



Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit

Umweltgeologische Evaluierung von
Entsorgungs- und
Verwertungsmöglichkeiten für
Tunnelausbruchsmaterial im Rahmen des
FCC-Projekts

Amra Joldić, BSc

Februar 2024



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, den Einsatz von generativen Methoden und Modellen der künstlichen Intelligenz vollständig und wahrheitsgetreu ausgewiesen habe, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich den Satzungsteil „Gute wissenschaftliche Praxis“ der Montanuniversität Leoben gelesen, verstanden und befolgt habe.

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

Datum 12.02.2024

Unterschrift Verfasser/in
Amra Joldic

DANKSAGUNG

Ein besonderer Dank gebührt meiner Betreuerin Assoc. Prof. Ph.D. Marlene Villeneuve vom Lehrstuhl für Subsurface Engineering. Ihre Großzügigkeit, Fachkompetenz und Unterstützung haben mir ermöglicht, diese Masterarbeit zu verfassen. Die Anleitung und Inspiration, die ich von Ihnen erhalten habe, sind von unschätzbarem Wert.

Ebenfalls möchte ich mich bei DI Elisabeth Hauzinger, ebenfalls vom Lehrstuhl für Subsurface Engineering, bedanken. Ihre Mitarbeit und Expertise bei der Probenahme haben einen bedeutenden Beitrag zu meiner Masterarbeit geleistet. Ich möchte mich auch bei Jörg Krainz für die Bereitstellung weiterer Rückstellproben herzlich bedanken.

Herzlichen Dank richte ich auch an meine zweite Betreuerin Dipl.-Ing. Dr.mont. Alexia Tischberger-Aldrian vom Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW). Ihre konstante Unterstützung, fachliche Anleitung und Ermutigung haben meine Arbeit bereichert. Ihre Präsenz und Unterstützung haben wesentlich dazu beigetragen, dass ich mich während meiner Arbeit gut aufgehoben gefühlt habe.

Ein weiteres Dankeschön gilt den Mitarbeitern des AVAW-Labors. Eure Hilfe bei den Analysen war unersetzlich. Hinter jeder Probe steckt so viel Arbeit und ich schätze euren Einsatz sehr.

Ein ganz besonderer Dank geht an meinen Ehemann, meinen Sohn Emil und meine gesamte Familie, die immer an mich geglaubt haben. Eure Unterstützung war die treibende Kraft hinter meinem Erfolg.

Zum Schluss möchte ich auch meinen Mitstudierenden meinen Dank aussprechen. Eure Freundschaft, Zusammenhalt und Unterstützung haben diese Studienzeit unvergesslich gemacht. Auch meiner Studienkollegin und inzwischen einer sehr guten Freundin, DI Elisabeth Diethart-Jauk, möchte ich meinen Dank aussprechen. Ihre Ermutigung und Unterstützung haben mich maßgeblich dazu motiviert, nach dem Bachelorstudium weiterzumachen. Ihr Einfluss auf meinen Bildungsweg ist für mich von unschätzbarem Wert.

Danke an alle, die dazu beigetragen haben, dass ich so viel lernen und wachsen konnte. Eure Unterstützung hat einen bleibenden Eindruck hinterlassen.

Kurzfassung

Umweltgeologische Evaluierung von Entsorgungs- und Verwertungsmöglichkeiten für Tunnelausbruchsmaterial im Rahmen des FCC Projekts

Die Masterarbeit widmet sich der umweltgeologischen Bewertung von Entsorgungs- und Verwertungsmöglichkeiten für Tunnelausbruchsmaterial im FCC-Projekt. Schwerpunkt bildete eine vergleichende Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen und experimentellen Untersuchungen in Österreich, der Schweiz und Frankreich.

Aus dem Material erster Probebohrungen wurden zwei Proben (qSTP1 und qSTP2) chemisch analysiert und auf ihre Verwertungsmöglichkeiten in verschiedenen Branchen basierend auf technischen und rechtlichen Vorgaben bewertet.

Für die Analysen wurden einerseits die Gesamtgehalte (Metalle nach Königswasseraufschluss und Totalaufschluss sowie RFA) und andererseits die Eluatgehalte ermittelt. Ein Abgleich der Ergebnisse von qSTP1 und qSTP2 mit Rückstellproben aus vorangegangenen Arbeiten bestätigte die Repräsentativität der gezogenen Proben.

Die Zusammensetzung der RFA zeigt das Vorliegen folgender Hauptkomponenten: 47 % SiO_2 , 12 % CaO , 11 % Al_2O_3 , 7 % MgO , 5 % Fe_2O_3 , 2% K_2O und 1 % Na_2O .

Im Rahmen der XRD-Untersuchung wurden folgende Phasen festgestellt: 20 % CaCO_3 (Calcit), 19 % $\text{KAl}_2[(\text{OH},\text{F})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$ (Glimmer-Gruppe (Muskovit/Illit)), 14 % $(\text{Fe},\text{Mg},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})$ (Chlorit), 12 % $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (Plagioklas (Albit)), 11 % SiO_2 (Quarz), 11% $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (Dolomit), 11% $(\text{Ca},\text{Na},\text{K})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_9(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{10}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Corrensit) und 4 % KAlSi_3O_8 (Kalifeldspat (Mikroclin)).

Gemäß österreichischer Deponieverordnung wird das Tunnelausbruchsmaterial als nicht gefährlicher Abfall betrachtet und erfüllt die Grenzwerte für Baurestmassendeponien sowie Massenabfalldeponien. Allerdings ist dies die ungünstigste Entsorgungsmethode. Gemäß dem Bundesabfallwirtschaftsplan erfüllt das Tunnelausbruchsmaterial keine Qualitätsklasse. Es hält jedoch die Grenzwerte der österreichischen Recycling-Baustoffverordnung (Zuschlagstoff für recycelten Asphalt oder für die ungebundene Oberschicht gemäß § 13 Z 9) ein, allerdings ist der Einsatz des Materials auch rechtlichen Gründen derzeit nicht zulässig.

In der Schweiz erfüllt das Tunnelausbruchsmaterial die Grenzwerte gemäß der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) und wird entsprechend in die Kategorien Typ D und Typ E klassifiziert. Laut *Étarès Environnement* erfüllt das Tunnelausbruchsmaterial in Frankreich die Grenzwerte für Klasse 2 sowie für Klasse 3.

Aufgrund der großen Menge (9 Millionen m^3) und der möglichen Schwankungen in der Materialzusammensetzung wurden Branchen, die das Tunnelausbruchsmaterial nur in kleinen Mengen verwenden können, nachrangig behandelt. Das galt auch für Branchen mit geringer Toleranz gegenüber Schwankungen in Qualität und Zusammensetzung ihrer Rohstoffe. Die Bewertung des Tunnelausbruchsmaterials im Rahmen der Masterarbeit kommt zu folgenden Ergebnissen:

Das Tunnelausbruchsmaterial zeigt als Ersatzrohstoff Potenzial zur Verwertung in der Zementindustrie aufgrund hoher Hauptrohstoffmengen wie SiO_2 , CaO , Al_2O_3 und Fe_2O_3 . In der Ziegelindustrie wäre ein Einsatz für Mauerziegelmassen denkbar, doch erhöhte Magnesium- und Calciumoxid-Gehalte könnten Probleme verursachen, sodass es nur als Zuschlagstoff zum Einsatz kommen kann. Für die Glasindustrie ist es ungeeignet aufgrund des hohen Verunreinigungsgrades (z.B. Eisen). In der Landwirtschaft ist es aufgrund der hohen Nickelkonzentration und begrenzter Nährstoffgehalte ungeeignet.

Abstract

Environmental geological evaluation of disposal and recycling options for excavated tunnel material within the FCC project

The master's thesis is dedicated to the environmental geological assessment of disposal and recycling options for tunnel excavation material in the FCC project. The main focus was on a comparative analysis of the legal frameworks and experimental investigations in Austria, Switzerland, and France.

Chemical analysis of two samples (qSTP1 and qSTP2) from initial boreholes was conducted, evaluating their potential for reuse in various industries based on technical and legal requirements. Total contents (metals after aqua regia digestion and total digestion, as well as X-ray fluorescence) and eluate contents were determined for the analyses. A comparison of the results of qSTP1 and qSTP2 with retained samples from previous work confirmed the representativeness of the drawn samples.

The composition of the X-ray fluorescence analysis revealed the presence of the following main components: 47% SiO₂, 12% CaO, 11% Al₂O₃, 7% MgO, 5% Fe₂O₃, 2% K₂O, and 1% Na₂O.

X-ray diffraction (XRD) examination identified the following phases: 20% CaCO₃ (calcite), 19% KAl₂[(OH,F)₂AlSi₃O₁₀] (mica group (muscovite/illite)), 14% (Fe,Mg,Al)₆(Si,Al)₄O₁₀(OH) (chlorite), 12% NaAlSi₃O₈ (plagioclase (albite)), 11% SiO₂ (quartz), 11% CaMg(CO₃)₂ (dolomite), 11% (Ca,Na,K)(Mg,Fe,Al)₉(Si,Al)₈O₂₀(OH)₁₀ nH₂O (corrensite), and 4% KAlSi₃O₈ (potassium feldspar (microcline)).

According to the landfill ordinance, the tunnel excavation material is considered non-hazardous waste and complies with the limits for construction waste landfills and mass waste landfills. However, this is the least favorable disposal method. According to the Federal Waste Management Plan, the tunnel excavation material does not meet any quality class. However, it complies with the limits of the Austrian Recycling Construction Material Ordinance (aggregate for recycled asphalt or for unbound top layer according to § 13 Z 9), although the use of the material is currently not allowed for legal reasons.

In Switzerland, the tunnel excavation material meets the limits according to the Ordinance on the Avoidance and Disposal of Waste (VVEA) and is classified into categories Type D and Type E. According to Étarès Environnement, in France, the tunnel excavation material meets the limits for Class 2 as well as for Class 3.

Due to the large quantity (9 million m³) and possible variations in material composition, industries that can only use the tunnel excavation material in small quantities were treated as lower priority. This also applied to industries with low tolerance to variations in the quality and composition of their raw materials. The evaluation of the tunnel excavation material in the context of the master's thesis results in the following conclusions:

The tunnel excavation material shows potential as a substitute raw material for use in the cement industry due to high quantities of main raw materials such as SiO₂, CaO, Al₂O₃, and Fe₂O₃. In the brick industry, it could be used for masonry brick masses, but elevated magnesium and calcium oxide contents could cause problems, limiting its use to an aggregate. It is unsuitable for the glass industry due to high contamination levels (e.g., iron). In agriculture, it is unsuitable due to high nickel concentrations and limited nutrient content.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung	3
2 THEORETISCHER TEIL.....	5
2.1 Kurzer geologischer Überblick der FCC-Studie	5
2.2 Vergangene Arbeiten zur Materialcharakterisierung	7
2.3 Rechtliche Aspekte zu Tunnelausbruchmaterial	9
2.4 Klassische Prüfverfahren für die Einstufung von Abfällen.....	12
2.5 Tonmineralogie	20
2.5.1 Tone	20
2.5.2 Tonminerale.....	20
2.5.3 Aufbau und chemische Zusammensetzung von Tonmineralen	21
2.5.4 Klassifizierung von Tonmineralen	22
2.5.4.1 1:1 Tonminerale	22
2.5.4.2 2:1 Tonminerale	26
2.5.4.3 2:1:1 Tonminerale	28
2.5.5 Merkmale von Tonmineralen.....	28
2.5.6 Feuerfeste Tone	30
3 EXPERIMENTELLER TEIL	33
3.1 Material und Probenahme.....	33
3.2 Probenaufbereitung und chemische Analysen.....	35
3.2.1 Gesamtgehalte Teil I (Metalle nach Königswasseraufschluss).....	36
3.2.2 Gesamtgehalte Teil II (Metalle nach Totalaufschluss).....	37
3.2.2.1 Metalle mittels RFA.....	38
3.2.3 Eluatgehalte.....	38
3.2.4 Rückstellproben	39
3.2.5 Mineralogische Zusammensetzung der Proben (XRD-Analyse).....	40
4 ERGEBNISSE UND BEWERTUNG.....	41
4.1 Ergebnisse der chemischen Analysen	41
4.2 Bewertung des Tunnelausbruchsmaterials hinsichtlich Entsorgung- und Verwertungsmöglichkeiten	49
4.2.1 Zementindustrie	49

4.2.1.1	Kennzahlen bzw. Module für die chemische Beurteilung.....	57
4.2.2	Glasindustrie.....	58
4.2.3	Ziegelindustrie	63
4.2.3.1	Ofenarten.....	69
4.2.3.2	Schäden durch Fluorgase	70
4.2.3.3	Porenbeton	71
4.2.4	Landwirtschaft.....	73
5	ZUSAMMENFASSUNG	78
6	VERZEICHNISSE	80
6.1	Literatur.....	80
6.2	Tabellen.....	83
6.3	Abbildungen.....	85
ANHANG	I

1 Einleitung

Die konstante Bautätigkeit, getrieben von der wachsenden Nachfrage nach vielfältigen Bauprojekten, darunter auch Tunneln, führt unvermeidlich zu erheblichen Mengen an Ausbruchsmaterial, einschließlich Tunnelausbruch. Die Sammlung von Abfällen auf Baustellen erfolgt typischerweise durch das Beladen von Lastwagen, die den Abfall anschließend zu verschiedenen Bestimmungsorten transportieren. Diese können Deponien, Zwischenlager, Behandlungsanlagen oder sogar direkt andere Baustellen zur Verwertung sein (BAWP, 2023).

Diese Masterarbeit widmet sich der umweltgeologischen Bewertung von Entsorgungs- und Verwertungsmöglichkeiten für Tunnelausbruchsmaterial am Beispiel des FCC-Projekts. Der Fokus liegt dabei auf einer vergleichenden Studie der rechtlichen Rahmenbedingungen und experimentellen Untersuchungen in den Ländern Österreich, der Schweiz und Frankreich.

1.1 Problemstellung

Beim FCC-Projekt, welches die Realisierung eines 100 Kilometer langen Tunnels für einen zukünftigen Teilchenbeschleuniger umfasst, handelt es sich um ein eindrucksvolles Beispiel für ein Tunnelvorhaben. Im Rahmen dieses Projekts werden ca. 9 Millionen m³ Tunnelausbruchmaterial anfallen. Bei diesem Material handelt es sich – Sondierungen zufolge – vorrangig um Sandstein, Mergel und Kalkstein (Abada et al., 2019).

Die Herausforderung besteht darin, nachhaltige Alternativen zur herkömmlichen Deponierung des anfallenden Gesteins zu finden. Die Frage nach der Umweltverträglichkeit von Verwertungsmöglichkeiten wird angesichts der Dimensionen des Projekts zu einem zentralen Anliegen.

1.2 Zielsetzung

Diese vorliegende Masterarbeit verfolgt das übergeordnete Ziel, den Entscheidungsprozess im Hinblick auf die Auswahl umweltfreundlicher Optionen für die Entsorgung und Verwertung von Tunnelausbruchsmaterial zu unterstützen. Im Speziellen liegt der Fokus auf der detaillierten Evaluierung der Materialqualität sowie potenzieller Verwertungslösungen in den Ländern Österreich, Schweiz und Frankreich auf Basis von experimentellen Untersuchungen. Dazu sollen verschiedene Branchen, die für eine Verwertung denkbar erscheinen, betrachtet werden und die für eine Bewertung notwendigen analytischen Parameter bestimmt werden. Durch die Integration von theoretischen und experimentellen Ansätzen beabsichtigt diese Arbeit, einen Überblick der komplexen rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die praktische Umsetzbarkeit der identifizierten Verwertungsoptionen zu gewähren.

Dabei ist wesentlich, dass sowohl die geotechnischen als auch die mineralogischen und die geochemischen Eigenschaften für mögliche Verwertungsszenarien entscheidend sind (vgl. Abbildung 1). Während vorangegangene Arbeiten (Nievoll, 2023; Haas, 2022) auf die geotechnischen Eigenschaften fokussieren, liegt der Schwerpunkt dieser Masterarbeit auf den chemischen Eigenschaften des Tunnelausbruchmaterials.

Im Rahmen des theoretischen Teils dieser Arbeit soll eine eingehende Recherche der aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen, Grenzwerte und Bestimmungsmethoden in den genannten Ländern (Österreich, Schweiz, Frankreich) durchgeführt werden. Ziel ist es, einen fundierten Überblick über die gesetzlichen Grundlagen zu erlangen, der als solide Grundlage für die darauf folgende Bewertung der Verwertungslösungen dient. Die Fokussierung liegt dabei auf der Zusammenführung und systematischen Darstellung dieser rechtlichen Aspekte, um eine umfassende Orientierung im regulatorischen Kontext zu ermöglichen.

Nach der Sichtung und Strukturierung vorhandener Daten, insbesondere in Bezug auf die mineralogische Zusammensetzung und umweltrelevante Parameter, sollen im experimentellen Teil weitere, ergänzende Analysen im Labor des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft anhand mehrerer Proben des FCC-Tunnelausbruchmaterials durchgeführt werden. Die erhaltenen Analyseergebnisse sollen ausgewertet und mit den vorgegebenen Grenz- und Richtwerten verglichen werden.

