075	69,1967
Einaxialdruckf	99,88	97,74	99,99	103,55
Trockendichte	0,8551	0,9311	0,6163	0,9405
Clustered Instances				
0	745 (48%)			
1	388 (25%)			
2	422 (27%)			

Die einaxiale Druckfestigkeit und die Trockendichte haben keine offensichtliche Beziehung zueinander, deshalb sind die einzelnen Gruppen nicht gut zu unterscheiden (Abbildung 76a). Eine Tendenz mit der Entnahmetiefe ist nicht zu erkennen aber das System unterscheidet die Cluster deutlich nach diesem Merkmal, s. Abbildung 76 b). Die Beziehung von Trockendichte zum Wassergehalt ist in Abbildung 76 c) zu sehen.

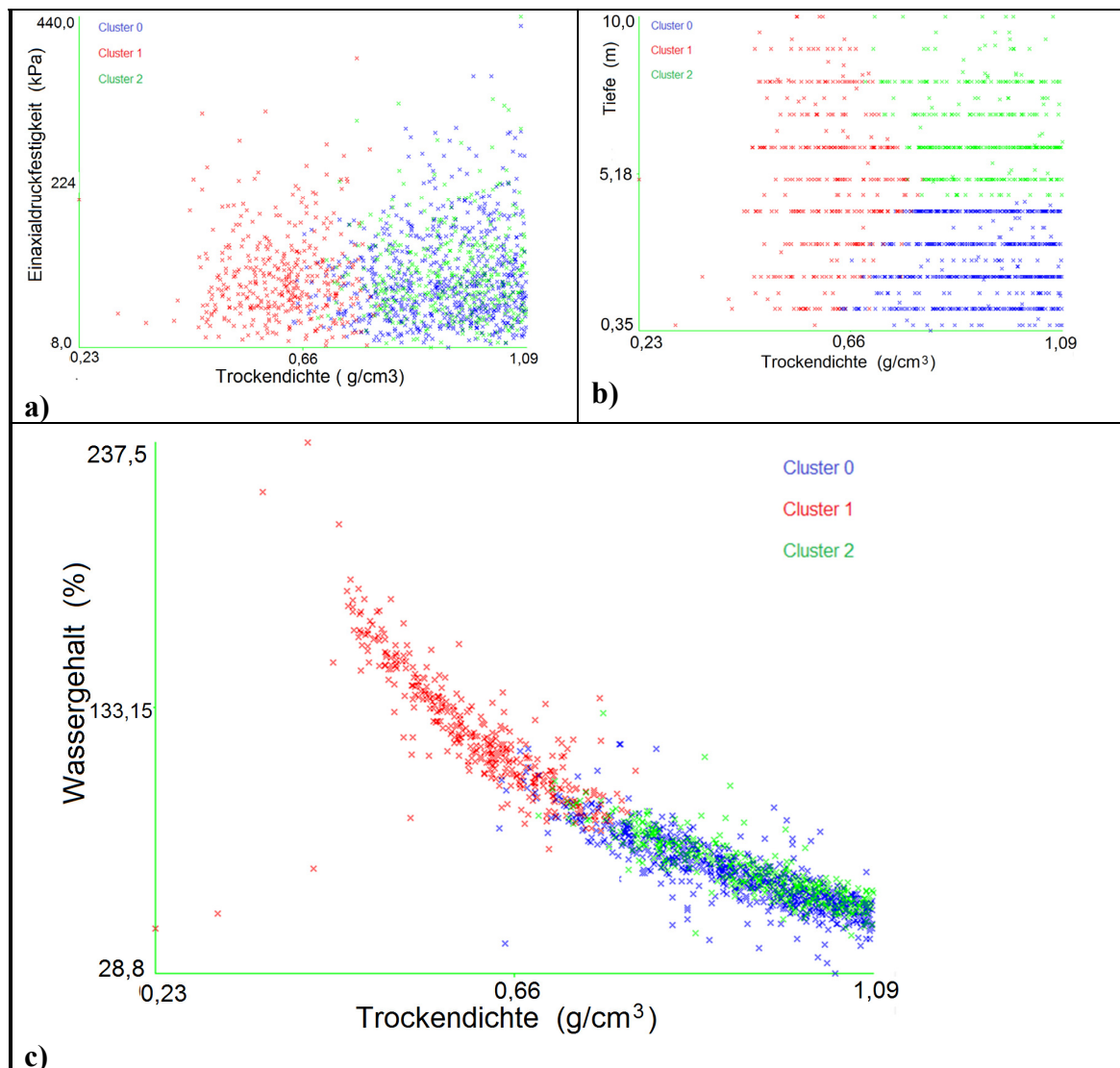


Abbildung 76: Beziehungen als Resultat der Clustering mit Trockendichte

Aus den Abbildungen lässt sich erkennen, dass die Trockendichte keine Beziehung zur Entnahmetiefe oder zur einaxialen Druckfestigkeit besitzt. Lediglich zum Wassergehalt gibt es einen Zusammenhang. In Abbildung 76c ist gut zu erkennen, dass steigende Wassergehalte mit verringerten Trockendichten (Cluster 1) verbunden sind. Das Verhältnis ist mit einer nichtlinearen Regressionskurve beschreibbar.

Aussagen der Analyse

Aus der Analyse der Laborergebnisse sind folgende Feststellungen abzuleiten:

- Die Werte der Zustandsgrenzen weisen eine Beziehung zum ursprünglichen Wassergehalt auf. Dies deutet darauf hin, dass alle möglichen Störungen der Bodenproben bei der Durchführung der Versuche im Labor nicht so stark sind oder dass eine identische (standardisierte) Behandlung der Proben einen konstanten Fehler verursacht.

Es kann aber nicht festgestellt werden, ob die Ergebnisse im Labor eine definitive Charakterisierung dieser Böden ermöglichen oder ob diese Böden sich in situ durch Verwitterung weiter verändern.

Die Beziehung Wassergehalt zur Fließgrenze kann mit einer linearen Regressionsgerade beschrieben werden (Abbildung 77). Auf Grund der Streuung der Daten ist die Korrelation gering.

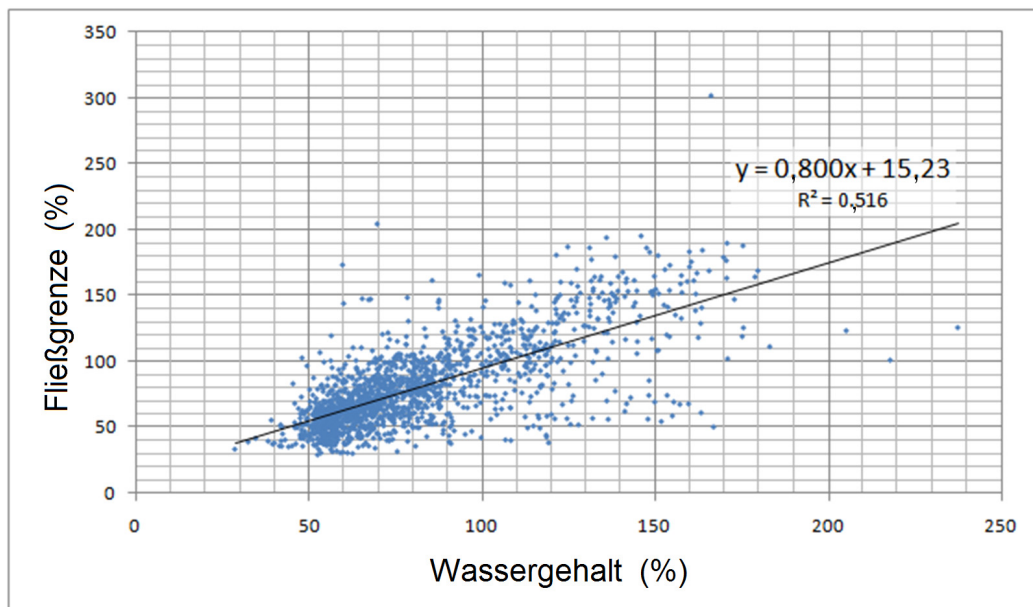


Abbildung 77: Beziehung Fließgrenze und Wassergehalt

- Es gibt keine erkennbare Beziehung der untersuchten Merkmale mit der Tiefe. Bodenproben aus den oberen Schichten (0 bis 5 m) können sowohl als SM (schluffiger Sand) oder als MH (hochplastischer Schluff) klassifiziert, während Bodenproben aus tieferen Schichten vorwiegend als MH eingestuft werden.

Da die Zustandsgrenzen keinen eindeutigen Zusammenhang mit der Entnahmetiefe zeigen, ist zu vermuten, dass der Unterschied bei der Charakterisierung (zwischen MH und SM) nicht durch die Anteile der feinen, sondern durch den der groben Partikel hervorgerufen wird. Die Ursache hierfür könnte in der Austrocknung der Schichten zu suchen sein, die eine Aggregation der Partikel zur Folge hat und damit die Korngrößenverteilung beeinflusst. Es

wäre aber auch möglich, dass die Böden an der Oberfläche sich zu sandigen Materialien umwandeln können.

Diesbezüglich sind noch einige offene Fragen in zukünftiger Forschung zu beantworten, wie z.B. der Bezug zum Alter der Schichten und die Randbedingungen jedes Ausbruchs des Vulkans.

- Außer der erwähnten Beziehung der Klassifikation sind keine weiteren deutlichen Beziehungen zwischen Tiefe, Wassergehalt, Zustandsgrenzen und Einaxialdruckfestigkeit zu erkennen. D.h. dass die Werte dieser Merkmale auf fast allen Niveaus zu finden sind. Zudem zeigen sich die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeit in einem begrenzten Bereich, weshalb Tendenzen nur schwer zu erkennen sind.

Es kann aber eine deutliche Beziehung zwischen Trockendichte und Wassergehalt (damit auch mit der Fließgrenze) festgestellt werden. Diese Beziehung könnte bedeuten, dass Hohlräume des noch feuchten Materials mit Wasser gefüllt sind.

In der folgenden Abbildung 78 wurde das Diagramm aus Abbildung 76c um eine Regressionskurve ergänzt. Zusätzlich sind die mathematische Funktion und das Bestimmtheitsmaß dargestellt.

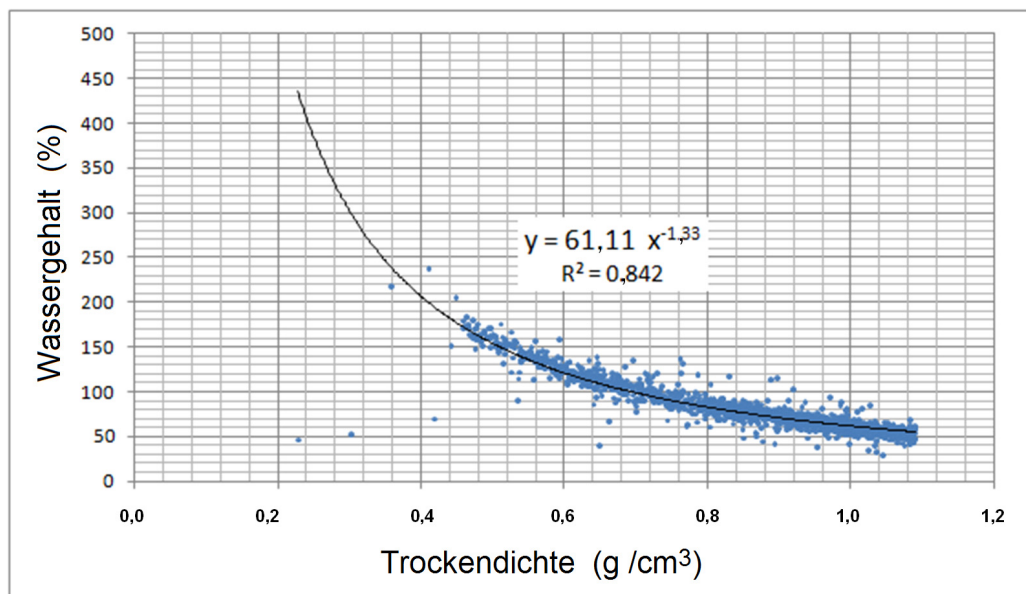


Abbildung 78: Beziehung Fließgrenze und Wassergehalt

Wenn man die Ergebnisse des ersten Clustering- Prozesses betrachtet, zeigen die oberflächennahen, sandigen Bodenproben SM, SC (Cluster 0) eine ungewöhnliche Eigenschaft, die mit der „Un- Konsistenzzahl“ beschrieben wird. Wenn man diese aus der Gesamtmenge der Daten entfernt, bleiben noch 1189 Datensätze übrig. Trägt man diese verbliebenden Datensätze erneut gegeneinander auf (Abbildung 79) und bestimmt die Funktion der

mathematischen Ausgleichskurve, so erhöht sich Korrelationskoeffizient R^2 auf über 90%.

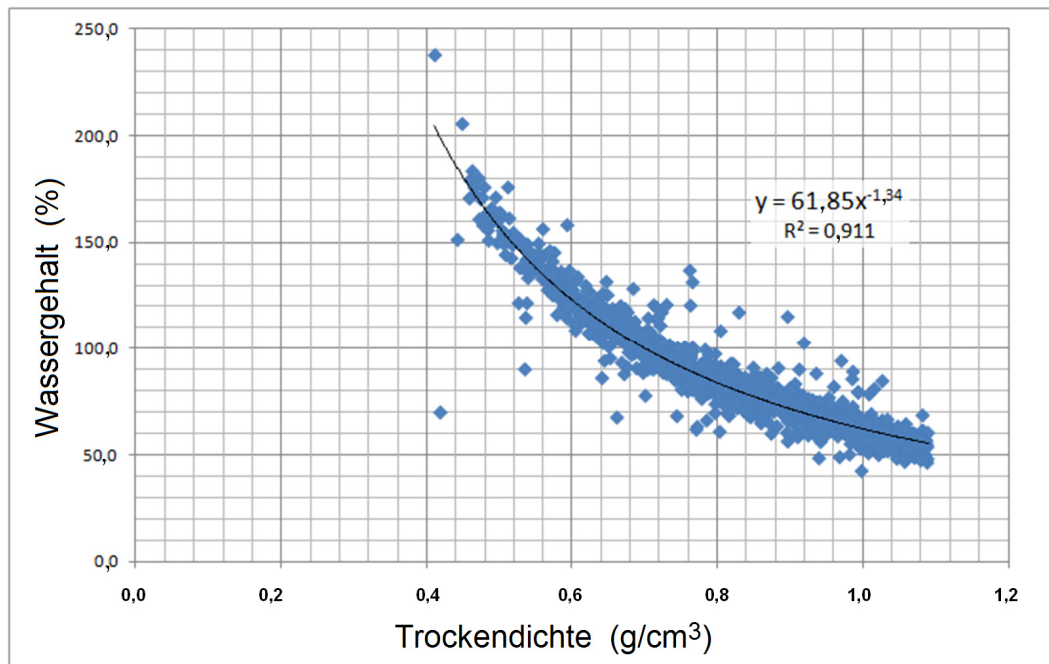


Abbildung 79: Beziehung Wassergehalt und Trockendichte ohne SM - Bodenproben

Auf Grund dieser Feststellung ist es tendenziell möglich, anhand des Wassergehaltes (der sehr einfach zu bestimmen ist) die Höhe der Trockendichte abzuleiten. Da das spezifische Gewicht der Festsubstanz γ_s bei diesen Böden nicht stark variiert (von 2,3 bis 2,6 in Kolumbien), ist näherungsweise auch eine Bestimmung der Porenzahl möglich.

$$\gamma_s = \frac{G_s}{V_s} \quad \begin{array}{l} \gamma_s = \text{Spezifisches Gewicht der Festsubstanz} \\ G_s = \text{Gewicht des Festsubstanz} \\ V_s = \text{Volumen des Festsubstanz} \end{array} \quad (6)$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \quad \begin{array}{l} e = \text{Porenzahl} \\ \gamma_d = \text{Trocken - Raumgewicht} \end{array} \quad (7)$$

- Negative Werte der Konsistenzzahl zeigen, dass sehr hohe Wassergehalte möglich sind, welche höher sind als die Fließgrenzen, was nur in einer ganz offenen Struktur möglich ist.

