



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Kationenaustauschkapazität -  
Eine alternative Methode zur Untersuchung der  
künstlichen geologischen Barriere im Deponiebau?“

verfasst von / submitted by

Zora Alice Kumm

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2022 / Vienna, 2022

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

UA 066 815

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Masterstudium Erdwissenschaften UG2002

Betreut von / Supervisor:

Ao. Univ. Prof. Mag. Dr. Susanne Gier



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis .....	V
Abstract .....	1
1. Einleitung .....	3
1.1. Aktuelle Verordnungen .....	5
1.2. Aktueller Stand der Forschung .....	6
2. Standortbeschreibung .....	8
2.1. Allgemeine Geographie .....	8
2.2. Allgemeine Geologie .....	11
2.2.1. Geologie .....	11
2.2.2. Tektonik .....	14
3. Material und Methodik .....	15
3.1. Material .....	15
3.2. Röntgendiffraktometrie .....	16
3.3. Röntgenfluoreszenz .....	18
3.4. Organischer Anteil .....	19
3.5. Korngrößenbestimmung .....	20
3.6. Atterberg'sche Zustandsgrenzen .....	21
3.7. Kationenaustauschkapazität .....	23
4. Ergebnisse .....	26
4.1. Mineralogische Eigenschaften .....	26
4.1.1. Gesamtmineralogie .....	26
4.1.2. Tonmineralogie .....	27
4.1.3. Quantifizierung .....	30
4.2. Chemische Eigenschaften .....	35
4.2.1. Röntgenfluoreszenz .....	35
4.2.2. Organischer Anteil .....	37
4.3. Geotechnische Eigenschaften .....	38

4.3.1. Korngrößenbestimmung .....	38
4.3.2. Atterberg'sche Zustandsgrenzen .....	41
4.3.3. Kationenaustauschkapazität .....	43
5. Diskussion.....	46
5.1. Mineralogische, chemische und geotechnische Eigenschaften der Proben.....	46
5.2. Zusammenhang: Atterberg'sche Fließgrenze und Tonmineralogie .....	49
5.3. Zusammenhang: Kationenaustauschkapazität und Tonmineralogie.....	53
5.4. Zusammenhang: Atterberg'sche Zustandsgrenzen und Kationenaustauschkapazität.....	57
5.5. Gegenüberstellung: Atterberg'sche Zustandsgrenzen, Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie und Kationenaustauschkapazität .....	58
6. Conclusio .....	62
7. Danksagung.....	64
8. Eigenständigkeitserklärung.....	65
9. Literatur.....	66
10. Anhang .....	69

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer Deponie der Deponieklassen 2 und 3 .....	5
Abbildung 2: Blick nach Süden auf die Deponie „Mistelbach“ .....	8
Abbildung 3: Unmittelbare Umgebung der Deponie „Mistelbach“ .....	9
Abbildung 4: Blick nach Norden auf die Deponie „Kettlastrunn“ .....	10
Abbildung 5: Unmittelbare Umgebung der Deponie „Kettlastrunn“ .....	10
Abbildung 6: Geologische Karte der Umgebung der Deponien. Links: Deponie „Mistelbach“; Rechts: Deponie „Kettlastrunn“ Maßstab: 1:50.000 .....	12
Abbildung 7: Ausschnitt aus der Legende „Geologische Karte 25 (Poysdorf)“ .....	12
Abbildung 8: Sand- und Tonwechsellagerung bei der Deponie „Kettlastrunn“ .....	13
Abbildung 9: Störungen in der Umgebung der Deponien .....	14
Abbildung 10: Links, Gesamtmineralogie. Rechts, Texturfreie Probe .....	17
Abbildung 11: Links, Presspille. Rechts, Schmelzpille .....	18
Abbildung 12: Links, Siebturm. Rechts, Die Proben MB_L und KB_TS nach dem Sieben....	20
Abbildung 13: Links, Fraktion < 63 µm der Probe MB_L. Rechts, Micromeritics SediGraph III .....	21
Abbildung 14: Links, Klopfschale. Rechts, Probe KB_TS vor dem Trocknen .....	23
Abbildung 15: Spectroquant Prove 300 mit Blindwert und vier vorbereitete Proben .....	24
Abbildung 16: Röntgendiffraktometrie - Gesamtmineralogie der vor Ort entnommenen Proben .....	26
Abbildung 17: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Probe MB_L .....	28
Abbildung 18: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Probe KB_TS.....	29
Abbildung 19: Quantifizierung - Vor Ort entnommene Proben.....	30
Abbildung 20: Quantifizierung - Löss-Ton Mischungen .....	32
Abbildung 21: Quantifizierung - Sand-Ton Mischungen.....	34
Abbildung 22: Korngrößenbestimmung - Kornsummenkurve der vor Ort entnommenen Proben .....	38

Abbildung 23: Atterberg'sche Fließgrenze und Anteil der Tonminerale .....	50
Abbildung 24: Korrelation der Atterberg'schen Fließgrenze mit dem gesamten Anteil an Tonmineralen in den Proben und Mischungen .....	51
Abbildung 25: Korrelation der Atterberg'schen Fließgrenze mit dem Anteil bestimmter Tonminerale in den Proben und Mischungen .....	52
Abbildung 26: Kationenaustauschkapazität und Anteil der Tonminerale .....	54
Abbildung 27: Korrelation der Kationenaustauschkapazität mit dem gesamten Anteil an Tonmineralen in den Proben und Mischungen .....	55
Abbildung 28: Korrelation der Kationenaustauschkapazität mit dem Anteil bestimmter Tonminerale in den Proben und Mischungen .....	56
Abbildung 29: Korrelation der Kationenaustauschkapazität gegenüber den Zustandsgrößen der Atterberg'schen Fließgrenze .....	58

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Proben .....	15
Tabelle 2: Koordinaten der Probenahme .....	16
Tabelle 3: Übersicht der Mischungen .....	16
Tabelle 4: Verwendete Standards - Kohlenstoff-Wasser Analysator .....	20
Tabelle 5: Anforderungen an das Verfahren nach Casagrande .....	22
Tabelle 6: Messbereiche für das Verfahren nach Casagrande .....	22
Tabelle 7: Röntgenfluoreszenzanalyse - Hauptelemente der vor Ort entnommenen Proben .....	35
Tabelle 8: Röntgenfluoreszenzanalyse - Glühverluste der vor Ort entnommenen Proben .....	36
Tabelle 9 : Kohlenstoffanalyse - Vor Ort entnommene Proben .....	37
Tabelle 10: Korngrößenbestimmung - Anteil entsprechend der Korngröße gemäß DIN EN ISO 14688-2 .....	40
Tabelle 11: Korngrößenbestimmung - Berechnete kf -Werte .....	41
Tabelle 12: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Zustandsgrenzen und Bodenart .....	42
Tabelle 13: Kationenaustauschkapazität - Vor Ort entnommene Proben .....	44
Tabelle 14: Kationenaustauschkapazität - Löss-Ton Mischungen .....	44
Tabelle 15: Kationenaustauschkapazität - Sand-Ton Mischungen .....	45



## Abstract

Tone und Tonminerale werden aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften in vielen Bereichen eingesetzt. Für die Entsorgungswirtschaft sind sie seit langem ein wichtiger Rohstoff. Ihr niedriger Durchlässigkeitsbeiwert sowie ihre Fähigkeiten zu quellen und Schadstoffe zu binden, machen sie zu einem idealen Rohstoff für die Abdichtung von Deponien. Dies betrifft neben der Basisabdichtung auch die künstliche geologische Barriere. Sie ist, zusätzlich zur Basisabdichtung, eine ergänzende Barriere unterhalb des Deponiekörpers, die die Umwelt vor unkontrollierten Emissionen durch den gelagerten Abfall schützen soll. Die Eigenschaften, die künstliche geologische Barrieren in Österreich erfüllen müssen, sind durch die Deponieverordnung (2008) geregelt. Die ÖNORM S 2074-1 definiert die Vorgehensweise der Standorterkundung und die notwendigen Laboruntersuchungen und Kennwerte für die künstliche geologische Barriere. Zu den wichtigsten Laboruntersuchungen gehören die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen sowie die Bestimmung der Tonmineralogie anhand einer Röntgendiffraktometrie-Analyse. Die Kationenaustauschkapazität ist in der Liste der Laboruntersuchungen der ÖNORM S 2074-1 nicht angeführt. Sie ist ein Maß zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften von Tonen, wie der Diffusion von geladenen und ungeladenen Molekülen und der Retention von Kationen. Diese Arbeit soll klären, ob die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität eine alternative Methode zu derzeit verwendeten Laboruntersuchungen darstellt. Dafür wurden vier Proben von zwei Deponien der Firma Zöchling Abfallverwertung sowie sechs Mischungen aus diesen Proben auf ihre mineralogischen, chemischen und geotechnischen Eigenschaften untersucht. Die Ergebnisse wurden einander gegenübergestellt und der Zusammenhang zwischen der Tonmineralogie, der Atterberg'schen Zustandsgrenzen und der Kationenaustauschkapazität definiert. Anschließend wurden die jeweiligen Vorteile und Nachteile der Methoden diskutiert. Diese Arbeit kommt zu dem Schluss, dass die Kationenaustauschkapazität eine Alternative zu Laboruntersuchungen wie der Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie und der Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen ist. Ob die Kationenaustauschkapazität dabei eine vollständige Alternative oder als teilweise Substitution verwendet werden kann, sollte in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit wird eine teilweise Substitution der aktuell verwendeten Laboruntersuchungen als realistisch betrachtet.

## Abstract

Clay and clay minerals are used in many areas due to their specific properties. They have long been an important raw material for the waste management industry. Their low-hydraulic permeability as well as their swelling property and adsorption capacity make them an ideal raw material for landfills liners. In addition to being a favorable material for liners, this also applies to the geological barrier of landfills. In addition to the base sealing, it is a supplementary barrier beneath the body of the landfill, intended to protect the environment from uncontrolled leachate from the waste material. The properties that an geological barrier in Austria must meet are regulated by the Deponieverordnung (2008). The ÖNORM S 2074-1 defines the procedure for site exploration and the necessary laboratory tests and parameters for the geological barrier. The most important laboratory tests include the Atterberg tests and the determination of the clay mineralogy using an X-ray diffractometry analysis. The cation exchange capacity is not included in the list of laboratory tests of the ÖNORM S 2074-1. It is a numerical value to describe the physical properties of clays, such as the diffusion of charged and uncharged molecules and the cation retention. This work is supposed to clarify whether the cation exchange capacity represents an alternative method to currently used laboratory tests. For this purpose, four samples from two landfills owned by the company Zöchling Abfallverwertung as well as six mixtures of these samples were examined for their mineralogical, chemical and geotechnical properties. The results were compared and correlations between the clay mineralogy, the Atterberg tests and the cation exchange capacity specified. Subsequently the respective advantages and disadvantages of each method were discussed. This work concludes that the cation exchange capacity is an alternative to other laboratory tests, such as determining the clay mineralogy using X-ray diffraction or the Atterberg test. To what extent the cation exchange capacity represents a complete alternative to another laboratory test or should be used as a partial substitution should be clarified in further studies. Based on the results of this work, a partial substitution of the currently used laboratory tests is considered feasible.

## 1. Einleitung

Tonminerale finden in vielen Bereichen unserer modernen Gesellschaft Anwendung. Ob in der Medizin, im Kunsthandwerk oder als Rohstoff in der Bauindustrie. Tone sind aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften vielseitig einsetzbar. Für die Entsorgungswirtschaft sind Tone seit Jahrzehnten ein wichtiger Rohstoff. Im Deponiebau werden Tone und tonhaltige Bodenmischungen für die Abdichtung der Deponie verwendet. Neben der Oberflächenabdeckung und der Deponiebasisabdichtung gilt dies auch für die künstliche geologische Barriere.

Im modernen Deponiebau nimmt die künstliche geologische Barriere einen essentiellen Part ein, da sie eine zusätzliche Maßnahme ist, um die Umwelt vor unkontrollierten Emissionen durch den gelagerten Abfall zu schützen (Musso et al., 2010). Die Barriere muss dabei insbesondere zwei Anforderungen erfüllen: Sie soll einen niedrigen Durchlässigkeitsbeiwert haben und die Fähigkeit besitzen, Schadstoffe zu binden (Czurda, 2006). Ähnliche Aussagen ergeben sich aus Punkt 5 der ÖNORM S 2074-1, welche die Standorterkundung und damit die notwendigen Laboruntersuchungen und Kennwerte für die künstliche geologische Barriere definiert. Gemäß der ÖNORM S 2074-1 sind die wichtigsten Kenngrößen für die künstliche geologische Barriere der Durchlässigkeitsbeiwert und das Verformungsverhalten.

Verdichtete Tone, insbesondere wenn sie die Tonminerale Smectit und Vermiculit enthalten, verfügen natürlicherweise über einen geringen Durchlässigkeitsbeiwert und besitzen darüber hinaus die Fähigkeiten zu quellen und Schadstoffe zu binden (Bahmani und Bayram, 2018). Sie minimieren somit das Austreten und den Transport von Schadstoffen in die Umwelt (Chen et al., 2014).

Der Durchlässigkeitsbeiwert sagt aus, wie schnell eine Flüssigkeit ein Gestein oder einen Boden durchfließen kann. Er ist von vielen Faktoren abhängig, beispielsweise der Bodenporosität, der Korngröße, dem Kapillarradius und dem Tongehalt. In Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass der Durchlässigkeitsbeiwert mit zunehmendem Tongehalt abnimmt. (Shevnin et al., 2006).

Zudem besitzen Tonminerale die Fähigkeit Schadstoffe zu adsorbieren. Somit sind Tonminerale in der Lage, Flüssigkeiten und Kationen durch Ionenaustausch zu binden. In Abhängigkeit von der chemischen Umgebung können diese Schadstoffe an weiteren Austauschprozessen beteiligt sein. Die Schadstoffe werden daher nicht final gebunden. (Czurda, 2006).

Es ist daher von Bedeutung das Ausgangsmaterial der künstlichen geologischen Barriere auf das Vorhandensein und die spezifischen Eigenschaften der Tonminerale zu untersuchen.

Die in der ÖNORM S 2074-1 angeführte Liste der Laboruntersuchungen zur Bestimmung der hydrogeologischen und geotechnischen Eigenschaften des Bodenmaterial umfasst unter anderem die Bestimmung der Tonminerale anhand der Röntgendiffraktometrie und die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen. Ein Zusammenhang zwischen der Atterberg'schen Zustandsgrenzen und dem Anteil der Tonminerale im Probenmaterial ist in der Literatur

bereits diskutiert worden (Schmitz et al., 2004) und soll auch in dieser Arbeit untersucht werden. Die Atterberg'schen Zustandsgrenzen setzen sich aus mehreren Kennwerten zusammen, darunter die Fließgrenze und die Plastizitätsgrenze. Insbesondere die Fließgrenze ist für diese Arbeit von Bedeutung, da angenommen wird, dass sie von quellfähigen Tonen beeinflusst wird (Schmitz et al., 2004). Die Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie ist relevant, da anhand dieser eine Quantifizierung durchgeführt wird, welche genaue Werte für den Anteil der wichtigsten Tonminerale im Bodenmaterial liefert.

Diese Masterarbeit soll die Frage beantworten, ob die Kationenaustauschkapazität eine alternative Methode zu den in der ÖNORM S 2074-1 vorgeschlagenen und anerkannten Laboruntersuchungen darstellt. Dies betrifft die zuvor genannte Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen sowie die Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie.

Die Kationenaustauschkapazität (CEC) ist die Messgröße, die beschreibt, in welchem Maße Tonminerale die Fähigkeit besitzen, Kationen und somit eine Vielzahl von Schadstoffen zu binden. Ein höherer Wert für die Kationenaustauschkapazität bedeutet, dass eine größere Menge Schadstoffe durch den Ton aus dem Sickerwasser entfernt werden kann (Kabir und Taha, 2003). Für die Kationenaustauschkapazität wird somit angenommen, dass sie, wie die Atterberg'sche Zustandsgrenzen, mit dem Anteil an Tonmineralen im Probenmaterial in einem Zusammenhang steht.

Zur Beantwortung dieser Frage wurden vier Sediment-Proben sowie sechs Mischungen aus diesen Proben von zwei Deponiestandorten der Firma Zöchling Abfallverwertung im Labor auf ihre mineralogischen, chemischen und geotechnischen Eigenschaften geprüft.

Für die Bestimmung der mineralogischen Eigenschaften wurde die Gesamtmineralogie und die Tonmineralogie am Röntgendiffraktometer (XRD) analysiert. Anhand einer texturfreien Röntgendiffraktometrie-Analyse wurden die wichtigsten Tonminerale quantifiziert.

Die chemische Analyse wurde an den vier vor Ort entnommenen Proben durchgeführt. Zum einen wurden die Haupt- und Nebenelemente anhand der Röntgenfluoreszenz bestimmt. Zum anderen wurde der organische Anteil in den Proben ermittelt.

Zur Ermittlung der geotechnischen Eigenschaften wurden die Korngrößenbestimmung, die Atterberg'sche Zustandsgrenzen und die Kationenaustauschkapazität für alle vor Ort entnommenen Proben und Mischungen bestimmt.

Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen sollen miteinander verglichen und der Zusammenhang zwischen der Bestimmung der Tonmineralogie, den Atterberg'schen Zustandsgrenzen und der Kationenaustauschkapazität diskutiert werden. Im letzten Schritt werden die drei Methoden einander gegenübergestellt und evaluiert.

## 1.1. Aktuelle Verordnungen

In Österreich werden die Anforderungen an eine Deponie durch die Deponieverordnung von 2008 (DVO 2008) geregelt, welche eine Verordnung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft ist. Unter Abschnitt 6 der DVO 2008 wird die Deponietechnik beschrieben, welche den Aufbau einer Deponie festlegt. Abbildung 1 veranschaulicht den Aufbau einer Reststoff- und Massenabfalldeponie. Diese entspricht den Deponieklassen 2 und 3 und ist Gegenstand dieser Arbeit.

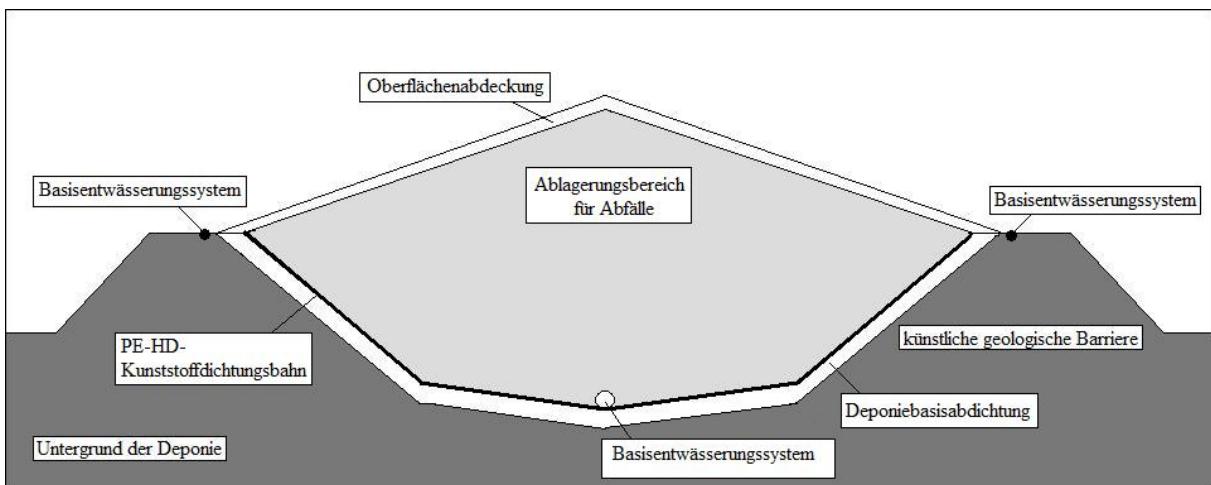


Abbildung 1: Aufbau einer Deponie der Deponieklassen 2 und 3

(Nach: Deponieverordnung (2008))

Eine Deponie besteht von oben nach unten betrachtet aus der Oberflächenabdeckung, dem Ablagerungsbereich für Abfälle, dem Basisentwässerungssystem, der PE-HD Kunststoffdichtungsbahn und der Deponiebasisabdichtung. Unterhalb der Basisabdichtung befindet sich die künstliche geologische Barriere.

Für die Deponieklassen 2 und 3 wird in der DVO 2008 vorgeschrieben, dass die künstliche geologische Barriere „zumindest im Bereich der Aufstandsfläche des Deponiekörpers über einen geologisch, hydrogeologisch und geotechnisch möglichst einheitlichen, gering durchlässigen Untergrund verfügen“ (DVO 2008) soll. In Abschnitt 5, § 22 der DVO 2008 werden die Anforderungen an diese Barriere genau definiert. Sie können im Anhang unter Anhang 1 eingesehen werden.

Ab der Deponiekasse 2 ist gemäß Abschnitt 5, § 23 der DVO 2008 eine Standorterkundung und -untersuchung durchzuführen. Diese werden in der ÖNORM S 2074-1 „Geotechnik im Deponiebau – Teil 1: Standorterkundung“ vom 01.05.2004 und der ÖNORM S 2074-2 „Geotechnik im Deponiebau – Teil 2: Erdarbeiten“ vom 01.09.2004 ausführlich beschrieben.

Die ÖNORM S 2074-1 Punkt 5 definiert den Umfang und die Art der hydrogeologischen und geotechnischen Erkundungen, die ausgeführt werden müssen. Unter Punkt 6 werden die zu-

lässigen Verfahren beschrieben. Entsprechend der „zu erwartenden Untergrundverhältnisse, der Größe der geplanten Deponie und dem Gefährdungspotential der zu erwartenden Abfälle“ (ÖNORM S 2074-1) sollen die Verfahrensweise und der Umfang der notwendigen Untersuchungen aus dem entsprechenden Katalog ausgewählt werden. Bei der Wahl der geotechnischen Untersuchungen soll zudem darauf geachtet werden, dass „eine möglichst gesicherte Aussage über die Untergrundverhältnisse und die Bedenkenswerte erzielt werden kann“ (ÖNORM S 2074-1).

Die ÖNORM S 2074-2 beschreibt die Erdarbeiten, die ergänzend zu der Standorterkundung durchgeführt werden müssen. Punkt 5 der ÖNORM S 2074-2 befasst sich mit dem Unterbau der Deponie, der künstlichen geologischen Barriere. Es werden sowohl der unbehandelte Untergrund, wie auch der verbesserte Untergrund erläutert und die notwendigen Erkundungen detailliert beschrieben. Darüber hinaus werden die geforderten Kennwerte für den verbesserten Untergrund genannt.

Die in der ÖNORM S 2074-1 angegebenen Laboruntersuchungen sind im Rahmen dieser Arbeit von besonderem Interesse. Die in ÖNORM S 2074-1 angeführte Tabelle umfasst unter anderem die Korngrößenbestimmung, die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen, den organischen Anteil und die Röntgendiffraktometrie. Diese Laboruntersuchungen werden in dieser Arbeit ebenfalls ausgeführt. Die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität wird in der ÖNORM S 2074-1 nicht in der Liste für Laboruntersuchungen für Lockergestein angeführt. Als ergänzende Untersuchungsmethode kann sie allerdings angewandt werden.

## **1.2. Aktueller Stand der Forschung**

In der Literatur wird die Kationenaustauschkapazität oftmals als Untersuchungsmethode herangezogen um zu prüfen, ob ein Boden bzw. ein Material für die Deponieabdichtung verwendet werden kann (Musso et al., 2010; Oluwapelumi, 2015; Afolagboye et al., 2017). Die Kationenaustauschkapazität spielt neben weiteren Laboruntersuchungen wie der Korngrößenbestimmung, der Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen und Proctorversuchen eine entscheidende Rolle für die Eignungsprüfung von Bodenmaterial (ÖNORM S 2074-1).

Neben direkten Methoden zur Bestimmung der Kationenaustauschkapazität anhand von natürlichen Kationen wie K oder Na, gibt es auch indirekte Methoden wie die Bestimmung von organischen Kationen (Meier und Kahr, 1999).

Eine bevorzugte oder genormte Methode gibt es nicht. In vielen Veröffentlichungen wird die Bestimmung nach Chabra et al. (1975) mit Silbernitrat verwendet. Die Methylenblau-Methode ist eine sehr schnell durchzuführende Methode, die im Vergleich zu anderen Methoden jedoch nicht zuverlässig ist (Kahr und Madsen, 1995).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Methode nach Meier und Kahr (1999) angewandt. Dabei wird ein Cu(II)-Ethylendiamin-Komplex hergestellt und die Kationenaustauschkapazität anschließend anhand eines Photometers bestimmt. Der Cu(II)-Ethylendiamin-Komplex eignet sich für die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität, da Tonminerale eine hohe Affinität für diese Ionen besitzen (Meier und Kahr, 1999).

## 2. Standortbeschreibung

### 2.1. Allgemeine Geographie

Die Proben stammen von zwei Deponien, die der Firma Zöchling Abfallverwertung gehören. Beide Deponien befinden sich im Gebiet der Gemeinde Mistelbach in Niederösterreich.

Mistelbach liegt im östlichen Weinviertel auf etwa 228 m über dem Meeresspiegel. Das Gemeindegebiet umfasst 10 Ortschaften mit 13.700 Einwohnern. ([weinviertel.at](http://weinviertel.at)).

Die Deponie ‚Mistelbach‘ liegt im Osten der Ortschaft Mistelbach unmittelbar an der Mistelbacher Straße. Bei der Deponie ‚Mistelbach‘ handelt es sich um eine Reststoffdeponie mit Abfallbehandlungsanlage vor Ort.

Eine Aufsicht auf die Deponie ‚Mistelbach‘ vom Standort der Probenahme aus befindet sich in Abbildung 2. Der südliche Teil der Deponie ist bereits aufgeschüttet und abgedichtet. Der mittlere Teil befindet sich in der Aufschüttung, während im nördlichsten Teil der Deponie der Rohbau fertiggestellt wird.



Abbildung 2: Blick nach Süden auf die Deponie ‚Mistelbach‘

(Foto: Zora Alice Kumm)

In Abbildung 3 sind die Deponie „Mistelbach“ sowie die unmittelbare Umgebung dargestellt. Das Gelände der Deponie ist pink umfasst, die Wohnbebauung grün, gewerblich genutzte Flächen blau. Der Ort der Probenahme ist mit einem Stern markiert. In der unmittelbaren Umgebung der Deponie befinden sich Äcker sowie ein kleines Waldstück im Westen. An das Waldstück angrenzend, an der Lichtensteinstraße, befindet sich eine kleine Wohnsiedlung. Im Süden der Deponie sind eine Hundeschule und eine Kläranlage.



Abbildung 3: Unmittelbare Umgebung der Deponie „Mistelbach“.

Das Gelände der Deponie ist pink eingefasst. Die Wohnsiedlung im Westen der Deponie ist grün umrandet, die gewerblich genutzten Flächen sind blau umfasst. Der Ort der Probenahme ist mit einem gelben Stern gekennzeichnet.

(Quelle: nach geoland.at)

Die Deponie „Kettlasbrunn“ befindet sich südlich der Ortschaft Kettlasbrunn in Niederösterreich. Die Zufahrt liegt nahe der Brünner Straße an der A5. Die Deponie „Kettlasbrunn“ ist ebenfalls eine Reststoffdeponie. Eine Abfallbehandlungsanlage ist vorhanden.

Eine Ansicht auf die Deponie „Kettlasbrunn“ befindet sich in Abbildung 4. Bei diesem Teil der Deponie handelt es sich um den ersten Deponiekörper. Ein zweiter befindet sich in der Planung. Die Deponie „Kettlasbrunn“ ist zum Teil im Aufbau. Der nördliche Teil der Deponie befindet sich in der Aufschüttungsphase. Richtung Süden befindet sich die Deponie im Rohbau.



Abbildung 4: Blick nach Norden auf die Deponie „Kettlastrunn“

(Foto: Zora Alice Kumm)



Abbildung 5: Unmittelbare Umgebung der Deponie „Kettlastrunn“.

Das Gelände der Deponie ist pink umfasst. Der gelbe Stern markiert den Ort der Probenahme für die Tonsandprobe. Der rote Stern kennzeichnet die Orte der Probenahme für die Tonprobe und die Sandprobe.

(Quelle: nach geoland.at)

In Abbildung 5 sind die Deponie „Kettlasbrunn“ sowie die unmittelbare Umgebung dargestellt. Das Gelände der Deponie ist pink umfasst, die Orte der Probenahmen sind mit einem Stern gekennzeichnet. Der gelbe Stern kennzeichnet den Ort der Probenahme für die Ton-sandprobe. Die Orte der Probenahme der Tonprobe und der Sandprobe sind durch einen roten Stern markiert. Eine genauere Darstellung der Orte der Probenahme für die Tonprobe und die Sandprobe befindet sich in Abbildung 8.

Die Umgebung der Deponie ist durch Waldstücke, Wiesen und Äcker geprägt. Zudem wird die Umgebung zur Erzeugung von Windenergie genutzt. In der unmittelbaren Umgebung befindet sich keine Wohnbebauung und keine gewerblich genutzte Fläche.

## 2.2. Allgemeine Geologie

### 2.2.1. Geologie

Die Geologie im Umkreis der beiden Deponien ist durch quartäre Sedimente aus dem Holozän und Pleistozän geprägt sowie aus Sedimenten des Wiener Beckens und dessen Randbuchten.

In Abbildung 6 sind Ausschnitte der geologischen Karte „Geologische Karte 25, Poysdorf (Ausgabe 2018/09)“ der Geologischen Bundesanstalt von Österreich dargestellt. Die Standorte der Deponien sind pink umfasst. Abbildung 7 gibt den relevanten Abschnitt der Legende dieser geologische Karte wieder.

Der südliche Teil der Deponie „Mistelbach“ befindet sich auf einem Aufschluss der Bzenec-Formation aus dem unteren Pannonium. Dieser besteht vorwiegend aus Tonmergel und Sand. Auf der Karte in Abbildung 6 ist diese Formation in braun mit schwarzen Punkten eingefärbt, Nummer 11. Der überwiegende Teil der Deponie befindet sich auf einem Aufschluss der Hollabrunn-Mistelbach-Formation aus dem Pannonium. Dieser setzt sich aus Kies und Sand, die lokal konglomeratisch verfestigt sein können, zusammen. Zudem können lokal siltig-tonige und sandreichere Einschaltungen vorkommen. Bei der Hollabrunn-Mistelbach-Formation handelt es sich um fluviatile Ablagerungen. Diese Formation ist in Abbildung 6 braun mit schwarzen Kreisen und der Nummer 13 dargestellt. Beide Formationen gehören zum Wiener Becken und dessen Randbuchten. (Geologische Karte 25, Poysdorf (Ausgabe 2018/09)).

Der nördliche Teil der Deponie befindet sich auf einer Lössablagerung aus dem Pleistozän. Diese ist siltig, sandig und zum Teil lehmig. In Abbildung 6 hellgelb mit roten Punkten und der Nummer 6 versehen. (Geologische Karte 25, Poysdorf (Ausgabe 2018/09)).

Weitere Aufschlüsse der Bzenec-Formation und der Hollabrunn-Mistelbach-Formation finden sich auch in der näheren und weiteren Umgebung der Deponie. Lössablagerungen aus dem Pleistozän finden sich ebenfalls in der Umgebung der Deponie. Südlich der Deponie befinden sich Bach- und Flussablagerungen aus dem Holozän. Diese bestehen aus Ton, Silt und Sand.

Zum Teil können Kies und Lehm auftreten. Diese sind in der Karte weiß dargestellt und mit der Nummer 2 gekennzeichnet. Im Osten der Deponie befindet sich zudem ein Aufschluss der Skalica-Formation aus dem oberen Sarmatium. Diese Formation gehört ebenfalls zum Wiener Becken und dessen Randbuchten. Sie besteht hauptsächlich aus Sand, Kalkstein und Tonmergel. Sie ist in der Karte grün und besitzt die Nummer 14. Im Südwesten der Deponie finden sich hochgelegene Terrassensedimente aus dem Pleistozän. Diese bestehen aus Kies und Sand. Zum Teil können sie verfestigt sein. Sie sind in Abbildung 6 gelb mit roten Kreisen und mit der Nummer 8 versehen. (Geologische Karte 25, Poysdorf (Ausgabe 2018/09)).

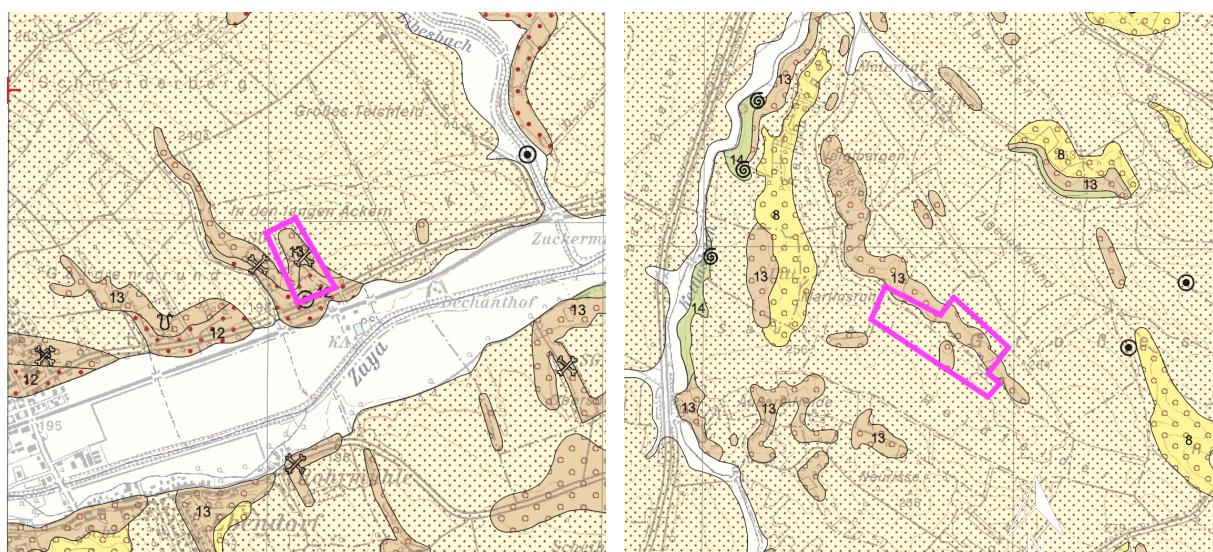


Abbildung 6: Geologische Karte der Umgebung der Deponien. Links: Deponie „Mistelbach“; Rechts: Deponie „Kettlasbrunn“ Maßstab: 1:50.000

(Quelle: nach Geologische Karte 25 (Poysdorf, Ausgabe 2018/09))

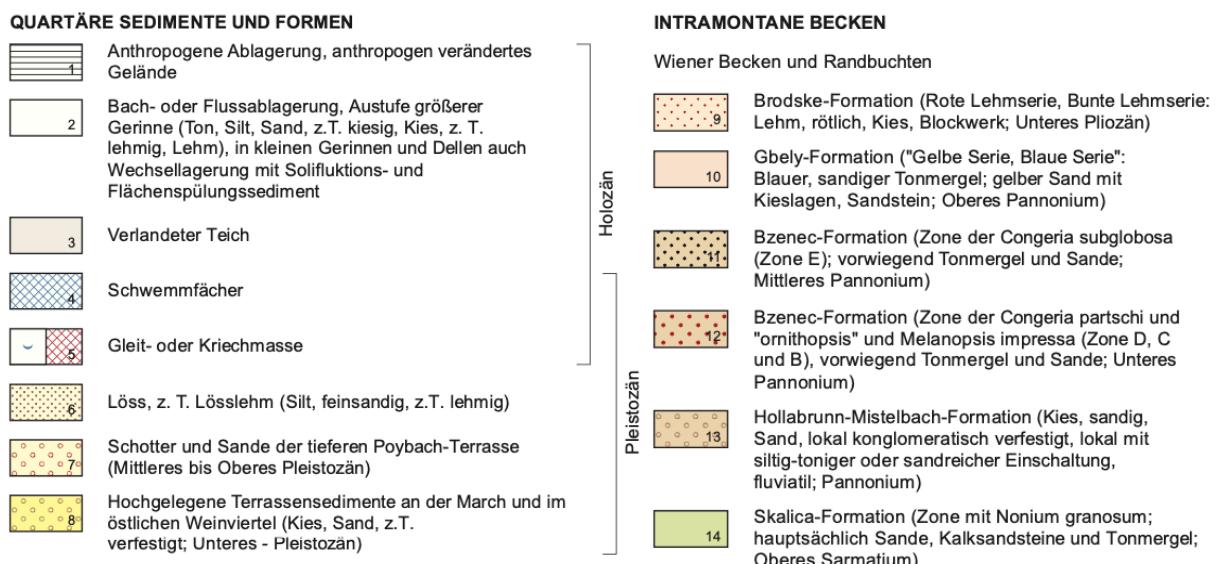


Abbildung 7: Ausschnitt aus der Legende „Geologische Karte 25 (Poysdorf)“

(Quelle: nach Geologische Karte 25 (Poysdorf, Ausgabe 2018/09))

Die Deponie „Kettlastrabunn“ befindet sich ebenfalls auf einem Aufschluss der Hollabrunn-Mistelbach-Formation. In der Karte ist diese braun mit schwarzen Kreisen dargestellt und hat die Nummer 13. Diese wird von Lössablagerungen umgeben, die zum Teil aus Lösslehm bestehen. Sie sind siltig, sandig und zum Teil lehmig. In Abbildung 6 hellgelb mit roten Punkten und der Nummer 6 dargestellt. (Geologische Karte 25, Poysdorf (Ausgabe 2018/09)).

In der Umgebung der Deponie finden sich Aufschlüsse der Skalica-Formation. Sie ist in der Karte grün und mit der Nummer 14 versehen. Im Westen sowie im Nordwesten und Norden der Deponie befinden sich Bach- und Flussablagerungen aus dem Holozän. Diese sind in der Karte weiß dargestellt und mit der Nummer 2 gekennzeichnet. Diese bestehen aus Ton, Silt und Sand. Zum Teil können Kies und Lehm auftreten. Darüber hinaus treten in der Umgebung der Deponie „Kettlastrabunn“ hochgelegene Terrassensedimente aus dem Pleistozän auf. Sie sind in Abbildung 6 gelb mit roten Kreisen und mit der Nummer 8 versehen. (Geologische Karte 25, Poysdorf (Ausgabe 2018/09)).

Auf dem Gelände der Deponie „Kettlastrabunn“ befinden sich gut ausgeprägte Wechsellagerungen aus Ton und Sand. Eine Aufnahme dieser Wechsellagerungen ist in Abbildung 8 dargestellt.