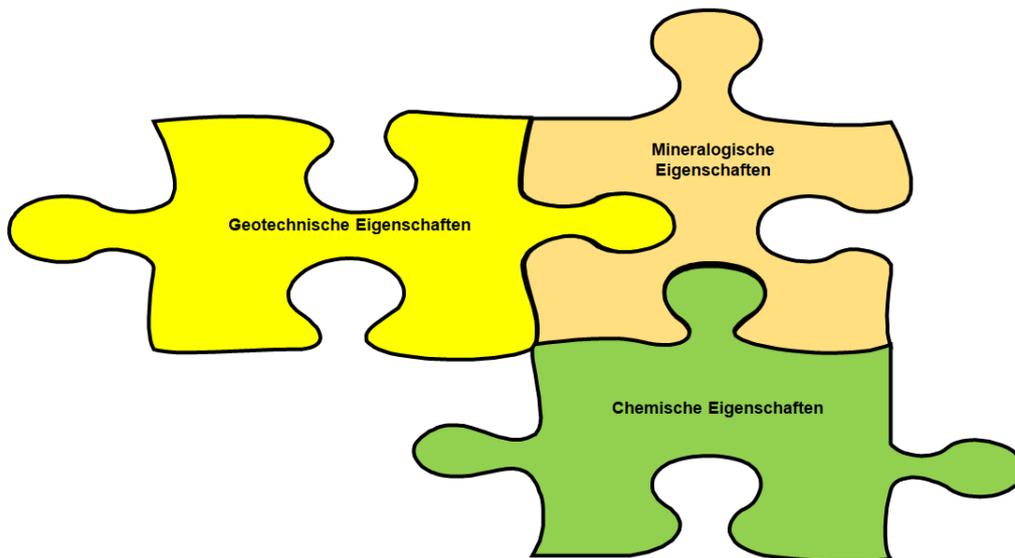


Abbildung 1: Verbindende Elemente der Materialcharakterisierung: Verknüpfung von geotechnischen, mineralogischen und geochemischen Analysen.

2 Theoretischer Teil

2.1 Kurzer geologischer Überblick der FCC-Studie

Das FCC-Projekt zielt darauf ab, den weltweit größten Teilchenbeschleuniger zu konstruieren – einen bemerkenswerten Future Circular Collider mit einer Länge von 100 Kilometern, strategisch platziert in der Genfer Region an der Grenze zwischen der Schweiz und Frankreich. Dieses ambitionierte Vorhaben wird von der Organisation Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) geleitet, einer führenden europäischen Forschungsorganisation im Bereich der Teilchenphysik (Bromiley und Osborne, 2022).

Im Rahmen des FCC-Projekts wird eine erhebliche Menge an Tunnelmaterial während der Bauarbeiten erwartet. Es wird geschätzt, dass etwa 9,3 Millionen m³ an Tunnelausbruchsmaterial produziert werden (Bromiley und Osborne, 2022).

Bislang wurden bereits rund 60 Tonnen an ausgehobenem Material von HL-LHC (Large High-Luminosity Hadron Collider) Punkt 1 - ATLAS (Abbildung 2) geliefert und diese befinden sich derzeit im Tunnel Research Center (ZAB).

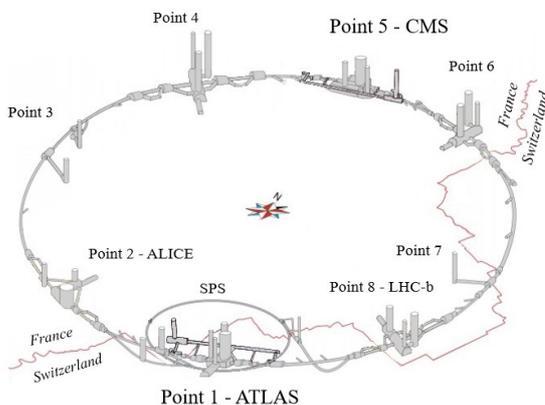


Abbildung 2: Darstellung der Struktur der unterirdischen Einrichtungen am CERN. Das Probenmaterial stammt vom Punkt 1 - ATLAS (Fern et al., 2018).

Die Struktur des FCC-Projekts verdeutlicht, dass die Umgebung vorwiegend aus Molassesedimenten besteht. Diese Sedimente, primär zusammengesetzt aus Quarz, Tonmineralen und kalkhaltigen Mineralien, stellen den fundamentalen Untergrund für das FCC-Projekt dar. Innerhalb dieser Sedimente ist ebenfalls eine begrenzte Menge an Kalkstein vorhanden (Abbildung 3; Bromiley und Osborne, 2022).

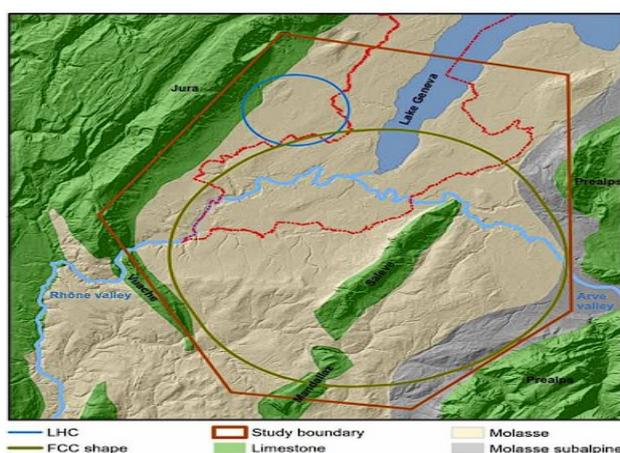


Abbildung 3: Projektgebiet und geologische Verhältnisse: Der blaue Kreis repräsentiert den derzeitigen Standort des Large Hadron Collider (LHC) (Bromiley und Osborne, 2022).

Die Darstellung der Hauptstruktur des Tunnels auf einer visuellen Ebene gibt einen Einblick in die Bauprojektbläufe (Abbildung 4; Bromiley und Osborne, 2022).

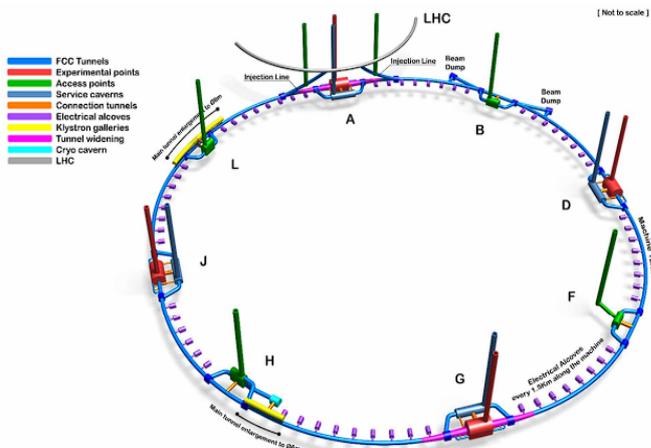


Abbildung 4: Hauptstruktur des geplanten Future Circular Collider (Bromiley und Osborne, 2022).

Die geplante Lage des FCC befindet sich am FuÙe des Genfer Sees im Genfer Becken, auch bekannt als Westalpines Molassebecken. Dieses Becken wird im Nordwesten von mesozoischen Ablagerungen aus dem Jura-Gebirge und im Südosten von alpinen Einheiten begrenzt, darunter das Helvetikum, das Penninikum, die Flysch-Zone und der Zentralgneis (siehe Abbildung 5) (Schlunegger und Mosar, 2011).

Das Genfer Becken besteht aus drei Hauptbodentypen: Moränen, Molasse und Kalkstein. Molasse, ein variables Sedimentgestein, liegt unter geringfesten glazialen Ablagerungen namens Moränen. Die Morärentiefe variiert von wenigen Metern bis zu 100 Metern. Kalksteinstrukturen wie die Jura-Berge und die Alpenvorberge begrenzen die Molasseschichten. Molasse besteht aus horizontal geschichteten Mergel- und Sandsteinlagen (Bromiley und Osborne, 2022).

Für eine ausführliche Beschreibung der Geologie wird auf die Dissertation von Maximilian Haas (Haas, 2022) und die Masterarbeit von Gabriel Nievoll (Nievoll, 2023) verwiesen.

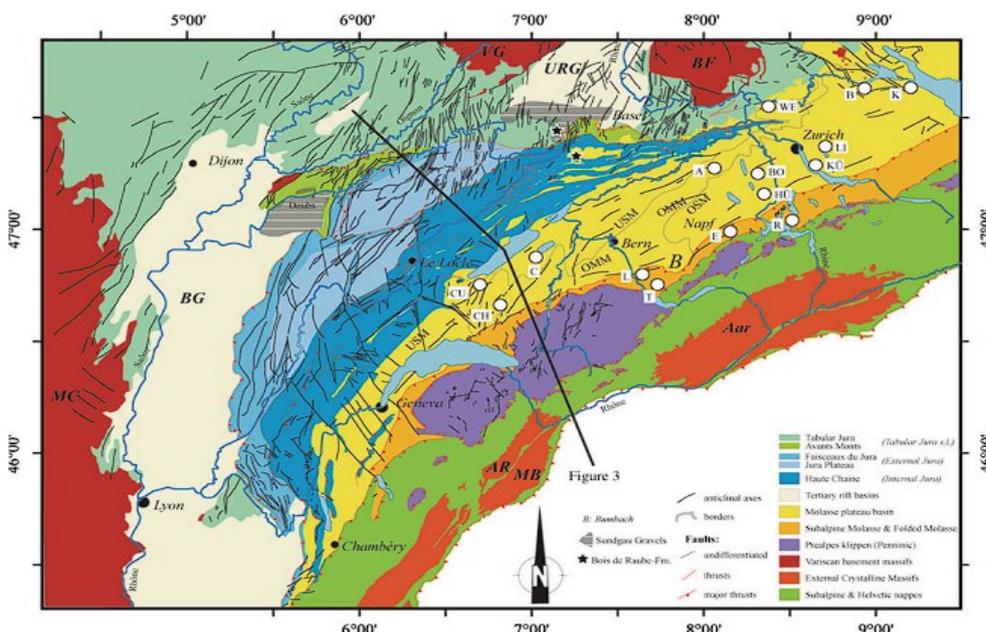


Abbildung 5: Geologische Karte (Schlunegger und Mosar, 2011).

2.2 Vergangene Arbeiten zur Materialcharakterisierung

Zum FCC-Tunnelausbruchmaterial wurden anhand des Materials der bisherigen Testbohrungen bereits vielfältige Untersuchungen durchgeführt, so auch von Haas (Haas, 2022) und Nievoll (Nievoll, 2023). Haas (Haas, 2022) führte Charakterisierungsstudien an dem Material an drei verschiedenen Universitäten durch, wobei er geotechnische, geochemische und petrophysikalische Eigenschaften des Materials erhob. An der Montanuniversität Leoben erfolgte am Lehrstuhl für Subsurface Engineering die Bestimmung geotechnischer Parameter. Nievoll (Nievoll, 2023) führte ebenfalls geotechnische Untersuchungen am selben Lehrstuhl durch.

Außerdem standen XRD-Analysen für dieses Material zur Verfügung. Dies war von besonderer Bedeutung, da die Mineralphasen eine entscheidende Rolle bei der Verwertung spielen. Die XRD-Analyse ergab, dass die Proben aus den Mineralphasen Quarz, Calcit, Dolomit, Plagioklas, Kalifeldspat, sowie Mineralen der Glimmer-Gruppe (Muskovit, Illit), Chlorit und Corrensit bestehen. Corrensit bildet sich durch die regelmäßige Wechsellagerung von Chlorit mit entweder Vermiculit oder trioktaedrischem Smektit und weist daher einen quellfähigen Bestandteil auf (Wegerer, 2023).

Die Dissertation von Haas (Haas, 2022) widmet sich umfassenden geologischen und multi-analytischen Untersuchungen zur Vorhersagbarkeit von Anwendungsszenarien für weiche, tonreiche Sedimentgesteine im Genfer Becken, mit besonderem Fokus auf die zukünftige unterirdische Infrastruktur des CERN. Das übergeordnete Ziel der Arbeit bestand darin, eine vertiefte Kenntnis der geologischen und geotechnischen Merkmale dieser Gesteine zu erlangen und ihre Eignung als Baugrund für künftige Infrastrukturprojekte zu bewerten. Die Dissertation basiert auf eingehenden geologischen Untersuchungen, einschließlich geophysikalischer Messungen, geotechnischer Tests und chemischer Analysen. Die Ergebnisse offenbaren eine hohe Varianz in den geologischen und geotechnischen Eigenschaften der tonreichen Sedimentgesteine im Genfer Becken, was die Vorhersagbarkeit von Anwendungsszenarien erschwert.

Trotz dieser Heterogenität wurden vielversprechende Ergebnisse erzielt, die darauf hinweisen, dass die tonreichen Sedimentgesteine potenziell als Baugrund für die geplanten Infrastrukturprojekte des CERN geeignet sind. Die Dissertation liefert somit wertvolle Erkenntnisse über die geologischen und geotechnischen Eigenschaften der Gesteine und könnte als Grundlage für zukünftige Infrastrukturprojekte dienen. Das Genfer Becken wird aufgrund seiner geologischen Besonderheiten intensiv erforscht. Besondere Aufmerksamkeit wurde den schwachen, tonreichen Sedimentgesteinen gewidmet, da sie bei der Planung und dem Bau unterirdischer Infrastrukturen von hoher Bedeutung sind.

Die geologischen und multi-analytischen Untersuchungen umfassten die Charakterisierung von Struktur, Mineralogie, Geochemie, mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und Dehnbarkeit sowie hydraulischen Eigenschaften wie Permeabilität und Porosität der tonreichen Sedimentgesteine. Die Ergebnisse zeigen eine heterogene und anisotrope Struktur, wobei mechanische und hydraulische Eigenschaften erheblich variieren können.

Die Schlussfolgerung dieser Dissertation von Haas (Haas, 2022) betont die Notwendigkeit einer sorgfältigen Charakterisierung der geologischen und geotechnischen Eigenschaften dieser Gesteine. Dies ist entscheidend, um die Eignung für geplante Anwendungsszenarien zu bewerten und mögliche Risiken wie Bodenbewegungen oder Grundwasserbeeinträchtigungen zu minimieren.

Parallel dazu liefert die Masterarbeit von Nievoll (Nievoll, 2023) wichtige Erkenntnisse über das untersuchte Material, insbesondere in Bezug auf seine geotechnischen Eigenschaften und das Potenzial als Recyclingbaustoff. Eine übersichtliche Zusammenfassung der bedeutendsten geotechnischen und mineralogischen Aspekte lautet wie folgt:

In Bezug auf die geotechnischen Analysen kristallisiert sich heraus, dass das Material einen komplexen, gemischtkörnigen Charakter aufweist, wobei sandiger Kies eine maßgebliche Rolle spielt. Die Korngrößenverteilung offenbart eine flache Struktur, geprägt durch eine Krümmungszahl (C_c) von 0,7 und eine Gleichförmigkeitszahl (C_u) von 52. Unter Berücksichtigung der Feinanteile, die bei 5,2% liegen, wird die Sensibilität des Materials gegenüber verschiedenen Vortriebsmethoden deutlich.

Die Konsistenzgrenzen lassen auf einen Ton mit niedriger Plastizität schließen, wobei die Plastizitätszahl (I_p) bei 10,8% liegt. Bei der Frost-Tau-Beständigkeit zeigt sich eine hohe Anfälligkeit, wobei 89% der Ausgangsprobe ein 4-mm-Sieb durchdringen. Dies deutet auf eine gewisse Empfindlichkeit gegenüber Wasser hin, was während des Frost-Tau-Wechsels zu einer Abnahme der Festigkeit führt. Interessanterweise überstehen etwa 10% der Ausgangskörnung diesen Wechsel positiv.

Die Bewertung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität ergibt eine geringe Dehnung von 0,37%, wodurch das Material als unbedenklich für die Verwendung in Beton eingestuft wird. Jedoch zeigte der Widerstand gegen Zertrümmerung, gemessen durch den Los Angeles-Test (LA-Wert von 48) und die Schlagzertrümmerung (31%), eine geringe Verfestigung des Materials. Diese mangelnde Verfestigung könnte während des Transports, der Handhabung oder der Aufbereitung negative Auswirkungen auf die Materialeigenschaften haben.

Zusammenfassend unterstreicht diese Masterarbeit von Nievoll, dass das Material in seiner aktuellen Form nicht für verschiedene geotechnische Anwendungen geeignet ist. Eine weitere Aufbereitung ist erforderlich, um die Anforderungen bestimmter Anwendungen zu erfüllen. Trotz gewisser Herausforderungen zeigt das Material jedoch Potenzial als Recyclingbaustoff, insbesondere für spezifische Anwendungen wie Perlkies in Putz- und Mörtelsanden.

In dieser grafischen Darstellung (Abbildung 6) werden mögliche Ansätze zur Recyclingfähigkeit präsentiert. Die Anregungen hierzu stammen aus zwei Masterarbeiten, genauer gesagt von Lenes (Lenes, 2022), der die Verwendung als Rohstoff für Industriemineralien und als Recycling-Baustoff vorschlug, sowie von de Jager-Janisch (de Jager-Janisch, 2014), der die Nutzung als Ersatz für Primärrohstoffe empfahl.