Diese Böden wurden als SM-Böden klassifiziert. Grundsätzlich würde man erwarten, dass nur hoch plastische Materialien eine solche Wasseraufnahmefähigkeit besitzen und auch mit einem so hohen Wassergehalt in situ standfest bleiben.

Möglicherweise ist die Klassifizierung als SM eine Fehldeutung der Bestimmung der Korngrößenverteilung, die bedingt wird durch die Umwandlung des Materials an der Oberfläche oder sogar im Labor.

- Aus den Vorüberlegungen hätte man erwartet, dass die oberflächennahen Bodenproben durch Austrocknung erhärtet sind und daher eine höhere Festigkeit aufweisen. Dieses konnte aber durch die Auswertung der Daten unter Berücksichtigung einer niedrigen Trockendichte nicht bestätigt werden. Anhand der Daten ergeben sich höhere Festigkeiten für Böden, die als MH-Böden klassifiziert wurden und eine höhere Konsistenzzahl aufweisen. Deshalb sind die höchsten Festigkeiten in den tieferen Schichten zu finden.
- Durch das abweichende Verhalten der Böden bei der Bestimmung des Wassergehalts sowie der Fließgrenze und dadurch bedingt der Konsistenzzahl ist es zweifelhaft, weitere Parameter abzuschätzen, wie dies in der Praxis zum Beispiel häufig nach DIN 1055 [DI11] (Tabelle 41) oder durch die in Tabelle 42 dargestellten Korrelationen von geschieht.

Tabelle 41: Bodenkenngrößen für bindige und organische Böden (Rechenwerte) aus DIN 1055

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8
Zeile	Bodenart	Kurzzeichen nach DIN 18 196	Zustandsform ¹⁾	Wichte		Reibungswinkel	Kohäsion	
				über Wasser	unter Wasser		cal ϕ'	cal c'
				cal γ	cal γ'	Grad		
				kN/m ³ (Mp/m ³)	kN/m ³ (Mp/m ³)	Grad	kN/m ² (Mp/m ²)	kN/m ² (Mp/m ²)
1	Anorganische bindige Böden mit ausgeprägt plastischen Eigenschaften ($w_L > 50\%$)	TA	weich	18,0 (1,80)	8,0 (0,80)	17,5	0 (0)	15 (1,5)
steif			19,0 (1,90)	9,0 (0,90)	17,5	10 (1,0)	35 (3,5)	
halbfest			20,0 (2,00)	10,0 (1,00)	17,5	25 (2,5)	75 (7,5)	
4	Anorganische bindige Böden mit mittelplastischen Eigenschaften ($50\% \geq w_L \geq 35\%$)	TM und UM	weich	19,0 (1,90)	9,0 (0,90)	22,5	0 (0)	5 (0,5)
steif			19,5 (1,95)	9,5 (0,95)	22,5	5 (0,5)	25 (2,5)	
halbfest			20,5 (2,05)	10,5 (1,05)	22,5	10 (1,0)	60 (6,0)	
7	Anorganische bindige Böden mit leicht plastischen Eigenschaften ($w_L < 35\%$)	TL und UL	weich	20,0 (2,00)	10,0 (1,00)	27,5	0 (0)	0 (0)
steif			20,5 (2,05)	10,5 (1,05)	27,5	2 (0,2)	15 (1,5)	
halbfest			21,0 (2,10)	11,0 (1,10)	27,5	5 (0,5)	40 (4,0)	
10	Organischer Ton, organischer Schluff	OT und OU	weich	14,0 (1,40)	4,0 (0,40)	15	0 (0)	10 (1,0)
steif			17,0 (1,70)	7,0 (0,70)	15	0 (0)	20 (2,0)	
12	Torf ohne Vorbelastung	HN und HZ		11,0 (1,10)	1,0 (0,10)	15	2 (0,2)	10 (1,0)
13	Torf unter mäßiger Vorbelastung			13,0 (1,30)	3,0 (0,30)	15	5 (0,5)	20 (2,0)

¹⁾ weich: $0,50 < I_C \leq 0,75$; steif: $0,75 < I_C \leq 1,00$; halbfest: $I_C > 1,00$; dabei ist die Konsistenzzahl $I_C = (w_L - w)/(w_L - w_p)$, siehe DIN 18 122 Teil 1

Tabelle 42: Korrelationen für Konsolidierungsparameter [Bo97]

Compression index, C_c	Comments	Source/Reference
$C_c = 0.009(w_L - 10)$ ($\pm 30\%$ error)	Clays of moderate S_r	Terzaghi and Peck (1967)
$C_c = 0.37(e_o + 0.003w_L + 0.0004w_N - 0.34)$	678 data points	Azzouz et al. (1976)
$C_c = 0.141G_s \left(\frac{\gamma_{\text{sat}}}{\gamma_{\text{dry}}} \right)^{2.4}$	All clays	Rendon-Herrero (1983)
$C_c = 0.0093w_N$	109 data points	Koppula (1981)
$C_c = -0.0997 + 0.009w_L + 0.0014I_P + 0.0036w_N + 0.1165e_o + 0.0025C_P$	109 data points	Koppula (1981)
$C_c = 0.329[w_N G_s - 0.027w_P + 0.0133I_P(1.192 + C_P/I_P)]$	All inorganic clays	Carrier (1985)
$C_c = 0.046 + 0.0104I_P$	Best for $I_P < 50\%$	Nakase et al. (1988)
$C_c = 0.00234w_L G_s$	All inorganic clays	Nagaraj and Srinivasa Murthy (1985, 1986)
$C_c = 1.15(e_o - 0.35)$	All clays	Nishida (1956)
$C_c = 0.009w_N + 0.005w_L$	All clays	Koppula (1986)
$C_c = -0.156 + 0.411e_o + 0.00058w_L$	72 data points	Al-Khafaji and Andersland (1992)
Recompression index, C_r		
$C_r = 0.000463w_L G_s$		Nagaraj and Srinivasa Murthy (1985)
$C_r = 0.00194(I_P - 4.6)$ $= 0.05$ to $0.1C_c$	Best for $I_P < 50\%$ In desperation	Nakase et al. (1988)
Secondary compression index, C_α		
$C_\alpha = 0.00168 + 0.00033I_P$ $= 0.0001w_N$		Nakase et al. (1988) NAFAC DM7.1 p. 7.1-237
$C_\alpha = 0.032C_c$ $= 0.06$ to $0.07C_c$ $= 0.015$ to $0.03C_c$	$0.025 < C_\alpha < 0.1$ Peats and organic soil Sandy clays	Mesri and Godlewski (1977) Mesri (1986) Mesri et al. (1990)
Notes: 1. Use w_L , w_P , w_N , I_P as percent, not decimal. 2. One may compute the in situ void ratio as $e_o = w_N G_s$ if $S \rightarrow 100$ percent. 3. C_P = percent clay (usually material finer than 0.002 mm). 4. Equations that use e_o , w_N , and w_L are for both normally and overconsolidated soils.		

5. ERGEBNISSE UND EMPFEHLUNGEN

Im Folgenden sollen die Fragestellungen aus der Zielstellung in Kapitel 1.2 beantwortet werden.

- a) Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen im Labor haben gezeigt, dass die empfindliche Struktur der Ascheböden einen großen Einfluss auf die Bestimmung der Bodenkennwerte hat. Der Wassergehalt beherrscht die Eigenschaften des Materials maßgeblich. Dabei werden die Laborergebnisse bereits ab der Probenentnahme beeinflusst, weil auch kleine Wasserverluste vor Ort oder während der ersten Verarbeitungsschritte im Labor auftreten können. Diese Veränderungen sind auch durch eine spätere Wasserzugabe nicht umkehrbar. Wasserverluste, die durch zeitliche Verzögerung zwischen der Bestimmung einzelner Kennwerte auftreten, führen zu erheblichen Streuungen der Ergebnisse und somit zu einem Verlust der Proportionalität zwischen den Messwerten.

Es hat sich gezeigt, dass der Wassergehalt und der Allophananteil, der Wassergehalt und die Fließgrenze bzw. der Wassergehalt und die Trockendichte eine Abhängigkeit voneinander aufweisen. Hierdurch ist es möglich, den Boden im Labor eindeutig zu beschreiben. Es ist aber nicht möglich, nach Wasserverlust die Eigenschaften des Bodens in situ zu charakterisieren. Im Gegensatz zu traditionellen Böden können die Laborergebnisse aus der Untersuchung von Aschen nur sehr beschränkt auf die in situ vorhandenen Bedingungen übertragen werden.

Für die Durchführung der Laboruntersuchungen werden die Proben mehrfach aufbereitet (Remoulding). Diese Umformung hat zur Folge, dass auf Grund der Empfindlichkeit die inneren Strukturen dauerhaft verändert werden und damit die zu ermittelnden Parameter im Wesentlichen abhängig von der Art und Weise der Behandlung der Proben sind.

Die erzielten Parameter sind dann nicht in ähnlicher Weise wie die von anderen Böden zu interpretieren.

Wegen der niedrigen Zusammendrückbarkeit in den niedrigen Laststufen (vor Erreichen des „scheinbaren“ Überlagerungsdrucks), sind die Kompressionsbeiwerte C_s bei vulkanischen Böden klein und vergleichbar mit denen anderer Bodenarten. Die Kompressionsbeiwerte C_c können jedoch sehr viel höher als bei den traditionellen Böden ausfallen. Bei den traditionellen Böden können diese Kompressionsbeiwerte anhand von Korrelationen aus der Fließgrenze und der Porenzahl abgeschätzt werden (s. Tabelle 42). Eine solche Abschätzung sollte bei Ascheböden nur mit großer Vorsicht angewandt werden.

Obwohl Ascheböden in Laborversuchen sehr hohe Porenzahlen aufweisen (von 2,5 bis 7) sind vulkanische Ascheböden im ungestörten Zustand normalerweise nur

geringfügig zusammendrückbar. Der Grund dafür liegt in der Struktur des Bodens und der Zementierung zwischen den Partikeln.

Beim Verdichtungsprozess steigt die Festigkeit bei diesen Böden nicht proportional mit der Trockendichte an. Dieses kann mit der hohen Sensitivität des Bodens begründet werden, in dem durch die Störung der Struktur eine Zunahme der Festigkeit verhindert wird.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei manchen Proben Anomalien vorkommen können, wie zum Beispiel eine Klassifizierung als schluffiger Sand SM trotz hoher Wassergehalte, die in den meisten Fällen sogar höher sind als die eigene Fließgrenze. Die Einstufung als schluffiger Sand SM liegt möglicherweise daran, dass die Bodenproben während des Prozesses trocknen und so größere Partikel bilden, was zu einer fehlerhaften Bestimmung der Korngrößenverteilungen führt und damit die eigentlichen Eigenschaften als bindigen Boden überdeckt.

- b) Die in den Aschen enthaltenen mineralische Stoffe wie Allophane, Imogolite und Halloysite und deren offene Struktur in Form von Kugeln, Fäden und Röhren, steuern das Verhalten dieses Materials. Die anderen Komponenten wie Quarz, Feldspat, Amphibole, Pyroxene, Cristobalit, Epidot, Illit, Vermiculit kommen bei vielen der traditionellen Böden vor, ohne ein besonderes Verhalten zu erzeugen.

Der Einfluss der Allophane, Imogolite und Halloysite wird sichtbar, wenn die Bodenproben zermahlen, getrocknet, befeuchtet oder mit sandigen Böden vermischt werden. Hierbei wirken sich die Eigenschaften der vulkanischen Ascheböden auf das behandelte kohäsionslose Material festigend aus.

- c) Die Analyse der Scherfestigkeit zum Nachweis einer Zementierung hat gezeigt, dass durch natürliche Trocknung des Bodens bei Bauarbeiten eine hohe Festigkeit erzeugt wird. Diese wird durch eine Durchfeuchtung stark reduziert. Bei den Laboruntersuchungen sind wesentliche Expansionskräfte ermittelt worden, die bei einem Auftreten unter natürlichen Bedingungen zu Erosion führen können und die Standfestigkeit von Böschungen stark beeinträchtigen.

Empfehlungen

- Labor-Ergebnisse sollten als vorläufige Ergebnisse betrachtet werden, die nicht unbedingt den Merkmalen des Materials in situ entsprechen und die sich auch später unter bestimmten klimatischen Umständen verändern können.

Es wird empfohlen, auf die Verwendung der Schlämmanalyse zu verzichten. Wenn es sich um eine Differenzierung oder Identifizierung des Materials handelt, ist eine direkte mineralogische Beschreibung der feineren Partikeln, anhand von zum Beispiel Elektronenmikroskop-, Thermodifferential- und Röntgenstrahlanalyse, zielführender.

Zur mechanischen Charakterisierung der Böden in situ wird die Anwendung von Flügelsonde und Cone-Penetrometer empfohlen.

Laboruntersuchungen zur Bestimmung von Festigkeitsparametern sollen die realen klimatischen Bedingungen der Böden auf der Baustelle simulieren. Verarbeitungsbedingte Parameter sind zu ermitteln.

- Fließgrenzen-, Ausrollgrenzen- und Plastizitätsbestimmung sollten als Verfahren zur Charakterisierung dieser Bodenarten in Frage gestellt werden.
- Gleiche Bodenschichten können in verschiedenen Zonen unterschiedlichen klimatischen Bedingungen unterworfen gewesen sein und daher unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Deshalb sollten für den geotechnischen Entwurf (wie in der Praxis üblich) keine Parameter von benachbarten Projekten übernommen werden, da sie sich von den lokalen erheblich unterscheiden können.
- Die mit der Trocknung verbundene Bildung von grobkörnigem Material kann den Verdichtungsvorgang durch eine bessere Verarbeitbarkeit positiv beeinflussen. Durch die Trocknung eines ungestörten Aschebodens verringern sich die Hohlräume durch Schrumpfen und es wird eine Zunahme der Kohäsion bewirkt.
- Im Gegensatz hierzu sollte, um eine Beschädigung natürlich anstehenden Bodens zu verhindern, bei Herstellung von Böschungen ein Schutz vor Austrocknung vorgesehen werden.
- Die abgeleiteten Parameter dürfen nicht wie die von traditionellen feinen Böden interpretiert werden. Korrelationen, wie die der Norm DIN 1055 [DI11], die aus der Konsistenzzahl eine Abschätzung der Scherparameter erlauben, sind wegen der außergewöhnlichen Plastizitätsmerkmale der Aschen nicht anwendbar. Böden bei denen negative Konsistenzzahlen möglich sind, werden in der DIN 1055 nicht erfasst. Es ist zu erwägen, die Norm über die Bodenproben mit „traditionellen“ Konsistenzzahlen hinaus auf die untersuchten speziellen Böden zu erweitern. Hierzu wären umfangreiche Untersuchungen nötig.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit widmet sich dem besonderen Verhalten vulkanischer Ascheböden. Zu diesen Eigenschaften zählen zum Beispiel eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit, hohe Zustandsgrenzen, eine geringe Zusammendrückbarkeit im ungestörten Zustand, hohe Porenzahlen und trotzdem eine hohe Scherfestigkeit.