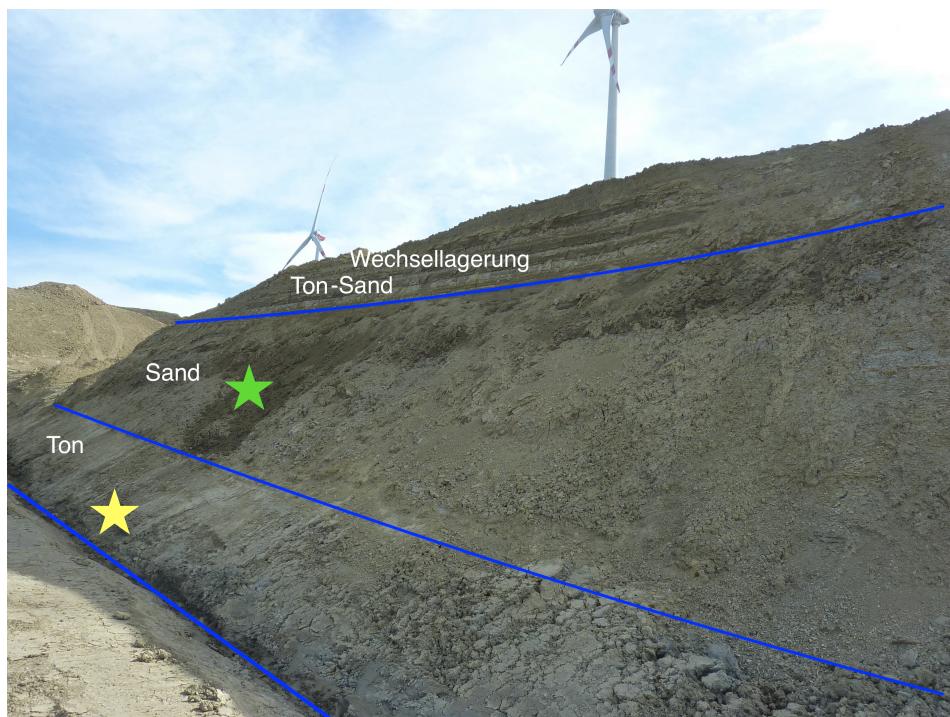


Abbildung 8: Sand- und Tonwechsellagerung bei der Deponie „Kettlastrabunn“

Der gelbe Stern kennzeichnet den Ort der Probenahme für die Tonprobe. Der grüne Stern markiert den Ort der Probenahme für die Sandprobe.

(Foto: Susanne Gier)

Bei diesen Wechsellagerungen handelt es sich wahrscheinlich um fluviatile Ablagerungen innerhalb der Hollabrunn-Mistelbach-Formation. Dabei kann es sich um ehemalige Auen- oder Überschwemmungsgebiete handeln.

## 2.2.2. Tektonik

Die Tektonik in der Umgebung der Deponien ist durch Störungen geprägt. In der Nähe der Deponien befindet sich die Bisamberg-Störung. Nördlich von Mistelbach ist die Schrattenberg-Störung und im Süden die Steinberg-Störung. Alle Störungen gehören zum Mur-Mürz-Wiener-Becken-Vah-Großstörungssystem und Wiener Becken. (nach [geolba.maps.arcgis.com](http://geolba.maps.arcgis.com)).

Abbildung 9 gibt eine Übersicht über die Störungen in der Umgebung der Deponien. Die Bisamberg-Störung ist rot gekennzeichnet, die Schrattenberg-Störung blau und die Steinberg-Störung grün.

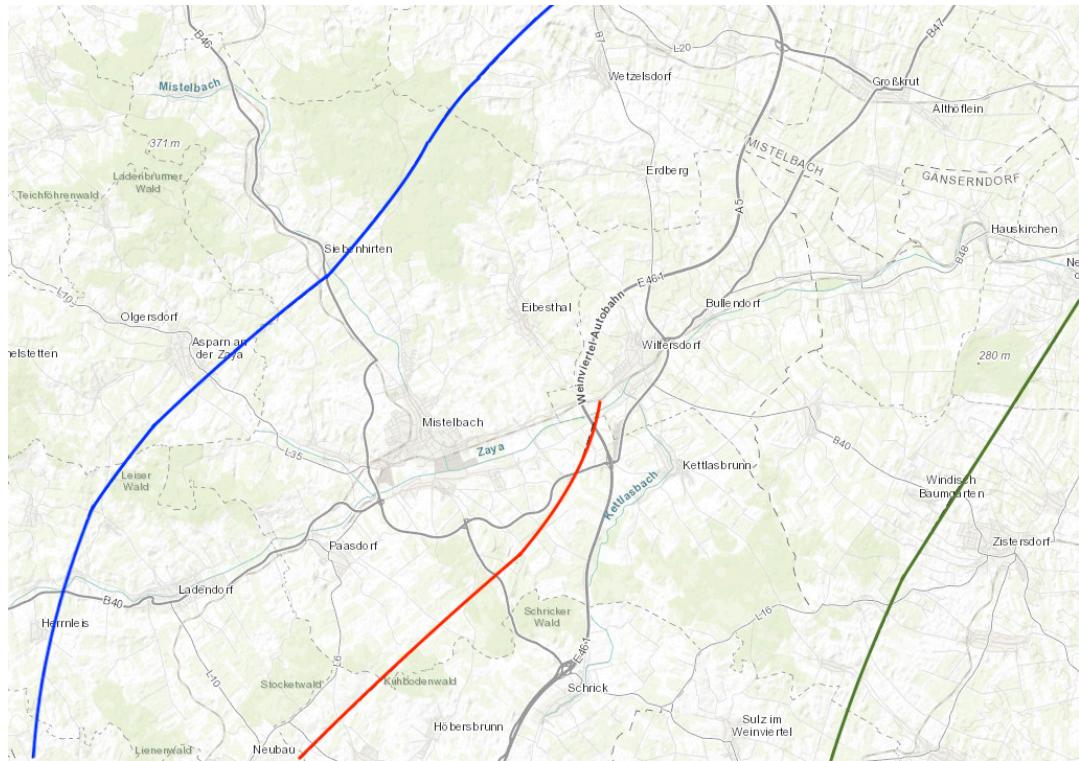


Abbildung 9: Störungen in der Umgebung der Deponien

(Quelle: nach [geolba.maps.arcgis.com](http://geolba.maps.arcgis.com))

### 3. Material und Methodik

Die Bestimmung der mineralogischen, chemischen und geotechnischen Eigenschaften erfolgte an vier Sediment-Proben sowie sechs Mischungen aus diesen Proben von zwei Deponiestandorten der Firma Zöchling Abfallverwertung.

#### 3.1. Material

Die Sediment-Proben stammen von zwei Deponiestandorten der Firma Zöchling Abfallverwertung. Eine Übersicht über die Proben ist in Tabelle 1 gegeben. Darüber hinaus wurden aus den Sediment-Proben zwei Sätze an Mischungen erstellt. Eine Übersicht über die Mischungen befindet sich in Tabelle 3.

Tabelle 1: Übersicht der Proben

Die Probe von der Deponie „Mistelbach“ ist durch das Kürzel MB gekennzeichnet. Die Proben von der Deponie „Kettlastrunn“ sind mit dem Kürzel KB versehen. Die Buchstaben im Anschluss an die Beschreibung der Deponie beschreibt die dominante Korngröße. Das L steht für Löss, TS für Ton-sand, T für Ton und S für Sand.

Eine genauere Beschreibung der Abkürzungen befindet sich in Anhang 2.

Sediment-Proben (vor Ort entnommen)	Bezeichnung im Fließtext
MB_L	Lössprobe
KB_TS	Tonsandprobe
KB_T	Tonprobe
KB_S	Sandprobe

Von der Deponie „Mistelbach“ stammt die Lössprobe. Die Probe wurde von einer Aufschüttung direkt neben dem Deponiekörper entnommen. Der Ort der Probenahme ist in Abbildung 3 durch einen Stern gekennzeichnet. Bei der Lössaufschüttung handelt es sich um Material, das beim Bau der Deponie ausgehoben und aufgeschüttet wurde.

Die Proben von der Deponie „Kettlastrunn“ stammen von zwei Standorten. Bei der Tonsandprobe handelt es sich ebenfalls um einen Aufschüttung von Material, das während des Baus der Deponie ausgehoben wurde. Dabei wurden sandige und tonige Lagen willkürlich vermischt. Der Ort der Probenahme der Tonsandprobe ist in Abbildung 5 durch einen gelben Stern gekennzeichnet. Die Tonprobe und die Sandprobe stammen von einem Aufschluss der Wechsellagerung, die in Kapitel 2.2.1. Geologie beschrieben wird. Es wurde eine Probe aus einer sandigen Ablagerung und eine Probe aus einer tonigen Ablagerung entnommen. Die Orte der Probenahmen für die Sandprobe und die Tonprobe sind in Abbildung 5 durch einen roten Stern gekennzeichnet. Eine exaktere Kennzeichnung der Entnahmestellen befindet sich

in Abbildung 8. Der Ort der Probenahme für die Sandprobe ist durch einen grünen Stern gekennzeichnet, der Ort der Probenahme für die Tonprobe ist durch einen gelben Stern markiert.

Die Koordinaten für die Probenahme sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Koordinaten der Probenahme

(Quelle: nach maps.google.de)

Sediment-Proben	Hochwert	Rechtswert	Deponie
MB_L	48°34'39.3"N	16°36'15.2"E	Mistelbach
KB_TS	48°31'59.4"N	16°39'10.5"E	Kettlasbrunn
KB_T	48°32'04.4"N	16°39'10.4"E	Kettlasbrunn
KB_S	48°32'04.4"N	16°39'10.4"E	Kettlasbrunn

Für die Herstellung der Mischungen wurden verschiedene Anteile der vor Ort entnommenen Proben miteinander vermischt. Eine detaillierte Beschreibung der Mengenverhältnisse sowie eine Beschreibung der verwendeten Abkürzungen befindet sich in Anhang 2. Für eine möglichst homogene Mischung wurden die Proben von Hand zerkleinert und ein handelsübliches Handrührgerät zum Mischen verwendet.

Tabelle 3: Übersicht der Mischungen

Die ersten beiden Buchstaben der Mischung leiten sich von den vor Ort entnommenen und für die Herstellung der Mischung verwendeten Proben ab. L-T steht für Löss-Ton, S-T für Sand-Ton. Die anschließend folgenden Zahlen stehen für das Verhältnis der vor Ort entnommenen Proben an der Mischung. Dabei bezieht sich die erste Zahl auf den ersten Buchstaben (Löss oder Sand) und die zweite Zahl auf den zweiten Buchstaben (Ton).

Eine genauere Beschreibung der Abkürzungen befindet sich in Anhang 2.

Löss-Ton Mischungen	Sand-Ton Mischungen
L-T 1:2	S-T 1:2
L-T 1:1	S-T 1:1
L-T 2:1	S-T 2:1

### 3.2. Röntgendiffraktometrie

Die mineralogische Zusammensetzung der Proben wurde anhand der Röntgendiffraktometrie (XRD) bestimmt. Die Proben wurden hierfür in einer Achatschale zerkleinert und anschließend in einen Probenhalter mit einem Durchmesser von 16 mm gepresst. Siehe Abbildung 10 Links. Für die Messung wurde ein PANalytical X’Pert PRO Röntgendiffraktometer ver-

wendet (CuKa Strahlung, 40 kV, 40 mA, step size 0.0167, 5 s per step). Die Auswertung erfolgte am Computer anhand der Programme X’Pert Data Viewer und X’Pert HighScore Plus.

Für die Bestimmung der Tonmineralogie wurden die Proben zunächst mit einer H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Lösung (15%) versetzt, um das organische Material zu entfernen. Nach der Beendigung der Reaktion wurden die Suspensionen mit einem 400 Watt Ultraschallstab für 3 Minuten dispergiert. Anschließend wurde die < 2 µm Fraktion mit Hilfe der Sedimentation im Atterberg-Zylinder abgetrennt. 50 mg der Tonfraktion wurden in einem Zentrifugenröhrlchen abgewogen, mit 50 ml 1 M MgCl<sub>2</sub> oder KCl versetzt und 24 Stunden über Kopf geschüttelt. Nachfolgend wurden die Proben in die Zentrifuge gegeben (1500 rpm, 5 min) und daraufhin mit 50 ml entionisiertem Wasser aufgeschüttelt und erneut zentrifugiert (4000 rpm, 10 min). Es wurde eine Sigma 6-16K Zentrifuge verwendet. Nach dem Zentrifugieren wurde die überschüssige Flüssigkeit entfernt. Es wurden 5 ml entionisiertes Wasser erneut hinzugegeben und das Probenmaterial mit einem 400 Watt Ultraschallstab 1 Minute dispergiert. Anschließend wurde jeweils 1 ml der Lösung auf ein Glasplättchen pipettiert. Folgende Glasplättchen-Präparate wurden für die Analyse vorbereitet: K-gesättigt, K-Ethylenglykol gesättigt, K-550 °C temperiert, Mg-gesättigt, Mg-Glycerin gesättigt. Die Auswertung erfolgte mit dem Programm Data Viewer anhand der d-Wert Positionen gemäß Thorez (1976) und Moore und Reynolds (1997).

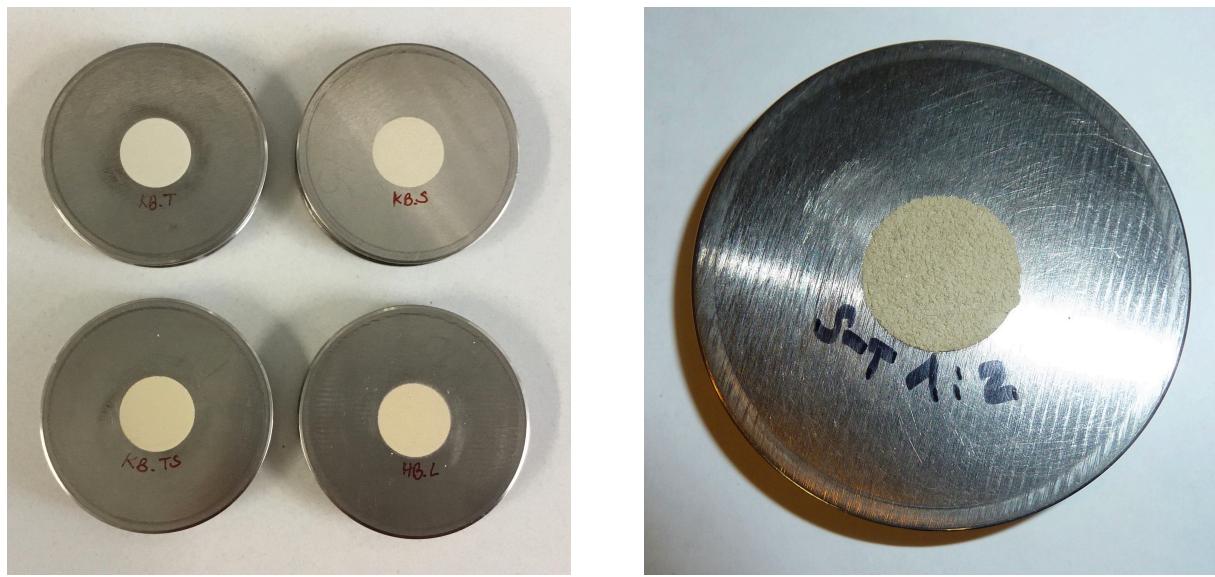


Abbildung 10: Links, Gesamtmineralogie. Rechts, Texturfreie Probe

(Fotos: Links, Zora Alice Kumm. Rechts, Susanne Gier)

Für die Quantifizierung der Tonminerale wurde das gepulverte Material texturfrei präpariert. Die Probe wurde locker in den Probenhalter gedrückt und die Oberfläche mit Sandpapier angerauht. Siehe Abbildung 10 Rechts. Anschließend wurden die Proben mit dem Röntgendiffraktometer gemessen (CuKa Strahlung, 40 kV, 40 mA, step size 0.0167, 5 s per step). Für die Auswertung wurde das Programm APD36G verwendet. Anhand des Programms wurden die

Intensitäten der Peaks bestimmt. Anschließend wurde die Methode von Schultz (1964) angewandt, um den Prozentanteil der Tonminerale zu bestimmen.

### 3.3. Röntgenfluoreszenz

Die Röntgenfluoreszenz-Analysen (XRF) wurden auf einem sequentiellen Röntgenspektrometer PHILIPS PW2404 unter Verwendung einer super-scharfen Endfensterröhre mit einer Rh-Anode und einem programmierbaren 4kW-Generator (60kV max., 125mA max.; iso-Watt-Schaltung) durchgeführt. Die begleitende Software ist PANalytical "SuperQ" Vers. 5.1B (5.2822.3) mit den Optionen "Pro-Trace" und „Omnian“. (Nagl et al., 2019).

Die Korrektur der Instrumentendrift erfolgt durch die Verwendung von Monitorproben; unbekannte Proben werden in Gruppen gefahren. Eine Charge sogenannter Qualitätskontrollproben wird ebenfalls zusammen mit jeder Gruppe gemessen. (Nagl et al., 2019).

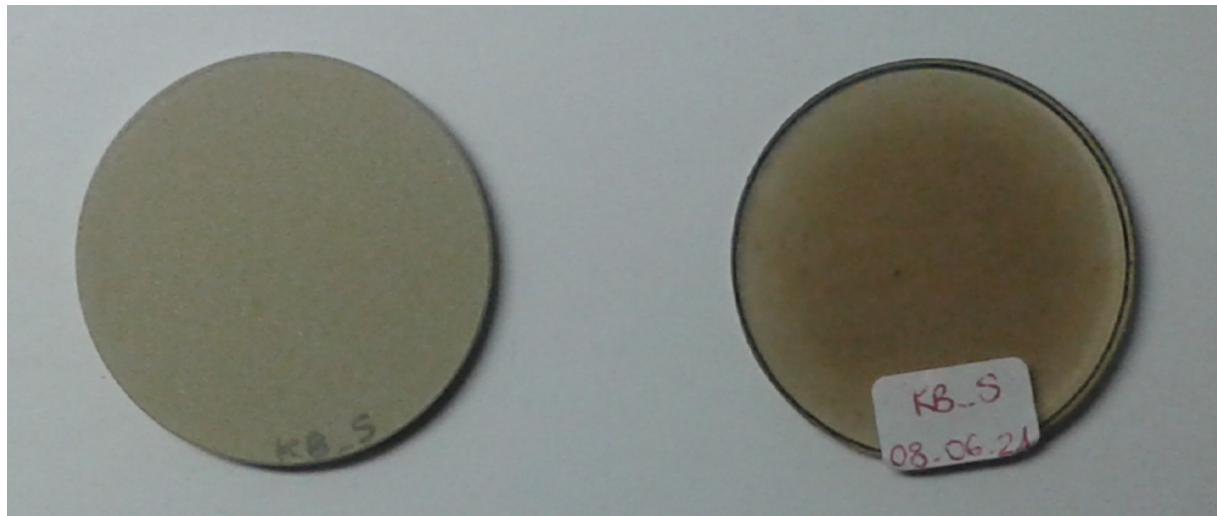


Abbildung 11: Links, Presspille. Rechts, Schmelzpille

(Fotos: Peter Nagl)

Die Hauptelemente Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K und P (üblicherweise in Mengen von >0,1 Gew.-M.-% Elementoxid vorhanden) werden an geglühtem Gesteinsmehl bestimmt, das mit Lithiumtetraborat/-metaborat als Flussmittel zu einer Glaspille geschmolzen wurde. (Nagl et al., 2019).

Die Spurenelemente As, Ba, Ce, Co, Cr, Cu, Ga, La, Mo, Nb, Nd, Ni, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, Y, Zn und Zr (normalerweise in Mengen von <1000ppm vorhanden) werden direkt aus dem zerkleinerten und gemahlenen Gesteinsmehl bestimmt, das mit Polyvinylalkohol als Bindemittel vermischt wurde, um eine gepresste Pulverpille zu bilden. (Nagl et al., 2019).

Für die Herstellung der Schmelzpille mit EAGON 2 wurden 0,8000 g des zuvor gebrannten Probenpulvers in eine kleine Porzellanform eingewogen. Anschließend wurden 8,0000 g einer

Li TB/MB-Mischung (Fluxana FX-X65-2; Di-Lithiumtetraborat:Di-Lithiummetaborate 66:34, in einem Ofen bei 110 °C für etwa 12 Stunden dehydriert) zugegeben. Das Verhältnis von 1:10 von geglühter Probe und Flussmittel ist entscheidend. Die Porzellanform wird in einem Exsikkator bis zum folgenden Verfahren zur Herstellung der geschmolzenen Pille aufbewahrt. Beide Pulver werden in der Porzellanform mit einem dünnen Glasstab homogenisiert, bevor die Mischung in einen Platintiegel gegossen wird. Der Tiegel und die Gießschale (eine Form mit einem Durchmesser von 40 mm) bestehen aus einer Legierung aus 95 M.-% Platin mit 5 M.-% Gold, wodurch sich die Schmelze bzw. die Glaspille vom Tiegel bzw. Gießschale löst). Die Herstellung einer Schmelzpillen erfolgt mit einer automatischen Schmelzmaschine PANalytical EAGON 2 (Mikroprozessor-basierter dualer Vorbereitungsofen zur Herstellung von Glasperlen für die Verwendung mit XRFS). Nach dem Einsetzen der Gießschale in ihren Keramikhalter wird der Pt-Tiegel mit der Mischung aus Flussmittel und Probe in den darüber liegenden Keramiktiegelhalter gestellt. Als NWA (Non-Benetzungsmitte)-Trennmittel werden Pillen aus Jodidverbindungen verwendet. Der Zyklus des Aufheizens, Gießens und Abkühlens der Probe läuft unter der Steuerung des Mikroprozessors des Systems nach Drücken der Starttaste an der Vorderseite der Maschine ab. Siehe Abbildung 11 Links. (Nagl et al., 2019).

Zur Herstellung der Presspille werden ca. 0,5 ml einer wässrigen Polyvinylalkohollösung (ca. 2M.-%, MERCK Mowiol) zu ca. 10 g des nicht geblühten Gesteinspulvers gegeben, das dann in einem 100 ml-Becherglas durch manuelles Rühren mit einem Glasstab für ca. 10 min gut vermischt wird. Nach dem Einfüllen der Mischung in ein Presswerkzeug mit 40 mm Durchmesser wird das Pulver geglättet und mit einem Glasstab mit flacher Spitze leicht abgeklopft, bevor die passgenaue Stahlmatrize eingesetzt wird. Durch Pressen auf ca. 16 Tonnen pro cm<sup>2</sup> in einer hydraulischen Presse und Trocknen in einem Ofen über Nacht bei 70 °C entsteht eine Pille, die stark genug ist, um der Probenhandhabung und -rotation sowie dem Vakuum im Röntgenspektrometer während der Messung standzuhalten. Siehe Abbildung 11 Rechts. (Nagl et al., 2019).

### **3.4. Organischer Anteil**

Für die Bestimmung des organischen Kohlenstoffs wurde ein LECO RC612 Kohlenstoff-Wasser Analysator verwendet.

Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffs erfolgte anhand der Verbrennungsmethode. Hierfür wurden 100 mg der vor Ort entnommenen Proben jeweils zweimal abgewogen und gemessen. Für die Verifizierung der Methode wurden zwei Standards verwendet. Diese sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Verwendete Standards - Kohlenstoff-Wasser Analysator

Standard	Kohlenstoff (M.-%)	Nummer	Lot. Nummer
Synthetic Carbon LCRM (LECO)	4,99 ± 0,05	502-905	1001
Calcium Oxalate LCRM (LECO)	200 °C : 12,3 ± 0,1 450 °C : 19,5 ± 0,1 850 °C : 29,6 ± 0,1	502-926	1000-1

### 3.5. Korngrößenbestimmung

Für die Bestimmung der Korngrößen wurden die Proben zunächst mit einer H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Lösung (15%) versetzt, um das organische Material zu entfernen. Nach der Beendigung der Reaktion wurden die Suspensionen für 3 Minuten mit einem 400 Watt Ultraschallstab dispergiert.

Die Bestimmung der Korngröße erfolgte anschließend mit Hilfe eines Siebturms. Verwendet wurden Siebe mit folgender Maschenweite: 500 µm, 250 µm, 125 µm und 63 µm. Eine Abbildung des Siebturms befindet sich in Abbildung 12 Links.

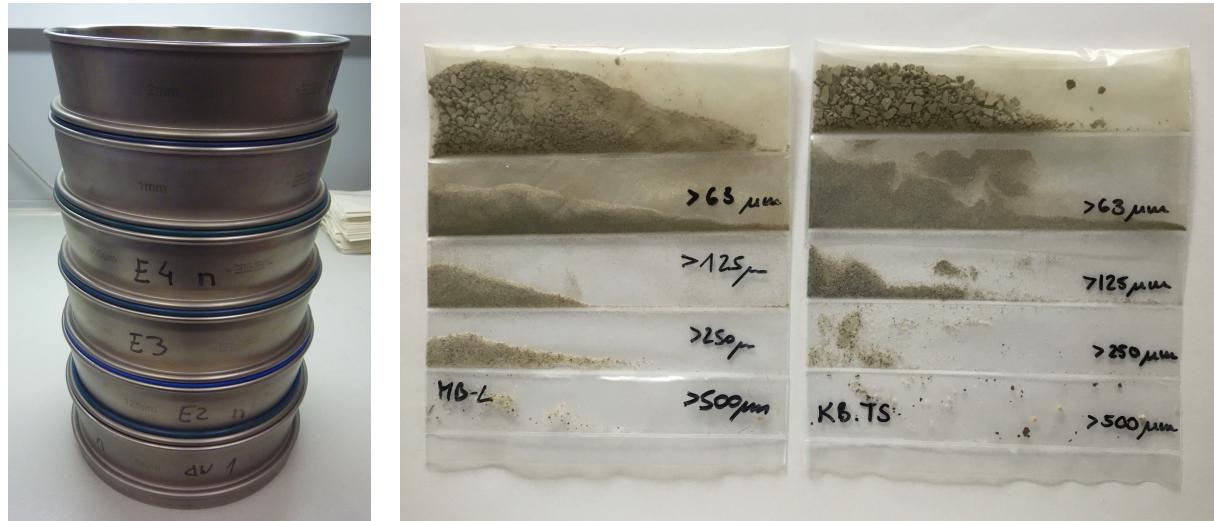


Abbildung 12: Links, Siebturm. Rechts, Die Proben MB\_L und KB\_TS nach dem Sieben

(Fotos: Links, Susanne Gier. Rechts, Zora Alice Kumm)

Zunächst wurden alle Proben durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 63 µm gewaschen. Die Tonfraktion wurde in einer Schale aufgefangen und in Bechergläser umgefüllt. Diese wurden zum Sedimentieren ruhen gelassen. Nach dem Abschütten des überschüssigen Wassers wurde die Tonfraktion in einem Trockenschrank bei 60 °C getrocknet. Siehe Abbildung 13 Links. Anschließend wurde die Fraktion > 63 µm gesiebt. Der Rückstand jedes Siebes wurde in eine separate Schale gegeben und im Trockenschrank bei 40 °C getrocknet. Nach dem Trocknen wurde der Inhalt jeder Schale gewogen und der Inhalt in einer Plastiktüte

eingeschweißt. Siehe Abbildung 12 Rechts. Die Fraktion < 63 µm wurde nach dem Trocknen mit einem Porzellanstössel homogenisiert. Etwa 2,5 g der Probe wurden mit einem Micromeritics SediGraph III gemessen. Eine Abbildung des Sedigraphen befindet sich in Abbildung 13 Rechts. Die gemessene Partikelgröße lag bei 0,2 und 70 µm. Die Auswertung der Kornsummenkurve erfolgte mit Hilfe des Programms GRADISTRATH. Für die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes wurde die Methode nach Hazen (1892) angewandt.

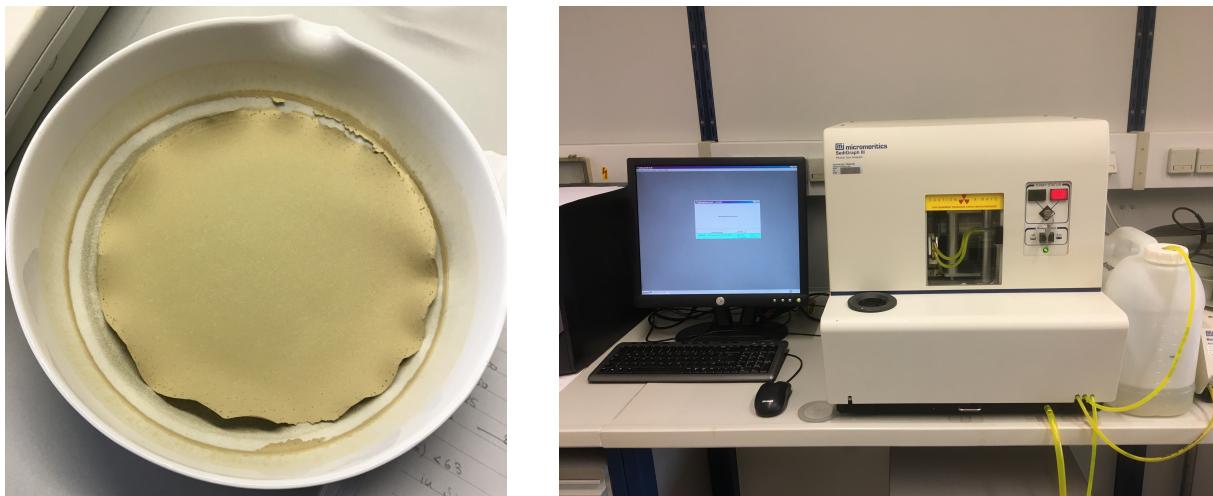


Abbildung 13: Links, Fraktion < 63 µm der Probe MB\_L. Rechts, Micromeritics SediGraph III

(Fotos: Zora Alice Kumm)

### 3.6. Atterberg'sche Zustandsgrenzen

Die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen wurde gemäß der ÖNORM EN ISO 17892-12, Ausgabe 2020-07-15, durchgeführt.

Für die Probenvorbereitung wurden zunächst etwa 200 g Probenmaterial durch ein 400 µm Sieb gesiebt. Proben mit einer Korngröße von weniger als 400 µm wurden nicht gesiebt. Anschließend wurde das Probenmaterial mit entionisiertem Wasser getränkt und für 24 Stunden in einer versiegelten Schale ruhen gelassen. Im Anschluss wurde die jeweilige Probe durchmengt, bis sich die Struktur der entstehenden Paste nicht weiter ändert. Durch Hinzufügen oder Entfernen von Wasser wurde die Probe in den notwendigen Wertebereich für die Durchführung des Versuchs gebracht. Die entstandene Paste wurde sowohl für die Bestimmung der Fließgrenze, als auch für die Bestimmung der Plastizitätsgrenze verwendet. (ÖNORM EN ISO 17892-12).

Die Bestimmung der Fließgrenze erfolgte durch das Verfahren nach Casagrande in einer Klopfschale (Abbildung 14, Links). Die Probenpaste wurde hierfür mit einem Spatel in die Klopfschale gegeben. Für Proben mit einem hohen Tonanteil wurde ein Furchenzieher verwendet, um eine Furche in die Paste zu schneiden. Wenn dies nicht möglich war, wurde ein Furchendrucker benutzt, um eine Furche in die Probenpaste zu drücken. Der Mitnehmer wur-

de anschließend mit etwa zwei Umdrehungen pro Sekunde gedreht und die Probe beobachtet. Sobald sich die Furche über eine Länge von 10 mm geschlossen hat, wurde der Mitnehmer angehalten und die Umdrehungen aufgezeichnet. Es wurde stets darauf geachtet die Anforderungen an das Verfahren nach Casagrande zu befolgen. Diese sind in Tabelle 5 angegeben. War die Anzahl der Umdrehungen ausserhalb des erlaubten Bereichs, so wurde Wasser hinzugefügt oder entfernt, um die Konsistenz der Probenpaste anzupassen. Bewegte sich die Anzahl der Umdrehungen innerhalb der Anforderungen, wurden die Umdrehungen notiert und mindestens 10 g der Probenpaste aus dem Bereich der Furche entnommen. (ÖNORM EN ISO 17892-12).

Alle Proben und Mischungen wurden für 24 Stunden bei einer Temperatur von 105 °C in einen Trockenschrank gegeben, um den Wassergehalt gemäß der ÖNORM B 4410 zu bestimmen.

Tabelle 5: Anforderungen an das Verfahren nach Casagrande

(Quelle: ÖNORM EN ISO 17892-12)

	Anzahl der Umdrehungen
Wertebereich der Umdrehungen	15 bis 40
Anzahl der Umdrehungen zur Bestimmung der Fließgrenze	25
Maximale Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen für einen Einpunkt-Versuch	2

Insgesamt wurde für jede Probe ein Versuch mit jeweils fünf Messungen durchgeführt. Die festgelegten Bereiche, in denen sich die Anzahl der Umdrehungen der jeweilige Messung befinden darf, sind in der nachfolgenden Tabelle 6 ausgewiesen.

Tabelle 6: Messbereiche für das Verfahren nach Casagrande

Messung	Anzahl der Umdrehungen
1	15 bis 17
2	20 bis 21
3	24 bis 26
4	29 bis 31
5	34 bis 35

Für die Bestimmung der Plastizitätsgrenze wurden etwa 15 g der vorbereiteten Paste zu einer Kugel geformt. Die Kugel wurde so lange zwischen den Händen getrocknet, bis sich an der Oberfläche kleine Risse bilden. Anschließend wurde die Kugel in zwei Hälften geteilt, wobei eine Hälfte wiederum in drei Teile geteilt wurde. Jede der drei Unterteile wurde einzeln auf

einer Platte oder auf Zeitungspapier unter sanftem Druck und gleichmäßigen Bewegungen der Hand vor und zurück gerollt, um eine Rolle zu formen. Sobald die Rolle bei einem Durchmesser von 3 mm zu zerbrechen begann, wurde der Versuch beendet und die Rollen auf ein Uhrglas gegeben. Siehe Abbildung 14 Rechts. Der Vorgang wurde für alle drei Teile der Kugel wiederholt. (ÖNORM EN ISO 17892-12).

Der Wassergehalt der Rollen wurde im Anschluss gemäß der ÖNORM B 4410 bestimmt.

Anhand der Fließgrenze und der Plastizitätsgrenze wurden die Konsistenzgrenzen nach Atterberg gemäß ÖNORM EN ISO 17892-12 bestimmt. Zu diesen gehören die Fließgrenze, die Konsistenzgrenzen, der Plastizitätsbereich und das Plastizitätsdiagramm.

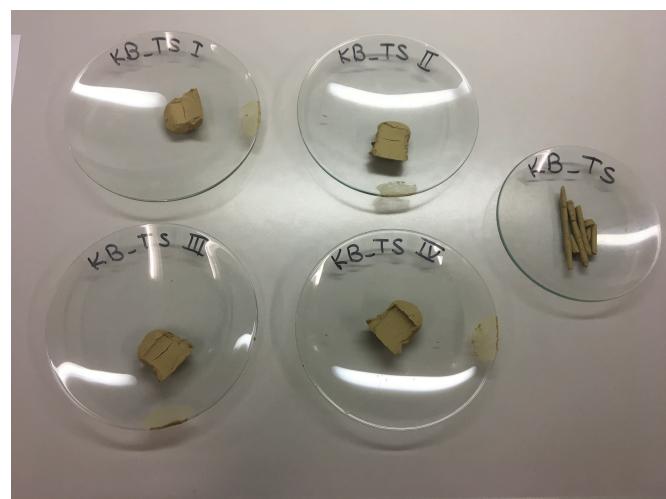


Abbildung 14: Links, Klopforschale. Rechts, Probe KB\_TS vor dem Trocknen

(Fotos: Zora Alice Kumm)

### 3.7. Kationenaustauschkapazität

Die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität erfolgt nach Meier und Kahr (1999).

Zunächst wurden 1,463 g Triethylenetetramine mit 100 ml entionisiertem Wasser versetzt. Zusätzlich wurde eine zweite Mischung aus 1,596 g Cu(II) und entionisiertem Wasser hergestellt. Diese sollte 1 l Lösung ergeben. Anschließend wurden beide Mischungen zusammengefügt. Der entstandene Cu(II)-Ethylendiamin-Komplex wurde als Färbemittel für die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität verwendet. (Meier und Kahr, 1999).

Für die Versuchsvorbereitung wurden zweimal 500 mg jeder Probe und Mischung in einem 100 ml Becherglas abgewogen. Anschließend wurde jeweils 50 ml entionisiertes Wasser dazugegeben. Die Mischungen wurden etwa zwei Minuten mit einem Magnetrührer gerührt. Danach wurden die Proben eine Minute mit einem Ultraschallstab beschallt (300 W) und zurück auf den Magnetrührer gestellt. Anschließend wurde 10 ml Cu(II)-Ethylendiamin-Komplex hinzugegeben. Nach der Zugabe des Cu(II)-Ethylendiamin-Komplexes wurden die Pro-

ben erneut für mindestens drei Minuten mit dem Magnetrührer gerührt. Danach wurden die Proben und Mischungen in ein 50 ml Zentrifugenrörchen umgefüllt und im Anschluss zentrifugiert (4000 rpm, 10 Minuten). Für die Versuchsvorbereitung wurde eine Sigma 6-16K Zentrifuge verwendet. Nach dem Zentrifugieren wurde die klare Lösung in ein entsprechend beschriftetes Becherglas dekantiert.

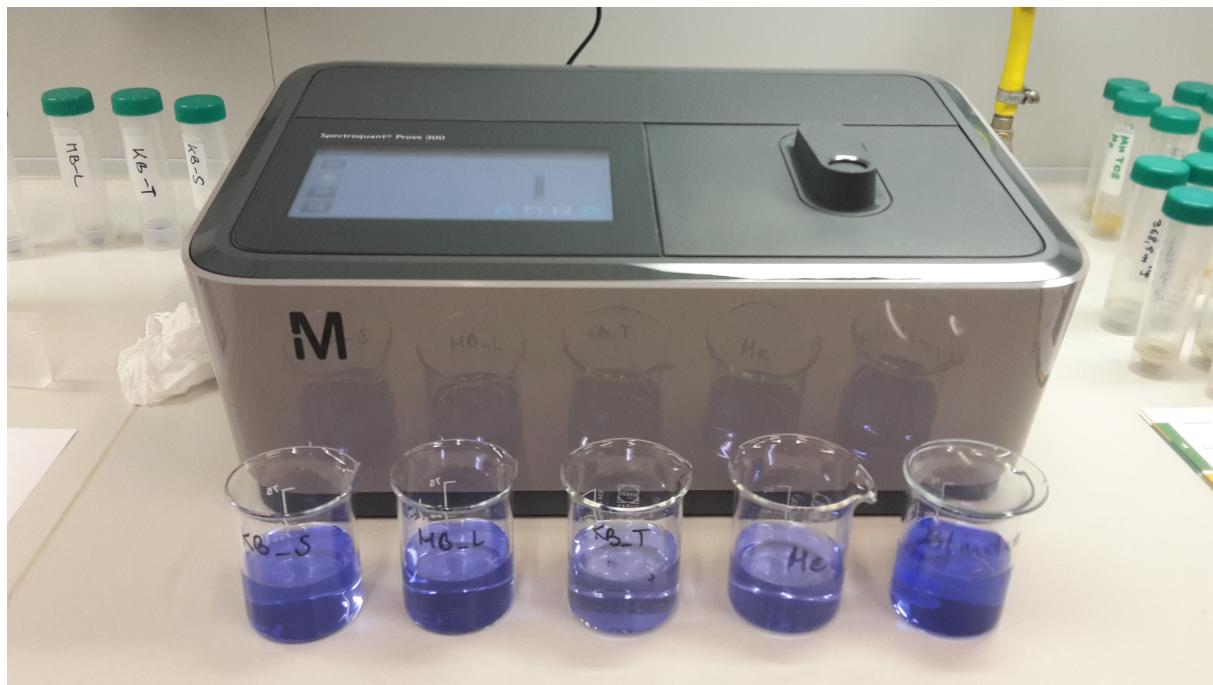


Abbildung 15: Spectroquant Prove 300 mit Blindwert und vier vorbereitete Proben

(Fotot: Susanne Gier)

Neben den Proben und Mischungen wurde die Standard-Probe „Hennersdorf“ vorbereitet. Die Herstellung erfolgt gemäß der oben beschriebenen Vorgehensweise. Es wurden ebenfalls 500 mg Probenmaterial verwendet.