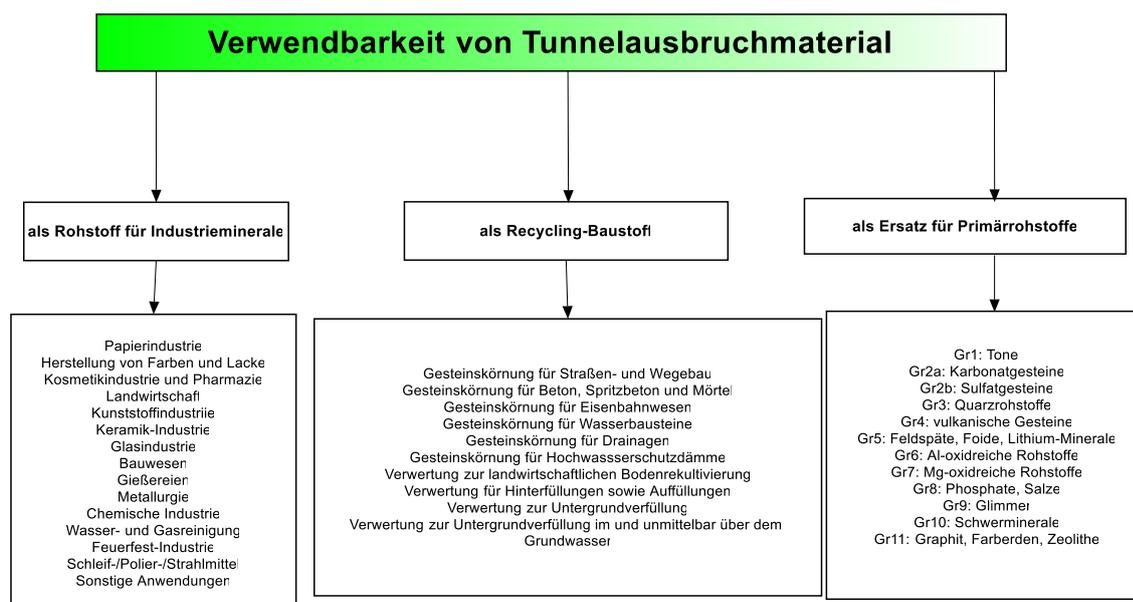


Abbildung 6: Potenzielle Recyclingszenarien für Tunnelmaterial: Ein Überblick über Vorschläge; nach (Lenes, 2022; de Jager-Janisch, 2014).

2.3 Rechtliche Aspekte zu Tunnelausbruchmaterial

Aufgrund der gesetzlichen Regelungen im Zusammenhang mit der Verwertung und/oder Entsorgung von Tunnelausbruchmaterial sind verschiedene Rechtsinstrumente im österreichischen Rechtssystem maßgeblich. Die EU-Abfallrahmenrichtlinie, das Abfallwirtschaftsgesetz, der Bundesabfallwirtschaftsplan, die Deponieverordnung, die Abfallverzeichnisverordnung, das Altlastensanierungsgesetz sowie die Richtlinie der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (ÖBV) zur Verwendung von Tunnelausbruch bilden einen umfassenden rechtlichen Rahmen. Dieser gewährleistet, dass die Verwertung und Entsorgung von Tunnelausbruchmaterial den festgelegten Umweltschutzstandards und Prinzipien einer nachhaltigen Abfallwirtschaft entspricht.

Die **EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG** bildet einen zentralen Rechtsrahmen für die Handhabung von Abfällen in Europa. Ihr Hauptziel besteht darin, Mensch und Natur vor den negativen Auswirkungen von Abfällen zu schützen, indem eine gezielte Reduzierung dieser Auswirkungen durch Recycling und Verwertung erreicht wird. Die Richtlinie legt eine klare Hierarchie für den Umgang mit Abfällen fest, die die Prävention an oberster Stelle setzt, gefolgt von Wiederverwendung, Recycling, Verwertung für sonstige Zwecke (z.B. energetische Verwertung) und schließlich Beseitigung.

Ein wichtiger Grundsatz der Richtlinie ist die Reduzierung der Menge an entsorgtem oder deponiertem Abfall auf das technisch mögliche Minimum. Gemäß der Richtlinie trägt der Ersterzeuger des Abfalls die Kosten für dessen Entsorgung. Die Richtlinie setzt auch Quoten für die Wiederverwertung fest, wobei beispielsweise für Haushaltsabfälle eine Wiederverwertungsquote von 50 % und für Bau- und Abbruchabfälle eine Quote von 70 % vorgeschrieben ist.

Die Definition von Abfall gemäß dieser Richtlinie bezieht sich auf jeden Stoff oder Gegenstand, den der Besitzer loswerden will, loswerden muss oder losgeworden ist. Es gibt jedoch Ausnahmen, darunter nicht ausgehobene kontaminierte Böden und Böden, die ausgehoben und in ihrem natürlichen Zustand wieder verbaut werden. Im Tunnelbau kann die Wiederverwendung von Böden in ihrem natürlichen Zustand nur in der offenen Bauweise, insbesondere bei der Hinterfüllung der Tunnelröhren, erfolgen. Material gilt nicht mehr als Abfall, wenn es einen Verwendungszweck hat, auf einen Markt trifft, die technischen Anforderungen erfüllt und keine schädlichen Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt hat, wie in der Richtlinie 2008/98/EG festgelegt.

Der § 1 des österreichischen **Abfallwirtschaftsgesetzes 2002** legt grundlegende Prinzipien fest. Die Abfallwirtschaft soll im Einklang mit dem Vorsorgeprinzip und der Nachhaltigkeit erfolgen, um schädliche Auswirkungen auf Mensch, Tier, Pflanzen und die Umwelt zu minimieren. Ziele umfassen die Reduktion von Luftschadstoffen und klimarelevanten Gasen, die Schonung von Ressourcen, insbesondere durch getrennte Abfallsammlung, sowie die Sicherstellung, dass stoffliche Verwertung keine höheren Gefährdungspotenziale aufweist als vergleichbare Primärrohstoffe. Der Gesetzgeber strebt an, nur Abfälle zu hinterlassen, deren Ablagerung keine Gefahr für kommende Generationen darstellt.

Die Umsetzung der Ziele des Abfallwirtschaftsgesetzes (AWG) erfolgt durch die periodische Erstellung des Bundesabfallwirtschaftsplans alle sechs Jahre. Dieser Plan wird vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) erstellt. Die aktuell gültige Ausführung des Bundesabfallwirtschaftsplans wurde im Jahr 2023 verfasst.

Im Rahmen des **Bundesabfallwirtschaftsplans 2023** wird Bodenaushubmaterial definiert als natürliche Boden- oder Untergrundmaterialien, die beim Ausheben oder Abräumen entstehen. Der Anteil an mineralischen und organischen bodenfremden Bestandteilen darf jeweils 5 bzw. 1 Volumsprozent nicht überschreiten. Diese Bestandteile müssen vor der

Aushubtätigkeit im Boden vorhanden sein, außer bei Tunnelausbruchmaterial. Vermischungsbezogene Vorgaben gemäß AWG 2002 sind zu beachten. Die Aushubmaterialien stellen den dominanten Anteil am Gesamtabfalls dar (Abbildung 7).

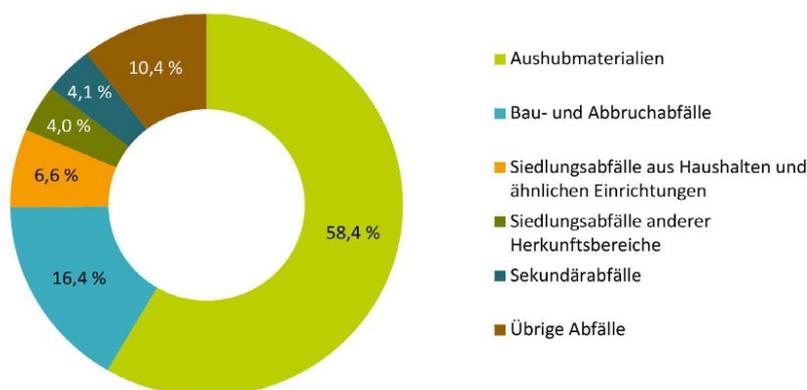


Abbildung 7: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens 2020 (BAWP, 2023).

Zwischen 2015 und 2020 zeigte sich in Österreich eine erhebliche Zunahme des Volumens an Aushubmaterialien, von etwa 32,77 Millionen Tonnen auf etwa 40,79 Millionen Tonnen, was einem prozentualen Anstieg von 24 % entspricht.

Entsprechend dem BAWP 2023 eröffnen sich vielfältige Verwertungsmöglichkeiten für Aushubmaterialien. Dazu zählen insbesondere die Nutzung als Rohstoff für industrielle Anwendungen, die Verwendung als Recycling-Baustoff für bautechnische Zwecke, die Einsatzmöglichkeit zur Untergrundverfüllung oder Bodenrekultivierung, die Verwendung als Ausgangsmaterial für die Herstellung künstlicher Erden sowie die Nutzung als Strukturmaterial bei der Kompostierung oder zur Herstellung von Komposterden und Kultursubstraten. Um die Klassifizierung in verschiedene Qualitätsklassen vorzunehmen, ist eine chemische Charakterisierung erforderlich. Dabei kommen die gleichen Untersuchungsmethoden zum Einsatz wie in der Deponieverordnung.

Laut österreichischer **Deponieverordnung** handelt es sich bei Tunnelausbruch um ein Bodenaushubmaterial, das aus natürlichen Fest- oder Lockergesteinen besteht und anfällt, wenn Schachtbauwerke, Stollen, Kavernen oder Schächte errichtet werden (Umweltbundesamt, 2016).

Die **Deponieverordnung 2008** legt betriebsbezogene und technische Anforderungen für Deponien und Abfälle fest. Das Hauptziel besteht darin, während des gesamten Betriebs negative Umweltauswirkungen zu minimieren, insbesondere die Verschmutzung von Oberflächenwasser, Grundwasser, Boden und Luft sowie globale Umweltrisiken wie den Treibhauseffekt. Im Einklang mit der Abfallhierarchie strebt die Verordnung an, dass Abfälle, die sich für Recycling und andere Verwertungsformen eignen, künftig nicht mehr auf Deponien gelangen sollen. Es sind verschiedene Deponieklassen und -unterklassen definiert, darunter Bodenaushubdeponien, Inertabfalldeponien, Deponien für nicht gefährliche Abfälle (wie Baurestmassendeponien, Reststoffdeponien und Massenabfalldeponien) sowie Deponien für gefährliche Abfälle (ausschließlich als Untertagedeponien).

Das **Altlastensanierungsgesetz** (ALSAG) hat die Aufgabe, die Finanzierung, Sanierung und Erhaltung von Altlasten zu regeln. Wenn Abfälle auf Deponien gelangen, unterliegen diese ALSAG-Gebühren.

Die **ÖBV-Richtlinie** (Österreichische Bautechnik Vereinigung) legt fest, wann Untersuchungen und Planungen erfolgen sollen. Ziel ist, bei der Einreichungsplanung einen

Längsschnitt des Tunnels zu haben, der das Verwertungspotenzial, die voraussichtliche Deponiemenge und die Prognosesicherheit über die gesamte Tunnelstrecke prognostiziert.

Sichtweise Schweiz

Gemäß dem Umweltschutzgesetz (USG, 1983) ist es vorgeschrieben, dass Abfälle gemäß Artikel 30 optimal verwertet und umweltverträglich entsorgt werden müssen. Die Regelungen zur Abfallverwertung sind in der Abfallverordnung und der Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) festgelegt. Dabei werden die Verwertungswege entsprechend den Schadstoffgehalten definiert (BAFU, 2022).

Bezüglich Aushub- und Ausbruchmaterial legt Artikel 19 VVEA die erlaubten Verwertungswege fest, während Anhang 3 VVEA die zulässigen Gesamtgehalte an Schadstoffen für dieses Material dokumentiert (BAFU, 2022).

Anforderungen für die Verwertung von Abfällen in der Beton- und Zementherstellung sind in Anhang 4 VVEA spezifiziert, abhängig von deren Verwendung als Rohmaterial, Rohmaterialkorrekturstoffe, Brennstoffe oder Zumahl- und Zuschlagstoffe (BAFU, 2022).

Gemäß der Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA) von 2021 bezieht sich Tunnelausbruchmaterial auf das Material, das während der Konstruktion von Untertagebauwerken anfällt. Dieses wird durch verschiedene Methoden wie Sprengvortrieb, Tunnelbohrmaschinen oder alternative Ausbruchverfahren generiert. Tunnelausbruchmaterial unterliegt zwangsläufig durch jede Vortriebstechnik anthropogenen Verschmutzungen. Zu den unterirdischen Bauwerken, die dieses Material erzeugen, zählen Kavernen, Schächte, Schrägschächte, Stollen und Tunnel (BAFU, 2021).

Unverschmutztes Aushub- und Ausbruchmaterial, das den Anforderungen entspricht, kann als Baustoff, Rohstoff für Baustoffe, für die Wiederauffüllung von Materialentnahmestellen oder für genehmigte Terrainveränderungen genutzt werden. Für Aushub- und Ausbruchmaterialien, die nicht den Anforderungen für unverschmutztes Material entsprechen, bietet sich eine optimale Wiederverwertung als Rohstoff für hydraulisch oder bituminös gebundene Baustoffe, als Baumaterial auf Deponien der Typen B–E oder als Rohmaterial für die Herstellung von Zementklinker an. In der Schweiz existieren fünf Klassen für die Deponierung, von A bis E. (VVEA, 2021).

Sichtweise Frankreich

In Frankreich ist das Ministerium für Umwelt, Energie und das Meer für die Umweltpolitik verantwortlich, während die DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) auf regionaler Ebene die Umsetzung koordiniert. Bezüglich Tunnelausbruchmaterials gibt es keine gesetzliche Definition. Die Handhabung dieser Materialien fällt jedoch unter drei Gesetzgebungen: Abfallgesetzgebung, Gesetzgebung für genehmigungsbedürftige Anlagen und Vorschriften für verschmutzte Standorte und Böden (RECORD, 2017).

Die Abfallgesetzgebung umfasst Gesetze von 1975 bis 2015, die die Definition von Abfall, die Verantwortlichkeit der Produzenten und die Hierarchie der Behandlungsverfahren festlegen. Nicht ausgegrabene Böden gelten nicht als Abfall. Die Genehmigungsverfahren für Anlagen können auf Tunnelausbruchmaterial angewendet werden, insbesondere wenn es den Status von Abfall annimmt. Spezielle Regelungen schließen verschmutzte Standorte und Böden von der Abfallregulierung aus (RECORD, 2017).

Insgesamt gibt es verschiedene Leitfäden und Richtlinien für den Umgang mit Tunnelausbruchmaterialien. Die Definition von Abfall in Frankreich orientiert sich an der EU-

Richtlinie, wobei Überlegungen zur Beendigung des Abfallstatus bestehen, jedoch komplexe Verfahren und unscharfe Aspekte die Umsetzung erschweren (RECORD, 2017).

Innerhalb der Europäischen Union wird gegenwärtig das ausgehobene Tunnelmaterial gemäß den gesetzlichen Bestimmungen als Abfall klassifiziert und kann nur unter bestimmten Umständen stofflich verwertet, in vielen Fällen aber deponiert werden. Wie in der Darstellung der Abfallpyramide (Abbildung 8) illustriert, stellt die Deponierung die ungünstigste Entsorgungsoption für das angefallene Tunnelmaterial dar. Hinzu kommt, dass damit auch finanzielle Belastungen einhergehen. Die bevorzugte Vorgehensweise besteht stattdessen darin, das Material stofflich zu verwerten.



Abbildung 8: Abfallpyramide (BMK, 2024).

2.4 Klassische Prüfverfahren für die Einstufung von Abfällen

Für die Einstufung von Abfällen in Bezug auf die Deponierbarkeit bzw. Gefährlichkeit gelten die in Tabelle 1 angeführten Prüfverfahren für Österreich, Schweiz und Frankreich. Diese Tabelle ermöglicht einen Vergleich der festgelegten Verfahren in den drei Ländern.

Welche Verfahren jeweils anzuwenden sind, wird in Österreich durch die Deponieverordnung, in der Schweiz durch die Abfallverordnung, speziell die Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (VVEA), definiert.

In Frankreich hängt die Klassifizierung der Gefährlichkeit von Abfällen von allen im Abfall vorhandenen Substanzen ab. Es gibt verschiedene Klassifizierungsregeln, die von der Einstufung und den Gefahrenhinweisen abhängen, die den im Abfall enthaltenen Substanzen zugeordnet sind. Nachdem die Kenntnisse über die im Abfall enthaltenen Substanzen vorliegen, können die Klassifizierungsregeln gemäß Verordnung (EU) Nr. 1357/2014 angewendet werden, um die Gefährlichkeit des Abfalls in Bezug auf die Gefahreneigenschaften HP 4, HP 5, HP 6, HP 7, HP 8, HP 10, HP 11 und HP 13 zu bewerten. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, den Abfall gemäß der Methode "Charakterisierung von Abfällen - Bestimmung des Gehalts an Elementen und Substanzen in Abfällen" zu analysieren, wie sie in der experimentellen Norm AFNOR XP X30-489 beschrieben ist (INERIS, 2016).

Auf Basis dieser Tabelle wird ersichtlich, dass die in den drei Ländern festgelegten Prüfverfahren durchaus vergleichbar sind. D.h. Ergebnisse, die nach den österreichischen Vorgaben erhalten wurden, können im Regelfall auch den Grenzwerten aus Frankreich oder der Schweiz gegenübergestellt werden.

Tabelle 1: Vergleich der festgelegten Prüfverfahren in den drei Ländern.