Die Untersuchung der Veränderung dieser Eigenschaften unter speziellen Randbedingungen wie der Trocknung oder der Zermahlung der Ascheböden, führt zur sachgerechten Interpretation der Stoffparameter. Das Verständnis dieser Parameter ist wichtig, da die Mechanismen von häufig auftretenden Böschungsbrüchen und ganz allgemein die Schwierigkeiten, die bei Straßenbauprojekten mit Ascheböden auftreten, hiermit besser zu verstehen sind.

Die im Labor untersuchten Versuchsproben stammen aus einer Zone der Kaffee-Achse Kolumbiens. Diese Region ist vor 25.000 Jahren im Quartärs durch Ausbrüche einer Kette von Vulkanen geprägt worden. Hierdurch haben sich Ascheablagerungen von bis zu 25 m Dicke entwickelt.

Mit Hilfe einer umfangreichen Literaturrecherche, die für die Bereiche Mineralogie, Bodenkunde und Agrarwissenschaft durchgeführt wurde, wird der aktuelle Stand hinsichtlich einer geotechnischen Betrachtung vulkanischer Ascheböden dargestellt.

Spezielle mineralische Bestandteile wie Allophane, Imogolite und Halloysite, die aus der Verwitterung von vulkanischem Glas, und durch unterschiedliche klimatische Bedingungen eine einzigartige Nanostruktur bekommen, werden in der Literatur als ausschlaggebend für die besonderen geotechnischen Merkmale beschrieben.

Die chemische Untersuchung der Allophananteile einer Gruppe von Bodenproben ermöglicht die Beobachtung von direkten Beziehungen zwischen Allophan und grundlegenden Merkmalen wie Zustandsgrenzen und Wassergehalt. Ein gewisser, wenn auch geringer, Zusammenhang mit der Einaxialdruckfestigkeit ist zu erkennen. Die Beziehung des Allophananteils zur Trockendichte ist linear, wobei hohe Anteile mit geringen Trockendichten verbunden sind.

Durch Röntgenstrahlanalyse wird eine mineralogische Beschreibung der Bestandteile vulkanischer Ascheböden der Region ermöglicht. Quarz, Feldspat, Amphibole, Pyroxene, Cristobalit, Epidot, Illit, Vermiculit gehören zu den wichtigsten Komponenten.

Von Andere Elemente, wie z.B. Montmorillonit, Micas (Glimmer, Moskovit) oder Smektit, die bei traditionellen Tonen ein besonderes Wasserbindungsvermögen, eine hohe Plastizität oder das Schwellen und Schrumpfen des Bodens hervorrufen, waren nicht nachweisbar, wie auch organische Anteile nur in geringen Mengen festgestellt werden konnten. Mittels Röntgenanalyse konnte belegt werden, dass durch Trocknung und Zermahlung der Proben sich eine Veränderung der amorphen Bestandteile einstellt,

womit zusätzliche Informationen über das Vorhandensein dieser Substanzen geliefert werden kann.

In einem weiteren Schritt wird der Effekt der Trocknung und der Materialhandhabung bei der Bestimmung der Zustandsgrenzen untersucht. In Kolumbien ist bekannt, dass durch Trocknung eine unumkehrbare Veränderung der Plastizität erfolgt. Deshalb werden seit mehreren Jahren die Zustandsgrenzen im Labor ohne Trocknung des Materials bestimmt. Es hat sich aber herausgestellt, dass auch leichte Wasserverluste, die ab der Probeentnahme und der Vorbereitung im Labor unbemerkt auftreten, einen Einfluss auf die Ergebnisse haben können.

Eine Datenanalyse (Kapitel 4) hat gezeigt, dass die Ergebnisse der Zustandsgrenzen nicht chaotisch verteilt sind. Zudem scheint der zuvor beschriebene geringe Wasserverlust die "wirklichen" Parameter der Zustandsgrenzen nur in geringem Maße zu verändern. Wichtiges Ergebnis ist, dass die hohen ursprünglichen Wassergehalte, die in situ zu finden sind, in den meisten Fällen schon über der Fließgrenze dieses Materials liegen, obwohl senkrechte Böschungen für viele Jahre standfest bleiben. Dies verdeutlicht noch einmal, dass diese Parameter bei vulkanischen Aschen nicht wie bei traditionellen Böden interpretiert werden können. Sie können dazu genutzt werden, Ascheböden voneinander zu unterscheiden.

Die komplizierte Beziehung zwischen Wassergehalt und Festigkeit kommt besonders bei Verdichtungsarbeiten zum Tragen. Da sich aus dem Proctorversuch nur leicht gekrümmte Proctor-Kurven ergeben, ist die Bestimmung des optimalen Wassergehaltes erschwert. Zusätzlich führt die Erhöhung der Verdichtungsenergie zur Aufweichung des Materials. Dieses Problem wurde im Labor durch einen wiederholten Prozess untersucht. Bodenproben wurden mehrmals verdichtet und im Einaxialdruckversuch getestet. Dabei treten je nach Plastizität (die in einem direkten Verhältnis zum Allophananteil steht) unterschiedliche Verhaltensmuster auf, die keinen schlüssigen Zusammenhang zwischen Wassergehalt, Trockendichte und Festigkeit ergeben.

Eine weitere Komplikation ergibt sich aus der Relation von hohen Porenzahlwerten zu den geringen Zusammendrückbarkeiten von Aschen im ungestörten Zustand. Dieses Verhalten ist sehr unterschiedlich im Vergleich mit anderen feinkörnigen Böden. Im Ödometerversuch wird normalerweise ein Überkonsolidationsdruck bestimmt, dessen Überschreitung mit einer deutlichen Zunahme der Zusammendrückbarkeit verbunden ist. Dieser Überkonsolidationsdruck, der keine Beziehung zu einer Vorbelastung hat, wird bis heute als ein Effekt von physikalischen und chemischen Bindungen zwischen den Partikeln (Zementierung) angenommen.

In diesem Zusammenhang war von großer Bedeutung, ob der Überkonsolidationsdruck der Aschen durch Trocknung infolge Verdunstung bei gewöhnlichen tropischen Temperaturen, beeinflusst wird. Diese Untersuchung im Labor durch Ödometer- und Kastenscherversuche, ergibt eine Verminderung der Porenzahl mit der Trocknungstemperatur und eine Verfestigung durch die Zunahme der Kohäsion. Deutliche Tendenzen oder ein steigender Überkonsolidationsdruck mit der Trocknungstemperatur waren nicht nachweisbar.

Die Steigerung der Festigkeit von sandigen Böden durch Zugabe von plastischen Ascheböden konnte nachgewiesen werden. Die besonderen Bestandteile der Aschen (Allophane, Imogolite, Halloysite) erzeugen diese Verbesserung. Durch Beimengung von etwa 20% Asche werden nicht nur Verbesserungen des Steifemoduls im Vergleich zu den originalen, nicht behandelten Bodenproben erreicht, sondern auch erhebliche Zunahmen der Druckfestigkeit. Es konnten teilweise Werte von mehr als dem Doppelten der Festigkeit der ursprünglichen sandigen Bodenproben ermittelt werden. Ergänzend wurde festgestellt, dass sowohl der Wassergehalt wie auch zermahlene Zugaben von Ascheböden eine effektive puzzolanische Wirkung haben. Es ist aber anzumerken, dass Festigkeit und Trockendichte keine direkte Beziehung zueinander besitzen.

Abschließend wurde durch die Analyse der Scherfestigkeit der Zusammenhang zwischen der festgestellten Zementierung und den in der Realität vorhandenen Böschungsbrüchen und damit der Dauerhaftigkeit der Festigkeit vor Ort bei natürlicher Bewitterung nach Fertigstellung der Bauarbeiten untersucht. Durch einen mehrstufigen Triaxialversuch wurde eine typische Situation modelliert und die Festigkeit im ungestörten, an der Luft getrockneten und im gesättigten Zustand getestet. Die schon bekannte hohe Festigkeit, die sich beim Trocknen einstellt, wird durch eine erneute Sättigung stark reduziert. Bei den Versuchen traten erhebliche Expansionskräfte (ca. 0,1 kN) auf, die die Standfestigkeit von Böschungen beeinträchtigen können.

Die Empfindlichkeit und die Unbeständigkeit der Materialparameter, die sich im Verlauf der Arbeit offenbart haben, wurden als Anlass genommen, eine breit angelegte Analyse einer Vielfalt von Labordaten vorzunehmen, wobei angestrebt wird, Beziehungen zwischen den Materialparametern aufzuzeigen. Das Programm WEKA ermöglicht als Data-Mining Werkzeug die Analyse eines Datenpools von insgesamt 1617 Bodenproben, von denen Entnahmetiefe, Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Klassifizierung, Einaxialdruckfestigkeit und Trockendichte vorliegen.

Hierbei bilden sich mindestens zwei Gruppen heraus. 480 Bodenproben sind als „sandiger Schluff“ SM klassifiziert und haben meistens einen Wassergehalt, der über der Fließgrenze liegt. Die sich damit ergebenden negativen Werte der Konsistenzzahl machten die Schaffung eines neuen Begriffes notwendig, der als „Un-Konsistenzzahl“ benannt wird und die Lage des Wassergehalts oberhalb der Fließgrenze repräsentiert. Die Höhe dieser „Un-Konsistenzzahl“ für die erwähnte Probengruppe ist deutlich größer als der Wert der Konsistenzzahlen der anderen Bodenproben. Die Einaxialdruckfestigkeit der mit der Un-Konsistenzzahl benannten Proben ist stets kleiner als die der anderen Proben.

Die zweite Gruppe Proben, die im Allgemeinen als MH klassifiziert wird, hat im Durchschnitt deutlich höhere Wassergehalte, Zustandsgrenzen und Einaxialdruckfestigkeiten im Vergleich zu den SM Proben der ersten Gruppe. Kein Merkmal in beiden Gruppen hat eine erkennbare Abhängigkeit zur Entnahmetiefe der Bodenprobe, SM-Böden treten fast nur in den oberen Schichten (<6,0m Tiefe) auf.

In der gesamten Datenbasis zeigt sich von allen analysierten Materialparametern nur bei der Trockendichte eine deutliche Beziehung zum Wassergehalt (und damit auch der

Fließgrenze). Mit steigendem Wassergehalt sinken die Trockendichten. Die Beziehung lässt sich mit einer Potenzfunktion beschreiben. Die Korrelation verbessert sich wenn die SM Gruppe aus der Datenbasis entfernt wird.

Die Feststellung dieser Beziehungen deutet darauf hin, dass die Störungen, die bei der Behandlung auftreten können, nicht stark genug sind, um große Streuung der Daten zu verursachen und dass diese Merkmale, auch wenn nicht mit den Ergebnissen traditioneller Böden vergleichbar, aber für die Differenzierung von vulkanischen Aschen untereinander nützlich sind.

LITERATUR

- [All89] Allen, B.L.; Hajek, B.F. (1989): Mineral occurrence in soil environments.- SSSA Book Series No.1. 2nd Ed.
- [AP05] Applied Ceramic Technology (2005). - SACMI IMOLA Vol 1. Imola, Italy
- [Ar93] Arango, J.D. (1993): Características Generales y Comportamiento Geotécnico de las Cenizas Volcánicas en la Zona del Viejo Caldas.- MSc Thesis, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- [AS11] ASTM Standard D2487-11. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI 10.1520/D2487-11 www.astm.org.
- [Ba90] Bailey, S.W. (1990): Halloysite- A critical assessment. - Proceedings of the 9th International Clay Conference, Strasbourg, 1989. V.C. Farmer and Y. Tardy (Eds.). Sci. Géol. Mém.,85, p.89-98, Strasbourg.
- [Ba96] Bakker, L.; Lowe, D.J.; Jongmans, A.G. (1996): Amicromorphological study of pedogenic processes in an evolutionary soil sequence formed on Late Quaternary rhyolitic tephra deposits, North Island, New Zealand.- Quat. Int. 34-36:249-261.
- [Be68] Besoain, E. (1968): Imogolite in volcanic Soils of Chile. - Geoderma 2(2) 151-169.
- [Bo97] Bowles, J.E. (1997): Foundation Analysis and Design. The McGraw-Hill Companies, Inc. 5 Ed.
- [Bu91] Buol, S. W.; Hole, F.D.; McCracken, R.J. (1991): Soil Genesis and Classification.- The Iowa State University Press, Ames, Iowa, E.U.A.
- [Ca01] Cascaredo, A.; u. a. (2001): Estimation of Allophane and its Relationship with Other Chemical Parameters in Mountain Andisols of the Volcano Cofre de Perote. - Terra 19: 105-116.
- [Ch03] Chadwick, O.A.; u.a. (2003): The impact of climate on de biogeochemical functioning of volcanic soils. - Chemical Geology, 202 (3-4): 461-478.
- [Ch75] Churchman, G.J.; Carr, R. M. (1975): The Definition and nomenclature of Halloysites. - Clays and Clay Minerals, Vol 23, pp. 382-388. Pergamon Press. Great Britain.
- [Co05] Correa, F. (2005): Identificación de Parámetros Dinámicos por Medio de un Sistema Neuro-Genético.- Tesis de Grado. Universidad Nacional Autónoma de México.

- [Da94] Dahlgren, R.A. (1994): Quantification of allophane and imogolite.- J.E. Amonette and L. Zelazny (ed.) Quantitative Methods in Soil Mineralogy. Soil Science Society of America. Madison, WI. pp. 430-451.
- [De73] De, P.K.; Furdas, B. (1973): Discussion on Wallace. - Geotechnique 23, 601-603.
- [DI11] DIN 1055-2 (2010-11). Lastannahmen für Bauten: Bodenkenngrößen, Wichte, Reibungswinkel, Kohäsion, Wandreibungswinkel.- Seite 9ff. Abschnitt 4.
- [Du97] Dunoyer, M.; Aguirre, Y. (1997): Identificación y caracterización macroscópica de la secuencia de tefras de la Ciudad de Armenia.- Corporación Autónoma Regional del Quindío. Manizales. 46p.
- [En08] Enciclopedia of Soil Science (2008): Ward Chesworth (Ed). Springer. The Netherlands
- [Fi01] Fiantis, D.; Nelson, M.; u.a. (2001): Changes in the Chemical and Mineralogical Properties of Mt. Talang Volcanic Ash in West Sumatra during the initial Weathering Phase. – Commun. Soil Sci. Plant Anal. Vol 42, No.5, 568-585.
- [Fi11] Fiedler, S. (2011): Skripte zur Vorlesung Podsolierung. Universität Hohenheim.https://www.uni-hohenheim.de/tebaldi/lehre/pics/skripte_Podsolierung_final.pdf
- [Fi96] Fieldes, M., (1966): The nature of allophane in soils, Part 1. Significance of structural randomness in pedogenesis.- New Zealand Jnl of Science 9, No.3, 599-607.
- [Fi66] Fieldes, M.; Furkert, R. J. (1966): The nature of allophane in soils: Part 2. Differences in composition. - New Zealand Jnl of Science 9, No.3, 608-622.
- [Fi84] Fisher, R.V; Shimincke H.U.(1984): Pyroclastic Rocks.- Springer Verlag. Berlin.
- [Fo98] Forero, C.A. (1998): Characterisation of a Silica-Gel as a Geotechnical Cement. -Thesis Doctor of Philosophy of the University of London, Imperial College of Science.
- [Fo98] Forero, C.A.; de Freitas M.H; u.a (1998): Influence of Water Content on The Mechanical Properties of a Silica-Gel.- III World Congress on Particle Technology, Brighton, U.K.
- [Fo99] Forero, C.A.; Gálvez, P., u.a. (1999): Estudios de la estructura de las cenizas volcánicas de Armenia y su relación con el comportamiento geotécnico.- X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Boletín Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia.

