



Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit



Geotechnische Untersuchungen der
westalpinen Molasse im Rahmen der
Wiederverwertung von
Tunnelausbruchsmaterial

Gabriel Nievoll, BSc

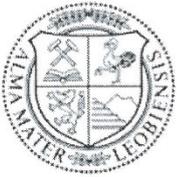
Mai 2023

Zusammenfassung

Geotechnische Untersuchungen sind für die Planung eines jeden unterirdischen Infrastrukturbauprojekts von entscheidender Bedeutung. Im Falle einer nachhaltigen Planung, werden die Ergebnisse von geotechnischen Untersuchungen auch für die Betrachtung unterschiedlicher Verwertungspotentiale, des beim Bau anfallenden Ausbruchmaterials verwendet. Dabei ist es wichtig, die geotechnischen Eigenschaften und das Verhalten des Ausbruchmaterials bereits vor Beginn der Bauarbeiten entsprechend zu charakterisieren, um herauszufinden welchen technischen Anforderungen dieses Material entspricht. Im Hinblick auf den in Planung befindlichen Bau des Future Circular Collider (FCC) der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) in der Nähe der Schweizer Stadt Genf, wurden geotechnische Untersuchungen an Proben der westalpinen Molassezone durchgeführt. Das Ziel ist es, das Aushubmaterial möglichst nachhaltig zu bewirtschaften und dadurch die Umweltauswirkungen des Bauprozesses erheblich zu verringern. In dieser Arbeit werden die Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen erläutert und die Eignung für den Einsatz in unterschiedlichen Applikationen, wie der Herstellung von Baumaterialien (z.B. Beton), diskutiert. Die hierbei vorgeschlagenen Verwendungsmöglichkeiten des heterogenen Molassematerial können als Grundlage für zukünftige Projekte in der westalpinen Molassezone sowie in anderen Regionen mit ähnlicher Geologie dienen. Insgesamt unterstreicht die Arbeit die Bedeutung, vor jedem Bauprojekt eine detaillierte geologische Charakterisierung durchzuführen, um einen sicheren und effizienten Einsatz der Materialien in der Wiederverwertung zu gewährleisten.

Abstract

Geotechnical investigations are of crucial importance for the planning of any subsurface infrastructure project. In the case of sustainable planning, the results of geotechnical investigations are also used for the consideration of different recycling potentials of the excavated tunnel material. In this context, it is important to characterize the geotechnical properties and behaviour of the excavated material before the start of construction in order to determine the technical standards of the material. With regard of the planned construction of the Future Circular Collider (FCC) by the European Organization for Nuclear Research (CERN) near the Swiss city of Geneva, geotechnical investigations were carried out on samples of the Western Alpine Molasse Basin. The objective is to manage the excavated material as sustainably as possible, thereby significantly reducing the environmental impact of the construction process. In this thesis the results of the geotechnical investigations are explained and the suitability for use in different applications, such as the production of building materials (e.g. concrete), is discussed. The proposed uses of the heterogeneous molasse material can serve as a basis for future projects in the western alpine molasse zone as well as in other regions with similar geology. Overall, the work emphasizes the importance of conducting detailed geotechnical investigations prior to any construction project to ensure safe and efficient use of the materials in reuse.



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 21.05.2023

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'G. Nievoll'.

Unterschrift Verfasser/in
Gabriel Nievoll

Danksagung

Mein Dank gilt dem Lehrstuhl für Subsurface Engineering, speziell dem Vorstand Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler für die Betreuung meiner Diplomarbeit.

Besonderer Dank geht an Frau Dipl.-Ing. Elisabeth Hauzinger, für die Ermöglichung, eine Diplomarbeit zum Thema „Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterial“ verfassen zu können. Ebenfalls ihre kritischen wie hilfreichen Anregungen bei aufgetretenen Fragen und ihr stets positiver Blick in die Zukunft waren bei der Erstellung der Arbeit besonders hilfreich. Nicht zuletzt war auch die Freiheit, die sie mir bei der Bearbeitung des Themas gelassen hat, nicht selbstverständlich.

Ich möchte auch dem Laborteam des Lehrstuhls für Subsurface Engineering unter der Leitung von Ing. Jörg Krainz meinen Dank für ihre Unterstützung und die zahlreichen wertvollen Diskussionen aussprechen

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Studienkollegen und Freunden, die mich durchs Studium begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner gesamten Familie für die großartige Unterstützung während meiner gesamten Ausbildungs- und Studienzeit.

*Gabriel Nievoll
Brüssel, Mai 2023*

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	ii
Eidesstattliche Erklärung.....	iii
Danksagung	iv
Inhaltsverzeichnis.....	v
1. Einleitung und Aufgabenstellung	1
2. Geologischer Überblick.....	2
2.1. Geologie der Westalpen.....	2
2.1.1. Die Architektur der Schweizer Alpen.....	3
2.1.2. Westalpines Molassebecken.....	5
2.1.3. Geodynamische Evolution des Genfer Beckens.....	7
2.1.4. Entwässerungssystem.....	7
2.2. Stratigraphie des Genfer Beckens.....	8
2.2.1. Untere Meerwassermolasse (UMM)	9
2.2.2. Untere Süßwassermolasse (USM)	10
2.2.3. Obere Meerwassermolasse (OMM).....	11
2.2.4. Obere Süßwassermolasse (OSM).....	13
2.2.5. Klassifizierung der Molasse nach geotechnischen Parametern	14
2.2.6. Probenahmestelle LHC Point 1.....	15
3. Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterial.....	17
3.1. Future Circular Collider (FCC).....	18
3.2. „Mining the Future“ Wettbewerb.....	24
3.2.1. Molassematerial im Spritzbeton	24
3.2.2. Molassematerial als Baurohstoff	25
3.2.3. Molassematerial in Roherdeziegel	26
3.2.4. Molassematerial als Oberbodenmaterial.....	26
4. Methodik.....	28
4.1. Probennahme	28
4.2. Korngrößenverteilung	30
4.3. Fallkegelversuch und Bestimmung der Ausrollgrenze.....	35
4.4. Dosenfrostversuch.....	41

4.5.	Beurteilung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität im Beton.....	43
4.6.	Bestimmung der Kornformkennzahl.....	46
4.7.	Los Angeles Test	47
4.8.	Modell zur analytischen Betrachtung der Verwertbarkeit von Tunnelausbruchmaterial.....	50
5.	Ergebnisse.....	52
5.1.	Korngrößenverteilung	52
5.2.	Wassergehalt der Fließ- und Ausrollgrenze.....	54
5.3.	Widerstands gegen Frost-Tau-Wechsel	55
5.4.	Alkali-Kieselsäure Reaktivität	57
5.5.	Kornformkennzahl	58
5.6.	Widerstand gegen Zertrümmerung.....	58
6.	Diskussion der Ergebnisse	59
6.1.	Korngrößenverteilung	59
6.2.	Konsistenzgrenzen	61
6.3.	Widerstand gegen Frost-Tau Wechsel	61
6.4.	Alkali Kieselsäure Reaktivität.....	63
6.5.	Widerstand gegen Zertrümmerung.....	63
6.6.	Verwertungspotential als Recyclingrohstoff.....	65
7.	Interpretation	71
7.1.	Sensitivität des Materials gegenüber Wasser	71
7.2.	Widerstandsparameter	71
7.3.	Kieselsäure Reaktivität	72
7.4.	Relevante Bodenkennwerte.....	72
8.	Schlussfolgerungen	74
9.	Tabellenverzeichnis	75
10.	Abbildungsverzeichnis	76
11.	Literatur	79

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterial ist ein wichtiger Aspekt im Bereich des nachhaltigen Bauens und der Ressourcenschonung. Insbesondere bei großen Bauprojekten wie dem Future Circular Collider (FCC) der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) fallen enorme Mengen an Tunnelausbruchsmaterial an. Um dieses Material sinnvoll zu nutzen und gleichzeitig die Umweltbelastung zu reduzieren, bietet sich die Wiederverwendung des Materials in unterschiedlichen Applikationen an. Vor der Wiederverwendung ist jedoch eine genaue geotechnische Untersuchung des Baugrunds bzw. des Ausbruchsmaterials notwendig, um eine sichere und ökonomische Verwendung zu gewährleisten. Die vorliegende Abschlussarbeit beschäftigt sich mit den geotechnischen Untersuchungen der westalpinen Molasse im Rahmen der Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterial. Ziel der Arbeit ist es, geotechnischen Eigenschaften des Tunnelausbruchsmaterials zu erfassen und zu bewerten. Dabei werden sowohl die geotechnischen Aspekte der Wiederverwendung als auch die geologischen Gegebenheiten der westalpinen Molassezone betrachtet. Ein Ziel ist es, durch unterschiedlichste Aufbereitungsverfahren das Aushubmaterial möglichst vollständig nutzen zu können und dadurch den Einsatz von primär Rohstoffen zu reduzieren und gleichzeitig das Abfallaufkommen zu kommen. Die Arbeit beginnt mit einer Einführung in das Thema und einer Beschreibung der geologischen Gegebenheiten in der westalpinen Molassezone und einer kurzen Zusammenfassung des FCC-Projekts. Anschließend werden die theoretischen Grundlagen der verschiedenen geotechnischen Untersuchungsmethoden vorgestellt. Dabei wird auch auf die technischen Anforderungen bei der Wiederverwendung von Baustoffen eingegangen. Im nächsten Abschnitt werden konkrete geotechnische Untersuchungen am Aushubmaterial, welches bei der LHC-Erweiterung angefallen ist, erläutert. Hierbei werden verschiedene geotechnische Parameter erfasst und bewertet. Dabei werden auch Erfahrungen und Herausforderungen bei der Durchführung der Untersuchungen betrachtet. Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der geotechnischen Untersuchungen und der Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterial gegeben. Dabei werden auch mögliche Einsparpotentiale und Umweltauswirkungen im Vergleich zu herkömmlichen Baustoffen diskutiert. Die Arbeit soll somit einen Beitrag zur nachhaltigen und ökonomischen Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterial in der westalpinen Molassezone leisten.

2. Geologischer Überblick

Um einen Überblick über den Aufbau und die Genese der westalpinen Molassezone zu bekommen, wird in den nachfolgenden Unterkapiteln die generelle Geologie der Westalpen und gängige Modelle der tektonischen Entwicklung deren näher erklärt. Weiters wird auf die Entwicklung der westalpinen Molassezone und deren stratigraphischer Aufbau eingegangen.

2.1. Geologie der Westalpen

Die Westalpen sind ein Teil der Alpen, welche sich von Frankreich über die Schweiz bis in den Osten Österreichs erstrecken. Die Ausdehnung der Alpen beträgt in Ost-West Richtung ca. 900km und Nord-Süd Richtung ca. 200km. Im Osten tauchen die Alpen unter die Sedimente des Wiener Beckens ab. Manche Alpinen Einheiten finden eine Fortsetzung in den westlichen Karpaten. Geografisch können die Alpen in West-, Ost- und Südalpen unterteilt werden. Die Südalpen werden durch die Periadriatische Naht von den West- und Ostalpen abgegrenzt [1]. Die Westalpen werden geografische durch eine Linie ausgehend vom Bodensee bis zum Comer See von den Ostalpen abgegrenzt. Die tektonische Einteilung der Alpen erfolgt in vier Einheiten, die als Helvetikum, Penninikum, Ostalpin und Südalpin bezeichnet werden (*Abbildung 1*). Nördlich werden die Alpen von der Molassezone begrenzt, westlich schließen die Jura Alpen an. Die Helvetischen Decken sind Überreste der ehemaligen Schelf- und Hangbereiche des europäischen Kontinents und bestehen aus verschiedenen Gesteinen. Die Gesteine der penninischen Einheiten können zwei Paläoozeanen und einem dazwischenliegenden Mikrokontinent zugeordnet werden, welche zwischen dem europäischen Kontinent und Afrika lagen. Das Ost- und Südalpin sind Teile der adriatischen Platte, wobei das Ostalpin einen deformierten Bereich dieser darstellt und das Südalpin nur sehr gering deformiert wurde. Entstanden sind die Alpen durch die Kollision der Eurasischen und der Afrikanischen Kontinentalplatte beginnend in der Kreide. Dadurch, dass bei der Kollision auch Ozeane und andere Mikrokontinente inkludiert wurden, ergibt sich eine komplexe Entwicklungsgeschichte der Alpen [2].

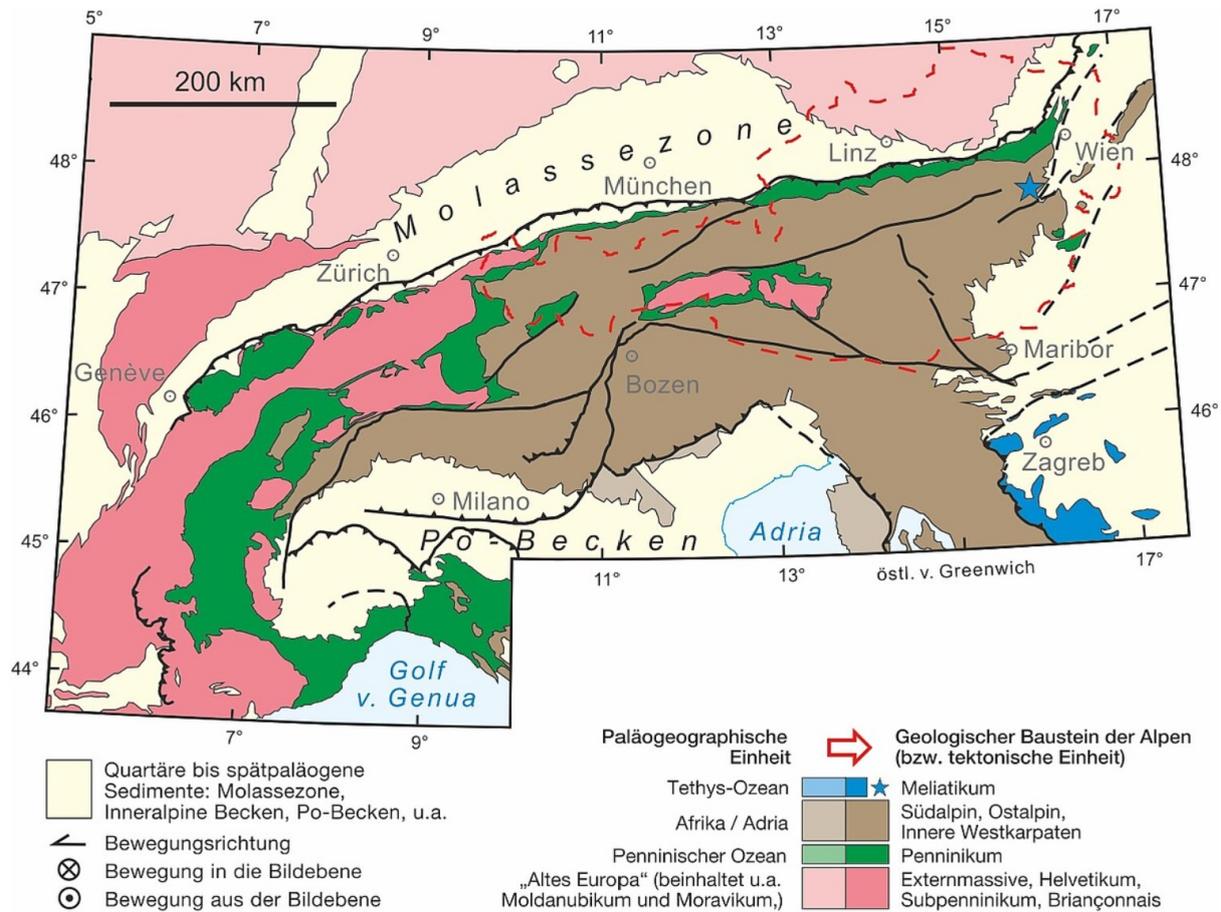


Abbildung 1 tektonische Übersicht des Alpenraumes mit den Großtektonischen Einheiten [3]

2.1.1. Die Architektur der Schweizer Alpen

Die Schweizer Alpen welche hier vor allem den Bereich der Alpen auf dem Schweizer Staatsgebiet beschreiben soll, sind das Ergebnis einer älteren kretazischen und einer jüngeren känozoischen Gebirgsbildung [4]. Bei diesem Event subduzierte die ozeanische Kruste der europäischen Platte unter den adriatischen Kontinent und es kam zu einer Deckenstapelung [2]. Die Alpen bilden ein doppelt vergentes Orogen, wobei die Südalpen in Richtung Süden einfallen und restlichen Alpen generell in Richtung Norden (Abbildung 3). Dabei wird ein kristalliner Kern bestehend aus europäischer Kruste von Metasedimenten umgeben (Penninikum, Helvetikum), wobei die Ostalpinen Decken in den Schweizer Alpen nicht auftreten [5]. Die Ablagerungen der Sedimente im Mesozoikum, welche das heutige Jura Gebirge bilden, fanden am passiven Kontinentalrand der alpinen Tethys statt und bestehen aus bis zu 2 Kilometer mächtigen Wechselfolgen aus Kalksteinen und Mergel [6]. Der Schweizer Jura kann in drei unterschiedliche Teile eingeteilt werden, der interne Jura, der externe Jura und der Tafeljura. Der externe Jura besteht aus eher flach lagernden mesozoischen Einheiten, im Gegensatz zum internen Jura (Faltenjura), in welchem ebenfalls Faltenstrukturen und auch sinistrale Störungen vorliegen [6]. Im Allgemeinen beschreiben die mesozoischen Abfolgen die Entwicklung von einer flachen Plattform, zu einem Schelf und einer folgenden

Entwicklung zu einer Karbonatplattform. Nach dem Ertrinken dieser Karbonatplattform kam es vermehrt zur Ablagerung pelagischer Sedimente [7]. Meeresspiegelschwankungen aufgrund von Eustasie oder auch durch veränderte tektonische Verhältnisse beeinflussten die Ablagerungsbedingungen. Gemeinsam mit dem wechselnden Einfluss des damals vorherrschenden Klimas, kam es dadurch zu mehreren faziellen Änderungen oder auch zu Variationen in den Sedimentationsraten was sich in den abgelagerten Sedimenten widerspiegelt [8]. Im Oligozän -Miozän wurden noch die Sedimente der Molasse und auch Quartäre, teils glaziogene Sedimente abgelagert, wobei diese die Molasse in manchen Teilen bedecken (Abbildung 2) [9].

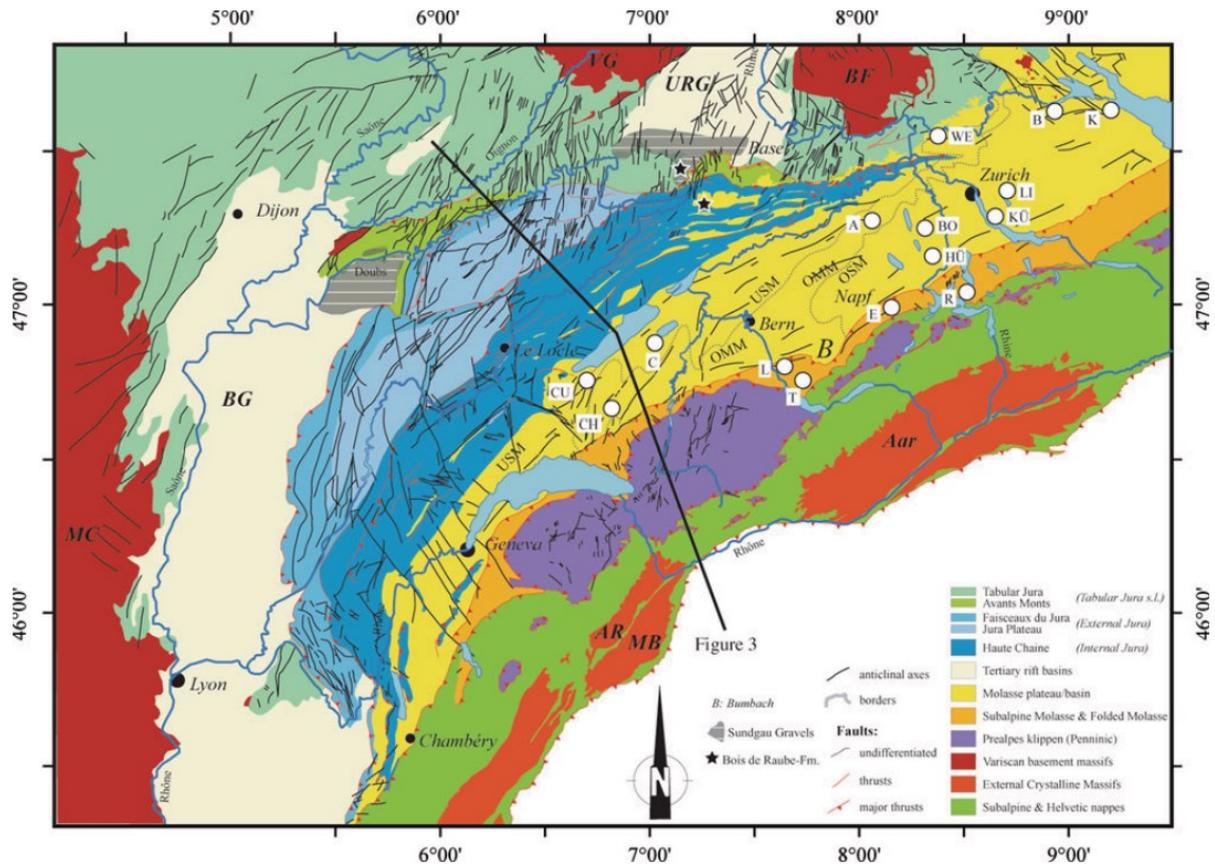


Abbildung 2: Überblick der geologischen Einheiten der Schweiz [10]

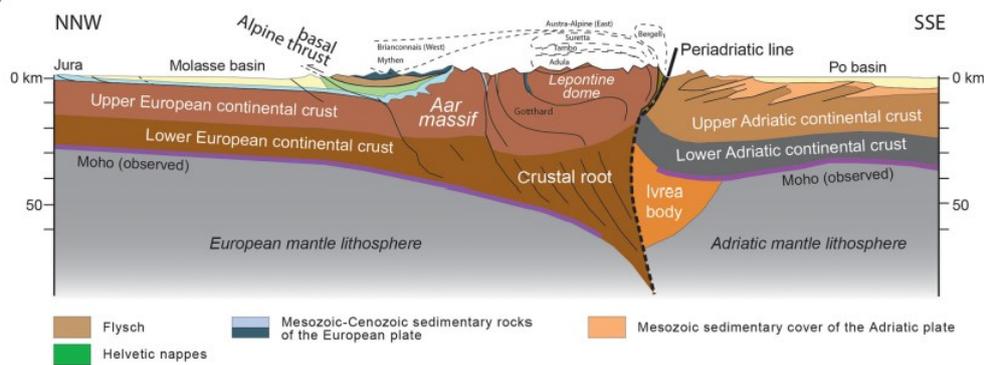


Abbildung 3: interpretiertes geologisches Profil durch die Westalpen, welches die Haupteinheiten zeigt [11]

2.1.2. Westalpines Molassebecken

Das westalpine Molassebecken kann in mehrere Einheiten unterteilt werden. Das Alpine Vorland bestehend aus Tafeljura und Faltenjura, den Alpen Einheiten den sogenannten Voralpen, den Helvetischen Decken, dem externen Massiv und den penninischen Decken. Die Molassezone wird durch die Salève, der Vuache und dem Jura begrenzt (Abbildung 4), welche allesamt aus mesozoischen Gesteinen bestehen und besteht aus einem 3000-5000m dicken mesozoischen – känozoischen Sedimentstapel, welcher auf dem variszischen Basement liegt. Östlich und südöstlich werden die undeformierten oligozänen-miozänen Molassesedimente von den gleichaltrigen aber deformierten Einheiten der Subalpinen Molasse, welche am Nordrand der Alpen liegen, begrenzt [12]. Die Basis des Sedimenttrops fällt mit 1-3° Richtung Süden ein [13]. Die Sedimentabfolge beginnt im Liegenden aus Evaporiten, darüber folgen Kalksteine und Mergel. Diese Abfolge ist auf eine Ablagerung zurückzuführen, welche am Südrand des europäischen Kontinents im Tethys Meer stattgefunden hat. Die Ablagerung auf dem paläozoischen Basement werden durch Horst und Graben Strukturen angezeigt, welche anschließend an die variszische Orogenese mit Siliziklastika verfüllt wurden [14]. Aufgrund der Kompression während der Orogenese wurde das Becken gehoben und es kam zur Bildung einer Erosionsfläche. Nach der Erosion folgen weiter siliziklastische Sedimente aus dem Oligozän, welche wiederum mit Sedimenten aus dem Quartär überlagert werden. Diese quartären Sedimente zeigen eine Bandbreite des Ablagerungsregimes von glazial bis fluviatil während der alpidischen Orogenese [15]. Für den Bau des Future Circular Colliders, sind vor allem die Quartären Sedimente von Bedeutung, da diese der Lithologie der geplanten Bautiefe entsprechen. Es existieren zwei Klassifizierungen der Molasse, welche einerseits auf einer stratigrafischen Basis aufgebaut sind [15] und andererseits auf den geotechnischen Parameter beruhen [16].

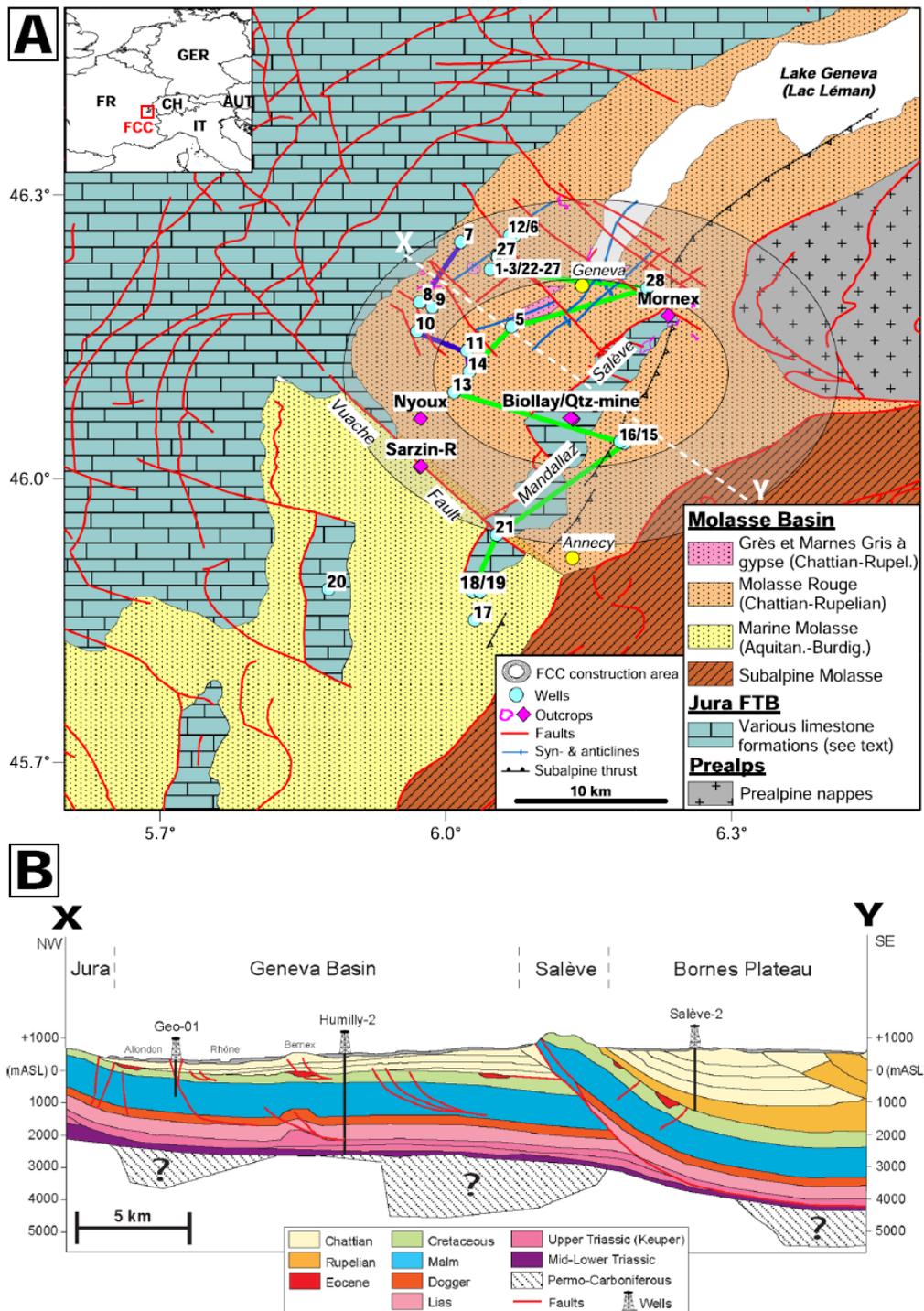


Abbildung 4: A) Überblick der tektonischen Einheiten im westalpinen Molassebecken im Bereich des FCC-Projektgebietes; B) Profil durch das westalpine Molassebecken, welches die Lagerungsverhältnisse der mesozoischen Einheiten (Salève) im Projektgebiet zeigt

2.1.3. Geodynamische Evolution des Genfer Beckens

Durch die Lage des westlichen Teil des Nordalpinen Vorlandbeckens (NAFB) über die Ländergrenzen der Schweiz und Frankreich hinweg, gibt es unterschiedliche Nomenklaturen für dieses [17]. Ausgehend vom Genfersee, über den Süden Deutschlands bis nach Wien, zieht sich das mit Oligozänen bis Miozänen gefüllte NAFB entlang der Nordseite der Alpen [18]. Geprägt wurde die Entwicklung durch die Kollision des afrikanischen mit dem europäischen Kontinent. Die Entwicklungen des Beckens und auch die des sich bildenden Orogens, weisen dabei entlang ihres Auftretens Unterschiede auf. Aus diesem Grund gibt es eine Unterscheidung der Molasse in einen Schweizer Teil im Westen, einen zentralen deutschen Teil und einen östlichen, österreichischen Teil [19]. Die Geschichte der Entstehung des Molassebeckens ist eng mit der geodynamischen Evolution der Alpen verknüpft [20, 4]. Der Beginn der Bildung des Vorlandbeckens wird mit dem Schließen der alpinen Tethys Ende der Kreide korreliert [21]. Zu dieser Zeit wurde auch die ozeanische Kruste der europäischen Platte unter kontinentale Kruste der adriatischen Platte subduziert und dabei kam es durch die Belastungen zu einem Absinken der europäischen Platte [21]. Im Becken kam es dabei zur Ablagerung von marinen Sedimenten und diese Periode wird als Flysch-Stadium bezeichnet [11]. Als es zur Subduktion der leichteren kontinentalen Platte kam, änderte sich die Situation, was dazu führte, dass es zu Zugspannungen am Rand dieser Platte kam [21]. Es folgte das Abreißen der ozeanischen Lithosphäre von der europäischen Kontinentalplatte [22] was zu einem Rückprall der Platte und neben dem damit verbundenen Aufstieg der Schweizer Alpen auch zu einem Anstieg der Sedimentmenge führte [23]. Das folgende Stadium der Beckenentwicklung war das Molasse Stadium, welches in zwei Megazyklen unterteilt werden kann. Diese beschreiben jeweils eine Entwicklung der Sedimentation von marinen zu terrestrischen Verhältnissen [23]. Die Bezeichnung des Genfer Beckens wurde von *Moscariello (2019)* [24] eingeführt und beschreibt den Teil des NAFB welcher durch das Jura Gebirge im Norden, den Voralpen im Osten, im Süden durch das Salève Massiv und im Südwesten durch die Vuache abgegrenzt werden. Dabei wird das Genfer Becken aus den mesozoischen Sedimenten der Jura, den oligozänen-miozänen Molassesedimenten und den hangenden quartären Ablagerungen aufgebaut [24].

2.1.4. Entwässerungssystem

Die Interpretation des Entwässerungssystems zwischen dem Oligozän und heute, konnte unter anderem durch die Auswertung von Daten aus petrografischen und geochemischen Untersuchungen des Schuttmaterials gemacht werden, welcher Hinweise auf die Provenance des Sediments gibt. Ein weiterer Faktor ist die Auswertung von thermochronometrischen Daten von vorhandenen Glimmern oder von Zirkon bzw. Apatit, welche Aussagen über die chronologische Entwicklung der Sedimente gibt. Ein ebenfalls beachteter Punkt sind die Informationen über die Position und Ausbreitung der unterschiedlichen Schüttungen ins Becken [25].