Parameter		Prüfverfahren			
		Österreich gemäß DVO2008 (EDM, 2024)	Schweiz (BAFU, 2022)	Frankreich (INERIS, 2016)	
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Anorganische Stoffe	Trockenrückstand (105°)	ÖNORM EN 14346:2007 03 01 DIN 38409-1: 1987 01	keine Vorgabe	keine Vorgabe
		Trockenrückstand (40°)	ÖNORM EN 14346:2007 03 01 DIN 38409-1: 1987 01	keine Vorgabe	keine Vorgabe
		Antimon (als Sb)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	Labor SPIEZ (ICP-MS nach Königswasser- od. Königswasser / HF-Aufschluss)) Röntgenfluoreszenz RFA Königswasseraufschluss	NF EN 15308
		Arsen (als As)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308
		Barium (als Ba)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 15308
		Blei (als Pb)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	DIN 38406-6 (AAS) SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308
		Cadmium (als Cd)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	DIN 38406-21 (AAS) SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308
		Chrom gesamt (als Cr)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308
		Chrom VI (als Cr)	DIN 38405-24: 1987 05 (photometr. Verfahren) ISO 11083: 1994 08 15 (spektr. Verfahren) ÖNORM EN ISO 23913: 2009 11 01 (spektr. Verfahren)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 DIN 38405-24 (photometrisches Verfahren)	NF EN 15308
		Cobalt (als Co)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	DIN 38406-24 (AAS) SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308

Parameter	Prüfverfahren		
	Österreich gemäß DVO2008 (EDM, 2024)	Schweiz (BAFU, 2022)	Frankreich (INERIS, 2016)
Gold	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 15308
Kupfer (als Cu)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	DIN 38406-7 (AAS) SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308
Molybdän (als Mo)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 15308
Nickel (als Ni)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	DIN 38406-11 (AAS) SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308
Quecksilber (als Hg)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	DIN EN ISO 12846 (Kaltdampf-AAS, AAS, ICP-MS, AFS)	NF EN 15308
Selen (als Se)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 15308
Silber (als Ag)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	DIN 38406-21 (AAS) SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308
Thallium (als Tl)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 15308
Vanadium (als V)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 15308
Wolfram (als W)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 15308
Zink (als Zn)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	DIN 38406-8 (AAS) SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308
Zinn (als Sn)	ÖNORM EN ISO 17294-2: 2005 02 01 (ICP-MS) ÖNORM EN ISO 17294-1: 2007 01 01 (ICP-MS)	SN EN ISO 11885 (ICP-OES) EPA 7000 Serie	NF EN 15308

Parameter		Prüfverfahren		
		Österreich gemäß DVO2008 (EDM, 2024)	Schweiz (BAFU, 2022)	Frankreich (INERIS, 2016)
Organische Summenparameter	Ausblasbare org. gebundene Halogene	ÖNORM EN ISO 22155:2013 04 15 (GC)	keine Vorgabe	keine Vorgabe
	KW-Index	ÖNORM EN 14039:2005 01 01 (GC)	SN EN 14039 (Referenzmethode)(GC) ISO 16703 (Referenzmethode) (GC)	keine Vorgabe
	PAK (16 Verbindungen nach EPA)	DIN 38407-39: 2011 09 (GC-MS) ÖNORM L 1200:2003 01 01 (HPLC oder GC-MS)	EPA, 8270 (GC-MS)	keine Vorgabe
	PAK (Benzo[a]pyren)	DIN 38407-39: 2011 09 (GC-MS) ÖNORM L 1200:2003 01 01	EPA, 8270 (GC-MS)	keine Vorgabe
	PCB (7 Verbindungen)	DIN 38414-20: 1996 01 (GC-MS)	EPA 8082A (GC-MS)	Kapillargaschromatographie mit Elektroneneinfangdetektion oder Massenspektrometrie.
	Summe der flüchtigen aromatischen KW	ÖNORM EN ISO 22155:2013 04 15 (GC)	keine Vorgabe	keine Vorgabe
	TOC (als C)	ÖNORM EN 13137:2001 12 01 ÖNORM EN 1484: 1997 08 01	DIN 15936 (TOC-Analyzer)	keine Vorgabe

Parameter		Prüfverfahren			
		Österreich gemäß DVO2008 (EDM, 2024)	Schweiz (BAFU, 2022)	Frankreich (INERIS, 2016)	
Gehalt im ELUAT (bei L/S 10)	Anorganische Stoffe	Abdampfrückstand	DIN 38409-1:1987-01	keine Vorgabe	keine Vorgabe
		Elektrische Leitfähigkeit	DIN EN 27888:1993-11	keine Vorgabe	keine Vorgabe
		pH-Wert	ISO 10523:2008-12	keine Vorgabe	keine Vorgabe
		Aluminium (als Al)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
		Ammonium (als N)	DIN 38406-5:1983-10 (photometrisches Verfahren)	EDI Richtlinien: Methode Nr. 30 DIN 38406-5 (photometrisches Verfahren) SN EN ISO 14911 (IC) SN EN ISO 11732 (FIA resp. CFA)	NF EN 12457-2
		Antimon (als Sb)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
		Arsen (als As)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
		Barium (als Ba)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
		Beryllium (als Be)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
		Blei (als Pb)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
		Bor (als B)	ÖNORM EN ISO 11885:2009-11 (ICP-OES)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
		Cadmium (als Cd)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
		Chlorid (als Cl)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
Chrom gesamt (als Cr)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2		

Parameter	Prüfverfahren		
	Österreich gemäß DVO2008 (EDM, 2024)	Schweiz (BAFU, 2022)	Frankreich (INERIS, 2016)
Chrom VI (als Cr)	DIN 38405-24:1987-05 8 (photometrisches Verfahren)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 DIN 38405-24 (photometrisches Verfahren)	NF EN 12457-2
Cobalt (als Co)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
Cyanide, gesamt (als CN)	EN ISO 14403-2 (CFA)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
Cyanide, leicht freisetzbar (als CN)	EN ISO 14403-02 (CFA)	EDI Richtlinien: Methode Nr. 33 (Photometrie)	NF EN 12457-2
Eisen, gesamt (als Fe)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
Fluorid (als F)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)	FAL Reckenholz DIN 38405-4 SN EN ISO 10304-1 (IC)	NF EN 12457-2
Gold	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
Kupfer (als Cu)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
Molybdän (als Mo)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
Nickel (als Ni)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
Nitrat (als N)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
Nitrit (als N)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)	EDI Richtlinien: Methode Nr. 36 SN EN ISO 11732 (CFA) SN EN ISO 10304-1 (IC)	NF EN 12457-2
Phosphat (als P)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)	DIN EN ISO 6878 (photometrisches Verfahren)	NF EN 12457-2
Quecksilber (als Hg)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	DIN EN ISO 12846 (Kaltdampf-AAS, AAS,	NF EN 12457-2

Parameter		Prüfverfahren		
		Österreich gemäß DVO2008 (EDM, 2024)	Schweiz (BAFU, 2022)	Frankreich (INERIS, 2016)
			ICP-MS, AFS)	
	Selen (als Se)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
	Silber (als Ag)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
	Sulfat (als SO ₄)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
	Thallium (als Tl)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
	Vanadium (als V)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
	Wolfram (als W)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	keine Vorgabe	NF EN 12457-2
	Zink (als Zn)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
	Zinn (als Sn)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)	EDI Richtlinien: Methoden Nr. 12–27 EPA 200 (ICP-AES) SN EN ISO 11885 (ICP-OES)	NF EN 12457-2
	Organische Summenparameter	Adsorbierbare org. gebundene Halogene	EN ISO 9562	keine Vorgabe
Anionenaktive Tenside (als MBAS)		ÖNORM EN 903:1994-03 (photometrisches Verfahren)	keine Vorgabe	keine Vorgabe
Extrahierbare org. gebundene Halogene		ÖNORM M 6614	keine Vorgabe	keine Vorgabe
KW-Index		EN ISO 9377-2 (GC)	SN EN ISO 9377-2 (GC)	keine Vorgabe
PAK (16 Verbindungen)		DIN 38407-39 (GC-MS)	DIN EN ISO 17993 (HPLC) DIN 38407-39 (GC-MS) EPA 610 (GC-MS)	keine Vorgabe
PAK (Benzo[a]pyren)		DIN 38407-39 (GC-MS)	DIN EN ISO 17993 (HPLC) DIN 38407-39 (GC-MS) EPA 610 (GC-MS)	keine Vorgabe

Parameter	Prüfverfahren		
	Österreich gemäß DVO2008 (EDM, 2024)	Schweiz (BAFU, 2022)	Frankreich (INERIS, 2016)
PCB (7 Verbindungen)	DIN 38407-3 (GC)	EPA (608) (GC-MS) EPA 8082A (GC)	keine Vorgabe
Phenolindex	DIN 38409-16:1984-06	EPA 604, 625 (GC-MS)	keine Vorgabe
TOC (als C)	ÖNORM EN 1484:2019-04	DIN EN 1484 (TOC-Analyzer)	keine Vorgabe

2.5 Tonmineralogie

Der Fokus der theoretischen Ausführungen der vorliegenden Masterarbeit liegt zunächst auf der Tonmineralogie, da das vorherrschende Tunnelausbruchsmaterial hauptsächlich aus Tonmineralen besteht.

2.5.1 Tone

Ton, ein feinkörniges Naturgestein oder erdiges Material mit einem Durchmesser von unter 0,005 mm, besteht vornehmlich aus Tonpartikeln. Im Kontext gängiger Mineraldefinitionen zeichnen sich Tone überwiegend durch ihre anorganische Zusammensetzung aus, wobei jedoch Ausnahmen wie Torf, Schlamm und bestimmte Böden beträchtliche Mengen an organischen oder natürlichen Materialien enthalten können. Die Entstehung der Tonpartikel resultiert aus Verwitterungs- und Erosionsprozessen an Gesteinen, die eine Vielzahl von Tonmineralen wie Kaolinite und Smektit hervorbringen. Ton ist in der Lage mit diversen Tonmineralen, geringfügigen Mengen Quarz, Metalloxiden und organischem Material zu wirken. Die Plastizität von Tonen, festgelegt durch Partikelgröße, Geometrie und Wassergehalt, erlaubt es, sie in gewünschte Formen zu modellieren, solange sie Feuchtigkeit enthalten. Diese Formbeständigkeit bleibt erhalten, bis der Ton trocknet oder erhitzt wird, wodurch er seine ursprüngliche Plastizität verliert und zu einem harten, steifen Zustand übergeht. Die chemische Zusammensetzung beeinflusst maßgeblich die Plastizität und Härte des Tons. Einige Arten von Tonmineralen, wie beispielsweise Chlorit und Glimmer, zeigen variierte plastische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Partikelgröße (Kumari und Mohan, 2021).

Die Definition von Ton fokussiert in erster Linie auf die Partikelgröße, wobei bislang keine allgemein akzeptierte Obergrenze festgelegt wurde. Im Kontrast zu anderen feinkörnigen Böden unterscheidet sich Ton durch seine spezifische Größenordnung und Mineralogie. Die Abgrenzung von Schluff zu Ton variiert disziplinübergreifend: Geologen und Bodenkundler verwenden üblicherweise einen Grenzwert von 2 μm , Sedimentologen hingegen bevorzugen Werte von 4–5 μm , während Kolloidchemiker eine Grenze von 1 μm ansetzen. Geotechnische Ingenieure nutzen die plastischen Eigenschaften des Bodens, gemessen an den Atterberg-Grenzen, zur Differenzierung zwischen Schluffen und Tonen. Die Kombination von Schluff, Sand und Ton (< 40 %) wird als Lehm Boden klassifiziert (Kumari und Mohan, 2021).

Geologische Tonablagerungen bestehen größtenteils aus Phyllosilikatmineralen, die variable Mengen Wasser in ihrer mineralischen Struktur aufweisen. Die Farbgebung variiert von weiß über mattgrau oder braun bis hin zu tiefem orange-rot, abhängig vom Bodeninhalt. Kolloidale Suspensionen bilden sich, wenn Tonpartikel in Wasser eingetaucht sind, während Flockung in salzhaltigem Wasser auftritt. Ton wird in zwei Hauptklassen unterteilt: Residualton, der sich vor Ort durch Oberflächenverwitterung bildet, während transportierter Ton, auch als sedimentärer Ton bekannt, durch Erosion entfernt und an einem neuen Ort abgelagert wird (Kumari und Mohan, 2021).

2.5.2 Tonminerale

Tonminerale sind wesentliche Bestandteile der Erdkruste, die in der Nähe der planetaren Oberfläche vorkommen. Sie entstehen durch Veränderungen von Gesteinen unter dem Einfluss von Wasser, typischerweise in feinkörnigen Sedimentgesteinen wie Schiefer, Tonstein und Siltstein. Aufgrund ihrer Fähigkeit, Wasser und gelöste Pflanzennährstoffe zurückzuhalten, werden sie oft als "chemische Schwämme" betrachtet. Die meisten Tonminerale werden als hydrierte Alumino-Silikate oder hydrierte Aluminium-Phyllosilikate klassifiziert (Kumari und Mohan, 2021).

Die Tonminerale entstehen durch die chemische Verwitterung von Gesteinen. Die chemische und strukturelle Zusammensetzung von Tonmineralien ähnelt den primären Mineralien, die aus magmatischen oder metamorphen Gesteinen stammen. Einige widerstandsfähige primäre Mineralien wie Quarz, Glimmer und Feldspat können im Boden verbleiben, während weniger widerstandsfähige Mineralien wie Pyroxene und Amphibole durch Verwitterung zerfallen und sekundäre Minerale bilden. Diese werden häufig als Phyllosilikate bezeichnet, da sie eine plättchen- oder schuppenartige Struktur aufweisen (Kumari und Mohan, 2021).

Als zentraler Bestandteil des Bodens haben Tonminerale Partikelgrößen von weniger als 2 μm . Sie beeinflussen wesentlich die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens, einschließlich Schwellungs- und Schrumpfungsfähigkeit sowie Kationenaustauschkapazität. Die Erforschung von Tonmineralien erfuhr in den 1930er Jahren einen Fortschritt durch den Einsatz fortschrittlicher Röntgenbeugungstechnologie zur Untersuchung ihrer molekularen Natur (Kumari und Mohan, 2021).

2.5.3 Aufbau und chemische Zusammensetzung von Tonmineralen

Die charakteristischen Merkmale, die die Zusammensetzung von Tonmineralen definieren, resultieren aus den in ihnen vorhandenen chemischen Verbindungen, der symmetrischen Anordnung von Atomen und Ionen sowie den die Struktur verbindenden Kräften. Tonminerale werden hauptsächlich als komplexe Silikate unterschiedlicher Ionen wie Aluminium, Magnesium und Eisen betrachtet. Die grundlegenden kristallinen Einheiten von Tonmineralen lassen sich basierend auf der Anordnung der Ionen in zwei Hauptkategorien unterteilen. Zum einen gibt es die Silizium-Sauerstoff-Tetraeder, die aus Silizium bestehen und von vier Sauerstoffatomen umgeben sind, wodurch sie eine Silikatschicht bilden. Andererseits existieren Aluminium- oder Magnesium-Oktaeder, die aus Aluminium bestehen und von sechs Hydroxylgruppen umgeben sind. Je nachdem, ob Aluminium das dominierende Atom ist, bildet sich eine Gibbsite-Schicht, während bei vorherrschendem Magnesium eine Brucit-Schicht entsteht (Kumari und Mohan, 2021).

Die tetraedrische Schicht besteht hauptsächlich aus Si^{4+} -Kationen, die sich in Siliziumtetraedern aus jeweils vier Sauerstoffatomen gruppieren. Diese Schicht bildet sich durch das Teilen von drei Sauerstoffatomen jedes Tetraeders mit benachbarten Tetraedern. Das vierte Sauerstoffatom bleibt frei und verbindet sich mit anderen polyedrischen Elementen, den oberen Sauerstoffen, die eine Verbindung zwischen den Tetraeder- und Oktaederschichten herstellen. Jeder Tetraeder teilt eine Ecke mit einem Oktaeder in der Oktaederschicht. Die tetraedrische Schicht trägt aufgrund der isomorphen Substitution von Al^{3+} eine negative Ladung. Gängige tetraedrische Kationen sind Si^{4+} , Al^{3+} und Fe^{3+} (Kumari und Mohan, 2021).

Die nachfolgende Tabelle präsentiert einen Überblick über die Kationenaustauschkapazitäten und spezifischen Oberflächen von verschiedenen Tonmineralen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Kationenaustauschkapazitäten und spezifische Oberflächen von Tonmineralen (Kumari und Mohan, 2021).

Tonmineral	Typ	Kationenaustauschkapazität (pH=7) [Milliäquivalente je 100 Gramm]	Spezifische Oberfläche [m ² pro Gramm]	Schwellungs- potenzial
Kaolinit	1:1	3-15	5-40	fast kein
Illit	2:1	10-40	10-100	niedrig
Vermiculit	2:1	100-150	760*	hoch
Smektit	2:1	80-120	40-800	hoch
Chlorit	2:1:1	10-40	10-55	kein

*je nach dem Anteil der inneren spezifischen Oberfläche.

2.5.4 Klassifizierung von Tonmineralen

Tonminerale werden anhand von Alumosilikatschichten klassifiziert, die aus den grundlegenden Struktureinheiten der Phyllosilikate bestehen. Diese Schichten entstehen durch die Verbindung von tetraedrischen und oktaedrischen Blättern, die durch gemeinsame Sauerstoffatome miteinander verbunden sind. Phyllosilikate, aufgrund ihrer plattenartigen Struktur, setzen sich aus Si-dominierenden tetraedrischen Einheiten und Al- oder Mg-dominierenden oktaedrischen Einheiten zusammen, die in Schichten angeordnet sind. Es gibt verschiedene Kategorien von Phyllosilikaten, darunter Schicht- und Ketten-Silikate, Sesquioxide und andere anorganische Minerale. Die Klassifizierung von Tonmineralen (Abbildung 9) hängt von der Art und Anordnung der tetraedrischen und oktaedrischen Schichten ab (Kumari und Mohan, 2021).