- [Fo00] Forero, C.A.; Ulloa, E.F.; Pinzón, A.I. (2000): Algunos Aspectos del Comportamiento de Cenizas Volcánicas sobre el Glasis del Quindío. – VIII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá, Colombia.
- [Gi86] Giraldo, A.; Martínez, N.; Ramos, L. (1986): Tercer aporte al Estudio de las Características Geotécnicas y Estabilidad de Taludes en los Suelos Residuales.- Trabajo de Grado. Universidad del Quindío, Facultad de Ingeniería Civil.
- [Gö16] Göttingische gelehrte Unzeigen: Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften (1816).- Der zweite Band.
- [GU07] Graz University of Technology. (2007): Skriptum. Felsmechanik und Tunnelbau. Erhältlich im Internet unter:
<http://tunnel.tugraz.at/fileadmin/tunnel/files/additional/Skriptum.pdf>
- [Gr68] Grim, R. E. (1968): Clay Mineralogy. 2da Ed. McGraw Hill, New York.
- [He76] Henmi, T.; Wada, K. (1976): Morphology and composition of allophane.- Amer. Miner. 61, 379-390.
- [Im82] Imeson A. C.; u.a. (1982): A survey of soil erosion processes in tropical forest ecosystems on volcanic ash soils in the Central Andean Cordillera, Colombia. - Geografika Annaler. Series A, Physical Geography 64 (3/4).
- [IN99] INGEOMINAS, (1999). Terremoto del Quindío – Enero 25 de 1999. Caracterización geotécnica general del suelo.- Capítulo 5.- In: Aspectos geodinámicos regionales, Vol II Zonificación sismogeotécnica indicativa para la reconstrucción de Armenia. Informe técnico científico. Bogotá
- [IN00] INGEOMINAS, (2000): Zonificación de la Amenaza Geológica de los Municipios del Eje Cafetero afectados por el sismo del 25 de enero de 1999. (Geologische Gefahr Zoneneinteilung für die Länder der Kaffe Achse, betroffen nach dem Erdbeben der 25 Januar 1999). Bogotá.
- [Ja89] Jacquet, D. (1989): Sensitivity to Remoulding of some Volcanic Ash Soils in New Zealand.- Engineering Geology, 28 (1990) 1-25
- [Ja86] James, M. (1986). Estudio sismotectónico en el area del Viejo Caldas. Informe final 2008.- In: Revista de la Academia colombiana de ciencias exactes, físicas y . Volume 32, No. 123. Ingeominas Medellín.
- [Kr 98] Krahl, D.; Windheuser, U.; Zick, F. K. (1998): Data Mining, Einsatz in der Praxis.- Verlag Addison-Wesley. Bonn, Deutschland, 1998. ISBN 3-8273-1349-X
- [Ku78] Kuno, G.; Shinoki, R.; Kondo, T.; Tsuchiya, C.(1978): Clay fills. Institution of Civil Engineers. London, p.149-156.

- [La03] Lang, H.J.; Huder, J.; Amann, P.(2003): Bodenmechanick und Grudbau. -7^{te} Auflage. Springer Verlag.Germany.
- [Li70] Limura, K. (1970): An aspect on the water in allophane.- Abs. Ann. Meet. Soc. Sci. Soil Manure. Japan. 16, 149.
- [Li91] Linero, C. (1991): Evaluación de la Utilización del Ensayo Triaxial Escalonado.- Tesis de Grado. Universidad de Medellín.
- [Lo02] López, J.; Raigoza, L. (2002): Implementación de la Base de Datos de los Ensayos de Suelos del Laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. - Tesis de Grado. Universidad Nacional. Manizales.
- [Ma83] Maeda, T. (1983): Physical and engineering characteristics of volcanic ash soils in Japan compared with those in other countries.- Irrig. Eng. Rural Planning 3:16-31.1983.
- [Ma85] Maeda, T.; Soma, K. (1985): Classification of andisols in Japan based on physical properties.- Proceedings of the International Clay Conference, Denver. The Clay Minerals Society, Bloomington, Indiana, 174-178.
- [Ma77] Maeda, T.; Takenaka, H.; Warkentin, B.P. (1977): Physical properties of allophane soils.- Adv. Agron. 29, 229-264.
- [Me95] Mejía, O. (1995): Algunas propiedades geotécnicas de los suelos cohesivos derivados de tefra predominantes en el Departamento de Caldas. In: Boletín de vías No.82. Vol. XXII(95). 63-119.
- [Mi93] Mitchell, J.K. (1993): Fundamentals of soil behavior.- 2nd ed. John Wilwy and Sons, Inc., New York.
- [Mi91] Mitchell, J.K.; Coutinho, R.Q; et al. (1991): Occurrence, Geotechnical Properties, and Special Problems of some Soils of America.- Special report for the Ninth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Viña del Mar, Chile, August, Vol. 4, pp.1651-1741
- [Mo72] Mohr, E.C.;Van Baren, F.A.;Van Shuylenborg, J. (1972): Andosols. Tropical Soils: A Comprehensive Study of Their Genesis.- Mouton –Ichtiar Baru-Van Hoeve. 3r ed. The Hague, The Netherlands, 481p.
- [Na98] Nagaraj, T.S.; u.a. (1998): Compressibility behavior of soft cemented soils. Technique Note. - Gèotechnique 48(2): 281-287.
- [Na00] Nagaraj, T.S.;u.a. (2000): Compressibility behavior of soft cemented soils. Discussion.- Gèotechnique 50(3): 297-300.
- [Na04] Nanzyo, M. (2004): Unique properties of volcanic ash soils.- Global Environmental Research Vol.6 No.2. Association of International Research Initiatives for Environmental Studies (AIRIES), Japan.

- [Na93] Nanzyo, M.; Shoji, S. (1993): Properties of Andosols from the northern part of circum-pacific volcanic zone, II. Chemical properties based on Andisol TU database. - *Pedologist*, 37:87-95.
- [Ni00] Nieuwenhuysse, A.; Verburg, P.S.J.; Jongmans, A.G. (2000): Mineralogy of a soil chronosequence on andesitic lava in humid tropical Costa Rica.- *Geoderma* Volume 98, Issues 1-2, November 2000, Pages 61-82
- [Ni97] Nizeyimana, E.; Bicki, T.J.; Agbu, P.A. (1997): An assessment of colloidal constituents and clay mineralogy of soils derived from volcanic materials along a toposequence in Rwanda. *Soil Sci.* 162: 361–371.
- [OR88] O'Rourke, T.D.; Crespo, E. (1988): Geotechnical Properties of Cemented Volcanic Soil. - *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. Vol 114. No. 10.
- [Pa82] Parfitt, R. L.; Henmi, T. (1982): Comparison on an oxalate-extraction method and an infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays. In: *Soil science and plant nutrition*. 28: 183-190
- [Pa90] Parfitt, R.L. (1990): Allophane in New Zealand-A Review. -*Aust. J. Soil Res.*, 28, 343-360.
- [Pa90b] Parfitt, R.L. (1990b): Estimation of imogolite in soils & clays by DTA. - *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 21, 623_628.
- [Pa09] Parfitt, R.L. (2009): Allophane and imogolite: role in soil biochemical processes. - *Clay Minerals*. v 44. no.1. p:135-155.
- [Pa80] Parfitt, R.L.; Furkert, R.J. (1980): Identification and Structure of two types of Allophane from Volcanic Ash Soils and Tephra.- *Clays and Clay Minerals*, Vol. 28. No.5, 328-334.
- [Pa89] Parfitt, R.L.; Kimble J.M. (1989): Conditions for formation of allophane soils. - *Soil Sci. Soc Am. J.* 53: 971-977.
- [Pa83] Parfitt, R.L.; Russell, M; Orbell, G.E. (1983): Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zealand.- *Geoderma* 29: 41-57.
- [Pa84] Parfitt, R.L.; Saigusa, M.; Cowie, J.D. (1984): Allophane and halloysite formation in a volcanic ash bed under different moisture conditions.- *Soil Sci.* 138: 360-364.
- [Pa85] Parfitt, R.L.; Wilson, A.D. (1985): Estimation of allophane an halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand.- *Volcanic Soils*. Caldas, E.F. Yaalon, D.H. (Eds.), *Catena Supplement*, 7:1-8.

- [Pe91] Peart, M. (1991): Allophane and Halloysite: Index and Engineering Properties. - Technical notes, Vol 91, Vol 95. Geological Survey of Papua New Guinea, Department of Minerals and Energy.
- [Po99] Poudel, D.D.; West, L. T. (1999): Soil Development and Fertility Characteristics of a Volcanic Slope in Mindanao, the Philippines.- Soil Science Society of America Journal 63:1258-1273.
- [Pr07] Press, F.; Siever.R. (2007): Allgemeine Geologie.- Spektrum Akademischer Verlag. p736
- [Qu88] Quantin P.; Gautheyrou, J.; Lorenzoni P. (1988): Halloysite formation through insitu weathering of volcanic glass from trachytic pumices, Vico's Volcano, Italy. - Clay Min. 23 (4): 423-437.
- [Ra95] Rao, S.M. (1995): Mechanistic approach to the shear strength behaviour of allophanic soils.- Engineering Geology 40, 215-221.
- [Ri03] Riley, C.M.; Rose W.I.; Bluth, G.J.S. (2003): Quantitative shape measurements of distal volcanic ash.- Journal of Geophysical Research 108 (B10).
- [Ro34] Ross, C.S.; Kerr, P.F. (1934): Halloysite and allophone.- U.S. Geological Survey Professional Paper. p.185-189.
- [Ro86] Rouse, W. (1986): Volcanic soil properties in Dominica, West Indies.- Engineering Geology, 23: 1-28.
- [Sh93] Shoji S.; Nanzyo, M.; Dahlgren R.A. (1993): Volcanic Ash Soils: Genesis, properties and utilization.- Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, The Netherlands.
- [Si02] Simón, M.; Donrronsoro, C.; Ortiz, I.; u.a.(2002): Pollution of carbonate soils in a Mediterranean climate due to a tailing spill.- European Journal of Soil Science, 53. No.2, 321-330.
- [Si96] Singh, B. (1996): Why does Halloysite roll?- A new Model.- Clays and Clay Minerals, Vol. 44, No.2, 191-196.
- [Si89] Singleton, P.L.; McLeod, M.; Percival, H.J. (1989): Allophane and halloysite content and soil solution silicon in soils from rhyolitic volcanic material, New Zealand. -Aust. J. Soil Res. 27:67-77
- [So98] So, Ei-Kon.(1998): Statistical correlation between allophane content and index properties for volcanic cohesive soil.- Soils and Foundations. Japanese Geotechnical Society. Vol. 38. No.4, 85 -93.

- [St85] Stevens, K.F.; Vucetich, C.G. (1985): Weathering of Upper Quaternary tephras in New Zealand, 2. Clay minerals and their climatic interpretation.- Chem.Geol. 53:237–247.
- [Ta93] Takahashi, T.; Dahlgren, R.; van Susteren, P. (1993): Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic materials in the xeric moisture regime of northern California.- Geoderma 59:131–150.
- [Ta84] Tan.,K.H. (1984): Andosols. -Benchmark Papers in Soil Sciences, Volume 4.
- [Th95] Thomas, B.R. (1995): Application of evaporative dewatering methods to allow the use of wet fills in the construction of earthworks.- Engineering Geology Special Publications, Geological Society, London, 10:237-244
- [ToS83] Tomura, S.Y.; Shibasaki H.; Kitamura M. (1983): Spherical kaolinite: synthesis and mineralogical properties.- Clays an Clay Minerals 31(6): 413-421.
- [To83] Tomura, S.Y.; Shibasaki, Y.; Kitamura M. (1983): Growth Conditions an Genesis of Spherical and Platy Kaolinite.- Clay an Clay Minerals 33:200-206.
- [To85] Townsend, F. C. (1985): Geotechnical Characteristics of Residual Soils.- Journal of Geotechnical Engineering 111(1): 77-94.
- [Ug04] Ugolini, F.; Dahlgren, R.A. (2004): Soil development in volcanic ash.- Global Environmental Research, Association of International Research Initiatives for Environmental Studies (AIRIES), Japan ,Vol.6. No. 2.
- [Va02] Van Rants E.; Utami, S.R.; Shamshuddin J. (2002): Andisols on volcanic ash from Java Island, Indonesia: Physico-chemical properties and classification.- Soil Science 167(1): 68-79.
- [Va88] Vaughan, P.R. (1988): Characterizing the mechanical properties of in-situ residual soils. In: Proc. 2nd Int. Conf. on Geomechanics in Tropical Soils, Singapore 2, 20-37.
- [Ve92] Velde, B. (1992): Introduction to Clay Minerals. Chemistry, Origins, Uses and Environmental Significance.- Chapman & Hall. London.
- [Gr01] Von Soos, P. (2001): Konsistenzgrenzen. In: Grundbau Taschenbuch. Teil 1: Geotechnische Grundlagen.. Karl Josef Witt (Ed). 6^{te} Auflage. Ernst & Sohn. Germany. p.138
- [Wa87] Wada, K. (1987): Minerals formed and mineral formation from volcanic ash by weathering.- Chemical Geology, 60:17-28.