Bei der Rekonstruktion des alpinen Drainagesystems wurden unterschiedliche Phasen identifiziert [25]. Die erste Phase (Chattium-Burdigalium) wird durch eine rechtwinkelige

Ausbreitungsrichtung des Drainagesystem definiert welches ihren Ursprung zuerst in den aufsteigenden Alpen Decken hatte und sich dann immer tiefer einschnitt, was zu einer petrographischen Änderung des Detritus zu einem aus den penninischen Einheiten und schlussendlich zu einer Petrofazies aus dem Kristallin führte [26]. Die zweite Phase beschreibt eine Phase in welcher die Zusammensetzung der Sedimente gleichbleibend war und sich die Anzahl der Schuttfächer nicht änderte (Burdigalium-Pliozän) [25]. Die dritte Phase beschreibt die einer orogenparallelen Drainage welche durch das Wachsen des Aarmassivs hervorgerufen wurde (Beginn im Pliozän) [27]. Bei einer gemeinsamen Betrachtung der Gebirgsbildung mit der Entwicklung des Beckens wird gezeigt, dass ein heranwachsendes Gebirge zu einer Progradation der Sedimente im Vorland führt [28]. Die Füllung des alpinen Vorlandbeckens im Zeitraum vom Rupelium – Langhium ging von drei unterschiedlichen Entwässerungssystemen aus [29]. Das primäre System war ein fluviatiles, parallel zur Achse des Beckens, welches ihr Ursprungsgebiet wahrscheinlich im Südwesten hatte. Die beiden weiteren fluviatilen System waren jeweils rechtwinkelig auf die Beckenachse orientiert, und lieferten einmal Material vom südlichen Rand und einmal vom nördlichen Rand des Beckens. Die im Süden liegenden, aufsteigenden Alpen, waren das Liefergebiet des dortigen Flusssystem. Beim Eintritt ins Becken bildeten sich große Schuttkegel. Auch bei der Änderung der Verhältnisse im Becken zu einem marinen Umfeld, lieferten die Flüsse weiter Detritus [29]. Aus dem anfänglich im Rupelium vorhandenen schmalen Meeresbecken, wurde durch das sich ausdehnende Molassebecken ein mäandrierendes Flusssystem. Dabei kam es zur Ablagerung der unteren Süßwasser Molasse in der Zeit des Chattiums und Aquitaniums. Während des Burdigalium etablierten sich wiederum flach marine Verhältnisse welche zur Ablagerung mariner Sedimente führten (obere Meerwasser Molasse)[29].

2.2. Stratigraphie des Genfer Beckens

Die Einteilung nach Trümpy (1980) [15] umfasst vier Unterteilungen für welche meist nur die Abkürzungen verwendet werden. Diese Einteilung folgt dem Konzept zweier Megasequenzen welche *coarsening upward* Zyklen zeigen und in eine untere Meerwassermolasse (UMM), untere Süßwassermolasse (USM), obere Meerwassermolasse (OMM) und eine obere Süßwassermolasse (OSM) eingeteilt werden (*Abbildung 5*). Beginnend im Rupelian [30], markiert die UMM den Beginn der Sedimentablagerung der ersten Megasequenz. Abgelöst werden diese marinen Sedimente, durch die Ablagerung von fluvio-lakustrinen Sedimenten der USM (Chattium-Aquitanium) [29]. Die Sedimentation von Detritus mariner Herkunft (OMM) im Burdigalium markiert den Übergang zur zweiten Megasequenz, welche mit den im Langhium abgelagerten Süßwassersedimenten (OSM) ihren Abschluss findet. Die Entwicklung des Beckens um die zwei progradierenden Sequenzen (UMM-USM und OMM-OSM) zeigt, dass es sich um zwei Perioden handelt, in denen der Sedimenteintrag die Bereitstellung des Ablagerungsraumes übersteigt. Dabei verschiebt sich die Beckenachse vom Beckenrand im Süden ins Becken Richtung Norden. Die Mächtigkeiten der Molasseablagerungen lassen auf unterschiedliche Subsidenzraten schließen. Im Chattium werden von Schlunegger et al. (1997) [31] Subsidenzraten von 0,5-0,6mm/Jahr beschrieben und

ein schmales Becken mit weniger als 50km Breite. Dabei lag die Beckenachse nahe am Südrand des Beckens. Im Aquitanium sanken diese und die Breite des Beckens nahm zu und es kam ebenfalls zu einer Verschiebung der Beckenachse, weg vom Beckenrand in Richtung Norden. Die Ablagerung endete im Pliozän nach einer Hebungsphase und es folgte eine Erosion der zuvor abgelagerten Sedimente [32]. Im Westen des Beckens erreichte die Erosion tiefere Bereiche als im Osten, mit der Konsequenz, dass die OMM im Westen nur mehr in Fragmenten erhalten sind [33]. Die Neigung der Beckenachse war während der Zeit der Ablagerung der UMM und USM in Richtung Nordosten gerichtet und dies änderte sich anschließend in Richtung Südwesten [25]. Während der der Ablagerungszeit der OMM, wurde das Material nicht weit transportiert sondern direkt im Sedimenttrog abgelagert [34]. Dies konnte durch die lithologische Zuordnung des transportierten Materials rekonstruiert werden.

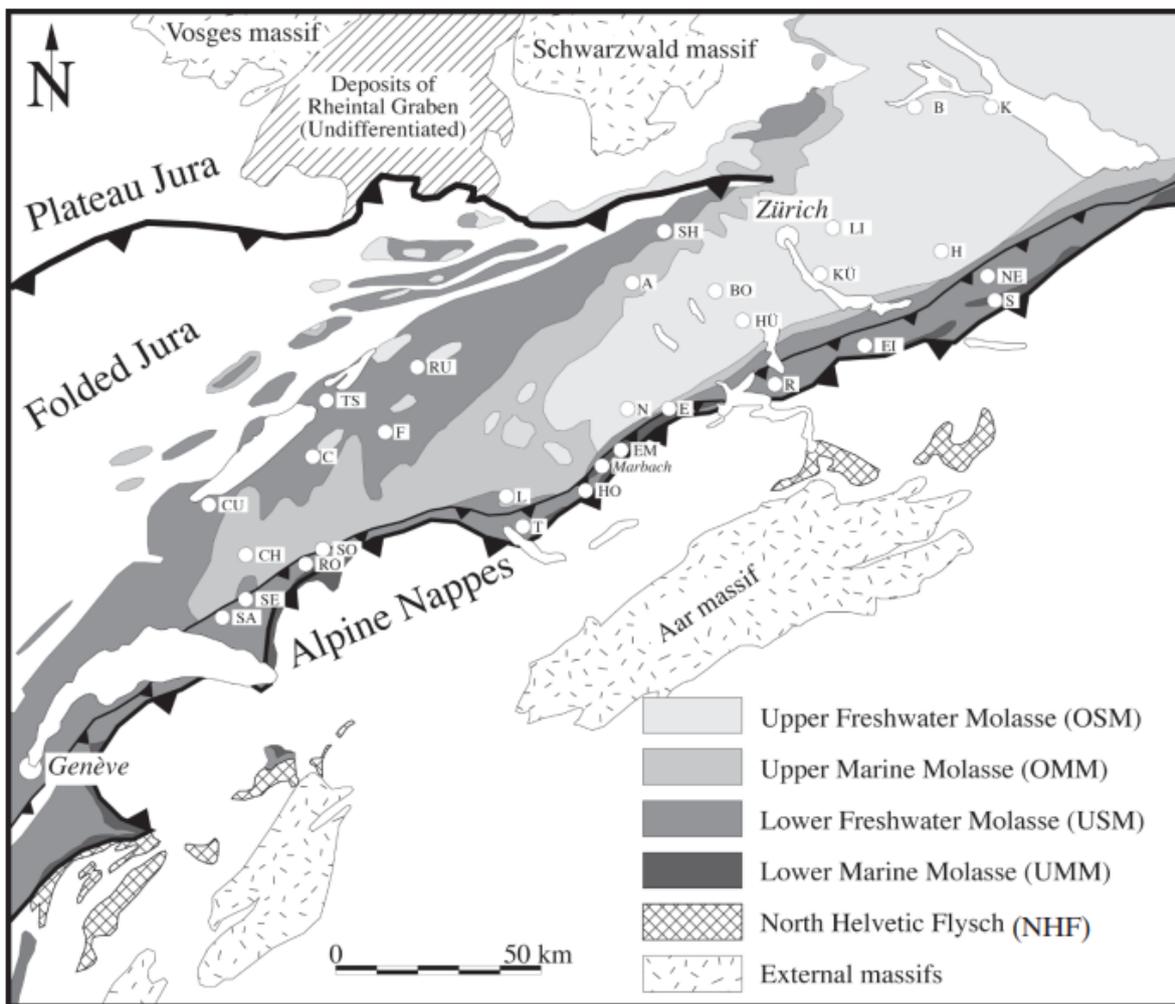


Abbildung 5: Übersichtskarte des westalpinen Molassebeckens aus Schlunegger et al. (2007) [25]

2.2.1. Untere Meerwassermolasse (UMM)

Die UMM wird im Liegenden aus mächtigen Mergelablagerungen aufgebaut, in welche immer wieder turbiditische Ablagerungen eingeschaltet sind. Hierbei wurde von Diem (1986)

[30] ein Ablagerungsraum unter der sogenannten Sturmwetterwellenbasis gedeutet (Abbildung 6). Später werden die Mergellagen immer wieder von Sandsteinlagen unterbrochen an welchen unterschiedliche Sedimentstrukturen wie Wellenrippel zu erkennen sind. Diese sandigen Schichten werden von Diem (1986) als Schlechtwetterereignisse gedeutet, wo es durch Sturmereignisse die Sandfraktion weiter transportierte und als sogenannte Tempestite abgelagert wurden. Auf diese Tempestite folgt eine ca 10-20m mächtige bankige Sandsteinschicht, wobei diese in küstennäherer Umgebung sedimentiert wurde. Auf diesen Sandsteinen kommt es zur Wechselfolge von Sandsteinen, Mergeln und auch Kohle. Dies deutet den Übergang auf die folgende untere Süßwassermolasse an.

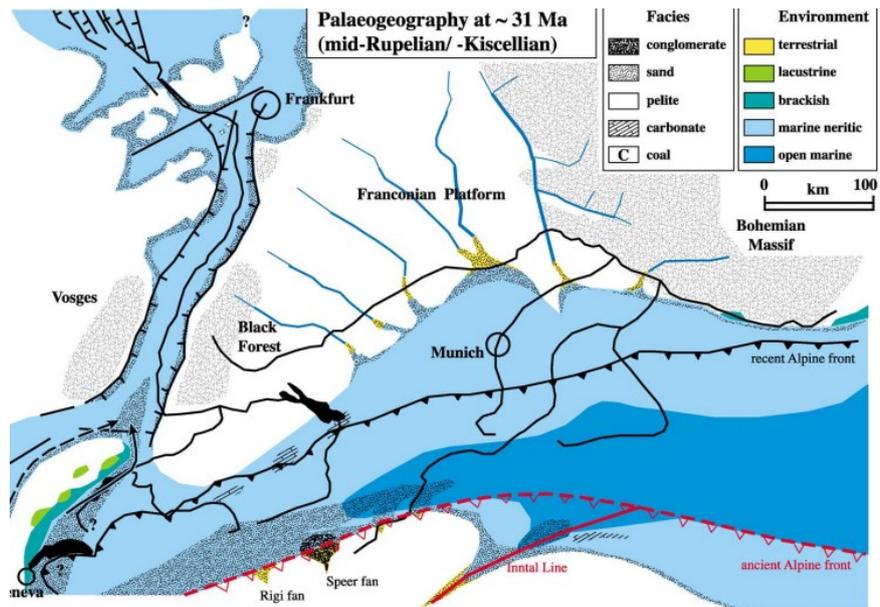


Plate 1. Evolution of facies and environment of the NAFB at ~ 31 Ma (Lower Marine Molasse, UMM). See text for discussion.

Abbildung 6 Paläogeografische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit der UMM vor ca. 31 Millionen Jahre zeigt die Ausdehnung der marinen Bereiche [20]

2.2.2. Untere Süßwassermolasse (USM)

Die untere Süßwassermolasse beginnt mit fluviatilen Konglomeraten, welche in Schuttfächern abgelagert wurden. Diese haben sich entlang der Überschiebungsfront, welche nach Nordwest gerichtet war, ausgebreitet. Der Abfluss des Entwässerungssystem war Richtung Nordosten gerichtet, in welchem Sandablagerungen zu finden sind. Die USM kann Mächtigkeiten bis 3000m erreichen und weist auf Grund der vorhandenen Sedimentstrukturen auf ein mäandrierendes Flusssystem hin. Diese Sandablagerung wird durch episodische Ablagerungen von feinkörnigerem Material unterbrochen. Diese feinkörnigen Ablagerungen werden als Ablagerungen im oberen Strömungsregime interpretiert [25]. Während der Ablagerung der USM änderte sich die Anzahl der Schüttungen in das Molassebecken. Während im Chattium noch 7 große Schüttungen vorhanden waren, die weit transversal ins Becken ablagerten (Abbildung 7), änderte sich die Situation mit dem Aquitanium das die transversalen Schüttungen nicht mehr so weit ins Becken schütteten sondern ihre Richtung in Richtung der Beckenachse änderten [31]. Es ist nicht ganz klar, ob die westlichen Schüttungen

in Richtung Rheingraben oder doch in Richtung Nordosten schütteten [20]. Im Westen rund um den Genfer See wird eine Scheide der Sedimentationsrichtung vermutet, wobei die südlichen Schüttungen in Richtung Tethys und die nördlichen Schüttungen wie das restliche Becken Richtung Nordosten (Paratethys) ausgerichtet sind [11]. Durch die andauernde Sedimentablagerung, verlagerte sich die Beckenachse weiter Richtung Norden [31].

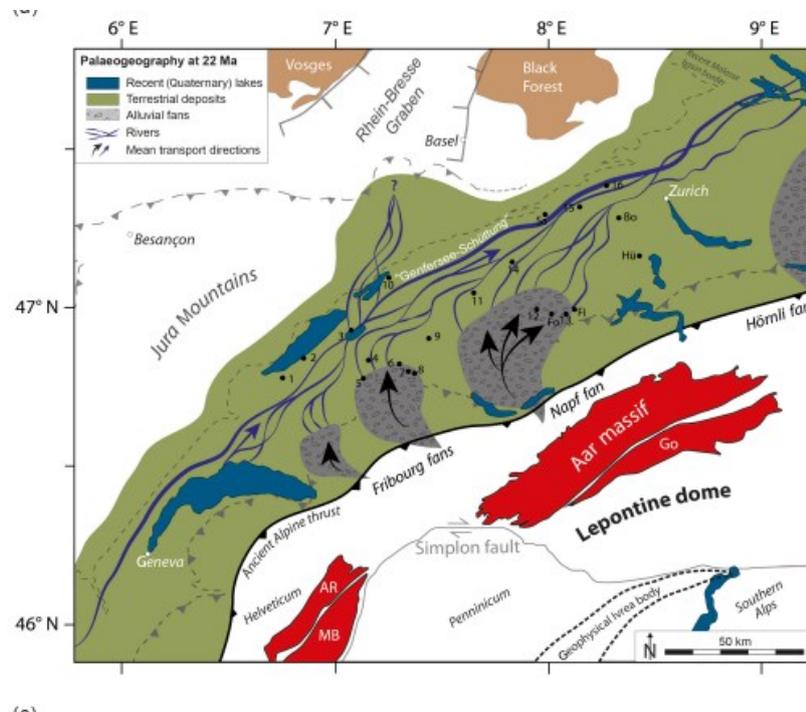


Abbildung 7: Paläogeographische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit der USM vor ca. 22 Mio. Jahren zeigt die Ablagerung terrestrischer Sedimente über große Schuttfächer im Süden und eine Entwässerung in Richtung Nordosten [11]

2.2.3. Obere Meerwassermolasse (OMM)

Die obere Meerwassermolasse erreicht eine Gesamtmächtigkeit von bis zu 1000m und diese nimmt zum Beckenrand hin ab [34]. Eine fortschreitende Transgression in Richtung Nordosten änderte die Ablagerungsbedingungen im Becken (Abbildung 8). Dabei verband eine schmale Seebrücke die Tethys mit der Paratethys [34]. Aufgebaut ist die Obere Meerwassermolasse hauptsächlich aus Sandsteinlagen in unterschiedlichen sedimentären Ablagerungsformen. Dazwischen können auch immer wieder dünne tonige Lagen auftreten [31]. Die abgelagerten Sandbänke (Abbildung 8) weisen auf eine Transportrichtung von SW nach NE hin [11]. Durch die fortschreitende Transgression änderte sich ebenfalls die Breite des Beckens erheblich (Abbildung 9). Dabei änderten sich auch die Ablagerungsbedingungen und es kam zur

Ablagerung von Muschelsandstein. Modelle zeigen, dass in dieser Zeit das Ablagerungszentrum nördlich des Napf Schuttfächer gelegen hat [11].

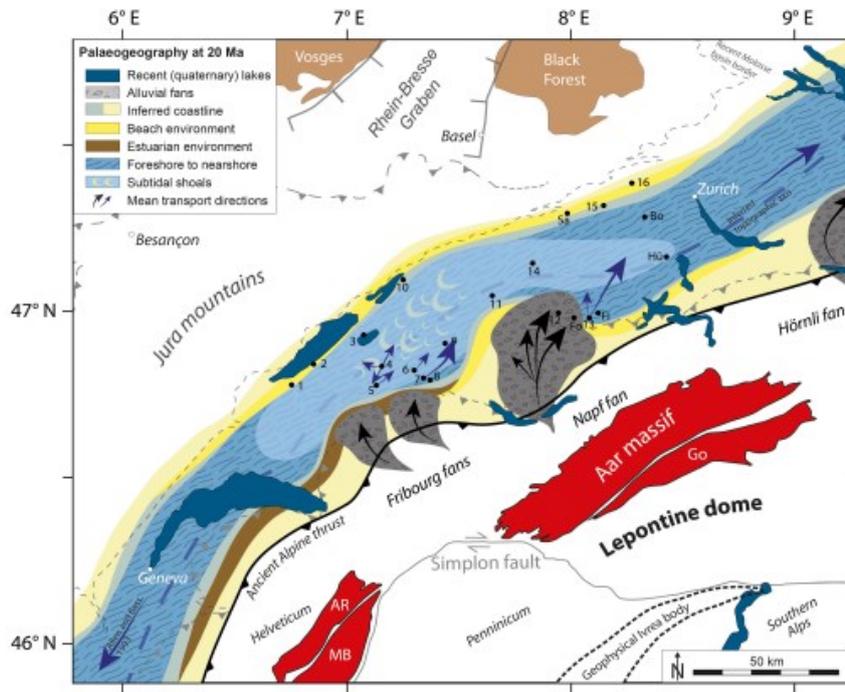


Abbildung 8: Paläogeographische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit der OMM vor ca. 20 Millionen Jahre zeigt die erneuten marinen Bedingungen und eine Transgression in Richtung Nordosten [11]

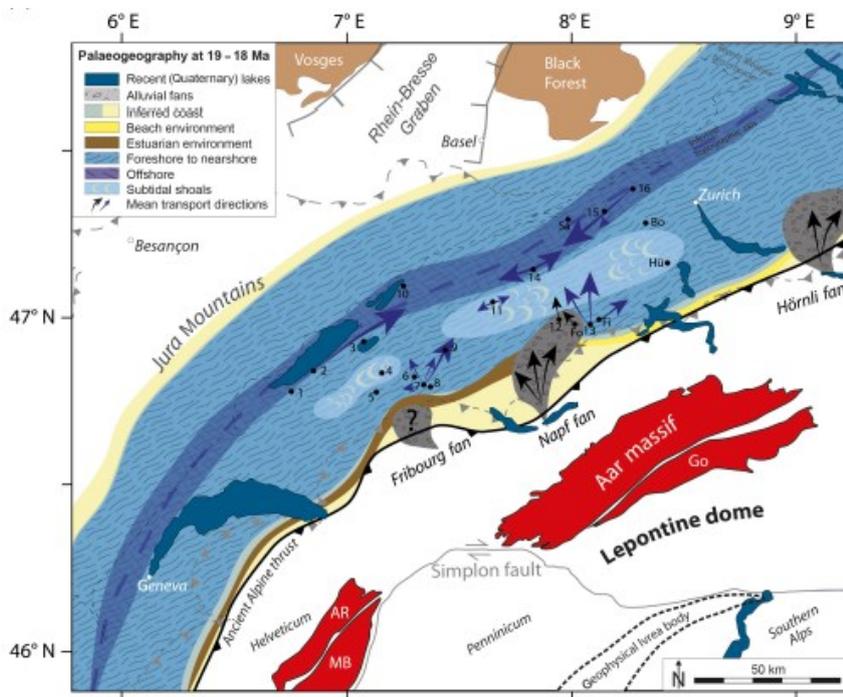


Abbildung 9: Paläogeographische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit der OMM vor ca. 18 Mio. Jahren, zeigt die Verbreiterung des Beckens und ebenfalls einen Anstieg des Wasserspiegels [11]

2.2.4. Obere Süßwassermolasse (OSM)

Durch fortschreitende Ablagerung von Deltaschüttungen füllte sich das Becken und es kam zu einem Ende der Ablagerungen [11]. Die OSM wird ähnlich der USM am Beckenrand aus km mächtigen Fächerschüttungen aufgebaut. Diese Fächerschüttungen bestehen hauptsächlich aus Konglomeraten. Dabei überschneiden diese sich mit den im distaleren Bereich des Beckens vorliegenden Sandsteinen. Der Sedimenttransport findet zu dieser Zeit in Richtung Südwesten statt (*Abbildung 10*) was auf eine Neigung der Beckenachse in diese Richtung deutet. Die OSM wird durch die Ablagerung von großen Schuttfächern geprägt.

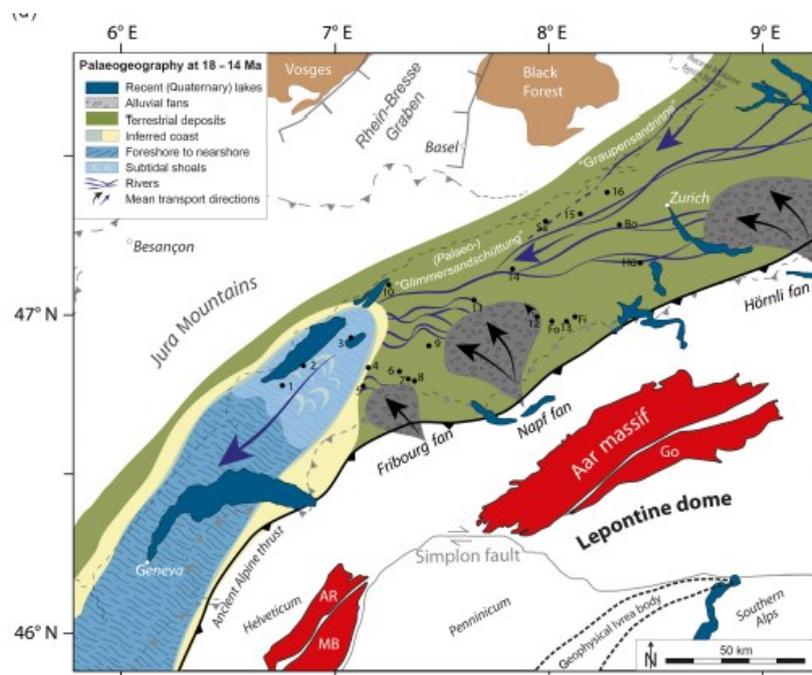


Abbildung 10: Paläogeographische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit Ende OMM und zur Zeit der OSM zwischen 18 Mio. und 14 Mio. Jahren zeigt den Rückzug des Meeres nach Südwesten und eine Entwässerung in dieselbe Richtung und die erneute Ablagerung terrestrischer Sedimente [11]

2.2.5. Klassifizierung der Molasse nach geotechnischen Parametern

Fern et al. (2018) [16] erstellte anhand von historischen Daten aus den bisherigen Explorationsprogrammen und auch den bereits getätigten unterirdischen Infrastrukturbauarbeiten eine alternative Klassifizierung der Molasse Rouge, welche auf geotechnischen Daten anstatt auf Stratigrafie beruht. Dabei wurden die geotechnischen Daten analysiert und in mehrere Klassen eingeteilt. Die Gliederung erfolgt mit der Zunahme der einachsialen Druckfestigkeit (UCS) *Abbildung 11* unter der Berücksichtigung von anderen Kennwerten wie dem E-Modul und den Atterberg'schen Zustandsgrenzen. Daraus erfolgte die Einteilung in einen sehr schwachen Mergel, schwachen Mergel, mittelschwachen Mergel, schwacher Sandstein, mittelstarker Sandstein, und starker Sandstein. Die Mergel unterscheiden sich grundsätzlich von den Sandsteinen, dass diese sich duktiler verhalten und die Sandsteine spröder sind. Ebenfalls die Mineralogie und die Korngrößen zeigen Unterschiede. So bestehen die Mergel hauptsächlich aus Ton- und Siltfraction und mineralogisch aus Tonmineralen und etwas Calcit und Quarz. Mit steigendem Anteil an Quarz und vor allem Kalzit und somit besserer Zementation in den Mergeln, nimmt die einachsiale Druckfestigkeit zu. Die Sandsteine bestehen hauptsächlich aus gut zementierten Silten und Sanden und mineralogisch aus Quarz und Feldspat mit Tonminerale und Calcit in variablen Anteilen. Die einachsiale Druckfestigkeit nimmt ebenfalls mit dem Zementationsgrad zu. [16].

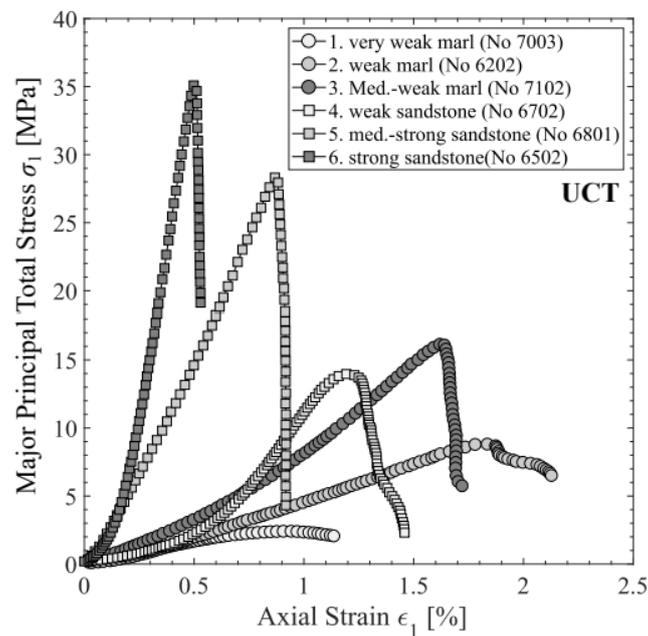


Abbildung 11 Ergebnisse des einachsialen Druckversuchs an den unterschiedlichen Klassen 1) sehr schwacher Mergel, 2) schwacher Mergel, 3) mittelschwacher Mergel, 4) schwacher Sandstein, 5) mittelstarker Sandstein, 6) starker Sandstein [16]

2.2.6. Probenahmestelle LHC Point 1

Um weitere Erkenntnisse für den zukünftigen Bau des neuen Teilchenbeschleunigers zu erlangen, wurden die Erweiterungsarbeiten des LHC dazu verwendet, Gesteinsproben von den Vortriebsarbeiten zu entnehmen. Die Probenmaterial stammt vom LHC Point1, welcher sich am Standort Meyrin in der Schweiz befindet. Mittels bergmännischer Tunnelbaumethode wurden bei diesem Projekt Schächte, Kavernen und Tunnel erweitert oder auch neu errichtet. Die Geologie, welche in diesem Bauabschnitt vorgefunden wurde, zählt zur Molasse Rouge Formation der westalpinen Molasse und besteht aus sub-horizontalen Wechsellagerungen von Mergel und Sandsteinen [35] wo teilweise auch Kohlenwasserstoffe angetroffen wurden. Bei der Betrachtung von *Abbildung 12* ist zu erkennen, dass es sich um eine sehr heterogene Abfolge der unterschiedlichen Lithologien handelt.

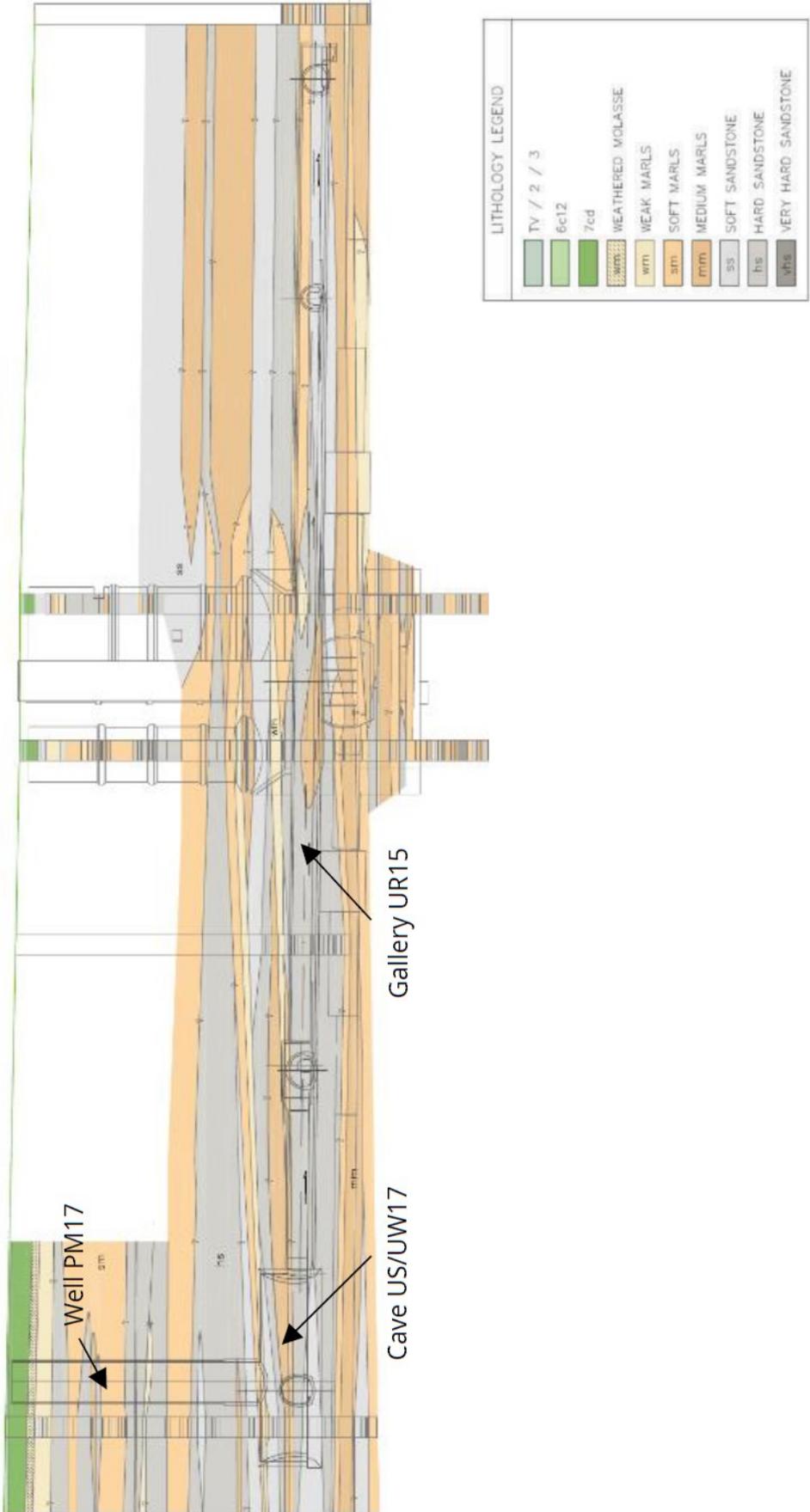


Abbildung 12: Geologischer Schnitt des LHC Point 1 Probenentnahmestelle mit der Klassifizierung nach Fern et al. (2018) zeigt den heterogenen Aufbau der Molasse im Bereich der Bauarbeiten welche eine Herausforderung für die weitere Aufbereitung darstellen [1, 2]

3. Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterial

Die Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterial wird in Zeiten von nachhaltiger Rohstoffnutzung und Kreislaufwirtschaft immer wichtiger. Dabei ist die anfallende Menge an Ausbruchsmaterial, welche beim Bau anfällt, oft beträchtlich. Die beim Bau des Tunnels anfallenden Mengen, wurden in der Vergangenheit meist auf Deponien entsorgt. Diese Entsorgung der Ausbruchsmaterial kann bei Projekten Kosten in der Höhe von bis zu 15% der Gesamtprojektkosten annehmen [36]. Resch (2012) [37] gibt einen Überblick über die diversen Randbedingungen, welche bei der Verwertung von Tunnelausbruchsmaterial berücksichtigt werden müssen (Abbildung 13).