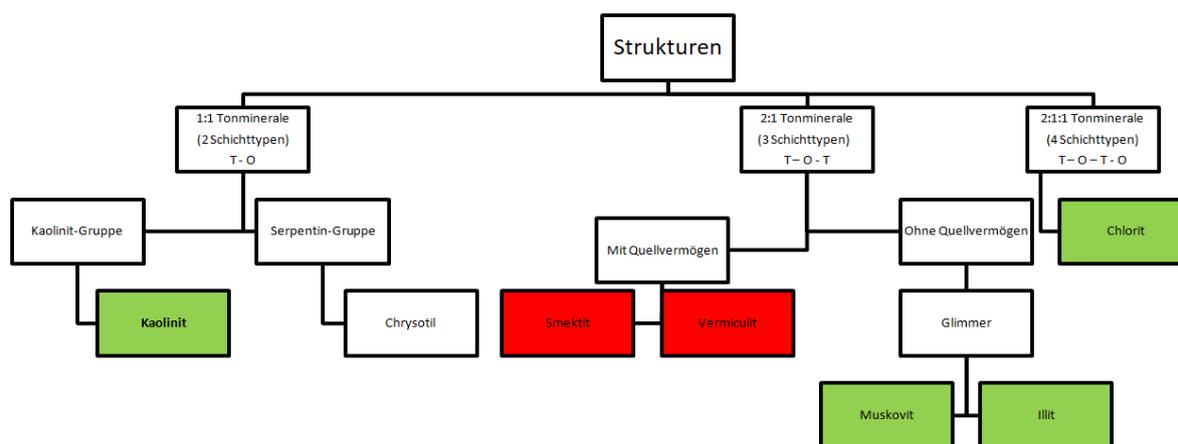


Abbildung 9: Klassifizierung von Tonmineralen (Kumari und Mohan, 2021).

Die durchgeführte Röntgenbeugungsanalyse (XRD) des Tunnelasbruchmaterials offenbarte im Wesentlichen das Vorhandensein von bestimmten Tonmineralen, darunter vorrangig Muskovit/Illit aus der Glimmer-Gruppe, gefolgt von Chlorit und Corrensit. Corrensit, stellt ein bemerkenswertes Wechsellagerungsmineral dar, welches sich aus Chlorit und Vermiculit bzw. Chlorit und trioktaedrischer Smektit zusammensetzt. Von besonderer Relevanz ist dabei der quellfähige Anteil in Corrensit, welcher auf eine potenzielle Volumenvergrößerung bei Wasseraufnahme hindeutet. Eine solche Quellfähigkeit könnte beispielsweise dazu führen, dass das Material instabil wird oder sich unerwünscht verändert, was in bestimmten Anwendungen oder Bauvorhaben unerwünscht sein könnte. In Bezug auf die XRD-Analyse werde ich mich nun ausschließlich auf die identifizierten Tonminerale konzentrieren.

2.5.4.1 1:1 Tonminerale

Kaolinit ist ein Tonmineral mit der chemischen Formel $Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$, das in Gesteinen als Kaolin oder China-Ton gefunden wird. Es entsteht durch die chemische Verwitterung von Aluminiumsilikaten wie Feldspat. Kaolinit ist elektrostatisch neutral, weist trikline Symmetrie auf und bildet Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Schichten, was zu einer geringeren Kristallinität im Vergleich zum triklinen Kaolinit führt. Die Struktur von Kaolinit ist aufgrund der Wasserstoffbrückenbindung fest, ohne Ausdehnung zwischen den Schichten. Es handelt sich um ein 1:1 Schichtsilikat, quillt nicht in Wasser auf, hat eine geringe Oberfläche und niedrige Kationenaustauschkapazität (Kumari und Mohan, 2021).

Die theoretische Zusammensetzung von Kaolinit besteht aus 46,5 M.-% SiO_2 , 39,5 M.-% Al_2O_3 und 14 M.-% H_2O . In diesem Mineral kann Aluminium teilweise durch Fe^{3+} und in geringerem Maße durch Ti ersetzt werden (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Kaolinitische Tone repräsentieren sedimentäre Ablagerungen im kontinentalen Bereich, die aus den Erosionsprodukten kaolinitischer Verwitterungskrusten stammen. Die mineralogische Zusammensetzung dieser Tone variiert beträchtlich: Die Hauptkomponenten umfassen Kaolinit (20-95 M.-%), Glimmer/Illit (5-45 M.-%) und Quarz (1- >50 M.-%). Aufgrund ihrer ausgeprägten Plastizität finden kaolinitische Tone vorwiegend in der keramischen Industrie Anwendung (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Kaolin (ca. 1/3 Kaolinit, 1/3 Quarz und 1/3 Feldspat) und kaolinitische Tone können in verschiedenen industriellen Anwendungen genutzt werden, vorausgesetzt, sie erfüllen die vorgegebenen Grenzwerte. Ihre einzigartigen Eigenschaften machen sie zu unverzichtbaren Füllstoffen, die in der Papierindustrie, Farbenindustrie, Kosmetikindustrie, pharmazeutischen Industrie, Lebensmittel- und Tierfutterindustrie sowie der Kunststoffindustrie breite Anwendung finden. Zugleich wird Kaolin in der Papierindustrie als Beschichtungsmaterial verwendet, um eine glatte Oberfläche und verbesserte Druckqualität zu erzielen. Neben ihrer Verwendung als Füllstoffe in verschiedenen Industriezweigen erfüllen Kaolin und kaolinitische Tone auch entscheidende Funktionen in weiteren Schlüsselbereichen. In der Landwirtschaft dienen sie als wirkungsvoller Trägerstoff in Insektiziden, wodurch die Haftung und Effektivität der Pestizide verbessert werden. Abgerundet wird ihre vielseitige Anwendungspalette durch ihre Rolle als essenzielle Rohstoffe in der Keramikindustrie, wo sie Formgebung, Trocknungsprozesse und das Brennen von Keramik unterstützen. Zusätzlich kommen kaolinitische Tone als bedeutender Rohstoff für die Herstellung von Borsilikatglas in der Glasindustrie sowie für die Produktion von feuerfesten Keramiken in der Feuerfest-Industrie zum Einsatz. Diese breitgefächerten Anwendungen unterstreichen die fundamentale Bedeutung von Kaolin und kaolinitischen Tonen als vielseitige und unverzichtbare Materialien in unterschiedlichsten Branchen (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Kaolin erfüllt vielfältige Rohstoffanforderungen in Deutschland (Tabelle 3), indem es in verschiedenen Branchen eingesetzt wird: von der Keramikindustrie über Streichkaoline, Füllstoffe in der Papierindustrie, Farben und Lacke, Gummiproduktion, Kunststofffüllstoffe, Kosmetik- und Pharmaindustrie bis hin zu seiner Verwendung als Trägerstoff für Schädlingsbekämpfungsmittel, in der Glasfaserherstellung, als Politurmittel und bei der Herstellung von Kaolinschamotten (Elsner, 2017).

Tabelle 3: Rohstoffanforderungen an Kaolin in Deutschland (Elsner, 2017).

In der Keramikindustrie	<ul style="list-style-type: none"> • Kaolinitgehalt: > 75% Kaolinit • Geringe Gehalte an Quarz und Feldspat • Glimmeranteil < 2 % • Niedrige Fluorgehalte • Mn-Gehalt: < 0,01 ppm • As-Gehalt: < 0,1 ppm • Organische Substanz enthalten (begünstigt Glühverlust, Viskosität, Plastizität) • Kornanteil < 2 µm hoch (z.B. in Sanitärkeramik > 40 %, in Porzellan > 70 %) • Kornanteil > 45 µm: < 0,1%
Als Streichkaoline	<ul style="list-style-type: none"> • Kaolinitgehalt: > 93 %, Spitzenqualitäten > 99 % • Quarzgehalt: möglichst quarzfrei • pH-Wert: 4,5-7,5 • Weißegrad: > 80 % ISO, besser > 85 % ISO • Kornanteil < 2 µm: > 60 %, besser > 70 % • Kornanteil > 10 µm: < 1,0 %, besser < 0,1 % • Kornanteil > 45 µm: < 0,03 % • Viskositätskonzentration: > 63 %, besser > 65 %
Als Füllstoffe in der Papierindustrie	<ul style="list-style-type: none"> • Kaolinitgehalt: 90 – 95 % • Quarzgehalt: < 2,0 %

	<ul style="list-style-type: none"> • pH-Wert: 4,5 – 7,5 • Weißegrad: > 76 % ISO, besser > 82 % ISO • Korngröße des Kaolins: rund 50 % < 2 µm, 45 % zwischen 2 und 20 µm, Kornanteil > 45 µm: < 0,05 %
Für Farben und Lacke	<ul style="list-style-type: none"> • Kaolinitgehalt: 90 – 95 % • Quarzgehalt: < 1,0 % • Fe₂O₃ - Gehalt: < 1,2 % • Cu-Gehalt: < 30 ppm • Mn-Gehalt: < 5 ppm • As-Gehalt: < 2 ppm • Summengehalt von Pb, Hg und Cd: < 20 ppm • organische Substanz: < 0,05 % • wasserlösliche Salze: < 1,5 % • pH-Wert: 4,5 – 9,5 • Weißegrad: 76 – 90 % ISO • Kornanteil > 45 µm: < 0,05 % • Kornklassenmaximum: 5 – 20 µm
In der Gummiproduktion	<ul style="list-style-type: none"> • Kaolinitgehalt, je nach Korngröße: > 77 % (grob) bis > 90 % (fein) • Quarzarmut aufgrund Silikosegefahr bei der Verarbeitung • Fe₂O₃ - Gehalt: < 0,9 % • Cu-Gehalt: < 30 ppm • Mn-Gehalt: < 5 ppm • As-Gehalt: < 5 ppm • organische Substanz: < 0,05 % • wasserlösliche Salze: < 0,5 % • pH-Wert: 6 – 7 • Kornanteil < 2 µm: 30 – 40 %, für spezielle Fälle z. T. wesentlich feinkörniger • Kornanteil > 45 µm: < 0,5 % • Feuchtegehalt: < 0,5 %
Kunststofffüllstoffe	Hier gelten dieselben Qualitätskriterien wie für Gummifüllstoffkaoline.
Kosmetik- und Pharmaindustrie	<ul style="list-style-type: none"> • Weißegrad: > 80 % ISO • pH-Wert: 4,5 – 7,5 • Kornanteil < 2 µm: > 45 – 80 % • Kornanteil > 45 µm: < 0,05 % • wasserlösliche Salze: < 0,1 % • Chloride: < 250 ppm • Sulfate: < 0,1 % • säurelösliche Substanzen: < 1,0 % • Fe₂O₃-Gehalt: < 0,9 % • Ca-Gehalt: < 250 ppm • Summe Schwermetalle: < 25 ppm • bestandener mikrobiologischer Test (Gesamtkeimzahl sowie Hefe, Pilze)
Trägerstoff für Schädlingsbekämpfungsmittel	<ul style="list-style-type: none"> • Kaolinitgehalt: > 80 % • Kornanteil < 2 µm: > 90 % • Kornanteil > 45 µm: < 0,5 % • hohes Schüttgewicht: > 0,7 g/cm³ • pH-Wert: 6 – 7 • spezifische Oberfläche > 5 m² /g • gute Dispergierbarkeit (Einarbeitbarkeit) • großes Volumen zur Bildung stabiler Dispersionen • gute Schwebfähigkeit

	<ul style="list-style-type: none"> • gute Haftfestigkeit auf Pflanzen • gute Adsorption der Wirkstoffe • Quarzfreiheit, insbesondere aufgrund der abrasiven Natur von Quarz bei der Verwendung in Spritzmaschinen
Glasfaserherstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Kaolinitgehalt: > 80 % • Fe₂O₃-Gehalt: < 0,9 % • TiO₂-Gehalt: < 0,2 % • Kornanteil < 2 µm: > 32 %, auch weniger • Kornanteil > 45 µm: < 0,05 % • Quarzgehalt: gerne hoch, sonst wird Quarzmehl zugemischt
Politurmittel	<ul style="list-style-type: none"> • > 90 % des kalzinierten Kaolins in Korngrößen < 2 µm • Absolut frei von allen größeren Körnern
Kaolinschamotten	<ul style="list-style-type: none"> • möglichst aluminiumreicher Kaolin

Die folgende Tabelle präsentiert eine ausführliche Zusammenfassung der physikalischen Eigenschaften und chemischen Zusammensetzung von Kaolin und kaolinitischen Tonen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Physikalische Anforderungen und chemische Zusammensetzung von Kaolin und kaolinitischen Tonen (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Kaolin und kaolinitische Tone	Feinkeramik			Feuerfestkeramik		Landwirtschaft	Chemie
	Steingut, Sanitärkeramik	Wand- und Bodenfliesen	Elektroporzellan	Bindeton	Schamotte	Bindeton in Futtermitteln	Füllstoff (z.B. in Kunststoffen)
Korngröße < 2 µm [M.-%]	70-90	> 40	50-75	> 70	65-95	> 70	> 70
Korngröße < 1 µm [M.-%]	> 65			40-60			
Korngröße < 0,5 µm [M.-%]	45-70	16-25	16-50	> 40	55-72		
Chemische Zusammensetzung [M.-%]							
SiO ₂	46-55	56-70	55-60	< 55	48-55	48-58	< 56
Al ₂ O ₃	30-35	20-28	25-30	> 30	30-35	29-35	30-33
Fe ₂ O ₃	< 0,9-1,8	< 1,0	< 1,5	< 2,0	< 0,5	< 0,5	< 1,0
TiO ₂	< 1,3	< 1,0	< 1,6	< 1,5	< 1,5	< 0,5	< 1,5
CaO	0,2-0,5	0,2-0,7	0,2-0,5	0,3	0,2	0,2	0-0,5
MgO	< 0,5	0,4-0,8	0,2-0,5	0,1-0,7	0,1-0,3	0,1-0,3	0,2
K ₂ O	0,7-2,5	< 3,0	< 2,5	< 3,0	1,4-2,2	0,7-2,0	< 2,5
Na ₂ O	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,4	0,2-0,6	0,3	0,1-0,5	0,2-0,4

2.5.4.2 2:1 Tonminerale

Die 2:1-Schichtsilikate lassen sich in zwei bedeutende Kategorien unterteilen:

1. Tonminerale, die sich bei Wasseraufnahme ausdehnen: Hierzu gehören die Smektitgruppe und Vermiculit.

Smektitminerale stützen sich hauptsächlich auf eine Struktur von entweder trioctahedralen 2:1 (Talk) oder dioctahedralen 2:1 (Pyrophyllit) und unterscheiden sich von diesen neutralen Strukturen durch das Vorhandensein von isomorphen Substitutionen in der oktaedrischen oder tetraedrischen Schicht. Die Smektitgruppe von Tonmineralen wird weiter in Saponit (trioctahedral) und **Montmorillonit** (dioctahedral) unterteilt. Ein weiteres bedeutendes Mitglied der Smektitfamilie ist **Bentonit**, auch als sedimentärer Ton bekannt, der die einzigartige Eigenschaft der Wasserrückhaltung aufweist (Kumari und Mohan, 2021).

Für Bohrspülungen ist es erforderlich, dass das Bentonit äußerst fein gemahlen ist und üblicherweise nur Korngrößenanteile von weniger als 2,5 % über 75 µm aufweist. Die Dichte sollte im Bereich von 1 bis 2 g/cm³ liegen, und der pH-Wert muss zwischen 7 und 9 liegen. Der Feuchtigkeitsgehalt sollte 10–15 % nicht überschreiten. Die scheinbare Viskosität (gemessen bei 6,5 g Ton in 100 ml Wasser) sollte über 15 cP (Zentipoise) liegen, während die plastische Viskosität (bei 10 g Ton in 350 ml Wasser) mehr als 8 cP betragen sollte. Zusätzlich existieren spezifische Vorgaben bezüglich der Fließgrenze, Viskosität, Ergiebigkeit und des Filterverlustes (Elsner, 2019).

Für den Einsatz in der Tiefbauindustrie ist es wichtig, dass das Bentonit ebenfalls sehr feinkörnig ist und üblicherweise weniger als 1 % Korngrößenanteile über 75 µm aufweist. Der pH-Wert hat einen breiteren Bereich von 8 bis 11, aber auch hier sollte die Feuchtigkeit niedrig sein (unter 12 %). Ähnlich wie bei Bohrbentoniten werden auch an Tiefbaubentonite spezielle Anforderungen in Bezug auf ihre Fließgrenzen, Viskositäten, thixotropen Eigenschaften, Ergiebigkeiten sowie Filterverluste gestellt (Elsner, 2019).

Bei der Verwendung als Bindeton in Gießereisanden sind neben der Korngrößenverteilung auch die plastischen Eigenschaften (wie Fließgrenzen und Fließfähigkeit), die Permeabilität sowie die Druckfestigkeiten (einschließlich Gründruckfestigkeit, Trockenbruchfestigkeit und Nasszugfestigkeit) des bentonitischen Formsandes von entscheidender Bedeutung. Es wird empfohlen, dass 85–90 % der Korngrößenverteilung des Bentonits im Bereich von 20 bis 75 µm liegen. Idealerweise sollte der Feuchtigkeitsgehalt zwischen 5 und 7 % liegen, während der pH-Wert im Bereich von 8 bis 9 angesiedelt sein sollte. Ein geringer CaO-Gehalt von unter 0,7 % ist vorteilhaft. Die Permeabilität sollte etwa 110 cm³/min betragen, und die Festigkeit sollte im Bereich von 500–600 g/cm² liegen (Elsner, 2019).

Eine endgültige Beurteilung der Eignung von Bentoniten in der Gießereiindustrie ist jedoch erst nach praktischen Tests möglich. Für Schwärzen in Gießereisanden sollten nur solche Bentonite verwendet werden, deren Korngröße zu mehr als 97 % unter 2 µm liegt. Um sicherzustellen, dass die Feuerfestigkeit der Schwärzen nicht beeinträchtigt wird, sollten die ausgewählten Tone einen Alkaligehalt von höchstens 4,5 % aufweisen, wozu Na₂O (Natriumoxid) und K₂O (Kaliumoxid) gehören. Der Fe₂O₃ (Eisenoxid)-Gehalt sollte auf unter 3,25 % begrenzt sein, während der Al₂O₃ (Aluminiumoxid)-Gehalt nicht weniger als 35 % betragen sollte (Elsner, 2019).