Darüber hinaus wurde eine Blindwert-Probe hergestellt. Hierfür wurden 10 ml Cu(II)-Ethylen diamin-Komplex mit 50 ml entionisiertem Wasser zusammengegeben.

Die Messung der Proben erfolgte an einem Spectroquant Prove 300 bei einer Wellenlänge von 585 nm. Verwendet wurde eine 20 mm Küvette.

Die Berechnung erfolgte anhand der nachfolgenden Formel, wobei  $CEC$  die Kationenaustauschkapazität,  $E_B$  die Extinktion des Blindwertes und  $E_P$  die Extinktion der Probe beschreibt.

$$CEC_{[mmol/100g\ Ton]} = \frac{(E_B - E_P) \cdot 100}{E_B} / 2,5$$

Der Wert wird durch 2,5 geteilt, da 500 mg Probenmaterial verwendet wurden. Nach der Methode von Meier und Kahr (1999) werden für Tone 200 mg Probenmaterial verwendet.

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Mineralogische Eigenschaften

#### 4.1.1. Gesamtmineralogie

Zunächst werden die vor Ort entnommenen Proben beschrieben. Im Anschluss folgt die Beschreibung der Gesamtmineralogie für die Mischungen. Die Gesamtmineralogie der vor Ort entnommenen Proben ist in Abbildung 16 dargestellt. In Anhang 3 Abbildung II und III ist die Gesamtmineralogie der Löss-Ton Mischungen und der Sand-Ton Mischungen abgebildet.

Anhand der Gesamtmineralogie wurden die Hauptminerale Quarz (Q), Dolomit (Dol), Calcit (Cc), Kalifeldspat (K-Fsp) und Albit (Alb) bestimmt. Darüber hinaus wurden die Tonminerale Muskovit (Mu), Chlorit (Chl) und Kaolinit (Kao) nachgewiesen.

In Abbildung 16 ist die Gesamtmineralogie der vor Ort entnommenen Proben dargestellt. Bei dem obersten, grünen Graphen handelt es sich um die Sandprobe. Darunter folgen die Tonprobe in rot, die Tonsandprobe in blau und die Lössprobe in pink.

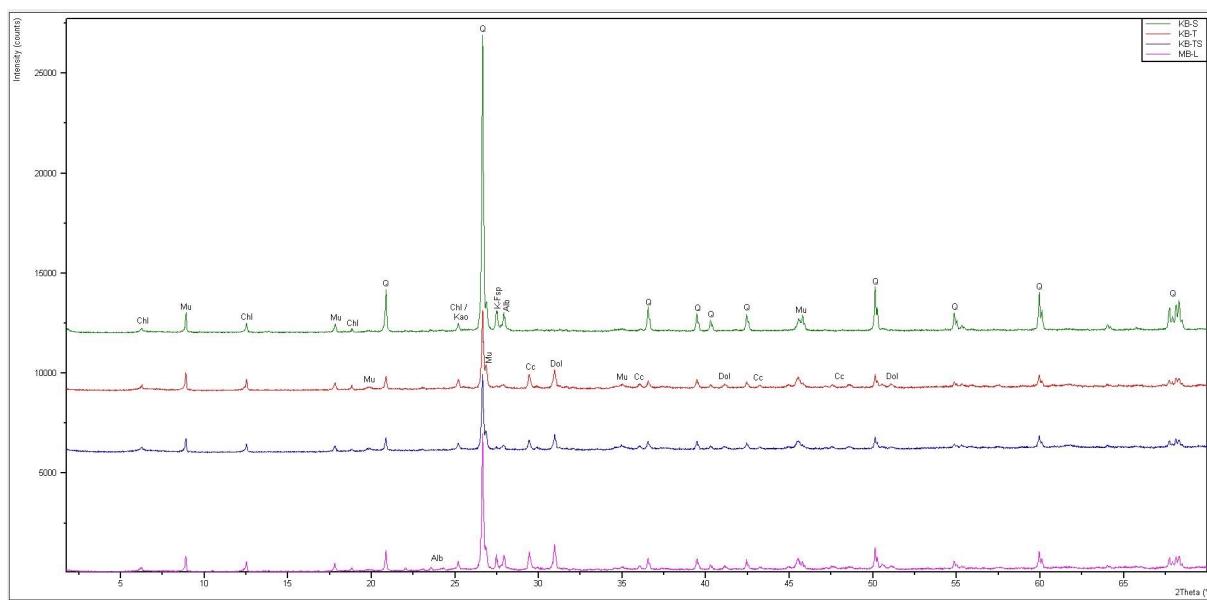


Abbildung 16: Röntgendiffraktometrie - Gesamtmineralogie der vor Ort entnommenen Proben

Von oben nach unten betrachtet ist die Gesamtmineralogie für folgende Proben abgebildet: die Sandprobe in grün, die Tonprobe in rot, die Tonsandprobe in blau und die Lössprobe in pink.

Die wichtigsten Hauptminerale sind durch folgende Abkürzungen gekennzeichnet: Q für Quarz, Dol für Dolomit, Cc für Calcit, K-Fsp für Kalifeldspat und Alb für Albit.

Darüber hinaus sind die folgenden Tonminerale mit Abkürzungen markiert: Mu für Muskovit, Chl für Chlorit und Kao für Kaolinit.

Alle vor Ort entnommenen Proben sind reich an Quarz. Die Peak-Intensität von Quarz sinkt von der Sandprobe hin zu den tonreichen Proben stetig. Darüber hinaus weisen die Tonprobe und die Tonsandprobe kaum Albit und kaum Kalifeldspat auf. Bei der Lössprobe und der

Sandprobe sind Peak-Intensitäten für die Minerale Kalifeldspat und Albit deutlich erkennbar. Dolomit und Calcit sind in der Tonsandprobe, der Tonprobe und der Lössprobe enthalten. Bei der Sandprobe sind Dolomit und Calcit nicht zu erkennen. Die Tonminerale Chlorit und Kaolinit weisen zwischen den vor Ort entnommenen Proben nur geringe Unterschiede auf. Der Gehalt an Muskovit ist in der Sandprobe und der Tonsandprobe etwas höher als in der Tonsandprobe und der Lössprobe.

Die Gesamtmineralogie für die Löss-Ton Mischungen und die Sand-Ton Mischungen können in Anhang 3 eingesehen werden. Bei den Löss-Ton Mischungen ist deutlich zu erkennen, wie die Peak-Intensitäten der Tonminerale mit zunehmendem Tongehalt ebenfalls höher werden. Der Quarzgehalt sowie der Dolomit und Calcit-Gehalt zeigen keine signifikante Änderung. Betrachtet man die Gesamtmineralogie der Sand-Ton Mischungen, unterscheiden sich die Mischungen geringfügig voneinander. Die Mischung mit dem höchsten Sandanteil, S-T 2:1 weist deutlich höhere Anteile an Albit, Kalifeldspat und Quarz in der Mischung auf, als die sandärmeren Mischungen. Die Mischung mit dem höchsten Anteil an Ton hat hingegen erhöhte Peak-Intensitäten für die Minerale Dolomit und Calcit. Die Peak-Intensitäten der Tonminerale unterscheiden sich zwischen den Mischungen nur gering.

#### **4.1.2. Tonmineralogie**

Die Tonmineralogie der vor Ort entnommenen Proben wird anhand der Lössprobe, Abbildung 17, und der Tonsandprobe, Abbildung 18, beschrieben. Anschließend folgt die Beschreibung der Tonmineralogie für die zwei Sätze an Mischungen. Die Abbildungen der Tonmineralogie für jede Probe und Mischung kann in Anhang 4 eingesehen werden.

Für die Bestimmung der Tonmineralogie wurden jeweils fünf Messungen durchgeführt: Mg-gesättigt in grün, K-gesättigt in rot, Mg-Glycerin gesättigt in blau, K-Ethylenglykol gesättigt in pink und K-550 °C getempert in schwarz.

Die Tonmineralogie für die Lössprobe von der Deponie „Mistelbach“ ist in Abbildung 17 abgebildet. Die Lössprobe weist neben den Peak-Intensitäten der Tonminerale auch Peak-Intensitäten von Quarz (Q) und Calcit (Cc) auf.

Im untersten Diffraktogramm, grün dargestellt, ist die Probe mit Magnesium gesättigt. Bei 14,2 Å ist die (001)-Peak-Intensität von Smectit, Chlorit und Vermiculit gut zu erkennen. Bei 9,97 Å erkennt man die Peak-Intensität von Illit. Darüber hinaus sind die Chlorit Peak-Intensitäten bei 7,16 Å (002), 4,74 Å (003), 3,52 Å (004) und 2,88 Å (005) gut erkennbar. Kaolinit Peak-Intensitäten befinden sich bei 7,1 Å (001) und 3,58 Å (002). In der Kalium gesättigten Probe, rotes Diffraktogramm, ist bei 14 Å die (001)-Peak-Intensität von Chlorit zu erkennen. Die Peak-Intensität von Smectit fällt auf 12,2 Å. Die Peak-Intensitäten bei 10 Å steht für Illit und Vermiculit. Smectit weitet sich im blauen Diffraktogramm, Mg-Glycerin gesättigt, auf 17,8 Å auf. Im pinken Diffraktogramm, K-Ethylenglykol gesättigt, weitet sich die (001)-Peak-

Intensität von Smectit auf 16 Å auf. Das getemperte Diffraktogramm, schwarz dargestellt, zeigt die Peak-Intensitäten von Smectit und Illit bei 9,96 Å (001), 4,98 Å (002) und 3,33 Å (003). Die Chlorit Peak-Intensitäten befinden sich bei 13,9 Å (001), 4,71 Å (003) und 2,88 Å (005).

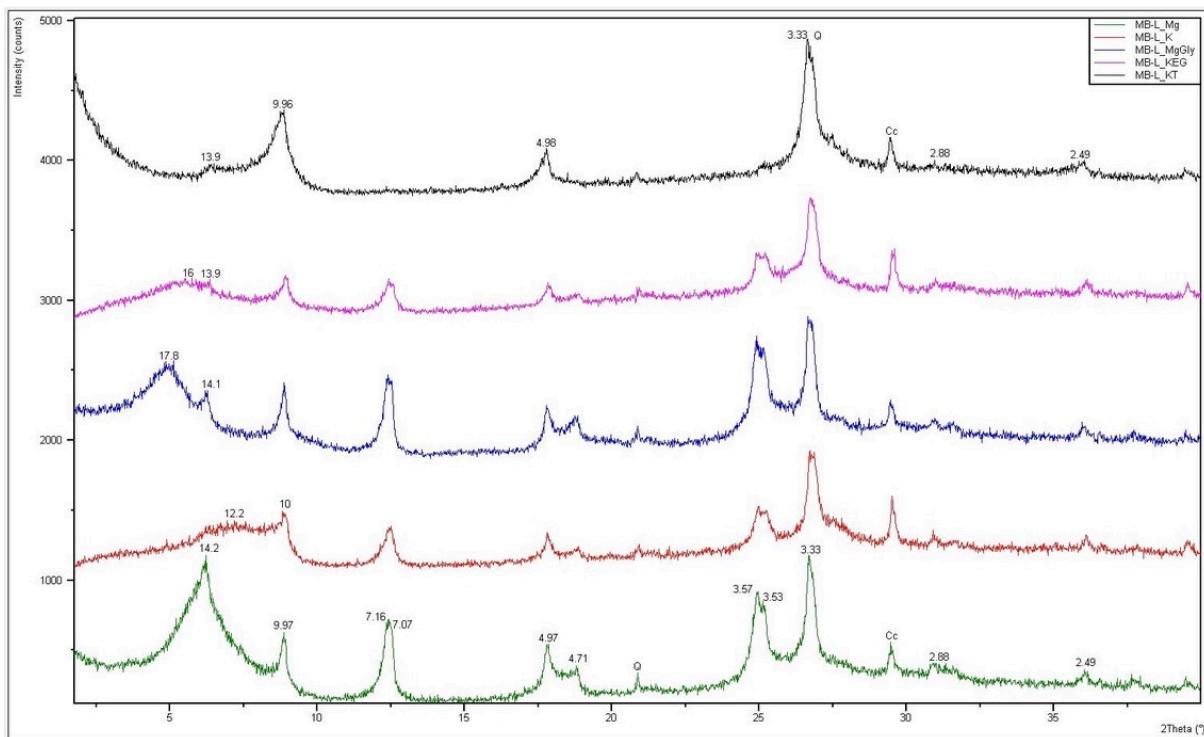


Abbildung 17: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Probe MB\_L

Von oben nach unten betrachtet ist die Tonmineralogie für folgende Sättigungen abgebildet:  
K-550 °C temperiert in schwarz, K-Ethylenglykol gesättigt in pink, Mg-Glycerin gesättigt in blau, K-gesättigt in rot und Mg-gesättigt in grün.

In Abbildung 18 ist die Tonmineralogie für die Tonsandprobe von der Deponie „Kettlesbrunn“ dargestellt. Die Tonsandprobe weist neben den Peak-Intensitäten der Tonminerale auch Peak-Intensitäten von Quarz (Q) auf.

Das grüne Diffraktogramm, Magnesium gesättigt, weist eine sehr hohe Peak-Intensität von Smectit bei 14,2 Å auf. Zudem sind Peak-Intensitäten von Illit bei 9,91 Å (001), 4,96 Å (002) und 3,33 Å (003) erkennbar. Auch Chlorit ist bei 7,16 Å (002), 4,74 Å (003), 3,52 Å (004) und 2,88 Å (005) zu erkennen. Die Peak-Intensitäten von Kaolinit befinden sich bei 7,04 Å (001) und 3,56 Å (002). Im Kalium gesättigten Zustand, rotes Diffraktogramm, fällt die (001)-Peak-Intensität von Smectit auf 11,7 Å. Die (001)-Peak-Intensität von Chlorit bei 14 Å ist kaum erkennbar. Bei 9,99 Å befindet sich die (001)-Peak-Intensität von Illit und Vermiculit. Im blauen Diffraktogramm, Mg-Glycerin gesättigt, weitet sich der Smectit auf 17,9 Å auf. Die (001)-Peak-Intensität von Smectit weitet sich im pinken Diffraktogramm, K-Ethylenglykol gesättigt, auf 16,8 Å auf. Das schwarze Diffraktogramm, Kalium gesättigt und getempert,

zeigt die Peak-Intensitäten von Smectit und Illit bei 9,95 Å (001), 4,98 Å (002) und 3,33 Å (003). Die Peak-Intensitäten von Chlorit befinden sich bei 14,4 Å (001), 4,71 Å (003) und 2,88 Å (005).

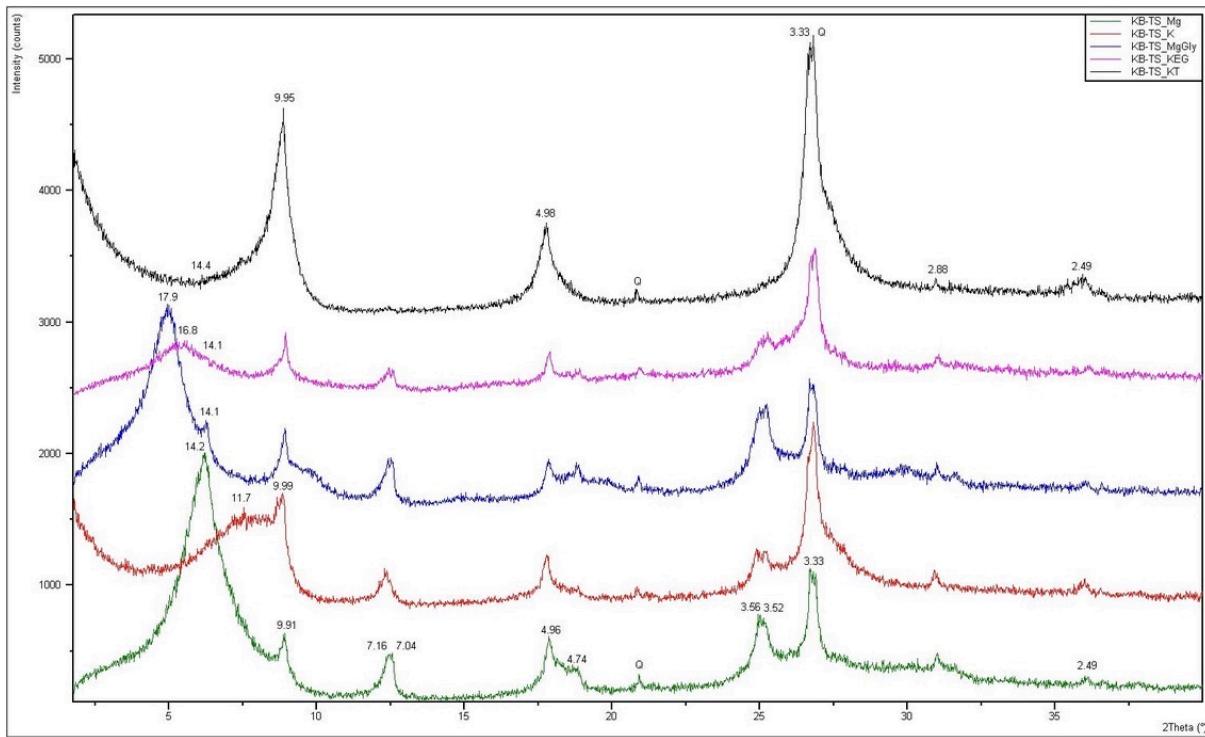


Abbildung 18: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Probe KB\_TS

Von oben nach unten betrachtet ist die Tonmineralogie für folgende Sättigungen abgebildet: K-550 °C temperiert in schwarz, K-Ethylenglykol gesättigt in pink, Mg-Glycerin gesättigt in blau, K-gesättigt in rot und Mg-gesättigt in grün.

Die Tonmineralogie der Tonprobe und der Sandprobe sind der Tonsandprobe sehr ähnlich. Es sind ebenfalls die Tonminerale Smectit, Vermiculit, Kaolinit und Illit vorhanden. Chlorit ist in geringen Mengen vorhanden. Die Sandprobe weist als einzige vor Ort entnommene Probe keine Peak-Intensität für Calcit auf.

Die Tonmineralogie der Mischungen unterscheidet sich geringfügig von der Tonmineralogie der vor Ort entnommenen Proben und weist ähnliche Merkmale auf.

Die Löss-Ton Mischungen weisen alle eine Peak-Intensität von Calcit auf. Darüber hinaus fällt der Anteil an Chlorit mit Abnahme des Anteils an Lössprobe in der Mischung. Dies ist anhand der leichten Wölbung bei 14 Å bei der getemperten Probe, schwarz dargestellt, erkennbar. Der Smectit-Anteil nimmt mit steigendem Anteil der Tonprobe an der Mischung zu. Erkennbar ist dies durch die breitere Peak-Intensität bei 18 Å bei der blauen Mg-Glycerin gesättigten Kurve. Für die Tonminerale Illit, Kaolinit und Vermiculit sind nur geringfügige Änderungen zwischen den Mischungen erkennbar.

Die Sand-Ton Mischungen weisen keine Peak-Intensitäten von Calcit auf. Der Anteil an Smectit nimmt mit steigendem Anteil an Tonprobe in der Mischung ebenfalls zu. Dies ist durch die breitere Peak-Intensität bei 18 Å bei der blauen Mg-Glycerin gesättigten Kurve erkennbar. Der Anteil an Illit und Kaolinit steigt ebenfalls mit zunehmendem Anteil an Tonprobe in der Mischung. Für Illit ist dies anhand der Peak-Intensität bei 10 Å und für Kaolinit an der Peak-Intensität bei 3,53 Å zu erkennen. Die Tonminerale Chlorit und Vermiculit weisen nur geringfügige Veränderungen auf.

#### 4.1.3. Quantifizierung

Die Anteile der wichtigsten Minerale und Tonminerale werden nachfolgend für die vor Ort entnommenen Proben in Abbildung 19 und anschließend für die Mischungen in Abbildung 20 und 21 beschrieben. Die exakten Anteile der wichtigsten Hauptminerale und Tonminerale können in Anhang 5 in Tabelle V bis X eingesehen werden.

Die wichtigsten Hauptminerale sind Quarz, Kalifeldspat, Plagioklas sowie die Karbonate Dolomit und Calcit. Sie können in allen Proben nachgewiesen werden. Die wichtigsten Tonminerale sind Chlorit, Illit, Kaolinit, Smectit und Vermiculit. Alle Tonminerale können in den Proben und Mischungen zumindest in Spuren nachgewiesen werden.

Die Anteile der Hauptminerale in den vor Ort entnommenen Proben sowie die Anteile der wichtigsten Tonminerale sind in Abbildung 19 aufgelistet. Die exakten Anteile in Massenprozent können in Tabelle III und IV in Anhang 5 eingesehen werden.

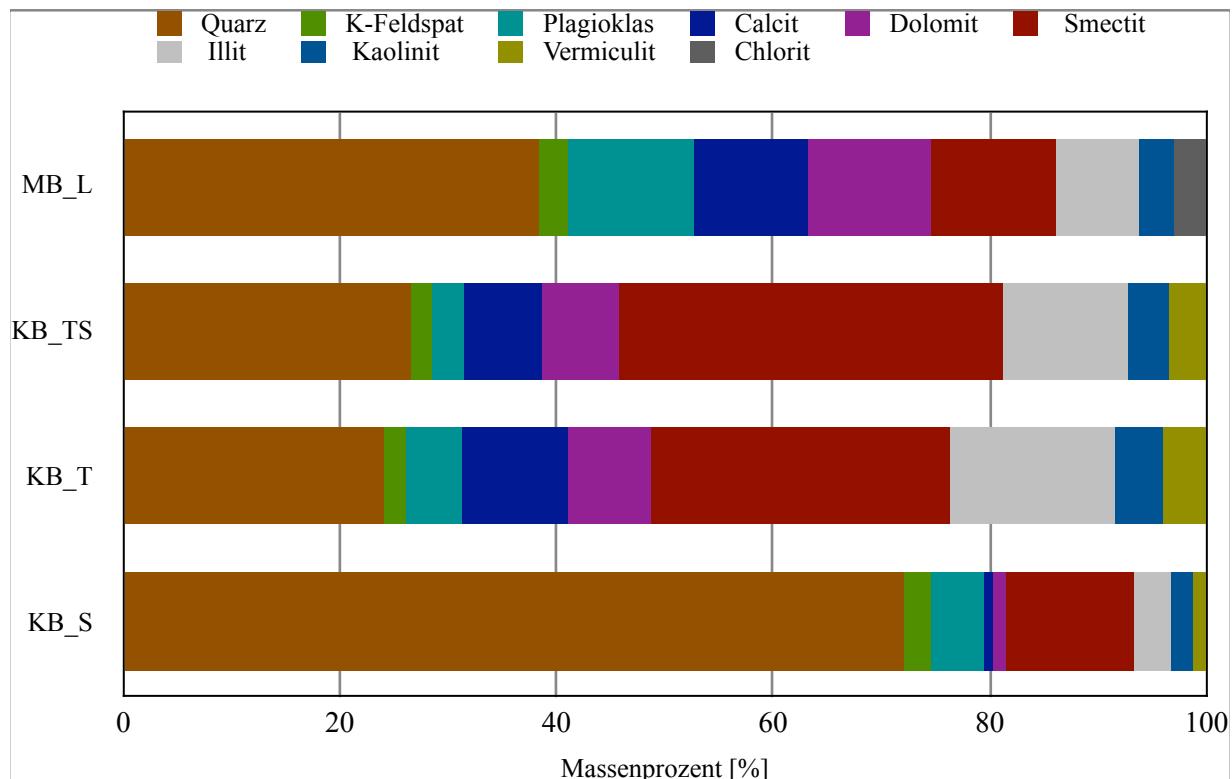


Abbildung 19: Quantifizierung - Vor Ort entnommene Proben

Der größte Anteil der Lössprobe von der Deponie ‚Mistelbach‘ besteht mit 38,3 M.-% aus Quarz, während die Tonminerale mit 25,4 M.-% ungefähr ein Viertel der Probe ausmachen. Die Anteile der Feldspäte liegen bei 2,7 M.-% für den Kalifeldspat und 11,7 M.-% für Plagioklas. Den höchsten Anteil an Kalifeldspat in einer Probe weist ebenfalls die Probe von der Deponie ‚Mistelbach‘ auf. Die Karbonate sind mit 10,4 M.-% für Calcit und 11,5 M.-% für Dolomit enthalten. Auffällig ist, dass die Anteile an Plagioklas, Calcit und Dolomit sind bei der Lössprobe ungefähr in gleichen Anteilen vorhanden.

Betrachtet man die Tonmineralogie der Lössprobe, entfällt der größte Anteil mit 11,5 M.-% auf das Tonmineral Smectit. Auf Illit entfallen 7,8 M.-% der Gesamtprobe. Die Minerale Kaolinit und Chlorit kommen auf jeweils 3,1 M.-%. Vermiculit ist geringfügig vorhanden, jedoch zu gering, um bei der Quantifizierung bestimmt zu werden.

Die Proben von der Deponie ‚Kettlastrunn‘ sind sich mineralogisch ähnlich. Die Sandprobe enthält mit 72,2 M.-% den größten Anteil an Quarz und mit 18,6 M.-% den geringsten Anteil an Tonmineralen. Bei den tonhaltigen Proben überwiegen die Tonminerale mit 51,2 M.-% für die Tonprobe und 54,4 M.-% für die Tonsandprobe, wobei die Tonsandprobe mehr Tonminerale enthält, als die Tonprobe. Der Quarzgehalt ist in der Tonsandprobe mit 26,5 M.-% ebenfalls höher, als in der Tonprobe mit 24,1 M.-%. Der Anteil an Kalifeldspat unterscheidet sich zwischen den Proben nur geringfügig. Er liegt bei 1,9 bis 2,3 M.-%. Größere Unterschiede ergeben sich beim Plagioklas. Die Tonprobe und die Sandprobe weisen mit ungefähr 5,0 M.-% fast doppelt so viel Plagioklas auf, wie die Tonsandprobe mit 2,8 M.-%. Der Anteil der Karbonate unterscheidet sich zwischen den tonhaltigen Proben und der Sandprobe. Sowohl in der Tonsandprobe als auch in der Tonprobe liegt der Anteil an Karbonaten mit 14,2 M.-% beziehungsweise mit 17,6 M.-% deutlich über den Anteilen in der Sandprobe. In dieser liegt der Anteil an Karbonaten bei 1,9 M.-%.

In der Tonmineralogie der Proben von der Deponie ‚Kettlastrunn‘ überwiegt ebenfalls der Anteil an Smectit. Der höchste Anteil kann in der Tonsandprobe mit 35,7 M.-% nachgewiesen werden, gefolgt von der Tonprobe mit 27,4 M.-% und der Sandprobe mit 11,9 M.-%. Mit 15,5 M.-% entfällt der höchste Anteil an Illit in den Proben auf die Tonprobe. In der Tonsandprobe sind 11,4 M.-% enthalten, in der Sandprobe 3,3 M.-%. Der Anteil an Kaolinit liegt bei 4,4 M.-% im Ton bis 3,7 M.-% im Tonsand. Die Sandprobe enthält mit 2,0 M.-% den geringsten Anteil an Kaolinit. Das Tonmineral mit dem geringsten Anteil an der Gesamtmineralogie ist der Vermiculit mit 1,3 M.-% in der Sandprobe, 3,6 M.-% in der Tonsandprobe und 4,0 M.-% in der Tonprobe. Chlorit ist in den Proben von der Deponie ‚Kettlastrunn‘ in Spuren enthalten. Für die Quantifizierung war die Menge an Chlorit in den Proben jedoch nicht ausreichend.

Die Ergebnisse der Quantifizierung für die Löss-Ton Mischungen sind in Abbildung 20 dargestellt. In Anhang 5 sind die Anteile der wichtigsten Hauptminerale in Tabelle V ausgewiesen, Tabelle VI beinhaltet die Anteile der wichtigsten Tonminerale. Die verwendeten vor Ort entnommenen Proben sind jeweils mit aufgelistet.

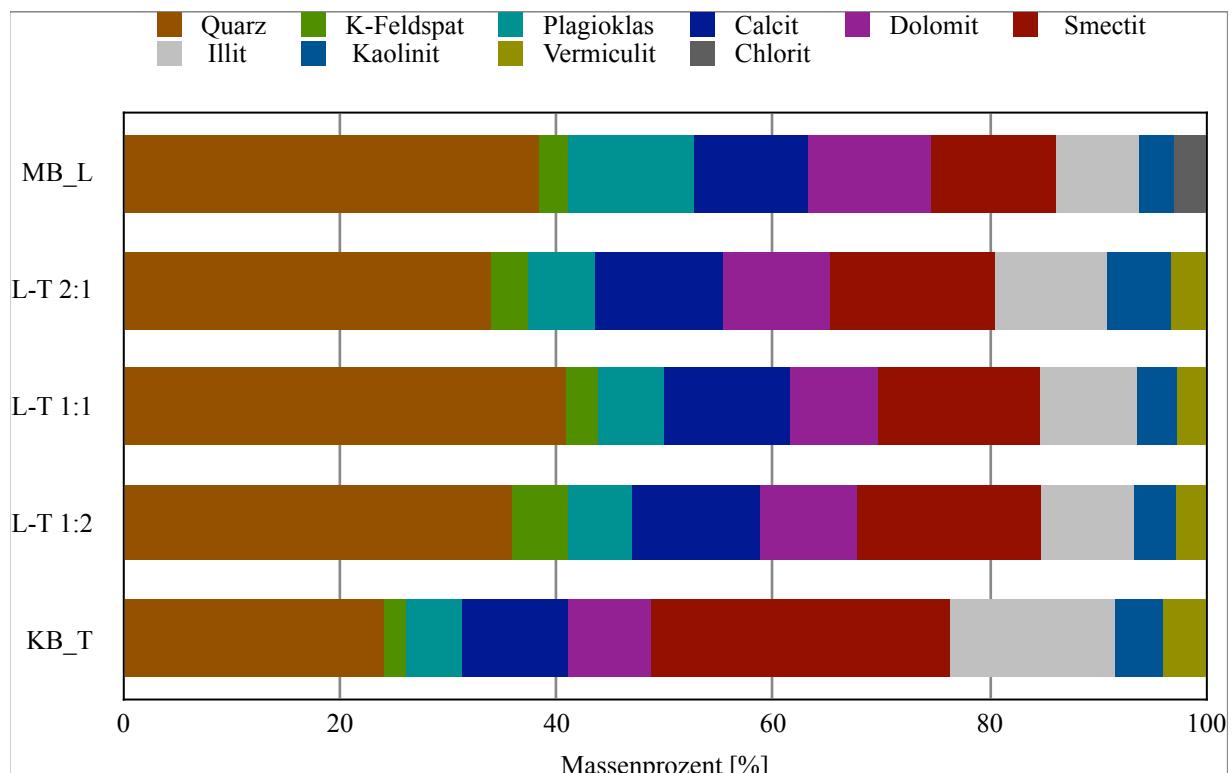


Abbildung 20: Quantifizierung - Löss-Ton Mischungen

Die Gesamtmineralogie der Löss-Ton Mischungen weist geringe Unterschiede zwischen den Mischungen auf. Bei den Mischungen entfällt der höchste Anteil auf den Quarz mit 40,7 M.-% für die Mischung L-T 1:1 und 35,8 M.-% für die Mischung L-T 1:2. Die Mischung mit dem höchsten Anteil an Lössprobe in der Mischung, L-T 2:1, weist trotz geringem Anteil an Tonprobe in der Mischung mit 34,8 M.-% den höchsten Anteil an Tonmineralen und mit 33,8 M.-% den geringsten Anteil an Quarz auf. Die Anteile an Tonmineralen in den beiden anderen Mischungen des Satzes liegen bei 30,4 M.-% für L-T 1:1 und 32,4 M.-% für L-T 1:2. Die Anteile an Kalifeldspat liegen bei allen Mischungen oberhalb der Werte der für die Mischungen verwendeten Proben. Einen Ausreißer stellt der Anteil für den Kalifeldspat der Mischung L-T 1:2 dar, welcher mit 5,1 M.-% deutlich höher ist, als bei den beiden anderen Mischungen mit 3,0 M.-% für L-T 1:1 und 3,4 M.-% für L-T 2:1. Bei den Anteilen für Plagioklas ist eine Trendentwicklung von der Tonprobe hin zur Lössprobe zu erkennen, wobei die Anteile bei den Mischungen mit 6,0 M.-% für L-T 1:2 bis 6,3 M.-% für L-T 2:1 sehr nah beieinander liegen. Die Anteile von Calcit und Dolomit liegen ebenfalls eng beieinander. Für den Calcit lässt sich ein Trend erkennen, wobei die Anteile bei den Mischungen mit 11,6 bis

11,9 M.-% über den Anteilen der für die Mischung verwendeten Proben liegen. Für den Dolomit liegen die Anteile bei den Mischungen zwischen den Anteilen an Plagioklas der für die Mischungen verwendeten Proben. Der Anteil der Mischung L-T 1:1 liegt mit 8,2 M.-% etwas unterhalb der beiden anderen Mischungen mit 8,9 M.-% für L-T 1:2 und 9,9 M.-% für L-T 2:1.

Bei den Ergebnissen der Tonmineralogie fällt auf, dass sich die Anteile für den Smectit bei den Löss-Ton Mischungen nur geringfügig unterscheiden. Nichtsdestotrotz ist für das Tonmineral Smectit ein Trend erkennbar. Mit steigendem Anteil an Tonprobe in der Mischung steigt der Anteil an Smectit in der Mischung ebenfalls an. Dabei liegen alle Anteile in den Mischungen innerhalb der Anteile der für die Mischung verwendeten Proben. Der höchste Anteil ist bei der tonreichsten Mischung L-T 1:2 mit 17,0 M.-% zu finden. Die Anteile der Mischungen L-T 1:1 und L-T 2:1 sind etwas niedriger und liegen bei ungefähr 15,0 M.-%. Für den Illit lässt sich ebenfalls ein Trend beobachten. Die Anteile in den Mischungen steigen von 8,5 M.-% für L-T 1:2 auf 10,2 M.-% für L-T 2:1. Der Trend läuft entgegengesetzt der Anteile der für die Mischungen verwendeten Proben. Die Anteile steigen mit zunehmendem Lössgehalt kontinuierlich an, obwohl die Tonprobe den höchsten Anteil an Illit hat. Betrachtet man den Verlauf des Tonminerals Kaolinit, ist bei der Mischung L-T 2:1 ein Ausreißer zu erkennen. Der Anteil liegt mit 6,0 M.-% deutlich über den Werten der anderen Mischungen und die für die Mischung verwendeten Proben mit 4,4 M.-% für die Tonprobe und 3,1 M.-% für die Lössprobe. Abgesehen von dem Ausreißer ist auch für den Kaolinit ein Trend erkennbar. Die Anteile steigen mit steigendem Anteil der Tonprobe in der Mischung. Für den Anteil an Vermiculit ist hingegen erneut ein Trend wie beim Illit zu erkennen. Die Anteile steigen mit zunehmendem Lössgehalt, wobei die Tonprobe den höchsten Wert für den Vermiculit besitzt. Während bei der Lössprobe nur geringe Mengen an Vermiculit nachgewiesen werden konnten, steigt der Anteil an Vermiculit bei den Löss-Ton Mischungen von 2,7 M.-% für L-T 1:2 auf 3,2 M.-% für L-T 2:1 mit zunehmendem Lössgehalt. Chlorit konnte in den Mischungen hingegen nur in einem geringen Maße nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der Quantifizierung für die Sand-Ton Mischungen sind in Abbildung 21 ausgewiesen. In Anhang 5 sind die Anteile der wichtigsten Hauptminerale in Tabelle VII aufgelistet. Unter Anhang 5 Tabelle VIII sind die Anteile der wichtigsten Tonminerale ausgewiesen. Die verwendeten vor Ort entnommenen Proben sind jeweils in der Tabelle mit aufgeführt.

Betrachtet man den Quarzgehalt in den Mischungen, so lässt sich ein Trend feststellen. Mit zunehmendem Sandgehalt nimmt der Quarzanteil zu. Auffällig ist, dass die Mischungen S-T 1:1 mit 41,8 M.-% und S-T 1:2 mit 40,7 M.-% sehr nah beieinander liegen. Die Mischung S-T 2:1 hat mit 52,8 M.-% den höchsten Anteil an Quarz. Für den Anteil der Tonminerale lässt sich ebenfalls ein Trend erkennen. Mit zunehmendem Tongehalt nimmt der Anteil der

Tonminerale an der Gesamtmineralogie von 25,8 auf 37,5 M.-% zu. Für den Kalifeldspat lässt sich innerhalb der Mischungen gleichfalls ein Trend erkennen. Der Anteil steigt mit zunehmendem Sandgehalt von 1,8 auf 3,7 M.-%. Für den Anteil an Plagioklas ist kein Trend erkennbar. Die Werte der Mischungen S-T 1:1 und S-T 1:2 liegen mit 3,6 und 4,7 M.-% etwas unterhalb der Werte der verwendeten Proben mit 5,0 und 5,1 M.-%. Der Anteil der Mischung S-T 2:1 stellt mit 9,2 M.-% einen Ausreißer dar. Für die Anteile von Calcit und Dolomit an der Gesamtmineralogie ist ebenfalls kein eindeutiger Trend zu erkennen. Bei beiden Mineralen liegen alle Werte innerhalb der Werte der für die Mischungen verwendeten Proben. So wohl bei Calcit als auch bei Dolomit weisen die Mischungen S-T 1:2 und S-T 1:1 mit 8,6 und 8,8 M.-% für den Calcit und 6,7 und 7,5 M.-% für den Dolomit Werte auf, die sehr nah beieinander liegen, wobei der Anteil des jeweiligen Minerals bei der Mischung S-T 1:1 etwas höher ist. Der Anteil der Minerale ist bei der Mischung S-T 2:1 deutlich geringer. Der Anteil an Calcit liegt bei 4,6 M.-%, der für Dolomit bei 3,8 M.-%.