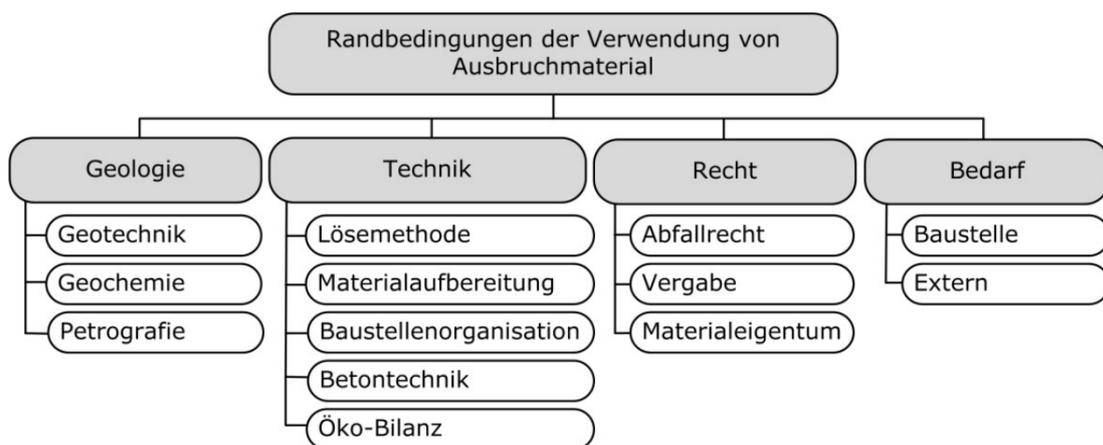


Abbildung 13 Darstellung der zu berücksichtigenden Randbedingungen für die Verwendung von Tunnelausbruchsmaterial aus Resch (2012) [37]

Neben dem grundlegenden Aspekt, welches Material durch die vorgegebene Geologie überhaupt zur Verfügung steht, müssen auch die Aspekte der technischen Machbarkeit, unterschiedliche rechtliche Aspekte und ebenfalls ein etwaiger Bedarf an dem Material geprüft werden. Um eine dezidierte Aussage über die Verwendung des Ausbruchsmaterial treffen zu können, müssen diese Randbedingungen im Projektverlauf untersucht werden, wobei der Detaillierungsgrad mit dem Planungsfortschritt immer weiter zunimmt. In der Projektplanung ist vor allem die Entscheidung wieviel Deponievolumen, welche zusätzlichen Anlagen bzw. welche zusätzliche Infrastruktur für eine Deponie genehmigt werden müssen, direkt von der Entscheidung der Wiederverwertung abhängig. Das Ziel von zukünftigen Tunnelbauprojekten soll es sein, dass die Menge an Material, welches deponiert werden muss, reduziert wird und indessen die Verwertung in unterschiedlichen Applikationen forciert wird [38]. Dieser Zugang zum Handling von Ausbruchsmaterial bringt einerseits ökologische Vorteile, durch zum Beispiel einen geringeren Landschaftsverbrauch aufgrund des verminderten Deponievolumens und reduzierten Transportaufkommens, andererseits auch Vorteile im Hinblick auf die nachhaltige Ressourcennutzung von primären Gewinnungsstätten von Rohstoffen. Für das Tunnelbauprojekt selbst, kann die

Wiederverwertung von Tunnelausbruchsmaterial auch wirtschaftlich einen positiven Einfluss haben. Hierbei gilt es, die Verwendungsmöglichkeiten nach ihrem wirtschaftlichen Nutzen zu gliedern und zu prüfen. Diese Verwendungsmöglichkeiten können innerhalb des Projektrahmens sein, mit dem prominenten Beispiel der Gesteinskörnung für die Betonherstellung aber auch in Kreisläufe außerhalb des Projekts zugeführt werden. Möglichkeiten sind die Verwertung des Ausbruchsmaterial als Industriemineral, die Substitution von Primärrohstoffen, sowie eine Verwertung des Ausbruchsmaterial als sogenannter Recyclingrohstoff [39]. Hierbei gelten unterschiedliche Anforderungen an das Material. Beim Einsatz als Recyclingrohstoff sind vor allem die geotechnischen Parameter des Gesteins wichtig, wobei beim Einsatz als Substitut für Primärrohstoffe oder als Industriemineral die geochemische und mineralogische Zusammensetzung wichtig ist. Die Anforderungen können wie zum Beispiel in der ÖBV-Richtlinie (2015) [40] beschrieben, in der von der deutschen Bundesanstalt für Geowissenschaften herausgegeben Buchreihe „Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden“ nachgeschlagen werden [41–49]. Konkrete Verwertungsmöglichkeiten müssen entsprechend detaillierteren Prüfungen unterzogen werden. Die Anforderungen an die geotechnischen Parameter jedoch auch geochemischen Parametern einzuhaltenden Grenzwerte für die Verwendung als Recyclingrohstoff müssen aus den entsprechenden Normen oder Richtlinien entnommen werden. Wie in *Abbildung 13* dargestellt beeinflussen auch rechtliche Bestimmungen die Entscheidung, ob das Tunnelausbruchsmaterial einer weiteren Verwendung zugeführt werden kann oder nicht. Dabei ist auf die im Land des Projektes geltenden Rechtsvorschriften zu achten. Im Falle des CERN-Projekts, ist hier unter anderem die Gesetzgebung der Europäischen Union und Frankreich sowie die Schweizer Rechtsprechung anzuwenden. In der derzeitigen Gesetzeslage der Europäischen Union gilt Tunnelausbruchsmaterial als Abfall. Für die Weiterverarbeitung von Abfall ist es wichtig, die geltenden Abfallrichtlinien zu beachten. Das Abfallende eines Abfall kann dann erreicht werden, wenn das angefallene Material einer entsprechenden Abfallbehandlung oder auch Aufbereitung zugeführt wird und eine eindeutige Verwendung dafür gefunden wurde [50].

3.1. Future Circular Collider (FCC)

Das CERN (Europäische Organisation für Kernforschung) ist eines der weltweit führenden Forschungszentren für Teilchenphysik. Es wurde 1954 gegründet und befindet sich in der Nähe von Genf, an der Grenze zwischen der Schweiz und Frankreich. Am CERN wird der derzeit größte Teilchenbeschleuniger der Welt betrieben, der Large Hadron Collider (LHC). Der LHC ist ein Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 27 Kilometern. Hier werden Protonen auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und dann kollidiert, um die fundamentalen Bausteine der Materie und Kräfte zu untersuchen. Derzeit plant das CERN das Future Circular Collider (FCC)-Projekt, das als Nachfolger des Large Hadron Colliders (LHC) dienen soll. Das FCC-Projekt wird voraussichtlich einen unterirdischen Ringbeschleuniger mit einem Umfang von knapp 100km umfassen, der dazu verwendet wird, Teilchen auf noch höhere Energien als der LHC zu beschleunigen und zu kollidieren. Das Projekt wird

voraussichtlich mehrere Phasen umfassen, beginnend mit einem 100-TeV-Proton-Proton-Kollider, gefolgt von einem Elektron-Positron-Collider mit einer Energie von bis zu 350 GeV. Die geplante Gesamtleistung des FCC-Projekts würde es ermöglichen, neue physikalische Phänomene zu erforschen, die derzeit noch nicht verstanden werden [51].

Für eine erfolgreiche Machbarkeitsstudie des geplanten FCCs ist die bautechnische Gestaltung der Infrastruktur, welche die Versuchseinrichtungen beheimatet, ein wichtiger Faktor. Die geplante Infrastruktur der ersten Ausbaustufe dem sogenannten FCC lepton collider (FCC-ee) besteht wie in *Abbildung 14* ersichtlich aus unterschiedlichen Bauwerken. In *Tabelle 1* werden die wichtigsten Bauwerke und ihre Dimensionen aufgelistet.

Tabelle 1 Übersicht der wichtigsten Bauwerke des FCC-ee mit entsprechenden Dimensionen [52]

Anzahl	Beschreibung	Länge/Tiefe	Durchmesser/Abmessungen
1	Maschinentunnel	ca. 91 km	5,5 m
14	Vertikalschächte	140-400 m	12-18 m
8	Servicekavernen	100-150 m	h=15 m b=25 m
4	Versuchskavernen	66m	h=30 m b=30 m
2	Strahlentransfertunnel von LHC	4.1 km und 6.1 km	5,5 m
2	Strahlentransfertunnel	2 km	5,5 m
-	Bypass-tunnel	Gesamt ca. 5 km	5,5 m
18	Anschlusskavernen	variabel	variabel
2	Klystron Galleries	1078 m und 1990 m	h=9,8 m b=5,4 m
60	Elektronischen	25m	6 m

Die Gesamtlänge der geplanten unterirdischen Infrastrukturen beträgt ca. 140 km und es werden 9 Millionen m³ Ausbruchsmaterial prognostiziert [52]. Die derzeitige Variante sieht einen quasi kreisförmigen Tunnel vor, welcher durchschnittlich 300m über Meereshöhe liegt. Neben der unterirdischen Infrastruktur wird auch über Tage bei den Zugängen eine neue Infrastruktur errichtet.

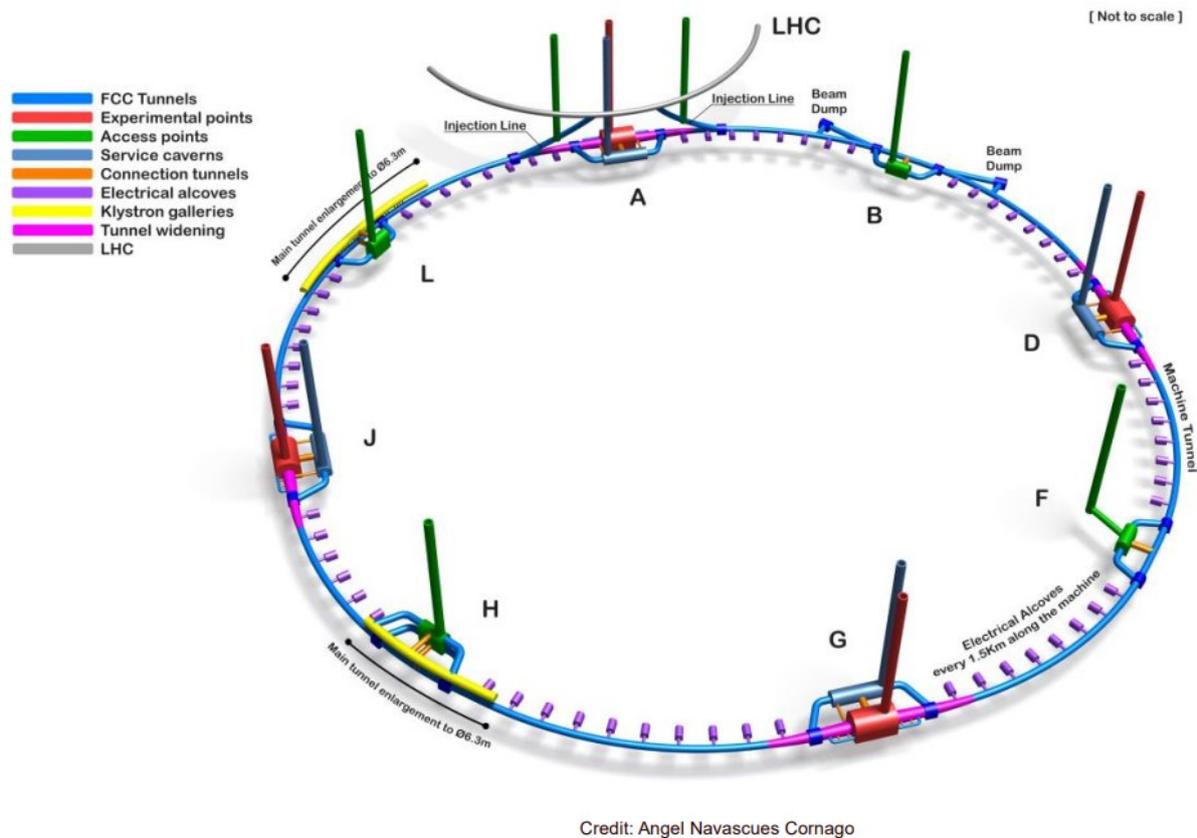


Abbildung 14 Schematische Darstellung der geplanten Infrastruktur des FCCs [52]

Eine große Herausforderung ist die Positionierung des Colliders im Genfer Becken. Dabei müssen neben den geologischen Gegebenheiten, möglichst kurzen Wegen zu der bereits bestehenden Infrastruktur des CERN, auch die Infrastruktur über Tage berücksichtigt werden. Bei der Positionierung der Schächte muss darauf geachtet werden Orte auszuwählen, welche in Einklang mit Lebensräumen, Naturschutzgebieten und auch mit den gegebenen topographischen und natürlichen Verhältnisse sind. Die technische Machbarkeit des Baus wurde untersucht und das Ergebnis war, dass bereits bestehende Tunnelbaumethoden für den Bau angewendet werden können. Die Spannweiten der großen Experimentkavernen von 35m sind angesichts der prognostizierten Untergrundverhältnisse geotechnisch eine Herausforderung. *Abbildung 15* zeigt das vorgegebene Projektgebiet, die Lage des bereits vorhandenen Large Hadron Collider (LHC) sowie die derzeitig geplante Positionierung des FCC-ee. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass der Großteil der unterirdischen Infrastruktur nicht in der Schweiz, sondern in Nachbarstaat Frankreich liegt. Dies bringt eine zusätzliche Herausforderung in Bezug auf die bei der Planung und bei Bau zu beachtenden Gesetzen und Vorschriften. Die bereits erwähnten ungefähr 9Millionen m³ Ausbruchsmaterial bestehen aus 95% aus Molassematerial des Genfer Beckens, welches hauptsächlich aus Mergel und Sandstein besteht und 5% Kalkstein [52].

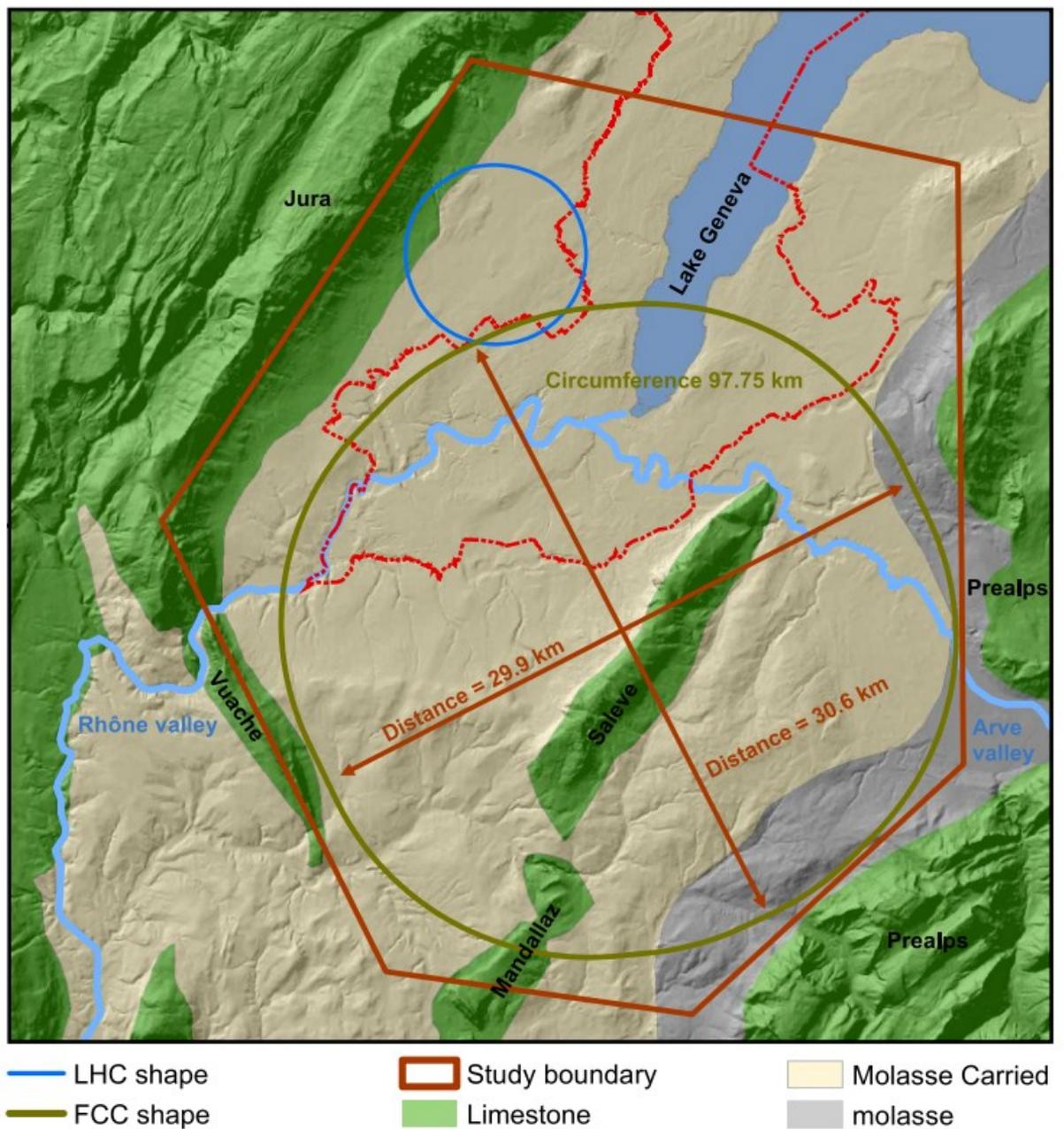


Abbildung 15: Darstellung des Projektgebietes, Überblick über die geologischen Verhältnisse und der Position des LHC und mögliche Position des FCC [52]

Diese Positionierung wurde unter anderem aus dem Grund gewählt, da beim Bau des Large Electron-Positron (LEP) und des LHC gute Erfahrungen mit den Tunnelvortrieb in der Molasse gemacht wurden. Im Gegensatz dazu, gab es beim Bau des LEP einen Wassereintrich im Jurakalkstein was den Bau dort negativ beeinflusst hat und in den Planungen hier berücksichtigt wurde. Die Tiefenlage des Tunnels wurde einerseits durch den Genfersee beeinflusst, jedoch auch die Schachttiefe und der davon abhängige Verbrauch an Material zur Herstellung der Versorgung des FCC zählen zu den Einflussfaktoren. Aus den bereits erläuterten Faktoren wurde das Projektgebiet schlussendlich durch die Voralpen im Südosten

und Osten, das Vuache-Gebirge im Westen, dem Jura Gebirge im Nordwesten und dem Genfer See im Norden eingegrenzt [52].

Für die Auswahl der idealen Variante für die Lage des Tunnels wurde ein neues Softwaretool angewandt. Basierend auf einem geologischen 3D Modell, welches die Topografie sowie die geologischen Verhältnisse berücksichtigt, konnte unterschiedlichste Varianten geprüft werden. Bei diesem Tunneloptimierungstool (TOT) können die Randbedingungen definiert werden und dadurch relativ einfach eine Aussage basierend auf dem vorgegebenen Modell erreicht werden. Hierbei sei zu beachten, dass die Resultate des TOT natürlich stark von der vorhandenen Datengrundlage im 3D Modell abhängt. Als Datengrundlage können unterschiedlichste vorhandene Ergebnisse wie Bohrlochdaten, Aufzeichnungen aus bereits durchgeführten Projekten, bzw. vom geologischen Dienst zur Verfügung gestellte Daten herangezogen werden. Beim FCC-Projekt wurde der Umfang des Tunnels vor Allem durch die physikalischen Ziele vorgegeben. Die in Abada, Abbrescia et al. 2019 [53] favorisierte Lösung beschreibt derzeit einen Verlauf der zu 90% in der für den Tunnelbau präferierten Molassezone liegt und die schwieriger zu durchörternden Jura Kalksteine vermeidet. Ein kleines Stück der derzeitigen Linienführung passiert jedoch den Mandallaz-Kalkstein und ebenfalls die glazialen Sedimente unterhalb des Genfersees. *Abbildung 16* zeigt den Verlauf des Tunnels durch die unterschiedlichen Geologien. Ebenfalls ersichtlich ist die Neigung des Tunnels, einerseits um die Schachttiefe zu reduzieren, andererseits um die Entwässerung zu erleichtern (Zitat).

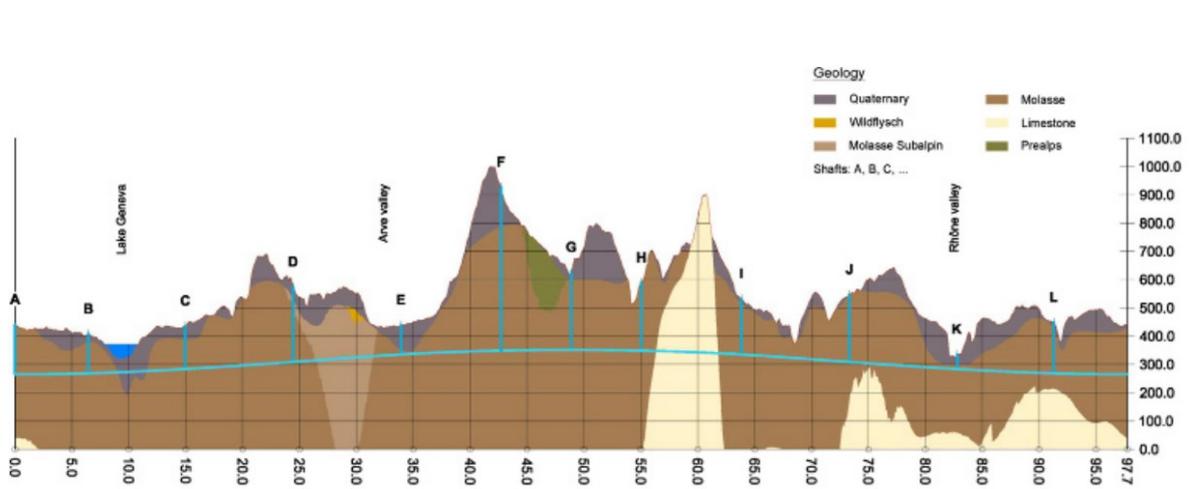


Abbildung 16: Abwicklung der Linienführung des Tunnels inklusive der Topografie und der Geologie aus [52]

Mit zunehmenden Projektfortschritt ist es notwendig, dass neben der Forschung der für die künftigen physikalischen Versuche notwendigen Materialien und Technologien auch eine detailliertere Erkundung des Untergrunds durchgeführt wird. Dies ist notwendig, um die Projektkosten für die Errichtung der Infrastruktur besser abschätzen zu können und ebenfalls, um die Projektrisiken zu reduzieren. Durch die Kombination aus geologischen Kartierungen

obertage, dem Einsatz von direkten Erkundungsmethoden und indirekten Erkundungsmethoden sowie Laboruntersuchungen, soll ein ausreichendes Verständnis über die zu erwartende Geologie erlangt werden. Anhand dieser Ergebnisse wird die Linienführung abermals angepasst, um die bestmöglichen Bedingungen für die Herstellung der Infrastruktur zu erreichen. Die Abmessungen der Infrastruktur werden durch die erforderliche Ausrüstung des Colliders bestimmt. Als primäre Vortriebsmethode wird ein maschineller Vortrieb aufgrund der zu erwartenden Geologie favorisiert. Die Aufweitungen für die Kavernen sowie die Nischen werden anderwärtig hergestellt. Wie viele Baulose tatsächlich ausgeschrieben werden, hängt von der optimalen Bauzeitplanung des Gesamtprojektes ab. Auf jeden Fall hat die Wahl des Vortriebsverfahren starke Auswirkungen auf das anfallende Ausbruchsmaterial [54]. Der Vortrieb der Schächte soll bergmännisch erfolgen.

3.2. „Mining the Future“ Wettbewerb

Um neue Ideen zur Verwertung von Molasseaushubmaterial zu generieren, wurde mit dem „Mining the Future“ Wettbewerbs eine Plattform geschaffen, auf welcher Möglichkeiten vorgestellt werden konnten, das Aushubmaterial in unterschiedlichsten Applikationen zu verwenden.

Mit der Unterstützung des EU finanzierten Horizon 2020 Future Circular Collider Innovation Study (FCCIS) Projektes, wurde der „Mining the Future“ Wettbewerb von der Montanuniversität Leoben, CERN und dem FCC-Projekt organisiert. Ziel dieses Ideenwettbewerbs war es, innovative Lösungen für Produkte oder Prozesse zu finden, welche eine möglich ganzheitliche Verwertung des beim Bau anfallenden Materials erlauben. Für den öffentlich ausgeschriebene Wettbewerb konnten die Projekte von April 2021 bis Oktober 2021 eingereicht werden und ein Konsortium von 10 Personen aus unterschiedlichen Bereichen der Wissenschaft und der Industrie wählte folglich vier Projekte in die Endrunde aus. Dabei hatten die verbliebenen Projektteams in einer zweiten Runde von Januar 2022 bis Juli 2022 Zeit, ihre Einreichungen zu verbessern und zu detaillieren. Die Kriterien zur Einreichung der Projektideen waren unter anderem ein Technologie-Reifegrad (TRL) von 3 bei Einreichung, welcher bis zum Baustart auf 9 sein soll, sodass die vorgestellten Technologien auch eingesetzt werden können. Die eingereichten Ideen zeigen die Potentiale für Molassematerial als Rohstoff in unterschiedlichsten Bereichen auf. Aufbauend auf den Ideen soll eine gesamtheitliche Lösung gefunden werden, um die prognostizierten 9Mio m³ Tunnelausbruchsmaterial bestmöglich zu verwerten. Die Projekte wurden von der Jury unter den Gesichtspunkten der technischen Machbarkeit, der wirtschaftlichen Rentabilität, dem gesellschaftlichen Wert und der Relevanz der Lösung für dieses Projekt evaluiert. Nachfolgend sollen die vier Endrundenprojekte näher beschrieben werden. Bei der Reihenfolge der vorgestellten Projekte wurde keine Rücksicht auf die Bewertungen der Jury genommen [55].

3.2.1. Molassematerial im Spritzbeton

Beton ist ein wichtiger Baustoff bei jedem Tunnelbauprojekt. Die drei Hauptbestandteile eines Betons sind Gesteinskörnungen, Zement und Wasser. Eine Möglichkeit der Verwendung des Aushubmaterials wäre es, dieses als Gesteinskörnung der Betonproduktion zuzuführen. Ein Projektteam bestehend aus einem Konsortium von AMBERG Engineering, Medusoil, Mobbob, Holcim, Versuchsstollen Haggerbach, Pagani Lanfranchi und Bilger hat sich unter anderem mit diesem Thema befasst und unter dem Titel „*CER3N: Recycle, Reinvent, Revalorize - Molassic excavated materials by harnessing digital & sorting technologies*“ eine Möglichkeit dazu vorgestellt. Die ersten Erkenntnisse sollen bereits durch die Auswertung der Bohrdaten in Echtzeit gewonnen werden um daraus bereits während des Bohrvorgangs eine Abschätzung der Zusammensetzung des anfallenden Materials möglich sein. Als der in diesem Projekt vorgestellte Schlüsselschritt kann die Klassierung der heterogenen Molasse direkt nach dem Ausbrechen vor Ort gesehen werden. Dieser Schritt soll dazu dienen, um Grundrohstoffe einheitlicher Korngröße und ähnlichen Eigenschaften für eine nachfolgende Verarbeitung zu

gewinnen. Die hierbei gewonnenen Kornklassen, können später je nach Verwendungszweck, beliebig gemischt und dem Einsatzzweck zugeführt werden. Ebenso soll die Verwendung bereits etablierter Technologien in den Bereichen Umweltschutz und Aufbereitung des Materials, sowie eine prozessbegleitende Materialwirtschaft, zum Erfolg dieses Projektes beitragen. Um das Material am Markt vertreiben zu können, ist es geplant, eine Plattform zu schaffen, wo die unterschiedlichen aufbereiteten Materialien für unterschiedliche lokale Nutzungen angeboten werden können. Die Möglichkeiten der weiteren Verwendung sind unter anderem die Verwendung des Materials in der Herstellung von Ziegeln, den Einsatz als Gesteinskörnung für die Herstellung von Betonfertigteilen oder auch den Einsatz für Beton welcher vor Ort für den Bau des FCCs benötigt wird. Die Entscheidung für welche Weiterverwendung das Material geeignet ist, wird auf Basis der Ergebnisse von begleitenden Untersuchungen zur Bestimmung von geotechnischen Parametern des Materials getroffen. Die Verwendung bzw. Aufbereitung von kontaminiertem Material wurde hierbei nicht erläutert. Im Zuge des Projekts wurden ebenfalls Versuche an Betonproben durchgeführt, wobei dabei die verwendeten Gesteinskörnungen vollständig aus Molassematerial bestand oder nur teilweise (55%). Die Ergebnisse der Druckfestigkeit zeigen sowohl für die Proben welche vollständig aus Molassematerial besteht als auch für die Probe, welche nur aus 55% Molassematerial besteht, deutlich geringere Druckfestigkeiten als die Probe, welche mit einer genormten Gesteinskörnung hergestellt wurde (Tabelle 2) [56].

Tabelle 2 Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung der Druckfestigkeiten mit Unterschiedlichen Gesteinskörnungen

Probe	Anteil an Gesteinskörnungen aus dem Molassematerial [%]	Erreichte Druckfestigkeit nach 7 Tagen [MPa]
1	100	7,0
2	55	14,8
3	0	26,7
Zur Herstellung der 10x10x10cm Probekörper wurde einheitlich 330kg/m ³ Optimo 4 Zement verwendet		

3.2.2. Molassematerial als Baurohstoff

Das Projekt „Molasse is the new ore“ welches von einem Konsortium aus BG Ingénieurs Conseils SA, Vicat, Circulère, Sigma-Betón, Vigier, MS und Induni eingereicht wurde, beschäftigt sich mit der Idee, das Molassematerial als Rohstoff für unterschiedliche Applikationen zu verwenden. Um die großen Mengen an Aushubmaterial bestmöglich verarbeiten zu können wurden mehrere unterschiedliche Möglichkeiten zur Verwendung berücksichtigt. Als Ziel wird angegeben, die Menge an zwischengelagertem Material so gering wie möglich zu halten und eine möglichst vollständige Verwendung des Materials zu erreichen. Bereits am Förderband sollen Onlineanalysen des Ausbruchsmaterials wie foto- optische Bestimmung der Korngrößen sowie die Bestimmung der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung des Materials durchgeführt werden. Durch die Auswertung des

Messergebnisses, kann das Material danach durch Vergleich mit vorgegebenen Grenzwerten für unterschiedlichste Anwendungen den entsprechenden Massenströmen zugeordnet werden. Weiterführende Parameter wie z.B. die einachsiale Druckfestigkeit oder das Verhalten gegen Abrasivität, müssen durch die entsprechenden Laborversuche bestimmt werden. Die vom Konsortium erwähnten Einsatzmöglichkeiten umfassen den Einsatz in Low Carbon Zemente, Roherdebeton und als Gesteinskörnung in unterschiedlichen Anwendungen wie z.B. Spritzbeton. Für Material, welches durch Kohlenwasserstoffe kontaminiert ist, wird eine biologische Neutralisierung dieser mittels Einsatzes unterschiedlicher Organismen vorgeschlagen, um es den weiteren Anwendungen zuführen zu können. Durch den Einsatz in vielen unterschiedlichen Anwendungen soll den Folgen eines Überangebotes an Material am lokalen Rohstoffmarkt entgegengewirkt werden [57].

3.2.3. Molassematerial in Roherdeziegel

Beim Projekt „*From Molasse to brick*“ welches von einem Konsortium bestehend aus Arcadis und Briques Technic Concept eingereicht wurde, steht die Verwendung des Feianteils des Molassematerials im Vordergrund. Dabei soll nach dem Abtrennen der Grobfraction und Verwertung dieser in diversen Anwendungen, der Feianteil zur Herstellung von Rohmauerziegel verwendet werden. Der Prozess sieht vor, das Material nach dem Sieben in die einzelnen Kornfraktionen, entsprechend Rezept zu mischen und daraus unterschiedliche Ziegelklassen herzustellen. Bei der Herstellung der Masse zum Pressen der Ziegel wird Wasser und Weißkalk zugegeben welche als Bindemittel fungieren und anschließend geformt. Der Zusatz eines Mineralisierungsmittels soll den Ziegel bei Außenanwendungen vor Erosion schützen. Bei Bauwerken ist es wichtig, dass die verwendeten Baustoffe zertifiziert sind, damit es hierbei in Versicherungsfällen zu keinen Problemen aufgrund eines nicht konformen Baustoffes kommt. Der Einsatz der hergestellten Ziegel für Bauwerke bis 3 Stockwerke wurde vom wissenschaftlich-technischen Zentrum für Bauwesen (CSTB) in Frankreich im Oktober 2021 zertifiziert. Die Herstellung von Roherdeziegel hat gegenüber gebrannten Ziegeln den Vorteil einer kohlenstoffärmeren Produktion [58].

3.2.4. Molassematerial als Oberbodenmaterial

Aus der Zusammenarbeit von Edaphos Engineering, Induni, Mont-Blank Valorisation und Microhumus entstand das Projekt „*From Wastes to soil*“. In diesem Projekt wird die Herstellung von Oberbodenmaterial aus der Vermengung von Molassematerial und organischen Reststoffen beschrieben. Hierbei wird durch den gezielten Einsatz von Bodenorganismen und Pilzen die natürliche Humusproduktion angekurbelt. Durch die Möglichkeit auf verschiedenen Mikroorganismen zurückgreifen zu können, kann dieses Verfahren auf die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden um einen negativen Einfluss in das bestehende Ökosystem sowie die lokale Biodiversität zu verhindern. Um die Machbarkeit im kleinen Maßstab testen zu können, wurde das beschriebene Verfahren an 1m³ Molassematerial angewendet und die Resultate waren durchaus positiv. Neben der Einhaltung der Grenzwerte für die Verwendung im landwirtschaftlichen Bereich zeigten das

Material ebenso eine hohe mikrobielle Aktivität. Der Vorteil dieser Verwendung ist, dass die geotechnischen Parameter des Molassematerial keinen entscheidenden Einfluss auf die Verwertungsmöglichkeit als Oberbodenmaterial haben. Bei auftretenden Verunreinigungen muss jedoch vor Verwendung des Materials eine entsprechende Behandlung durchgeführt werden [59].