Für die Zugabe zu Erden- und Torfsubstraten wird empfohlen, dass ein Bentonit idealerweise folgende chemische Zusammensetzung aufweist: etwa 56 % SiO₂, 16 % Al₂O₃, 4 % Fe₂O₃, 4 % CaO, 4 % MgO, 2 % K₂O, 0,4 % Na₂O und einen Glühverlust von 10 %. Die Spurenelementgehalte sollten auf ungefähr 1.000 ppm B, 300 ppm Mn, 90 ppm Zn, 50 ppm Ni, 35 ppm Co sowie 20 ppm Cu bzw. Mo begrenzt sein. Der Salzgehalt sollte 200 ml/100 g Ton nicht überschreiten. Zusätzlich dazu sollte das Bentonit sehr trocken und fein gemahlen

sein, und es sollte eine möglichst hohe Kationenaustauschkapazität sowie ein hohes Puffervermögen aufweisen (Elsner, 2019).

Bentonite, die als Trägerstoffe für Pestizide dienen sollen, sollten eine Korngrößenverteilung aufweisen, bei der 90 % der Partikel kleiner als 2 µm und 99 % kleiner als 44 µm sind. Der Feuchtigkeitsgehalt sollte unter 1 % liegen, und der pH-Wert sollte weniger als 8 betragen (Elsner, 2019).

Füllstoffe für die Kosmetik und Pharmazie unterliegen besonders strengen Anforderungen. Wie alle anderen potenziellen Füllstoffe für diese Anwendungen sollte auch Bentonit einen sehr niedrigen Gehalt an Schwermetallen aufweisen (weniger als 25 ppm). Es sollte vollständig in Korngrößen kleiner als 74 µm, idealerweise sogar kleiner als 44 µm vorliegen. Der pH-Wert sollte im Bereich von 9 bis 10 liegen, der Weißegrad etwa 78 % und die Atterberg-Fließgrenze sollte im Bereich von 500–700 % liegen. Zudem sind die Anforderungen an die Viskositäten in verschiedenen prozentigen Suspensionen genau definiert (Elsner, 2019).

Vermiculit gehört zur 2:1-Gruppe der Tonminerale, mit einer oktaedrischen Schicht zwischen zwei tetraedrischen Schichten. Es zeigt eine dioktahedrale Struktur, meist aluminiumdominiert. Vermiculit ist ein hydroses Phyllosilikatmineral, das sich bei Erhitzung ausdehnt (Exfoliation). Die tetraedrische Schicht hat eine hohe negative Ladung aufgrund von Al^{3+} -Substitution. Die chemische Formel lautet $(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+})_3(SiAl)_4O_{10}(OH)_{24}H_2O$. Im Gegensatz zu Glimmern sind Wassermoleküle im Zwischenschichtraum vorhanden. Die Kationenaustauschkapazität ist hoch (100–150 meq/100 g). Vermiculit entsteht durch Verwitterung von Biotit oder Phlogopit (Kumari und Mohan, 2021).

2. Tonminerale, die sich nicht bei Wasseraufnahme ausdehnen: Diese Gruppe umfasst Illit (Glimmergruppe).

Diese Gruppe umfasst hauptsächlich das Tonmineral Mica (Illit) als sekundäre Form mineralischer Niederschläge. **Illit** gehört zur Gruppe der Phyllosilikate oder geschichteten Alumino-Silikate. Es tritt in Tonfraktionen auf, die gelegentlich als feinkörniges Mica bezeichnet werden. Illit entsteht durch Verwitterung und hydrothermale Umwandlungen und ist ein Bestandteil von Sericit. Häufig findet man dieses Mineral in Böden, tonigen Sedimentgesteinen und Gesteinen mit geringer Metamorphose. Die tetraedrische Schicht von Illit weist aufgrund der Substitution von Aluminiumatomen anstelle von Siliziumatomen eine höhere negative Ladung auf. K^+ -Ionen in den Zwischenschichten fungieren als Brücke und verhindern die Schichtenexpansion, was Illit als nicht-expandierend charakterisiert. Der Zwischenschichtabstand beträgt daher 10 Å. Die chemische Formel lautet $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$. Illit hat eine geringere Adsorptionskapazität, Schwellungs- und Schrumpfkapazität im Vergleich zu Montmorillonit und Vermiculit, aber höhere als Kaolinit. Die Kationenaustauschkapazität (CEC) von Illit liegt typischerweise bei etwa 20–30 meq/100 g (Kumari und Mohan, 2021).

Muskovit ($KAl_2[(OH, F)_2 | AlSi_3O_{10}]$) zeigt eine verstärkte Absorption von UV-Licht. Wie alle Glimmerarten zeichnet sich Muskovit durch seine Resistenz gegenüber Alkalien, Säuren und oxidierenden Substanzen aus. Die Oberflächen fein gemahlener Muskovits sind, ähnlich wie bei anderen Glimmern, ausgesprochen hydrophil. Sie nehmen leicht polare Medien wie Wasser auf und können Kationen austauschen. Die hohe Zugfestigkeit und Elastizität der Glimmerplättchen ermöglichen es, die verwendeten Füllstoffe effektiv in die Matrix des Beschichtungsmaterials einzubetten. Dies wird beispielsweise in Farben oder Lacken umgesetzt (Gwosdz et al., 2006).

2.5.4.3 2:1:1 Tonminerale

Chlorit gehört zur 2:1:1-Silikatgruppe und besteht aus Eisen-Magnesium-Silikaten mit einigen Aluminiumatomen. Die Kristallstruktur beinhaltet 2:1-Schichten, die sich mit einer von Magnesium dominierten Trioktaederschicht abwechseln. Im Gegensatz zu einigen Tonmineralen hat Chlorit eine nicht-expandierende Natur, da keine Wasseraufnahme zwischen den Schichten erfolgt. Die negative Ladung von Chloriten ist geringer als bei einigen anderen Tonmineralen. Die Aluminiumionen in der oktaedrischen Schicht können durch Magnesiumionen ersetzt werden, was zu verschiedenen Varianten wie Sudoit führt. Insgesamt zeigt Chlorit eine komplexe Struktur, die für bestimmte geologische Umgebungen charakteristisch ist (Kumari und Mohan, 2021).

2.5.5 Merkmale von Tonmineralen

Tonminerale gelten aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften als wertvolle Ressource für die Menschheit. Die kontinuierliche Forschung erkundet ihre vielseitigen Anwendungen, da sie weltweit weit verbreitet und in praktisch jedem Land vorhanden sind. Die poröse Blattstruktur und die elektrische Leitfähigkeit der Minerale spielen dabei eine wichtige Rolle. Die Bedeutung von Tonmineralen resultiert aus ihrer Kationenaustauschkapazität und Adsorptionsfähigkeit (Kumari und Mohan, 2021).

- Die **Kationenaustauschkapazität** (CEC - Cation-Exchange Capacity) von Tonmineralen beeinflusst deren Fähigkeit, Kationen zu adsorbieren und zurückzuhalten. Sie wird als Maß für die Anzahl der auf der Oberfläche von Bodenpartikeln zurückgehaltenen Kationen gemessen und beeinflusst die Bodenchemie, einschließlich der Nährstoffbindung und Schwermetallretention. Die CEC hängt von Partikelgröße, Kristallinität und adsorbierten Ionen ab, und ihre Bestimmung erfolgt durch Methoden wie den Austausch von Kationen mit Ammonium oder anderen Komplexen (Kumari und Mohan, 2021).
 - Die **Quellfähigkeit** von Tonmineralen ist ein komplexer Prozess, der durch Faktoren wie die Ladungsdichte der Tonschichten, Art der Zwischenschicht-Ionen, Ionenkonzentration in der Lösung, Wassergehalt, Mineralzusammensetzung und spezifische Oberfläche beeinflusst wird. Quellfähige Tonminerale, die zur 2:1-Gruppe gehören, weisen eine größere Dicke der Zwischenschichtspalten auf und zeigen eine höhere Neigung zum Schwellen. Die Schwellkapazität beeinflusst die Stabilität von Baustrukturen, insbesondere bei hohen spezifischen Oberflächen und starkem Volumenwechsel. Der Schwellprozess, ausgelöst durch Osmose, wird durch die Hydratation der Tonminerale initiiert, wobei Wassermoleküle in die Zwischenschichtspaltendicke strömen (Kumari und Mohan, 2021).
 - Die **elektrischen Eigenschaften von Tonmineralen**, resultierend aus isomorpher Substitution oder Protonierung, spielen eine entscheidende Rolle bei verschiedenen chemischen Prozessen wie der Bildung von Organokomplexen und der Ionenmigration. Es gibt zwei Hauptkategorien von Tonmineralen: solche mit dauerhaft negativer Ladung und solche mit variabler Ladung. Diese Ladung beeinflusst die Aggregation von Tonpartikeln und die Aufnahme von Verunreinigungen. Unterschiedliche Basalflächen zeigen verschiedene Ladungseigenschaften, die durch die Salzkonzentration beeinflusst werden. Die Ladungseigenschaften werden unter Umgebungsbedingungen analysiert und beeinflussen die Elektrische Doppelschicht (EDL) nahe der Tonoberfläche (Kumari und Mohan, 2021).
 - Ton und tonhaltige Minerale zeigen **adsorptives Verhalten** durch drei Mechanismen: physikalische Adsorption (umfasst nicht-ionische Adsorption auf der Tonoberfläche), Ionen-Austauschadsorption (bei der elektrostatische Wechselwirkungen oder
-

Austauschprozesse auftreten) und zeolithartige Adsorption (involviert die Zugabe kleiner Moleküle in Poren oder Hohlräume und die Eliminierung größerer Moleküle). Ihre erheblichen Adsorptionskapazitäten für Metallionen und organische Substanzen sind auf Faktoren wie eine große Oberfläche, geringe Permeabilität, hohe Kationenaustauschkapazitäten und effektive Retentionsfähigkeiten zurückzuführen. Aktive Stellen, einschließlich austauschbarer Kationen, verschiedener Hydroxylgruppen, koordinativ ungesättigter Ionen und Sauerstoffanionen, tragen zu sowohl physikalischen Adsorptionsinteraktionen (über Van-der-Waals-Kräfte oder Wasserstoffbrückenbindung) als auch zu Wechselwirkungen (aufgrund von Bindungsbildung) zwischen Tonmineralen und Molekülen bei (Kumari und Mohan, 2021).

- Die **spezifische Oberfläche** bezeichnet die Oberfläche von Bodenpartikeln pro Masseneinheit oder Volumeneinheit trockenen Bodens und wird in m^2/g oder m^2/m^3 gemessen. Die Tonminerale zeigen aufgrund ihrer Wechselwirkungen mit Bodenwasser eine hohe reaktive spezifische Oberfläche. Die Reaktivität variiert je nach Art des Tonminerals, wobei Smektit und Vermiculit einen beträchtlichen Anteil an innerer Oberfläche aufweisen. Die spezifische Oberfläche wird durch Partikelgröße und -form beeinflusst und nimmt mit abnehmender Partikelgröße zu. Schwellende Tonminerale wie Montmorillonit und Vermiculit können eine hohe spezifische Oberfläche von bis zu $810 \text{ m}^2/\text{g}$ haben, während nicht schwellende Tonminerale wie Kaolinit in der Regel niedrigere spezifische Oberflächen von 10 bis $70 \text{ m}^2/\text{g}$ aufweisen, da sie nur zur äußeren Oberfläche beitragen. Die spezifische Oberfläche kann durch Säureaktivierungsbehandlungen, insbesondere mit anorganischen Säuren, erhöht werden (Kumari und Mohan, 2021).
- Die **Plastizität** von Tonmineralien ist eine entscheidende Eigenschaft, die ihre Verformbarkeit unter Einfluss von Kraft beschreibt. Sie wird von Faktoren wie Zusammensetzung, organischen Substanzen, spezifischer Oberfläche und Wassereigenschaften beeinflusst. Hochplastische Ton-Wasser-Systeme erfordern mehr Kraft für Verformung, während geringplastische leichter verformbar sind. Die Plastizität steht im Zusammenhang mit der Morphologie von Tonmineralien, die sich nach Zugabe von Wasser gegeneinander verschieben. Der Wassergehalt bei dem der Ton plastisch wird, ist die Plastizitätsgrenze, während der Zustand klebrig wird als Fließgrenze bezeichnet. Der Unterschied zwischen diesen Punkten ist der Plastizitätsindex (Kumari und Mohan, 2021).
- Die **Dispersion** von Tonmineralen beschreibt die Separation von Feststoffpartikeln in eine kontinuierliche Phase unterschiedlicher Zusammensetzung, beispielsweise in Flüssigkeit, Feststoff oder Gas. Durch die Benetzung der Tonminerale erfolgt eine Trennung der Partikel, was zur Bildung einer Dispersion führt. Im Gegensatz dazu tritt bei der Flockung eine Anhaftung und Bildung von größeren Clustern oder Klumpen auf, wenn die dispersen Partikel miteinander in Kontakt kommen. Die Balance zwischen anziehenden und abstoßenden Kräften an der Oberfläche geladener Kolloide in der elektrischen Doppelschicht reguliert die Ton-Dispersion. Faktoren wie austauschbare Kationen und Ionenstärke beeinflussen diese Balance. Zusätzlich spielt der pH-Wert der Lösung eine entscheidende Rolle im Dispersion-/Flockungsverhalten der Tonminerale und beeinflusst deren elektrokinetische Eigenschaften (Kumari und Mohan, 2021).

Durch die Anpassung mit verschiedenen organischen Kationen lassen sich die physikochemischen Eigenschaften von Tonmineralen, darunter spezifische Oberfläche, Ionen-Austauschkapazität, Adsorptionskapazität und Quelfähigkeit, verbessern. Diese Veränderungen machen sie besonders geeignet für bestimmte Anwendungen, beispielsweise die kostengünstige Sanierung von kontaminierten Gewässern und Böden (Kumari und Mohan, 2021).

2.5.6 Feuerfeste Tone

Feuerfeste Produkte müssen nicht nur extremen Temperaturen standhalten, sondern auch gegen die Einwirkung von metallischen und anderen Schmelzen resistent sein. In zahlreichen Fällen wird auch eine ausgeprägte Widerstandsfähigkeit gegenüber Temperaturschwankungen benötigt und sie sollten unter Drucklast bei erhöhten Temperaturen nur minimal oder überhaupt nicht erweichen (Lorenz und Gwosdz, 1997).

In der nachfolgenden Tabelle 5 sind die Anforderungen an feuerfeste Tone gemäß Lorenz und Gwosdz (1997) detailliert aufgeführt.

Tabelle 5: Anforderungen an feuerfeste Tone (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Eigenschaft	Anforderung
Mineralzusammensetzung	Geringe Gehalte an <ul style="list-style-type: none"> • Illit • Karbonaten • Eisenverbindungen
Homogenität der Rohtone	möglichst homogen
Al_2O_3 - und SiO_2 - Gehalt	möglichst hoch
Begrenzung von K_2O , Na_2O , CaO , MgO	maximal 3 M.-%
Eisengehalt	ideal < 3 M.-% als Fe-Oxide
Organischer Kohlenstoff (C_{org})	generell < 2 M.-%, vorzugsweise < 1 M.-%
SO_3 -Gehalt	maximal 0,2 M.-%

Feuerfeste Tone setzen sich im Wesentlichen aus ungeordnetem Kaolinit, Halloysit, Illit und Quarz zusammen. Es gibt zwei Haupttypen von feuerfesten Tonen: solche mit hohem SiO_2 -Gehalt, die in Form- und Klebsanden verwendet werden, sowie solche mit hohem Al_2O_3 -Gehalt, die hauptsächlich als Schamott-Rohstoff oder Bindeton dienen. Die Feuerfestigkeit ist ein entscheidendes Bewertungskriterium für alle feuerfesten Tone, wobei der Schmelzpunkt über ihre Verwendung in der Feuerfestindustrie entscheidet. Die Feuerfestigkeit steigt mit höherem Al_2O_3 -Gehalt. Hochfeuerfeste Rohtone weisen etwa 38 – 42 M.-% Al_2O_3 , < 2 – 3 M.-% Fe_2O_3 auf und sollen einen geringen Glühverlust haben (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Feuerfeste Tone müssen eine hohe Feuerfestigkeit aufweisen, das bedeutet, dass sie bei einem bestimmten Aufheiztest, dem sogenannten Segerkegeltest mit einer definierten Aufheizgeschwindigkeit (150 °C/h), erst oberhalb einer genau festgelegten Temperatur erweichen dürfen. Als feuerfest gelten Töne, die Temperaturen von ≥ 1.500 °C (SK 17 im Segerkegeltest) widerstehen, während hochfeuerfeste Tone Temperaturen von ≥ 1.785 °C (SK 36) ohne Verformung standhalten (Elsner, 2019).

Aufgrund dieser Stabilitätsanforderungen ist der Al_2O_3 -Gehalt der verwendeten Tone ein entscheidendes Qualitätskriterium. Hochfeuerfeste Tone enthalten in der Regel 38–44 % Al_2O_3 und sollten nur einen geringen Glühverlust aufweisen, beispielsweise durch Kohle oder organische Substanzen (< 1 %). Die Brennschwindung sollte ebenfalls gering sein. Der Gehalt an SO_3 (Schwefeltrioxid) im Ton darf zudem 0,2 % nicht überschreiten. Die Anteile an Alkali- und Erdalkaliverbindungen sollten niedrig sein (< 3 % K_2O , Na_2O , CaO und MgO) da diese als Flussmittel wirken und den Schmelzpunkt herabsetzen. Ein hoher Anteil an Kaolinit im Ton ist dabei hilfreich, da dieser hohe Al_2O_3 -Gehalte aufweist, aber keine Alkalien enthält. Hochwertige feuerfeste Tone enthalten in der Regel mehr als 90 % Kaolinit, während geringe Anteile an Illit, Karbonaten und Eisenverbindungen (< 3 % Fe_2O_3) vorhanden sind. Letztere Mineralien könnten mit den übrigen Bestandteilen niedrig schmelzende Gläser bilden. Generell sollte ein feuerfester Ton chemisch möglichst rein sein und bestimmte Bindeeigenschaften aufweisen (Elsner, 2019).