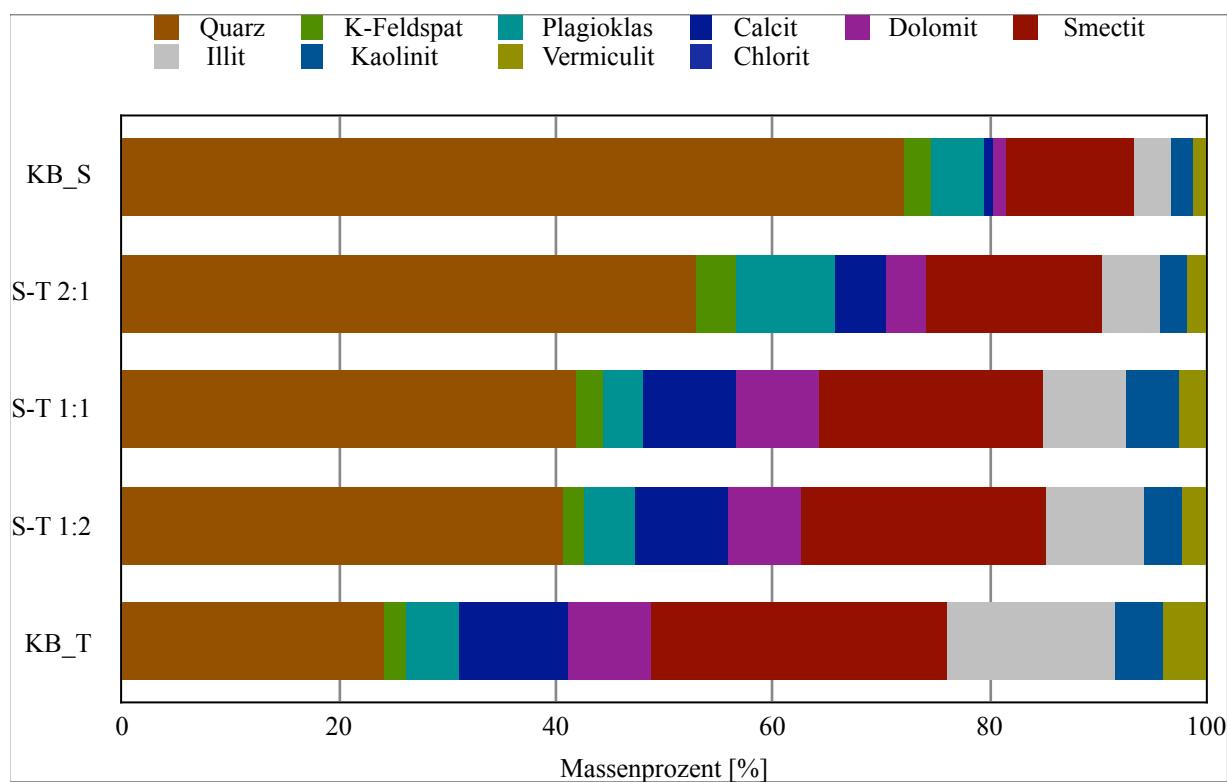


Abbildung 21: Quantifizierung - Sand-Ton Mischungen

Für die Tonminerale lässt sich sowohl für den Smectit als auch für den Illit ein Trend erkennen. Die Anteile der beiden Tonminerale steigen mit zunehmendem Anteil der Tonprobe in den Mischungen. Die Werte aller Mischungen befinden sich innerhalb der Anteile der für die Mischung verwendeten Proben. Für den Smectit liegen die Anteile in den Mischungen mit 16,2 M.-% für S-T 2:1, 20,7 M.-% für S-T 1:1 und 22,6 M.-% für S-T 1:2 in regelmäßigen Abständen zwischen den Anteilen der für die Mischungen verwendeten Proben. Für den Illit

liegen die Anteile mit 5,3 M.-% für S-T 2:1, 7,6 M.-% für S-T 1:1 und 9,2 M.-% für S-T 1:2 näher an der Sandprobe, haben jedoch ebenfalls regelmäßige Abstände. Betrachtet man die Anteile an Kaolinit, so ist mit der Mischung S-T 1:1 ein deutlicher Ausreißer erkennbar. Der Anteil liegt mit 4,9 M.-% oberhalb der Werte der anderen Mischungen aus dem Satz mit 2,3 M.-% für S-T 2:1 und 3,4 M.-% für S-T 1:2 und übersteigt die Anteile der beiden Ausgangsproben. Die Anteile des Tonminerals Vermiculit an der Gesamtmineralogie weisen ebenfalls einen Trend auf, wobei dieser durch einen auffällig niedrigen Anteil für die Mischung S-T 1:2 mit 2,3 M.-% unterbrochen wird. Im Allgemeinen steigt der Gehalt von Vermiculit in den Mischungen mit 1,9 M.-% für S-T 2:1 und 2,6 M.-% für S-T 1:1 mit zunehmendem Anteil an Tonprobe in den Mischungen. Chlorit kann in diesen Mischungen nur geringfügig nachgewiesen werden.

## 4.2. Chemische Eigenschaften

### 4.2.1. Röntgenfluoreszenz

Die Röntgenfluoreszenz-Analyse wurde an allen vor Ort entnommenen Proben durchgeführt. Neben den Hauptelementen wurden auch die Spurenelemente und die Glühverluste bestimmt. In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Hauptelemente aufgelistet. Die Glüh. e befinden sich in Tabelle 8. Die Ergebnisse für die Bestimmung der Spurenelemente sind in Anhang 6 Tabelle XI ausgewiesen.

Tabelle 7: Röntgenfluoreszenzanalyse - Hauptelemente der vor Ort entnommenen Proben

Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
MB_L	56,9	0,7	10,4	3,7	0,1	3,1	8,5	1,2	2,0	0,1	12,2
KB_TS	52,1	0,7	14,7	5,8	0,2	3,3	5,4	0,5	2,6	0,1	13,8
KB_T	58,1	0,9	16,0	5,0	0,1	4,5	8,8	0,6	3,0	0,1	15,0
KB_S	71,5	0,6	7,1	2,3	0,0	0,9	0,5	0,8	1,7	0,1	2,6

Das Hauptelement aller Proben ist SiO<sub>2</sub>. Dieses Mineral spiegelt den Quarzgehalt der Probe wider. Die Sandprobe enthält mit 71,5 M.-%, den höchsten Anteil an SiO<sub>2</sub>. In der Tonprobe befinden sich 58,1 M.-%, gefolgt von der Lössprobe mit 56,9 M.-% und der Tonsandprobe mit 52,1 M.-%.

Das zweitdominanteste Hauptelement ist Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Es ist ein Hauptbestandteil von Tonmineralen. Der höchste Anteil befindet sich in der Tonprobe mit 16,0 M.-%. Die Tonsandprobe enthält 14,7 M.-%, der Löss 10,4 M.-%. Die Sandprobe weist mit 7,1 M.-% den geringsten Anteil an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> auf.

Die Hauptelemente CaO und MgO sind Bestandteile von Karbonaten. Bezogen auf die Hauptminerale der Proben, sind diese Hauptelemente Indikatoren für Dolomit und Calcit. Der höchste Anteil an CaO befindet sich in der Tonprobe mit 8,8 M.-%. Ebenfalls einen hohen Anteil an CaO wird mit 8,5 M.-% in der Lössprobe nachgewiesen. Die Tonsandprobe hat mit 5,4 M.-% einen niedrigeren Anteil. Der geringste Anteil befindet sich in der Sandprobe mit 0,5 M.-%. Der MgO Gehalt ist in der Tonprobe mit 4,5 M.-% wiederum am höchsten. Die Lössprobe sowie die Tonsandprobe enthalten mit 3,1 bzw 3,3 M.-% etwas weniger MgO. In der Sandprobe ist mit 0,9 M.-% der geringste Anteil an MgO enthalten.

Na<sub>2</sub>O ist ein Indikator für Albit. Dieses Hauptelement ist am stärksten in der Lössprobe mit 1,2 M.-% vertreten. In der Sandprobe sind 0,8 M.-% Na<sub>2</sub>O enthalten. Die tonreichen Proben enthalten mit 0,6 M.-% für die Tonprobe und 0,5 M.-% für die Tonsandprobe nur sehr geringe Anteile an Na<sub>2</sub>O.

Das Hauptelement K<sub>2</sub>O wird häufig in Kalifeldspat und Muskovit gefunden. In den Proben ist K<sub>2</sub>O mit 3,0 M.-% am stärksten in der Tonprobe und mit 2,6 M.-% in der Tonsandprobe vertreten. In der Lössprobe werden 2,0 M.-% nachgewiesen, in der Sandprobe 1,7 M.-%.

Die Hauptelemente TiO<sub>2</sub>, MnO und P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sind in allen Proben nur geringfügig nachweisbar.

Der Glühverlust (LOI total) entspricht dem Anteil flüchtiger Stoffe in der Probe. Diese bestehen normalerweise aus Hydraten und labilen Hydroxyverbindungen sowie Kohlendioxid aus Karbonaten. Eine Auflistung der Glühverluste bei den Temperaturen 110 °C, 850 °C und 1050 °C befindet sich in Tabelle 8.

Tabelle 8: Röntgenfluoreszenzanalyse - Glühverluste der vor Ort entnommenen Proben

Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	LOD 110	LOI 850	LOI 1050	LOI total
MB_L	1,28	10,72	0,23	12,23
KB_TS	3,35	10,18	0,28	13,81
KB_T	2,60	12,01	0,37	14,97
KB_S	0,78	1,74	0,10	2,62

Der höchste Glühverlust bei LOD 110 kann bei den tonreichen Proben festgestellt werden. Dieser liegt bei der Tonsandprobe bei 3,35 M.-%, bei der Tonprobe bei 2,60 M.-%. Bei der Lössprobe liegt der Glühverlust bei 1,28 M.-%. Den geringsten Glühverlust weist die Sandprobe mit 0,78 M.-% auf.

Bei LOI 850 und LOI 1050 zerfällt der anorganische Kohlenstoff (LECO Corporation, 2018). Für LOI 850 findet sich der größte Glühverlust mit 12,01 M.-% bei der Tonprobe. Die Lössprobe und die Tonsandprobe weisen einen etwas geringeren Glühverlust mit 10,72 M.-% bzw.

10,18 M.-% auf. Der geringste Glühverlust wird in der Sandprobe nachgewiesen. Dieser liegt bei 1,74 M.-%. Der Glühverlust bei LOI 1050 ist bei der Tonprobe ebenfalls am höchsten. Er liegt bei 0,37 M.-%, gefolgt von der Tonsandprobe mit 0,28 M.-% und der Lössprobe mit 0,23 M.-%. Die Sandprobe weist auch hier den geringsten Glühverlust auf. Er liegt bei 0,10 M.-%.

Betrachtet man den gesamten Glühverlust, LOI total, haben die tonreichen Proben mit 14,97 M.-% für die Tonprobe und 13,81 M.-% für die Tonsandprobe den höchsten Glühverlust. Die Lössprobe folgt mit einem etwas geringeren Glühverlust von 12,23 M.-%. Die Sandprobe hat einen deutlich niedrigeren Glühverlust von 2,62 M.-%.

#### 4.2.2. Organischer Anteil

Der Anteil an Kohlenstoff in den vor Ort entnommenen Proben ist in Tabelle 9 aufgelistet. Es wird angenommen, dass bei 150 bis 450 Grad Celsius der organischen Kohlenstoff (TOC) zerfällt. Bei Temperaturen von unter 1000 Grad Celsius wird der anorganischen Kohlenstoff (TIC) zersetzt. Dies ermöglicht die Unterscheidung des organischen Kohlenstoffs vom anorganischen Kohlenstoff anhand des Differenzverfahrens. (LECO Corporation, 2018)

Tabelle 9 : Kohlenstoffanalyse - Vor Ort entnommene Proben

Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	TOC	TIC	ges. Kohlenstoff
MB_L	0,093	2,102	2,195
KB_TS	0,108	1,414	1,521
KB_T	0,196	2,063	2,260
KB_S	0,041	0,049	0,090

Die höchsten Anteile an organischem Kohlenstoff befinden sich in der Tonprobe und der Tonsandprobe. Mit 0,196 M.-% weist die Tonprobe den höchsten Anteil auf. Die Tonsandprobe und die Lössprobe besitzen einen etwas geringeren Anteil mit 0,108 M.-% und 0,093 M.-%. Die Sandprobe enthält mit 0,041 M.-% den geringsten Anteil an organischem Kohlenstoff.

Den höchsten Anteil an anorganischem Kohlenstoff enthält die Lössprobe mit 2,102 M.-%. Nur geringfügig weniger anorganischem Kohlenstoff weist die Tonprobe mit 2,063 M.-% auf. In der Tonsandprobe werden 1,414 M.-% nachgewiesen. Die Sandprobe enthält den geringsten Anteil mit 0,049 M.-%.

Betrachtet man den gesamten Kohlenstoff, enthält die Tonprobe mit 2,260 M.-% den höchsten Anteil. Die Lössprobe folgt mit einem etwas geringeren Anteil von 2,195 M.-%. Die Tonsandprobe besitzt einen Anteil von 1,521 M.-%. Der niedrigste Anteil wird in der Sandprobe mit 0,090 M.-% nachgewiesen.

## 4.3. Geotechnische Eigenschaften

### 4.3.1. Korngrößenbestimmung

Abbildung 22 zeigt die Kornsummenkurve für die Tonprobe in grau, die Tonsandprobe in rot, die Lössprobe in orange und die Sandprobe in grün. In Tabelle 10 sind die Anteile der wichtigsten Korngrößenfraktion in Massenprozent (M.-%) für alle Proben und Mischungen aufgelistet. Darüber hinaus kann anhand der Korngrößenbestimmung der Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) berechnet werden. Dieser ist für alle Proben und Mischungen in Tabelle 11 ausgewiesen.

Zunächst wird die Lössprobe von der Deponie „Mistelbach“ beschrieben. Anschließend folgt die Beschreibung der Proben von der Deponie „Kettlesbrunn“. Die Löss-Ton Mischungen und Sand-Ton Mischungen werden am Anschluss an die vor Ort entnommenen Proben beschrieben. Die Kornsummenkurven der Mischungen können unter Anhang 7 Abbildung XII und XIII eingesehen werden.

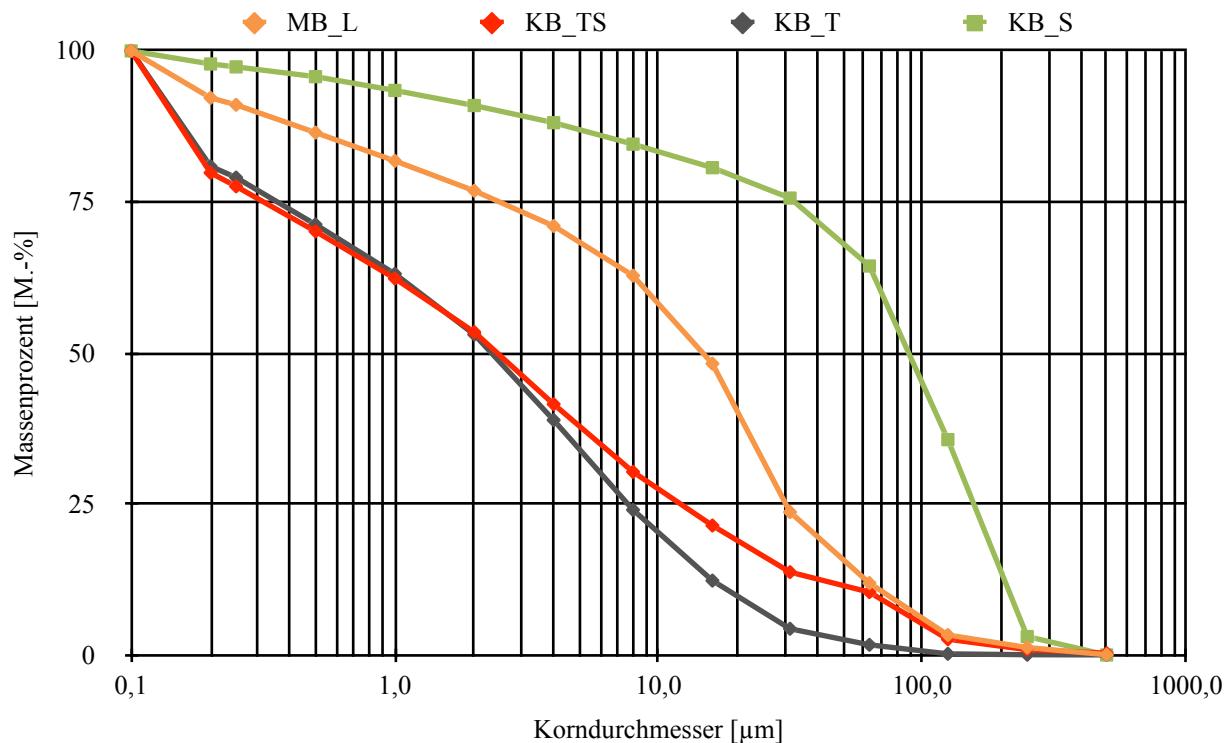


Abbildung 22: Korngrößenbestimmung - Kornsummenkurve der vor Ort entnommenen Proben

Die Korngrößenbestimmung der Lössprobe, in Abbildung 22 orange abgebildet, zeigt einen geringen Anteil an Ton. Dieser liegt bei 22,9 M.-%. Entsprechend der Kornsummenkurve ist mehr Feinton enthalten als Mittelton und Grobton. Der Schluffanteil ist mit 64,8 M.-% der höchste in allen Proben. Dieser setzt sich zum größten Teil aus Mittel- und Grobschluff zusammen. Dies ist anhand der starken Steigung der Kornsummenkurve ab einem Korngrößen-

durchmesser von 0,8 µm zu erkennen. Der Anteil an Feinschluff ist im Vergleich zum Mittel- und Grobschluff geringer. Diese Entwicklung lässt sich in der Kornsummenkurve durch die sich ausbildende Wölbung zwischen 0,2 und 20 µm feststellen. Der Anteil an Sand liegt bei 12,2 M.-%. Der Sandanteil stellt sich entsprechend der Kornsummenkurve aus einem hohen Anteil an Feinsand und zu einem geringeren Anteil aus Mittelsand zusammen. Grobsand ist in der Probe nicht enthalten.

Die Kornsummenkurve der Tonsandprobe ist in Abbildung 22 rot dargestellt. Sie besitzt einen Tonanteil von 46,2 M.-%. Anhand der Kornsummenkurve ist ein hoher Anteil an Feinton zu erkennen. Mittel- und Grobton sind ebenfalls vorhanden, jedoch in einem geringeren Maße als der Feinton. Der Schluffanteil liegt bei 43,2 M.-%. Der Anteil an Fein- und Mittelschluff ist im Vergleich höher, als der Anteil an Grobschluff. Dies wird durch die Abflachung der Kurve zwischen 20 und 63 µm deutlich. Der Anteil an Sand liegt bei 10,5 M.-%. Dieser setzt sich hauptsächlich aus Feinsand zusammen und bildet bei 63 µm einen Knick. Ab 125 µm flacht die Kurve deutlich ab. Mittelsand und Grobsand sind in der Probe nicht enthalten.

Die Tonprobe, grau dargestellt, hat entsprechend der Siebung von allen Proben den höchsten Anteil an Körnern der Tonfraktion. Der Wert liegt bei 46,5 M.-%. Entsprechend der Kornsummenkurve in Abbildung 22 besitzt die Tonprobe einen erhöhten Anteil an Feinton. Mittelton und Grobton sind in einem geringeren Maße gleichfalls vorhanden. Der Anteil an Schluff ist ebenfalls hoch. Der Anteil liegt bei 51,6 M.-%. Anhand der Kornsummenkurve ist erkennbar, dass der Anteil an Feinschluff und Mittelschluff besonders hoch ist. Dies wird in der Kornsummenkurve durch den leichten Knick bei 2 µm deutlich. Grobschluff ist in der Tonprobe im Vergleich zum Fein- und Mittelschluff in geringerem Maße vorhanden. Der Anteil der Sandfraktion ist mit 1,8 M.-% der niedrigste Anteil in allen Proben. Feinsand bis zu 125 µm ist erkennbar. Körner mit einem Durchmesser von mehr als 125 µm sind kaum vorhanden.

Die Kornsummenkurve der Sandprobe, grün dargestellt, weist einen sehr geringen Anteil an Ton auf. Dieser liegt bei 8,9 M.-% und ist somit der niedrigste Anteil in allen Proben. Entsprechend der Kornsummenkurve in Abbildung 22 setzt sich der Tonanteil überwiegend aus Grobton zusammen. Fein- und Mittelton sind in geringeren Anteilen ebenfalls vorhanden. Der Anteil an Schluff liegt bei 19,2 M.-%. Auch dieser besteht überwiegend aus Grobschluff. Fein- und Mittelschluff sind vorhanden, jedoch erhöht sich die Steigung im Bereich des Grobschluffs. Ab der Grenze zum Sand bei 63 µm ist die Steigung am stärksten ausgeprägt. Der Anteil an Sand liegt bei 71,9 M.-% und besteht gemäß der Kornsummenkurve überwiegend aus Feinsand. Mittelsand ist ebenfalls vorhanden. Grobsand ist in der Probe nicht vorhanden.

Tabelle 10: Korngrößenbestimmung - Anteil entsprechend der Korngröße gemäß DIN EN ISO 14688-2  
Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	Ton	Schluff	Sand
	< 2 µm	2 - 63 µm	63 - 2000 µm
MB_L	22,9	64,8	12,2
KB_TS	46,2	43,2	10,5
KB_T	46,5	51,6	1,8
KB_S	8,9	19,2	71,9
L-T 1:2	38,2	57,3	4,5
L-T 1:1	31,1	61,8	7,2
L-T 2:1	32,5	60,3	7,2
S-T 1:2	36,6	30,0	33,3
S-T 1:1	24,6	39,9	35,5
S-T 2:1	20,7	32,8	46,6

Die Kornsummenkurven der Mischungen können in Anhang 7 Abbildung XXII und Abbildung XXIII eingesehen werden. Die Anteile der Kornfraktionen in Massenprozent sind in Tabelle 10 ausgewiesen. Die Kornsummenkurven der Mischungen befinden sich alle innerhalb der Kornsummenkurven der vor Ort entnommenen Proben.

Bei den Löss-Ton Mischungen, Anhang 7 Abbildung XXII, liegt die tonreichste Mischung L-T 1:2 mit allen Anteilen nah an der Tonprobe. Die Mischungen L-T 1:1 und L-T 2:1 weisen Anteile für Ton und Schluff auf, die sehr nah beieinander liegen. Der Sandanteil der beiden Mischungen ist mit 7,2 M.-% identisch. Allgemein steigt der Tongehalt mit zunehmendem Anteil an Tonprobe in der Mischung, der Schluffanteil sowie der Feinsandanteil steigen mit zunehmendem Anteil an Lössprobe in der Mischung. Alle Mischungen weisen im Bereich des Schlusses eine Wölbung zwischen 0,2 und 30 µm auf. Diese prägt sich mit zunehmendem Schluffgehalt deutlicher aus.

Die Kornsummenkurve der Sand-Ton Mischungen können in Anhang 7 Abbildung XXIII eingesehen werden. Die Mischungen S-T 1:2 und S-T 1:1 lassen sich im Bereich von 0,1 bis 0,2 µm und 63 bis 125 µm kaum voneinander unterscheiden. Die Mischung S-T 2:1 weist im Vergleich zu den Mischungen S-T 1:2 und S-T 1:1 geringere Anteile an Ton und Schluff auf. Der Sandanteil in der Mischung S-T 2:1 ist hingegen deutlich höher. Insgesamt steigt der Tongehalt mit zunehmendem Anteil an Tonprobe in der Mischung, während der Sandgehalt mit zunehmendem Anteil an Sandprobe in der Mischung steigt.

Anhand der Korngrößenbestimmung kann der Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) bestimmt werden. Hierzu wurde die Methode nach Hazen (1892) angewandt. Alle berechneten Werte für den Durchlässigkeitsbeiwert sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Neben dem Durchlässigkeitsbeiwert sind die Werte für  $d_{10}$ , Korndurchmesser für den Gewichtsanteil  $m = 10 \text{ M.-\%}$  der Kornverteilungskurve;  $d_{60}$ , Korndurchmesser für den Gewichtsanteil  $m = 60 \text{ M.-\%}$  der Kornverteilungskurve; und  $U$ , Ungleichförmigkeitsgrad angegeben. Der Ungleichförmigkeitsgrad ist das Verhältnis der Korndurchmesser bei 60 M.-% und 10 M.-%. Er gibt Aufschluss über die Gleichkörnigkeit eines Bodens. Bei einem Wert von  $U < 5$  gilt ein Boden als gleichkörnig.

Tabelle 11: Korngrößenbestimmung - Berechnete  $k_f$ -Werte

Probe	$d_{10}$	$d_{60}$	$U$	$k_f$
Einheit	mm	mm	-	m/s
MB_L	0,00030	0,02000	0,01475	1,01E-09
KB_TS	0,00014	0,00450	0,03135	2,31E-10
KB_T	0,00014	0,00380	0,03789	2,41E-10
KB_S	0,00254	0,11900	0,02132	7,47E-08
L-T 1:2	0,000152	0,071	0,0021	2,68E-10
L-T 1:1	0,000176	0,012	0,0147	3,59E-10
L-T 2:1	0,000	0,012	0,0142	3,35E-10
S-T 1:2	0,000221	0,022	0,0100	5,67E-10
S-T 1:1	0,000215	0,032	0,0067	5,36E-10
S-T 2:1	0,000152	0,071	0,0021	1,07E-09

Besonders niedrige Werte im Bereich von  $5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$  weisen neben der vor Ort entnommenen Tonsand- und Tonprobe alle Löss-Ton Mischungen auf. Ebenfalls niedrige Werte im Bereich von  $10^{-10} \text{ m/s}$  wurden für die Sand-Ton Mischungen S-T 1:2 und S-T 1:1 ermittelt. Etwas höher, im Bereich von  $10^{-9} \text{ m/s}$ , ist der Durchlässigkeitsbeiwert für die Lössprobe. Der höchste Wert, im Bereich von  $10^{-8} \text{ m/s}$ , ist der Durchlässigkeitsbeiwert der Sandprobe.

#### 4.3.2. Atterberg'sche Zustandsgrenzen

Die Ergebnisse der Atterberg'schen Zustandsgrenzen sind in Tabelle 12 ausgewiesen. Für alle Proben, ausgenommen der Sandprobe von der Deponie „Kettlesbrunn“, war es möglich die Fließgrenze und die Plastizitätsgrenze zu bestimmen.

Das Plastizitätsdiagramm sowie die Diagramme zum Plastizitätsbereich und zur Bestimmung der Fließgrenze befinden sich in Anhang 8 Abbildung XIV bis XXII.

Tabelle 12: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Zustandsgrenzen und Bodenart

Die Bezeichnung der Bodenart gemäß DIN EN ISO 14688-2 für die hier angeführten Proben und Mischungen lauten: CIL (leichtplastischer Ton), CIM (mittelplastischer Ton), SIL (sandiger Silt) und CIL-SIL (Zwischenbereich von sandigem und tonigem Silt).

Probe	Fließgrenze WL	Plastizitätsgrenze WP	Plastizitätszahl IP	Konsistenzzahl IC	Bodenart gemäß DIN EN ISO 14688-2
Einheit	M.-%	M.-%	%	-	-
MB_L	25,1	21,7	3,4	N/A	SIL
KB_TS	44,4	21,7	22,7	1,07	CIM
KB_T	46,7	25,6	21,1	0,96	CIM
KB_S	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
L-T 1:2	40,0	22,8	17,2	0,98	CIM
L-T 1:1	34,2	22,9	11,3	1,03	CIL
L-T 2:1	30,9	20,9	10,0	1,02	CIL
S-T 1:2	38,3	20,2	18,1	1,12	CIM
S-T 1:1	29,3	19,9	9,4	N/A	CIL
S-T 2:1	25,3	20,2	5,1	N/A	CIL - SIL

Die Fließgrenze (WL) gibt an, ab welchem Wassergehalt ein Boden vom flüssigen in den plastischen Zustand übergeht (Dörken et al. 1999). Betrachtet man die Anteile in Tabelle 12, ist die Tonprobe mit 46,7 M.-% die Probe, die am meisten Wasser aufnehmen kann. Etwas niedriger ist die Fließgrenze der Tonsandprobe mit 44,4 M.-%. Die Lössprobe weist mit 25,1 M.-% die niedrigste noch messbare Fließgrenze aller Proben auf. Betrachtet man die Mischungen, so liegen die Anteile der Löss-Ton Mischungen mit 30,9 bis 40,0 M.-% etwas unterhalb der vor Ort entnommenen, tonreichen Proben. Innerhalb der Löss-Ton Mischungen ist eine Abnahme der Fließgrenze von der tonreichsten Mischung zur tonärmsten Mischung erkennbar. Die Sand-Ton Mischungen liegen deutlich weiter auseinander. Die höchste Fließgrenze der Sand-Ton Mischungen besitzt die Mischung S-T 1:2 mit 38,3 M.-%. Sie liegt nur knapp unterhalb der vor Ort entnommenen Tonprobe. Mit zunehmendem Sandgehalt fällt die Fließgrenze deutlich ab. Auf 29,3 M.-% für die Mischung S-T 1:1 und 25,3 M.-% für die Mischung S-T 2:1.

Die Plastizitätsgrenze ( $w_p$ ), auch Ausrollgrenze genannt, sagt aus, ab welchem Wassergehalt eine Probe sich nicht weiter plastisch verhält (Dörken et al. 1999). Die Plastizitätsgrenze liegt bei allen gemessenen Proben und Mischungen sehr nah beieinander. Sie befindet sich zwischen 19,9 und 22,9 M.-%. Den einzigen Ausreißer stellt die vor Ort entnommene Tonprobe dar. Die Plastizitätsgrenze dieser Probe liegt bei 25,6 M.-%.

Die Plastizitätszahl ( $I_p$ ) gibt Aufschluss über die Differenz zwischen Fließgrenze und Plastizitätsgrenze (Dörken et al. 1999). Die höchsten Werte für diese Kenngröße besitzen die vor Ort entnommenen tonreichen Proben mit 22,7 % für die Tonsandprobe und 21,1 % für die Tonprobe. Der Wert der Lössprobe ist der niedrigste gemessene Wert. Er liegt bei 3,4 %.

Die Mischungen weisen sehr unterschiedliche Werte auf. Den höchsten Wert der Löss-Ton Mischungen weist die Mischung L-T 1:2 auf. Er liegt bei 17,2 %. Die Werte der Mischungen L-T 1:1 und L-T 2:1 sind etwas niedriger und liegen mit 11,3 und 10,0 % sehr nah beieinander. Die Sand-Ton Mischungen besitzen größere Abstände zwischen den Werten. Den höchsten Wert hat die Mischung S-T 1:2 mit 18,1 %. Der Wert der Mischung S-T 1:1 liegt mit 9,4 % ungefähr bei der Hälfte der Mischung S-T 1:2. Die Mischung S-T 2:1 ist mit 5,1 % wiederum knapp halb so groß, wie die Mischung S-T 1:1. Für die Sand-Ton Mischungen ist somit ein deutlicher Abstieg des Plastizitätsbereichs mit zunehmendem Sandgehalt zu erkennen.

Die Konsistenzzahl ( $I_c$ ) beschreibt die Beschaffenheit bindiger, feinkörniger Böden in Abhängigkeit vom Wassergehalt und ist ein Kriterium für die Verformbarkeit (tuhh.de). Bei einem Wert von 0,75 bis 1,0 wird der Boden als steif beschrieben. Dies trifft bei den Proben und Mischungen dieser Arbeit auf die Tonprobe sowie die Mischung L-T 1:2 zu. Werte zwischen 1,00 und 1,25 werden als halbfest bezeichnet. Dies betrifft die Tonsandprobe und die Mischungen L-T 1:1, L-T 2:1 und S-T 1:2. Ab einem Wert von 1,25 wird ein Boden als fest gekennzeichnet. Für die Lössprobe, die Sandprobe und die Mischungen S-T 1:1 und S-T 2:1 kann die Konsistenzzahl nicht angegeben werden, da es sich bei diesen Böden nicht um bindige, feinkörnige Böden handelt. Sie werden anhand der Lagerungsdichte für grobkörnige Böden beschrieben. (Dörken et al. 1999).

### **4.3.3. Kationenaustauschkapazität**

Die Ergebnisse der Kationenaustauschkapazität sind in Tabelle 13 bis 15 aufgelistet. Für alle Proben und Mischungen wurden zwei Messungen durchgeführt. Zunächst werden die Werte der Kationenaustauschkapazität für die vor Ort entnommenen Proben beschrieben. Im Anschluss folgen die Beschreibungen für die beiden Sätze aus Mischungen.

In Anhang 9 Tabelle XII bis XIV können alle Werte für die Messungen der Kationenaustauschkapazität sowie der Mittelwert der Messungen und die Mittelwerte für die Auslöschen eingesehen werden.

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse der Kationenaustauschkapazität für die vor Ort entnommenen Proben ausgewiesen. Die Ergebnisse der Messung für den Blindwert und den verwendeten Standard sind in Tabelle 13 mit angegeben.

Die Standard-Probe „Hennersdorf“ wurde zur Verifizierung der Messungen mit gemessen. Er liegt mit 13,2 meq/100g innerhalb des für den Standard typischen Bereichs von 13 bis 16 meq/100g.

Die höchsten Werte für die Kationenaustauschkapazität bei den vor Ort entnommenen Proben finden sich bei der Tonprobe mit 19,2 meq/100g und der Tonsandprobe mit 18,7 meq/100g. Deutlich niedriger ist der Wert der Lössprobe mit 7,7 meq/100g. Die niedrigsten Werte der vor Ort entnommenen Proben wurden bei der Sandprobe mit 1,9 und 3,8 meq/100g gemessen.

Tabelle 13: Kationenaustauschkapazität - Vor Ort entnommene Proben

Angaben in meq/100g

Probe	CEC - Messung 1	CEC - Messung 2	Mittelwert
Hennersdorf	13,3	13,1	13,2
MB_L	7,6	7,8	7,7
KB_TS	19,0	18,5	18,7
KB_T	19,1	19,3	19,2
KB_S	3,8	1,9	2,9

Die Unterschiede zwischen den Messungen sind bei der Lössprobe sowie der Tonprobe und der Tonsandprobe mit 0,2 bis 0,5 meq/100g sehr gering. Die Sandprobe weist von allen Proben den höchsten Unterschied zwischen den zwei Messungen auf. Er liegt bei 1,9 meq/100g.

Die Ergebnisse der Kationenaustauschkapazität für die Löss-Ton Mischungen befinden sich nachfolgend in Tabelle 14.

Tabelle 14: Kationenaustauschkapazität - Löss-Ton Mischungen

Angaben in meq/100g

Probe	CEC - Messung 1	CEC - Messung 2	Mittelwert
KB_T	19,1	19,3	19,2
L-T 1:2	13,4	13,8	13,6
L-T 1:1	12,7	12,6	12,6
L-T 2:1	12,4	11,7	12,1
MB_L	7,6	7,8	7,7

Die Löss-Mischungen weisen einen stetigen Anstieg der Kationenaustauschkapazität von der Lössprobe hin zur Tonprobe auf. Alle Werte der Mischungen liegen ungefähr im gleichen Bereich und mittig zwischen den Werten der Tonprobe und der Lössprobe. Der Mittelwert der zwei Proben liegt bei 13,5 meq/100g. Die Mischung mit dem höchsten Anteil an Ton, L-T 1:2, ist die einzige Mischung, die mit 13,6 meq/100g über dem Mittelwert von Tonprobe und Lössprobe liegt. Die beiden anderen Mischungen liegen mit 12,6 meq/100g für L-T 1:1 und 12,1 meq/100g für L-T 2:1 etwas unterhalb des Mittelwertes.

Die Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Messung liegt bei den Löss-Ton Mischungen bei 0,1 bis 0,7 meq/100g.

In Tabelle 15 sind die Werte der Kationenaustauschkapazität der Sand-Ton Mischungen aufgelistet.

Die Kationenaustauschkapazität der Sand-Ton Mischungen zeigt ebenfalls einen Abstieg von der Tonprobe hin zur Sandprobe. Der Mittelwert zwischen der Tonprobe und der Sandprobe liegt bei 11,0 meq/100g. Die Probe mit dem höchsten Anteil an Ton, S-T 1:2, ist die einzige Probe, die mit 13,7 meq/100g oberhalb des Mittelwertes aus Tonprobe und Sandprobe liegt. Die beiden anderen Mischungen liegen mit 10,3 meq/100g für S-T 1:1 und 8,3 meq/100g für S-T 2:1 deutlich unterhalb des Mittelwertes. Im Allgemeinen liegen die Werte der Sand-Ton Mischungen weiter auseinander und weisen kleinere Abstände zu den für die Mischungen verwendeten Proben auf.

Die zwei Messungen der Sand-Ton Mischungen weisen Unterschiede zwischen 0,1 und 0,4 meq/100g auf. Den höchsten Unterschied besitzt die Mischung S-T 1:2.

Tabelle 15: Kationenaustauschkapazität - Sand-Ton Mischungen

Angaben in meq/100g

Probe	CEC - Messung 1	CEC - Messung 2	Mittelwert
KB_T	19,1	19,3	19,2
S-T 1:2	13,9	13,5	13,7
S-T 1:1	10,2	10,3	10,3
S-T 2:1	8,4	8,3	8,3
KB_S	3,8	1,9	2,9

## 5. Diskussion

### 5.1. Mineralogische, chemische und geotechnische Eigenschaften der Proben

Alle Proben stammen von zwei Deponien, die eine ähnliche Geologie aufweisen und werden vor Ort für den Bau der künstlichen geologischen Barriere verwendet. Die Proben von der Deponie ‚Kettlasbrunn‘ wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen Korngrößenbestimmung gewählt. Unterschiede zwischen diesen Proben sollten daher insbesondere bei den geotechnischen Eigenschaften auftreten. Die Lössprobe von der Deponie ‚Mistelbach‘ stellt einen Gegenpart zu den Proben von der Deponie ‚Kettlasbrunn‘ dar. Die Probe von der Deponie ‚Mistelbach‘ sollte sich in allen ihren Eigenschaften von den anderen Proben unterscheiden. Darüber hinaus wird angenommen, dass die hergestellten Mischungen sich in ihrer Mineralogie, Chemie und ihren geotechnischen Eigenschaften ebenfalls geringfügig von den vor Ort entnommenen Proben unterscheiden.

Die Gesamtmineralogie (Abbildung 16) bestätigt, dass die Proben Unterschiede in ihrer Zusammensetzung aufweisen. Je feiner die Korngrößenbestimmung ist, desto geringer ist der Anteil an Quarz und Albit in der Probe. Signifikante Änderungen bei den Peak-Intensitäten der Tonminerale können hingegen nicht beobachtet werden. Auffällig ist, dass die Sandprobe nur geringe Mengen an Dolomit und Calcit enthält. Betrachtet man die Gesamtmineralogie der Mischungen, bestätigt sich die Beobachtung aus der Gesamtmineralogie der vor Ort entnommenen Proben. Sowohl bei den Löss-Ton Mischungen als auch bei den Sand-Ton Mischungen sind nur geringfügige Änderungen in der Intensität der Peaks erkennbar. Die Mineralogie ist gleichbleibend, wobei in allen Mischungen deutlich höhere Anteile an Dolomit und Calcit vorhanden sind.

Die Quantifizierung bestätigt diese Beobachtungen. Der Anteil an Quarz nimmt mit zunehmendem Anteil der Sandfraktion in der Probe oder Mischung zu, während der Anteil an Tonmineralen mit zunehmendem Anteil an Körnern der Tonfraktion in der Probe oder Mischung zunimmt. Der Anteil an Feldspäten in der Probe nimmt ebenfalls mit zunehmendem Sandanteil zu. Zudem werden in der Sandprobe deutlich geringere Anteile an Dolomit und Calcit nachgewiesen. Die Mischungen bestätigen diesen Verlauf. Es kommt sowohl bei den Proben als auch bei den Mischungen zu Ausreißern. Diese sind jedoch gering und widerlegen die zuvor genannten Beobachtungen nicht.

Die Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie weist das Vorhandensein folgender Tonminerale nach: Kaolinit, Illit, Chlorit, Smectit und Vermiculit.