4. Methodik

In diesem Kapitel; sollen die verwendeten Untersuchungsmethoden bzw. nachfolgende Auswertungen näher erläutert werden.

4.1. Probennahme

Die Proben für die weiteren Untersuchungen stammen aus dem Ausbruchsmaterial, welches beim Ausbau des Large High-Luminosity Hadron Collider (HL-LHC) am CERN in Meyrin beim Punkt 1 ATLAS auf der Schweizer Seite angefallen ist (*Abbildung 17*).

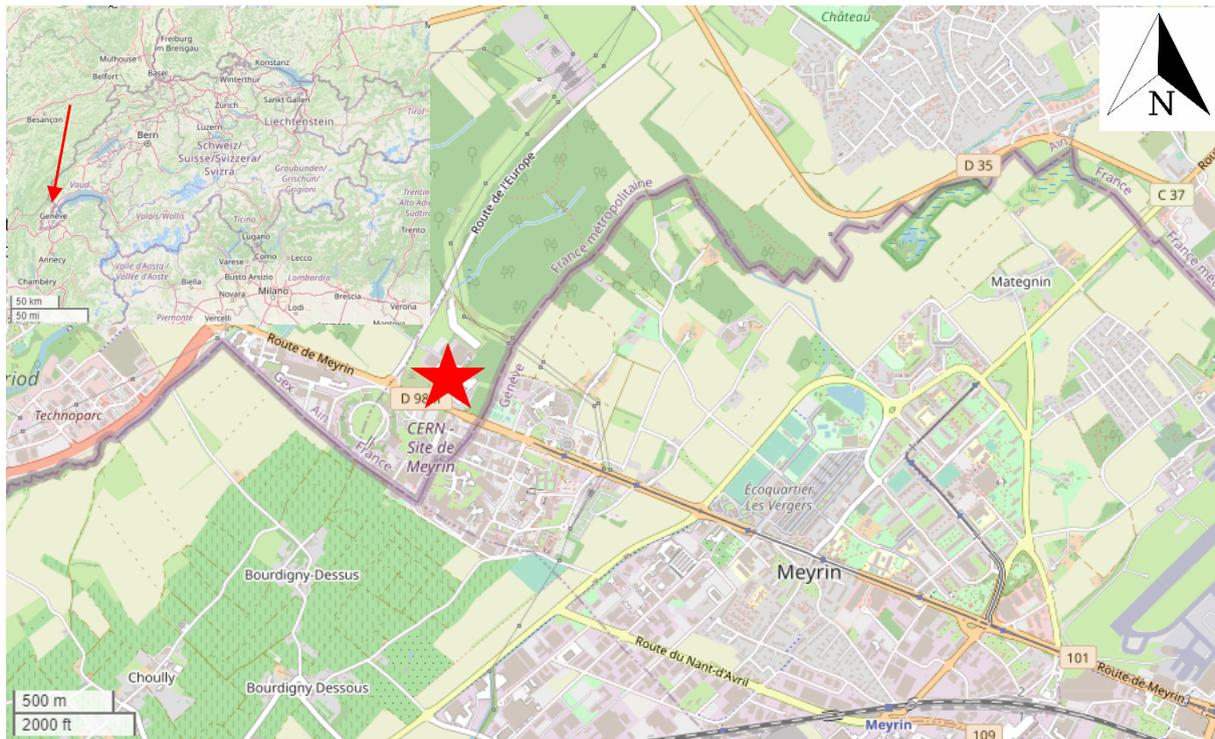


Abbildung 17: Überblickskarte des Probenursprungs in der Nähe von Meyrin (Schweiz) ©OpenStreetMap [60]

Das Probenmaterial ist eine Gesamtprobe, welche so beim Ausbruch mittels konventioneller Tunnelvortriebsverfahren angefallen ist. Es wurde daher keine Unterscheidung der einzelnen Lithologien bei der Probennahme getroffen und somit stellt diese eine Mischung der vorkommenden Molasselithologien dar. Die tatsächliche Probennahme wurde am Tunnelforschungszentrum Zentrum am Berg (ZAB) der Montanuniversität Leoben am Erzberg in der Gemeinde Eisenerz durchgeführt. Hierzu wurden ca. 40 Tonnen an Aushubmaterial des HL-LHC Point 1 angeliefert und eingelagert (*Abbildung 18*).



Abbildung 18: Angeliefertes Material aus welchem die Probe für die Versuche entnommen wurden am ZAB Ursprung CERN HL-LHC-Point 1

Die entnommenen Proben wurden nachfolgend im Labor des Instituts für Subsurface Engineering an der Montanuniversität Leoben für die Durchführung der im weiteren Verlauf näher erläuterten Versuche vorbereitet.

4.2. Korngrößenverteilung

Ermittlung der Korngrößenverteilung

Durch Anwendung einer Sieb- bzw. einer Schlämmanalyse nach ÖNORM EN 933-1 [61] können die Massenanteile einzelner Kornfraktion der Probe bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Analyse können in einem Diagramm als Kurve dargestellt werden und zeigen die Korngrößenverteilung einer Lockergesteinsprobe an. Die Korngrößenverteilung dient als Basis um eine Lockergesteinsprobe klassifizieren zu können und weiters dessen Eigenschaften zu bestimmen. Aus der Siebanalyse zu bestimmende Eigenschaften sind unter anderem die Frostempfindlichkeit, Wasserdurchlässigkeit, Verdichtungsfähigkeit und Filterstabilität. Um eine Probe richtig klassifizieren zu können, ist es wichtig die richtige Analysemethode zu verwenden. Die Siebanalyse ist für Proben im Korngrößenbereich 0,063-90 mm und eine Sedimentationsanalyse ist für Proben mit einem Korngrößenbereich <0,125 mm anzuwenden. Besteht eine Probe aus Korngrößen, welche in die Analysenbereiche beider Methoden fällt, wird eine kombinierte Sieb- und Sedimentationsanalyse durchgeführt. Die Mindestgröße der Messproben ist abhängig von der maximal Korngröße und wird in *Tabelle 3* dargestellt.

Tabelle 3 Mindestmassen der Messproben von Gesteinskörnungen [61]

Korngruppe <i>D</i> (Maximum) mm	Masse der Gesteinskörnungen kg	Volumen der leichten Gesteinskörnung Liter
90	80	—
32	10	2,1
16	2,6	1,7
8	0,6	0,8
≤ 4	0,2	0,3

ANMERKUNG 1 Die Mindestmasse der Messprobe von Gesteinskörnungen anderer Gruppen kleiner als 90 mm darf von den Massen nach Tabelle 1 mit der folgenden Gleichung interpoliert werden: $M = (D/10)^2$

Dabei ist

- M* die Mindestmasse der Messprobe, in kg;
- D* die Korngruppe, in mm.

Bei der Methode der Siebanalyse werden die verschiedenen Kornklassen durch mechanische Siebung in Nass- oder Trockenverfahren voneinander getrennt. Das Trockenverfahren kann dann angewendet werden, wenn sichergestellt werden kann, dass die Gesteinskörnungen nicht zu einer Agglomeration neigen oder die physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörnung durch den Waschvorgang zu stark verändert werden. Die Trennung der Kornklassen erfolgt mit Siebeinsätzen mit unterschiedlichen Maschenweiten, welche zu einem Turm übereinandergestellt werden. Der Siebturm weist von oben nach unten abnehmende Maschenweiten auf, wobei Kornklassen <0,063mm in einem Auffangbehälter am Boden des Siebturms aufgefangen werden. Die restlichen Kornklassen bleiben nach durchgeführter

Siebung auf den entsprechenden Siebeinsätzen zurück. Zu beachten ist bei dieser Methode, dass die Körner bei dieser Methode nicht vollständig voneinander getrennt werden können. Beeinflusst wird diese Trennung vor allem durch die Kornform und die Maschenform des Siebeinsatzes. Um eine möglichst vollständige Trennung zu erreichen, ist es wichtig, dass Überladen der Siebeinsätze zu vermeiden. Nach erfolgter Siebung wird, der die Masse der entsprechenden Kornklasse, welche den Siebeinsatz nicht passieren konnte (Siebrückstand) ermittelt. Dabei ist es wichtig die Masse des Siebes bei der Auswertung des Siebrückstandes von der Gesamtmasse (Siebrückstand + Sieb) abzuziehen. Die einzelnen ermittelten Massen werden ins Verhältnis zur Gesamtprobenmasse gesetzt und in einer Korngrößenverteilung dargestellt. Wenn der Siebverlust (*Gleichung 1*) größer als 1% ist muss die Siebung wiederholt werden.

$$\text{Glg. 1 Siebverlust} = \frac{M_2}{M_1} * 100 \text{ [\%]}$$

M₁ ... Gesamttrockenmasse vor der Siebung

M₂ ... Summe der Siebrückstände und der Fraktion <0,063mm im Auffangbehälter

Ermittlung der Korngrößenverteilung in der Fraktion <0,063mm mittels der Sedimentationsanalyse

Die Analyse der Feinfraktion kann nach ÖNORM EN ISO 17892-4 [62] mit der Sedimentationsanalyse oder dem Pipettierverfahren durchgeführt werden. Im Zuge der Diplomarbeit wurde für die Bestimmung der Feinfraktion die Sedimentationsanalyse angewendet.

Um eine Sedimentationsanalyse der Probe durchführen zu können, muss die Probe, welche sich aus der Kornfraktionen <0,063mm zusammensetzt, zuerst in Suspension gebracht werden. Dieser Vorgang, welcher auch als aufschlämmen bezeichnet wird, dient dazu eine homogene Verteilung der Partikel zu erreichen. Die Suspension wird nach dem Aufschlämmen in einen in der Norm vorgegebenen Messzylinder überführt und gleich anschließend mit dem ersten Messvorgang begonnen (*Abbildung 19*). In definierten Zeitabständen wird ein wie in der Norm definiertes Aräometer in die Suspension getaucht und die Dichte der Suspension an diesem abgelesen. Weiters muss die Temperatur Suspension bei jeder Messung bestimmt werden, da diese die Viskosität des Wassers beeinflusst.

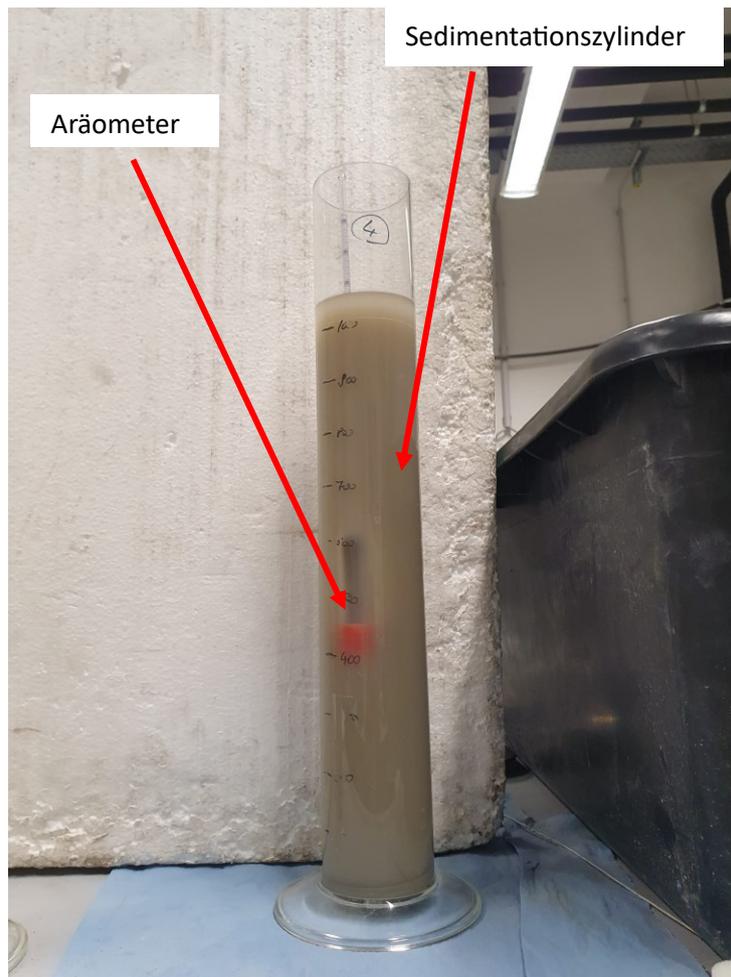


Abbildung 19. Messaufbau beim Sedimentationsverfahren Sedimentationszylinder mit der eingefüllten Suspension und das Aräometer zum Messen der Dichte der Suspension

Die Sedimentationsanalyse beruht auf dem Stokes'schen Gesetz. Das Stokes'sche Gesetz beschreibt die Kräfte, die auf ein kleines, in einer Flüssigkeit schwimmendes Objekt wirken, wenn es sich durch die Flüssigkeit bewegt. Es besagt, dass die Kraft, die auf das Objekt wirkt, proportional zu seiner Geschwindigkeit und seiner Größe ist. Diese Kraft wird auch als Reibungskraft bezeichnet und hängt von der Viskosität der Flüssigkeit ab. Das Sedimentationsverfahren basiert auf dem Prinzip der Schwerkraftabscheidung, wobei Feststoffpartikel durch die Schwerkraft in einer Flüssigkeit sedimentieren. Die Geschwindigkeit, mit der sich ein Partikel in der Flüssigkeit bewegt, hängt von seiner Größe, Form und Dichte ab. Kleinere, leichtere Partikel bewegen sich langsamer als größere, schwerere Partikel. Das Stokes'sche Gesetz kann angewendet werden, um die Sedimentationsgeschwindigkeit von Partikeln in einer Flüssigkeit zu berechnen. Wenn ein Partikel sich durch die Flüssigkeit bewegt, erfährt er eine Reibungskraft, die gegen die Schwerkraft wirkt. Wenn diese Kräfte ausgeglichen sind, bewegt sich der Partikel mit konstanter Geschwindigkeit. Diese Geschwindigkeit wird als Setzungs-Geschwindigkeit

bezeichnet und kann durch das Stokes'sche Gesetz berechnet (*Gleichung 2, Gleichung 3*) werden (aus [63]).

$$\text{Glg. 2 } v = \frac{d^2 \cdot (\rho_k - \rho_w) \cdot g}{18 \cdot \eta}$$

oder

$$\text{Glg. 3 } t = \frac{h}{v} = \frac{18 \cdot \eta}{(\rho_k - \rho_w) \cdot g} \cdot \frac{h}{d^2}$$

t ... Fallzeit [s]

h ... Fallhöhe [m]

v ... Sinkgeschwindigkeit [m/s]

η ... dynamische Viskosität von Wasser [Pa*s]

ρ_k ... Korndichte [kg/m³]

ρ_w ... Dichte von Wasser [kg/m³]

g ... Erdbeschleunigung [m/s²]

d ... Äquivalenzdurchmesser der Körner [m]

Die Formel zeigt, dass die Sinkgeschwindigkeit direkt proportional zum Quadrat des Partikelradius ist. Daraus kann geschlossen werden, dass Körner mit kleineren Korndurchmessern langsamer sedimentieren als Körner mit größerem Korndurchmesser. Ebenfalls wird die Sinkgeschwindigkeit von der Dichte der Flüssigkeit beeinflusst. Eine höhere Korndichte oder eine höhere Dichte der Flüssigkeit führen zu einer höheren Sinkgeschwindigkeit [63].

Bei der Messung mit dem Aräometer wird die Dichte der Suspension gemessen. Die Dichte der Suspension zu der gegebenen Zeit, wird durch das Korngemisch der noch nicht sedimentierten Körner bestimmt. Das Aräometer wird für die Messung immer wieder neu eingesetzt damit vermieden wird, dass die Sedimentation der Körner durch dieses gestört wird. Ebenfalls soll dadurch eine Anlagerung der Körner am Aräometer vermieden werden. Das Einsetzen und Entfernen des Aräometers führt jedoch zu Verwirbelungen in der Suspension, welche die ungestörte Sedimentation beeinflussen. Vor allem am Beginn ändert sich die Dichte der Suspension sehr schnell, dabei ist darauf zu achten, Ablesefehler zu vermeiden [63].

Die Ableseintervalle sind in *Tabelle 4* dargestellt. Während der ersten acht Minuten, verbleibt das Aräometer in der Flüssigkeit, da die kurzen Messintervalle ein Einsetzen und Entfernen des Aräometers nicht zulassen und zu negativen Einflüssen der Sedimentation führen.

Tabelle 4 Ableseintervalle beim Sedimentationsverfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der Feinfraktion [62]

Ablesung	Zeit [min]	Ablesung	Zeit [min]
1	0,5	6	30
2	1	7	60
3	2	8	120
4	4	9	360
5	8	10	1440

Die Einteilung in die unterschiedlichen Kornfraktionen kann nach ÖNORM EN ISO 14688-2 [64] vorgenommen werden. Die dort beschriebene Einteilung ist in *Tabelle 5* beschrieben.

Tabelle 5 Einteilung der Kornfraktionen nach ÖNORM EN ISO 14688-2 [64]

	große Blöcke	> 630 mm
	Blöcke	> 200 mm - 630 mm
	Steine	> 63 mm - 200 mm
Kies	Grobkies	> 20 mm - 63 mm
	Mittelkies	> 6,3 mm - 20 mm
	Feinkies	> 2 mm - 6,3 mm
Sand	Grobsand	> 0,63 mm - 2 mm
	Mittelsand	> 0,2 mm - 0,63 mm
	Feinsand	> 0,063 mm - 0,2 mm
Schluff	Grobschluff	> 0,02 mm - 0,063 mm
	Mittelschluff	> 0,0063 mm - 0,02 mm
	Feinschluff	> 0,002 mm - 0,0063 mm
	Ton	- 0,002 mm

4.3. Fallkegelversuch und Bestimmung der Ausrollgrenze

Einen Grundlegenden Parameter für das Verhalten von bindigen Böden stellt die Plastizitätszahl dar. Diese wird grundsätzlich mit den Zustandsgrenzen von Atterberg ermittelt, welche in der ÖNORM EN ISO 17892-12 [65] festgelegt sind und gibt eine Aussage wie ein Boden auf unterschiedliche Wassergehalte reagiert. Die Zustandsgrenzen werden durch unterschiedliche Versuche bei unterschiedlichen Wassergehalten der Probe bestimmt. Nach Atterberg beschreiben die ermittelten Wassergehalte, die Grenzen zwischen den unterschiedlichen Zuständen des bindigen Bodens (*Abbildung 20*).

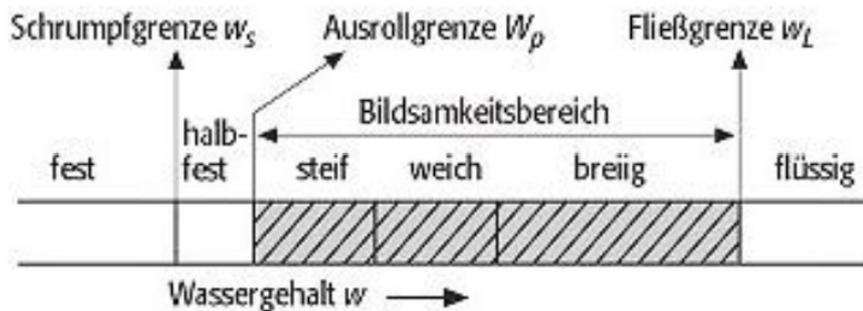


Abbildung 20: Konistenzbalken zur Darstellung der Zustandsgrenzen nach Atterberg [66]

Die Fließgrenze w_L beschreibt den Wassergehalt an der Grenze vom flüssigen zum plastischen Zustand. Dieser Übergang kann als Änderung des Verhaltens eines feinkörnigen Bodens verstanden werden, wo dieser seine Eigenschaften des Fließens verliert. Die Ausrollgrenze w_P beschreibt den Wassergehalt an der Grenze vom Flüssigen zum halbfesten Zustand. Dabei kann der Boden nicht mehr plastisch verformt werden, ohne brüchig zu werden. Die dritte Zustandsgrenze nach Atterberg wird als Schumpfgrenze w_s bezeichnet. Diese beschreibt den Wassergehalt am Übergang vom halbfesten in den festen Zustand. Bei dieser Grenze behält der feinkörnige Boden beim Trocknen sein Volumen. Bei der Änderung des Wassergehalts wird das Wasser im Porenraum durch Luft ersetzt.

Die Plastizitätszahl I_P ist das Ergebnis der Differenz der Fließgrenze w_L und der Ausrollgrenze w_P (*Gleichung 4*).

$$\text{Glg.4 } I_P = w_L - w_P \text{ [%]}$$

Nachfolgend soll die Durchführung der Versuche der für die Berechnung der Plastizitätszahl notwendigen Zustandsgrenzen beschrieben werden [65].

Für die Durchführung der Versuche, muss von den zu messenden Proben mindestens 200g Probenmaterial der Kornklasse $<0,4$ mm, mittels Maschensieb abgesiebt werden. Bei der

Vorbereitung der Proben ist darauf zu achten, diese gut zu homogenisieren, dass ein gleichmäßiger Wassergehalt in der gesamten Probe vorliegt. Die Probenvorbereitung für die Versuche ist bis auf den Wassergehalt ident.

Bestimmung des Wassergehalts

Als Grundlage für die Berechnung der Plastizitätszahl soll hier noch kurz die Bestimmung des Wassergehalts nach ÖNORM EN ISO 17892-1 [67] angeführt werden. Die Bestimmung des Wassergehalts einer Probe erfolgt durch das Trocknen der Bodenprobe bei 105°C bis zur Massekonstanz. Bevor die Probe getrocknet wird, muss diese gewogen und das Ergebnis notiert werden. Nach dem Trocknen wird die Probe erneut gewogen und über *Gleichung 5* der Wassergehalt bestimmt.

$$\text{Glg. 5 } w = \frac{m_f - m_d}{m_d} [\%]$$

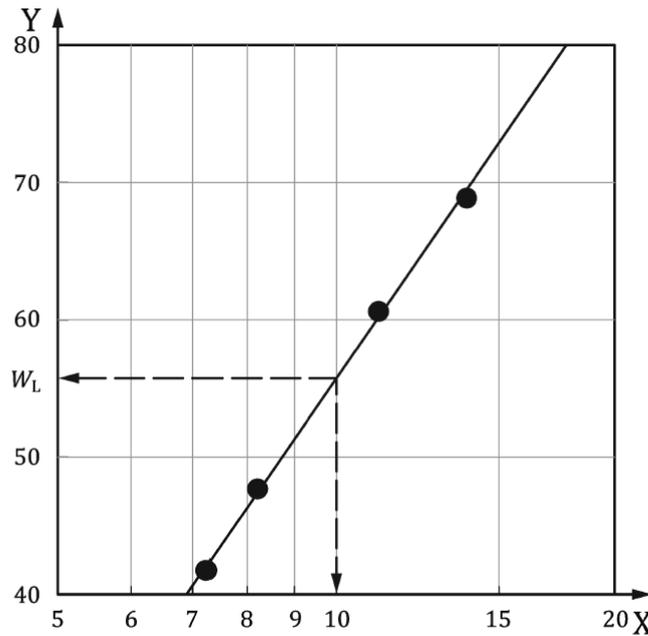
w ... Wassergehalt der Probe [%]

m_f ... Feuchtmasse der Probe [g]

m_d ... Trockenmasse der Probe [g]

Ermittlung der Fließgrenze

Die Fließgrenze beschreibt den Wassergehalt des Bodens, an dem dieser von einem flüssigen in einen plastischen Zustand übergeht. Zur Bestimmung der Fließgrenze sind die Methode des Fallkegelversuchs und der Versuch nach Casagrande standardisiert. Das Fallkegelverfahren liefert Ergebnisse mit höherer Wiederholgenauigkeit und wird daher bevorzugt. Der Versuch nach Casagrande wird aufgrund seiner langen Historie jedoch weiter angewendet. Um die Fließgrenze gut bestimmen zu können, wird bei beiden Versuchen empfohlen diesen 4-mal mit 4 unterschiedlichen Wassergehalten durchzuführen. Die Bestimmung der Fließgrenze erfolgt grafisch aus dem Diagramm auf welchem auf der x-Achse die Schlagzahl (Versuch nach Casagrande) bzw. Eindringtiefe (Fallkegelversuch) aufgetragen wird und auf der y-Achse der Wassergehalt der Probe (*Abbildung 21*).



Legende

- X Eindringung des Kegels (mm)
- Y Wassergehalt (%)

Abbildung 21: Ermittlung der Fließgrenze mittels Fallkegelversuch bei 10mm Eindringtiefe wird der Wassergehalt abgelesen [65]

Fallkegelversuch:

Der Versuchsaufbau für den Fallkegelversuch besteht aus einem Probenbehälter, einem Kegel und einer Messeinrichtung wie in *Abbildung 22 a)* dargestellt. Wie bereits erwähnt muss die Probe vor der Durchführung des Fallkegelversuchs gut durchmischt sein, um einen gleichmäßigen Wassergehalt innerhalb der Probe zu erreichen. Die homogenisierte Probe wird in den Behälter gefüllt und die Oberfläche eben zum Rand des Behälters mit einem steifen Gegenstand abgestreift. Neben einer glatten Oberfläche ist es wichtig, beim Einbau keine Luft im Behälter einzuschließen, da dies die Probenergebnisse beeinflusst. Für den Versuch ist ein Fallkegel, welcher der Norm entspricht zu verwenden. Diese haben ein standardisiertes Gewicht und einen standardisierten Spitzenwinkel (*Tabelle 6*).

Tabelle 6 Kegeltypen sowie Versuchsbedingungen für den Fallkegelversuch [65]

Kegeltyp	60 g/60°	80 g/30°
zulässiger Eindringungsbereich durch den Kegel	7 mm bis 15 mm	15 mm bis 25 mm
Fließgrenze (w_L), ermittelt bei einer Eindringtiefe von	10 mm	20 mm
maximale Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen	0,4 mm	0,5 mm

Der Kegel wird so platziert, dass seine Spitze die Oberfläche leicht berührt, jedoch nicht eindringt. Anschließend wird der Kegel entriegelt und dieser dringt in die Probe ein. Die Eindringtiefe kann am montierten Messschieber nach 4-6 Sekunden abgelesen werden. Der

Versuch gilt als gültig, wenn die Eindringtiefe innerhalb der in *Tabelle 6* angegebenen Grenzen liegt. Wurde beim Versuch ein zulässiges Ergebnis erzielt, werden ca. 15 g der Probe entnommen, um den Wassergehalt bestimmen zu können. Die restliche Probe wird aus dem Behälter entfernt dieser gut gereinigt und für die nächste Messung vorbereitet. Für die anschließende Messung wird der Wassergehalt der Probe verändert und die Messung erneut durchgeführt. Beim Vierpunktversuch werden vier Messungen bei unterschiedlichen Wassergehalten durchgeführt. Die Ergebnisse der vier Messungen werden mit einer Geraden verbunden und die Fließgrenze w_L als Schnittpunkt bei 10mm Eindringtiefe aus dem Diagramm abgelesen.

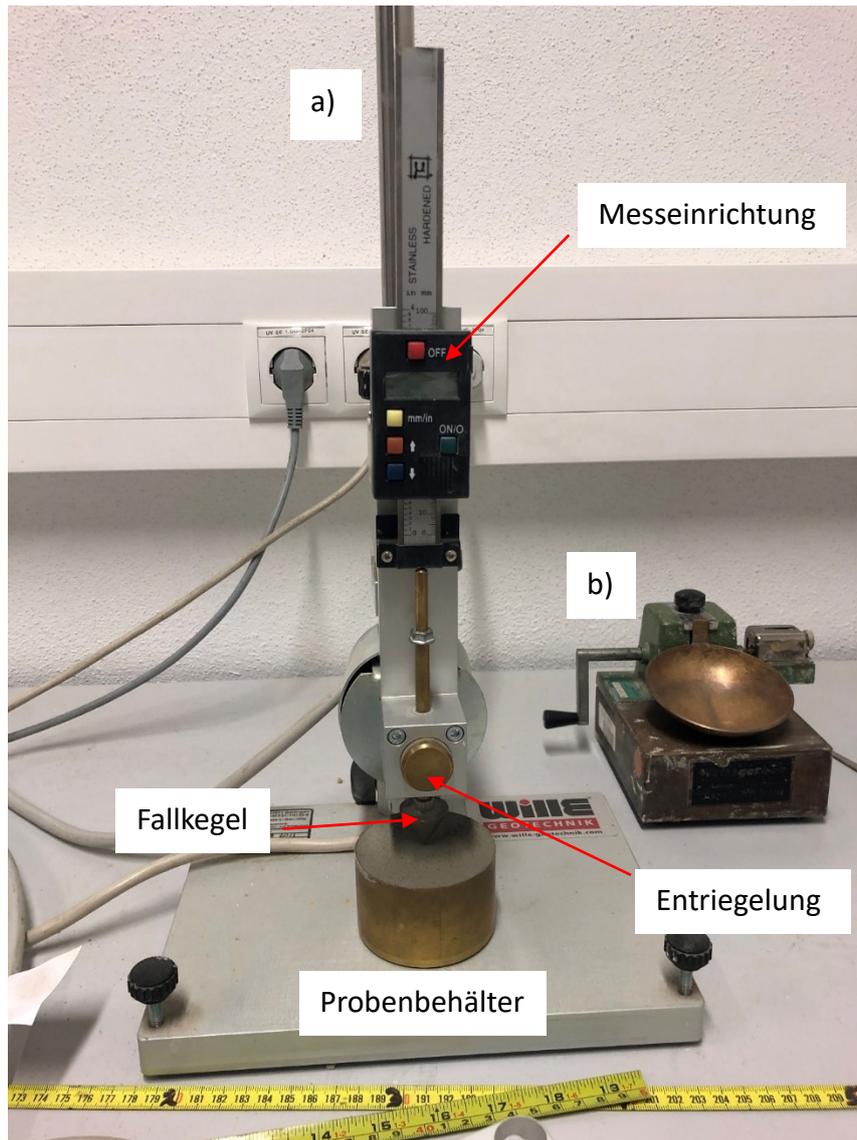
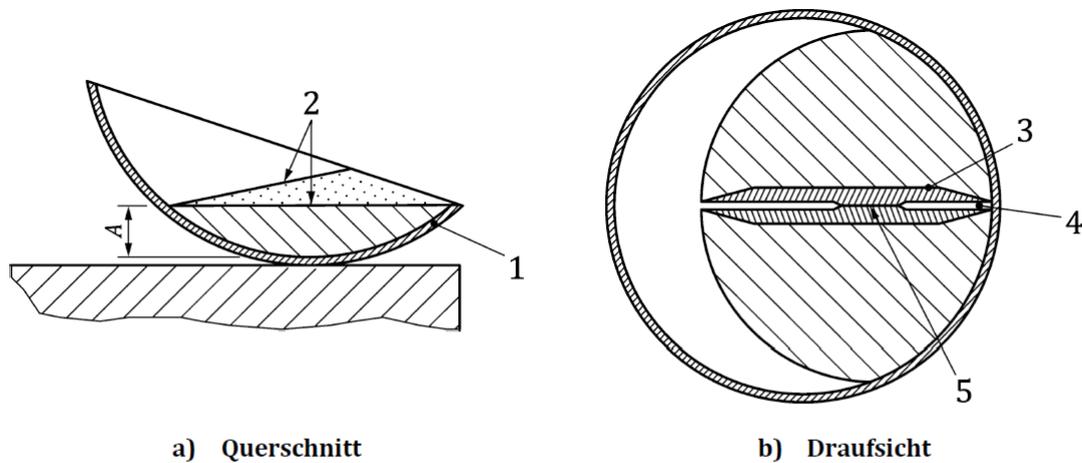


Abbildung 22 a) Aufbau Fallkegelversuchseinrichtung b) Messgerät Versuch nach Casagrande

Der traditionellere, jedoch mit geringerer Wiederholgenauigkeit durchführbare Versuch zum Bestimmen der Fließgrenze ist der Versuch nach Casagrande. Wie in *Abbildung 22 b)* dargestellt besteht der Versuchsaufbau aus einer Schale, in welche die Probe eingebracht wird, und einer

Kurbel mit welcher diese gehoben und wieder fallen gelassen wird. Die homogenisierte Probe wird im unteren Bereich der Schale eingebaut und mit einem standardisierten Furchenzieher wird eine Furche durch die Probe gezogen *Abbildung 23*.



Legende

- 1 Behälter
- 2 Oberflächenebene für den Versuch
- 3 Prinzipskizze der profilierten Seite der Furche als Schnitt
- 4 Boden des Behälters, exponiert durch Furche als Schnitt
- 5 10 mm Schließung der Furche am Endpunkt des Versuchs
- A 10 mm

Abbildung 23: Schematische Darstellung des Versuchs nach Casagrande [65]

Wie beim Fallkegelversuch ist auch hier beim Einbau der Probe das Einschließen von Luft zu vermeiden. Durch einen Mitnehmer wird die Probe bei Betätigung der Kurbel in 10mm Höhe angehoben und in die Ausgangsstellen zurückgefallen gelassen. Die Kurbel ist so lange zu drehen, bis sich die Furche auf einer Länge von 10mm geschlossen hat. Um einen gültigen Versuch zu bekommen, muss die Anzahl der Kurbelumdrehungen zwischen 15 und 40 liegen. Für die Auswertung ist die Anzahl der Umdrehungen bis zum Schließen aufzuzeichnen. Um den Wassergehalt bestimmen zu können, ist eine Probenmenge von ca. 15g zu entnehmen. Beim Vierpunktversuch wird dieser ebenfalls vier Mal mit unterschiedlichen Wassergehalten durchgeführt. Es ist darauf zu achten, dass die Gerätschaften nach jedem Versuch gesäubert werden. Im Diagramm ist die Anzahl der Kurbelumdrehungen auf der x-Achse und der Wassergehalt auf der y-Achse aufzutragen. Als Fließgrenze ist der Wassergehalt bei 25 Kurbelumdrehungen definiert.