Ton dient als Rohstoff für Schamotte, die wiederum aus sedimentären, limnischen, feinkörnigen, nicht verfestigten Töne besteht. Schamotte besteht zu einem großen Teil aus Kaolinit, begleitet von Illit und Quarz sowie variablen Mengen an Chlorit, Smektit, Siderit und teilweise Pyrit. Feuerfeste Fire clay-Töne haben Kaolinit als Hauptkomponente und weisen Al_2O_3 -Gehalte von 25 – 44 M.-% in einer kontinuierlichen Mischreihe auf. Sie enthalten nur geringe Verunreinigungen, sind feuerbeständig über 1500°C und haben eine gelbe bis beige oder graue Brennfarbe. Fire clay-Töne mit Al_2O_3 -Gehalten über 39 M.-% enthalten auch Bauxitminerale wie Gibbsit, Diaspor oder Boehmit. Nicht feuerfeste (keramische) Fire clay-Töne haben Kaolinit in etwa gleichen Anteilen neben Illit und Quarz. Die Feuerfestigkeit hängt hier hauptsächlich vom Verhältnis von Al_2O_3 zu SiO_2 ab (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Um Öfen, Brennkammern, Leitungen und ähnliche Einrichtungen zu verkleiden, sind Werkstoffe mit hoher Temperaturbeständigkeit erforderlich. Die primären Nutzer von feuerfesten bzw. hochtemperaturbeständigen Steinen und Massen sind vor allem die Eisen- und Stahlindustrie. Weitere bedeutende Anwenderbranchen schließen die Zement- und Kalkindustrie, die Glasindustrie, die chemische Industrie sowie die Produktion von feuerfesten Erzeugnissen mit ein (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Generell lassen sich feuerfeste keramische Produkte ausschließlich durch andere feuerfeste Materialien substituieren. In den letzten Jahren hat sich die Verfahrenstechnologie in der Feuerfestindustrie verstärkt von plastisch geformten Materialien hin zu trocken geformten Materialien entwickelt. Dies führte dazu, dass feuerfeste Töne teilweise durch Schamotte ersetzt wurden. Jedoch erlebt auch Schamotte vermehrt Substitution durch gebrannte sowie ungebrannte Materialien, die reich an Al_2O_3 sind, wie beispielsweise Bauxit, Kyanit, Andalusit und Sillimanit (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Für generelle industrielle Anwendungen sind in Tabelle 6 gemäß Lorenz und Gwosdz (1997) Orientierungswerte für die Merkmale von maschinell gepressten Schamottsteinen aufgeführt.

Tabelle 6: Orientierungswerte für die Merkmale von maschinell gepressten Schamottsteinen für generelle industrielle Anwendungen (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Schamottstein-Sorten	Al_2O_3 -Gehalt [M.-%]	Fe_2O_3 -Gehalt [M.-%]	Rohdichte (mind.) [g/cm^3]	Anteil an Poren _{offen} [%]	Druckfestigkeit bei Raumtemp. (mind.) [N/mm^2]	Druckfeuerbeständigkeit (Beginn der Erweichung) [$^\circ\text{C}$]
A40 _{trocken gepreßt}	> 40	< 2,5	2,15	20	30	1450
A40 _{halbtrocken gepreßt}			2,10	21	25	1420
A40 _{plastisch gepreßt}			1,90	26	15	1380
A35 _{trocken gepreßt}	35-40	< 2,5	2,10	19	30	1400
A35 _{halbtrocken gepreßt}			2,05	20	25	1380
A35 _{plastisch gepreßt}			1,90	25	15	1350
A30 _{trocken gepreßt}	30-35	< 3,0	2,05	19	30	1370
A30 _{halbtrocken gepreßt}			2,05	20	25	1350
A30 _{plastisch gepreßt}			1,90	24	15	1320
A25 _{trocken gepreßt}	< 30	< 3,0	2,05	18	35	1340
A25 _{halbtrocken gepreßt}			2,05	19	30	1320
A25 _{plastisch gepreßt}			1,90	24	20	1300

Im vorliegenden Tunnelausbruchmaterial wurden laut XRD zwei Arten von Feldspäten identifiziert, nämlich Plagioklas (Albit, $\text{Na-Feldspat}=\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) und Kalifeldspat (Mikroclin= $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$). Der Plagioklasanteil im Tunnelausbruchmaterial liegt im Bereich von 9-15%, während der Kalifeldspatanteil ungefähr bei 4% liegt.

Die Feldspäte nehmen einen wesentlichen Anteil von etwa 60-65 M.-% an der Zusammensetzung der festen Erdkruste ein und sind somit die wichtigste Mineralgruppe für die Gesteinsbildung. Als vorrangige Silikate, die Gesteine bilden, sind Feldspäte in drei

Hauptphasen des ternären Systems vertreten: Orthoklas (K-Feldspat), Albit (Na-Feldspat) und Anorthit (Ca-Feldspat). In der natürlichen Umgebung treten Feldspäte häufig als Mischkristalle oder in Entmischungsphasen von Orthoklas, Albit und Anorthit auf. Besonders in quarzreichen Magmatiten und Metamorphiten, vor allem solchen mit einer Zusammensetzung im Bereich von Granit bis Granodiorit, sind K-Feldspäte und Plagioklase als Hauptbestandteile weit verbreitet (Lorenz und Gwosdz, 2003).

Zu den K-Feldspäten gehören verschiedene Mineralien wie Orthoklas, Mikroklin, Sanidin und Andular. Die Plagioklase hingegen sind Mischkristalle aus Albit und Anorthit und machen etwa 40% der festen Erdkruste aus. Ihre Zusammensetzung wird basierend auf dem Anorthitgehalt in Mol-% bzw. dem Albitanteil unterteilt. Albit zeigt im Vergleich zu Anorthit eine höhere Beständigkeit gegen Zersetzung und Verwitterung. Das Hauptverwitterungsprodukt der Plagioklase ist Kaolin, während in tropischem Klima auch Bauxit entstehen kann (Lorenz und Gwosdz, 2003).

Die primären Abnehmer von K- und Na-Feldspäten sowie feldspathaltigen Gesteinen sind hauptsächlich die Keramik- und Glasindustrie. In der Keramikindustrie werden Feldspäte für Keramikmassen, Glasuren und Emaille eingesetzt. Aufgrund ihres Alkaligehalts wirken Alkalifeldspäte als Flussmittel, was zu einer Senkung der Schmelz- und Sinterpunkte der Rohstoffgemische führt und somit zu einer Energieeinsparung beiträgt. Beim Abkühlen entsteht eine bindende Glasmatrix. Bei Zusätzen für Keramikprodukte wird hauptsächlich K-Feldspat verwendet. Der Zusatz von Al_2O_3 reduziert die Neigung zur Rissbildung während des Brennprozesses und erhöht die Bruchfestigkeit. Anorthosite finden bevorzugte Anwendung in Schnellbrandmassen (Lorenz und Gwosdz, 2003).

In der Glasindustrie wirken Alkalifeldspäte ebenfalls als Flussmittel und senken die Schmelz- und Sinterpunkte der Rohstoffgemische, was zu einer Energieeinsparung führt. Beim Abkühlen aus der Schmelze bilden die Oxidbestandteile des Feldspats eine Glasstruktur. Das durch den Feldspat eingeführte Al_2O_3 erhöht die Viskosität einer Glasschmelze, was eine bessere maschinelle Formbarkeit des Glases ermöglicht. Zusätzlich erhöht es die Härte sowie die Bruchfestigkeit und wirkt entgegen der Neigung zur Kristallisation (Entglasung) (Lorenz und Gwosdz, 2003).

In der Glas- und Keramikindustrie werden K-reiche Feldspäte mit spezifischen chemischen Eigenschaften gefordert, darunter K_2O (> 8 M.-%), Na_2O (< 4 M.-%), Al_2O_3 (> 18,5 M.-%), Fe_2O_3 (< 0,1 M.-%) und Cr_2O_3 (< 0,0005 M.-%). Ebenso sind Feldspat-Quarz-Gemenge mit einem Gehalt an K_2O (> 4 M.-%), Na_2O (< 4 M.-%), Al_2O_3 (> 11 M.-%), Fe_2O_3 (< 0,1 M.-%) sowie Glimmer (< 1 M.-%) als generelle Anforderungen festgelegt (Lorenz und Gwosdz, 2003).

Spezielle Anforderungen gelten für Feldspat und Feldspatkonzentrate in der Glasherstellung, der Herstellung von Keramikwaren und als Füllstoff. Dabei wird stets ein niedriger Fe_2O_3 -Gehalt angestrebt, während ein möglichst hoher Alkaligehalt gefordert wird. In der Glasherstellung tendiert man vermehrt dazu, Quarz-Feldspat-Gemische zu bevorzugen (Lorenz und Gwosdz, 2003).

3 Experimenteller Teil

In diesem Abschnitt werden die experimentellen Verfahren vorgestellt, die im Rahmen einer umfassenden Analytik von Tunnelausbruchsmaterial aus dem FCC-Projekt angewandt wurden. Das Vorliegen der Ergebnisse ist entscheidend, um potenzielle Umweltauswirkungen oder Verwertungsmöglichkeiten zu bewerten und Schadstoffe zu identifizieren, die aus solchen Materialien freigesetzt werden könnten. Abbildung 10 gibt einen Überblick der durchgeführten experimentellen Arbeiten.

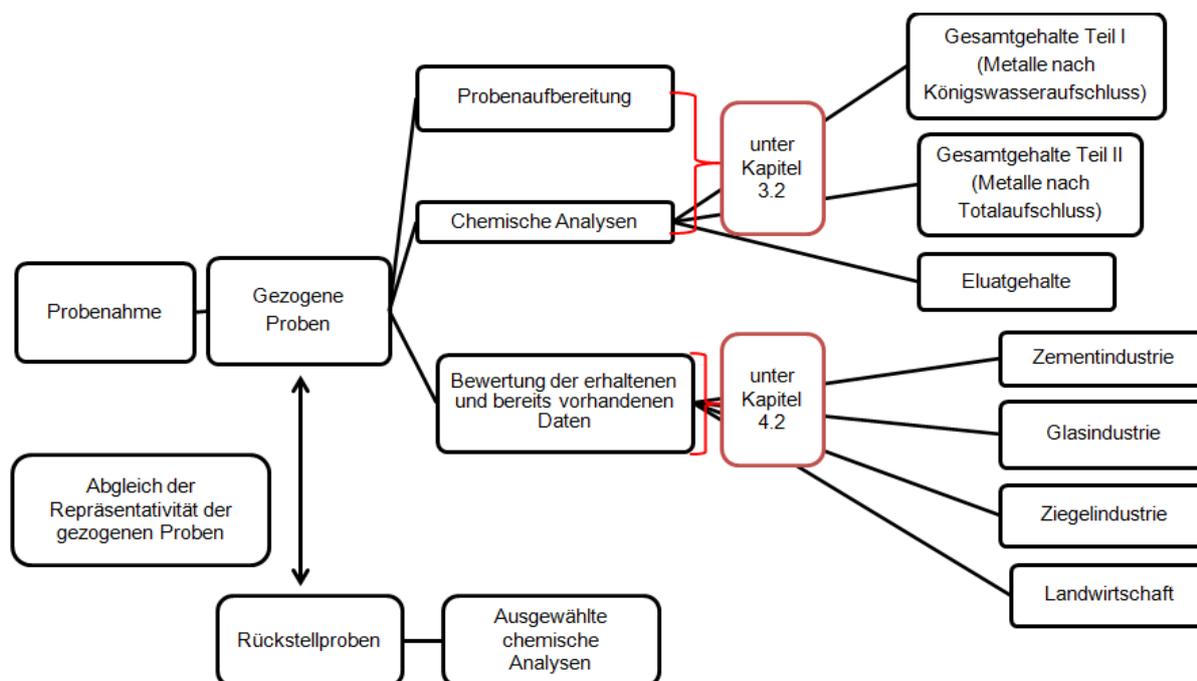


Abbildung 10: Der experimentelle Teil in Überblick.

3.1 Material und Probenahme

Die Probenahme erfolgte am Zentrum am Berg (ZAB), wie in der Abbildung 11 ersichtlich, gemäß den Richtlinien der ÖNORM S 2127:2011. Insgesamt lag eine Gesamtmenge von 60.000kg vor Ort, es wurden zwei repräsentative qualifizierte Stichproben gezogen (vgl. Tabelle 7). In der Abbildung 12 ist das Tunnelausbruchsmaterial zu sehen.

Das genommene Tunnelausbruchsmaterial, das in Kunststoffkübeln abgefüllt und gelagert wurde und insgesamt ein Gesamtgewicht von 17kg aufwies (Tabelle 7), zeichnete sich von Beginn an durch eine Korngröße von <math><10\text{ cm}</math> aus. Für die Untersuchungen erhielten die qualifizierten Stichproben interne Labornummern (vgl. Tabelle 7).



Abbildung 11: "Abfallhaufen" am ZAB (Foto von Dipl.-Ing. Elisabeth Hauzinger).

Tabelle 7: Probennummer und Gewicht inkl. Eimer.

Probennummer	Masse [kg]
0334-23/0478-23/EHa1/qSTP1	8,8
0335-23/0479-23/EHa2/qSTP2	8,2
SUMME	17,0



Abbildung 12: Tunnelausbruchsmaterial.

Zusätzlich wurden Rückstellproben aus einer früheren Doktorarbeit (Haas, 2022) ebenfalls analysiert (Abbildung 13).



Abbildung 13: Rückstellproben.

Eine detaillierte Übersicht der Probenbezeichnungen und zugehörigen Probennummern ist in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Rückstellproben - Probenbezeichnung und Probennummer.

Probenbezeichnung laut Haas (2022)	Probennummer
Pei-I-01A: fine grained sandstone	1415-23
Pei-I-03A: violet brownish marl	1416-23
Pei-I-05A (2/3) Pei-I-05C (1/3): HC-sandstone	1417-23
Pei-I-15D: gray marl	1418-23
C1-02B: sandstone	1419-23
Pei-I-20 E, F (<4mm), G: brown-yellow-marl	1420-23
C1-01-G: marl	1421-23
C1-04-C: sandstone	1422-23

3.2 Probenaufbereitung und chemische Analysen

Im Rahmen der sorgfältigen Probenaufbereitung gemäß ÖNORM EN 15002:2015-07 wurden die Proben zunächst mittels eines Backenbrechers auf eine Größe von <10 mm reduziert. Jeweils ein Teil der Proben wurde weiter mittels Kugelmühle auf Analysenfeinheit aufbereitet. Hierbei kamen Kugeln und ein Mahlbehälter aus Zirkonoxid zum Einsatz.

Unmittelbar nach der Zerkleinerung wurden die Proben über Nacht in einem Trockenschrank getrocknet. Dabei wurden Teilproben sowohl bei 40°C (Grund: Hg-Analytik) als auch bei 105°C getrocknet, gemäß den Vorgaben der ÖNORM EN 14346:2007-03 (Verfahren A).

Eluate wurden nach ÖNORM EN 12457-4:2003-01 (Abfall) vorbereitet. Hierzu wurden jeweils 100 g der Proben mit Reinstwasser im Verhältnis 1:10 (Feststoff:Flüssigkeit) unter Berücksichtigung der Trockenmasse gemischt. Für dieses Standardeluat wurde die Proben-Reinstwassermischung für 24 Stunden am Überkopfschüttler bei einer Geschwindigkeit von 6 Umdrehungen pro Minute intensiv durchmischt.

Nach 24 Stunden wurde das Eluat aus dem Überkopfschüttler genommen, um den Feststoff für eine Dauer von 15 Minuten absetzen zu lassen und eine klare Trennung zwischen Feststoff und Flüssigkeit zu gewährleisten. Anschließend erfolgten die Messungen des pH-Werts nach ISO 10523:2008-12 und der Leitfähigkeit nach DIN EN 27888:1993-11.

Vor Beginn sämtlicher Messungen wurden entsprechende Kalibrationen und Überprüfungen mit Kontrollstandards bekannter Konzentrationen durchgeführt. Für die pH-Wert-Messung wurde die Kalibrierung aufgrund der basischen Natur der Probe im Bereich von 7 bis 10 durchgeführt.

Nach der Vorbereitung des Eluats wurde dieses nach 24 Stunden aus dem Überkopfschüttler genommen und für eine Dauer von 15 Minuten abgesetzt, um eine klare Trennung zwischen Feststoffen und Flüssigkeit zu gewährleisten. Für die Messung des pH-Werts wurde das ISO 10523:2008-12-Verfahren angewendet, während die elektrische Leitfähigkeit nach DIN EN 27888:193-11 bestimmt wird.

Vor Beginn sämtlicher Messungen wurden entsprechende Kalibrationen und Überprüfungen mit Kontrollstandards bekannter Konzentrationen durchgeführt. Für die pH-Wert-Messung wurde die Kalibrierung aufgrund der basischen Natur der Probe im Bereich von 7 bis 10 durchgeführt.

Um beim Eluat den Feststoff von der Flüssigkeit abzutrennen, wurden die Eluate zunächst zentrifugiert (550 min^{-1} , 5 min) und anschließend unter Verwendung eines Blaubandfilters filtriert.

Die Bestimmung des Trockenrückstands oder Wassergehalts erfolgt nach dem Prüfverfahren ÖNORM EN 14346:2007-03 (Verfahren A), während der Abdampfrückstand gemäß DIN 38409-1:1987-01 analysiert wird. Die Analyse des Restwassergehalts für die bei 40°C getrockneten Proben erfolgte durch Abwiegen der Proben vor und nach dem Trocknen bei 105°C.