Bei dem Tonmineral Kaolinit handelt es sich um ein 1:1 Schichtsilikat, zusammengesetzt aus einer Schicht aus Siliciumdioxid-Tetraedern und einer Schicht aus dioktaedrischen Aluminiumoxid-Oktaedern mit einer Schichtladung von  $X = 0$  (Guggenheim et al., 2006). Kaolinit ist

kein quellendes Tonmineral und es fehlen austauschbare Kationen (Awad et al., 2019). Es besitzt eine spezifische Oberfläche von 1 - 40 m<sup>2</sup>/g (Heim, 1990).

Der Illit ist ein 2:1 Schichtsilikat, bestehend aus zwei Schichten von Silica-Tetraedern und einer zentralen dioktaedrischen Schicht (Ismadji et al., 2015). Die Schichtladung liegt bei  $X \sim 1$  (Füchtbauer, 1988). Illit ist kein quellendes Tonmineral (Awad et al., 2019). Die spezifische Oberfläche liegt bei 50 - 200 m<sup>2</sup>/g (Heim, 1990).

Chlorit ist ein 2:2 Schichtsilikat aus einer geordneten Aufschichtung abwechselnder Schichten verschiedener Typen. Die Oktaederschicht kann sowohl dioktaedrisch als auch trioktaedrisch sein (Jasmund und Lagaly, 1993). Die Schichtladung ist variabel bei  $X = 0 \dots 1$  (Füchtbauer, 1988) und die spezifische Oberfläche liegt bei < 200 m<sup>2</sup>/g (Heim, 1990).

Der Smectit ist ein 2:1 Schichtsilikat mit zwei Schichten von Silica-Tetraedern und einer zentralen dioktaedrischen oder trioktaedrischen Schicht. Es besitzt eine Schichtladung von  $X = 0,2 - 0,6$  (Ismadji et al., 2015). Smectit ist ein quellfähiges Tonmineral (Awad et al., 2019) mit einer spezifische Oberfläche von 600 - 700 m<sup>2</sup>/g (Heim, 1990).

Vermiculit ist ein 2:1 Schichtsilikat bestehend aus zwei Schichten von Silica-Tetraedern und einer zentralen dioktaedrischen oder trioktaedrischen Schicht. Die Schichtladung ist  $X = 0,6 - 0,9$ . Vermiculit ist ebenfalls ein quellfähiges Tonmineral (Ismadji et al., 2015). Die spezifische Oberfläche ist 600 - 800 m<sup>2</sup>/g (Heim, 1990).

Gemäß der Quantifizierung der Tonminerale ist das Tonmineral Smectit in allen Proben und Mischungen dominierend. Die Zusammensetzung der Tone unterscheidet sich zwischen den Deponien durch das Vorkommen von Vermiculit bei der Deponie ‚Kettlastrunn‘, während dieses Tonmineral bei der Probe von der Deponie ‚Mistelbach‘ nur geringfügig vorhanden ist. Bei den Proben von der Deponie ‚Kettlastrunn‘ kann Chlorit hingegen nur in geringen Mengen nachgewiesen werden, während es bei der Lössprobe mit einem Anteil von 3,1 M.-% vorhanden ist. Es ist möglich, dass der Chlorit bei der Deponie ‚Kettlastrunn‘ zu Vermiculit verwittert ist. In den beiden Sätzen aus Mischungen dominiert ebenfalls der Smectit. Bei den Ergebnissen der Tonmineralogie für die Löss-Ton Mischungen wird anhand der Röntgendiffraktometrie deutlich, dass der Anteil an Chlorit mit zunehmendem Lössanteil in der Mischung steigt. Bei den Sand-Ton Mischungen fehlen die Chlorit Peak-Intensitäten hingegen.

Der hohe Anteil an Smectit sowie das Vorhandensein von Vermiculit in den Proben und Mischungen ist von besonderer Bedeutung, da beide Tonminerale eine intrakristalline Reaktivität aufweisen. Dies bedeutet, dass Reaktanten (anorganische und organische Kationen) in die Schichtzwischenräume eindringen und dort gebunden werden können. (Jasmund und Lagaly, 1993).

Die chemischen Eigenschaften der Proben unterstützen die Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen. Alle Proben weisen einen hohen Anteil an  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  auf. Diese Minerale weisen auf Quarz beziehungsweise Tonminerale hin. Die Indikatoren für Calcit und Dolomit,  $\text{MgO}$  und  $\text{CaO}$ , sind überwiegend in den tonreichen Proben und der Lössprobe vorhanden. In der Sandprobe können sie nur geringfügig nachgewiesen werden.  $\text{Na}_2\text{O}$ , ein Indikator für Albit, kann in der Sandprobe sowie der Lössprobe nachgewiesen werden.

Die Glühverluste, die für die Röntgenfluoreszenz-Analyse bestimmt wurden, passen zu den Werten der TOC-Analyse (organischer Anteil). Bei beiden Untersuchungen steigt der Wert mit zunehmendem Tonanteil in der Probe. Dies ist durch die hohe Affinität von Hydraten und organischen Substanzen zu Tonmineralen zu erklären (Lagaly et al. 2013).

Die Hinzunahme der Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen bekräftigt die bisherigen Beobachtungen. Die Tonprobe enthält den höchsten Anteil an Körnern der Tonfraktion und den geringsten Anteil an Körnern der Sandfraktion. Der Anteil an Körnern der Tonfraktion nimmt von der Tonsandprobe über die Lössprobe zur Sandprobe hin ab, während der Anteil an Körnern der Sandfraktion zunimmt. Den höchsten Anteil an Körnern der Schlufffraktion besitzt die Lössprobe. Dieser Trend wird von den Mischungen bestätigt. Alle Ergebnisse können in Tabelle 9 eingesehen werden.

Die anhand der Korngrößenbestimmung ermittelten Werte für den Durchlässigkeitsbeiwert können in Tabelle 10 eingesehen werden. Alle Werte befinden sich innerhalb der Bestimmung der DVO (2008), welche in Anhang 1 zu finden ist. Bei der Verwendung der Proben beziehungsweise Mischungen als künstliche geologische Barriere sollte auf die Richtwerte für die Mindestmächtigkeit geachtet werden. Sie wird anhand des errechneten Durchlässigkeitsbeiwerts bestimmt. Für die Proben und Mischungen, die für diese Arbeit verwendet wurden, ergeben sich unterschiedliche Mindestmächtigkeiten von 0,5 Metern bis 3 Metern.

Die Ergebnisse der Atterberg'schen Zustandsgrenzen ergeben laut DIN 18196, dass sowohl die Tonprobe als auch die Tonsandprobe und die beiden Mischungen L-T 1:2 und S-T 1:2 mit einer Fließgrenze von 35 bis 50 M.-% mittel plastisch sind. Alle weiteren Proben und Mischungen sind leicht plastisch. Dies lässt darauf schließen, dass die Atterberg'sche Fließgrenze mit dem Vorhandensein von Tonmineralen zusammenhängt. Dies gilt insbesondere für die quellfähigen Tonminerale Smectit und Vermiculit. Laut Unified Soil Classification System (USCS) und der Bestimmung der Bodenart gemäß DIN EN ISO 14688-2 handelt es sich bei der Tonprobe und der Tonsandprobe sowie den Mischungen L-T 1:2 und S-T 1:2 um mittelplastische Tone. Die Mischungen L-T 1:1, L-T 2:1 und S-T 1:1 werden als leichtplastische Tone klassifiziert. Die Lössprobe wird als sandiger Silt definiert. Die Mischung S-T 2:1 befindet sich zwischen sandigem und tonigem Silt. Die Sandprobe ist von dieser Bestimmung ausgenommen, da sie anhand der Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen nicht be-

stimmt werden konnte. Alle Ergebnisse können in Tabelle 11 und in Anhang 8 eingesehen werden.

Die Werte der Kationenaustauschkapazität zeigen einen Anstieg mit steigendem Anteil an Ton in der Probe beziehungsweise Mischung. Dies bekräftigt die Annahme, dass die Kationenaustauschkapazität mit dem Anteil der Tonminerale in der Probe oder Mischung in einem Zusammenhang steht. Für die Verwendung als Ausgangsmaterial für die Deponieabdichtung gibt es keinen Richtwert oder Grenzwert für die Kationenaustauschkapazität. In der Literatur wird argumentiert, dass ein Boden eine Kationenaustauschkapazität von mindestens 10 meq/100g erreichen sollte (Rowe et al., 1995, Kabir und Taha 2003). Folgt man diesen Werten, so würden sich die Lössprobe, die Sandprobe, sowie die Mischung S-T 2:1 nicht als Ausgangsmaterial für die künstliche geologische Barriere eignen.

Auffällig ist, dass die beiden Mischungen L-T 1:1 und L-T 2:1 sehr große Ähnlichkeiten haben. In der Gesamtmineralogie und der Tonmineralogie ist dies nicht zu erkennen. Bei allen geotechnischen Untersuchungen ist diese Auffälligkeit jedoch erkennbar. Grund für die Ähnlichkeit der beiden Mischungen können zum einen eine schlechte Durchmischung des Probenmaterials sein, zum anderen unterscheiden sich die Löss-Ton Mischungen weniger stark voneinander als die Sand-Ton Mischungen. Mit dichter beieinander liegenden Ergebnissen sollte daher gerechnet werden.

## **5.2. Zusammenhang: Atterberg'sche Fließgrenze und Tonmineralogie**

Bei der Untersuchung der Proben und Mischungen im Labor wurde festgestellt, dass die Atterberg'sche Fließgrenze mit zunehmendem Tongehalt ansteigt. Untersuchungen zu einem direkten Zusammenhang der Atterberg'schen Fließgrenze und dem Anteil an Tonmineralen im Probenmaterial wurde bereits von Schmitz et al. (2004) erkannt.

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse der Quantifizierung der wichtigsten Tonminerale für alle Proben und Mischungen (Balken) den Atterberg'schen Fließgrenzen (türkisfarbene Rauten) gegenübergestellt. Zu den Tonmineralen gehören Smectit, Illit, Kaolinit, Vermiculit und Chlorit. Da der Chlorit in den Proben von der Deponie ‚Kettlasbrunn‘ sowie den Mischungen nur in Spuren vorhanden ist, ist er nur für die Probe von der Deponie ‚Mistelbach‘ angegeben.

Die Tonprobe hat den höchsten Wert für die Atterberg'sche Fließgrenze, wobei sie gemäß der Quantifizierung weniger Tonminerale insgesamt und weniger quellfähige Tone enthält, als die Tonsandprobe. Die Ergebnisse der Quantifizierung können in Anhang 5 Tabelle 3 und Tabelle 4 eingesehen werden. Beide Proben besitzen einen hohen Anteil an Tonmineralen sowie quellfähige Tone, welcher sich zwischen den Proben nur geringfügig unterscheidet. Die Werte der Atterberg'schen Fließgrenze liegen entsprechend nah beieinander und deutlich oberhalb des Wertes für die Lössprobe. Diese enthält weniger quellfähige Tone als die tonreichen Proben.

Die Löss-Ton Mischungen haben sehr ähnliche Werte für den Anteil an Tonmineralen und den Gehalt der quellfähigen Tone. Gemäß der Quantifizierung besitzt die Mischung L-T 2:1 den höchsten Anteil an Tonmineralen. Den höchsten Anteil an quellfähigen Tonen besitzt die Mischung L-T 1:2. Die Atterberg'sche Fließgrenze fällt von der Mischung mit dem höchsten Anteil an Tonprobe in der Mischung, L-T 1:2, zu den Mischungen mit geringerem Anteil an Tonprobe in der Mischung hin ab. Entsprechend der Herstellung der Mischungen, ist dieser Verlauf ideal, da die Atterberg'sche Fließgrenze mit zunehmendem Anteil an Tonmineralen in der Mischung steigen sollte. Anhand der Quantifizierung der Tonminerale lässt sich dieser Abfall hingegen nicht erklären.

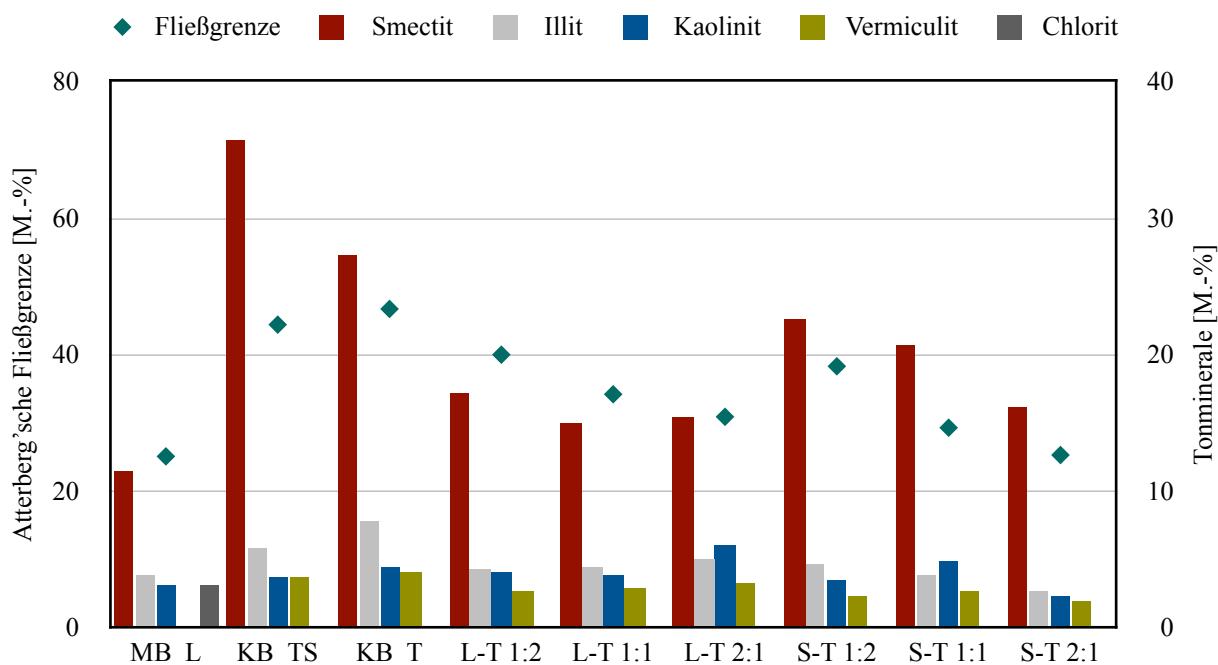


Abbildung 23: Atterberg'sche Fließgrenze und Anteil der Tonminerale

Bei den Sand-Ton Mischungen fällt der Anteil an Tonmineralen und quellfähigen Tonen stetig von der tonreichsten Mischung S-T 1:2 zur tonärmsten Mischung S-T 2:1 ab. Entsprechend steiler ist der Abfall der Atterberg'schen Fließgrenze im Vergleich zu den Löss-Ton Mischungen. Zudem sind die Werte der Sand-Ton Mischungen insgesamt niedriger als die Werte der Löss-Ton Mischungen. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die beiden Proben, die für die Herstellung dieser Mischungen verwendet wurden, größere Unterschiede in ihren mineralogischen Eigenschaften aufweisen, als die Lössprobe und die Tonprobe.

Kleinere Unstimmigkeiten, wie sie zwischen der Tonprobe und der Tonsandprobe sowie bei den Löss-Ton Mischungen vorkommen, können anhand der Heterogenität des Probenmaterials erklärt werden.

Anhand der Beziehungen, die in Abbildung 23 deutlich werden, wird die Annahme eines Zusammenhangs zwischen der Atterberg'schen Fließgrenze und dem Anteil an Tonmineralen im Probenmaterial bekräftigt. In wieweit die Atterberg'sche Fließgrenze von dem Anteil an Tonmineralen insgesamt oder von dem Vorhandensein eines bestimmten Tonminerals in der Probe zusammenhängt, soll nachfolgend diskutiert werden.

In Abbildung 24 ist die Atterberg'schen Fließgrenze aus allen Messungen dem Anteil der Tonminerale in den Proben und Mischungen gegenübergestellt.

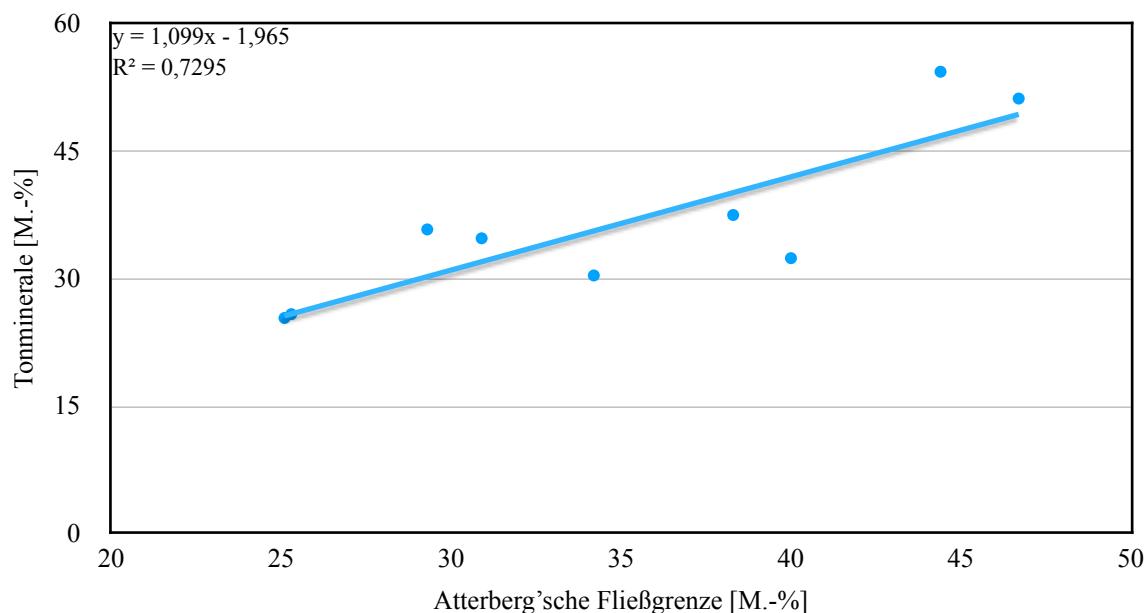


Abbildung 24: Korrelation der Atterberg'schen Fließgrenze mit dem gesamten Anteil an Tonmineralen in den Proben und Mischungen

Das Ergebnis ist eine positive, lineare Beziehung mit einem Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) von 0,7295. Das Bestimmtheitsmaß beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen den beiden Variablen. Ein perfekter Zusammenhang wäre bei einem Bestimmtheitsmaß von 1 gegeben. Eine Empfehlung über die Mindesthöhe des Bestimmtheitsmasses gibt es nicht. Aufgrund der Streuung entlang der Regressionsanpassungslinie der Proben und des Bestimmtheitsmasses kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Atterberg'sche Fließgrenze mit dem Anteil an Tonmineralen zusammenhängt.

Die nachfolgende Abbildung 25 soll klären, ob es eine Abhängigkeit oder einen Zusammenhang zwischen der Atterberg'schen Fließgrenze und einem bestimmten Tonmineral gibt. Untersucht wurden die vier wichtigsten Tonminerale, die in der Probe oder Mischung nachge-

wiesen werden konnten. Dies sind Smectit, Illit, Kaolinit und Vermiculit. Da das Tonmineral Chlorit ausschließlich in der Lössprobe in größeren Mengen vorhanden ist, erscheint es nicht in der nachfolgenden Korrelation. Die Lössprobe wurde aus der Korrelation für das Tonmineral Vermiculit ausgeschlossen, weil das Tonmineral Vermiculit in der Lössprobe nur geringfügig nachgewiesen werden konnte.

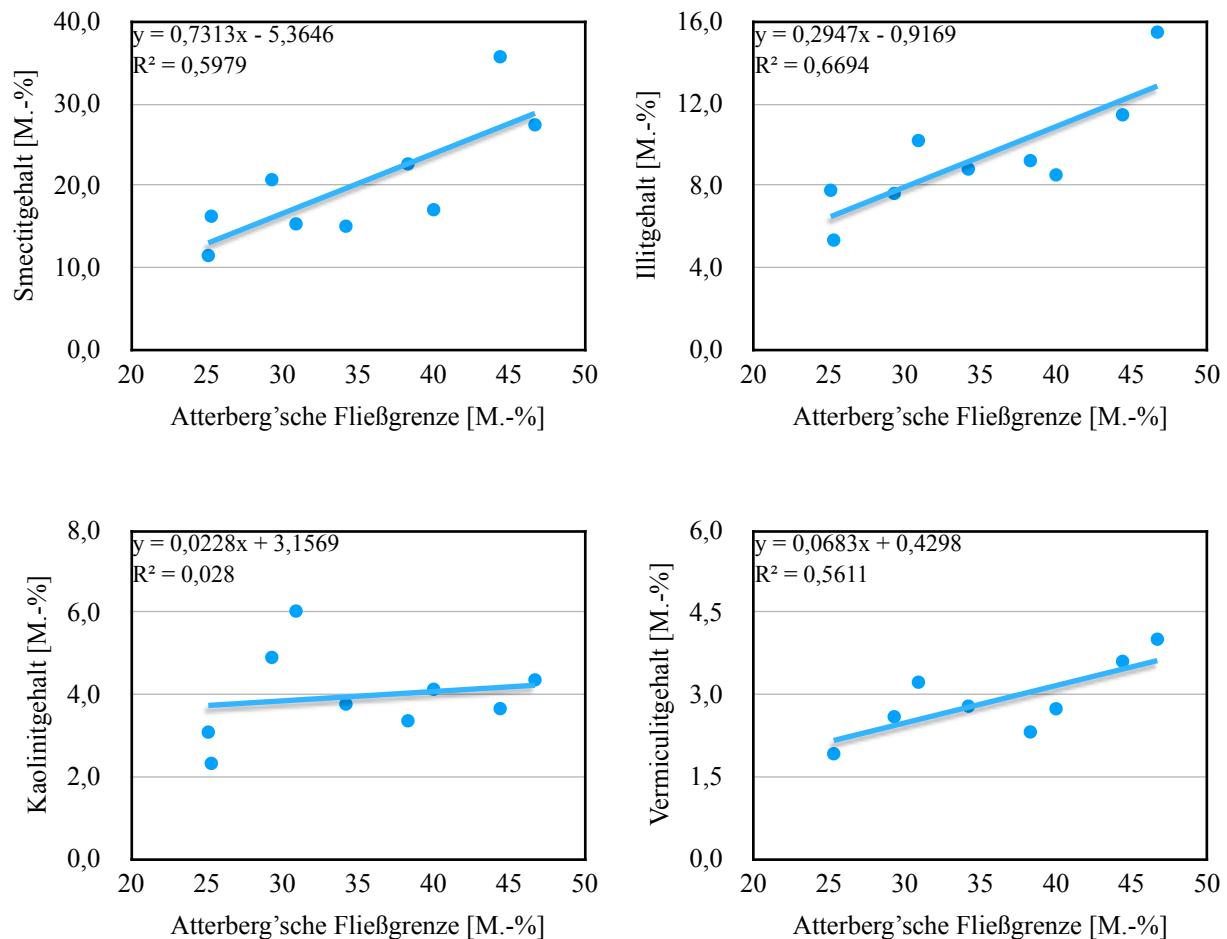


Abbildung 25: Korrelation der Atterberg'schen Fließgrenze mit dem Anteil bestimmter Tonminerale in den Proben und Mischungen

Die in Abbildung 25 dargestellten Korrelationen lassen auf mehrere Zusammenhänge zwischen der Atterberg'schen Fließgrenze und bestimmten Tonmineralen schließen. Alle Korrelationen haben einen positiven Zusammenhang. Den höchsten Wert für das Bestimmtheitsmaß besitzt das Tonmineral Illit mit 0,6694. Aufgrund der Streuung entlang der Regressionsanpassungslinie und des Vorhandenseins von einzelnen stark abweichenden Werten kann ein Zusammenhang zwischen dem Tonmineral Illit und der Atterberg'schen Fließgrenze angenommen, jedoch nicht vorausgesetzt werden. Einen ebenfalls hohen Wert für das Bestimmtheitsmaß weist das Tonmineral Vermiculit mit 0,5611 auf. Für dieses Tonmineral sind keine großen Ausreißer entlang der Regressionsanpassungslinie zu erkennen. Ein Zusammenhang mit der

Atterberg'schen Fließgrenze ist daher sehr wahrscheinlich. Das Tonmineral Smectit hat ein Bestimmtheitsmaß von 0,5979 und besitzt eine Streuung entlang der Regressionsanpassungslinie, die der Streuung für das Tonmineral Illit sehr ähnelt. Ein Zusammenhang zur Atterberg'schen Fließgrenze wird angenommen, dieser ist jedoch weniger deutlich als bei dem Tonmineral Vermiculit. Das Bestimmtheitsmaß für Kaolinit ist mit 0,028 sehr gering. Die Streuung entlang der Regressionsanpassungslinie verweist zudem nicht auf ein sich ergebendes Muster. Ein Zusammenhang ist sehr unwahrscheinlich.

Das hohe Bestimmtheitsmaß für die Tonminerale Smectit und Vermiculit sind von besonderem Interesse, da es sich bei diesen beiden Tonmineralen um quellfähige Minerale handelt und sie somit die Atterberg'sche Fließgrenze beeinflussen. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Atterberg'scher Fließgrenze und dem Anteil von Tonmineralen in der Probe, der in Abbildung 23 bereits geklärt wurde, kann angenommen werden, dass das generelle Vorhandensein von Tonmineralen bedeutender ist, als das Vorhandensein eines bestimmten Tonminerals. Entsprechend der Korrelationen in Abbildung 25 unterstützen quellfähige Tone einen hohen Wert für die Atterberg'sche Fließgrenze, sind jedoch nicht ausschließlich für den hohen Wert verantwortlich.

### **5.3. Zusammenhang: Kationenaustauschkapazität und Tonmineralogie**

Die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität basiert auf der Annahme, dass Tone die Fähigkeit haben, Kationen zu binden. Verantwortlich hierfür ist die negative Ladung der Oberfläche von Tonmineralen und die Eigenschaft einiger Tonminerale, zu quellen und somit positiv geladene Kationen in ihren Zwischenschichten einzulagern (Awad et al. 2019). Ein Zusammenhang zwischen der Kationenaustauschkapazität und dem Anteil feinkörniger Partikel ist bereits bekannt (Hepper et al., 2006). Bei der Bestimmung der Kationenaustauschkapazität für diese Arbeit wurde festgestellt, dass die Kationenaustauschkapazität ebenfalls mit zunehmendem Anteil an Ton in der Probe beziehungsweise Mischung steigt. Nachfolgend soll daher geklärt werden, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Anteil an Tonmineralen insgesamt oder dem Vorhandensein eines bestimmten Tonminerals gibt.

Abbildung 26 stellt die Ergebnisse der Quantifizierung der wichtigsten Tonminerale für alle Proben und Mischungen in Balken dar. Diese sind der Smectit, Illit, Kaolinit, Vermiculit und Chlorit. Wie zuvor in Abbildung 23 wird der Chlorit ausschließlich für die Lössprobe von der Deponie „Mistelbach“ angezeigt, da er bei den Mischungen und den Proben von der Deponie „Kettlesbrunn“ nur in Spuren vorhanden ist. Die Kationenaustauschkapazität ist in blau als Raute abgebildet.

Die vor Ort entnommenen Proben weisen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Anteil an Tonmineralen in der Probe und der Kationenaustauschkapazität auf. Die Tonprobe und die Tonsandprobe haben einen deutlich höheren Wert für die Kationenaustauschkapazität

als die tonärmeren Proben. Zudem besitzt die Sandprobe einen nochmals erheblich niedrigeren Wert als die Lössprobe. Den höchsten Anteil an Tonmineralen insgesamt sowie den höchsten Anteil an quellfähigen Tonen besitzt die Tonsandprobe. Den höchsten Wert für die Kationenaustauschkapazität hat hingegen die Tonprobe. Betrachtet man die Ergebnisse der Quantifizierung beider Proben ist auffällig, wie nah sie beieinander liegen. Dies wird bei den Ergebnissen der Kationenaustauschkapazität ebenfalls deutlich. Vergleicht man die Lössprobe und die Sandprobe, besitzt die Lössprobe einen höheren Anteil an Tonmineralen, die Sandprobe hat hingegen einen höheren Anteil an quellfähigen Tonen. Dass der Wert der Kationenaustauschkapazität bei der Lössprobe dennoch deutlich höher liegt als bei der Sandprobe, kann einen Hinweis darauf geben, dass der Anteil an Tonmineralen in der Probe von größerer Bedeutung ist, als das Vorhandensein eines bestimmten Tonminerals.

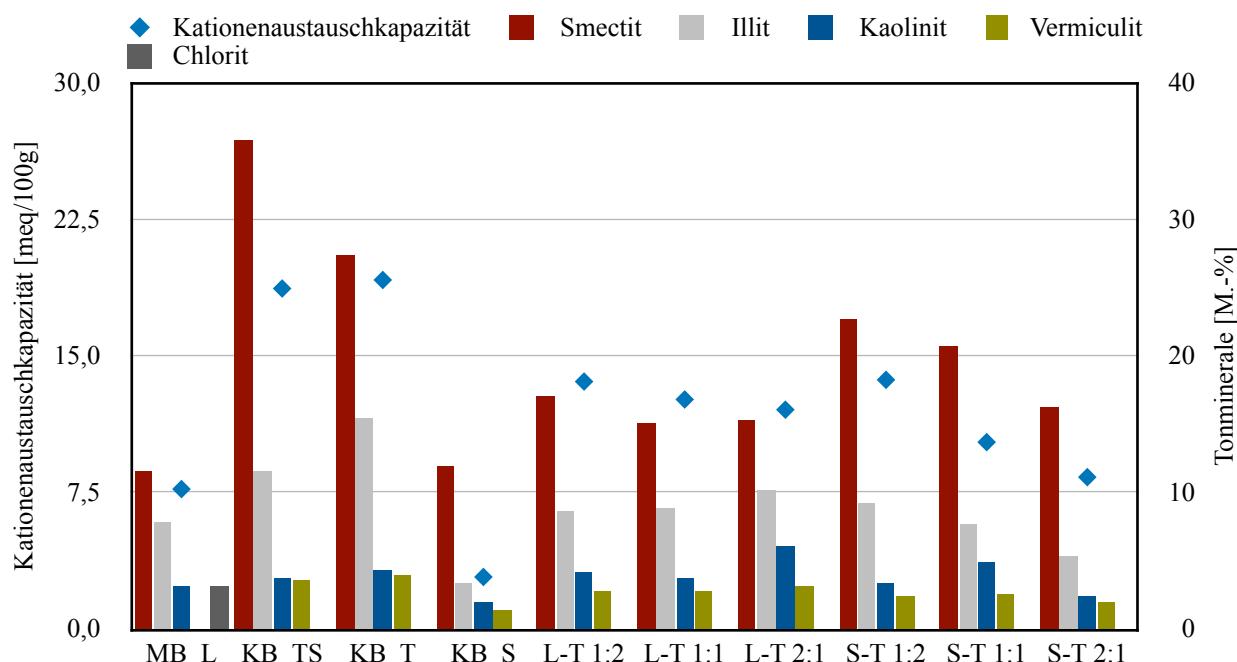


Abbildung 26: Kationenaustauschkapazität und Anteil der Tonminerale

Die Werte der Löss-Ton Mischungen liegen sowohl bei der Quantifizierung als auch bei der Kationenaustauschkapazität sehr nah beieinander. Während bei der Kationenaustauschkapazität ein abfallender Trend von der Mischung mit dem höchsten Anteil an Tonprobe hin zur Mischung mit dem niedrigsten Anteil an Tonprobe festgestellt werden kann, folgen die Werte der Quantifizierung diesem Verlauf nicht. Anhand der Quantifizierung der Tonminerale lässt sich dieser Abfall der Kationenaustauschkapazität daher nicht erklären.

Die Sand-Ton Mischungen weisen ebenfalls einen abfallenden Trend auf. Die Mischung mit dem höchsten Anteil an Tonprobe besitzt den höchsten Wert für die Kationenaustauschkapazität. Mit abnehmendem Anteil an Tonprobe in der Mischung nimmt der Wert der Kationenaus-

tauschkapazität ab. Die Werte der Sand-Ton Mischungen sind jeweils etwas niedriger als der Wert der entsprechenden Löss-Ton Probe. Wie zuvor bei der Atterberg'schen Fließgrenze lässt sich dies durch die größeren Unterschiede in den mineralogischen Eigenschaften zwischen der Sandprobe und der Tonprobe erklären.

Abbildung 26 bestärkt die Annahme eines Zusammenhangs zwischen der Kationenaustauschkapazität und dem Anteil an Tonmineralen. Die Entwicklung der Kationenaustauschkapazität entspricht den Erwartungen, wonach die Kationenaustauschkapazität mit sinkendem Anteil an Tonmineralen in der Probe oder Mischung ebenfalls sinken sollte. Nachfolgend soll geklärt werden, ob die Kationenaustauschkapazität mit dem Anteil an Tonmineralen insgesamt oder mit dem Vorhandensein eines bestimmten Tonminerals zusammenhängt.

In Abbildung 27 ist die Kationenaustauschkapazität gegenüber dem Gesamtanteil an Tonmineralen in den Proben und Mischungen gemäß der Quantifizierung aufgezeichnet.

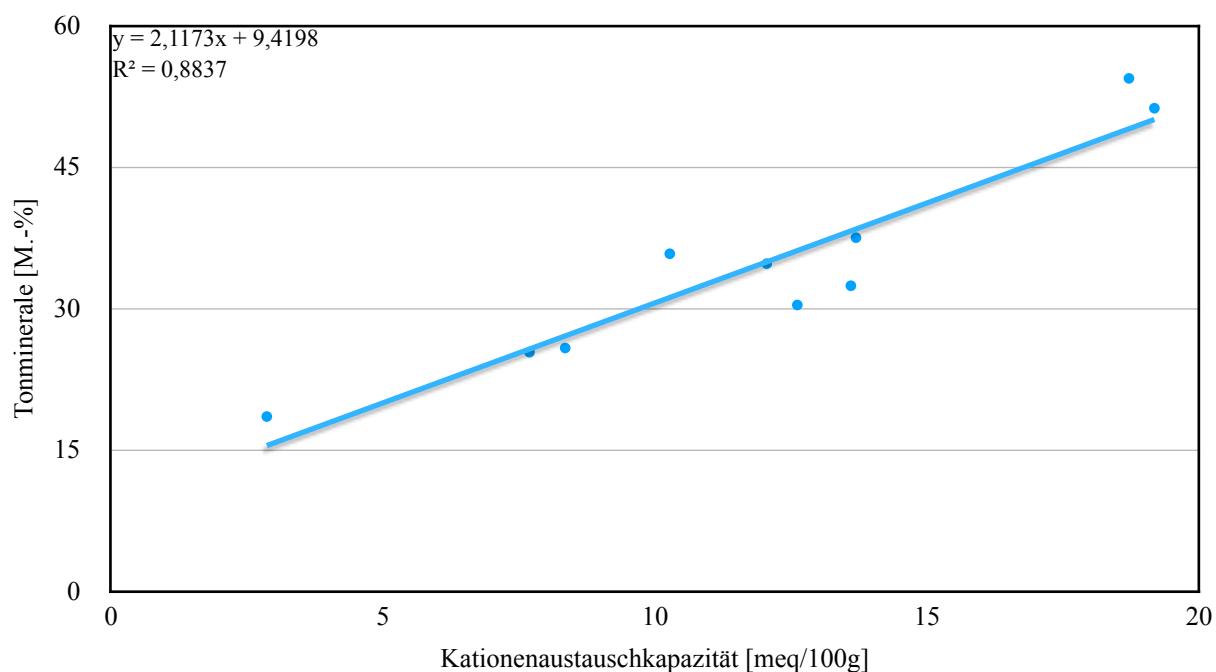


Abbildung 27: Korrelation der Kationenaustauschkapazität mit dem gesamten Anteil an Tonmineralen in den Proben und Mischungen

Die Korrelation weist eine positive, lineare Beziehung mit einem Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) von 0,8837 auf. Aufgrund der Streuung entlang der Regressionsanpassungslinie und des hohen Bestimmtheitsmaßes kann von einem Zusammenhang zwischen der Kationenaustauschkapazität und dem Anteil an Tonmineralen in der Probe ausgegangen werden.

In der nachfolgenden Abbildung 28 ist die Kationenaustauschkapazität den wichtigsten Tonmineralen gegenübergestellt. Anhand dieser Korrelation soll geklärt werden, ob es einen Zusammenhang zwischen einem oder mehreren bestimmten Tonmineralen und der Kationenaustauschkapazität gibt. Es wurden die vier wichtigsten Tonminerale, die in den Proben und Mischungen nachgewiesen werden konnten, untersucht. Dies sind Smectit, Illit, Kaolinit und Vermiculit. Das Tonmineral Chlorit konnte ausschließlich in der Lössprobe in größeren Mengen nachgewiesen werden, daher erscheint es nicht in der nachfolgenden Korrelation. Da das Tonmineral Vermiculit in der Lössprobe nur geringfügig vorhanden ist, wurde die Lössprobe aus der Korrelation für den Vermiculit ausgeschlossen.