Ermittlung der Ausrollgrenze w_{pF}

Als Ausrollgrenze wird der Wassergehalt definiert, in dem der Boden vom bildsamen in den halbfesten Zustand über geht. Die Ausrollgrenze wurde mit dem Versuch zur Bestimmung der Ausrollgrenze nach ÖNORM EN ISO 17892-12 [65] bestimmt. Zur Versuchsdurchführung ist die Probe vor Entnahme vollständig zu homogenieren. Danach müssen 15g – 20g der Probe entnommen werden und zu einer Kugel geformt. Die Kugel wird anschließend halbiert und die Hälfte wiederum gedrittelt. Jedes Drittel wird auf einer saugfähigen Unterlage so lange

gerollt, bis ein schlanker Zylinder von 3mm entsteht (*Abbildung 24*). Sobald beim Zylinder Längs- oder Querrisse auftreten, ist das Rollen zu beenden und unverzüglich die weiteren Schritte zur Bestimmung des Wassergehaltes der Probe durchzuführen. Dieselben Schritte werden ebenfalls mit den restlichen Teilproben durchgeführt. Die ermittelten Wassergehalte werden je Hälfte der Kugel gemittelt und mit dem Mittelwert der anderen Probenhälfte verglichen. Der Versuch gilt als gültig, wenn die beiden Mittelwerte nicht mehr als 0,5 % voneinander abweichen. Der Mittelwert aller Wassergehalte der Teilproben 1-6 ergibt die Ausrollgrenze w_p .



Abbildung 24: Ermittlung der Ausrollgrenze, herstellen von 3mm Rollen bis diese zu bröckeln beginnen

4.4. Dosenfrostversuch

Der Widerstand einer Gesteinskörnung gegen einen zyklischen Frost-Tau-Wechsel kann mittels dem in der ÖNORM EN 1367-1 [68] beschriebene Dosenfrostversuch bestimmt werden. Dabei wird das Verhalten einer Gesteinskörnung nach wiederholtem Einfrieren und Auftauen untersucht. Dies stellt einen wichtigen Parameter für unterschiedlichste Anwendungen dar. Der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel kann an unterschiedliche Kornklassen wie in *Tabelle 7* ersichtlich ermittelt werden.

Tabelle 7 Gesteinskörnungen für die Durchführung des Frost-Tau Versuchs [68]

Maximale Korngröße mm	Erforderliche Masse oder erforderliches Volumen der Gesteinskörnung	
	Normale Gesteinskörnung g	Leichte Gesteinskörnung (Schüttvolumen) ml
4 bis 8	1 000	500
8 bis 16	2 000	1 000
16 bis 32	4 000 ^a	1 500
32 bis 63	6 000 ^a	—

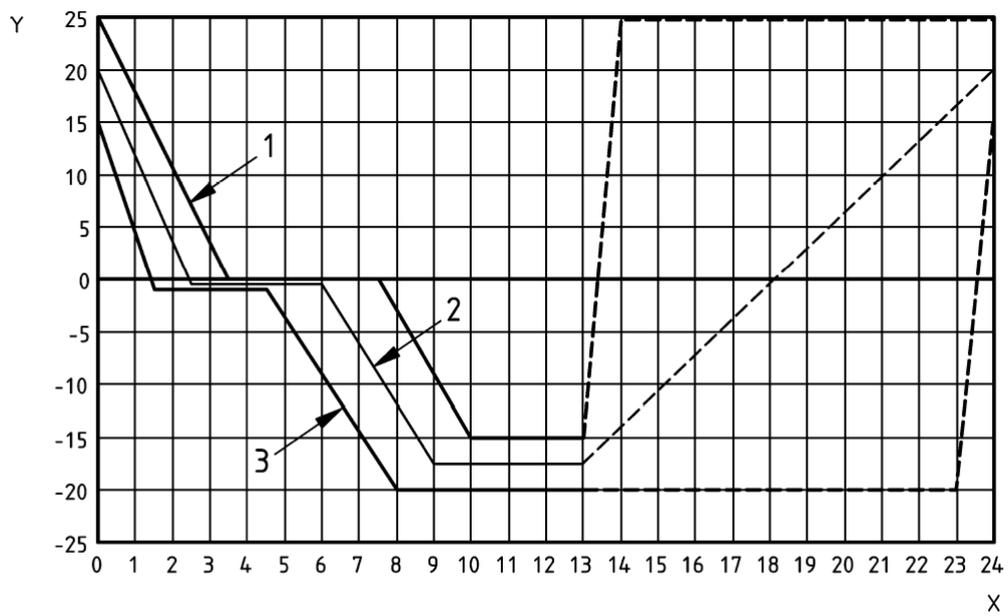
^a Es werden zusätzliche Dosen benötigt.

Der Versuch wird an drei Teilproben durchgeführt, dabei ist zu beachten, die richtige Anzahl an Probengefäßen und die richtige Probenmenge für die entsprechende Kornklasse zu verwenden. Die Probengefäße sind anhand der in der Norm vorgegebenen Anforderungen auszuwählen. Die Probe wird vor Beginn des ersten Zyklus 24 Stunden in destilliertem Wasser getränkt. Vor dem Start des ersten Frost-Tau-Zyklus ist auf eine ausreichende Bedeckung der Probe zu achten und gegebenenfalls Wasser nachzufüllen. Ein Frost-Tau-Zyklus entspricht dem in *Abbildung 25* dargestellten Temperaturzyklus. Die Probe wird von +20°C entsprechend der Vorgabe auf -17,5°C abgekühlt und der Versuch endet nach max. 24 Stunden, wenn die Probe wieder +20°C erreicht hat. Die Temperatur ist in einer Probe in der Mitte des Probengefäßes während der Zyklen zu messen. Der Zyklus ist zehnmal durchzuführen und die Proben sind nach dem letzten Auftauen mit einem Analysensieb, welche der halben Korngröße der unteren Kornklassenbegrenzung entspricht, abzusieben. Für die Kornklasse 8mm-16mm würde das ein Sieb mit einer Maschenweite von 4mm entsprechen. Der Siebrückstand wird getrocknet und gewogen und das Ergebnis der Frost-Tau-Wechselprüfung *F* über die *Gleichung 6* bestimmt.

$$Glg. 6 \quad F = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100 \quad [\%]$$

*M*₁ ... die gesamte Ausgangstrockenmasse der drei Einzelmessproben [g]

*M*₂ ... die gesamte Endtrockenmasse des Siebrückstandes auf dem gewählten Analysesieb [g]



Legende

- 1 obere Grenze
- 2 Regelwert
- 3 untere Grenze
- X Zeit, Stunden
- Y Temperatur, °C

Abbildung 25: Temperaturverlauf des Frost-Tau Versuches

4.5. Beurteilung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität im Beton

Chemische Reaktionen der Bestandteile des Betons, können sich auch negativ auf die Eigenschaften des späteren Betons auswirken. So gibt es unter anderem Reaktionen die zu Treiberscheinungen wie der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) führen können. Diese können durch ihre Ausdehnung den Beton innerlich zerstören, was zu negativen Auswirkungen auf das Bauwerk führen kann. Daraus ergibt sich neben den äußeren Einwirkungen wie der Abtragung von mechanischen Lasten und dem chemischen sowie physikalischen Angriff eine weitere potenzielle Quelle, welche die Eigenschaften des Betons beeinflusst. Es gilt die Auswirkungen der Gesteinskörnungen im späteren Beton bereits vor Einbau auf die Reaktivität zu untersuchen. Zur AKR kommt es, wenn die bei der Herstellung von Beton auftretenden Alkalihydroxide des Zements mit alkaliempfindlichen Bestandteilen der Gesteinskörnungen reagieren. Da Gesteinskörnungen für die Herstellung von Beton immer wieder kieselsäurehaltig sind, tritt diese Reaktion häufig auf. Diese muss jedoch nicht immer eine schädigende AKR hervorrufen. Jedoch auch Gesteinskörnungen welche AKR zeigen können durch gezielte Betontechnologie unter bestimmten Voraussetzungen eingesetzt werden [69]. Abhängig von der kristallinen Struktur der Kieselsäure kann diese Reaktion mehr oder weniger ausgeprägt auftreten *Tabelle 8*.

Tabelle 8 Schädigende Anteile an alkaliempfindlichen Mineralen in Beton aus [69]

Reaktive Substanz	Physikalische Struktur	Gesteinstyp	Gefährdung bei x M.-%
Opal	amorph	Einschlüsse in Basalt und anderer Lava, opalhaltiger Sand-, Kalk- und Hornstein sowie Schiefer, Überzug an verschiedenen Gesteinen	> 0,25
Kieselsäureglas	amorph	Rhyolit, Andesit und andere Lava und ihre Tuffe, die eine Glasmatrix enthalten Künstliches Glas (Pyrex, Duran)	> 3 > 0,8
Chalcedon	krypto-bzw. mikrokristallin	Kieseliger Kalkstein, Flint, Hornstein, Sandstein mit Chalcedonmatrix	> 5
Cristobalit, Tridymit	kristallin	Schmelzen, vulkanische Gesteine	> 1
Quarz	kristallin	Quarzit, Sandstein, vulkanische und metamorphe Gesteine	> 20

Es kommt zu Treiberscheinungen, wenn diese Formen mit den Alkalien im Zement reagieren. Die Reaktion führt zur Bildung von Kieselsäuregel, welches bei Feuchtigkeitseinwirkung quillt und dabei den Beton sprengt. Um die Verwendung von Gesteinskörnungen mit hoher Reaktivität zu vermeiden, wurde die ÖNORM B 3100 [70] entwickelt, um das Risiko von Schäden an Betonbauwerken zu minimieren. Es gibt unterschiedliche Prüfverfahren zur Bestimmung der Alkali-Kieselsäure Reaktivität. Da die Reaktion grundsätzlich langsam abläuft, sind die meisten Versuche auch Langzeitversuche. Der im Zuge dieser Masterarbeit angewendete Versuch war ein Schnelltest. Er beinhaltet die Beanspruchung von Betonprismen, welche aus den zu prüfenden Gesteinskörnungen und einem Normzement hergestellt wurden, mit einer 1-molaren Natriumhydroxid-Lösung. Diese Beanspruchung in

der starken Lauge soll Reaktion der Gesteinskörnung mit den Alkalien im Zement beschleunigen und somit Aufschluss über die Reaktivität der Gesteinskörnung geben. Die Prüfung wird anhand von definierten Grenzwerten durchgeführt, um die Eignung von Gesteinskörnungen für die Verwendung in Beton festzustellen. Die Beurteilung erfolgt je nach Einsatz der Gesteinskörnung und ist in der Nachfolgenden *Tabelle 9* ersichtlich

Tabelle 9 Beanspruchungsklasse gegen Alkali-Kieselsäurebeständigkeit [70]

Beanspruchungsklasse		Bauteile	Stark belastende Umweltbedingungen ^a
1	gering bis mäßig	sämtliche Bauteile mit Ausnahme von jenen der Beanspruchungsklasse 2	–
2	hoch	Betonfahrbahn-Decken (Ober- und Unterbeton) ^a	Alkalizufuhr von Außen (z. B. Taumittel), mäßige bis starke Durchfeuchtung, wechselnde und hohe Oberflächen-Bauteiltemperatur, dynamische Belastung

^a Betonleitwände wurden nicht in die Beanspruchungsklasse 2 aufgenommen, da sie keiner dynamischen Belastung ausgesetzt sind und die Auswirkung einer möglichen Alkali-Kieselsäure-Reaktivität im Allgemeinen vernachlässigbar ist.

Schnellprüfung der Gesteinskörnung an Mörtelprismen

Wie bereits erwähnt, wurde zur Prüfung der AKR im Zuge dieser Diplomarbeit ein Schnelltest angewendet. Dieser Schnelltest wird in der ÖNORM B 3100 [70] beschrieben. Aus der zu prüfenden Gesteinskörnung und mit einem Einheitszement CEM I 42,5R wurden drei Mörtelprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm hergestellt. Bei der Herstellung ist auf das Verhältnis von Gesteinskörnungen, Zement und Wasser entsprechend der Norm zu achten. An den Stirnflächen werden jeweils Messzäpfchen mit ein betoniert. Für die Herstellung des Mörtels wurden die Kornklassen teilweise nur gesiebt und teilweise vor dem Sieben auch gebrochen, um die Anforderungen in *Tabelle 10* zu erfüllen.

Tabelle 10 vorgegebene Kornklassen zur Herstellung der Prismen für den Alkali Kieselsäureschnelltest [70]

Kornklasse	Anteil	Vorkommen mit GK > 4 mm, Aufbereitete Körnung	
		0/4	4/GK (gebrochen)
		40 %	60 %
0,125/0,25 mm	15 %	81 g	121 g
0,25/0,5 mm	25 %	135 g	203 g
0,5/1 mm	25 %	135 g	203 g
1/2 mm	25 %	135 g	202 g
2/4 mm	10 %	54 g	81 g
gesamt	100 %	540 g	810 g

Nach der Herstellung härten die Prismen 24 Stunden aus, um dann aus der Form herausgenommen zu werden. Nach dem Ausschalen wird die Bezugslänge mit einem Messschieber und eine Initialmessung mit einem Schwindmessgerät durchgeführt, um eine Referenzlänge für jedes der drei Betonprismen zu erhalten (*Abbildung 26*).



Abbildung 26 links: Messung der Bezugslänge mit einem Messschieber; rechts: Messung der Initialmessung mit einem Schwindmessgerät

Anschließend werden die Prismen in ein Wasserbad gelegt und dort innerhalb von 24 Stunden in einem Ofen von 20°C auf 80°C aufgeheizt. Vor der Umlagerung der Prismen in eine 1 molare NaOH-Lösung für 13 Tage wird nochmal die Längenänderung mittels Schwindmessgerät ermittelt und als Nullmessung notiert. Beim Hantieren mit der Natriumhydroxidlösung ist auf jeden Fall auf geeignete Schutzausrüstung zu achten. Neben der Initial- und der Nullmessung sind weitere Messungen mit dem Schwindmessgerät nach 2 Tagen, 7 Tagen, 10 Tagen und 14 Tagen nach der Initialmessung durchzuführen. Bei der Durchführung der Messungen ist darauf zu achten, dass die Messung möglichst rasch erfolgt, um eine Längenänderung durch Temperaturänderung und dadurch einen negativen Einfluss auf das Messergebnis möglichst zu vermeiden. Als Ergebnis des Versuchs wird die Dehnung der einzelnen Prismen von Tag 2 bis Tag 14 ab der Initialmessung berechnet. Die Gesteinskörnung gilt als nicht Alkali-Kieselsäure reaktiv, wenn der Mittelwert der Dehnung der drei Prismen kleiner 1 Promille ist. Sollte ein positives Ergebnis auftreten ist ein Langzeit Test mit der entsprechenden Gesteinskörnung durchzuführen.

4.6. Bestimmung der Kornformkennzahl

Die Kornformkennzahl (Shape Index – SI) beschreibt die geometrischen Eigenschaften einer Gesteinskörnung und ist in der ÖNORM EN 933-4 [71] beschrieben. Um das Verhältnis aus kleinster Kornabmessung (E) und größter Kornabmessung (L) bestimmen zu können, werden diese, unter der Verwendung eines Kornform-Messschiebers (Abbildung 27), ermittelt.

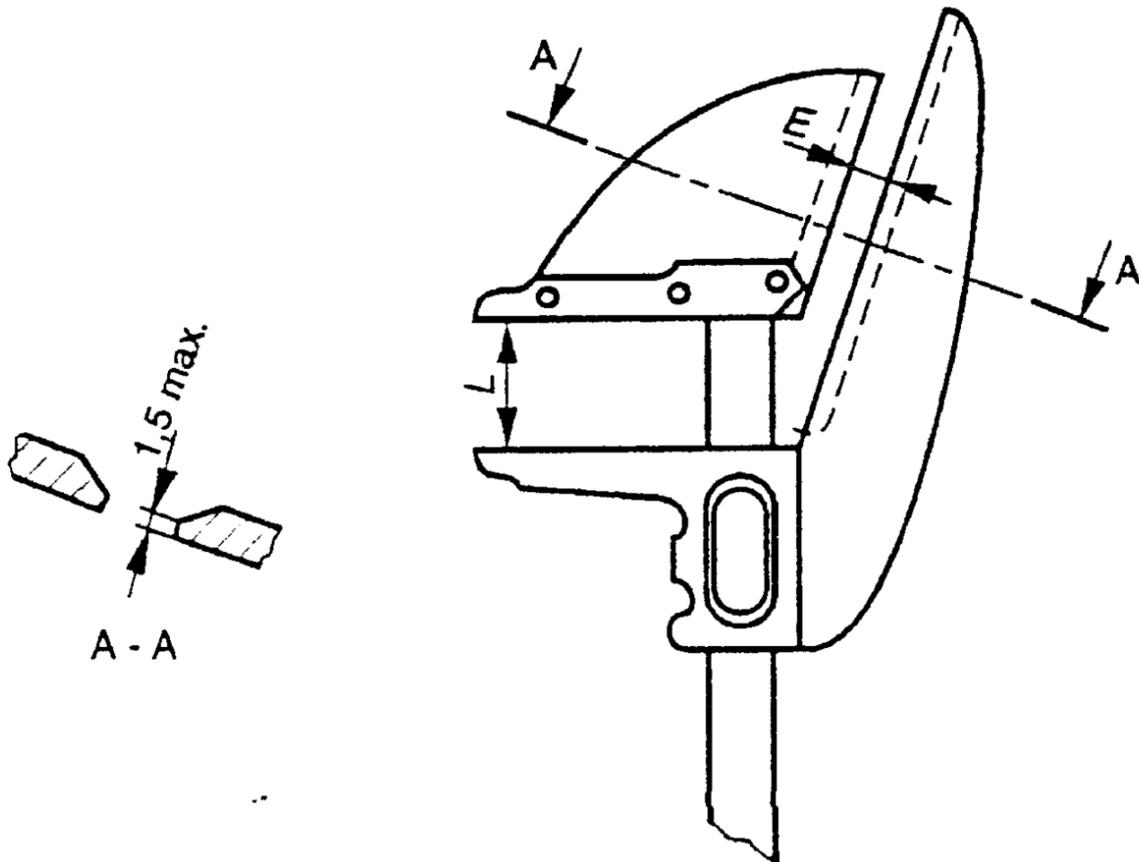


Abbildung 27: Darstellung eines Kornformmessschiebers zur raschen Ermittlung der Kornform [71]

Die Unterteilung der gemessenen Körnungen erfolgt in kubische Körner (günstig) mit einem Verhältnis von $L/E < 3$ und nicht-kubische Körner (ungünstig) mit einem Verhältnis von $L/E > 3$. Um die Kornformkennzahl bestimmen zu können, muss nach der Einteilung der Probenmenge in die bereits erwähnten Kornformklassen, die Masse an nicht kubischen Körnern (M_2) sowie die Gesamtprobenmenge (M_1) jeweils in Gramm bestimmt werden. Die Kornformkennzahl wird nach Gleichung. 7 berechnet und das Ergebnis in Prozent als ganze Zahl dargestellt.

$$\text{Glg. 7 } SI = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \text{ [\%]}$$

4.7. Los Angeles Test

Die Norm ÖNORM EN 1097-2 [72] beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung des Widerstands gegen Zertrümmerung einer Gesteinskörnung. Der Widerstand gegen Zertrümmerung ist ein wichtiger Kennwert für die meisten bautechnischen Anwendungen, da er einen wichtigen Einfluss auf die Festigkeit und Haltbarkeit von Beton und anderen Baustoffen hat, die aus Gesteinskörnungen hergestellt werden. Eine Möglichkeit zur Bestimmung bietet das Los-Angeles-Prüfverfahren (LA-Test). Das Verfahren beginnt damit, dass eine bestimmte Menge der Gesteinskörnung in einen Zylinder gefüllt wird, welcher auf einer rotierenden Welle montiert ist (Abbildung 28).

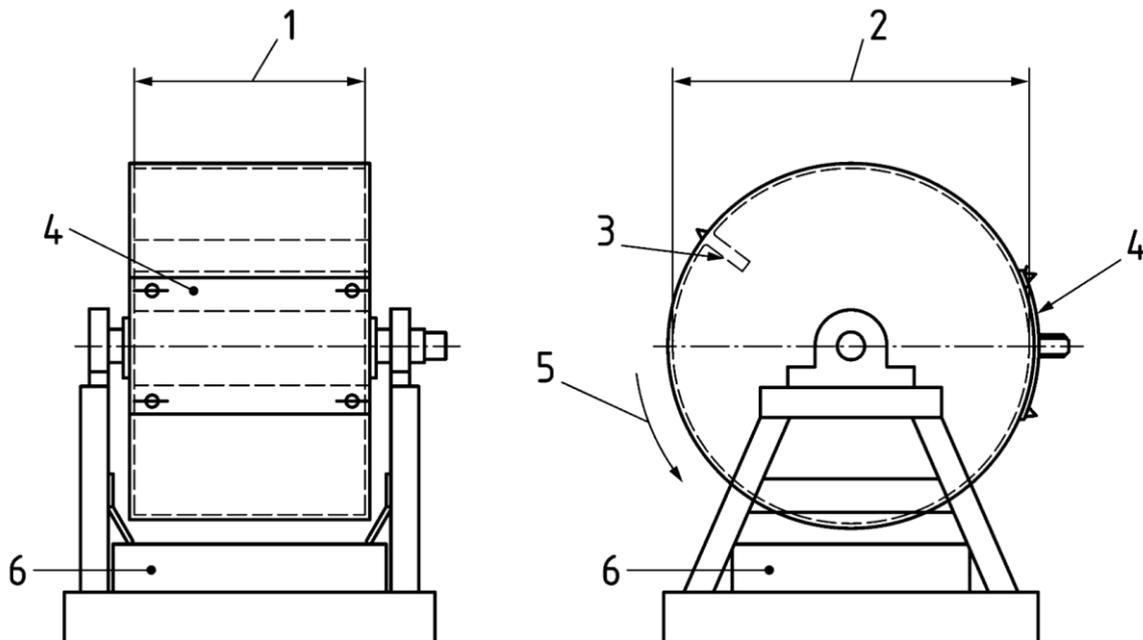


Abbildung 28: Aufbau der Prüfeinrichtung zur Ermittlung des LA Koeffizienten nach ÖNORM EN 1097-2 1) Innenlänge (508 ± 5)mm, 2) Innendurchmesser (711 ± 5)mm, 3) Mitnehmerleiste, 4) Deckel und Öffnung, 5) Rotation, 6) Blech [72]

Nachfolgend werden zuerst 11 Stahlkugeln von bestimmter Größe und Masse in den Zylinder gelegt und die Gesteinskörnung hinzugefügt. Als Probe werden 5kg der Körnung 10-14mm verwendet, welche einer definierten Korngrößenverteilung entsprechen müssen.

Der Zylinder wird mit einer definierten Drehzahl (31-33 Umdrehungen/Minute) für eine festgelegte Anzahl von 500 Trommelrotationen rotiert. Während der Rotation wird das Material auf Schlag und Abrieb beansprucht. Um den LA Wert bestimmen zu können, wird die Probenmenge nach Beendigung der Beanspruchung durch die Stahlkugeln mit einem 1,6mm Analysesieb abgesiebt und die Masse des Rückstands (m) bestimmt. In Gleichung 8 ist der Zusammenhang dargestellt mit welchen der Los Angeles Wert (LA) bestimmt werden kann.

$$\text{Glg. 8 } LA = \frac{5000 - m}{50} \quad [\%]$$

Zum Beispiel bedeutet ein LA-Wert von 10, dass 10 % der geprüften Gesteinskörnung nach dem Versuch ein Sieb mit der Maschenweite von 1,6 mm passiert haben. Je höher der Widerstand gegen Zertrümmerung, desto widerstandsfähiger ist die Gesteinskörnung gegen Zertrümmerung und desto besser eignet sie sich für bautechnische Anwendungen

Laut Resch (2012) [37] wird das Ergebnis des LA-Test auch von der Aufbereitungsart der Gesteinskörnungen beeinflusst.

Ein modifizierter LA-Test welcher von Resch (2012) [37] beschrieben wurde, lässt eine Aussage über das Nachbrechverhalten von Gesteinskörnungen zu. Dabei wird der LA-Test ohne die Stahlkugeln durchgeführt und die Autogene Zerkleinerung des Materials beurteilt werden. Das Ergebnis soll Aussagen über das Verhalten des Materials während Transport- oder Mischvorgängen ermöglichen.

Ein ähnlicher Versuch ist der sogenannte LCPC-Brechbarkeit-Test. Einen Zusammenhang des LA-Werts und den aus dem LCPC-Brechbarkeits-Test gewonnenen Brechbarkeitsindex hat Girmscheid (2013) [73] beschrieben (Abbildung 29). Die Aussagekraft des Brechbarkeitsindex ist in Tabelle 11 ersichtlich.

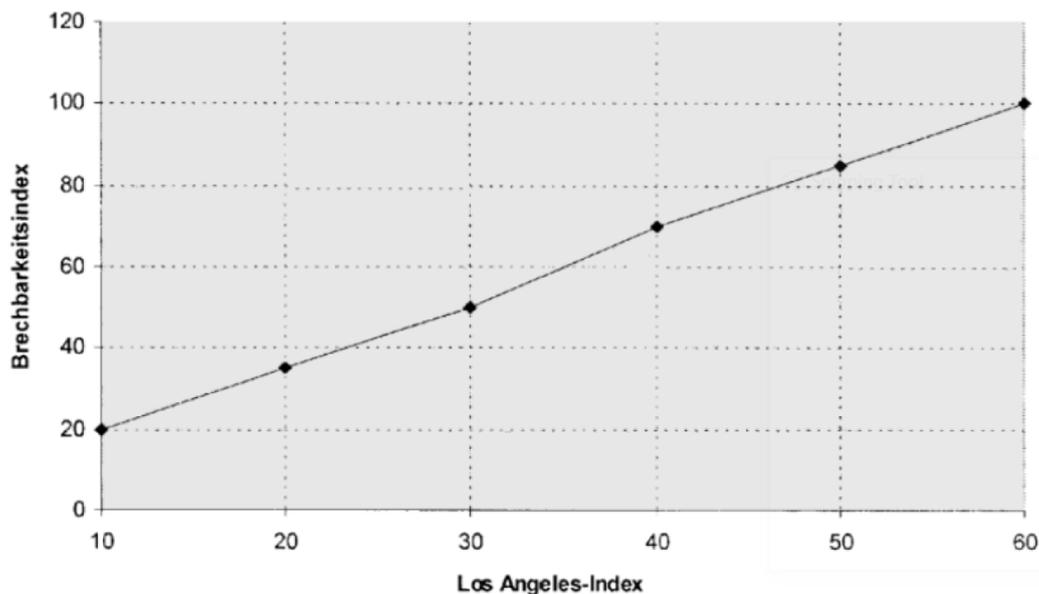


Abbildung 29: Zusammenhang zwischen Brechbarkeitsindex und dem Los-Angeles Index nach Girmscheid (2013) [73]

Tabelle 11 Einteilung der Brechbarkeit anhand des Brechbarkeitsindex (LBR) nach Buechi, Mathier et al. (1995) [74]

LBR [%]	Brechbarkeits- Bezeichnung
0 – 25	sehr schwach
25 – 50	mittelschwach
50- 75	mittel
75 – 100	mittelstark
> 100	sehr stark

Durch die Auswertung unterschiedlicher Gesteine konnte Thalmann (1996) [75] ebenfalls eine Korrelation zwischen Brechbarkeitsindex und LA-Index herstellen und hat dazu eine Gleichung aufgestellt (Gleichung 9).

$$\text{Glg. 9 } B_R = 3,25(\pm 5,93) + 1,63(\pm 0,17) * LA$$

Widerstand gegen Schlagzertrümmerung

Aufgrund einer ähnlichen Beanspruchung zur Ermittlung des Widerstands gegen Schlagzertrümmerung und der Ermittlung des LA-Koeffizienten gibt es einen Zusammenhang dieser beiden Werte [76]. Die deutsche Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) untersuchten unterschiedlichen Gesteinsproben und konnten einen Zusammenhang beobachten. Dieser Zusammenhang ist in *Abbildung 30* dargestellt.

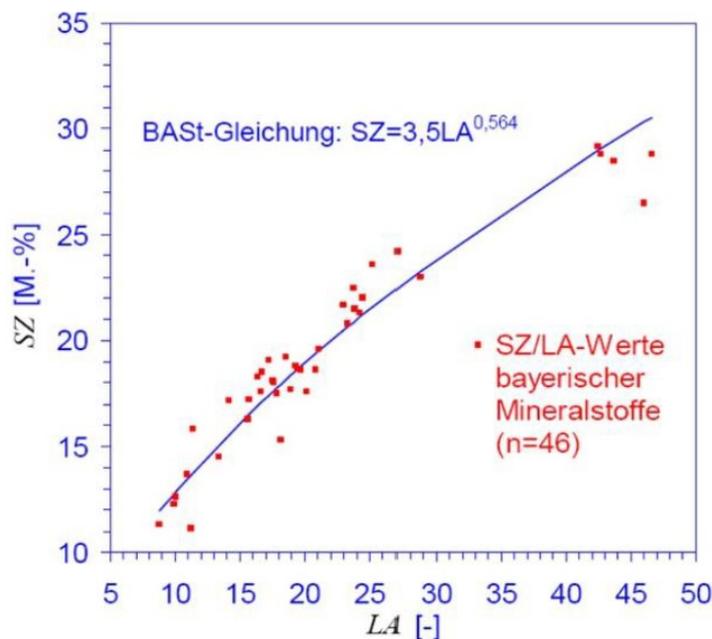


Abbildung 30 Zusammenhang des LA Werts mit der Schlagzertrümmerung nach Schießl (2005) [76]

4.8. Modell zur analytischen Betrachtung der Verwertbarkeit von Tunnelausbruchmaterial

Um mögliche Verwertungsmöglichkeiten für das Ausbruchsmaterial finden zu können, wurde von Lenes 2022 [39] ein Modell entwickelt, welches durch Eingabe von unterschiedliche Daten Verwertungspotentiale ausgibt. Die Ergebnisse aus geochemischen, mineralogischen oder auch geotechnischen Untersuchungen, werden dabei in einem Eingabefenster eingetragen. Diese Daten können in unterschiedlichen Projektstadien gewonnen werden und das Modell zeigt Verwendungsmöglichkeiten an, für welche die Bedingungen erfüllt oder nicht erfüllt werden, bzw. wo auf Grund von noch fehlenden Daten noch keine Aussage getroffen werden kann. Das Modell hat den Vorteil, dass mit der Eingabe der Daten in einer Eingabemaske, eine Palette an Verwertungsmöglichkeiten überprüft wird. Dabei werden die eingegebenen Daten gegen unterschiedliche, in den Normen bzw. Regelungen der unterschiedlichen Verwertungsmöglichkeiten festgelegten Grenzwerte geprüft. Bei der Eingabe der Daten wird neben der Einheit, in welcher die Daten eingegeben werden müssen, auch auf die Norm bzw. Regelung hingewiesen, mit welcher der einzugebende Wert zu bestimmen ist. *Abbildung 31* zeigt ein Eingabefenster des Modells für die technischen Parameter. Hierbei sind in die weißen Felder die Ergebnisse der getätigten Untersuchungen einzutragen. Für die Frost-Tau-Beständigkeit ist das Ergebnis aus einem Drop-down Menü auszuwählen.

	Norm	Messwert	
UCS	ÖNORM EN 1997-2		[MPa]
Point Load Index	ASTM D5731-07		[MPa]
statischer E-Modul	ÖNORM EN 14580		[GPa]
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA	
Schlagzertrümmerung	ÖNORM EN 1097-2	SZ	
Frost-Tau-Beständigkeit	ÖNORM EN 1367-1	Bitte auswählen	
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI	
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3	FI	
Plastizitätszahl	ÖNORM EN 17892-12		[-]
Wasseraufnahme nach 24h	ÖNORM EN 1097-6		[%]
Widerstand gegen Polieren	ÖNORM EN 1097-8	PSV	
Widerstand gegen Brechen	ÖNORM EN 1926	CS	

Abbildung 31: Eingabefenster zur Eingabe der technischen Parameter einer Probe im Verwertungsmodell von Lenes (2022) [39]

Es gibt ebenfalls die Möglichkeit die Ergebnisse der Siebanalyse einzugeben und die Korngrößenverteilung grafisch darstellen zu lassen (*Abbildung 32*). Diese Darstellung ähnelt der in Kapitel 4.2. beschriebenen Darstellung, jedoch ist es mit dem Modell möglich diese Korngrößenverteilung gegen in den Normen oder Regelungen geforderten Korngrößenverteilungen für die unterschiedlichen im Modell hinterlegten Applikationen sofort grafisch anzeigen zu lassen.