- [Wa89] Wada, K. (1989): Allophane and imogolite. In: Minerals in Soil Environment, J.B. Dixon and S.B. Weed (Editors), SSSA Madison, WI, USA., pp. 1051-1087.
- [Wa90] Wada, K. (1990): Minerals and mineral formation in soils derived from volcanic ash in the tropics.- Proceedings of the 9th International Clay Conference, Strasbourg, 1989. V.C. Farmer and Y. Tardy (Eds). Sci. Géol. Mém, 85, p. 69-78, Strasbourg.
- [Wa74] Wada, K.; Harward, M.E. (1974): Amorphous clay constituents of soils.- Adv. Agron. 26, 211-260
- [Wa97] Walsh, K.D. (1997): Shear Strength Components Attributable to Cementation Versus Soil Suction in Arid Environments". In: Unsaturated Soil Engineering Practice, Geotechnical Special Publication No. 68, eds. Houston and Fredlund, New York, ASCE, 169-198.
- [Wa02] Wan, Y.; Kwong, J.; u.a. (2002). Influence of amorphous clay size materials on soil plasticity and shrink-swell behavior.- Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 12, 1026-1031.
- [Wa72] Warkentin, B.P. (1972): Use of the liquid limit in characterizing Clay soils.- Canadian Journ. Soil Science 52, pp457-464.
- [Wa84] Warkentin, B.P. (1984): Properties of Andisols Important to Engineering.- Proceedings of the Sixth International Soil Classification Workshop. Chile and Ecuador. S121-150
- [Wa74] Warkentin, B.P.; Maeda, T. (1974): Physical properties of allophane soils from West Indies and Japan.- Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38:372-377.
- [Wa80] Warkentin, B.P.; Maeda, T. (1980): Physical and mechanical characteristics of Andisols.- Soil with variable charge. Theng B.K.G. (Ed.), New Zealand of Soil Science. Lower Hutt, New Zealand: 281-301.
- [We88] Wells, N.; Childs, W. (1988). Flow behaviour of allophane and ferrihydrite under shearing forces.- Australian Journal of Soil Research, 26, 145_152.
- [We85] Wells, N.; Theng, B.K.G. (1985): Factors affecting the flow behavior of soil allophane suspensions under low shear rates.- J. Colloid Sci. 104, 398-408.
- [We88] Wells, N.; Theng, B.K.G. (1988). The cracking behavior of allophane and ferrihydrite rich minerals: effect of pretreatment and material amendments.- Applied Clay Science 3:237-252.
- [We73] Wesley, L.D. (1973): Some basic engineering properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia.- Géotechnique 23 (4), 471-494.

-
- [We74] Wesley, L.D. (1974): Discussion. Structural behavior of residual soils of the continually wet highlands of Papua New Guinea.- *Geotechnique* 24, 101-105.
- [We77] Wesley, L.D. (1977): Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia.- *Geotechnique* 27(2), 125-136.
- [We08] Wesley, L.D. (2008): A simple compaction control method for slope construction.- *Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, 30 June-4 July 2008, Xi'an, China.
- [We09] Wesley, L.D. (2009): Vortrag an der „Escuela de Ingeniería de Antioquia. Medellín“.
- [We10] Wesley, L.D. (2010): *Geotechnical Engineering in Residual Soils*.- John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [We01] Wesley, L.D., (2001): Consolidation behavior of allophane clays.- *Géotechnique* 51(10): 901-904.
- [We03] Wesley, LD. (2003): Geotechnical Properties of Two Volcanic Soils. In: *Geotechnics on the Volcanic Edge: Tauranga, New Zealand Geotechnical Society Symposium*. Wellington, N.Z.: Institution of Professional Engineers New Zealand, 2003: 225-244.
- [Yo75] Yong, R.N.; Warkentin, B.P. (1975): *Soil properties and behaviour*.- Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. P431-439.
- [Yo86] Yoshinaga, N. (1986): Mineralogical characteristics, II.- *Clay minerals*, Wada, K (Ed). *Ando Soils in Japan*.- Kyushu University Press. Fukuoka, pp.41-56
- [Za93] Zadeh, L. (1993): Fuzzy Logic and Softcomputing.- Plenary Speaker, *Proceedings of IEEE International Workshop on Neuro Fuzzy Control*. Muroran, Japan.
- [Za94] Zadeh, L. (1994): Fuzzy Logic, neural network and Softcomputing, *Comm. ACM*, Vol 37.
- [Za96] Zadeh, L. (1996): The Role of Soft Computing and Fuzzy Logic in the Conception, Design, Development of Intelligent Systems.- Plenary Speaker, *Proceedings of the International Workshop on soft Computing Industry*. Muroran, Japan.
- [Ze03] Zehetner, F.; Miller, W.P.; West, L.T. (2003): *Pedogenesis of Volcanic Ash Soils in Andean Ecuador*. Soil Science Society of America. p.677. Segoe Rd., Madison, USA.

Tabelle A44: Aluminium und Eisen (mit Ammoniumoxalat-Säure extrahiert)


 DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI		RESULTADOS ANALITICOS DIVISION LABORATORIO DE SUELOS		FECHA			
				DIA	MES	AÑO	
				1	4	0	1
DEPARTAMENTO:	QUINDIO	MUNICIPIO:	ARMENIA				
LOCALIZACION:		No. LABORATORIO	3-50997 A 3-51001				
REMITENTE:	INGEOMINAS / JEASSON CALDERON						
TIPO ANALISIS:	HIERRO Y ALUMINIO ACTIVOS (OXALATO ACIDO DE AMONIO)						
No. LABORATORIO	IDENTIFICACION DE CAMPO	Fe %	Al %				
3-50997	C1M8	0,27	6,2				
3-50998	C2M3	0,99	5,7				
3-50999	C5M5	0,35	4,2				
3-51000	C6M3	0,92	5,0				
3-51001	C6M7	0,48	3,6				

Tabelle A45: Aluminium und Eisen (mit Pyrophosphat -Natrium extrahiert)


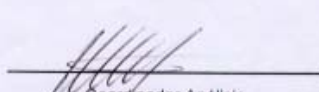
 DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI		RESULTADOS ANALITICOS DIVISION LABORATORIO DE SUELOS		FECHA			
				DIA	MES	AÑO	
				1	4	0	1
DEPARTAMENTO:	QUINDIO	MUNICIPIO:	ARMENIA				
LOCALIZACION:		No. LABORATORIO	3-50997 A 3-51001				
REMITENTE:	INGEOMINAS / JEASSON CALDERON						
TIPO ANALISIS:	HIERRO Y ALUMINIO EN PIROFOSFATO DE SODIO						
No. LABORATORIO	IDENTIFICACION DE CAMPO	Fe %	Al %				
3-50997	C1M8	0,04	0,36				
3-50998	C2M3	0,05	0,49				
3-50999	C5M5	0,04	0,48				
3-51000	C6M3	0,06	0,47				
3-51001	C6M7	0,05	0,36				

Tabelle A46: Phospor, Al, Eisen und Silizium aktiv, Aluminium und Eisen mit Pyrophosphat-Natrium extrahiert (Bodenproben mit der Kennung A, G, T, F und QS gekennzeichnet).

DEPARTAMENTO: INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI		RESULTADOS ANALITICOS DIVISION LABORATORIO DE SUELOS		FECHA			
				DIA	MES	AÑO	
		1 3 0 8			2 0 0 4		
DEPARTAMENTO:	COMPILACION INFORMACION		MUNICIPIO:				
PROYECTO:	GEOMECANICA		No. LABORATORIO	3-53899 A 910			
REMITENTE:	INGEOMINAS - CYNTHIA LINERO						
TIPO ANALISIS:	RETENCIÓN FOSFÓRICA, ALUMINIO, HIERRO Y SILICIO ACTIVOS, ALUMINIO Y HIERRO EN PIROFOSFATO DE SODIO						
No. LABORATORIO	IDENTIFICACION DE CAMPO	RETENCIÓN FOSFÓRICA %	ALUMINO ACTIVO %	HIERRO ACTIVO %	SILICIO ACTIVO %	ALUMINIO EN PIROFOSFATO DE SODIO %	HIERRO EN PIROFOSFATO DE SODIO %
3-53899	AI-2	52.7	1.2	0.32	0.72	0.06	0.05
3-53900	AI-3	33.2	0.86	0.13	0.64	0.06	0.03
3-53901	AI-5	27.3	0.19	0.30	0.05	0.21	0.06
3-53902	AI-7	49.2	1.3	0.19	0.87	0.05	0.02
3-53903	G6-3	21.8	0.03	0.11	0.05	N.D	0.01
3-53904	G7-4	20.4	0.02	0.07	0.04	0.03	0.08
3-53905	T2-7	37.4	0.09	0.14	0.09	0.01	0.02
3-53906	F3-2	90.4	3.1	0.73	2.5	0.08	0.02
3-53907	F3-7	71.6	2.0	0.44	1.4	0.06	0.02
3-53908	F3-9	85.7	2.8	0.42	2.4	0.11	0.03
3-53909	F6-1	93.1	2.9	0.65	2.1	0.17	0.05
3-53910	QS14-4	47.7	0.47	0.32	0.25	0.04	0.07
N.D.: NO DETECTADO							
METODOS: CUANTIFICACION: FOSFORO = COLORIMETRÍA; HIERRO, ALUMINIO Y SILICIO = ABSORCIÓN ATÓMICA (LLAMA ACETILENO - AIRE Y ACETILENO ÓXIDO NITROSO)							
NOTA: Los resultados, almacenados en la base de datos y los enviados por fax o correo electronico se conservarán durante tres (3) meses a partir de la entrega de los mismos.							
Favor comunicar su sugerencia, observación o reclamo al teléfono 3694016 o 3694000 ext. 4016				Aprobado por:			
				 Coordinador Análisis			

2. REM Untersuchung

ZIEL: Mit der Absicht, die Beschaffenheit dieser Böden auf einer höheren Erkenntnistufe zu erforschen und Veränderungen bei verschiedenen Zuständen zu erkennen, wird das Material unter dem Elektronenmikroskop untersucht.

METHODE. Für die mikroskopische Analyse wird ein Rasterelektronenmikroskop der Marke X230-ESEM, Philips EDAX Mikrosonde verwendet. Die Vergrößerungen liegen zwischen 350- und 4000-fach. In der Bodenkunde werden Rasterelektronenmikroskopuntersuchungen zur Bestimmung der Zusammensetzung von Proben verwendet. Darüber hinaus können so Strukturen und Formen der mineralischen Zuschlagstoffe identifiziert werden. Die Methode kann auch Informationen über die Morphologie, Topologie, Partikelgröße und andere wichtige Merkmale einer Bodenprobe liefern.