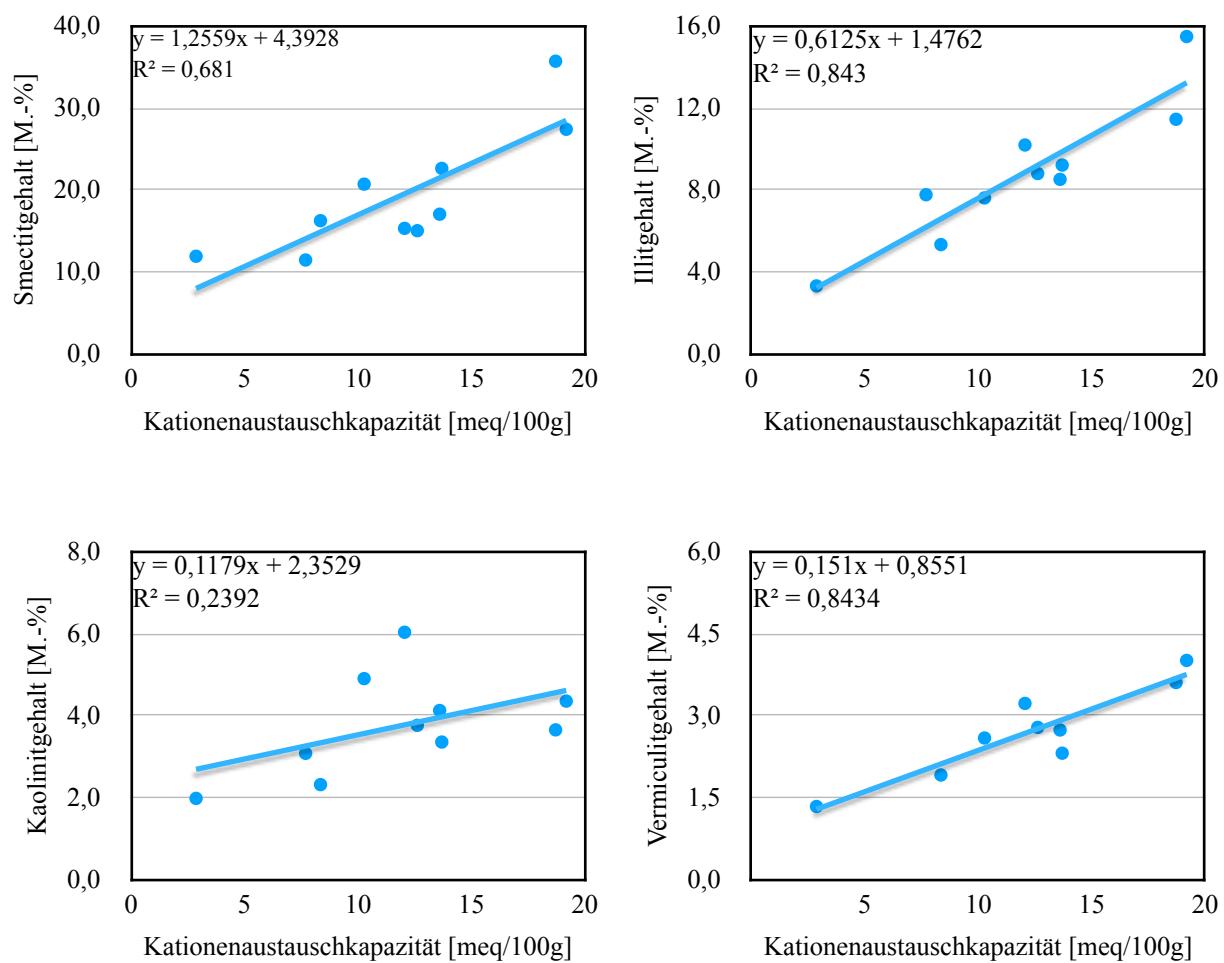


Abbildung 28: Korrelation der Kationenaustauschkapazität mit dem Anteil bestimmter Tonminerale in den Proben und Mischungen

Die Korrelation zwischen der Kationenaustauschkapazität und den wichtigsten Tonmineralen in Abbildung 28 lässt auf mehrere Zusammenhänge schließen. Das höchste Bestimmtheitsmaß besitzt der Vermiculit mit 0,8434. Darüber hinaus weist dieses Tonmineral eine geringe Streuung der Proben entlang der Regressionsanpassungslinie auf. Es kann daher von einem

Zusammenhang zwischen der Kationenaustauschkapazität und dem Tonmineral Vermiculit ausgegangen werden. Ebenfalls ein sehr hohes Bestimmtheitsmaß mit 0,843 besitzt der Illit. Im Vergleich zum Vermiculit weist der Illit hingegen eine größere Streuung entlang der Regressionsanpassungslinie auf. Ein Zusammenhang zwischen dem Tonmineral Illit und der Kationenaustauschkapazität ist anzunehmen, jedoch weniger deutlich als bei dem Tonmineral Vermiculit. Gleiches gilt für das Tonmineral Smectit mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,681 und einer Streuung, die der des Tonminerals Illit ähnelt, jedoch etwas weiter gestreut ist. Ein Zusammenhang zwischen der Kationenaustauschkapazität und Smectit kann daher ebenfalls angenommen werden. Das Tonmineral Kaolinit scheint keinen direkten Zusammenhang mit der Kationenaustauschkapazität zu haben. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,2392.

Auch bei der Kationenaustauschkapazität ist es von besonderem Interesse, dass die quellfähigen Tone Smectit und Vermiculit ein hohes Bestimmtheitsmaß aufweisen. Es wird angenommen, dass sie die Kationenaustauschkapazität im hohen Maße beeinflussen und in einem Zusammenhang mit den hohen Werten für die Kationenaustauschkapazität stehen. Abbildung 28 bestätigt die Annahme, dass das generelle Vorhandensein von Tonmineralen in der Probe beziehungsweise Mischung unabhängig von dem Vorhandensein eines bestimmten Tonminerals in einem Zusammenhang mit der Kationenaustauschkapazität steht. Der Anteil an quellfähigen Tonmineralen in der Probe oder Mischung ist nicht alleine verantwortlich, sondern der Anteil an Tonmineralen insgesamt. Die quellfähigen Tone Smectit und Vermiculit begünstigen jedoch einen hohen Wert für die Kationenaustauschkapazität.

#### **5.4. Zusammenhang: Atterberg'sche Zustandsgrenzen und Kationenaustauschkapazität**

Gemäß der Ergebnisse dieser Arbeit konnte festgestellt werden, dass sowohl die Atterberg'sche Fließgrenze als auch die Kationenaustauschkapazität in einem Zusammenhang mit dem Anteil an Tonmineralen im Probenmaterial stehen. Anhand der nachfolgenden Abbildung 29, in welcher die Kationenaustauschkapazität gegen die zwei wichtigsten Atterberg'schen Zustandsgrenzen aufgetragen ist, soll beurteilt werden, ob die beiden Methoden miteinander korrelieren.

In Abbildung 29 ist die Kationenaustauschkapazität der Atterberg'schen Fließgrenze (links) und der Plastizitätszahl (rechts) gegenübergestellt. Die Regressionsanpassungslinie und das Bestimmtheitsmaß geben Aufschluss über Zusammenhänge zwischen den Methoden.

Beide Korrelationen haben eine positive, lineare Beziehung. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei der Atterberg'schen Fließgrenze bei 0,946, bei der Plastizitätszahl bei 0,9101. Das Bestimmtheitsmaß deutet damit auf einen nahezu perfekten Zusammenhang zwischen der Kationenaustauschkapazität und den Atterberg'schen Zustandsgrenzen hin. Ein perfekter Zusammenhang wäre bei 1 gegeben. Aufgrund der Korrelation der Methoden ist davon auszugehen, dass ein

hoher Wert für die Kationenaustauschkapazität in einem hohen Wert für die Atterberg'schen Zustandsgrenzen resultiert. Ähnliche Zusammenhänge zwischen den Atterberg'schen Zustandsgrenzen und der Kationenaustauschkapazität können in der Literatur gefunden werden (Yilmaz, 2004; Metha und Sachan, 2017; Spagnoli und Shimobe, 2019).

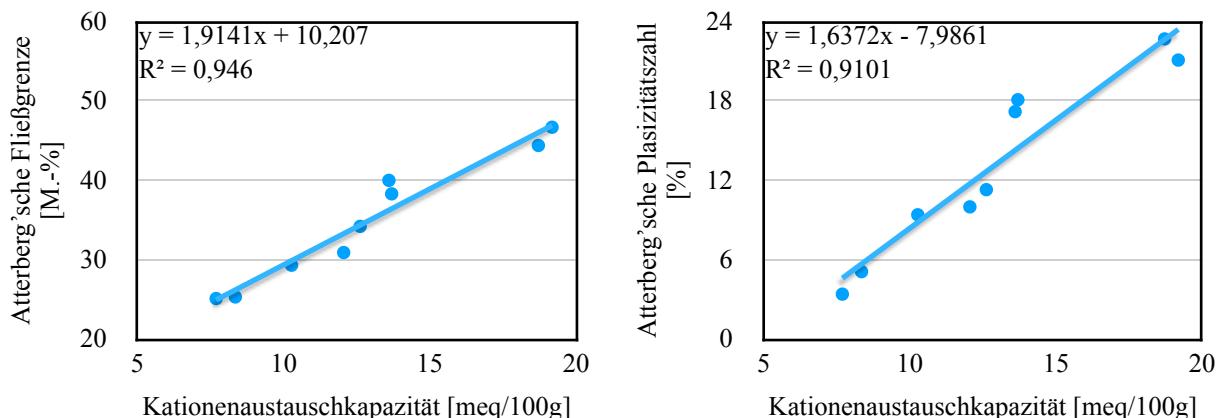


Abbildung 29: Korrelation der Kationenaustauschkapazität gegenüber den Zustandsgrößen der Atterberg'schen Fließgrenze

## 5.5. Gegenüberstellung: Atterberg'sche Zustandsgrenzen, Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie und Kationenaustauschkapazität

Die Kationenaustauschkapazität soll im Rahmen dieser Arbeit als eine neue alternative Methode für die Eignungsprüfung von Böden für die Verwendung als künstliche geologische Barriere diskutiert werden. Sie soll mit bereits anerkannten Laboruntersuchungen verglichen werden, die einen Zusammenhang mit dem Anteil an Tonmineralen im Probenmaterial aufweisen. Dies sind die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen und die Bestimmung der Tonminerale anhand der Röntgendiffraktometrie. Nachfolgend soll erörtert werden, wie sich die drei Methoden in ihrer Anwendung voneinander unterscheiden und ob die Kationenaustauschkapazität in der Lage ist, als Eignungsprüfung für Böden herangezogen zu werden und darüber hinaus eine Alternative zur Bestimmung der Tonminerale anhand der Röntgendiffraktometrie und/oder zur Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen darstellt.

In Kapitel 5.2 wurde bereits erklärt, dass die Atterberg'schen Zustandsgrenzen mit dem Anteil an Tonmineralen im Ausgangsmaterial in einem Zusammenhang steht. Ein gleicher Zusammenhang wurde in Kapitel 5.3 für die Kationenaustauschkapazität und den Anteil an Tonmineralen im Ausgangsmaterial festgestellt. Darüber hinaus konnte in Kapitel 5.3 der Zusammenhang zwischen den Atterberg'schen Zustandsgrenzen und der Kationenaustauschkapazität geklärt werden. Bei dem Vergleich der Methoden wurde deutlich, dass ein hoher Wert bei der Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen und der Kationenaustauschkapazität mit

einem hohen Anteil an Tonmineralen im Probenmaterial zusammenhängt. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass ein hoher Wert für die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen und der Kationenaustauschkapazität mit dem Vorhandensein von quellfähigen Tonmineralen wie Smectit und Vermiculit sowie der Präsenz des Tonminerals Illit im Probenmaterial in Verbindung steht. Beide Methoden geben somit Kennwerte an, die sich auf die Tonminerale insgesamt und auf das Vorhandensein bestimmter Tonminerale beziehen. Die Bestimmung der Atterberg'sche Zustandsgrenzen gibt zudem Informationen zur Plastizität und den Zustandsgrenzen des Bodens an, während die Kationenaustauschkapazität ein Maß für die Fähigkeit eines Bodens bestimmt, Kationen zu binden. Im Gegensatz zur Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie, wird anhand der Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen und der Kationenaustauschkapazität jedoch kein genauer Wert für die Anteile der Tonminerale bestimmt.

Für die Ermittlung der Kennwerte gibt es je nach Methode unterschiedliche Regelungen vom Staat Österreich. Die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen wird in der ÖNORM EN ISO 17892-12 vollständig beschrieben. Die Bestimmung der Tonmineralogie folgt Publikationen wie der von Moore und Reynolds (1997), welche in der Fachliteratur zu finden sind. Für die Kationenaustauschkapazität gibt es eine Vielzahl an Publikationen, die sich anhand ihres Versuchsaufbaus und den verwendeten Kationen unterscheiden. Ein genormtes Verfahren für die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität gibt es nicht. Es sollte daher darauf geachtet werden, inwieweit Verfahren zur Bestimmung der Kationenaustauschkapazität miteinander verglichen werden können.

Der Anwendungsbereich der drei Methoden unterscheidet sich ebenfalls. Die Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie und die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität können an allen Böden, unabhängig von ihrer mineralogischen und granulometrischen Zusammensetzung durchgeführt werden. Bei der Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen müssen Körner mit einem Korndurchmesser von mehr als 400 µm entfernt werden. Zudem spielt der Tonanteil eine bedeutendere Rolle. Ist der Tonanteil in der Probe zu gering, können die Atterberg'sche Zustandsgrenzen nicht bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnte aus diesem Grund die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen an der Sandprobe nicht durchgeführt werden.

Die Anwendung der drei Methoden unterliegt darüber hinaus der Erfahrung des Laboranten oder der Laborantin. Bei der Bestimmung der Tonmineralogie trifft dies insbesondere auf die Quantifizierung zu. Die Flächen, die anhand der Peak-Intensitäten der Tonminerale bestimmt werden, unterliegen dem Urteil des Laboranten oder der Laborantin und sind somit subjektiv und nicht vollständig reproduzierbar. Ein bedeutender Nachteil der Atterberg'schen Zustandsgrenzen ist ebenfalls die subjektive Beurteilung. Dies wird in der ÖNORM EN ISO 17892-12 bereits explizit genannt: „Es ist bekannt, dass die Versuchsergebnisse dem Urteil des Laboranten unterliegen und dass gewisse Schwankungen in den Ergebnissen auftreten“.

können“ (ÖNORM EN ISO 17892-12). Die Kationenaustauschkapazität weist diese Subjektivität nicht auf. Da die Messung an einem Gerät mit entsprechendem Programm und hoher Genauigkeit erfolgt, basieren die Ergebnisse dieser Methode nicht auf dem Urteil des Laboranten oder der Laborantin. Darüber hinaus ist die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität bei sorgfältiger Vorgehensweise reproduzierbar. Dies verdeutlichen die Ergebnisse der zwei Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit für die Kationenaustauschkapazität durchgeführt wurden. Die Ergebnisse zeigen nur geringe Abweichungen zwischen den zwei durchgeführten Messungen (Tabelle 18 bis 20).

Betrachtet man die Anwendung der Methoden auf ihr Gefahrenpotential und die notwendigen Vorrichtungen zur Minimierung der Gefahr für den menschlichen Körper, unterscheiden sich die Methoden ebenfalls voneinander. Das Röntgendiffraktometer für die Bestimmung der Tonmineralogie verwendet Röntgenstrahlen für die Analyse. Im Allgemeinen sind die Geräte aber Vollschutzgeräte und werden von Strahlenschutzbeauftragten geprüft, das heißt, bei normaler Labortätigkeit sollte keine Gefahr für den menschlichen Körper ausgehen. Bei der Bestimmung der Kationenaustauschkapazität wird ein Cu(II)-Ethylendiamin-Komplex verwendet. Dieser ist für den menschlichen Körper toxisch. Er sollte daher mit besonderer Vorsicht gehandhabt werden. Während der Arbeit mit dem Cu(II)-Ethylendiamin-Komplex müssen die ganze Zeit Handschuhe getragen werden. Die Herstellung der Proben sollte zudem in einem Abzug ausgeführt werden. Die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen birgt keine Gefahren.

Der zeitliche Faktor ist bei der Anwendung der Methoden unterschiedlich. Für die Bestimmung der Tonmineralogie sollte insofern Zeit eingeplant werden, als dass die Präparation für die Analyse mit dem Röntgendiffraktometer je nach Anzahl der Proben einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen kann. Der Zeitaufwand für die Auswertung der Tonmineralogie sowie die Quantifizierung hängt von der Erfahrung des Laboranten oder der Laborantin ab. Die Untersuchung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen nimmt vergleichsweise viel Zeit in Anspruch. Pro Probe sollte mit einem Zeitaufwand von 90 Minuten ausgegangen werden. Auch für diese Methode nimmt der Zeitaufwand mit zunehmender Erfahrung ab, bleibt aufgrund des Umfangs der Methode jedoch weiterhin hoch. Die Herstellung und Ausführung der Methode zur Untersuchung der Kationenaustauschkapazität ist weniger zeitintensiv. Zudem können wie bei der Bestimmung der Tonmineralogie mehrere Proben gleichzeitig vorbereitet und hintereinander gemessen werden. Für diesen Bericht wurde die Messung der Kationenaustauschkapazität zweimal durchgeführt. Pro Durchgang wurden 11 Proben gemessen. Bei beiden Durchgängen betrug die Zeit, die zur Vorbereitung und Messung der Proben notwendig war, in etwa fünf Stunden.

Vergleicht man die Anschaffungskosten, die für die Anwendung der Methoden notwendig sind, ergeben sich große Unterschiede. Für die Bestimmung der Tonmineralogie ist ein Röntgendiffraktometer notwendig. Die Kosten für ein Röntgendiffraktometer liegen im sechsstel-

ligen Euro-Bereich. Es ist möglich, einzelne Proben von zertifizierten Laboren analysieren zu lassen. Preise hierfür unterscheiden sich je nach Anbieter und Umfang der Analyse. Für die Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen ist eine Klopfschale sowie weiteres Zubehör notwendig. Die Klopfschale ist bei verschiedenen Herstellern erhältlich. Die Anschaffungskosten liegen bei ungefähr 550 €. Das Zubehör muss zusätzlich erworben werden und kann je nach Umfang im mittleren dreistelligen Euro-Bereich liegen. Ein Photometer zur Bestimmung der Kationenaustauschkapazität kostet etwa 900 €. Teurere Geräte mit weiteren Funktionen sind ebenfalls erhältlich. Die Anschaffung der Chemikalien, welche für die Herstellung des Cu(II)-Ethylendiamin-Komplexes notwendig sind, liegen bei etwa 90 € für Triethylenetetramine und 7 € für Cu(II). Der Cu(II)-Ethylendiamin-Komplex lässt sich nach der Herstellung aufheben. Ein Ablaufdatum ist nicht bekannt.

Bezieht man alle genannten Faktoren ein, stellt die Kationenaustauschkapazität eine Alternative sowohl zur Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen als auch zur Bestimmung der Tonmineralogie dar.

## 6. Conclusio

Die Frage, ob die Kationenaustauschkapazität eine alternative Methode zur Untersuchung der künstlichen geologischen Barriere im Deponiebau darstellt, kann bereits mit ‚Ja‘ beantwortet werden. Sie weist gegenüber der Bestimmung der Atterberg’schen Zustandsgrenzen und der Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie mehrere Vorteile auf. Sie kann, unabhängig von der Korngrößenbestimmung und dem Anteil an Tonmineralen, auf jede Bodenprobe angewandt werden und ist sowohl reproduzierbar als auch objektiv. Sie ist darüber hinaus weniger zeitintensiv als die Bestimmung der Atterberg’schen Zustandsgrenzen und kostengünstiger als die Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie.

Da die Kationenaustauschkapazität sich aufgrund ihrer Kennwerte von der Bestimmung der Atterberg’schen Zustandsgrenzen und der Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie unterscheidet, kommt jedoch die Frage auf, welche Kennwerte von größerer Bedeutung sind. Um diese Frage eindeutig klären zu können, wäre es notwendig die Zusammenhänge, zwischen den Methoden in weiteren Versuchen genauer zu erforschen. Die Zusammenhänge die in dieser Arbeit anhand von Korrelationen für die drei Methoden ermittelt wurden, sind sehr vielversprechend. Das Bestimmtheitsmaß lag bei allen Korrelationen zwischen den Methoden über 0,7. Für die Korrelationen der Kationenaustauschkapazität mit der Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie in Abbildung 27 lag das Bestimmtheitsmaß mit 0,8837 zudem deutlich höher, als bei der Korrelation der Bestimmung der Atterberg’schen Fließgrenze mit der Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie in Abbildung 24 mit 0,7295. Das höchste Bestimmtheitsmaß ergab sich bei der Korrelation der Kationenaustauschkapazität und der Bestimmung der Atterberg’schen Fließgrenze mit 0,9101 (Abbildung 29). Aufgrund der engeren Streuung entlang der Regressionsanpassungslinie und der hohen Werte für das Bestimmtheitsmaß kann von einen Zusammenhang ausgegangen werden. Ähnliches bestätigen Publikationen von Yilmaz (2004), Metha und Sachan (2017), Spagnoli und Shimobe (2019).

Ein weiterer Aspekt, der vor der Einführung der Kationenaustauschkapazität als anerkannte Laboruntersuchung geklärt werden sollte, ist die Einführung eines genormten Verfahrens anhand einer ÖNORM. Dies würde die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse garantieren und die Ergebnisse vergleichbar machen. Darüber hinaus würde die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Kenngröße der Kationenaustauschkapazität einen Vergleich zu Kenngrößen anderer Laboruntersuchungen wie der zuvor genannten Bestimmung der Atterberg’schen Zustandsgrenzen oder der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie eindeutig klären.

Diese Arbeit kommt zu dem Schluss, dass die Kationenaustauschkapazität eine realistische Alternative zur Bestimmung der Atterberg’schen Zustandsgrenzen und zur Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie ist. Ein Ersatz der aktuell anerkannten

Laboruntersuchungen durch die Kationenaustauschkapazität ist somit grundsätzlich möglich, aufgrund der Unterschiede zwischen den Methoden und den zuvor genannten, fehlenden Voraussetzungen ist zu diesem Zeitpunkt der vollständige Ersatz in der Praxis nicht umgehend möglich. Eine teilweise Substitution der Bestimmung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen oder der Bestimmung der Tonmineralogie durch die Kationenaustauschkapazität wäre hingegen realisierbar. Auf diese Weise würde ein objektiver Kennwert bestimmt werden, welcher den auf Erfahrung basierenden, subjektiveren Kennwerten der Bestimmung der Atterberg'schen Fließgrenze und der Bestimmung der Tonmineralogie anhand der Röntgendiffraktometrie gegenübersteände. Darüber hinaus würde dies dem Labor und dem Auftraggeber Kosten und Zeit sparen, und die Erfahrungen und Ergebnisse bei der Bestimmung der Kationenaustauschkapazität könnten für die Erstellung eines genormten Verfahrens verwendet werden.

## 7. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während meiner Masterarbeit unterstützt haben und ihr Fachwissen mit mir geteilt haben.

Ganz herzlich möchte ich mich bei Frau Professor Dr. Susanne Gier bedanken, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit. Ihre Herzlichkeit, Zugewandtheit und ihre Motivation und Inspiration in schwierigen Zeiten haben mich sehr gestärkt.

Der Firma Zöchling Abfallverwertung, und insbesondere den Herren Clemens Pfersmann und Christian Jachs für die intensive Diskussion zur Themenfindung dieser Arbeit und die fachliche Unterstützung und Betreuung sowie die Bereitstellung von Probenmaterial.

Ich möchte mich bei den Firmen und Instituten bedanken, die mir bei den Versuchsdurchführungen geholfen haben und immer für Fragen offen standen. Dies betrifft Frau Angelina-Rafaella und Frau Andrea Schicker von der Firma MAPAG GmbH sowie Frau Maria Mayrhofer vom Institut für Angewandte Geologie der Universität für Bodenkultur Wien.

Weiterhin möchte ich mich herzlich bei Herrn Peter Nagl vom Department für Lithosphärenforschung für die Einführung in die Anwendung der Röntgenfluoreszenzanalyse und seine Informationsbereitschaft bedanken. Unsere Gespräche in der Teeküche werden mir in sehr guter Erinnerung bleiben.

Ein ganz besonders herzlicher Dank gilt den Mitarbeitern des Fachbereichs Sedimentologie der Universität Wien. Zum einen möchte ich mich bei Frau Sabine Hruby-Nichtenberger für ihre Unterstützung bei allen Labortätigkeiten bedanken. Zum anderen möchte ich mich bei Frau Maria Meszar für die Durchführung von Messungen und ihre Hilfsbereitschaft bei Tätigkeiten im Labor bedanken. Darüber hinaus möchte ich mich bei Frau Beatrix Bethke für ihre Unterstützung bei der Bestimmung des organischen Kohlenstoffs bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kommilitonen, insbesondere Frau Franziska Holzer und Herrn Christian Bisping, die mir im Studium und ganz besonders während der Masterarbeit mit viel Interesse und einem offenen Ohr zur Seite standen. Ich werde unsere gemeinsam verbrachte Zeit nicht vergessen.

Frau Michaela Hamich-Helbrecht danke ich herzlich für das Korrekturlesen meiner Masterarbeit.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden und Freundinnen bedanken, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

## **8. Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken (dazu zählen auch Internetquellen) entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

---

(Datum, Unterschrift)

## 9. Literatur

- Afolagboye, L.O., Talabi , A.O., Ajisafe, Y.C., Alabi, S., 2017: Geotechnical Assessment of Crushed Shales from Selected Locations in Nigeria as Materials for Landfill Liners. *Geotechnical Geological Engineering* (2017) 35, 1847–1858.
- Awad, A.M., Shaikh, S.M.R., Jalab, R., Gulied, M.H., Nasse, M.S., Benamor, A., Adham, S., 2019: Adsorption of organic pollutants by natural and modified clays: A comprehensive review. *Separation and Purification Technology* 228 (2019) 115719.
- Bahmani, O., Bayram, M., 2018: Investigating the hydraulic conductivity and soil characteristics under compaction and soil texture and performances as landfill liner. *Arabian Journal of Geosciences* (2018) 11: 453.
- Chabra, R., Pleysier J., and Cremers, A., 1975: The measurement of the cation exchange capacity and exchangeable cations in soils 9A new method. *Proceedings of the Inter- national Clay Conference*, 1975, Mexico, 439-449.
- Chen, W., Lu, H.J., Li, J.X., Dai, R., Wang, G.W., 2014: The strength and hydraulic properties of landfill improved clay liner, vol. 19, Bund. p 4237–4246.
- Czurda, K., 2006: Clay Liners and Waste Disposal. In: Bergaya, F. Theng, B.K.G., Lagaly, G., (Eds.), *Handbook of Clay Science*. Elsevier, Amsterdam, 693-702.
- Deponieverordnung, 2008: Gesamte Rechtsvorschrift für Deponieverordnung 2008, Fassung vom 13.02.2022. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008 – DVO 2008). StF: BGBl. II Nr. 39/2008.
- DIN 18196: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Ausgabe: 2011-05. Berlin.
- DIN EN ISO 14688-2: Geotechnische Erkundung und Untersuchung — Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden — Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen. Ausgabe: 2020-11. Berlin.
- Dörken, W., Dehne, E., 1999: Grundbau in Beispielen, Teil 1. 2., überarb. u. erw. Aufl. Düsseldorf : Werner. 1999. – ISBN 3-8041-5075-6, S. 82-85, 301-304.
- Füchtbauer, H., 1988: Sedimente und Sedimentgesteine, 4. Aufl. Schweizerbart, Stuttgart.
- Guggenheim, S., Adams, J.M., Bain, D.C., Bergaya, F., Brigatti, M.F., Dritt, V.A., Formoso, M.L.L., Galan, E., Kogure, T., Stanjek, H., 2006: Summary of recommendations of nomenclature committees relavant to clay mineralogy: report of the Association Internationale Pour L'étude des Agiles (AIPEA) nomenclature committee 2006. *Clays Clay Miner.* 54, 761-772 (2006).
- Hazen, A., 1892: Some physical properties of sands and gravels with special reverence to their use in filtration. – 24th annual report, Massachusetts State Bureau of Health, Pub. Doc. No. 34, 539-556, Boston (1892).
- Heim, D., 1990: Tone und Tonminerale: Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie. - 157 S., Enke, Stuttgart.

Hepper, E.N., Buschiazzo, D.E., Hevia, G.G., Urioste, A., Antón, L., 2006: Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents. *Geoderma* 135 (2006) 216–223.

Ismadji, S., Soetaredjo, F.E., Ayucitra, A., 2005: *Clay Materials for Environmental Remediation*. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.

Kabir, M.D. H., Taha, M.R., 2003: Sedimentary Residual Soil as a Waste Containment Barrier Material. *Soil & Sediment Contamination*, 13:407–420, 2004.

Kahr, G. and Madsen, E.T., 1995: Determination of the cation exchange capacity and the surface area of bentonite, illite and kaolinite by methylene blue adsorption. *Applied Clay Science*, 9, 327-336.

Jasmund, K., Lagaly, G., 1993: *Tonminerale und Tone*. - 490 S., Steintopf, Darmstadt.

Lagaly, G., Ogawa, M., Dékány, I., 2013: Clay mineral-organic interactions, in: F. Bergaya, G. Lagaly (Eds.), *Developments in Clay Science*, Elsevier, Oxford, 2013, pp. 435–505.

LECO Corporation, 2018: Temperature-Dependent Determination of Total Organic Carbon (TOC) in Soil, Rock, and Shale. Saint Joseph, Michigan USA.

Mehta, B., Sachan, A., 2017: Effect of mineralogical properties of expansive soil on its mechanical behavior. *Geotechnical and Geological Engineering* 2017;35(6):2923-34. Meier, L.P., Kahr, G., 1999: Determination of the Cation Exchange Capacity (CEC) of Clay Minerals using the Complexes Oof Copper(II) Ion with Triethylenetetramine and Tetraethylenepentamine. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 47, No. 3, 386-388. 1999.

Moore, D.M., Reynolds, R.C., 1997: *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*, 2nd ed. Oxford, New York: Oxford University Press. 378 pp.

Musso, T.B., Roehl, K.E., Pettinari, G., Vallés, J.M., 2010: Assesment of smectite-richclaystones from Northpatagonia for their use as liner materials in landfills. *Applied Clay Science* 48 (2010) 438-445.

Nagl, P., Mader, D., 2019: XRF and INAA for the geochemical analysis of rocks, presented on inhouse control samples. Abstract Booklet - 27th Seminar on Activation Analysis and Gamma Spectrometry (SAAGAS 27), 24.-27.02.2019, Munich (TUM, Garching).

Oluwapelumi, O.O., 2015: Geotechnical Characterization of some Clayey Soils for Use as Landfill Liner. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* June 2015, Vol. 19 (2) 211 - 217.

ÖNORM B 4410: Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung. Untersuchung von Bodenproben. Erd- und Grundbau. Ausgabe: April 1960. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM EN ISO 17892-12: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben. Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen. Ausgabe: 2020-07-15. Austrian Standards International. Standardisierung und Innovation, Wien.

ÖNORM S 2074-1: Geotechnik und Deponiebau. Teil 1: Standorterkunndung. Ausgabe: 2004-05-01. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM S 2074-2: Geotechnik und Deponiebau. Teil 2: Erdarbeiten. Ausgabe: 2004-09-01. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

- Rowe, R.K., Quigley, R.M., and Booker, J.R., 1995: Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities. E&FN Spon, London.
- Schmitz, R.M., Schroeder C., Charlier, R., 2004: Chemo–mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits. Applied Clay Science 26 (2004) 351–358.
- Schultz, L.G., 1964: Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-ray and chemical data for the Pierre Shale: U.S. Geol. Survey. Prof.Papaer 391-C, 31p.
- Shevnin, V., Delgado–Rodríguez, O., Mousatov, A., Ryjov, A., 2006: Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. Geofisica internacional vol. 45 no. 3 Ciudad de México jul./sep. 2006.
- Spagnoli, G., Shimobe, S., 2019: A statistical reappraisal of the relationship between liquid limit and specific surface area, cation exchange capacity and activity of clays. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 11 (2019) 874-881.
- Thorez, J., 1976: Practical Identification of Clay Minerals. -90p. University of California. Lelotte, Dison.
- Yilmaz, I., 2004: Relationships between liquid limit, cation exchange capacity, and swelling potentials of clayey soils. Eurasian Soil Science 2004;37(5):506-12.

### **Internetquellen:**

- geoland.at: [https://www.geoland.at/webgisviewer/geoland/map/Geoland\\_Visualizer/Geoland](https://www.geoland.at/webgisviewer/geoland/map/Geoland_Visualizer/Geoland) 07.11.2021.
- geolba.maps.arcgis.com: <https://geolba.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=0e19d373a13d4eb19da3544ce15f35ec> 11.02.2022.
- Geologische Karte 25, Poysdorf, Ausgabe 2018/09: [https://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=25\\_M34.pdf](https://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=25_M34.pdf) 10.12.2021.
- maps.google.de: <https://www.google.de/maps/place/Mistelbach,+Österreich/@48.5849724,16.5180101,12z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x476d2363ab414f57:0xb859fd44f6a78dd3!8m2!3d48.56743!4d16.5722> 20.02.2022.
- tuhh.de: <https://www.tuhh.de/gbt/dienstleistungen/labor/klassifizierungsversuche/zustandsgrenzen.html> 14.02.2022.
- Unified Soil Classification System (USCS): <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/maintenance/documents/office-of-concrete-pavement/pavement-foundations/uscs-a11y.pdf> 19.02.2022.
- weinviertel.at: [https://www.weinviertel.at/alle-orte-im-weinviertel/a-mistelbach?category\[\]recreation](https://www.weinviertel.at/alle-orte-im-weinviertel/a-mistelbach?category[]recreation) 13.02.2022.

## **10. Anhang**

Anhang 1: Deponieverordnung 2008 - Abschnitt 5, § 22 .....	72
Anhang 2: Erläuterung der Proben .....	73
Anhang 3: Gesamtmineralogie .....	75
Anhang 4: Tonmineralogie .....	78
Anhang 5: Quantifizierung .....	83
Anhang 6: Röntgenfluoreszenz .....	85
Anhang 7: Korngrößenbestimmung .....	86
Anhang 8: Atterberg'sche Fließgrenze .....	87
Anhang 9: Kationenaustauschkapazität.....	96

Abbildung I: Röntgendiffraktometrie - Gesamtmineralogie der vor Ort entnommenen Proben ..	75
Abbildung II: Röntgendiffraktometrie - Gesamtmineralogie der Löss-Ton Mischungen.....	76
Abbildung III: Röntgendiffraktometrie - Gesamtmineralogie der Sand-Ton Mischungen.....	77
Abbildung IV: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Probe KB_T .....	78
Abbildung V: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Probe KB_S .....	78
Abbildung VI: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung L-T 1:2.....	79
Abbildung VII: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung L-T 1:1 .....	79
Abbildung VIII: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung L-T 2:1 .....	80
Abbildung IX: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung S-T 1:2 .....	81
Abbildung X: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung S-T 1:1 .....	81
Abbildung XI: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung S-T 2:1 .....	82
Abbildung XII: Korngrößenbestimmung - Kornsummenkurve der Löss-Ton Mischungen....	86
Abbildung XIII: Korngrößenbestimmung - Kornsummenkurve der Sand-Ton Mischungen... <td>86</td>	86
Abbildung XIV: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Probe MB_L .....	87
Abbildung XV: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Probe KB_TS .....	88
Abbildung XVI: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Probe KB_T .....	89
Abbildung XVII: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung L-T 1:2 .....	90
Abbildung XVIII: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung L-T 1:1 .....	91
Abbildung XIX: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung L-T 2:1 .....	92
Abbildung XX: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung S-T 1:2 .....	93
Abbildung XXI: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung S-T 1:1.....	94
Abbildung XXII: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung S-T 2:1 .....	95

Tabelle I: Beschreibung der Proben .....	73
Tabelle II: Beschreibungen der Löss-Ton Mischungen .....	73
Tabelle III: Beschreibungen der Sand-Ton Mischungen.....	73
Tabelle IV: Beschreibungen der Abkürzungen.....	74
Tabelle V: Quantifizierung - Hauptminerale der vor Ort entnommenen Proben .....	83
Tabelle VI: Quantifizierung - Tonminerale der vor Ort entnommenen Proben .....	83
Tabelle VII: Quantifizierung - Hauptminerale der Löss-Ton Mischungen .....	83
Tabelle VIII: Quantifizierung - Tonminerale der Löss-Ton Mischungen .....	84
Tabelle IX: Quantifizierung - Hauptminerale der Sand-Ton Mischungen.....	84
Tabelle X: Quantifizierung - Tonminerale der Sand-Ton Mischungen.....	84
Tabelle XI: Röntgenfluoreszenzanalyse - Nebenelemente der vor Ort entnommenen Proben.	85
Tabelle XII: Kationenaustauschkapazität - Vor Ort entnommene Proben .....	96
Tabelle XIII: Kationenaustauschkapazität - Löss-Ton Mischungen .....	96
Tabelle XIV: Kationenaustauschkapazität - Sand-Ton Mischungen.....	96

## Anhang 1: Deponieverordnung 2008 - Abschnitt 5, § 22

Abschnitt 5, § 22 der Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008 – DVO 2008) regelt die Untergrundanforderungen, die an die künstliche geologische Barriere einer Deponie gestellt werden.

Die Anforderungen lauten wie folgt:

- (1) Der Standort für eine Inertabfall-, Baurestmassen-, Reststoff- oder Massenabfalldeponie hat zumindest im Bereich der Aufstandsfläche des Deponiekörpers über einen geologisch, hydrogeologisch und geotechnisch möglichst einheitlichen, gering durchlässigen Untergrund zu verfügen (geologische Barriere).
- (2) Die geologische Barriere einer Inertabfalldeponie hat bei einer Mindestmächtigkeit von einem Meter eine Gebiets- oder Gebirgsdurchlässigkeit ( $k_r$ -Wert) von nicht größer als  $10^{-7}$  m/s aufzuweisen.
- (3) Bei einer Baurestmassen-, Reststoff- oder Massenabfalldeponie hat die geologische Barriere folgenden Anforderungen zu entsprechen:
  1. bei einer Mindestmächtigkeit von fünf Meter eine Gebiets- oder Gebirgsdurchlässigkeit ( $k_r$ -Wert) von nicht größer als  $10^{-7}$  m/s;
  2. bei einer Mindestmächtigkeit von drei Meter eine Gebiets- oder Gebirgsdurchlässigkeit ( $k_r$ -Wert) von nicht größer als  $10^{-8}$  m/s;
  3. bei einer Mindestmächtigkeit von einem Meter eine Gebiets- oder Gebirgsdurchlässigkeit ( $k_r$ -Wert) von nicht größer als  $10^{-9}$  m/s;
  4. bei einer Mindestmächtigkeit von einem halben Meter eine Gebiets- oder Gebirgsdurchlässigkeit ( $k_r$ -Wert) von nicht größer als 5 mal  $10^{-10}$  m/s.;
- (4) Die Untergrundanforderungen gemäß Abs. 1 bis 3 können auch durch nach den Regeln des Erdbauwesens lagenweise geschüttete und verdichtete Schichten mit einer Mindeststärke von 0,5 m erreicht werden (künstliche Barriere), wenn dadurch ein gleichwertiger Schutz gewährleistet wird. Bei Böschungsneigungen 1:2 oder steiler sind Sonderkonstruktionen zulässig, wenn dadurch ein gleichwertiger Schutz gewährleistet wird. Im Fall einer Inertabfalldeponie kann die fehlende Anforderung an den Untergrund ausschließlich durch eine gemäß § 27 Abs. 2 erforderliche Deponiebasisdichtung ersetzt werden.