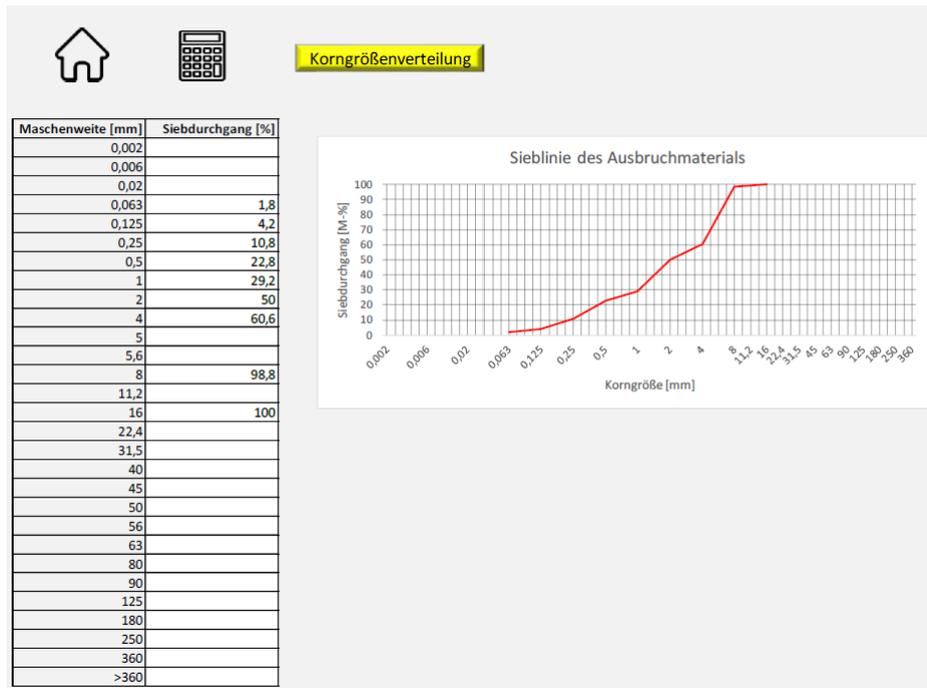


Abbildung 32: Eingabemaske und Darstellung der Korngrößenverteilung fuer im Verwertungsmodell von Lenes (2022) [39]

5. Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt und beschrieben. Es sei hier zu erwähnen, dass ein Waschen der Proben für die Versuche nicht möglich war, da sich dabei vor allem die Form- und Festigkeitseigenschaften des Probenmaterials stark änderten.

5.1. Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung wurde mittels einer kombinierten Sieb- und Sedimentationsanalyse ermittelt. Dabei wurden die Fraktionen 32mm – 0,063mm gesiebt. Der Siebdurchgang im Auffangbehälter welcher der Fraktion <0,063mm entspricht, wurde anschließend mit dem Aräometerverfahren noch genauer bestimmt.

Die Ergebnisse der Siebanalyse sind in *Tabelle 12* dargestellt. Die verwendeten Siebeinsätze sind in der Spalte Korngröße ersichtlich. Die Masse Siebrückstand ist der Anteil, welcher am entsprechenden Sieb zurückgeblieben ist. Hierbei wurde das Sieb inklusive dem Siebrückstand abgewogen und die Masse des Siebes abgezogen. Um die Ergebnisse der Korngrößenverteilung grafisch darzustellen wird der Siebdurchgang gegenüber der Korngröße aufgetragen. Aus der grafischen Darstellung ist eine erste Beurteilung der Korngrößenzusammensetzung der Probe möglich.

Tabelle 12 Messergebnisse der Korngrößenverteilung nach ÖNORM EN 933-1 [61]

Korngrößenverteilung ÖNORM EN 933-1					
Datum	27.10.2022				
Versuch durchgeführt von	Gabriel Nievoll				
Probe	NiGa1				
Trockenmasse	10631 [g]				
Korngröße	Tara	Masse Siebrückst. + Tara	Masse Siebrückstand	Siebrückstand	Summe der Siebdurchgänge
[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
32			0	0,00	100,00
16			2066,8	19,44	80,56
8			1524,5	14,34	66,22
4			1768,9	16,64	49,58
2			1083,2	10,19	39,39
1			747,9	7,04	32,36
0,425			744	7,00	25,36
0,25			448,8	4,22	21,14
0,125			1134	10,67	10,47
0,063			554,1	5,21	5,26
< 0,063			548,9	5,16	0,09
Summe	10621,1		10621,1	99,91	
Siebverlust	9,9 [g]		0,09%		

Die für die Auswertung des Sedimentationsverfahrens notwendigen Parameter und die Ergebnisse sind in *Tabelle 13* ersichtlich. Vor der Durchführung der Messungen wurde die Probe homogenisiert, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Partikel in der Suspension zu erhalten. Die Kornrohdichte, welche ebenfalls zur Bestimmung benötigt wird,

Ergebnisse

wurde mittels Heliumpyknometer bestimmt. Als Ergebnis des Sedimentationsverfahren wird der berechnete äquivalente Korndurchmesser und die Kornfraktion kleiner dem äquivalenten Korndurchmesser angegeben.

Tabelle 13 Messergebnisse des Sedimentationsverfahren nach ÖNORM EN ISO 17892-4 [62]

Probe	Gesamtmasse		20,4 g									
	1/4 Probe 4	R'0 Referenzlösung	Aräometerwert R'h Probe	Temperatur [°C]	Miniskus-korrektur [cm]	Viskosität [mPa*s]	Referenzlösung mit richtigem Meniskus R0	Korrigierter Ablesewert Rh des Aräometers	Modifizierter Ablesewert Rd	Tauchtiefe Hr	Äquivalenter Korndurchmesser di [mm]	Kornfraktion kleiner als äquivalenter Korndurchmesser K [%]
0,5	1,0002	1,0115	18,8	0,002	1,04	2,20	13,50	11,30	184,73	0,08529	89,306	
1	1,0002	1,0110			1,04	2,20	13,00	10,80	184,73	0,06031	85,355	
2	1,0002	1,0105	1,04		2,20	12,50	10,30	184,73	0,04265	81,403		
4	1,0002	1,0100	1,04		2,20	12,00	9,80	205,07	0,03177	77,452		
8	1,0002	1,0085	1,04		2,20	10,50	8,30	205,07	0,02247	65,597		
30	1,0015	1,0070	1,03		3,50	9,00	5,50	205,07	0,01159	43,468		
60	1,0015	1,0060	1,03		3,50	8,00	4,50	225,63	0,00859	35,565		
120	1,0015	1,0055	1,03		3,50	7,50	4,00	225,63	0,00608	31,613		
360	1,0015	1,0050	1,04		3,50	7,00	3,50	225,63	0,00353	27,661		
1440	1,0015	1,0040	1,04		3,50	6,00	2,50	225,63	0,00176	19,758		

Annahme Korndichte
Dichte der Sedimentationsflüssigkeit bei Raumtemperatur
40g/l Na6O18P6

2,6333 t/m ³
1,024 t/m ³
2,58 t/m ³

Die grafische Darstellung der Ergebnisse zur Bestimmung der Korngrößenverteilung ist in *Abbildung 33* ersichtlich.

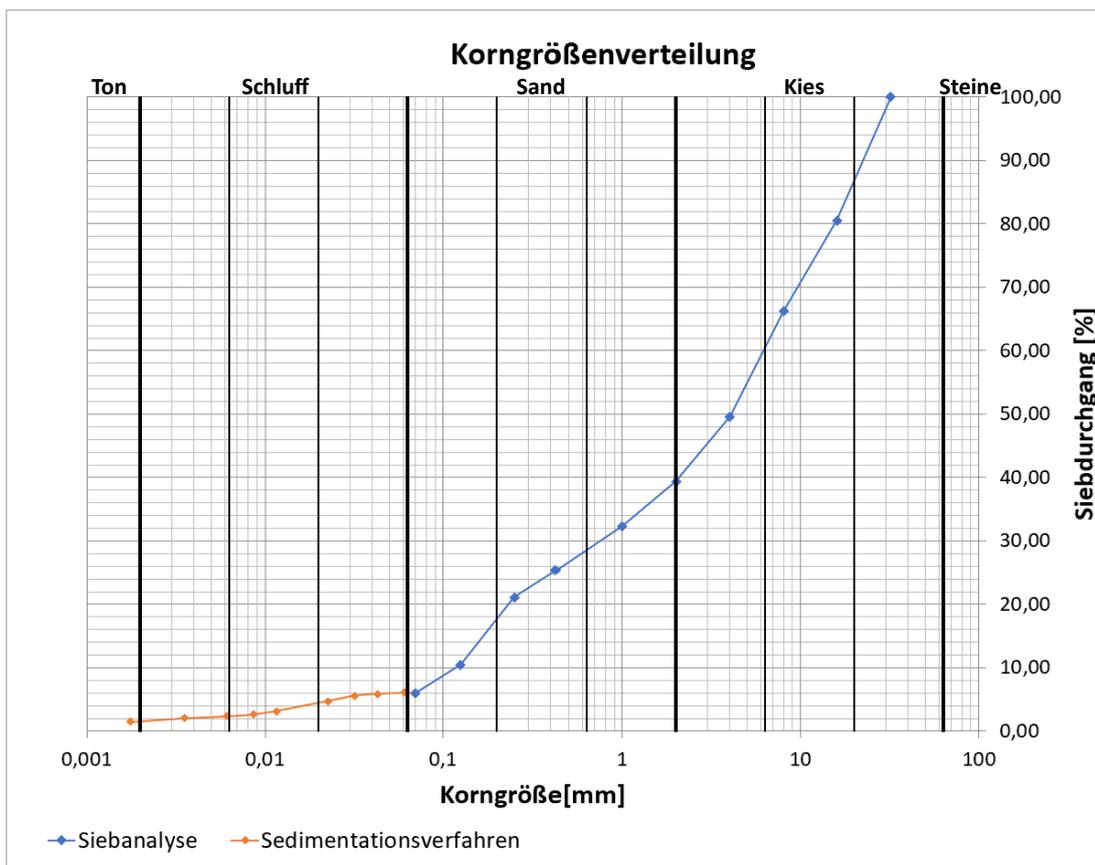


Abbildung 33: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Siebanalyse (blau) und der Sedimentationsanalyse (orange) in einem logarithmisch dargestellten x-Achse, die dicken Striche zeigen die Einteilungen der einzelnen Kornklassen

Dabei wurde die kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse in einem Diagramm zusammengefasst. Wie in der Legende ersichtlich wurde die Verteilung der Korngrößen in der Feinfraktion ($< 0,063\text{mm}$) mit dem Sedimentationsverfahren bestimmt. Die Verteilung der Fraktion $>0,063\text{mm}$ wurde über eine Trockensiebanalyse bestimmt.

Die Einteilung der Probe in die Kornfraktionen nach ÖNORM EN ISO 14688-1 [77] ist in *Tabelle 14* ersichtlich.

Tabelle 14 Anteile der Kornfraktionen in der gemessenen Probe

Kornfraktion	Anteil [%]
Kies	60
Sand	34
Schluff	4
Ton	2

5.2. Wassergehalt der Fließ- und Ausrollgrenze

Die Bestimmung der Fließ und Ausrollgrenze wurde nach der ÖNORM EN ISO 17892-12 [65] durchgeführt. *Tabelle 15* zeigt die Ergebnisse der Messungen zur Bestimmung der Fließgrenze mit dem Fallkegelversuch. Um den Wassergehalt berechnen zu können, musste die Feucht- und Trockenmasse bestimmt werden. Das Ergebnis dieses Versuchs ist die Fließgrenze, welche den Wassergehalt bei 10mm Eindringtiefe entspricht. Dieser wurde grafisch aus der *Abbildung 34* bestimmt $w_l=27,9\%$.

Tabelle 15 Darstellung der Messergebnisse aus dem Fallkegelversuch zur Bestimmung der Fließgrenze

Probenbezeichnung	Eindringtiefe	Masse feucht	Masse trocken	Wassergehalt
	[mm]	[g]	[g]	[%]
Probe 1	6,9	21,85	17,39	25,65
Probe 2	9,08	18,39	14,52	26,65
Probe 3	14,03	25,42	19,33	31,51
Probe 4	15,82	18,14	13,68	32,60
Wassergehalt bei 10 mm Eindringtiefe 27,9 %				

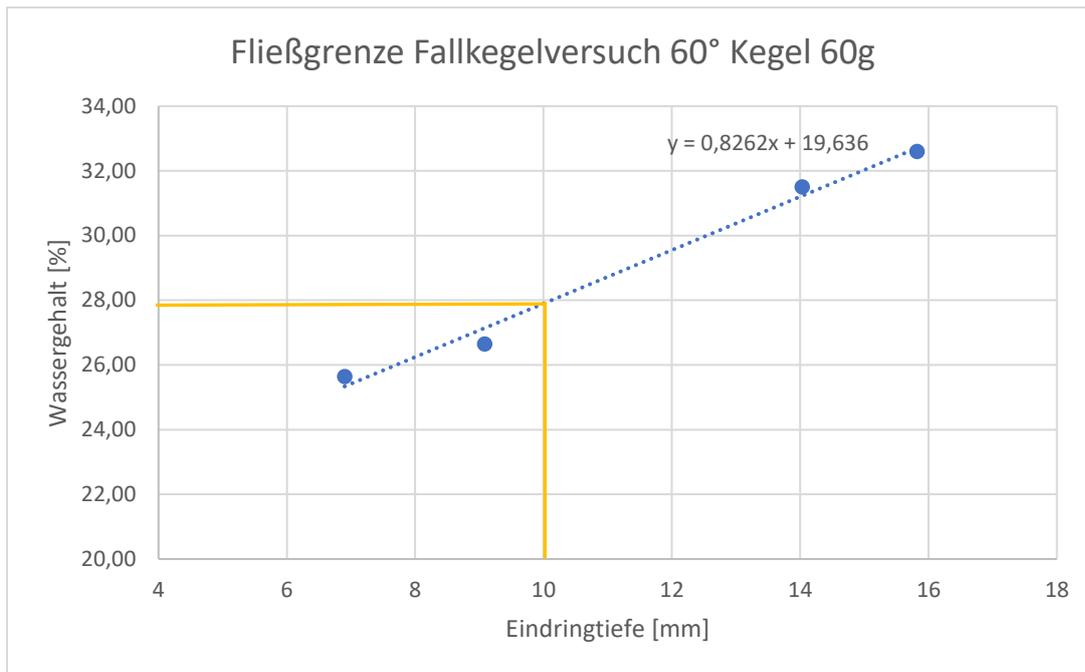


Abbildung 34: Grafische Bestimmung der Fließgrenze mittels des Fallkegelversuchs, Fließgrenze= Wassergehalt bei 10mm Eindringtiefe

Die Ergebnisse des Versuches zur Bestimmung der Ausrollgrenze sind in *Tabelle 16* dargestellt. Die Abweichung der beiden ermittelten Wassergehalte darf bei Wassergehalten von $\leq 40\%$, 2% nicht überschreiten. Die Ausrollgrenze entspricht dem Mittelwert der beiden bestimmten Wassergehalt und beträgt bei diesem Versuch $w_P=17,22\%$.

Tabelle 16 Ergebnisse zur Bestimmung der Ausrollgrenze

Proben- bezeichnung	Masse feucht [g]	Masse trocken [g]	Wassergehalt [%]	Differenz [%]
Probe 1	9,57	8,18	16,99	-0,23
Probe 2	9,53	8,13	17,22	
Ausrollgrenze			17,11	

5.3. Widerstands gegen Frost-Tau-Wechsel

Bei der Bestimmung des Widerstands gegen Frost-Tau-Wechsel muss ein vorgegebener, zeitabhängiger Temperaturbereich eingehalten werden. Der bei den Versuchen erreichte Temperaturverlauf ist in *Abbildung 35* dargestellt und zeigt, dass diese eingehalten wurde. Die Bereiche in denen die Temperatur um den 0°C Bereich als konstant zu sehen sind, sind die

Vorgänge des Einfrieren und Auftauen des Wassers. Hierbei bleibt die Temperatur so lange konstant, bis das gesamte Wasser gefroren bzw. aufgetaut ist, erst anschließend kommt es zu einer weiteren Temperaturänderung. Dieser Zyklus wurde 10-mal durchgeführt.

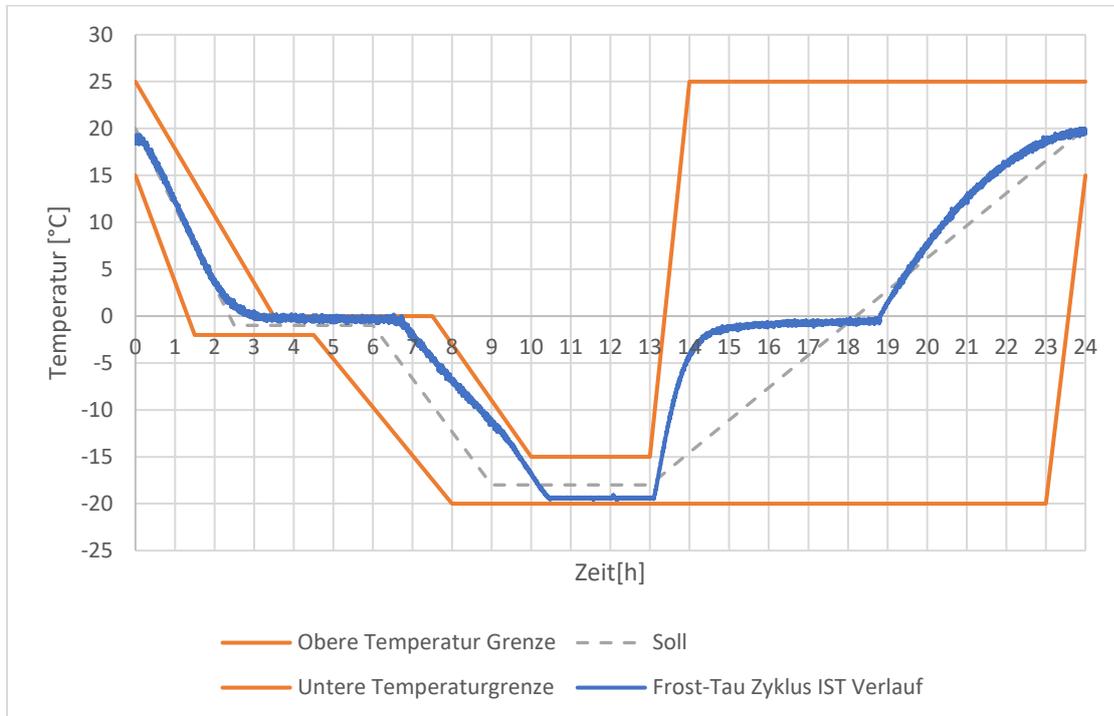


Abbildung 35 Bei einem Versuchszyklus aufgezeichneter Temperaturverlauf eines Frost-Tau Zyklus in der Mitte des Gefäßes

Die Ergebnisse des Versuchs zur Bestimmung des Frost-Tau Wechsel Widerstands sind in Tabelle 17 dargestellt. Dabei wurde die Trockenmasse der Probe vor der Beanspruchung durch die Frost-Tau-Wechsel bestimmt und mit dem Siebrückstand auf dem Sieb mit der halben Maschenweite (4mm) der unteren im Versuch verwendeten Kornklasse (8mm) verglichen. Der dabei berechnete Masseverlust durch die Einwirkung des Frosttauzyklus beträgt im Mittel $F=89,3\%$.

Tabelle 17 Ergebnisse des Versuchs zur Bestimmung der Frost-Tau-Wechselbeständigkeit

Probenbezeichnung	Masse Probe [g] Kornklasse 8-16 mm [g]	Siebrückstand > 4mm [g]	Siebrückstand >4mm [%]	Masseverlust [%]
Probe 1	2000	182,8	9,1	90,9
Probe 2	2000	239,5	12,0	88,0
Probe 3	2000	222,3	11,1	88,9
Frost-Tau-Wechselbeständigkeit F				89,3

5.4. Alkali-Kieselsäure Reaktivität

Wenn Beton dauerhaft einer Witterung ausgesetzt ist, ist die Bestimmung der Alkali-Kieselsäure Reaktivität von großer Bedeutung. Für den Versuch wurden lt. Norm 3 Prismen hergestellt und in definierten Abständen die Längenänderungen gemessen. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 18* dargestellt. Dabei wurden die 4 Messungen gemäß Vorgabe durchgeführt und die Dehnung zwischen dem 2. Tag und dem 14. Tag nach der Initialmessung berechnet.

Tabelle 18 Tabellarische Darstellung der Messergebnisse der Längenänderungen nach ÖNORM B3100 [70] und des Ergebnisses der Dehnung

Alkali-Kieselsäure Reaktivität Mörtelschnelltest ÖNORM B3100						
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Datum	Uhrzeit	Zeit ab Initialmessung [d]
Gesamtlänge mit Messzäpfchen [mm]	176,26	176,61	176,78	31.01.2023	14:15	
Bezugslänge [mm]	160,26	160,61	160,78	31.01.2023	14:20	
Initialmessung [mm]	0,064	0,413	0,578	31.01.2023	14:30	0
Nullmessung [mm]	0,224	0,585	0,728	01.02.2023	12:30	1
1 Messung (2Tage nach Initialmessung) [mm]	0,244	0,592	0,767	02.02.2023	13:45	2
2 Messung (7Tage nach Initialmessung) [mm]	0,272	0,617	0,793	07.02.2023	12:00	7
3 Messung (9Tage nach Initialmessung) [mm]	0,282	0,628	0,793	09.02.2023	12:00	9
4 Messung (14 Tage nach Initialmessung) [mm]	0,301	0,652	0,828	14.02.2023	11:30	14
Dehnung 14 Tagen nach Initialmessung [‰]	0,36	0,37	0,38			

Mittelwert der Dehnung 14 Tage nach Initialmessung[‰]	0,37
-------------------------------------------------------	------

Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse der Dehnung der drei Mörtelprismen über die gesamte Versuchsdauer.

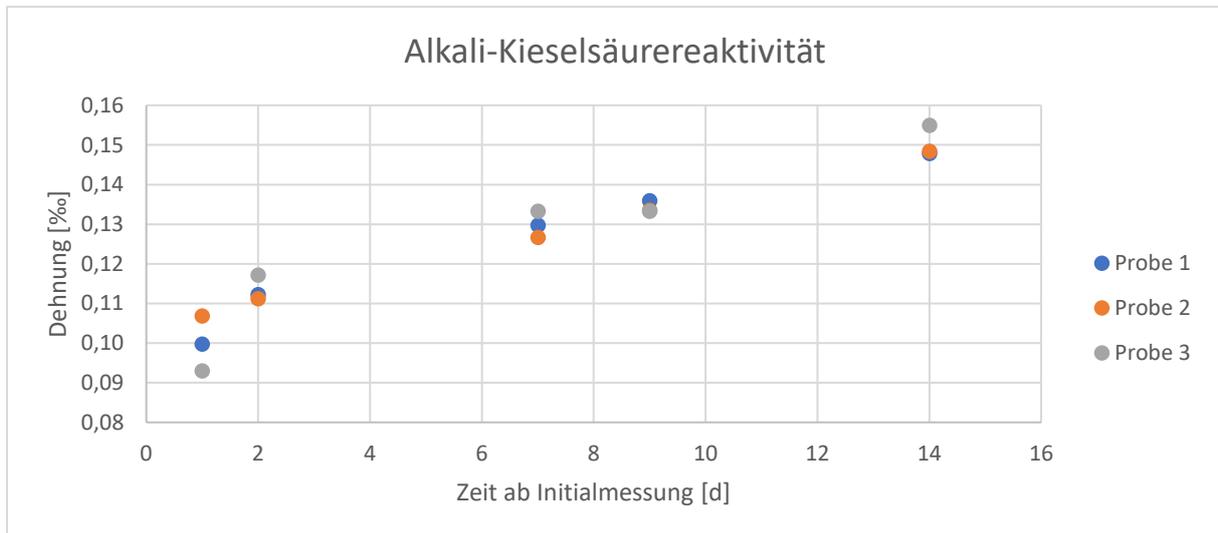


Abbildung 36: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Dehnung berechnet aus den Einzelmessungen der Längenänderungen der Proben auf Alkali-Kieselsäurereaktivität an den vorgegebenen Messtagen

5.5. Kornformkennzahl

Die Bestimmung der Kornformkennzahl erfolgt durch das Vermessen der kubischen und nicht kubischen Körner einer Probe mittels eines Messschiebers. Das Ergebnis ist die Kornformkennzahl, welche das Verhältnis kubischen zur Gesamtmasse ausdrückt. Diese beträgt für die untersuchte Probe SI=11 (Tabelle 19).

Tabelle 19 Messwerte und Auswertung zur Bestimmung der Kornformkennzahl

Kornklasse d_i/D_i mit $D_i \leq 2 \cdot d_i$ [mm]	Masse M_1 [g]	Masse M_2 [g]	Kornformkennzahl $SI = (M_2/M_1) \cdot 100$ [%] ganzzahlig
8-16	1017	113	11

5.6. Widerstand gegen Zertrümmerung

Mittels des LA-Tests wurde der Widerstand gegen Zertrümmerung bestimmt. Dabei wurde die Kornklasse 10mm -14mm im vorgegebenen Verhältnis gemischt und zusammen mit Stahlkugeln beansprucht. Nach Beanspruchung der Probe wurde diese mit einem Sieb mit 1,6mm Maschenweite abgesiebt und der Rückstand bestimmt. Der Los-Angeles Koeffizient berechnet sich aus dem Verhältnis der Masse der Fraktion <1,6mm und der Gesamtprobenmenge. Bei der Messung ergab sich ein Los Angeles Koeffizient von 48% (Tabelle 20).

Tabelle 20 Messwerte und Auswertung zur Bestimmung des Los Angeles Koeffizienten

Masse Kornklasse 10-12,5mm [g]	Masse Kornklasse 12,5-14mm [g]	Gesamtproben- menge [g]	Siebrückstand >1,6mm [g]	Los-Angeles Koeffizient [%]
3250	1750	5000	2605,3	48

6. Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen weiter ausgewertet, gegen Grenzwerte geprüft und genauer diskutiert werden.

6.1. Korngrößenverteilung

Aus der Korngrößenverteilung können unterschiedliche Eigenschaften über die Probe gewonnen werden.

Die Beschreibung von Bodenarten erfolgt nach ÖNORM EN ISO 14688-1 [77].

Anhand der Auswertung in Kapitel 5.1. kann der Boden als gemischtkörniger Boden und sandiger Kies (sa Gr) angesprochen werden.

Um die Form der Körnungslinie zu bestimmen, müssen die Werte d_{60} , d_{30} und d_{10} aus der Korngrößenverteilung herausgelesen werden. Als z.B. d_{60} wird die Korngröße verstanden, bei welcher sich die Korngrößenverteilung mit der horizontalen bei 60% Siebdurchgang schneidet.

Die Bestimmung der Werte ist in *Abbildung 37* dargestellt die Ergebnisse der Bestimmung sind in *Tabelle 21* angeführt.

Tabelle 21 Ergebnisse der Korngrößenverteilung d_{10} , d_{30} und d_{60}

	Korngröße [mm]
d_{60}	6,3
d_{30}	0,75
d_{10}	0,122

Aus diesen Werten können die zur Bestimmung der Form der Körnungslinie notwendigen Kennzahlen wie die Krümmungszahl C_c (*Gleichung 10*) und die Gleichförmigkeitszahl C_u (*Gleichung 11*) bestimmt werden.

$$\text{Glg. 10 } C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} * d_{10}} [-]$$

$$\text{Glg. 11 } C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} [-]$$

Daraus ergibt sich für die Krümmungszahl der Wert 0,7 und für die Gleichförmigkeitszahl der Wert 52.

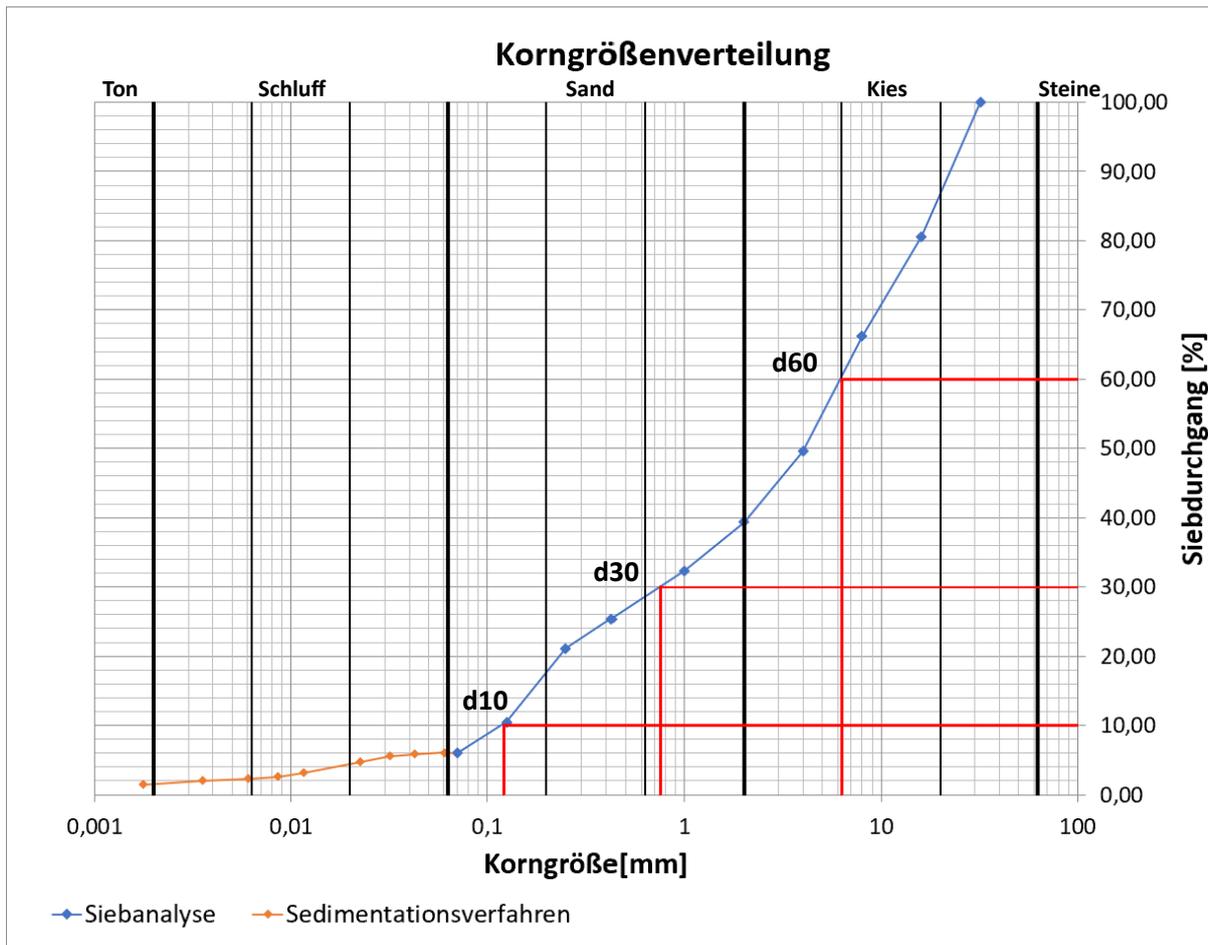


Abbildung 37 Auswertung der Korngrößenverteilung durch Bestimmung von d_{10} , d_{30} und d_{60}

Aus diesem Ergebnis lässt sich feststellen, dass es lt. ÖNORM EN ISO 14688-2 [64] um einen intermittierenden ($C_u > 15$ und $C_c < 0,5$) bis weitgestuften Boden ($C_u > 15$ und C_c 1 bis 3) handelt. Dies beschreibt einen Boden, der aus mehreren Kornfraktionen besteht und eine eher flache Korngrößenverteilung zeigt.

Aus der Siebanalyse nach ÖNORM EN 933-1 [61] kann ebenfalls als Ergebnis, der Gehalt an Feinteilen ($< 0,063\text{mm}$) bestimmt werden. Der Gehalt an Feinteilen für die gemessene Probe beträgt

$$f_{5,2} \dots \text{Siebdurchgang } (< 0,063 \text{ mm}) = 5,2 \text{ M-\%}$$

Die Eignung der Gesteinskörnung für unterschiedliche Applikationen aufgrund der ermittelten Korngrößenverteilung wird hier nicht näher beschrieben, da das Korngrößenspektrum auch sehr stark von der später verwendeten Vortriebsmethode abhängt.

6.2. Konsistenzgrenzen

Aus den in Kapitel 5.2. berechneten Konsistenzen (Fließgrenze und Ausrollgrenze) kann zur Beschreibung der Plastizität des Bodens die Plastizitätszahl nach Gleichung 4 ermittelt werden.

Daraus ergibt sich für die Plastizitätszahl I_p der Wert 10,8 %. Aus dem Plastizitätsdiagramm kann das Plastizitätsverhalten des Bodens herausgelesen werden (Abbildung 38). Das Feld in der die Ergebnisse der Plastizitätszahl und der Fließgrenze plotten ist das CIL Feld. Hierbei handelt es sich lt. ÖNORM EN ISO 14688-2 [64] um einen Ton mit niedriger Plastizität.