ERGEBNISSE

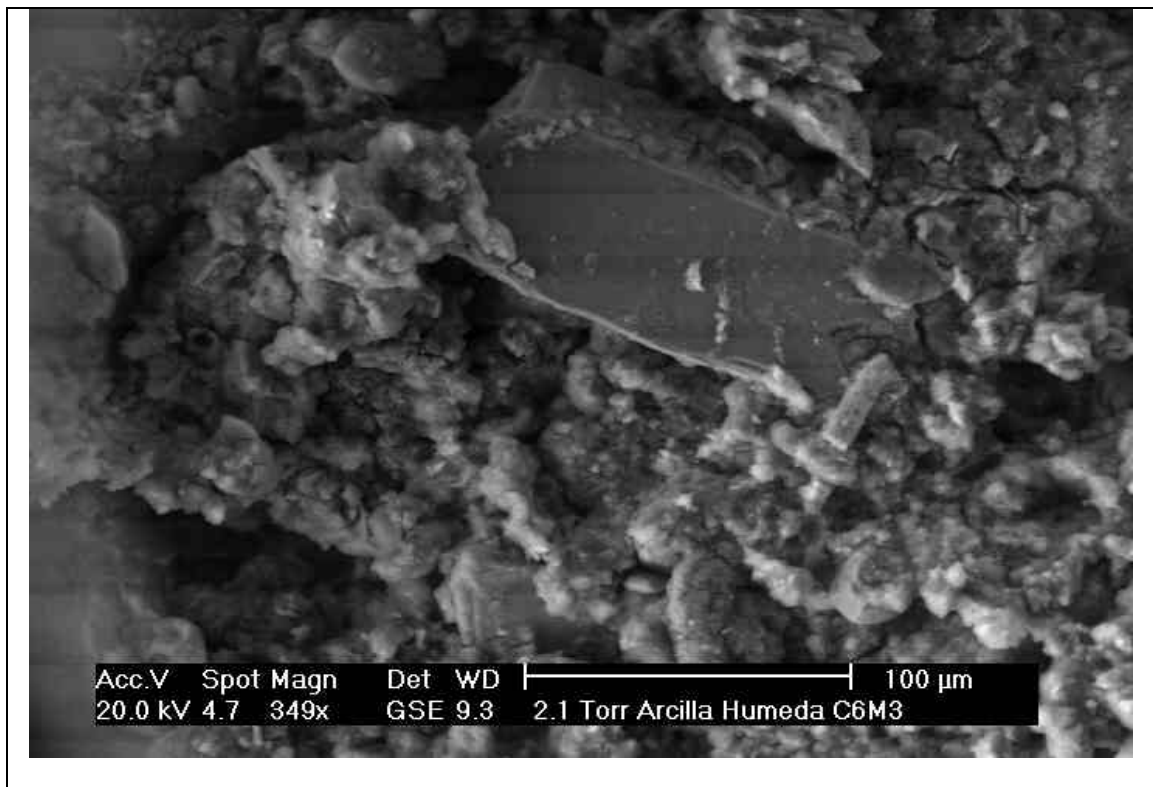


Abbildung A 1: Bodenprobe: C6M3. Zustand: ungestört, Vergrößerung 349x

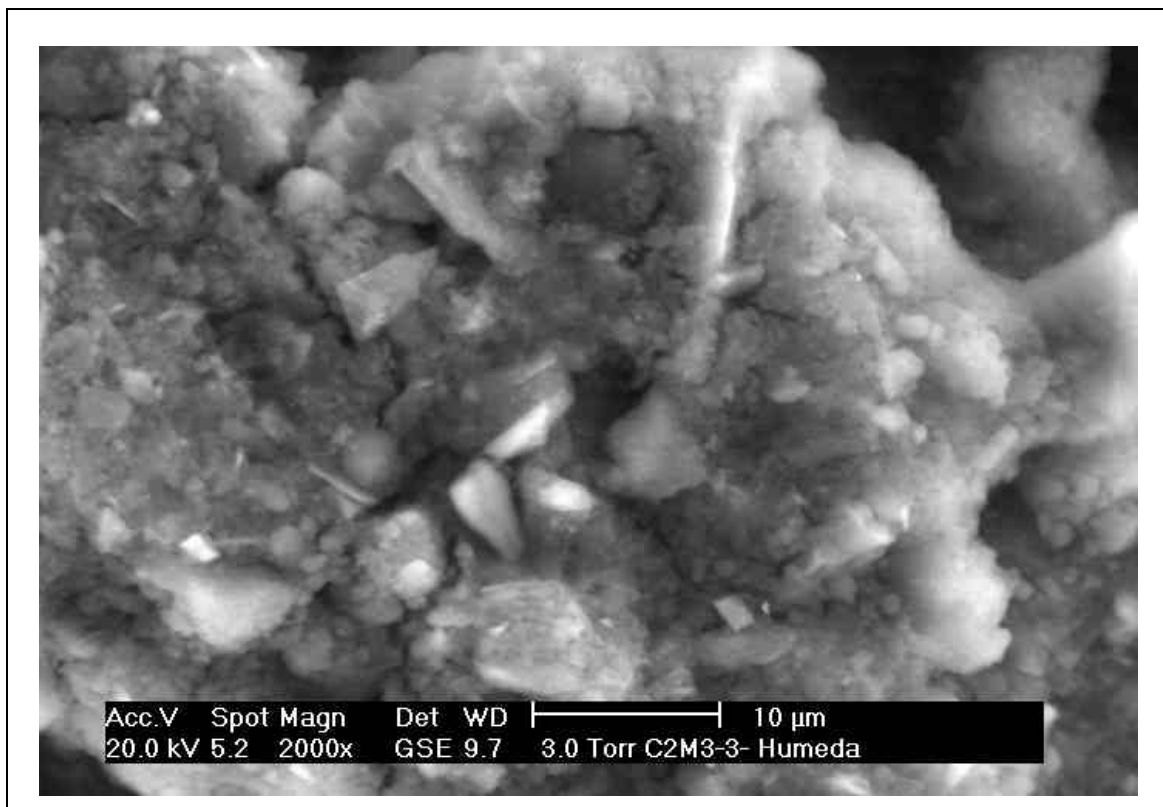


Abbildung A 2: Bodenprobe: C2M3. Zustand: ungestört, Vergrößerung 2000x

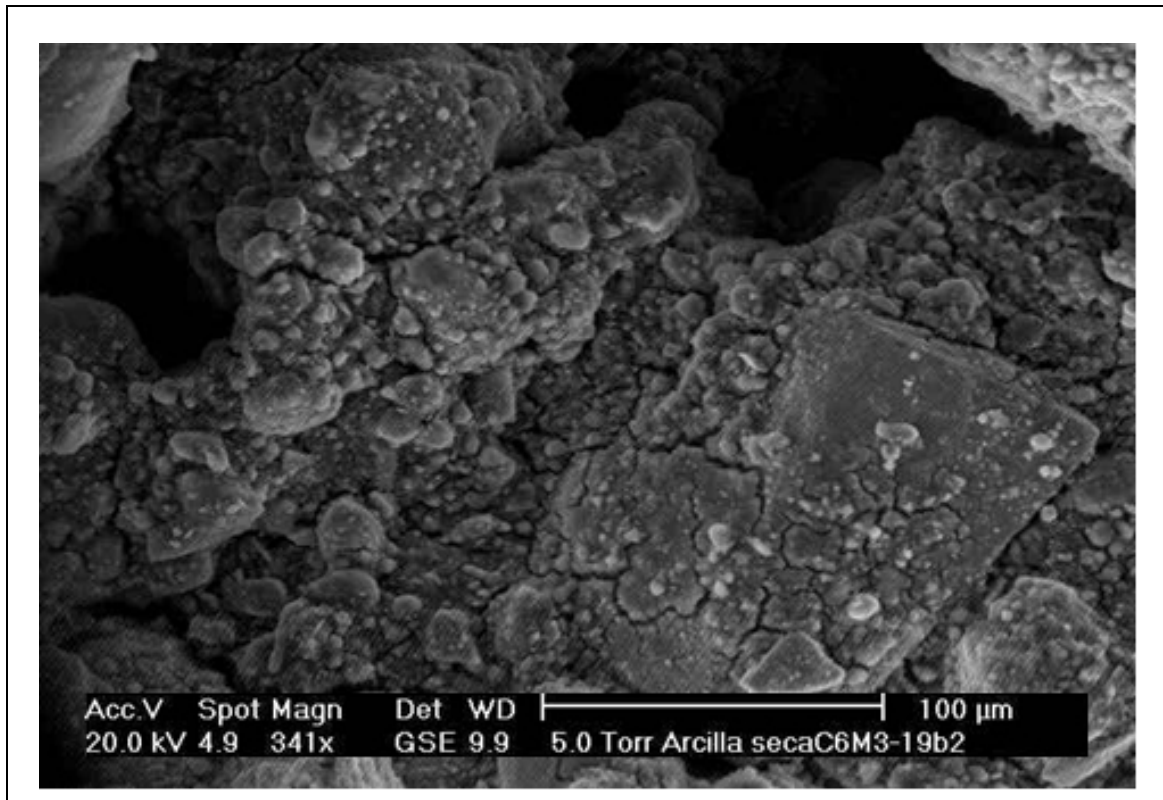


Abbildung A 3: Bodenprobe: C6M3. Zustand: ofengetrocknet, Vergrößerung 341x

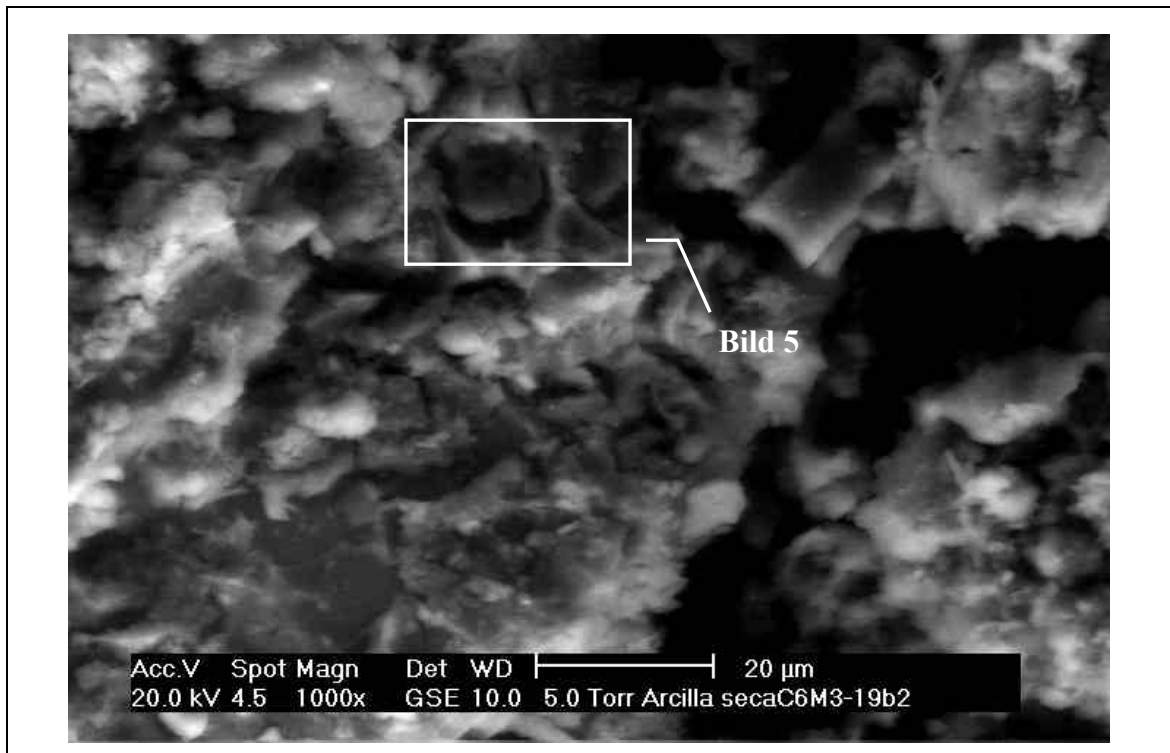


Abbildung A 4: Bodenprobe: C6M3. Zustand: ofengetrocknet, Vergrößerung 1000x

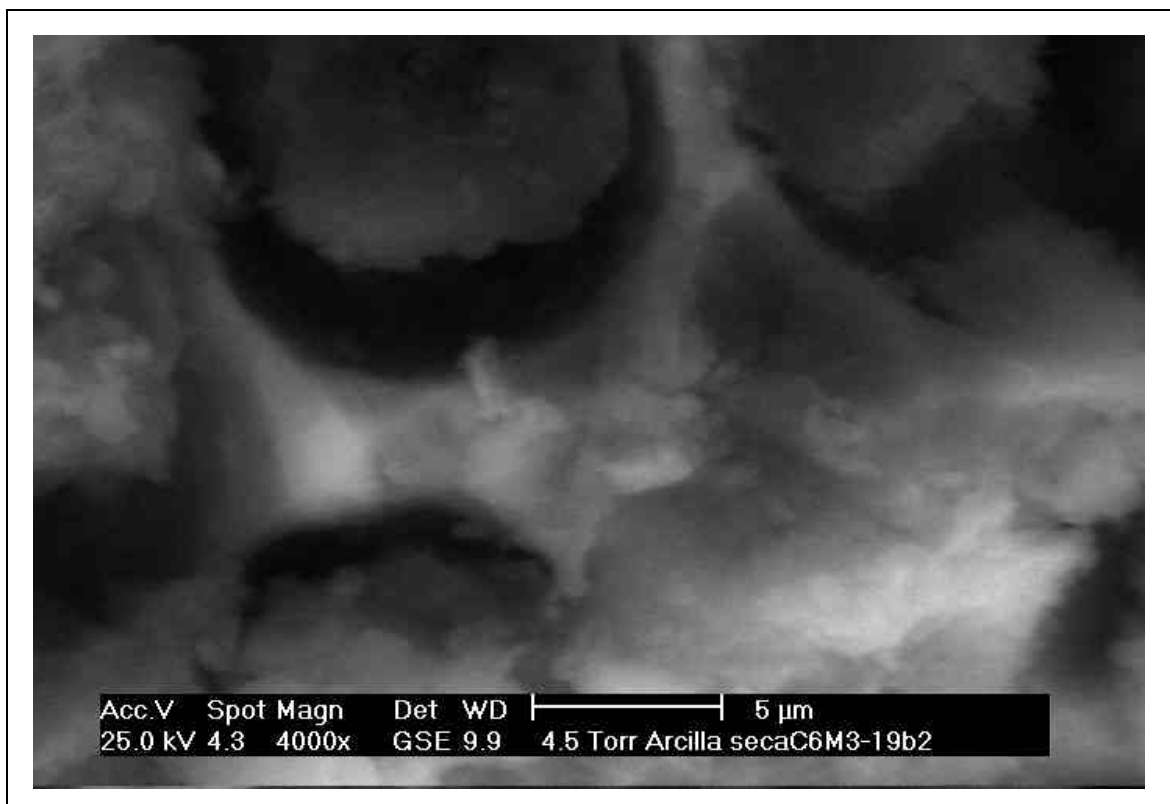


Abbildung A 5: Bodenprobe: C6M3. Zustand: ofengetrocknet, Vergrößerung 4000x

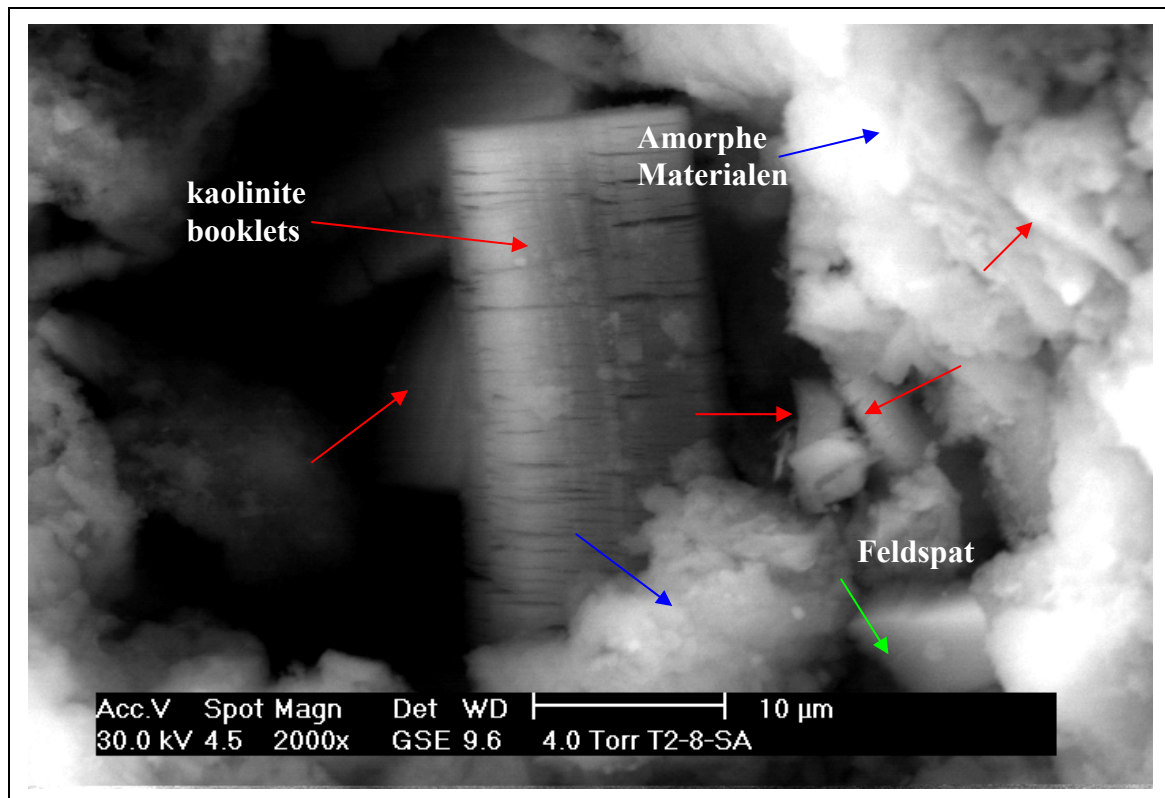


Abbildung A 6: Bodenprobe: T2-8. Zustand: ungestört, Vergrößerung 2000x

BEOBACHTUNGEN

Die Bilder A1 und A2 zeigen in ungestörten Proben eine massive Struktur, unorientiert und mit vielen Poren, die in der Bodenkunde als Matrixstruktur bezeichnet wird. Amorphe Materialien sehen aus wie ein Schwamm, der über die Mineralpartikel hinausragt.

Bild A3 zeigt die Struktur eines getrockneten Klumpens, in dem zahlreiche Risse zu sehen sind.

Bilder A4 und A5 zeigen abgerundete Kavitäten von vulkanischem Glas.

Auf dem Bild A6 sind „kaolinite Booklets“ zu erkennen ein Schwamm aus amorphen Materialien und Feldspat.

(Beschreibung: Mineraloge Ennio Gálvez. INGEOMINAS- Colombia)

Zur Ergänzung von Kapitel 3

1. Experimentelle Untersuchung der Plastizität (Details des Prozesses)

ZIEL:

Der Effekt der Behandlung der Proben im Labor auf die Ergebnisse der Zustandsgrenzen hinsichtlich der Wasserverdunstung und Befeuchtung soll beobachtet werden.

METHODE:

Insgesamt werden drei Bodenproben aus der Kaffee-Region Kolumbiens untersucht, die alle bis zum Tag der Untersuchung in luftdicht verschlossenen Plastikbeuteln aufbewahrt worden sind.

Vor der Untersuchung wird immer der Wassergehalt bestimmt.

Aus jeder Probe werden mehrere Bodenproben (mindestens 4) entnommen. Diese werden a) mit dem ursprünglichen Wassergehalt, b) an der Luft getrocknet, c) an der Luft getrocknet und dann wieder befeuchtet und d) durch Trocknung im Ofen (105°C) vorbereitet.

Mit dem Boden im Originalzustand werden zwei unterschiedliche Versuche durchgeführt. Zum einen wird der Boden traditionell behandelt, d.h. er wird an der Luft getrocknet und durch ein Sieb mit einer 0,425 mm Masche gesiebt. Im anderen Fall wird der Boden in einem luftdicht verschlossenen Plastikbeutel aufbewahrt und darin für den Versuch vorbereitet. Das erste Verfahren wird im Weiteren konventionell, das zweite alternativ genannt (Abbildung A 7).

Eine weitere Bodenprobe wird nach der Lufttrocknung geprüft und eine andere wird nach der Trocknung wieder in einem Beutel zwei Tage lang befeuchtet und dann nach Norm getestet (Abbildung A 8).