## Anhang 2: Erläuterung der Proben

Tabelle I: Beschreibung der Proben

Sediment-Proben (vor Ort entnommen)	Deponie	Bezeichnung im Fließtext
MB_L	Mistelbach	Lössprobe
KB_TS	Kettlasbrunn	Tonsandprobe
KB_T	Kettlasbrunn	Tonprobe
KB_S	Kettlasbrunn	Sandprobe

Tabelle II: Beschreibungen der Löss-Ton Mischungen

Löss-Ton Mischungen	Verhältnis Löss : Ton	Anteil Löss an 500g Mischung	Anteil Ton an 500g Mischung
L-T 1:2	1 : 2	167 g	333 g
L-T 1:1	1 : 1	250 g	250 g
L-T 2:1	2 : 1	333 g	167 g

Tabelle III: Beschreibungen der Sand-Ton Mischungen

Sand-Ton Mischungen	Verhältnis Löss : Ton	Anteil Sand an 500g Mischung	Anteil Ton an 500g Mischung
S-T 1:2	1 : 2	167 g	333 g
S-T 1:1	1 : 1	250 g	250 g
S-T 2:1	2 : 1	333 g	167 g

Tabelle IV: Beschreibungen der Abkürzungen

MB	Mistelbach
KB	Kettlarsbrunn
L	Löss
TS	Tonsand
T	Ton
S	Sand
1:2	Verhältnis 1:2
1:1	Verhältnis 1:1
2:1	Verhältnis 1:2

### Anhang 3: Gesamtmineralogie

Gesamtmineralogie: Vor Ort entnommene Proben

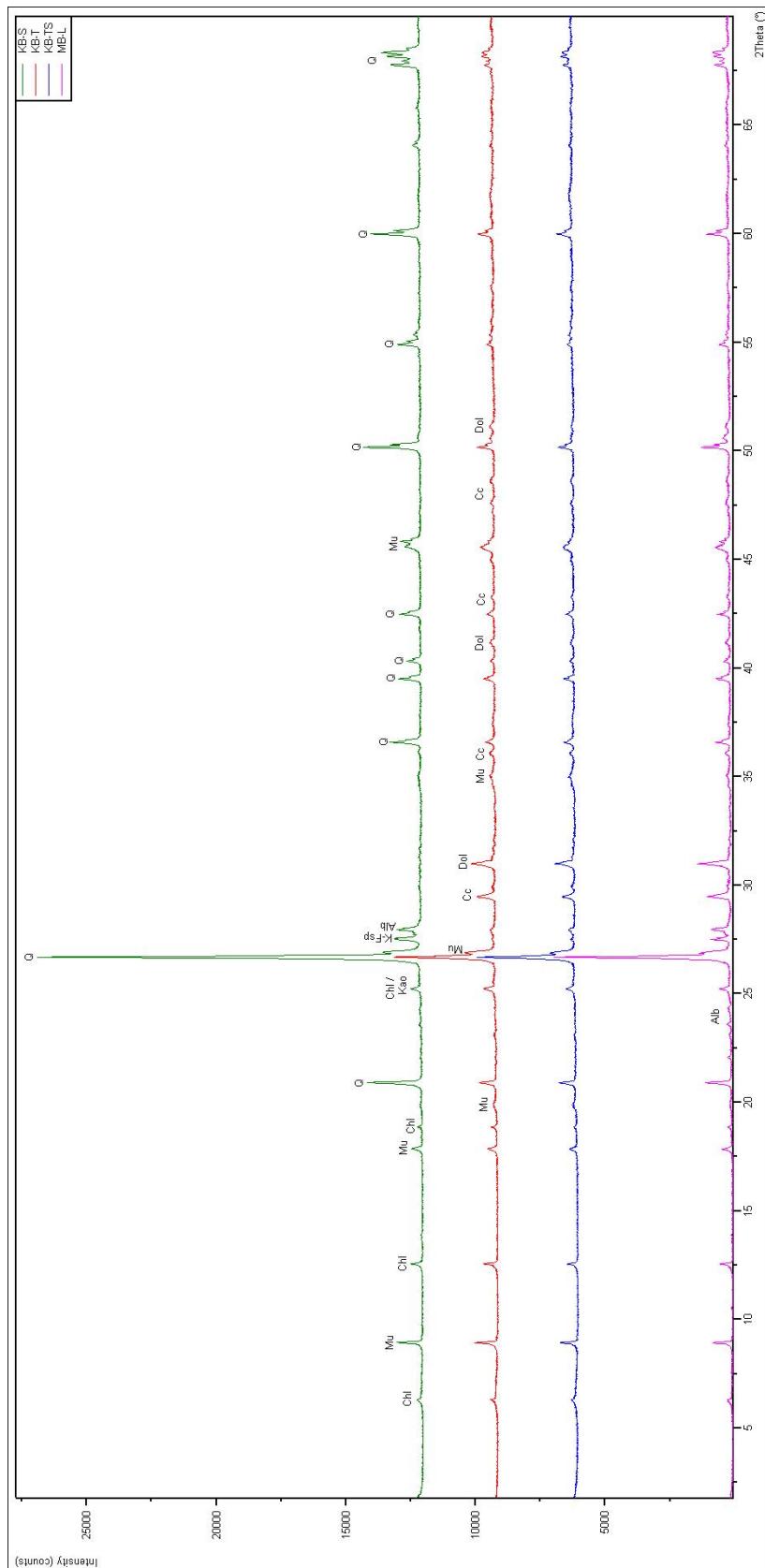


Abbildung I: Röntgendiffraktometrie - Gesamtmineralogie der vor Ort entnommenen Proben

## Gesamtmineralogie: Löss-Ton Mischungen

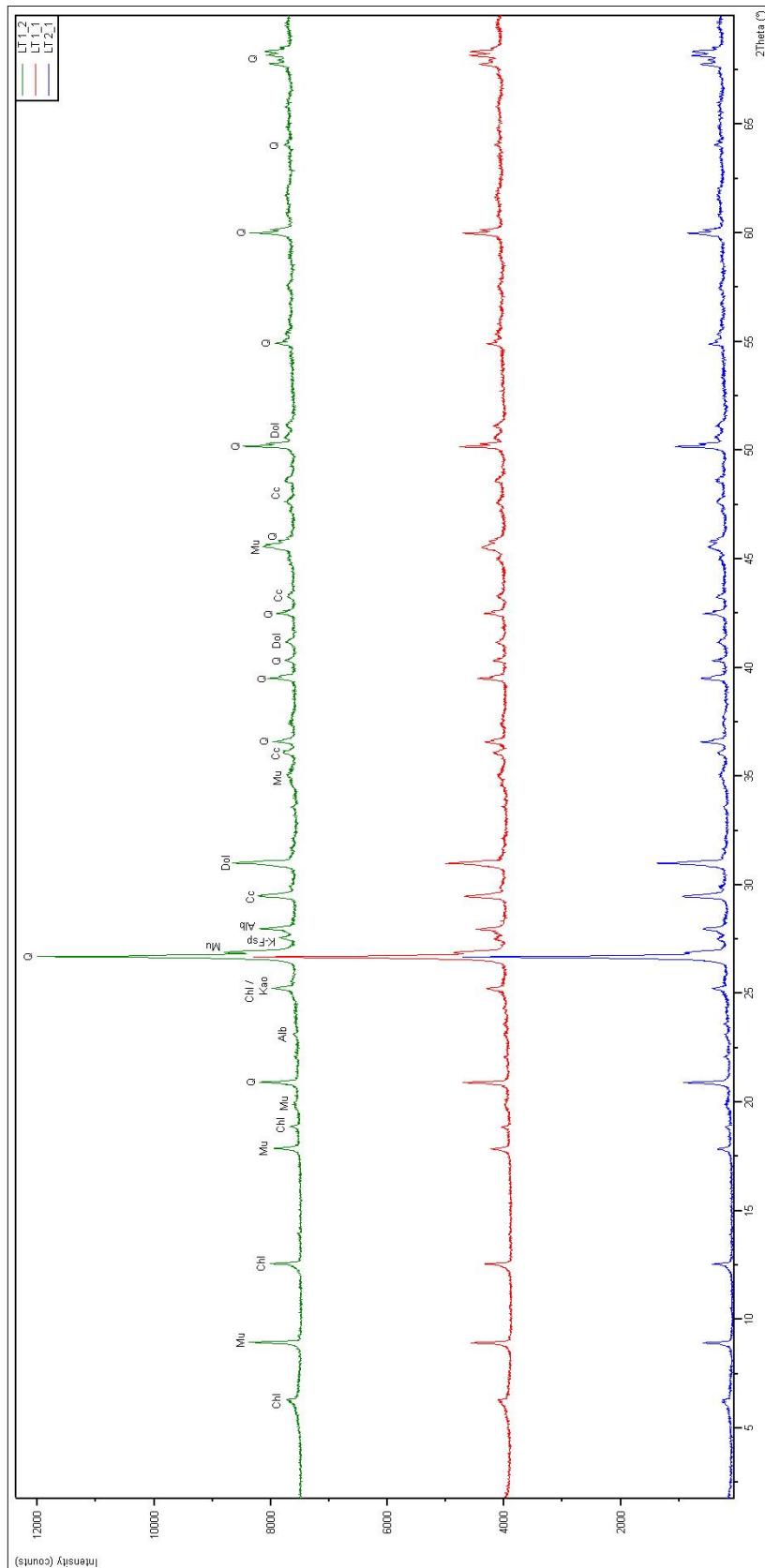


Abbildung II: Röntgendiffraktometrie - Gesamtmineralogie der Löss-Ton Mischungen

## Gesamtmineralogie: Sand-Ton Mischungen

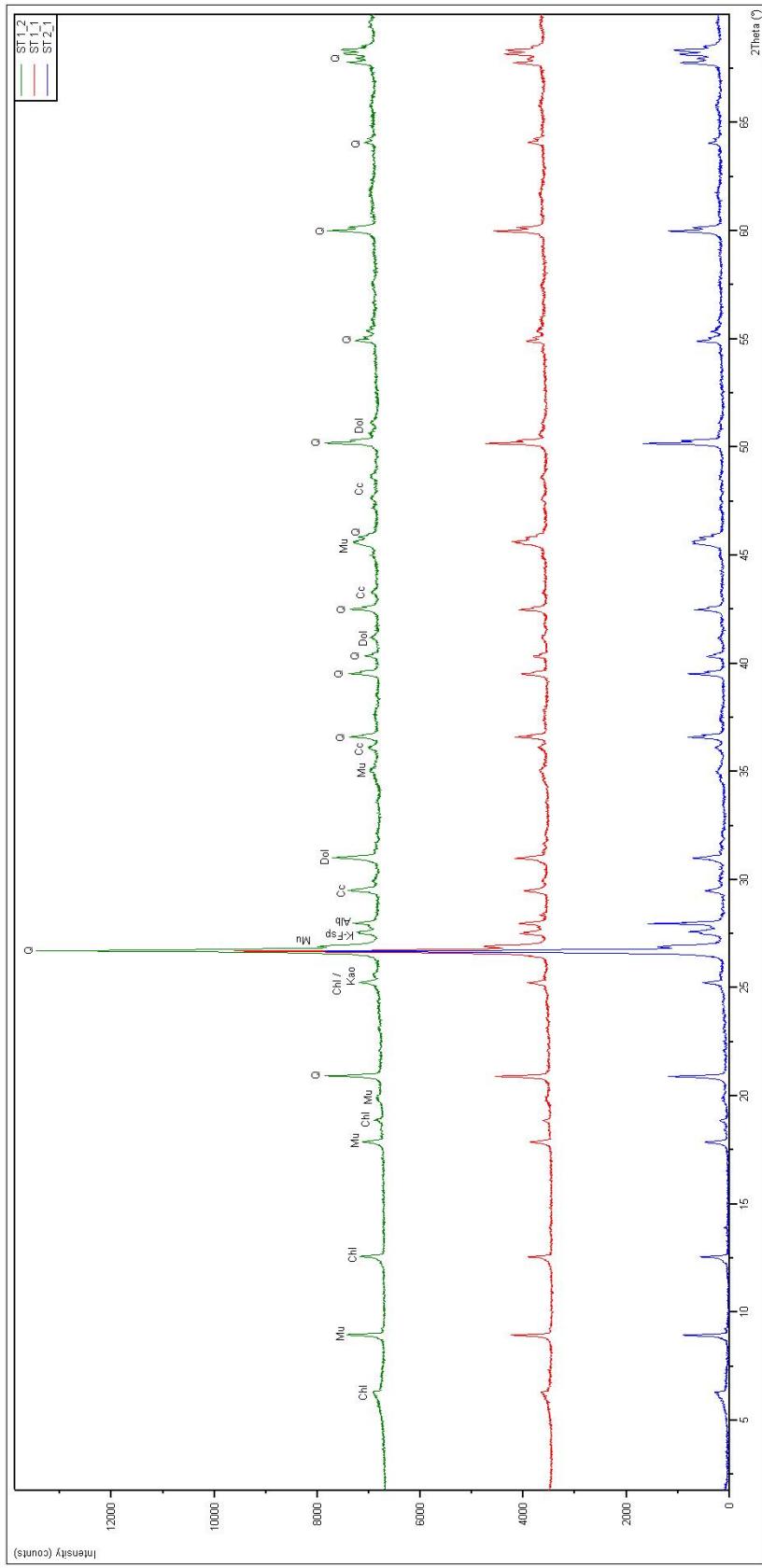


Abbildung III: Röntgendiffraktometrie - Gesamtmineralogie der Sand-Ton Mischungen

## Anhang 4: Tonmineralogie

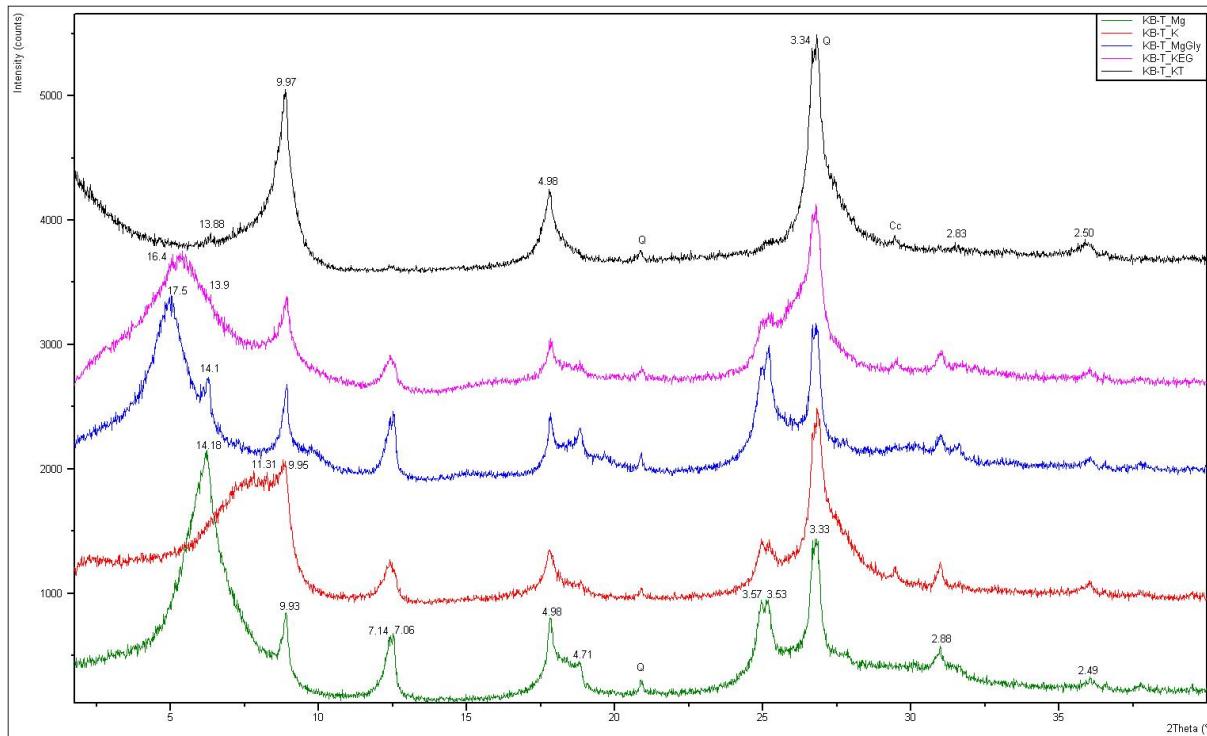


Abbildung IV: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Probe KB\_T

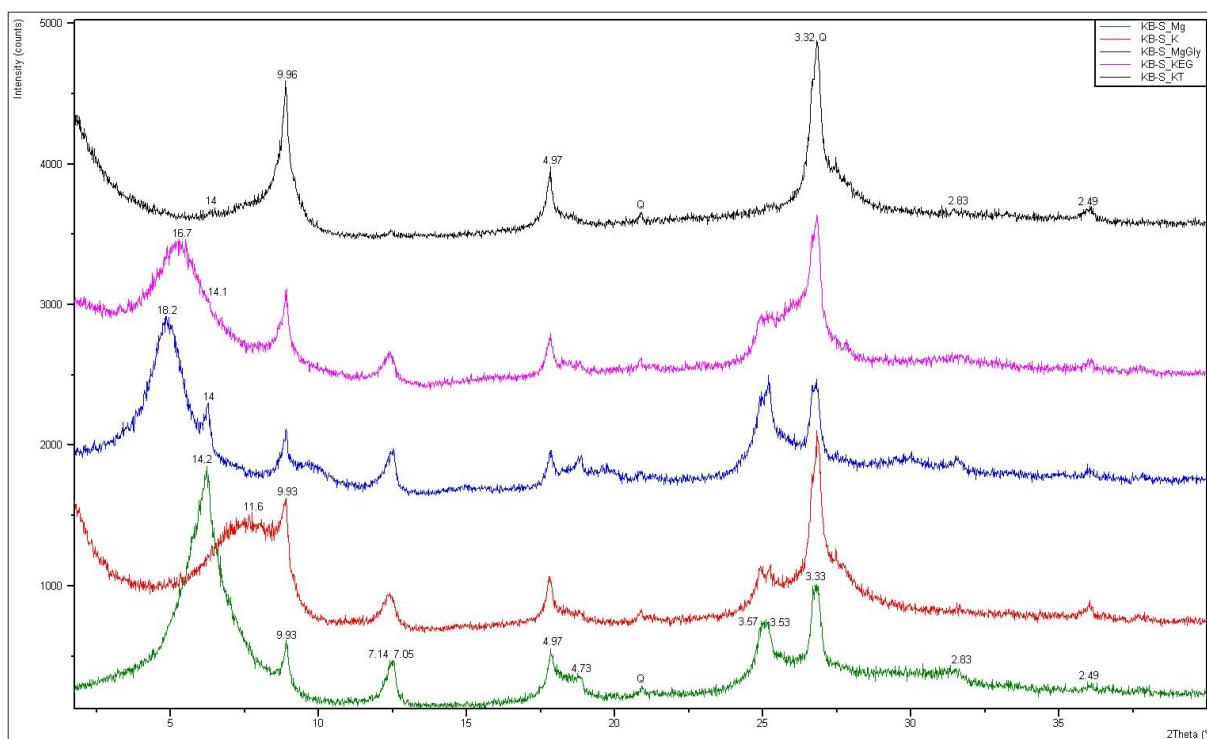


Abbildung V: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Probe KB\_S

### Löss-Ton Mischungen:

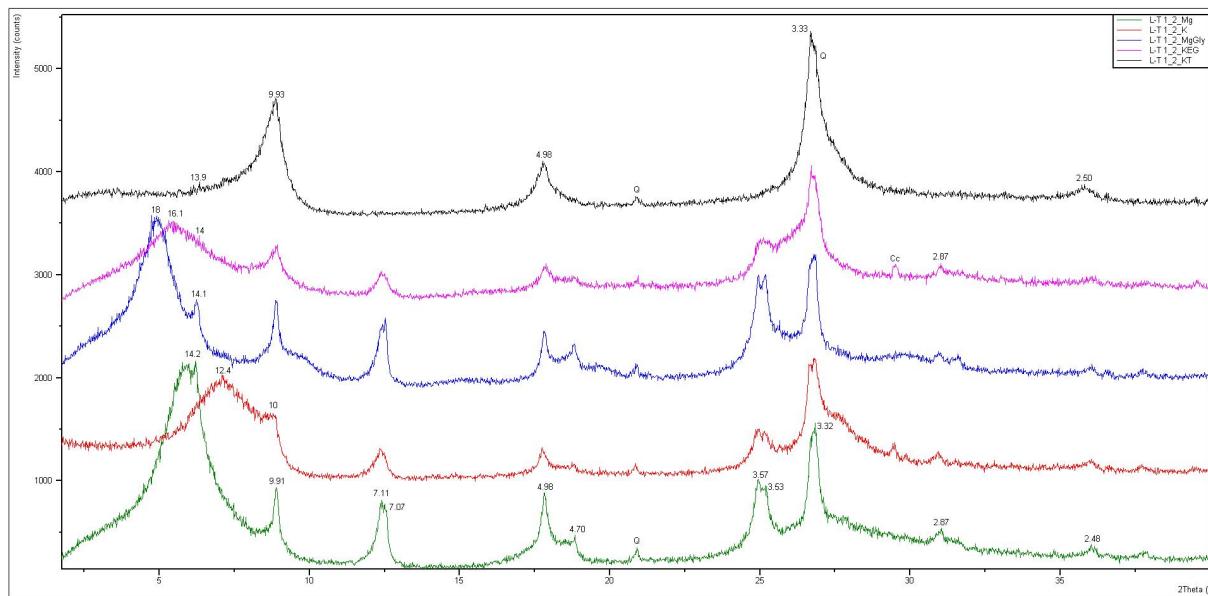


Abbildung VI: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung L-T 1:2

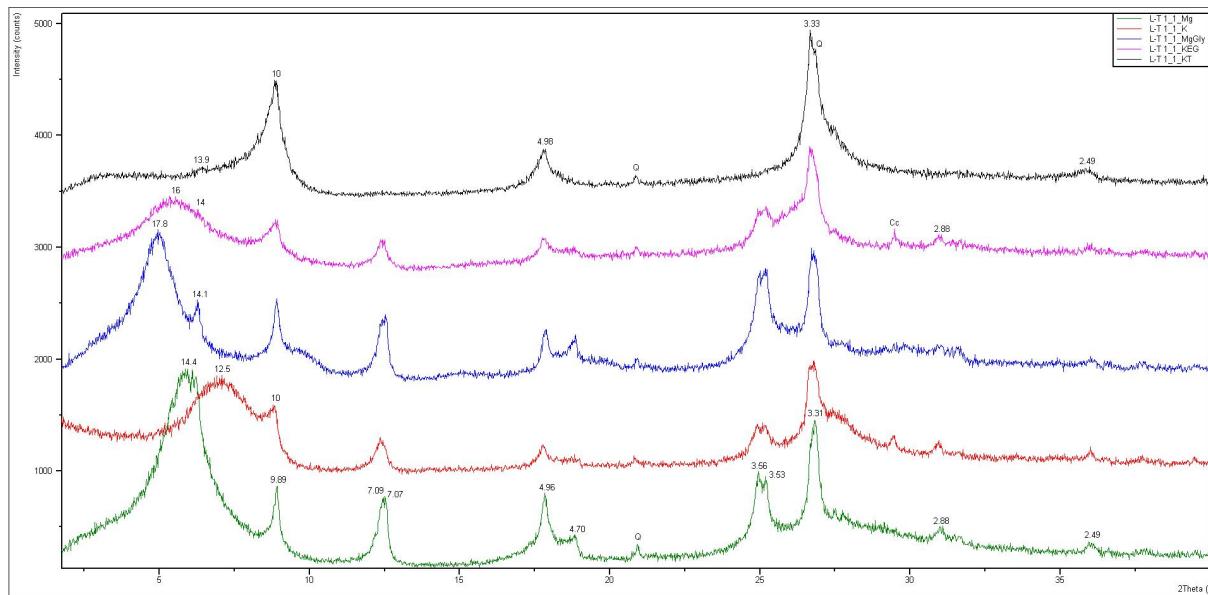


Abbildung VII: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung L-T 1:1

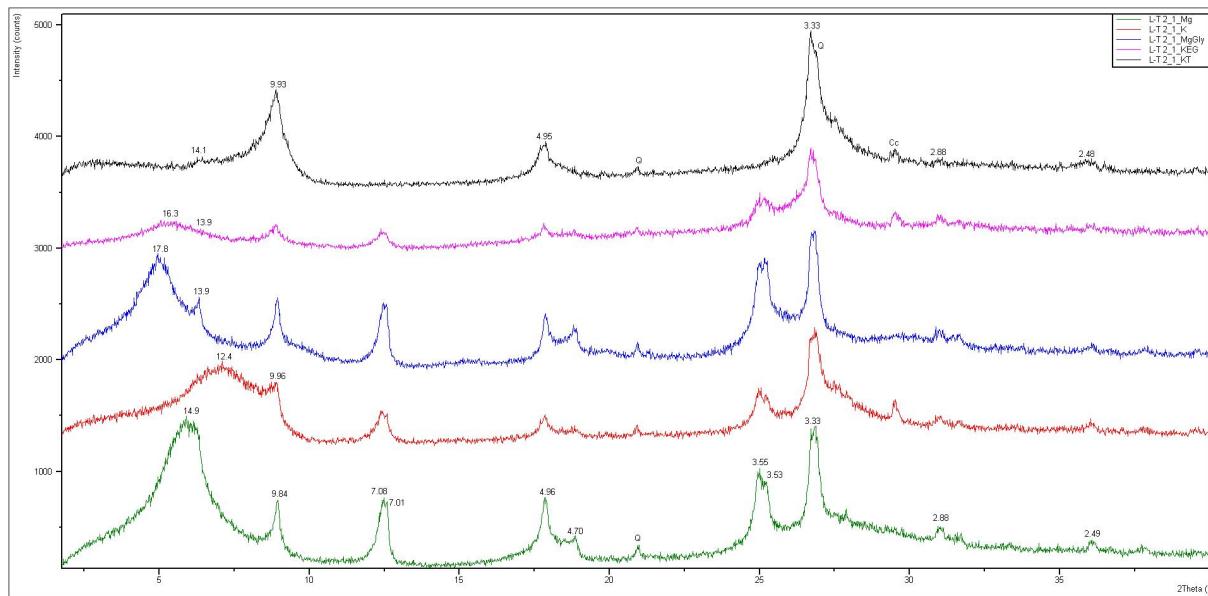


Abbildung VIII: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung L-T 2:1

### Sand-Ton Mischungen:

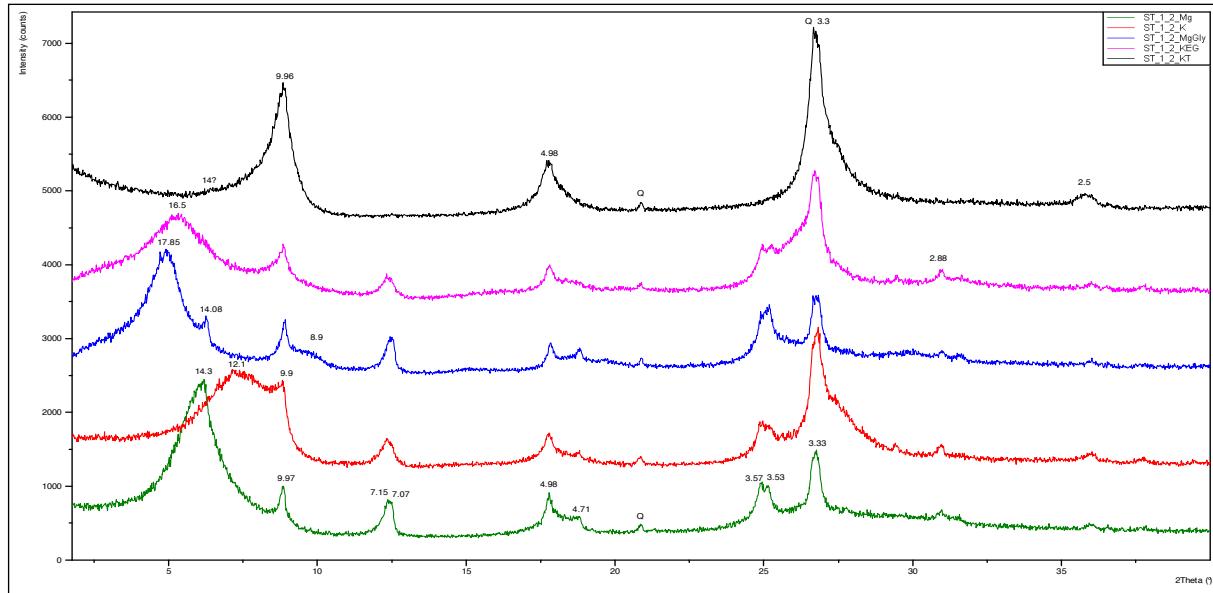


Abbildung IX: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung S-T 1:2

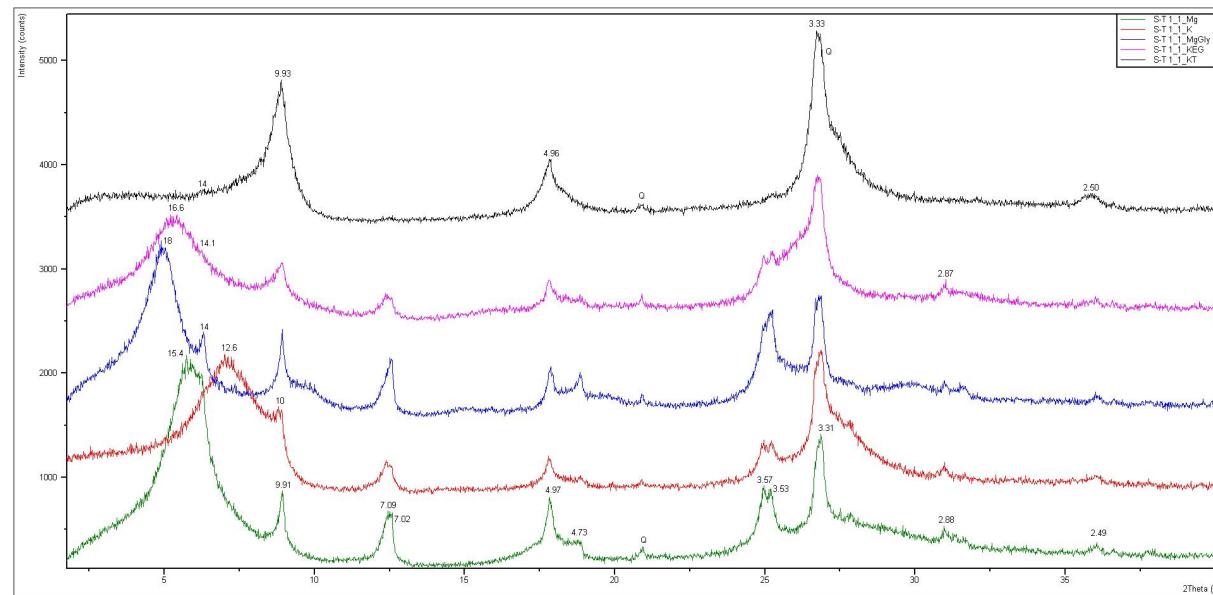


Abbildung X: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung S-T 1:1

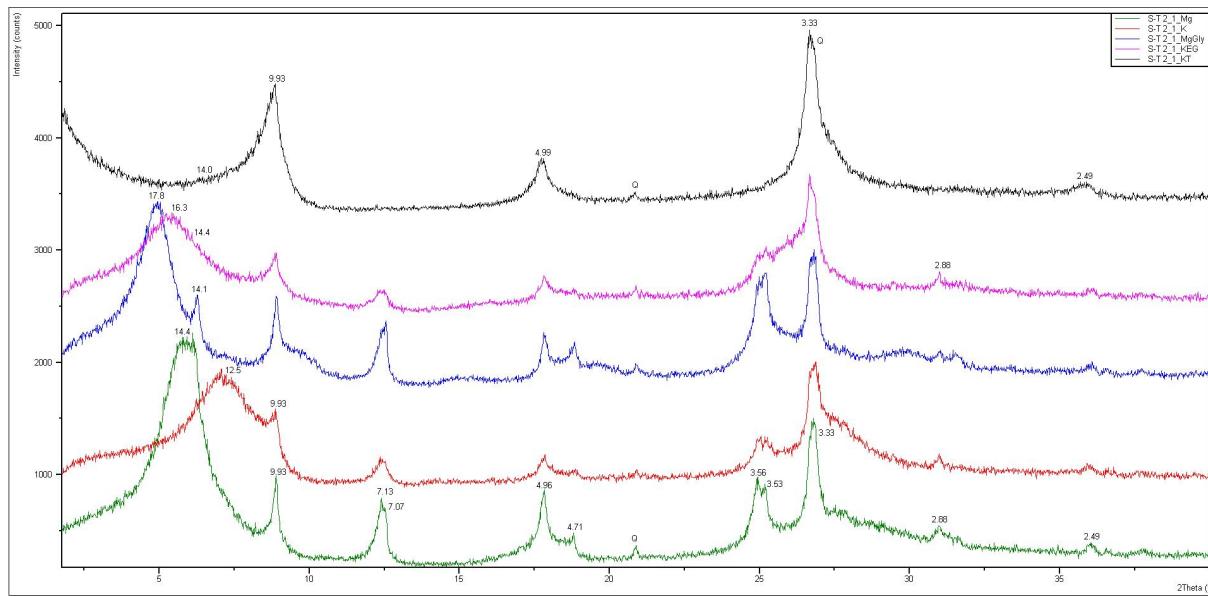


Abbildung XI: Röntgendiffraktometrie - Tonmineralogie der Mischung S-T 2:1

## Anhang 5: Quantifizierung

Tabelle V: Quantifizierung - Hauptminerale der vor Ort entnommenen Proben

Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	Quarz	Kalifeldspat	Plagioklas	Calcit	Dolomit	Tonminerale
MB_L	38,3	2,7	11,7	10,4	11,5	25,4
KB_TS	26,5	2,0	2,8	7,2	7,0	54,4
KB_T	24,1	1,9	5,1	9,9	7,7	51,2
KB_S	72,2	2,3	5,0	0,8	1,1	18,6

Tabelle VI: Quantifizierung - Tonminerale der vor Ort entnommenen Proben

Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	Smectit	Illit	Kaolinit	Vermiculit	Chlorit
MB_L	11,5	7,8	3,1	0,0	3,1
KB_TS	35,7	11,4	3,7	3,6	0,0
KB_T	27,4	15,5	4,4	4,0	0,0
KB_S	11,9	3,3	2,0	1,3	0,0

Tabelle VII: Quantifizierung - Hauptminerale der Löss-Ton Mischungen

Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	Quarz	Kalifeldspat	Plagioklas	Calcit	Dolomit	Tonminerale
MB_L	38,3	2,7	11,7	10,4	11,5	25,4
L-T 2:1	33,8	3,4	6,3	11,9	9,9	34,8
L-T 1:1	40,7	3,0	6,2	11,6	8,2	30,4
L-T 1:2	35,8	5,1	6,0	11,7	8,9	32,4
KB_T	24,1	1,9	5,1	9,9	7,7	51,2

Tabelle VIII: Quantifizierung - Tonminerale der Löss-Ton Mischungen

Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	Smectit	Illit	Kaolinit	Vermiculit	Chlorit
MB_L	11,5	7,8	3,1	0,0	3,1
L-T 2:1	15,3	10,2	6,0	3,2	0,0
L-T 1:1	15,0	8,8	3,8	2,8	0,0
L-T 1:2	17,0	8,5	4,1	2,7	0,0
KB_T	27,4	15,5	4,4	4,0	0,0

Tabelle IX: Quantifizierung - Hauptminerale der Sand-Ton Mischungen

Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	Quarz	Kalifeldspat	Plagioklas	Calcit	Dolomit	Tonminerale
KB_S	72,2	2,3	5,0	0,8	1,1	18,6
S-T 2:1	52,8	3,7	9,2	4,6	3,8	25,8
S-T 1:1	41,8	2,6	3,6	8,8	7,5	35,8
S-T 1:2	40,7	1,8	4,7	8,6	6,7	37,5
KB_T	24,1	1,9	5,1	9,9	7,7	51,2

Tabelle X: Quantifizierung - Tonminerale der Sand-Ton Mischungen

Angaben in Massenprozent (M.-%)

Probe	Smectit	Illit	Kaolinit	Vermiculit	Chlorit
KB_S	11,9	3,3	2,0	1,3	0,0
S-T 2:1	16,2	5,3	2,3	1,9	0,0
S-T 1:1	20,7	7,6	4,9	2,6	0,0
S-T 1:2	22,6	9,2	3,4	2,3	0,0
KB_T	27,4	15,5	4,4	4,0	0,0

## Anhang 6: Röntgenfluoreszenz

Tabelle XI: Röntgenfluoreszenzanalyse - Nebenelemente der vor Ort entnommenen Proben

Angaben in [ppm]

Probe	As	Ba	Ce	Co	Cr	Cu	Ga	La	Mo
MB-L	8,4	353,9	64,2	10,9	73,9	22,3	12,6	29,2	0,4
KB_TS	10,4	362,3	66,9	18,5	123,1	35,7	19,1	38,3	0,8
KB_T	5,8	364,9	54,1	17,7	111,9	35,6	17,8	31,7	0,5
KB_S	7,3	287,1	43,6	8,8	74,5	18,4	9,2	18,5	0,0
Probe	Nb	Nd	Ni	Pb	Rb	Sc	Sn	Sr	Ta
MB-L	14,2	28,7	29,2	18,8	93,0	<1	9,2	165,0	0,7
KB_TS	14,9	32,4	71,9	21,4	133,6	9,6	9,8	124,5	0,8
KB_T	14,8	22,2	65,2	21,2	121,7	3,6	10,6	133,5	1,7
KB_S	10,9	18,3	23,8	14,3	70,7	6,5	8,0	66,4	1,2
Probe	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr		
MB-L	13,2	3,7	76,0	0,4	31,1	59,0	329,4		
KB_TS	13,6	4,0	125,4	1,8	30,9	97,9	174,7		
KB_T	12,5	4,3	112,9	1,0	30,9	95,9	193,7		
KB_S	8,1	1,6	51,3	<1	20,1	45,1	213,0		