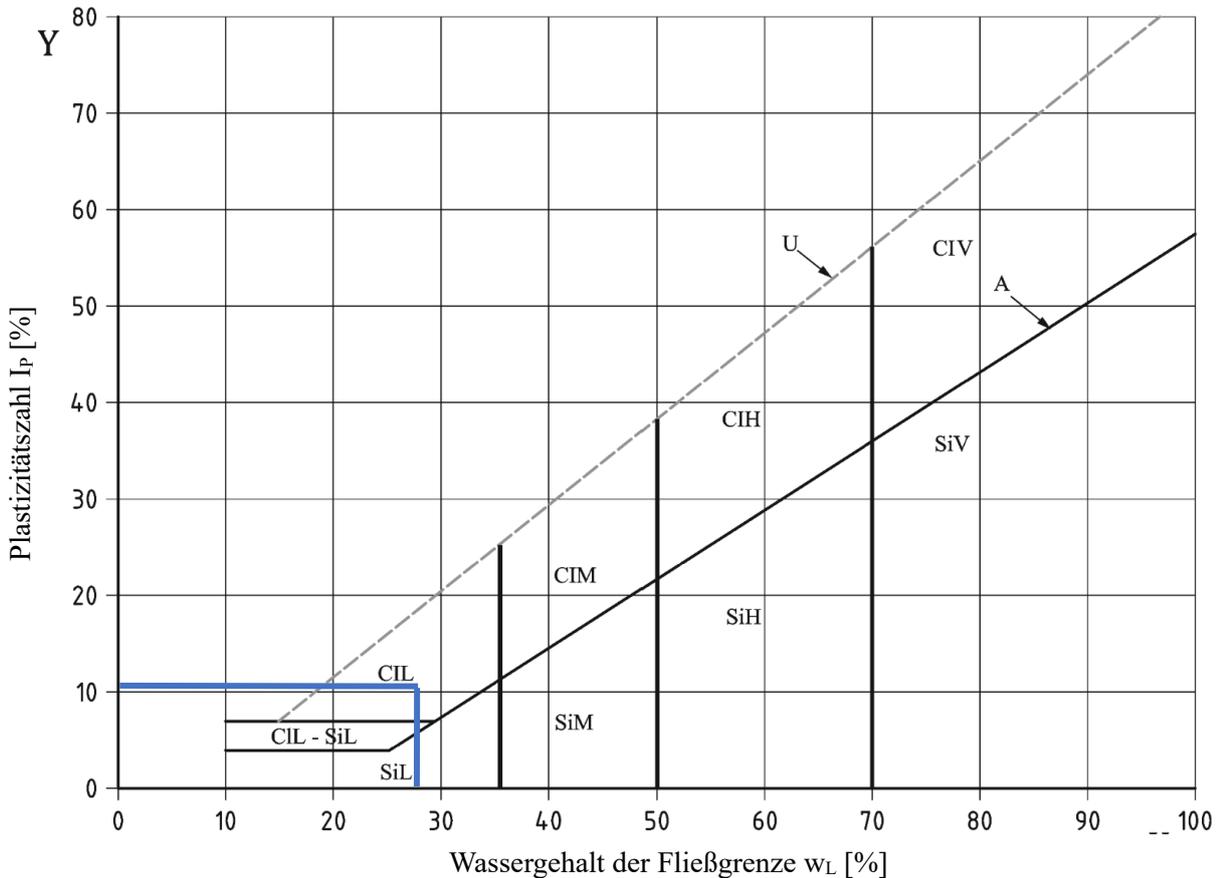


Abbildung 38: Plastizitätsdiagramm nach Casagrande zur Ermittlung des Plastizitätsverhalten des Bodens aus ÖNORM EN ISO 14688-2 [64] CIL=Ton mit geringer Plastizität, CIM=Ton mit mittlerer Plastizität, CIH= Ton mit hoher Plastizität, CIV=Ton mit sehr hoher Plastizität, SiL=Silt mit geringer Plastizität, SiM=Silt mit mittlerer Plastizität SiH=Silt mit hoher Plastizität, SiV=Silt mit sehr hoher Plastizität

6.3. Widerstand gegen Frost-Tau Wechsel

Beim Versuch zur Bestimmung des Widerstands gegen Frost-Tau-Wechsel wurde ein Wert F_{89} ermittelt. Dies bedeutet, dass nach der Frost-Tau Beanspruchung 89% der Masse der Ausgangsprobe durch ein 4mm Sieb durchgegangen sind. In der Norm ÖNORM EN 12620 [78] wird in die Kategorien F_1 , F_2 , F_4 , $F_{angegeben}$ und F_{NR} (keine Anforderung) unterschieden. Bei genauerer Betrachtung des Prüfvorgangs wurde ersichtlich, dass die Probe sich bereits beim Schritt des Tränkens sehr stark veränderte (Abbildung 39 a)). Daher ist hier bereits die hohe

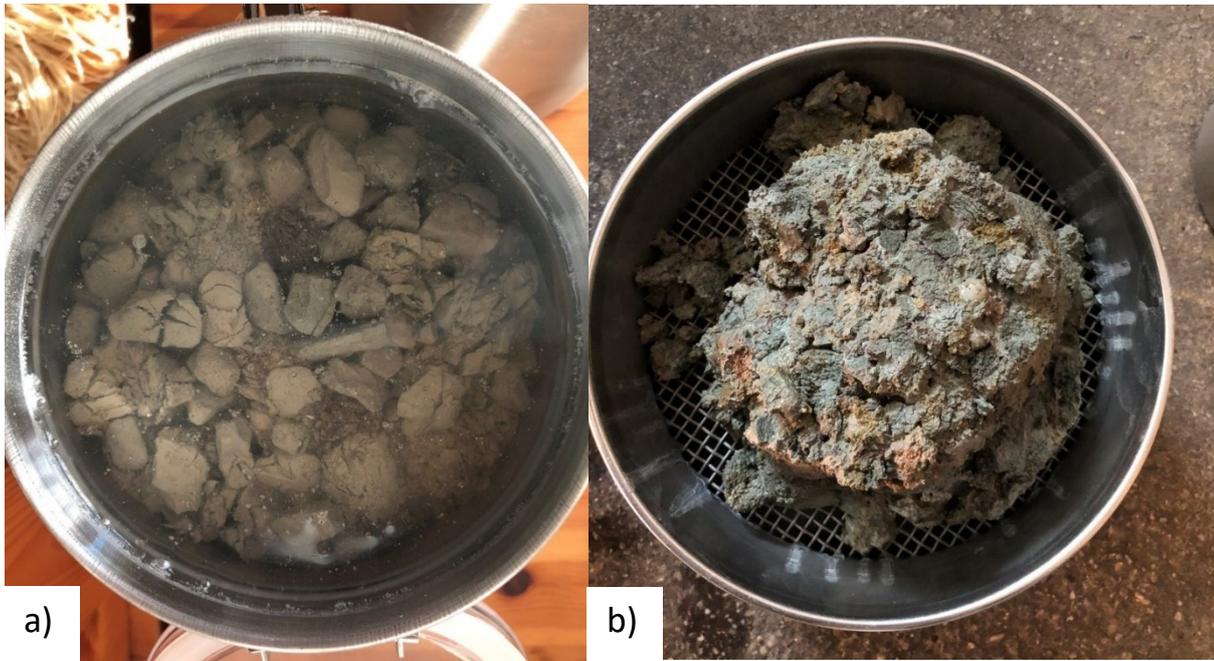


Abbildung 39: a) Gesteinskörnung 8-16 mm nach 24h tränken in deionisiertem Wasser b) Reste der Gesteinskörnung 8-16mm nach der Beanspruchung von 10 Frost-Tau Zyklen

Sensibilität des Materials gegenüber Wasser zu erkennen. Nach Beendigung des Versuchs wurde die geprüfte Körnung ebenfalls begutachtet. Dabei fiel auf, dass sich eine plastische Masse gebildet hat (Abbildung 39 b). Die Körner sind Großteils noch zu erahnen, konnten jedoch ohne weiteres mit dem Finger zerdrückt werden. Beim Absieben des Materials durch das 4mm Sieb zeigten einzelne Körner ein sehr klebriges Verhalten und konnten nur schwer durchs Sieb gewaschen werden. Ca. 10% der Ausgangskörnung haben die Frost Tau Wechsel positiv überstanden.

6.4. Alkali Kieselsäure Reaktivität

Die Ergebnisse der einzelnen Messungen beim Schnelltest zur Bestimmung der Alkali Kieselsäure Reaktivität zeigen eine gute Korrelation der einzelnen Proben zueinander (Abbildung 40). Die Standardabweichung nimmt von der ersten bis zur vierten Messung hin ab und zeigt bei der fünften Messung noch einmal eine Zunahme. Das Ergebnis der Dehnung von 0,37 ‰ liegt deutlich unter dem Grenzwert für den Schnelltest an Mörtelprismen der Reaktivität von 1 ‰ (ÖNORM B3100 [70]) und kann daher als unbedenklich gegenüber Alkali Kieselsäure Reaktivität angesehen werden.

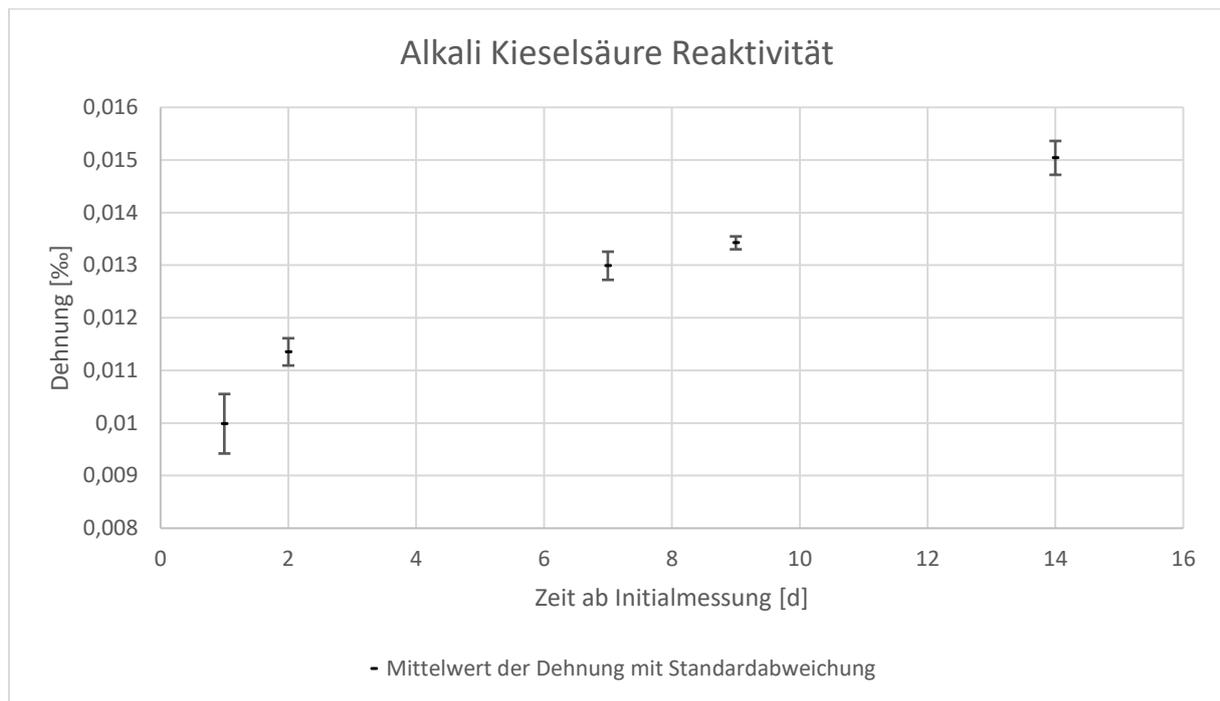


Abbildung 40: Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse Dehnungen der einzelnen Messtage inklusive der Standardabweichung

6.5. Widerstand gegen Zertrümmerung

Das Ergebnis des LA-Wertes = 48 zeigt einen geringen Widerstand gegenüber Zertrümmerung an. Wie in den Auswertungen der Verwertungsmöglichkeiten in Kapitel 6.6. ersichtlich hat der hohe LA-Wert eine große Auswirkung auf die möglichen Verwertungspotentiale des Materials in technischen Anwendungen. Der geringe Widerstand kann auf eine geringe Verfestigung des Sediments hinweisen und kann sich auch beim Transport, beim Handling oder der Aufbereitung negativ auf die Eigenschaften des Materials auswirken. Dazu wäre es auch noch möglich den modifizierten LA-Test von Resch (2012) [37] durchzuführen, um den Einfluss einer autogenen Zerkleinerung des Materials abschätzen zu können.

Durch den von Girmscheid (2013) [73] definierten Zusammenhang kann aus dem Ergebnis des LA-Tests auf den Brechbarkeitsindex geschlossen werden. *Abbildung 41* zeigt diesen Zusammenhang, wobei sich für einen LA-Wert von 48 ein Brechbarkeitsindex von 82 ergibt.

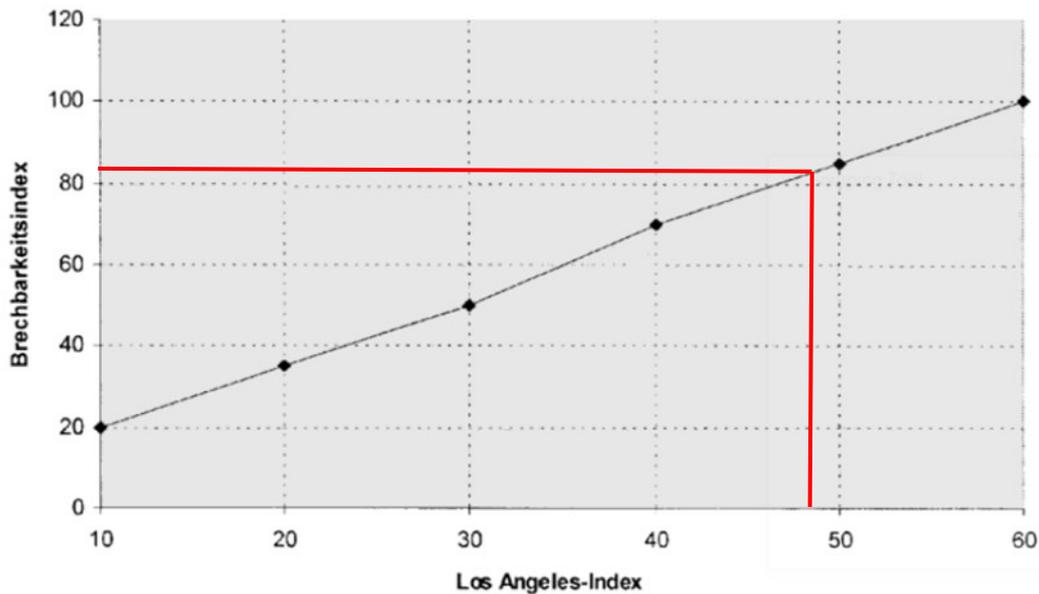


Abbildung 41: Bestimmung des Brechbarkeitsindex aus dem Los Angeles-Index

Der Zusammenhang des LA Werts mit der Schlagzertrümmerung aus Schießl (2005) [76] soll hier ebenfalls ausgewertet werden. Hier sei anzumerken, dass der Großteil der im Diagramm (*Abbildung 42*) dargestellten Werte niedrige LA Werte darstellen und die Kurve nicht so weit dargestellt ist. Der mit der BAST-Gleichung ermittelte SZ-Wert ergibt 31 M-%. Der Schlagzertrümmerungswert gibt den Widerstand gegenüber Schlagbeanspruchung nach ÖNORM EN 1097-2 [79] an. Der hier ermittelte Wert gibt einen niedrigen Widerstand gegenüber Schlagbeanspruchung an.

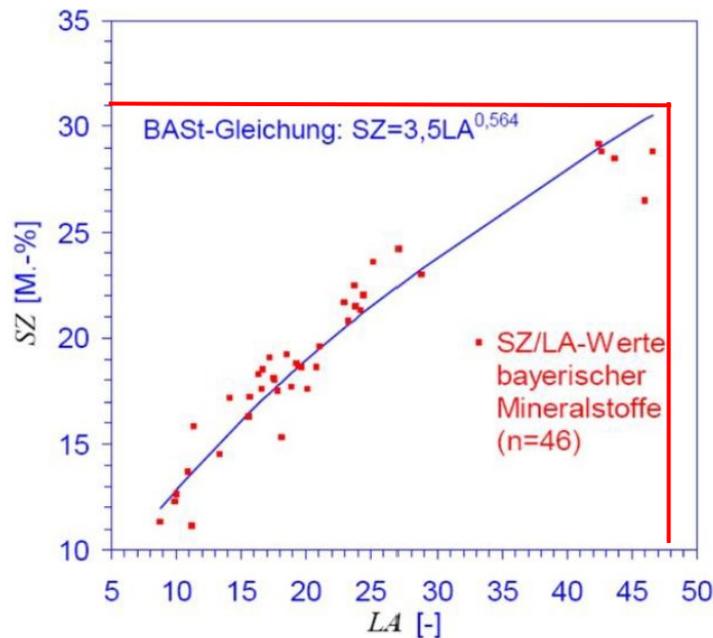


Abbildung 42: Zusammenhang des Los Angeles Index mit dem Schlagzertrümmerungswert

6.6. Verwertungspotential als Recyclingrohstoff

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Auswertung mit dem Modell zur analytischen Betrachtung der Verwertungspotentiale für Tunnelausbruchsmaterial nach Lenes (2022) [39] beschrieben werden. Hierbei wurde die Ergebnisse aus den in den vorangegangenen Kapiteln in das Modell übertragen, um dadurch eine Aussage über die Eignung für die im Modell hinterlegten Verwertungsmöglichkeiten wie die Verwendung der Gesteinskörnung im Straßen- und Wegebau, Verwertung in Beton, Spritzbeton und Mörtel, Verwertung im Eisenbahnwesen und der Verwertung in Hinterfüllungen und Auffüllungen für das Material zu erhalten.

Die geprüften Anwendungen werden nachfolgend aufgezeigt, wobei rote Balken ein negatives Ergebnis anzeigen.

Gesteinskörnung im Straßen- und Wegebau

Um das Material für den Einbau im Straßen- und Wegebau verwenden zu können, müssen die in den nachfolgenden Abbildungen geforderten Grenzwerte eingehalten werden. Für Frostschuttschichten wurde zur Prüfung hierbei auf eine Regelung nach ZTV Sob-StB 04 [80] zurückgegriffen. Die Kriterien für Straßendämme wurden aus UNI 11531-1 [81] entnommen. Die Kriterien für die ungebunden obere Tragschichten sind an die RVS 08.15.01 [82] angelehnt. Für bituminöse obere Tragschichten konnte gegen die Grenzwerte aus der ÖNORM B 3580-1 [83] geprüft werden. Ebenfalls gegen eine bautechnische Norm kann der Einsatz als Asphaltdeckschicht geprüft werden (ÖNORM B 3130 [84]). Als Referenz zur Prüfung der Ergebnisse für Betondeckschichten wird die ÖNORM EN 206 [85] angegeben. Hierbei wird

ersichtlich, dass ein zu hoher LA-Wert und eine zu geringe Frost-Tau-Beständigkeit diesen Einsatz für das unbehandelte Ausbruchsmaterial für die hier betrachteten Verwertungswege einschränken (Abbildung 43,44,45,46,47,48).

Kriterien für **Frostschuttschichten** nach ZTV SoB-StB 04

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 30
Schlagzertrümmerung	ÖNORM EN 1097-2		SZ 26
Frost-Tau-Beständigkeit	ÖNORM EN 1367-1	>F4	F4
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 55
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3		FI 50
Wasseraufnahme nach 24h	ÖNORM EN 1097-6		<0,5%

Abbildung 43: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Frostschuttschicht

Kriterien für **Straßendämme** nach UNI 11531-1

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 35
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3		FI 50
Plastizitätszahl	ÖNORM EN 17892-12	11 %	<10 %

Abbildung 44: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Straßendämmen

Kriterien für **ungebundene obere Tragschichten** nach RVS 08.15.01

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 40
Frost-Tau-Beständigkeit	ÖNORM EN 1367-1	>F4	F2
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 40
Wasseraufnahme nach 24h	ÖNORM EN 1097-6		<4,0%

Abbildung 45: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in ungebunden obere Tragschichten

Kriterien für **bituminös gebundene obere Tragschichten** nach ÖNORM B 3580-1

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 40
Frost-Tau-Beständigkeit	ÖNORM EN 1367-1	>F4	F2
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 50

Abbildung 46: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in bituminös gebundenen oberen Tragschichten

Kriterien für **Asphaltdeckschichten** nach ÖNORM B 3130

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 30
Frost-Tau-Beständigkeit	ÖNORM EN 1367-1	>F4	F1
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 15
Widerstand gegen Polieren	ÖNORM EN 1097-8		PSV 50

Abbildung 47: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Asphaltdeckschichten

Kriterien für **Betondeckschichten** nach ÖNORM EN 206

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 50
Schlagzertrümmerung	ÖNORM EN 1097-2		SZ 32
Frost-Tau-Beständigkeit	ÖNORM EN 1367-1	>F4	F4
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 55
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3		FI 50
Widerstand gegen Polieren	ÖNORM EN 1097-8		PSV 50

Abbildung 48: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Betondeckschichten

Verwertung in Beton, Spritzbeton und Mörtel

Die Verwertungsmöglichkeiten in Betonanwendungen werden nachfolgend gezeigt. Hierbei wird die Grenze des LA-Wertes für die Anwendung in Schalungs-(nach ÖNORM EN 206 [85]) und Spritzbeton (nach ÖNORM EN 206 [85]) noch eingehalten jedoch wird die geforderte Frost-Tau-Beständigkeit mit dem ermittelten Ergebnis von F_{89} deutlich überschritten (*Abbildung 49 und Abbildung 50*). Für den Einsatz als Perlkies für Ringspaltverfüllungsmörtel (nach KORDINA ZT GmbH 2019 [86]) werden ebenfalls die Grenzwerte für den LA-Wert und die Frost-Tau-Beständigkeit nicht erreicht (*Abbildung 51*). Eine Verwendung als Gesteinskörnung für Putz und Mörtelsande (nach DIN 18550 – 2 [87]) muss durch die Ermittlung zusätzlicher Parameter noch geklärt werden (*Abbildung 52*). Jedoch kann hier auf die Beobachtungen aus dem Frost-Tau-Versuch zurückgegriffen werden, welche eine starke Reaktion mit Wasser zeigen und daher Zweifel zulassen, ob der Grenzwert für die Wasseraufnahme erreicht wird.

Kriterien für Gesteinskörnung für **Schalungsbeton** nach ÖNORM EN 206

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 50
Schlagzertrümmerung	ÖNORM EN 1097-2		SZ 32
Frost-Tau-Beständigkeit	ÖNORM EN 1367-1	>F4	F4
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 55
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3		FI 50

Abbildung 49: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Gesteinskörnung in Schalungsbeton

Kriterien für Gesteinskörnung für **Spritzbeton** nach ÖNORM EN 206

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 50
Schlagzertrümmerung	ÖNORM EN 1097-2		SZ 32
Frost-Tau-Beständigkeit	ÖNORM EN 1367-1	>F4	F4
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 55
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3		FI 50

Abbildung 50: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Gesteinskörnung in Spritzbeton

Kriterien für Gesteinskörnung als **Perlkies für Ringspaltverfüllungsmörtel** nach KORDINA ZT GmbH (2019)

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 26
Frost-Tau-Beständigkeit	ÖNORM EN 1367-1	>F4	F2
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 15
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3		FI 15

Abbildung 51: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Perlkies für Ringspaltverfüllungsmörtel

Kriterien für Gesteinskörnung für **Putz- und Mörtelsande** nach DIN 18550-2

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 55
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3		FI 50
Wasseraufnahme nach 24h	ÖNORM EN 1097-6		<1,0%

erfüllt

Abbildung 52: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Putz- und Mörtelsanden

Verwertung im Eisenbahnwesen

Im Eisenbahnwesen wurde die Verwendung des Materials in der Anwendung als Gleisschotter (ÖNORM B 3133 [88]) und als Material für Eisenbahndämme (nach UNI 11531-1 [81]) geprüft. Die Verwertung als Gleisschotter wird durch einen zu hohen LA Wert eingeschränkt (Abbildung 53). Für Eisenbahndämme wird ebenfalls der geforderte LA Wert nicht erreicht und die Plastizitätszahl ist ebenfalls außerhalb der geforderten Grenzen (Abbildung 54).

Kriterien für **Gleisschotter** nach ÖNORM B 3133

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung
Point Load Index	ASTM D5731-07		>5 MPa
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 24
Schlagzertrümmerung	ÖNORM EN 1097-2		SZ 22
Kornformkennzahl	ÖNORM EN 933-4	SI 11	SI 30

Abbildung 53: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Gleisschotter

Kriterien für **Eisenbahndämme** nach UNI 11531-1

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung	
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 35	
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3		FI 50	
Plastizitätszahl	ÖNORM EN 17892-12	11 %	<10 %	

Abbildung 54: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Eisenbahndämmen

Verwertung für Hinterfüllungen sowie Auffüllungen

Zur Verwertung in Hinterfüllungen sowie Auffüllungen werden die Grenzwerte gegenüber Vorgaben aus UNI 11531-1 [81] geprüft. Dabei ist ersichtlich, dass ein zu hoher LA-Wert sowie eine leicht zu hohe Plastizitätszahl den Einsatz in Frage stellen (Abbildung 55).

Kriterien für **Hinterfüllungen & Auffüllungen** nach UNI 11531-1

geotechnische Anforderungen	gemäß Regelwerk	Messwert	Anforderung	
LA-Wert	ÖNORM EN 1097-2	LA 48	LA 35	
Plattigkeitskennzahl	ÖNORM EN 933-3		FI 50	
Plastizitätszahl	ÖNORM EN 17892-12	11 %	<10 %	

Abbildung 55: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Hinterfüllungen und Auffüllungen

7. Interpretation

Das möglichst vollständige Verwerten von Material, welches bei unterirdischen Infrastrukturarbeiten anfällt, soll ein primäres Ziel für künftige Projekte sein. Durch die gezielte Auswahl der geotechnischen Untersuchungen, konnten Aussagen über den Einsatz für diverse Applikationen getroffen werden.

7.1. Sensitivität des Materials gegenüber Wasser

Hierbei hat vor allem die Untersuchung der Frost-Tau Beständigkeit gezeigt, dass dieses Ergebnis für weitere Verwendung des Materials erheblichen Einfluss hat. Das Ergebnis von F89 zeigt nur einen sehr geringen Widerstand gegen die Frost Tau Beständigkeit. Hierbei sei jedoch zu erwähnen, dass die Proben vor dem Versuch nicht gewaschen wurden. Beim Versuch die Proben zu waschen, wurden diese immer weicher und begannen sich zu zersetzen. Der Waschvorgang wurde abgebrochen und die Proben getrocknet. Nach dem Trocknen verloren ein Großteil der vorliegenden Körnungen ihre Festigkeit und konnten zwischen den Fingern zerdrückt werden. Dadurch wurde beschlossen, den Waschvorgang nicht anzuwenden, da dieser die Aussage der direkten Verwendung der in der Molasse vorliegenden Gesteinskörnungen getrübt hätte, und es sich dabei um einen ersten aufwendigeren Aufbereitungsschritt handelt. Die Sensitivität gegenüber Wasser zeigte sich ebenfalls beim Tränken der Körnungen im ersten Schritt der Frost-Tau Prüfung. Dabei war klar ersichtlich, dass sich die Körner an der Oberfläche beginnen zu zersetzen. Dieser Vorgang zeigt einen wichtigen Punkt für eine zukünftige Verarbeitung oder Lagerung des Materials. Bei Wasserkontakt ändern sich nicht nur die Korngrößen, sondern auch die Festigkeit nimmt ab. Der Grund dafür kann in einer nicht ausreichenden Zementation der Sedimente liegen. Ebenfalls die vorhanden Tonminerale wie Illit und Smektit [16] können durch ihr Quellverhalten den Verbund innerhalb der Sedimente auflösen. Bei den hierbei geprüften Verwendungsmöglichkeiten zeigte sich, dass so bald Anforderungen an die Frost-Tau Beständigkeit gegeben sind, diese nicht eingehalten werden können. Somit ergibt sich nach den in den Kapiteln erwähnten Normen und Richtlinien keine direkte Verwendung des Materials im Straßen- und Wegebau als Frostschutzschicht, als obere Tragschicht, als Asphaltdeckschicht oder in Betondeckschichten. Ebenfalls eine direkte Verwendung des Materials in den erwähnten Betonapplikationen ist auf Grund des hohen Frost-Tau Widerstands nicht möglich. Die Kriterien für Putz und Mörtelsande wurden nicht vollständig geprüft, jedoch scheint es hier als sehr wahrscheinlich, dass die Anforderungen an die Wasseraufnahme auf Grund des beobachteten Verhaltens gegenüber Wasser nicht erfüllt werden. Wie aufwendig das Material aufbereitet werden muss, um nur die kompetenten Gesteinskörnungen zu erhalten geht aus den hier durchgeführten Versuchen nicht hervor.

7.2. Widerstandsparameter

In weiteren Applikationen zur Verwendung des Ausbruchsmaterial wird ein gewisser Widerstand gegen Zertrümmerung gefordert. Der hierzu durchgeführte Los Angeles Test ergab einen LA Wert=48. Dieser Wert zeigt eine mittlere Beständigkeit gegenüber der

Zertrümmerung, erfüllt jedoch ebenfalls nicht die Anforderungen, welche in den geprüften Anwendungen vorgegeben werden. Vor allem als Einsatz im Bahnwesen und als Hinterfüllung oder Auffüllung, wo keine konkreten Anforderungen an die Frost-Tau Beständigkeit gegeben sind, hätte ein niedrigerer LA-Wert eventuell das Potential eines Einsatzes erhöht.

Beim Einsatz als Hinterfüllung oder Auffüllung gibt es ebenfalls Anforderungen an die Plastizitätszahl. Das Ergebnis der Untersuchungen der Fließ- und Ausrollgrenze ergaben eine Plastizitätszahl von 11, welche dabei leicht über den geforderten Wert von 10 für diese Anwendung liegt. Dabei können bei der Bestimmung der Plastizitätsgrenzen auch Informationen über das Plastizitätsverhalten des Materials erhalten werden. Das hierbei untersuchte Material plottet dabei im Feld der niedrig plastischen Tone. Hierbei sei zu erwähnen, dass beim Absieben des Materials nach dem Frost-Tau Versuchs Material im Sieb zurückblieb, welches sich stark plastisch verhielt und nur schwer aus dem Sieb auszuwaschen war. Die stark plastischen Tone würden auf quellfähige Tonminerale deuten, wobei hier zur genaueren Bestimmung der vorhandenen Tonminerale die Röntgenbeugung (XRD) angewendet werden sollte. Dieser Umstand kann für den Tunnelvortrieb wichtig sein, da stark plastische Tone zum Verkleben des Schneidwerkzeugs führen können.

7.3. Kieselsäure Reaktivität

Bei neuen Lagerstätten welche Gesteinskörnungen in die Betonbranche liefern, kann es nötig sein eine Prüfung der Alkali Kieselsäure Reaktivität durchzuführen, um die Schädigung des Betons auf Grund der Gesteinskörnungen zu verhindern. Der hierbei durchgeführte Schnelltest, zeigte ein positives Ergebnis welche unter dem Grenzwert von 1 ‰ liegt und das Material kann hierbei als unreaktiv angesehen werden. Nach der Beschreibung von Bokern (2008) [89] kann dadurch auf einen unreaktiven Zustand des Quarzes geschlossen werden. Dieser liegt eher dann vor, wenn der Quarz eher in seiner kristallinen Form vorliegt. Anfällig für die Reaktion sind vor allem die amorphen Formen der Kieselsäure (SiO_2). Ebenso eine gegebenenfalls tektonische Beanspruchung des Quarzes kann durch die Verzerrung des Kristallgitters negativen Einfluss auf die Reaktivität haben. Die bereits erwähnte geringe tektonische Beanspruchung der Gesteine in der USM, welche über eine fortgeschrittene Diagenese nicht hinausgeht [90], kann hierbei ebenfalls positiv zur geringen Reaktivität des Materials beitragen. Diese niedrige Reaktivität würde damit den Einsatz im Beton zulassen.

7.4. Relevante Bodenkennwerte

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Parametern wurde die Korngrößenverteilung des Probenmaterials mittels Sieb- und Sedimentationsanalyse geprüft. Hierbei zeigt sich vor allem ein steiler Anstieg im Bereich der Sand und Kiesfraktion, welche auch die Hauptmengen der Probe darstellen. Die Siebanalyse wurde wegen der bereits erwähnten Sensibilität gegenüber Wasser ebenfalls nur trocken durchgeführt. Die für die Anwendungen notwendigen Kornverteilungen sind können mit diesem Ergebnis nicht geprüft werden. Dabei wäre es notwendig größere Mengen des Materials zu sieben und gegebenenfalls Berechnungen

anzustellen, wie die einzelnen Kornfraktionen gemischt werden müssen, um den Anforderungen hier gerecht zu werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die geologische Vorarbeit einen wichtigen Beitrag zur Erkundung eines Tunnelprojekts gibt. Für den weiteren Projektfortschritt ist auch die Gewinnung der geotechnischen Daten unabdingbar. Die beiden erwähnten Klassifizierungen nach Trümpy (1980) [15] und Fern et al. (2018) [16] geben einen guten Überblick, einerseits über die Entstehung, aus der viele Erklärungen zur Zusammensetzung des Materials abgeleitet werden können als auch die geotechnischen Eigenschaften der Molasse, welche ein wichtiger Faktor für die Planung und den Bau von unterirdischen Infrastrukturen bieten. Zur Vorhersage eines Wiederverwertungsszenario haben beide Modelle ihre Limitationen.