Abbildung A 7: Unterschiede in der Behandlung

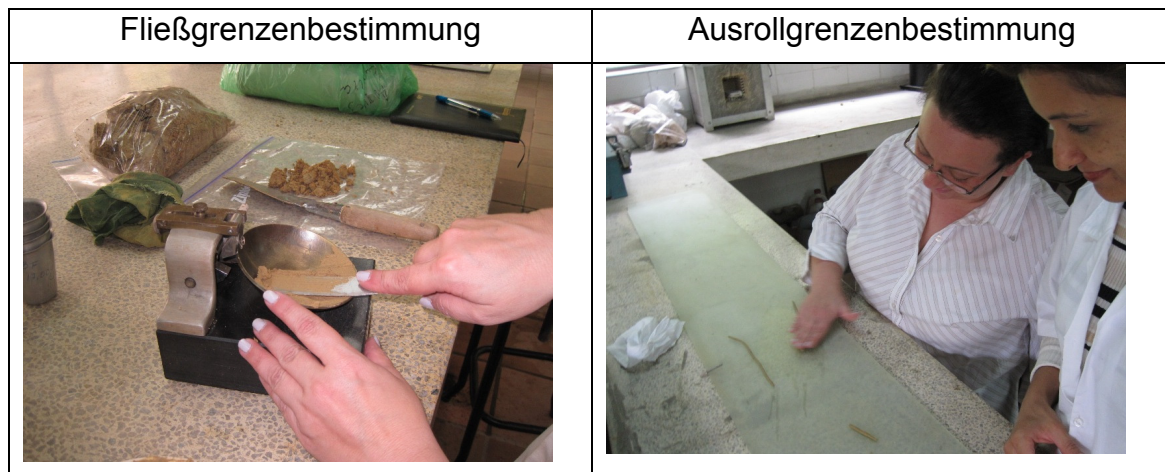


Abbildung A 8: Bestimmung von Zustandsgrenzen

BEOBACHTUNG

Die Ergebnisse sind vom Kontakt mit der Luft abhängig, wie im Kapitel 3 beschrieben wird.

2. Experimentelle Untersuchung der Empfindlichkeit der Struktur

ZIEL: Es wird untersucht, ob anhand der Ergebnisse der Einaxialdruckfestigkeit ein Einfluss der Behandlung bei der Verdichtung zu erkennen ist.

VORÜBERLEGUNG: Nimmt die Festigkeit mit der Trockendichte zu, kann dies auf einen Verbesserungsprozess durch die Verdichtung hinweisen. Nimmt die Festigkeit zu ohne einen gleichzeitigen Anstieg der Trockendichte, ist eine Zementierung zwischen den Partikeln zu vermuten.

METHODE: Es werden verschiedene Sorten Ascheböden untersucht: sandige, schluffige und feine (bindigere) Bodenproben aus vulkanischen Aschen der „Quindio“-Region der Kaffee-Achse Kolumbiens (gekennzeichnet als F6-1, F3-9, A1-7 und A1-2).

Die einzelnen Proben werden zuerst mit dem ursprünglichen Wassergehalt (ohne Trocknung) für den Druckversuch vorbereitet. Danach wird der einaxiale Druckversuch durchgeführt und nach dem Versuch der Wassergehalt an einer Teilprobe bestimmt. Diese Teilprobe wird anschließend durch Originalboden ersetzt, in die bestehende Probe durch Mischen eingearbeitet und erneut für den Versuch vorbereitet und getestet. Dies wird insgesamt drei bis vier Mal wiederholt.

Die Druckfestigkeitsprüfungen wurden nach Norm (ASTM D 2166) durchgeführt. Für die Verdichtung der Proben musste aber die Energie an die weiche Textur der Aschen angepasst werden. Allgemeine Details des Versuchs sind nachfolgend zusammengefasst (**Abbildung A 9**).

ANMERKUNGEN: Nach jedem Versuch wurde eine Teilprobe für die Wassergehaltsbestimmung entnommen, die für den folgenden Versuch mit

Originalboden (der bis dahin in einer Plastiktüte aufbewahrt wurde) ersetzt wurde. Bei sonst konstanten Randbedingungen sollte dies aber keinen Einfluss auf die Tendenz der Veränderung des Verhaltens haben.

Eine sinnvolle Ergänzung wäre die gleichzeitige Durchführung von Proctorversuchen gewesen. Hierfür stand allerdings nicht genügend Material zur Verfügung.

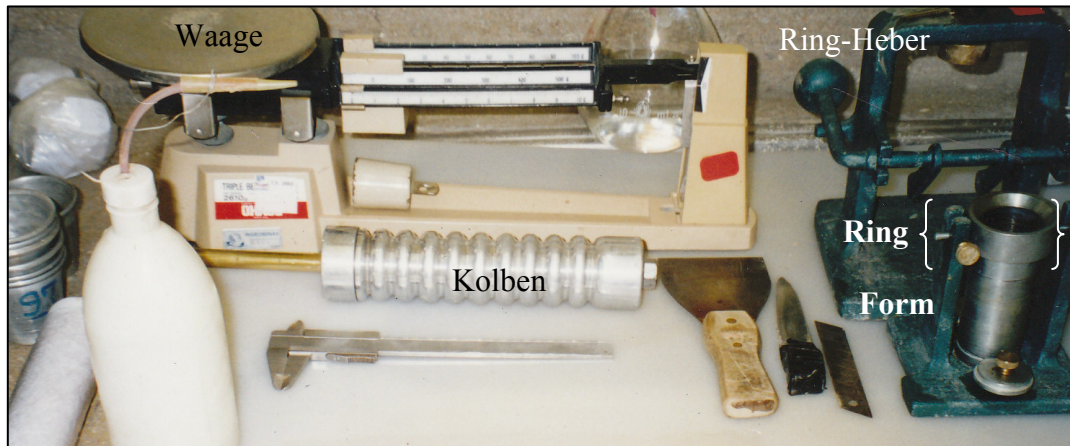


Abbildung A 9: Einrichtung für Verdichtung von Probenkörpern

Beschreibung:

Durchmesser der Form 33,33 mm, Höhe: 71,52 mm.

(Nach Norm ein Verhältnis zwischen 2 und 2,5)

Volumen (mit Ring)= 62,4 cm³

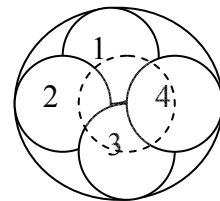
Der Kolben erzeugt (bei einer Stauchung der Feder von 11/16 Zoll= 17,4mm) einen Druck von 20 Pounds. Die Kalibrierung des Geräts erfolgte im Labor.

Vorgehensweise:

Leere Form wiegen und Ring einstellen.

Boden in 4 Schichten zugeben und jede Lage 25-mal mit dem Kolben verdichten, indem die Feder bis zur entsprechenden Markierung auf der Kolbenstange bewegt wird.

Die Verdichtung erfolgt dabei entsprechend dem Schema (rechts) mit einer fünften Belastung und in der Mitte.



Vor dem Einfüllen einer weiteren Schicht wird die Oberfläche aufgeraut

Die letzte Schicht soll über den Rand der Form herausstehen (1/8 -1/4 Zoll)

Den Ring abheben (mit dem Ring-Heber) und die Oberfläche glätten (Überstand abschneiden)

Das Material, das im Ring verbleibt, wird für die Bestimmung des Wassergehaltes entnommen.

Form mit Boden wiegen.

Die Probe aus der Form herausnehmen und Gewicht bestimmen.

Einrichtung für den Druckversuch

Presse und Verformungs-
Messeinrichtung.

Jeder Teilung = 0,001 Zoll.

Geschwindigkeit 17,5 Teilungen/min =
0,44mm/min.

(das sind 0,6 % /mm, nach Norm: 0,5 bis
2,0%/min)

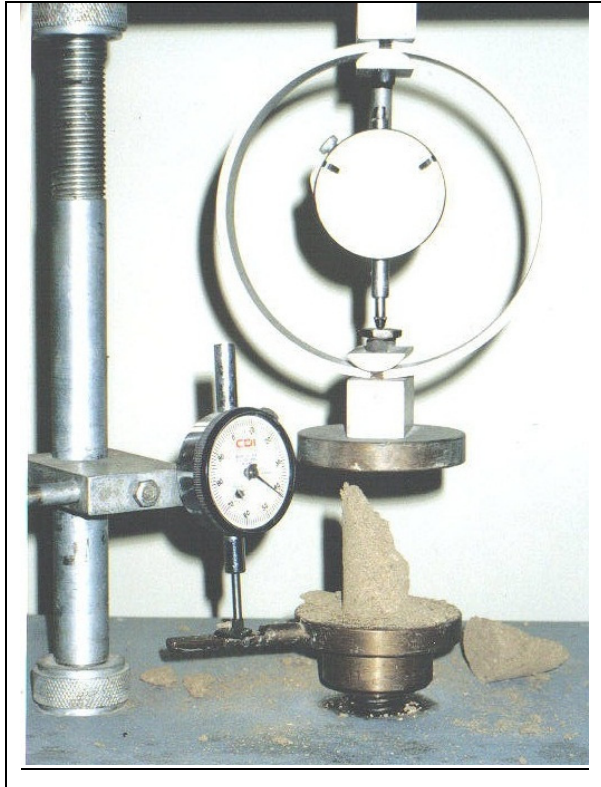


Abbildung A 10: Einrichtung für Zylinderdruckfestigkeit

BEOBACHTUNG

Bei mehreren Versuchswiederholungen derselben Bodenprobe verändern sich die Versuchsergebnisse, was ausführlich im Kapitel 3 erläutert wird.

3. Experimentelle Überprüfung der Zusammendruckbarkeit bei Austrocknung

ZIEL: Mit dem Ödometer – und Kastenscherversuch soll das Scherverhalten von Ascheböden bei unterschiedlichen Trocknungsniveaus untersucht werden.

Vorüberlegung: Es wird eine Veränderung der Überkonsolidierung und der Scherspannungen erwartet. Wenn die Überkonsolidierung mit der Trocknungstemperatur zunimmt, oder wenn es einen Zusammenhang zwischen der Trocknungstemperatur und einer Zunahme der Kohäsion oder dem Scherwinkel gibt, könnte das als ein Hinweis auf eine Verfestigung des Materials durch die Zementierung von Partikeln angesehen werden.

METHODE: Aus der Kaffee-Region Kolumbiens wurden drei Proben (15x15x20cm) aus drei verschiedenen Schächten, und eine Probe eines normalen schluffigen Bodens (alles ungestörte Bodenproben) untersucht. Bei diesen Proben wurde die vulkanische Herkunft nicht explizit bewiesen, da erfahrene Laborassistenten, Geologen und Geotechniker im Land mit der visuellen Erkennung von vulkanischen Materialien vertraut sind und diese als solche klassifiziert haben.

Die Proben wurden bis zum Versuch in der Feuchtekammer aufbewahrt.

Vor dem Versuch wird ein Teil der Probe entnommen und auf die Größe der Form beschnitten. Danach wird die Probe entsprechend den Vorgaben geprüft (für den Fall mit originalem Wassergehalt) oder zuvor im Ofen unter 25, 30 oder 40°C über 24 Stunden getrocknet.

Der Wassergehalt wird vor der Trocknung bestimmt. Die getrockneten Bodenproben werden vor dem Versuch gewogen, und nach dem Versuch im Ofen bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, um das Trockengewicht zu bestimmen.

Ödometer und Scherversuche wurden nach Norm (ASTM D2435 und ASTM D6528) durchgeführt, allerdings ohne Zugabe von Wasser.

Die Laststufen für den Ödometerversuch sind:

Belastung: 50, 100, 200, 400, 800 und 1600 kPa

Entlastung: 800, 400, 200, 100 und 50 kPa

Wiederbelastung: 100, 200, 400, 800 und 1600 kPa

Die Normalspannungen für die Scherversuche sind 50, 100 und 150 kPa.

Parallel dazu wurden für alle Böden die Zustandsgrenzen bestimmt und REM Untersuchungen durchgeführt. Die Zustandsgrenzen der vulkanischen Aschen wurden bei ursprünglichem Wassergehalt ermittelt.

Anmerkungen: Die Bodenproben werden nicht gesättigt. Das Verhalten des Wassers in den Poren bleibt somit unbekannt, ebenso wie der Effekt eines teilgesättigten Zustandes im Vergleich zu der traditionellen Prozedur. Dafür wären Einrichtungen mit Suktionskontrolle notwendig gewesen.

Beim Abschneiden der Bodenproben wurden die noch feuchten Proben bereits in den Ring eingelegt und mit dem Ring im Ofen getrocknet. Die Trocknung verursachte ein gewisses Schrumpfen der Probe. Da die Probe schon im Ring platziert war, war eine

Bestimmung der Volumenveränderung praktisch nicht möglich, weshalb Ungenauigkeiten bei den Berechnungen entstehen können.

Die beschränkte Anzahl der Bodenproben erlaubt keine endgültige Aussage zu den gestellten Fragen.

BEOBACHTUNG: Die Trocknung verändert den Wert der Porenzahl allmählich. Die Kurven des Ödometerversuchs verschieben sich nach unten. Es ist keine deutliche Veränderung des Überlagerungsdrucks mit der Trocknungstemperatur zu erkennen.

4. Experimentelle Untersuchung der Veränderung der Festigkeit.

- **Veränderung der Eigenschaften in situ und Dauerhaftigkeit der Festigkeit. – Ergänzende Proctor Versuche.**

Als Ergänzung der Charakterisierung der ersten Bodenprobe AP1-2 wurde ein Proctor-Versuch durchgeführt, dessen Ergebnisse in folgender Tabelle A47 und Tabelle A48 dargestellt sind.