## Anhang 7: Korngrößenbestimmung

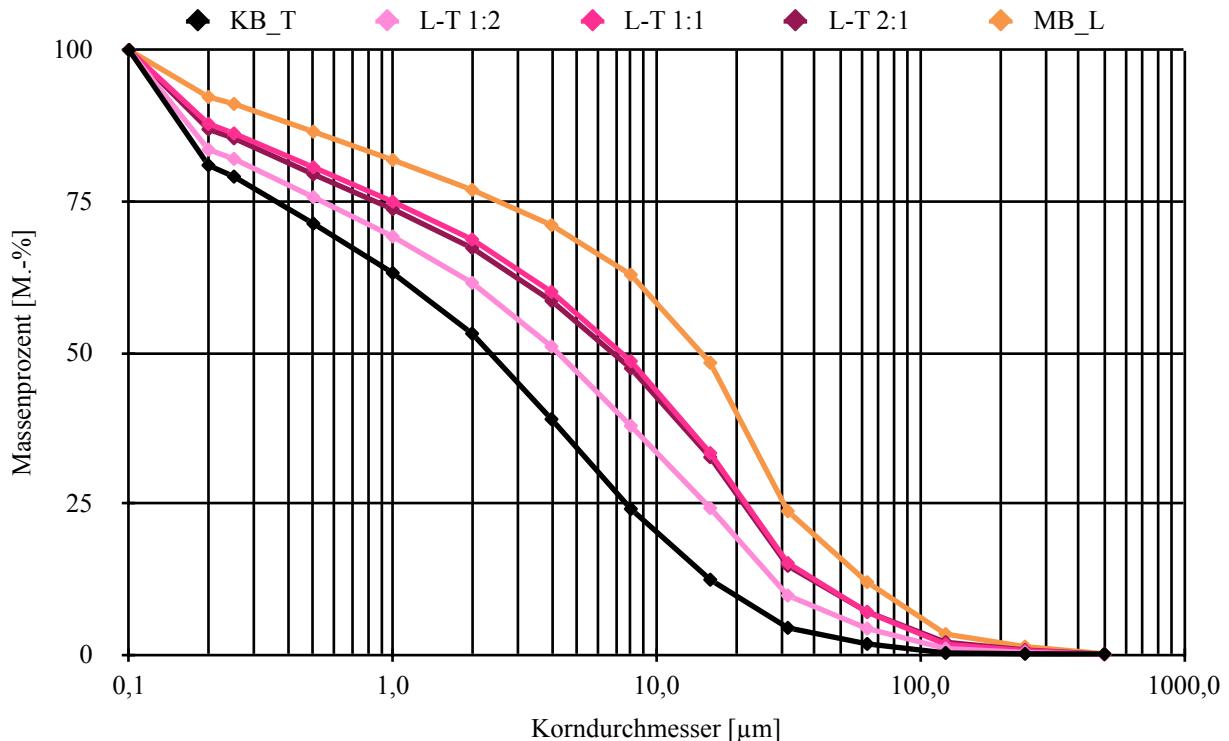


Abbildung XII: Korngrößenbestimmung - Kornsummenkurve der Löss-Ton Mischungen

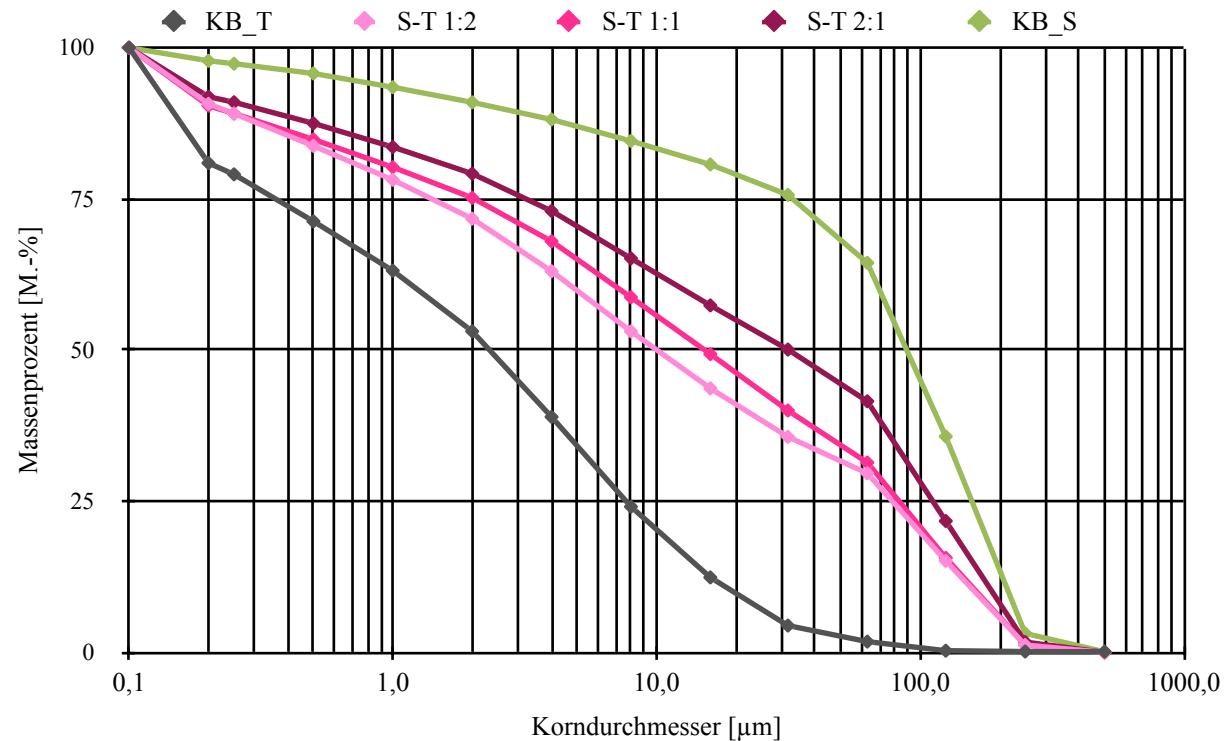


Abbildung XIII: Korngrößenbestimmung - Kornsummenkurve der Sand-Ton Mischungen

## Anhang 8: Atterberg'sche Fließgrenze

Probe: MB\_L

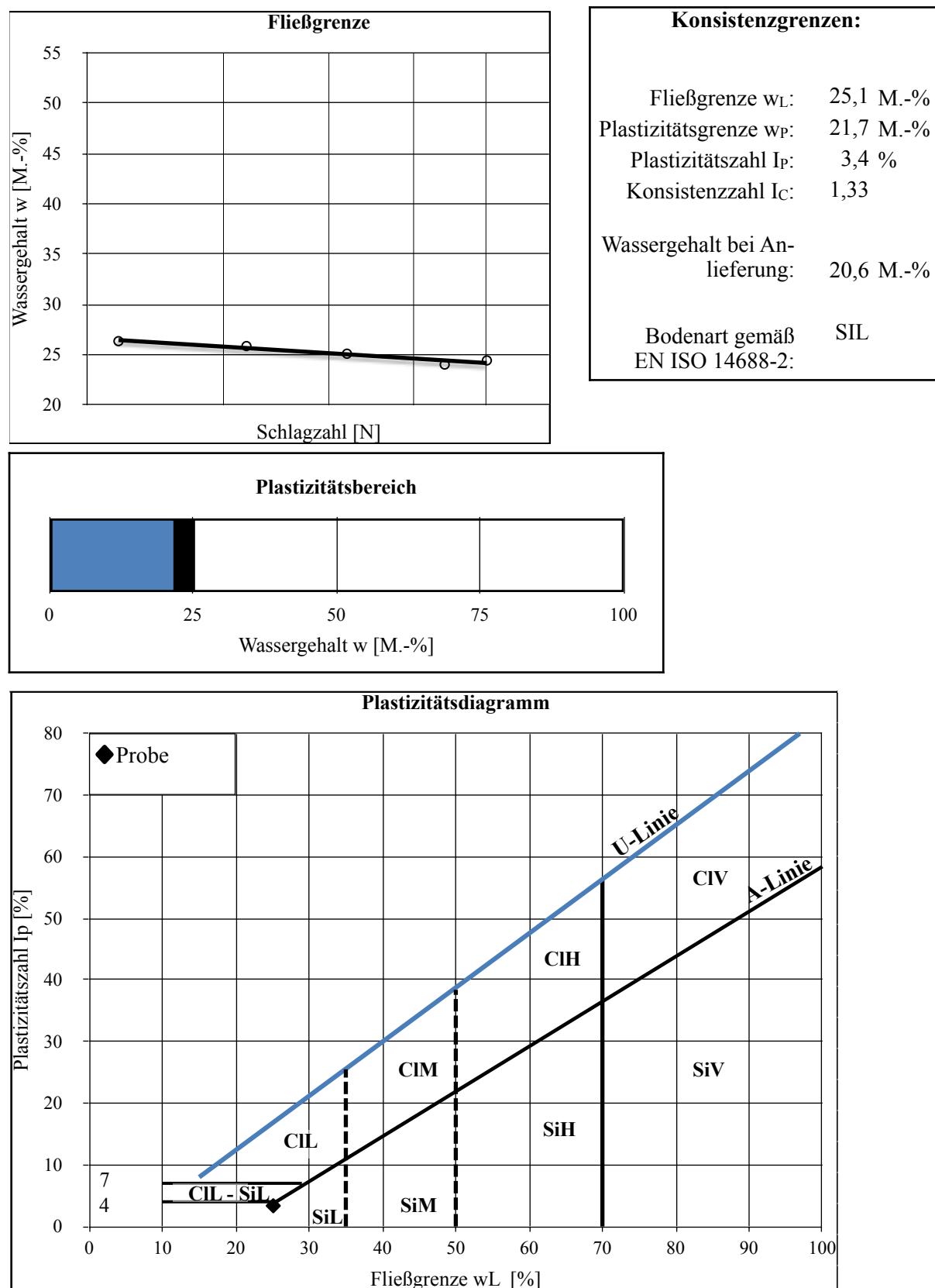


Abbildung XIV: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Probe MB\_L

Probe: KB\_TS

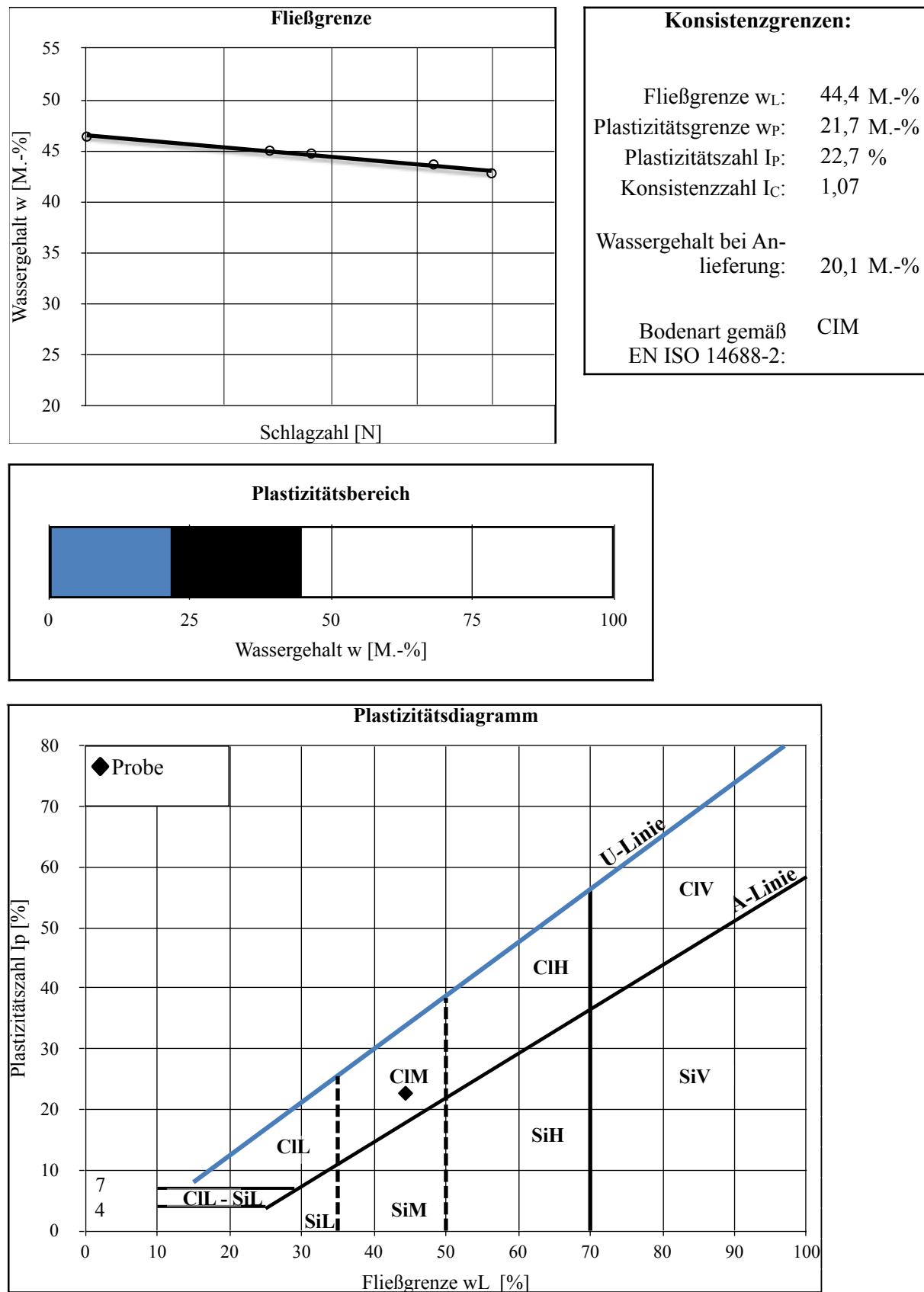


Abbildung XV: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Probe KB\_TS

Probe: KB\_T

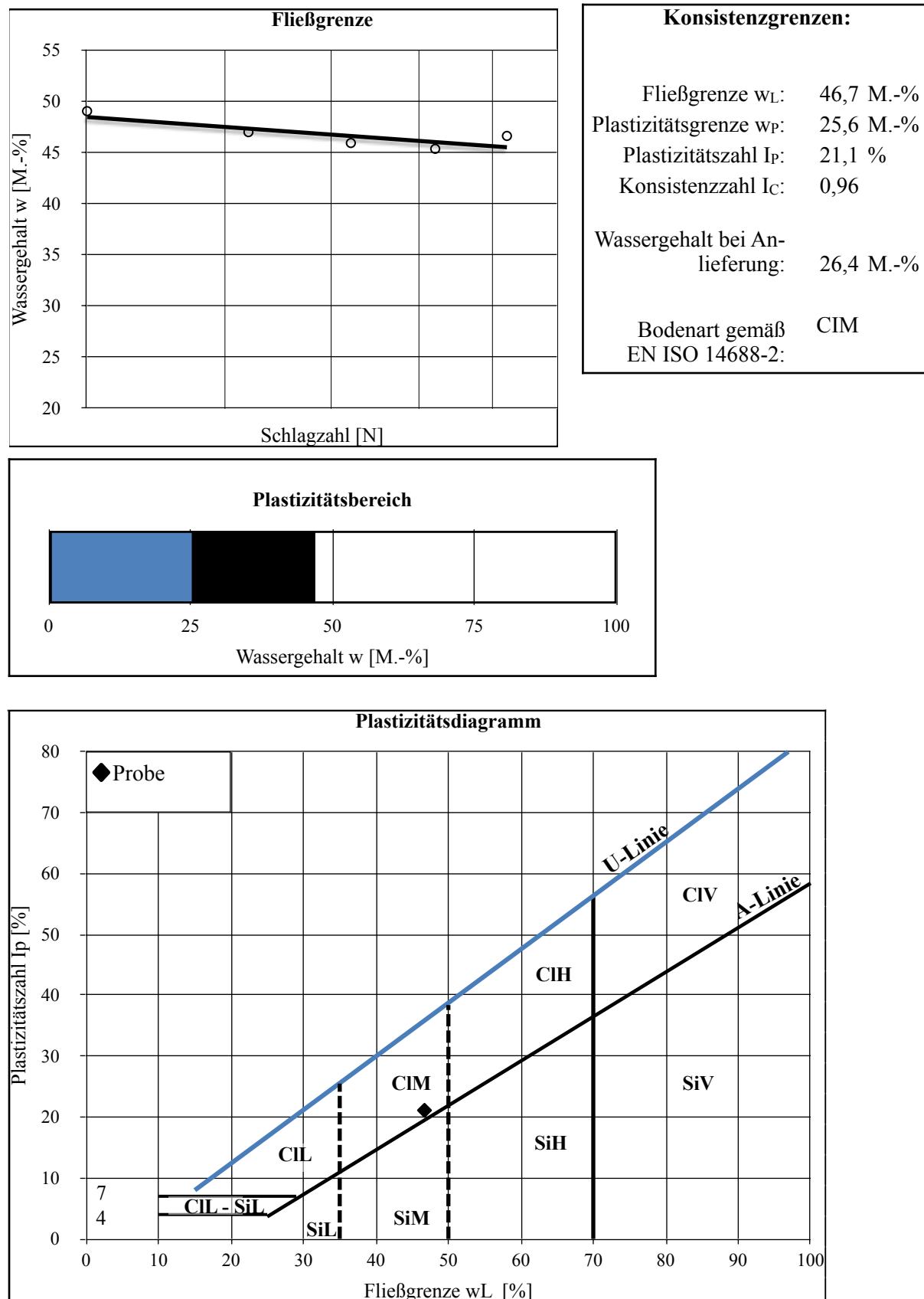


Abbildung XVI: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Probe KB\_T

Mischung: L-T 1:2

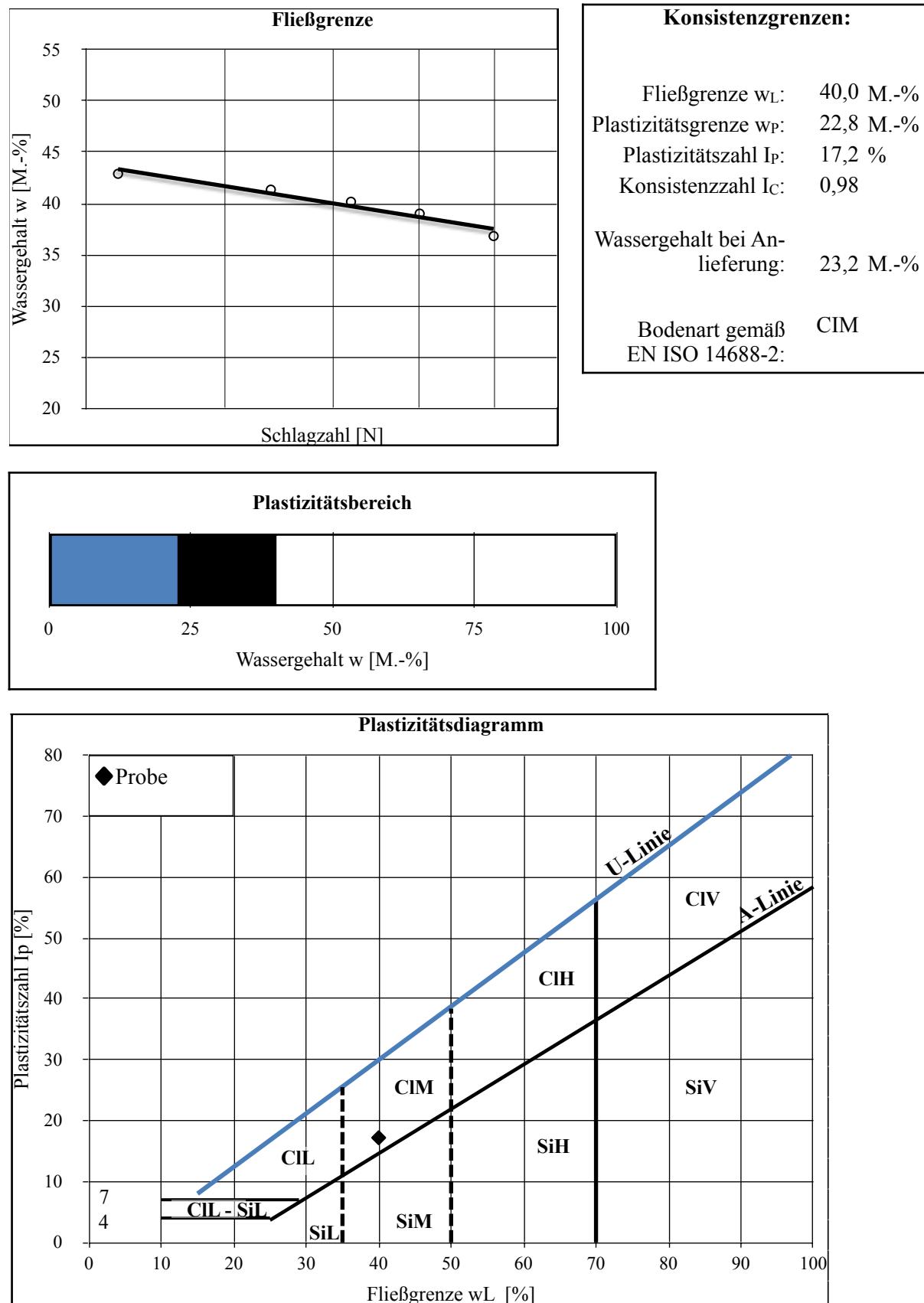


Abbildung XVII: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung L-T 1:2

Mischung: L-T 1:1

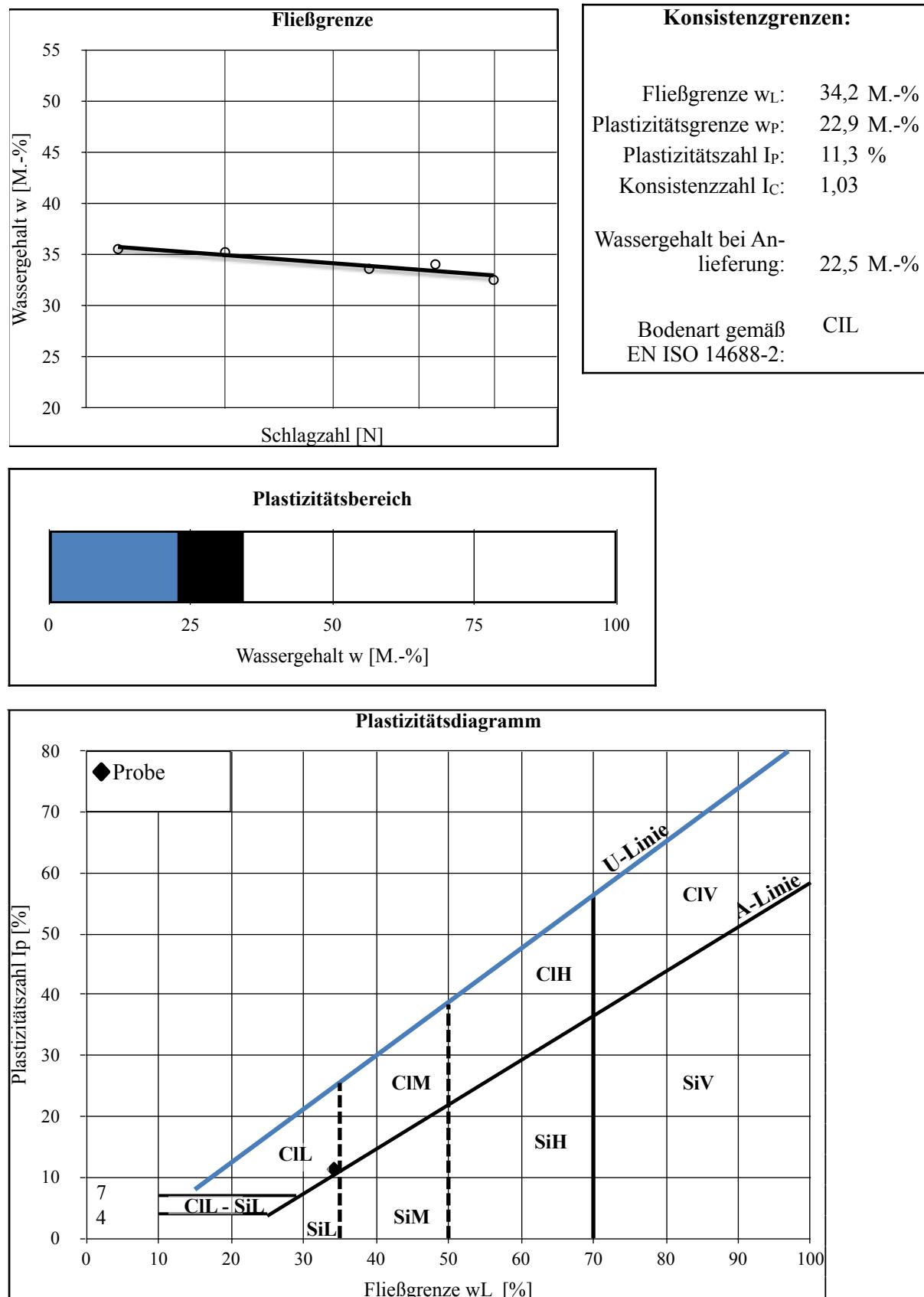


Abbildung XVIII: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung L-T 1:1

Mischung: L-T 2:1

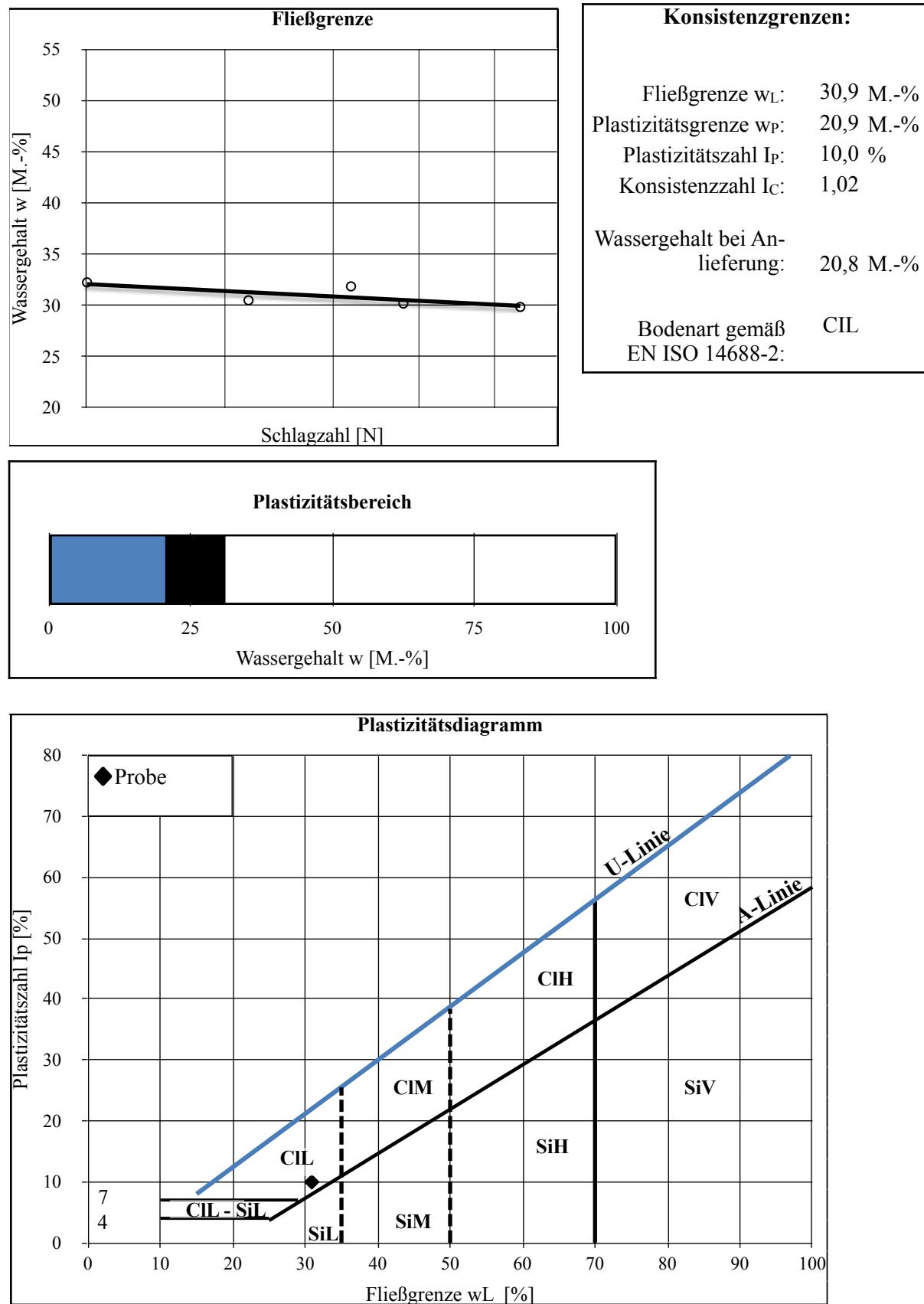


Abbildung XIX: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung L-T 2:1

Mischung: S-T 1:2

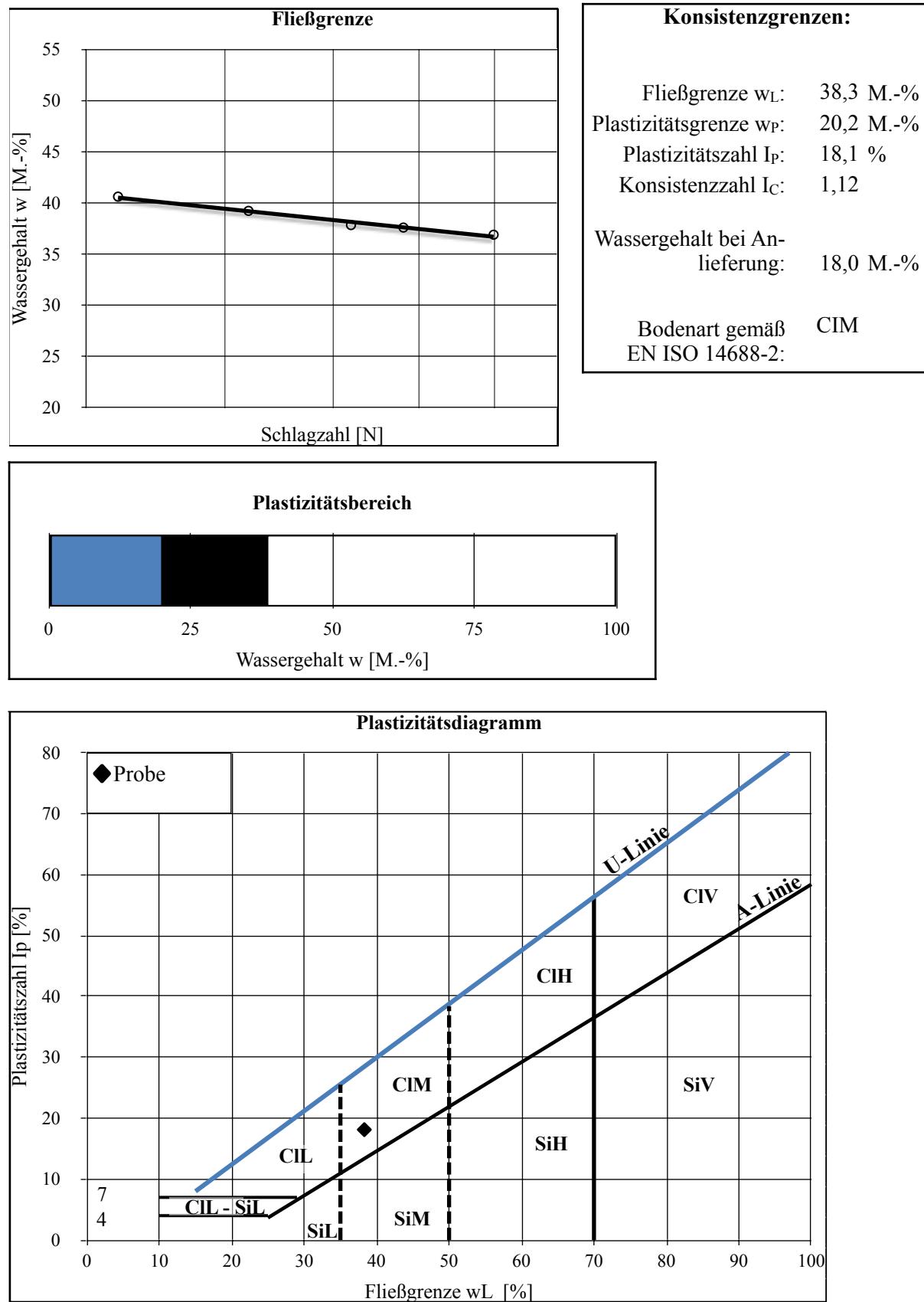


Abbildung XX: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung S-T 1:2

Mischung: S-T 1:1

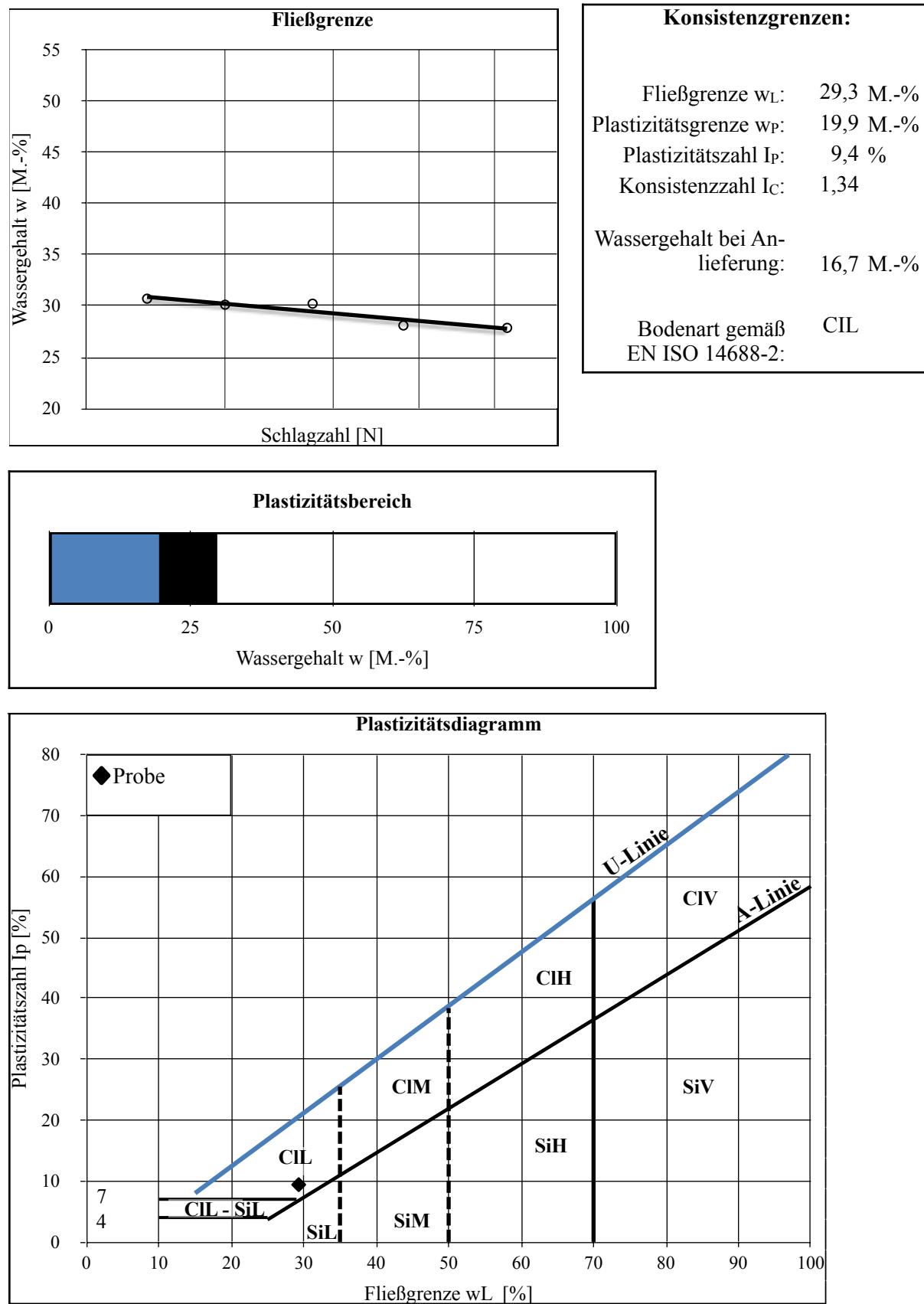


Abbildung XXI: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung S-T 1:1

Mischung: S-T 2:1

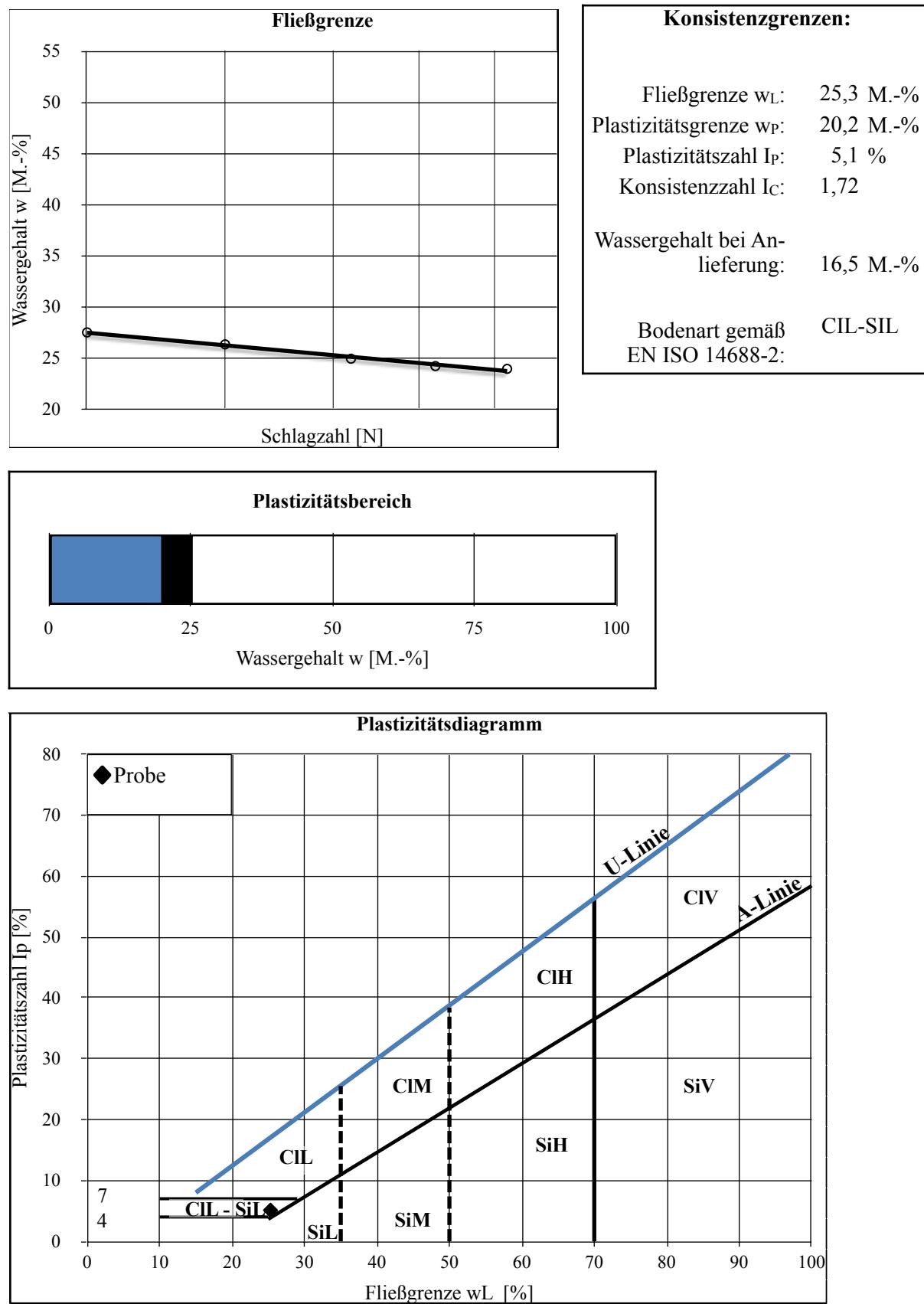


Abbildung XXII: Atterberg'sche Zustandsgrenzen - Mischung S-T 2:1

## Anhang 9: Kationenaustauschkapazität

Tabelle XII: Kationenaustauschkapazität - Vor Ort entnommene Proben

Angaben in meq/100g

Probe:	Mittelwert - Messung 1	CEC - Messung 1	Mittelwert - Messung 2	CEC - Messung 2	Mittelwert CEC
Nullwert	0,000	0,0	0,000	0,0	0,0
Blindwert	0,426	0,0	0,427	0,0	0,0
Hennersdorf	0,284	13,3	0,287	13,1	13,2
MB_L	0,345	7,6	0,344	7,8	7,7
KB_TS	0,224	19,0	0,230	18,5	18,7
KB_T	0,223	19,1	0,221	19,3	19,2
KB_S	0,385	3,8	0,407	1,9	2,9

Tabelle XIII: Kationenaustauschkapazität - Löss-Ton Mischungen

Angaben in meq/100g

Probe:	Mittelwert - Messung 1	CEC - Messung 1	Mittelwert - Messung 2	CEC - Messung 2	Mittelwert CEC
KB_T	0,223	19,1	0,221	19,3	19,2
L-T 1:2	0,283	13,4	0,280	13,8	13,6
L-T 1:1	0,291	12,7	0,293	12,6	12,6
L-T 2:1	0,294	12,4	0,302	11,7	12,1
MB_L	0,345	7,6	0,344	7,8	7,7

Tabelle XIV: Kationenaustauschkapazität - Sand-Ton Mischungen

Angaben in meq/100g

Probe:	Mittelwert - Messung 1	CEC - Messung 1	Mittelwert - Messung 2	CEC - Messung 2	Mittelwert CEC
KB_T	0,223	19,1	0,221	19,3	19,2
S-T 1:2	0,278	13,9	0,283	13,5	13,7
S-T 1:1	0,317	10,2	0,317	10,3	10,3
S-T 2:1	0,337	8,4	0,338	8,3	8,3
KB_S	0,385	3,8	0,407	1,9	2,9