Durch die Heterogenität der Molasse ist es schwierig die tatsächliche Verteilung der unterschiedlichen Gesteine aus den Klassifizierungen nach Fern vor und auch während des Baus zu definieren und vor allem diese im Zuge der Bauarbeiten voneinander zu trennen. Die Stratigrafische Unterteilung nach Trümpy lässt ebenfalls keine konkreten Aussagen über die Zusammensetzung des Ausbruchsmaterials zu. Dabei können jedoch Erfahrungen aus bereits in derselben stratigrafischen Einheit getätigten Bauarbeiten bzw. auch Ergebnisse aus in dieser Einheit durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten miteinander korreliert werden.

8. Schlussfolgerungen

Durch die ausgewählten ermittelten geotechnischen Parameter sollten Verwertungspotentiale in technischen Anwendungen eruiert werden. Verknüpft man die Ergebnisse und Auswertungen der Untersuchungen mit den Anforderungen an die hier vorgestellten technischen Verwendungsmöglichkeiten, so muss man erkennen, dass das Material in diesen, ohne etwaige weitere Aufbereitungen, nicht eingesetzt werden kann. Die Bedingungen, welche einen Einsatz in technischen Anwendungen erschweren, sind vor allem die geringe Resistenz gegen die Einwirkung von Frost-Tau Beanspruchung, der hohe LA-Wert so wie die generelle beobachtete Sensibilität gegenüber Wasser. Hierbei wurden die Anforderungen an die Materialklassen nach Bundes-Abfallwirtschaftsplan BAWP [91], Recycling-Baustoffverordnung [92] und Deponieverordnung DepVO [93] noch nicht berücksichtigt. Alternative Einsatzmöglichkeiten wie sie zum Beispiel im „Mining the future“ Wettbewerb bereits vorgeschlagen wurden, müssen weiterverfolgt werden. Hierbei sei erwähnt, dass es sinnvoll ist, sich um eine Gesamtlösung der eingereichten Ideen zu bemühen, um das anfallende Material möglichst vollständig verwerten zu können. Dabei sind Versuche zu unternehmen, wie sich das Material in der Aufbereitung verhält und die Auswirkungen auf das Material einer gegebenenfalls für eine Verwertung notwendige Zwischenlagerung des Materials muss untersucht werden. Es sind außerdem die verwendeten Vortriebsmethoden in den Verwertungsszenarien zu berücksichtigen, da diese Auswirkungen auf die Qualität und Korngrößenverteilung haben. Um eine Gesamtlösung zu finden, bedarf es einer umfassenden Recherche der benötigten Grenzwerte der einzelnen Anwendungen sowie einem fortgeschrittenen Materialwirtschafts- und Logistikkonzepts welche diesen Prozess vollständig abbildet. Es soll hier auch noch erwähnt werden, dass diese Gesamtlösung auch finanziell einen Benefit bringen soll. Aus diesem Grund sollte auch der Aspekt der regionalen Rohstoffindustrie und der rohstoffverarbeitenden Industrie genauer behandelt werden sowie ein Überblick über die Preissituation und den Einfluss neuer Mengen auf den lokalen Markt zu eruieren.

Die Punkte die offen bleiben sind, wie man für Projekte dieser Größe ökonomisch und technisch gute Vorhersagen zur Wiederverwertung treffen kann. Die Möglichkeit in der Planungsphase Verwertungspotentiale konkret zu definieren ist in einer heterogenen Geologie eine Herausforderung. Vor allem eine unsichere Vorhersage über die auftretenden Mengen der einzelnen Lithologien macht eine Kostenkalkulation schwierig und erfordert einen flexiblen Prozess. Jedoch ist jede Tonne, die nicht deponiert werden muss, ein Schritt in die richtige Richtung einer nachhaltigen Bewirtschaftung unserer limitierten Rohstoffreserven.

9. Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 Übersicht der wichtigsten Bauwerke des FCC-ee mit entsprechenden Dimensionen [52]</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 2 Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung der Druckfestigkeiten mit Unterschiedlichen Gesteinskörnungen.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 3 Mindestmassen der Messproben von Gesteinskörnungen [61]</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 4 Ableseintervalle beim Sedimentationsverfahren zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der Feinfraktion [62]</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 5 Einteilung der Kornfraktionen nach ÖNORM EN ISO 14688-2 [64]</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 6 Kegeltypen sowie Versuchsbedingungen für den Fallkegelversuch [65].....</i>	<i>37</i>
<i>Tabelle 7 Gesteinskörnungen für die Durchführung des Frost-Tau Versuchs [68]</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 8 Schädigende Anteile an alkaliempfindlichen Mineralen in Beton aus [69]</i>	<i>43</i>
<i>Tabelle 9 Beanspruchungsklasse gegen Alkali-Kieselsäurebeständigkeit [70].....</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 10 vorgegebene Kornklassen zur Herstellung der Prismen für den Alkali Kieselsäureschnelltest [70]</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 11 Einteilung der Brechbarkeit anhand des Brechbarkeitsindex (LBR) nach Buechi, Mathier et al. (1995) [74].....</i>	<i>49</i>
<i>Tabelle 12 Messergebnisse der Korngrößenverteilung nach ÖNORM EN 933-1 [61]</i>	<i>52</i>
<i>Tabelle 13 Messergebnisse des Sedimentationsverfahren nach ÖNORM EN ISO 17892-4 [62]</i>	<i>53</i>
<i>Tabelle 14 Anteile der Kornfraktionen in der gemessenen Probe</i>	<i>54</i>
<i>Tabelle 15 Darstellung der Messergebnisse aus dem Fallkegelversuch zur Bestimmung der Fließgrenze</i>	<i>54</i>
<i>Tabelle 16 Ergebnisse zur Bestimmung der Ausrollgrenze.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabelle 17 Ergebnisse des Versuchs zur Bestimmung der Frost-Tau-Wechselbeständigkeit.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabelle 18 Tabellarische Darstellung der Messergebnisse der Längenänderungen nach ÖNORM B3100 [70] und des Ergebnisses der Dehnung</i>	<i>57</i>
<i>Tabelle 19 Messwerte und Auswertung zur Bestimmung der Kornformkennzahl</i>	<i>58</i>
<i>Tabelle 20 Messwerte und Auswertung zur Bestimmung des Los Angeles Koeffizienten</i>	<i>58</i>
<i>Tabelle 21 Ergebnisse der Korngrößenverteilung d10, d30 und d60</i>	<i>59</i>

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 tektonische Übersicht des Alpenraumes mit den Großtektonischen Einheiten [3]	3
Abbildung 2: Überblick der geologischen Einheiten der Schweiz [10].....	4
Abbildung 3: interpretiertes geologisches Profil durch die Westalpen, welches die Haupteinheiten zeigt [11]	5
Abbildung 4: A) Überblick der tektonischen Einheiten im westalpinen Molassebecken im Bereich des FCC-Projektgebietes; B) Profil durch das westalpine Molassebecken, welches die Lagerungsverhältnisse der mesozoischen Einheiten (Salève) im Projektgebiet zeigt	6
Abbildung 5: Übersichtskarte des westalpinen Molassebeckens aus Schlunegger et al. (2007) [25].....	9
Abbildung 6 Paläogeografische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit der UMM vor ca. 31 Millionen Jahre zeigt die Ausdehnung der marinen Bereiche [20]	10
Abbildung 7: Paläogeographische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit der USM vor ca. 22 Mio. Jahren zeigt die Ablagerung terrestrischer Sedimente über große Schuttfächer im Süden und eine Entwässerung in Richtung Nordosten [11].....	11
Abbildung 8: Paläogeographische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit der OMM vor ca. 20 Millionen Jahre zeigt die erneuten marinen Bedingungen und eine Transgression in Richtung Nordosten [11]	12
Abbildung 9: Paläogeographische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit der OMM vor ca. 18 Mio. Jahren, zeigt die Verbreiterung des Beckens und ebenfalls einen Anstieg des Wasserspiegels [11]	12
Abbildung 10: Paläogeographische Rekonstruktion des Molassebeckens in der Zeit Ende OMM und zur Zeit der OSM zwischen 18Mio und 14 Mio. Jahren zeigt den Rückzug des Meeres nach Südwesten und eine Entwässerung in dieselbe Richtung und die erneute Ablagerung terrestrischer Sedimente [11].....	13
Abbildung 11 Ergebnisse des einachsialen Druckversuchs an den unterschiedlichen Klassen 1) sehr schwacher Mergel, 2) schwacher Mergel, 3) mittelschwacher Mergel, 4) schwacher Sandstein, 5) mittelstarker Sandstein, 6) starker Sandstein [16].....	14
Abbildung 12: Geologischer Schnitt des LHC Point 1 Probenentnahmestelle mit der Klassifizierung nach Fern et al. (2018) zeigt den heterogenen Aufbau der Molasse im Bereich der Bauarbeiten welche eine Herausforderung für die weitere Aufbereitung darstellen [1, 2]	16
Abbildung 13 Darstellung der zu berücksichtigenden Randbedingungen für die Verwendung von Tunnelausbruchsmaterial aus Resch (2012) [37].....	17
Abbildung 14 Schematische Darstellung der geplanten Infrastruktur des FCCs [52].....	20
Abbildung 15: Darstellung des Projektgebietes, Überblick über die geologischen Verhältnisse und der Position des LHC und mögliche Position des FCC [52]	21
Abbildung 16: Abwicklung der Linienführung des Tunnels inklusive der Topografie und der Geologie aus [52].....	22

Abbildung 17: Überblickskarte des Probenursprungs in der Nähe von Meyrin (Schweiz) ©OpenStreetMap [60]	28
Abbildung 18: Angeliefertes Material aus welchem die Probe für die Versuche entnommen wurden am ZAB Ursprung CERN HL-LHC-Point 1	29
Abbildung 19. Messaufbau beim Sedimentationsverfahren Sedimentationszylinder mit der eingefüllten Suspension und das Aräometer zum Messen der Dichte der Suspension	32
Abbildung 20: Konistenzbalken zur Darstellung der Zustandsgrenzen nach Atterberg [66].....	35
Abbildung 21: Ermittlung der Fließgrenze mittels Fallkegelversuch bei 10mm Eindringtiefe wird der Wassergehalt abgelesen [65]	37
Abbildung 22 a) Aufbau Fallkegelversuchseinrichtung b) Messgerät Versuch nach Casagrande	38
Abbildung 23: Schematische Darstellung des Versuchs nach Casagrande [65]	39
Abbildung 24: Ermittlung der Ausrollgrenze, herstellen von 3mm Rollen bis diese zu bröckeln beginnen	40
Abbildung 25: Temperaturverlauf des Frost-Tau Versuches.....	42
Abbildung 26 links: Messung der Bezugslänge mit einem Messschieber; rechts: Messung der Initialmessung mit einem Schwindmessgerät.....	45
Abbildung 27: Darstellung eines Kornformmessschieber zur raschen Ermittlung der Kornform [71] 46	
Abbildung 28: Aufbau der Prüfeinrichtung zur Ermittlung des LA Koeffizienten nach ÖNORM EN 1097-2 1) Innenlänge (508 ±5)mm, 2) Innendurchmesser (711 ± 5)mm, 3) Mitnehmerleiste, 4) Deckel und Öffnung, 5) Rotation, 6) Blech [72].....	47
Abbildung 29: Zusammenhang zwischen Brechbarkeitsindex und dem Los-Angeles Index nach Girmscheid (2013) [73].....	48
Abbildung 30 Zusammenhang des LA Werts mit der Schlagzertrümmerung nach Schießl (2005) [76]	49
Abbildung 31: Eingabefenster zur Eingabe der technischen Parameter einer Probe im Verwertungsmodell von Lenes (2022) [39]	50
Abbildung 32: Eingabemaske und Darstellung der Korngrößenverteilung fuer im Verwertungsmodell von Lenes (2022) [39].....	51
Abbildung 33: Grafische darstellung der Ergebnisse der Siebanalyse (blau) und der Sedimentationsanalyse (orange) in einem logarithmisch dargestellten x-Achse, die dicken Striche zeigen die Einteilungen der einzelnen Kornklassen.....	53
Abbildung 34: Grafische Bestimmung der Fließgrenze mittels des Fallkegelversuchs, Fließgrenze= Wassergehalt bei 10mm Eindringtiefe.....	55
Abbildung 35 Bei einem Versuchszyklus aufgezeichneter Temperaturverlauf eines Frost-Tau Zyklus in der Mitte des Gefäßes	56
Abbildung 36: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Dehnung berechnet aus den Einzelmessungen der Längenänderungen der Proben auf Alkali-Kieselsäurereaktivität an den vorgegebenen Messtagen.....	57

Abbildung 37 Auswertung der Korngrößenverteilung durch Bestimmung von d_{10} , d_{30} und d_{60}	60
Abbildung 38: Plastizitätsdiagramm nach Casagrande zur Ermittlung des Plastizitätsverhalten des Bodens aus ÖNORM EN ISO 14688-2 [64] CIL=Ton mit geringer Plastizität, CIM=Ton mit mittlerer Plastizität, CIH= Ton mit hoher Plastizität, CIV=Ton mit sehr hoher Plastizität, SiL=Silt mit geringer Plastizität, SiM=Silt mit mittlerer Plastizität SiH=Silt mit hoher Plastizität, SiV=Silt mit sehr hoher Plastizität	61
Abbildung 39: a) Gesteinskörnung 8-16 mm nach 24h tränken in deionisiertem Wasser b) Reste der Gesteinskörnung 8-16mm nach der Beanspruchung von 10 Frost-Tau Zyklen.....	62
Abbildung 40: Darstellung der zusammengefassten Ergebnisse Dehnungen der einzelnen Messtage inklusive der Standardabweichung	63
Abbildung 41: Bestimmung des Brechbarkeitsindex aus dem Los Angeles-Index.....	64
Abbildung 42: Zusammenhang des Los Angeles Index mit dem Schlagzertrümmerungswert.....	65
Abbildung 43: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Frostschutzschicht	66
Abbildung 44: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Straßendämmen.....	66
Abbildung 45: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in ungebunden obere Tragschichten	66
Abbildung 46: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in bituminös gebundenen oberen Tragschichten.....	66
Abbildung 47: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Asphaltdeckschichten...	67
Abbildung 48: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Betondeckschichten.....	67
Abbildung 49: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Gesteinskörnung in Schalungsbeton	68
Abbildung 50: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Gesteinskörnung in Spritzbeton.....	68
Abbildung 51: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Perlkies für Ringspaltverfüllungsmörtel	69
Abbildung 52: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Putz- und Mörtelsanden	69
Abbildung 53: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz als Gleisschotter	69
Abbildung 54: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Eisenbahndämmen.....	70
Abbildung 55: Prüfung der Messwerte mit den Kriterien für den Einsatz in Hinterfüllungen und Auffüllungen	70

11. Literatur

- [1] *Piaz, G.V.D.; Bistacchi, A.; Massironi, M.*: Geological outline of the Alps. *In: Episodes* 26 (2003), Heft 3, S. 175-180. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2003/v26i3/004>.
- [2] *Handy, M.R.; M. Schmid, S.; Bousquet, R. et al.*: Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological–geophysical record of spreading and subduction in the Alps. *In: Earth-Science Reviews* 102 (2010), 3-4, S. 121-158. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.002>.
- [3] *Schuster, R.; Daurer, A.; Krenmayr, H.G. et al.*: Rocky Austria – Geologie von Österreich - kurz und bunt. Geologische Bundesanstalt. Geologische Bundesanstalt, Wien, 2019.
- [4] *Pfiffner, O.A.; Schlunegger, F.; Buiter, S.J.H.*: The Swiss Alps and their peripheral foreland basin: Stratigraphic response to deep crustal processes. *In: Tectonics* 21 (2002), Heft 2, 3-1-3-16. <https://doi.org/10.1029/2000TC900039>.
- [5] *Schlunegger, F.; Kissling, E.*: Slab rollback orogeny in the Alps and evolution of the Swiss Molasse basin. *In: Nature Communications* 6 (2015), Heft 1, S. 8605. <https://doi.org/10.1038/ncomms9605>.
- [6] *Sommaruga, A.; Eichenberger, U.; Marillier, F.*: Seismic atlas of the Swiss Molasse Basin, Matériaux pour la géologie de la Suisse. Géophysique = Geophysik = Geophysics / Commission Suisse de Géophysique Heft 44, Federal Office of Topography swisstopo, Wabern, 2012.
- [7] *Sommaruga, A.*: Geology of the Central Jura and the Molasse Basin: New insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. (1996).
- [8] *Strasser, A.; Charollais, J.; Conrad, M.A. et al.*: The Cretaceous of the Swiss Jura Mountains: an improved lithostratigraphic scheme. *In: Swiss Journal of Geosciences* 109 (2016), Heft 2, S. 201-220. <https://doi.org/10.1007/s00015-016-0215-6>.
- [9] *Matter, A.; Homewood, P.; Caron, C. et al.*: Flysch and Molasse of western and central Switzerland. *In: Geology of Switzerland, a guidebook* (1980).
- [10] *Schlunegger, F.; Mosar, J.*: The last erosional stage of the Molasse Basin and the Alps. *In: International Journal of Earth Sciences* 100 (2011), Heft 5, S. 1147-1162. <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0607-1>.
- [11] *Garefalakis, P.; Schlunegger, F.*: Tectonic processes, variations in sediment flux, and eustatic sea level recorded by the 20 Myr old Burdigalian transgression in the Swiss Molasse basin. *In: Solid Earth* 10 (2019), Heft 6, S. 2045-2072. <https://doi.org/10.5194/se-10-2045-2019>.
- [12] *Burkhard, M.*: Aspects of the large-scale Miocene deformation in the most external part of the Swiss Alps (sub-Alpine molasse to Jura fold belt). *In: Eclogae Geologicae Helvetiae* 83 (1990), Heft 3, S. 559-583.
- [13] *Chelle-Michou, C.; Do Couto, D.; Moscariello, A. et al.*: Geothermal state of the deep Western Alpine Molasse Basin, France-Switzerland. *In: Geothermics* 67 (2017), S. 48-65. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.01.004>.

- [14] *Clerc, N.; Moscariello, A.*: revised structural framework for the Geneva Basin and the neighboring France region as revealed from 2D seismic data: implications for geothermal exploration. *In: Swiss Bull. angew. Geol.* (2020), S. 109-131.
- [15] *Trümpy, R.*: Geology of Switzerland – Geological Excursions. Wepf, Basel, 1980.
- [16] *Fern, E.J.; Di Murro, V.; Soga, K. et al.*: Geotechnical characterisation of a weak sedimentary rock mass at CERN, Geneva. *In: Tunnelling and Underground Space Technology* 77 (2018), S. 249-260. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.003>.
- [17] *Haas, M.; Carraro, D.; Ventra, D. et al.*: Integrated stratigraphic, sedimentological and petrographical evaluation for CERN's Future Circular Collider subsurface infrastructure (Geneva Basin, Switzerland-France). *In: Swiss Journal of Geosciences* 115 (2022), Heft 1, S. 1-43. <https://doi.org/10.1186/s00015-022-00407-y>.
- [18] *Kempf, O.; Pross, J.*: The lower marine to lower freshwater Molasse transition in the northern Alpine foreland basin (Oligocene; central Switzerland/south Germany): age and geodynamic implications. *In: International Journal of Earth Sciences* 94 (2005), Heft 1, S. 160-171. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0437-0>.
- [19] *Willett, S.D.; Schlunegger, F.*: The last phase of deposition in the Swiss Molasse Basin: from foredeep to negative-alpha basin. *In: Basin Research*, Vol. 22 (2010), Iss. 5, pp. 623-639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00435.x>.
- [20] *Kuhlemann, J.; Kempf, O.*: Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. *In: Sedimentary Geology* 152 (2002), 1-2, S. 45-78. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00285-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00285-8).
- [21] *Schmid, S.M.; Pfiffner, O.A.; Froitzheim, N. et al.*: Geophysical-geological transect and tectonic evolution of the Swiss-Italian Alps. *In: Tectonics* (1996), Heft 15, S. 1036-1064.
- [22] *Huw Davies, J.; Blanckenburg, F. von*: Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *In: Earth and Planetary Science Letters* 129 (1995), 1-4, S. 85-102. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)00237-S](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)00237-S).
- [23] *Sinclair, H.D.*: Flysch to molasse transition in peripheral foreland basins: The role of the passive margin versus slab breakoff. *In: Geology, Geophysics & Environment* 25 (1997), Heft 12, S. 1123. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<1123:FTMTIP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<1123:FTMTIP>2.3.CO;2).
- [24] *Moscariello, A.*: Exploring for geo-energy resources in the Geneva Basin (Western Switzerland): opportunities and challenges. *In: Swiss Bulletin für angewandte Geologie* 24 (2019), Heft 2, S. 105-124.
- [25] *Schlunegger, F.; Rieke-Zapp, D.; Ramseyer, K.*: Possible environmental effects on the evolution of the Alps-Molasse Basin system. *In: Swiss Journal of Geosciences* 100 (2007), Heft 3, S. 383-405. <https://doi.org/10.1007/s00015-007-1238-9>.
- [26] *Schlunegger, F.; Matter, A.; Mange-Rajetzky, M.*: Alluvial fan sedimentation and structure of the southern Molasse Basin margin, Lake Thun area, Switzerland. *In: Eclogae Geologicae Helvetiae* 86 (1994), S. 717-750.

- [27] *Schlunegger, F.; Melzer, J.; Tucker, G.*: Climate, exposed source-rock lithologies, crustal uplift and surface erosion: a theoretical analysis calibrated with data from the Alps/North Alpine Foreland Basin system. *In: International Journal of Earth Sciences* 90 (2001), Heft 3, S. 484-499. <https://doi.org/10.1007/s005310100174>.
- [28] *Flemings, P.B.; Jordan, T.E.*: Stratigraphic modeling of foreland basins: Interpreting thrust deformation and lithosphere rheology. *In: Geology, Geophysics & Environment* 18 (1990), Heft 5, S. 430. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0430:SMOFBI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0430:SMOFBI>2.3.CO;2).
- [29] *Strunck, P.; Matter, A.*: Depositional evolution of the Western Swiss Molasse. *In: Eclogae Geologicae Helvetiae* 95 (2002), S. 197-222.
- [30] *Diem, B.*: Die untere Meeresmolasse zwischen Saane (Westschweiz) und Ammer (Oberbayern). *In: Eclogae Geol. Helv.* (1986).
- [31] *Schlunegger, F.; Jordan, T.E.; Klaper, E.M.*: Controls of erosional denudation in the orogen on foreland basin evolution: The Oligocene central Swiss Molasse Basin as an example. *In: Tectonics* 16 (1997), S. 823-840.
- [32] *Mazurek, M.; Hurford, A.J.; Leu, W.*: Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analysis. *In: Basin Research* 18 (2006), Heft 1, S. 27-50. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2006.00286.x>.
- [33] *Baran, P.; Jodłowski, G.; Krzyżanowski, A. et al.*: Experimental testing of methanol sorption on selected coal samples from Upper Silesian Basin. *In: Geology, Geophysics & Environment* 40 (2014), Heft 3, S. 261. <https://doi.org/10.7494/geol.2014.40.3.261>.
- [34] *Allen, P.; Mange-Rajetzky, M.; Matter, A. et al.*: Dynamic palaeogeography of the open Burdigalian seaway, Swiss Molasse basin. *In: Eclogae Geologicae Helvetiae* 78 (1985), S. 351-381.
- [35] *Voiron, J., Haas, M., Amiot, J.-B.*: CERN HL-LHC POINT 1, Gestion des matériaux d'excavation potentiellement pollués aux hydrocarbures. *In: AFTES Congr. Paris* (2020).
- [36] *Schweizer Bundesamt für Umwelt BAFU*: Verwertung von Aushub- und Ausbruchsmaterial – Teil des Moduls Bauabfälle der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) (2021).
- [37] *Resch, D.*: Verwendung von Tunnelausbruchmaterial – Entscheidungsgrundlagen, Montanuniversität Leoben, Dissertation, 2012.
- [38] *International Tunneling and Underground Space Association*: ITA Report N°21 – Handling, Treatment and Disposal of Tunnel Spoil Materials (2019).
- [39] *Lenes, J.*: Abschätzung der Verwertbarkeit von Tunnelausbruchmaterial – Entwicklung eines Modells zur analytischen Betrachtung möglicher Verwertungswege des anfallenden Tunnelausbruchs, einschließlich rechtlicher und ökonomischer Rahmenbedingungen. Leoben, Montanuniversität Leoben, Masterarbeit, 2022.
- [40] Richtlinie Verwendung von Tunnelausbruch. Ausgabe 2015.
- [41] *Lorenz, W.; Gwosdz, W.*: Bewertungskriterien für Industriemineraie, Steine und Erden. 1 – Tone, Geologisches Jahrbuchreihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur

- Rohstoffwirtschaft 6; Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden 2, Schweizerbart, Stuttgart, 1997.
- [42] Lorenz, W.; Gwosdz, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden. 2 – Karbonat- und Sulfatgesteine, Geologisches Jahrbuchreihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft 6; Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden 2, Schweizerbart, Stuttgart, 1998.
- [43] Lorenz, W.; Gwosdz, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden. 3 – Quarzrohstoffe, Geologisches Jahrbuchreihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft 6; Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden 3, Schweizerbart, Stuttgart, 1999.
- [44] Lorenz, W.; Gwosdz, W.: Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden. 4 – Vulkanische Gesteine und Leichtzuschläge Bims, Bimsasche, andere vulkanische Aschen und Schlacken, Tuffgesteine, Perlit, Basalt und andere vulkanische Gesteine, Geologisches Jahrbuchreihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft 7; Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden 4, Schweizerbart, Stuttgart, 2000.
- [45] Lorenz, W.; Gwosdz, W.: Gesteinskörnungen – Kies, Sand und gebrochener Naturstein ; mit 125 Tabellen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geologisches Jahrbuch Reihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft Heft 8, Schweizerbart, Stuttgart, 2002.
- [46] Lorenz, W.; Gwosdz, W.: Feldspäte und andere Flussmittel – (Feldspatgesteine, Foidgesteine, Wollastonit, Fluorit, Kryolith, Lithium- und Bor-Mineralien) ; mit 76 Tabellen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geologisches Jahrbuch Reihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft Heft 10, Schweizerbart, Stuttgart, 2003.
- [47] Lorenz, W.; Gwosdz, W.: Naturwerksteine und Dachschiefer – Mit 34 Tabellen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geologisches Jahrbuch Reihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft Heft 9, Schweizerbart, Stuttgart, 2003.
- [48] Gwosdz, W.; Lorenz, W. (Hrsg.): Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden, Geologisches Jahrbuch Reihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft Heft 11, Schweizerbart, Stuttgart, 2005.
- [49] Gwosdz, W.; Röhling, S.; Lorenz, W.: Beryllium-Mineralien, Brom, Jod, Graphit, Farberden, Mangan-Mineralien und Zeolithe – Mit 75 Tabellen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geologisches Jahrbuch Reihe H, Wirtschaftsgeologie, Berichte zur Rohstoffwirtschaft Heft 14, Schweizerbart, Stuttgart, 2008.
- [50] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Abfallwirtschaftsgesetz – AWG. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2002.
- [51] CERN: „Accelerators“, <https://fcc.web.cern.ch/accelerators>.

- [52] Bromiley, L.; Osborne, J. (eds.): FCC-ee Civil Engineering and Infrastructure Studies. JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 2022.
- [53] Abada, A.; Abbrescia, M.; AbdusSalam, S.S. et al.: FCC-ee: The Lepton Collider. In: The European Physical Journal Special Topics 228 (2019), Heft 2, S. 261-623.
<https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900045-4>.
- [54] Kirchttag, C.: Verwertung von Tunnelausbruch. Leoben, Montanuniversität Leoben, Masterarbeit.
- [55] CERN: mining the future, <http://miningthefuture.web.cern.ch/> [Zugriff am: 11.05.2023].
- [56] Terzis, D., et al.: CER3N: Recycle, Reinvent, Revalorize, 2021.
- [57] Voiron, J.; et al.: Molasse is the new ore, 2021.
- [58] Graftieaux, P.; Boudrieres, F.: Manufacture of molasses bricks, 2021.
- [59] Carlesso, L.; et al.: From wastes to Soil: Mineral waste reclamation into fertile soil materials, 2021.
- [60] OpenStreetMap: The Free Wiki World Map, <http://www.openstreetmap.org> [Zugriff am: 15.05.2023].
- [61] ÖNORM EN 933-1 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren. Ausgabe März 2012.
- [62] ÖNORM EN ISO 17892-4 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016). Ausgabe Mai 2017.
- [63] Karius, V.: Sedimentationsmethoden – Mineralogisches Praktikum.
- [64] ÖNORM EN ISO 14688-2 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen. Ausgabe Oktober 2019.
- [65] ÖNORM EN ISO 17892-12 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 12: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenzen (ISO 17892-12:2018 + Amd.1:2021 + Amd.2:2022) (konsolidierte Fassung). Ausgabe Februar 2023.
- [66] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: „Konsistenzbalken“, <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/konsistenzbalken/8675> [Zugriff am: 11.05.2023].
- [67] ÖNORM EN ISO 17892-1 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts (ISO 17892-1:2014 + Amd.1:2022) (konsolidierte Fassung). Ausgabe Februar 2023.
- [68] ÖNORM EN 1367-1 Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung des Widerstands gegen Frost-Tau-Wechsel. Ausgabe Juni 2007.

- [69] Ludwig, U.; Wolff, G.; Hirche, D. (Hrsg.): Die Alkali-Kieselsäurereaktion. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 1974.
- [70] ÖNORM B 3100 Beurteilung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität im Beton. Ausgabe August 2008.
- [71] ÖNORM EN 933-4 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl. Ausgabe Oktober 2008.
- [72] ÖNORM EN 1097-2 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung. Ausgabe Juni 2020.
- [73] Girmscheid, G.: Bauprozesse und Bauverfahren des Tunnelbaus. Ernst, Berlin, 2013.
- [74] Buechi, E.; Mathier, J.; Wyss, S.: Gesteinsabrasivitaet - ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein. In: Tunnel 14 (1995), S. 38-44.
- [75] Thalmann, C.: Beurteilung und Möglichkeiten der Wiederverwertung von Ausbruchmaterial aus dem maschinellen Tunnelvortrieb zu Betonzuschlagstoffen. Zugl.: Zürich, ETH, 1996, Beiträge zur Geologie der Schweiz Geotechnische Serie = Série géotechnique / Hrsg. Schweizerische Geotechnische Kommission Heft 91, Schweizerische Geotechnische Komm, Zürich, 1996.
- [76] Schießl, P.: Gesteinskörnung. Skriptum zur Grundvorlesung in Baustoffkunde. München, 2005.
- [77] ÖNORM EN ISO 14688-1 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2017). Ausgabe Dezember 2020.
- [78] ÖNORM EN 12620 Gesteinskörnungen für Beton. Ausgabe Februar 2014.
- [79] ÖNORM EN 1097-2 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung. Ausgabe Juni 2020.
- [80] ZTV SoB-StB 04 – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau.
- [81] UNI 11531-1 – Costruzione e manutenzione delle opere civili delle infrastrutture - Criteri per l'impiego dei materiali - Parte 1: Terre e miscele di aggregati non legati.
- [82] RVS 08.15.01 – Ungebundene Tragschichten. Ausgabe 2010.
- [83] ÖNORM B 3580-1 Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Asphaltbeton - Teil 1: Empirische Anforderungen - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1. Ausgabe Februar 2018.
- [84] ÖNORM B 3130 Gesteinskörnungen für Asphalte und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13043. Ausgabe August 2016.

- [85] ÖNORM EN 206 Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Ausgabe Juli 2021.
- [86] *KORDINA ZT GmbH*: „Erwägungen zu Umweltverträglichkeitsprüfung – BBTSE Brenner Basistunnel, Änderungen der Strecken- und Bauwerksplanung der Eisenbahnanlage, Wien Ausgabe 2019.
- [87] DIN 18550-2 Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen - Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2:2016-09 für Innenputze(Gilt in Verbindung mit DIN EN 13914-2 (2016-09)). Ausgabe Januar 2018.
- [88] ÖNORM B 3133 Gleisschotter - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13450. Ausgabe November 2003.
- [89] *Bokern, J.*: Betonprüfungen zur Beurteilung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion: Auswirkung der klimatischen Bedingungen auf die Übertragbarkeit von Prüfergebnissen, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2008.
- [90] *Monnier, F.*: Thermal diagenesis in the Swiss molasse basin: implications for oil generation. In: Canadian Journal of Earth Sciences 19 (1982), Heft 2, S. 328-342. <https://doi.org/10.1139/e82-025>.
- [91] *Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus*: „Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017, Teil 1“, Wien, 2017. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.
- [92] *Rechtsinformationssystem des Bundes*: „Recycling-Baustoffverordnung 2016“, idgF. Rechtsinformationssystem des Bundes.
- [93] *Rechtsinformationssystem des Bundes*: „Deponieverordnung 2008“ idgF. Rechtsinformationssystem des Bundes.