Tabelle A47: Proctor- Versuch 1. Bodenprobe AP1-2 – La Ceja, Labor Daten

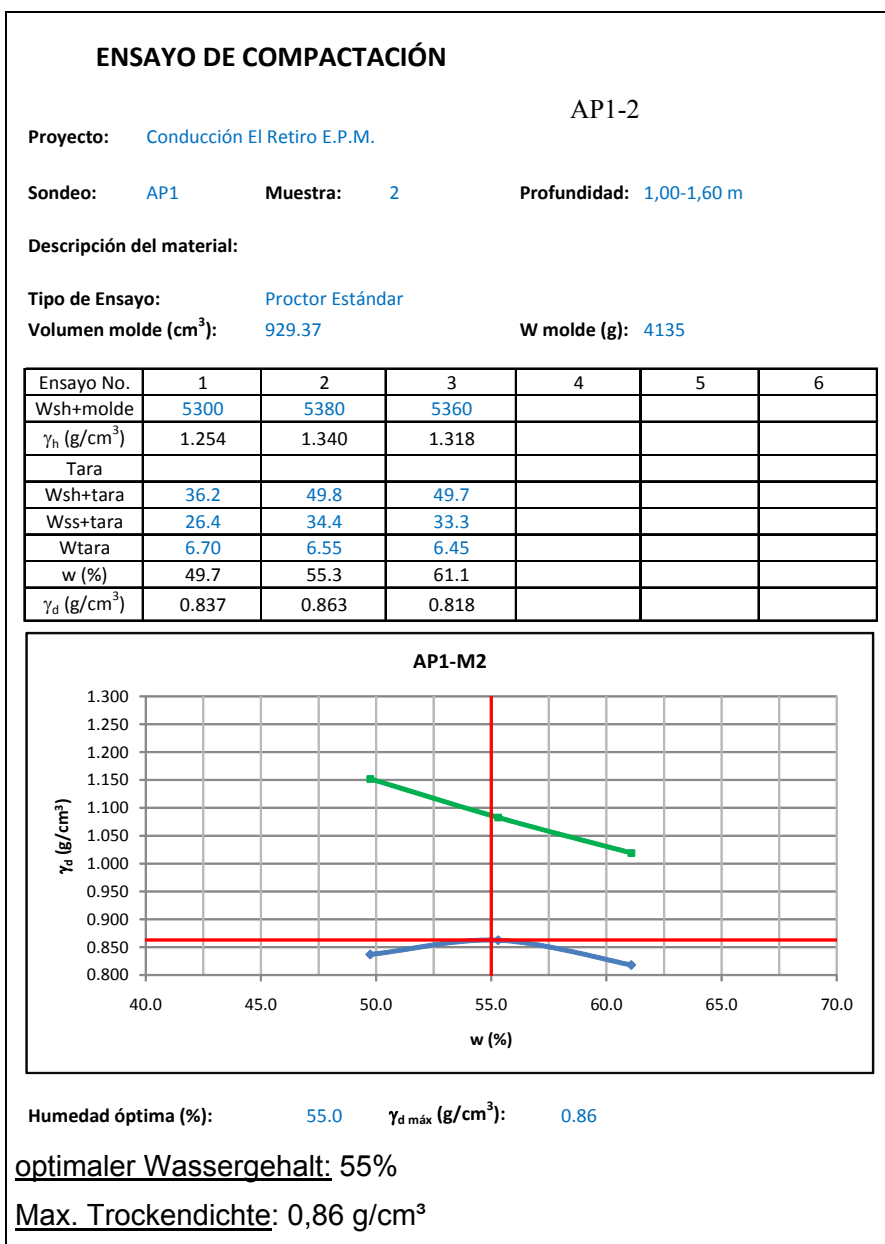


Tabelle A48: Proctor- Versuch 2. Bodenprobe AP1-2 – La Ceja, Labor Daten

ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
Proyecto:	Conducción El Retiro E.P.M.					
Sondeo:	AP1	Muestra:	2	Profundidad:	1,00-1,60 m	
Descripción del material:						
Tipo de Ensayo:	Proctor Estándar					
Volumen molde (cm ³):	929.37			W molde (g):	4135	
Ensayo No.	1	2	3	4	5	6
Wsh+molde	5200	5278	5285			
γ_h (g/cm ³)	1.146	1.230	1.237			
Tara						
Wsh+tara	54.7	51.3	52.5			
Wss+tara	33.9	31.6	31.8			
Wtara	5.30	6.20	6.50			
w (%)	72.7	77.6	81.8			
γ_d (g/cm ³)	0.663	0.693	0.681			
Humedad óptima (%):	78.0		$\gamma_{d \text{ máx}}$ (g/cm ³):	0.69		
Observaciones: La compactación efectuada se hizo a 12 golpes						
optimaler Wassergehalt: 78%						
Max. Trockendichte: 0,69 g/cm³						

Da Ascheböden schwer zu verdichten sind, wird der Versuch mit weniger Energie wiederholt. Links ist der Proctor-Versuch unter Standardbedingungen und rechts mit weniger Energie dargestellt.

Tabelle A49: Ergebnisse des Proctor- Versuchs

Sondierung	Probe	Tiefe (m)	w_{opt} (%)	γ_d (g/cm ³)	USCS
AP1	2	1,3	55	0,863	MH

BEOBACHTUNG

Die maximale Trockendichte ist nicht deutlich zu ermitteln und eine gute Verdichtung ist schwer zu erreichen, da dieses Material während des Versuches immer breiiger wird.

Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Erich Lackner

- | | | |
|------------|-----------------------------|---|
| Heft 1 | Rizkallah, V. | Die erdstatische Bemessung von Wänden und Pfählen in Sandböden (1971) |
| v) Heft 2 | Lohmann, H. | Ein Beitrag zur Spannungsberechnung in der elastisch-isotropen Halbebene unter tief angreifenden Lasten und Anwendungsmöglichkeiten auf den Baugrund (1971) |
| v) Heft 3 | Weißbach, A. | Baugrubensicherung - Berechnung und Konstruktion von Baugrubenumschließungen (1973) |
| v) Heft 4 | Leonhardt, G. | Die Belastung von starren Rohrleitungen unter Dämmen (1973) |
| Heft 5 | Rizkallah, V. | Großbohrpfähle - Beitrag zur Abschätzung der lotrechten Tragfähigkeit und der Wirtschaftlichkeit (1973) |
| Heft 6 | Hahn, F. R. | Ein Beitrag zur Herstellung und Ermittlung der Tragfähigkeit von temporären Erdankern in den Bodenarten der hannoverschen Kreideformation (1974) |
| Heft 7 | Blümel, W. | Ein Beitrag zum eindimensionalen Konsolidierungsverhalten von Klei im Kompressionsversuch (1974) |
| Heft 8 | Grade, H. | Ein Beitrag zur Abschätzung der Tragfähigkeit von Verpreßankern in nicht-injizierbaren, nichtbindigen Böden (1974) |
| Heft 9 | Krämer, U. | Zugwiderstände und Eindringverhalten von Schiffsankern in nichtbindige Böden (1974) |
| Heft 10 | Krämer, U.
Rizkallah, V. | Erfahrungen bei der Ermittlung von Scherparametern im Kastenschergerät (1976) |
| v) Heft 11 | Richwien, W. | Zum Einfluß der Konsolidierungsdauer auf die wirksame Spannung und die Scherfestigkeit von aufbereitetem Klei (1976) |
| Heft 12 | Krämer, H. | Abschätzung der Tragfähigkeit von Verpreßankern durch Anwendung der Korrelationstheorie (1977) |
| Heft 13 | Quast, P. | Ein Beitrag zum Kriechverhalten eines norddeutschen Kleis (1977) |
| Heft 14 | Paschen, R. | Konsolidierungs- und Scherverhalten von salzhaltigem Klei (1977) |
| v) Heft 15 | Liedtke, L. | Berechnung der Tragfähigkeit von temporären Erdankern mit der Methode der finiten Elemente (1978) |
| Heft 16 | Blümel, W. | Ein Verfahren zur Verminderung des Porenwasserdrucks bei Baugruben im Ton durch Entspannungsbohrungen (1979) |

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Victor Rizkallah

- | | | |
|------------|---------------|---|
| v) Heft 17 | Hellweg, V. | Ein Vorschlag zur Abschätzung des Setzungs- und Sackungsverhaltens nichtbindiger Böden bei Durchnässung (1981) |
| Heft 18 | Richwien, W. | Das Formänderungs- und Festigkeitsverhalten weicher bindiger Böden (1981) |
| v) Heft 19 | Maschwitz, G. | Ein Beitrag zur Abschätzung des Tragverhaltens von unbewehrten pfahlartigen Tragelementen (1983) |
| Heft 20 | Cunze, G. | Ein Beitrag zur Abschätzung des Porenwasserüberdrucks beim Rammen von Verdrängungspfählen in bindige Böden (1985) |
| Heft 21 | Wehner, T. | Seegangserzeugte Spannungsänderungen im Sandkern eines Seedeichs (1987) |

- v) Heft 22 Rizkallah, V. et al. Festschrift aus Anlaß des 75. Geburtstages von o. Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Erich Lackner (1988)
- v) Heft 23 El Sherif, M. M. Ein Beitrag zur Stabilisierung von bindigen Sedimentböden in Entwicklungsländern (1988)
- v) Heft 24 Buchmann, K.-J. Zum Tragverhalten ausgesteifter Bohrpfahlwände im Hannoverschen Ton (1988)
- Heft 25 Harder, H. Numerische Modellierung des "Cone Penetration Tests" in wassergesättigten bindigen Böden (1989)
- v) Heft 26 Rizkallah, V., Hilmer, K. Bauwerksunterfangung und Baugrundinjektion mit hohen Drücken (Düsenstrahlinjektion) (1989)
- v) Heft 28 Rizkallah, V. et al. Bauschäden im Spezialtiefbau (Baugruben, Rohrvortriebe, unterirdische Bauanlagen) (1990)
- Heft 29 Rizkallah, V. et al. Geböschte Baugruben, Baugruben mit Stahlspundwänden (1991)
- Heft 30 Eklu-Natey, D. Erodierbarkeit zementstabilisierter tropischer Böden im Straßenbau Togos (1992)
- Heft 31 Achmus, M., Rizkallah, V. Vortrieb von Rechteckprofilen (Belastungen-Bemessung-Anwendung) (1992)
- Heft 32 Jebe, P., Rizkallah, V. et al. Untersuchung von Hochbauschäden in den neuen Bundesländern Teil 1: Globale Bestandsaufnahme und systematische Erfassung (1993)
- Heft 33 Beilke, O. Interaktionsverhalten des Bauwerks "Fernwärmeleitung - Bettungsmaterial" (1993)
- Heft 34 Jebe, P., Rizkallah, V. et al. Untersuchung von Hochbauschäden in den neuen Bundesländern Teil 2: Dokumentation des baulichen Zustands historischer Bauwerke (1993)
- v) Heft 35 Vogel, J. Untersuchungen bauschadensrelevanter Faktoren beim Vorpressen begehbare Rohre (1993)
- Heft 36 Vogel, J. et al. Festschrift aus Anlaß des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. V. Rizkallah (1993)
- Heft 38 Vogel, J., Rizkallah, V. et al. Begehbare und nichtbegehbare Rohrvortriebe Verfahren, Bauschadensfälle und Empfehlungen zur Schadensminimierung (1993)
- Heft 39 Jebe, P., Rizkallah, V. Beispiele zur Sanierung alter Bausubstanz (1994)
- Heft 41 Achmus, M. Zur Berechnung der Beanspruchungen und Verschiebungen erdverlegter Fernwärmeleitungen (1995)
- Heft 43 von Bloh, G. Verfahren zur Ermittlung des Scherverhaltens von Bagger- und Klärschlamm mit der Flügelsonde (1995)
- Heft 44 Clasmeier, H.-D. Ein Beitrag zur erdstatischen Berechnung von Kreiszellenfangedämmen (1995)
- Heft 45 Hasan, M. Abschätzung der Eindring- und Reibungswiderstände beim unterirdischen Rohrvortrieb (1996)
- Heft 47 Rizkallah, V., Richwien, A. Beschleunigte Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes bindiger Böden (1998)
- v) Heft 48 Bruns, T. Untersuchung des Tragverhaltens von Ortbetonschraubpfählen (1998)
- Heft 49 Döbbelin, J. U., Salveter, G. et al. Festschrift aus Anlaß des 65. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. V. Rizkallah (1998)
- Heft 52 Salveter, G. Validierung numerischer Verfahren zur Berechnung des Interaktionsverhaltens "Fernwärmeleitung – Baugrund" (2000)
- Heft 53 Döbbelin, J. U. Zur geotechnischen Anwendung wissenschaftlicher Systeme mit Elementen der Fuzzy-Logik (2000)

- v) Heft 54 Baesmann, A. Berechnung und Bemessung von Pfahl-Plattengründungen (2000)
 Rizkallah, V.
 Heft 55 Kaiser, J. Zu Schadensursachen und zur Setzungsproblematik bei
 herkömmlichen Bauwerksunterfangungen (2000)
 Heft 58 Döbbelin, J.U. Empfehlungen zur Vermeidung von Planungs- und
 Rizkallah, V. Ausschreibungsfehlern bei Ingenieurbauwerken (2001)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Hanno Müller – Kirchenbauer / Prof. Dr.-Ing. Werner Blümel

- Heft 27 Friedrich, W. Ausbreitung chlorierter Kohlenwasserstoffe bei Einkapselung und
 Inversionsströmung (1989)
 Heft 37 Rogner, J. Modelle zur Beständigkeitsbewertung von Dichtwandmassen auf der
 Basis von Lagerungsversuchen (1993)
 Heft 40 initiiert von Univ.- Festschrift aus Anlaß des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing.
 Prof.Dr.-Ing. habil. H. Müller – Kirchenbauer
 S. Savidis
 Heft 42 Schlötzer, C. Filtrationsverhalten von Dichtsuspensionen an flüssigkeitsgestützten
 Erdwänden (1995)
 Heft 46 Brummermann, K. Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen in
 Deponiebasis-Abdichtungen - Prüfung und Bewertung ihrer
 Wirksamkeit (1997)
 Heft 50 Mbonimpa, M. Injizierfähigkeit von Feistbindemittelsuspensionen zur Abdichtung
 von Lockergesteinen (1998)
 Heft 51 Düser, O. Verwertung von aus Bauschutt aufbereitetem Recyclingmaterial in
 mineralischen Dichtungssystemen (1999)
 Heft 56 Stoewahse, C. Ermittlung des Reibungsverhaltens von Geokunststoffen und
 Erdstoffen im Rahmenschergerät (2001)
 Heft 57 Gawalek, K. Silikatgele auf Organosilanbasis für Abdichtungsinjektionen im
 Lockergestein (2001)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus / Prof. Dr.-Ing. Werner Blümel

- Heft 59 Doll, H. Dimensionierung von Kunststofflinern – Close-Fit-Verfahren (2001)
 Heft 60 Kuk, M. Untersuchungen zur Beeinflussung der Feistbindemittelausbreitung im
 Lockergestein durch Filtrationsmechanismen (2004)
 Heft 61 Achmus, M. Bauwerkserschütterungen durch Tiefbauarbeiten (2005)
 Kaiser, J.
 tom Wörden, F.
 Heft 62 Mansour, B.G.S. Investigations on Design and Rehabilitation Options for River
 Barrages with Special Respect to Piping (2005)
 Heft 63 Achmus, M. Bodenmechanik und Grundbau - Grundlagen und Konzepte (2007)
 Heft 64 Weidlich, I. Untersuchung zur Reibung an zyklisch axial verschobenen
 erdverlegten Rohren (2008)
 Heft 65 Kuo, Y.-S. On the behavior of large-diameter piles under cyclic lateral
 load (2008)
 Heft 66 Maßmann, J. Modeling of Excavation Induced Coupled Hydraulic-Mechanical
 Processes in Claystone (2009)
 Heft 67 Müller-Kirchenbau Funktionsnachweis für geotextile Tondichtungsbahnen in
 er, A. Deponieoberflächenabdichtungen (2009)
 Heft 68 tom Wörden, F. Untersuchungen zum räumlichen aktiven Erddruck auf starre vertikale
 Bauteile im nichtbindigen Boden (2010)

- Heft 69 Quast, A. Zur Baugrundsteifigkeit bei der gesamtdynamischen Berechnung von Windenergieanlagen (2010)
- Heft 70 Bosseler, B. Prüfung und Bewertung von Produkten und Verfahren zum Bau und zur Instandhaltung unterirdischer Kanälen und Leitungen (2010)

Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts für Geotechnik (IGtH)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus

- Heft 71 Peralta, P. Investigations on the behavior of large diameter piles under long-term lateral cyclic loading in cohesionless soil (2010)
- Heft 72 Ahlinhan, M.F. Untersuchungen zur inneren Erosionsstabilität nichtbindiger Böden (2011)
- Heft 73 Linero-Molina, C. Vulkanische Ascheböden als Straßenbaustoff (2011)

v) = vergriffen

Schutzgebühr: € 15,-/Heft