Zur Bestimmung von Metallkonzentrationen werden spektrometrische Methoden angewendet, darunter das ICP (Inductively Coupled Plasma) nach ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 und die Ionenchromatographie (IC) gemäß DIN EN ISO 10304-1:2009-07.

Die Photometrie kommt bei verschiedenen Analysen zum Einsatz, wie beispielsweise bei der Bestimmung von Ammonium (als N) nach DIN 38406-5:1983-10, anionischen Tensiden (als MBAS) gemäß ÖNORM EN 903:1994-03, dem Chrom VI-Gehalt nach DIN 38405-24:1987-05 und dem Phenolindex nach DIN 38409-16:1984-06.

Die Bestimmung des **Ammoniumgehalts** erfolgte gemäß DIN 38406-E5 unter Verwendung einer photometrischen Methode mit einem UV/VIS Spektrometer im Zweistrahlverfahren, bei dem die Probe gegen einen Blindwert gemessen wurde. Vor der Messung wurden die Proben mittels eines Membranfilters mit einer Porengröße von 0,45 µm filtriert.

Die Messung der **Anionen** wurde nach Filtration bei 0,45 µm durchgeführt. Die Anionen, die im Eluat analysiert wurden, umfassten Fluorid, Chlorid, Nitrit, Nitrat und Sulfat. Falls die Konzentrationen dieser Anionen zu hoch waren, wurde in einigen Fällen eine Verdünnung vorgenommen, insbesondere beim Sulfat.

Die Bestimmung des Gesamtgehaltes an Stickstoff erfolgte nach DIN EN 15104.

Aus dem Feststoff – je nach Verfahren in getrockneter Form oder dem Originalzustand – wurden zudem die in Tabelle 9 angeführten Verfahren durch ein Unterauftragslabor durchgeführt.

Tabelle 9: Durch ein Unterauftragslabor durchgeführten Prüfverfahren.

Organische Summenparameter	Parameter	Prüfverfahren
	Ausblasbare org. gebundene Halogene	EN ISO 22155 (GC)
	KW-Index	EN 14039 (GC)
	PAK (16 Verbindungen nach EPA)	EN 15527 (GC-MS)
	PAK (Benzo[a]pyren)	EN 15527 (GC-MS)
	PCB (7 Verbindungen)	ÖNORM EN 17322 (GC-MS)
	Summe der flüchtigen aromatischen KW	EN ISO 22155 (GC)
	TOC (als C)	ÖNORM EN 15936 (trockene Verbrennung)

3.2.1 Gesamtgehalte Teil I (Metalle nach Königswasseraufschluss)

Für den offenen Königswasseraufschluss wurden jeweils zwei Aufschlüsse pro Probe (Doppelbestimmung) in einem Stehrundkolben durchgeführt. Hierfür wurden 2,75 bis 3,00 Gramm der Proben in den Stehrundkolben eingewogen. Der Aufschluss erfolgte in einer Mischung aus konzentrierter *HCl* und *HNO₃* im Verhältnis 3:1 (= Königswasser). Dabei wurde eine Gesamtmenge von 60 ml Säure verwendet, die sich aus 45 ml *HCl* und 15 ml *HNO₃* im Verhältnis 3:1 zusammensetzte. Dieser Königswasseraufschluss ist ein Standardverfahren in der Abfallanalytik, jedoch ist festzuhalten, dass Silikate durch die verwendeten Reagenzien nahezu intakt bleiben.

Im Anschluss an den Königswasseraufschluss wurden die Lösungen in 50 ml Tubes über einen Schwarzbandfilter überführt und auf das Endvolumen mit Reinstwasser aufgefüllt. Die gelbliche Färbung der Lösung deutete auf das Vorhandensein von Chrom hin. Die Homogenisierung erfolgte durch Schütteln, um sicherzustellen, dass die Probe gut durchmischt wurde und repräsentative Ergebnisse erzielt wurden.

In dieser Tabelle 10 sind die Elemente und Prüfverfahren aufgeführt, die analysiert wurden.

Tabelle 10: Analytierte Elemente und zugehörige Prüfverfahren.

Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Anorganische Stoffe	Parameter	Prüfverfahren
		Trockenrückstand (105°)	ÖNORM EN 14346:2007-03 (Verfahren A)
		Trockenrückstand (40°)	ÖNORM EN 14346:2007-03 (Verfahren A)
		Antimon (als Sb)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Arsen (als As)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Barium (als Ba)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Blei (als Pb)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Cadmium (als Cd)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)

Parameter	Prüfverfahren
Chrom gesamt (als Cr)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Chrom VI (als Cr)	DIN 38405-24:1987-05/EPA Method 3060 A
Cobalt (als Co)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Gold (als Au)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Kupfer (als Cu)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Molybdän (als Mo)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Nickel (als Ni)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Quecksilber (als Hg)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Selen (als Se)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Silber (als Ag)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Thallium (als Tl)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Vanadium (als V)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Wolfram (als W)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Zink (als Zn)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
Zinn (als Sn)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)

3.2.2 Gesamtgehalte Teil II (Metalle nach Totalaufschluss)

Auf der anderen Seite wurde zur Bestimmung der Kationen ein Totalaufschluss nach ÖNORM EN 13656:2021-05 (Verfahren B) unter Verwendung einer Mikrowelle mit einer Mischung aus Salzsäure (HCl), Salpetersäure (HNO₃) und Flußsäure (HF) durchgeführt. Zusätzlich wurden 23 ml Bor zur Komplexbildung hinzugefügt. Der Totalaufschluss zielt darauf ab, alle Bestandteile, einschließlich der Silikate, vollständig aufzulösen. Diese Unterscheidung zwischen Königswasseraufschluss und Totalaufschluss ist besonders wichtig, da die Nicht-Auflösung der Silikate beim Königswasseraufschluss zu Minderbefunden führen kann. Aufgrund der Vorgaben der Ersatzrohstoffrichtlinie (BMLFUW, 2017) war es notwendig, einen Totalaufschluss durchzuführen.

Die nachfolgende Tabelle enthält eine Auflistung der Elemente, die aus dem Totalaufschluss bestimmt wurden (Tabelle 11). Die Analyse der **Kationen** erfolgte mithilfe der **ICP-MS** (Inductively Coupled Plasma - Massenspektrometrie). Die Kalibrierung wurde mit Konzentrationen von 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10,0 mg/l durchgeführt.

Tabelle 11: Analyse der Elemente durch Totalaufschluss mithilfe der ICP-MS.

Elemente	Prüfverfahren	
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Ag (Silber)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01
	Al (Aluminium)	
	Ba (Barium)	
	Be (Beryllium)	
	Ca (Calcium)	
	Fe (Eisen)	
	K (Kalium)	
	Li (Lithium)	
	Mg (Magnesium)	
	Mo (Molybdän)	
	N (Stickstoff)	
	Na (Natrium)	
	P (Phosphor)	
	Pd (Palladium)	
	Se (Selen)	
	Si (Silizium)	
	Sr (Strontium)	

Te (Tellur)	
Ti (Titan)	
W (Wolfram)	

3.2.2.1 Metalle mittels RFA

Es wurde ebenfalls eine semiquantitative Röntgenfluoreszenzanalyse aus dem Pulverpressling durch ein Unterauftragslabor durchgeführt. Zusätzlich wurde die Glühverlustbestimmung bei 1025°C unter Anwendung der DIN EN ISO 26845:2008-06 vorgenommen. Dabei lag die Bezugsbasis der Analyse auf der Trockensubstanz (105°C). Diese Methoden wurden unter Berücksichtigung der Vorgaben der DIN 51001:2003-08 und DIN 51418-2:2015-03 angewendet, um eine umfassende und normenkonforme Analyse von insgesamt 71 Elementen zu gewährleisten (Tabelle 12).

Tabelle 12: Analytierte Elemente und durchgeführte Prüfverfahren in einem Unterauftragslabor.

Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Parameter						
	F	Rb ₂ O	Pr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Ir	Br	TiO ₂
	Cl	SrO	Nd ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Pt	Ce ₂ O ₃	Os
	Na ₂ O	Y ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	MnO	Au	HfO ₂	Lu ₂ O ₃
	MgO	ZrO ₂	Eu ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CdO	Ta ₂ O ₅	SeO ₂
	Al ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	Gd ₂ O ₃	CoO	In ₂ O ₃	WO ₃	Glühverlust
	SiO ₂	MoO	Tb ₄ O ₇	NiO	SnO ₂	HgO	
	P ₂ O ₅	Ru	Dy ₂ O ₃	CuO	Sb ₂ O ₃	Tl ₂ O ₃	
	SO ₃	Rh	Ho ₂ O ₃	ZnO	TeO ₂	PbO	
	K ₂ O	Pd	Er ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃	I	Bi ₂ O ₃	
	CaO	Ag	Tm ₂ O ₃	GeO ₂	Cs ₂ O	ThO ₂	
	Sc ₂ O ₃	Re	Yb ₂ O ₃	As ₂ O ₃	BaO	U ₃ O ₈	

3.2.3 Eluatgehalte

Das Eluat wurde auf die in Tabelle 13 angeführten Parameter nach den aufgelisteten Verfahren untersucht.

Tabelle 13: Untersuchte Parameter im Eluat gemäß den aufgelisteten Verfahren

Gehalt im ELUAT (bei L/S 10)	Anorganische Stoffe	Parameter	Prüfverfahren
		Abdampfrückstand	DIN 38409-1:1987-01
		Elektrische Leitfähigkeit	DIN EN 27888:1993-11
		pH-Wert	ISO 10523:2008-12
		Aluminium (als Al)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01
		Ammonium (als N)	DIN 38406-5:1983-10 (photometrisches Verfahren)
		Antimon (als Sb)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Arsen (als As)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Barium (als Ba)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Beryllium (als Be)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Blei (als Pb)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Bor (als B)	ÖNORM EN ISO 11885:2009-11 (ICP-OES)
		Cadmium (als Cd)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Chlorid (als Cl)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)
		Chrom gesamt (als Cr)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Chrom VI (als Cr)	DIN 38405-24:1987-05 8 (photometrisches Verfahren)
		Cobalt (als Co)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01
Cyanide, gesamt (als CN)	EN ISO 14403-2 (CFA)		

		Cyanide, leicht freisetzbar (als CN)	EN ISO 14403-02 (CFA)
		Eisen, gesamt (als Fe)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Fluorid (als F)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)
		Gold (als Au)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Kupfer (als Cu)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Molybdän (als Mo)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Nickel (als Ni)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Nitrat (als N)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)
		Nitrit (als N)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)
		Phosphat (als P)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)
		Quecksilber (als Hg)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Selen (als Se)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Silber (als Ag)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Sulfat (als SO ₄)	DIN EN ISO 10304-1:2009-07 (IC)
		Thallium (als Tl)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Vanadium (als V)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Wolfram (als W)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Zink (als Zn)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Zinn (als Sn)	ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 (ICP-MS)
		Organische Summenparameter	Adsorbierbare org. gebundene Halogene
Anionenaktive Tenside (als MBAS)	ÖNORM EN 903:1994-03 (photometrisches Verfahren)		
Extrahierbare org. gebundene Halogene	ÖNORM M 6614		
KW-Index	EN ISO 9377-2 (GC)		
PAK (16 Verbindungen)	DIN 38407-39 (GC-MS)		
PAK (Benzo[a]pyren)	DIN 38407-39 (GC-MS)		
PCB (7 Verbindungen)	DIN 38407-3 (GC)		
Phenolindex	DIN 38409-16:1984-06		
	TOC (als C)	ÖNORM EN 1484:2019-04	

3.2.4 Rückstellproben

Die Untersuchung legte ihren Fokus darauf, die Repräsentativität der gezogenen Proben im Vergleich zu den bisher schon im Rahmen des FCC-Projektes gewonnenen Proben (Rückstellproben) zu überprüfen. In der Gesamtheit wurden acht Proben analysiert (vgl. Tabelle 8).

Für die Rückstellproben wurden folgende Probenvorbereitungen durchgeführt:

- Königswasseraufschluss gemäß ÖNORM EN 13657:2002-12,
- Totalaufschluss nach ÖNORM EN 13656:2021-05 (Verfahren B) und
- Eluat nach ÖNORM EN 12457-4:2003-01 (Abfall).

Folgende Elemente wurden sowohl im Feststoff als auch im Eluat nach ÖNORM EN ISO 17294-2:2017-01 mittels ICP-MS analysiert:

Aluminium, Antimon, Arsen, Barium, Beryllium, Blei, Cadmium, Calcium, Chrom gesamt, Cobalt, Eisen gesamt, Kalium, Kupfer, Lithium, Magnesium, Mangan, Molybdän, Natrium, Nickel, Palladium, Phosphor, Quecksilber, Selen, Silber, Silicium, Strontium, Tellur, Thallium, Titan, Vanadium, Wolfram, Zink und Zinn.

Ebenso wurden im Eluat Chlorid, Fluorid und Sulfat nach DIN EN ISO 10304-1:2009-07 analysiert. Im Eluat wurde der gesamte organisch gebundene Kohlenstoff gemäß ÖNORM EN 1484:2019-04 analysiert, während im Feststoff die Analyse nach ÖNORM EN 15936

durchgeführt wurde. Die elektrische Leitfähigkeit gemäß DIN EN 27888:1993-11 und der pH-Wert nach ISO 10523:2008-12 wurden ebenfalls im Eluat bestimmt.

3.2.5 Mineralogische Zusammensetzung der Proben (XRD-Analyse)

Im Jahr 2023 führte Frau Dipl.-Ing. Dr. Eva Wegerer, MBA, am Lehrstuhl für Erdölgeologie der Montanuniversität Leoben eine röntgendiffraktometrische Analyse (XRD) der Proben EHa1 und EHa2 durch. Das Hauptziel dieser Untersuchung bestand darin, die Mineralphasen qualitativ und semiquantitativ zu analysieren.

Die Probenaufbereitung beinhaltete die Homogenisierung des Gesteinsmaterials, woraufhin eine repräsentative Probenmenge entnommen wurde. Das bereits vorab vermahlene Gesteinsmaterial wurde mittels eines Achatmörser auf die erforderliche Feinheit reduziert. Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf eine schonende Behandlung gelegt, um mögliche Schäden am Kristallgitter zu vermeiden und damit eine Beeinträchtigung der Beugungsreflexe zu verhindern. Für die Bestimmung der Gesamtmineralogie wurden Pulverpräparate hergestellt, bei denen die Partikel in einem Stahlträger unorientiert angeordnet waren. Die Ermittlung der Gesamtmineralogie basierte auf diesen texturfreien Messungen. Zur detaillierten Analyse der Tonminerale wurden spezielle Texturpräparate auf Glaträgern erstellt (Wegerer, 2023).

Die XRD-Messungen wurden am Röntgendiffraktometer X'pert 3 powder (Panalytical) durchgeführt, wobei eine Kupfer-Anode für die niederenergetische Röntgenstrahlung genutzt wurde. Fünf verschiedene Analysen wurden pro Probe durchgeführt, darunter die Messung des texturfreien Präparats, des Texturpräparats, der Ethylenglykol-behandelten Probe sowie Messungen nach thermischer Behandlung bei 350°C und 550°C (Wegerer, 2023).

Die qualitative Analyse basierte auf der visuellen Auswertung des Diffraktogramms und dem Vergleich mit der Referenzdatenbank ICDD (International Centre for Diffraction Data). Zur Validierung wurden die Ergebnisse durch die ADM Software (Version 7, Wassermann Röntgenanalytik) überprüft (Wegerer, 2023).

4 Ergebnisse und Bewertung

4.1 Ergebnisse der chemischen Analysen

Im nachfolgenden sind die Ergebnisse der chemischen Analysen dargestellt, wobei die Ergebnisse wie folgt strukturiert werden:

1. Gesamtgehalte Teil I (Metalle nach Königswasseraufschluss) der zwei qualifizierten Stichproben (Tabelle 14),
2. Gesamtgehalte Teil II (Metalle nach Totalaufschluss) der zwei qualifizierten Stichproben (Tabelle 15),
 - a. Metalle nach RFA (Tabelle 16),
3. Eluatgehalte der zwei qualifizierten Stichproben (Tabelle 17),
4. Gesamt- und Eluatgehalte der Rückstellproben (Tabelle 18) und
5. Mineralogische Zusammensetzung der Proben (XRD-Analyse) (Tabelle 19).

In der nachfolgenden Tabelle 14 werden die Ergebnisse der Untersuchungen Gesamtgehalte Teil I (Metalle nach Königswasseraufschluss) der zwei qualifizierten Stichproben aufgelistet.

Tabelle 14: Gesamtgehalte Teil I (Metalle nach Königswasseraufschluss) der zwei qualifizierten Stichproben.

Parameter		Ergebnisse		Einheit	
		qSTP1	qSTP2		
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Anorganische Stoffe	Antimon (als Sb)	0,26	0,23	[mg/kg]
		Arsen (als As)	3,8	3,9	[mg/kg]
		Barium (als Ba)	61	58	[mg/kg]
		Blei (als Pb)	13	13	[mg/kg]
		Cadmium (als Cd)	0,1	< 0,10	[mg/kg]
		Chrom gesamt (als Cr)	200	200	[mg/kg]
		Chrom VI (als Cr)	< 0,2	< 0,2	[mg/kg]
		Cobalt (als Co)	20	20	[mg/kg]
		Gold (als Au)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]
		Kupfer (als Cu)	43	30	[mg/kg]
		Molybdän (als Mo)	0,28	0,25	[mg/kg]
		Nickel (als Ni)	220	210	[mg/kg]
		Quecksilber (als Hg)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]
		Selen (als Se)	3,6	3,6	[mg/kg]
		Silber (als Ag)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]
		Thallium (als Tl)	0,19	0,19	[mg/kg]
		Vanadium (als V)	50	49	[mg/kg]
		Wolfram (als W)	0,31	0,14	[mg/kg]
		Zink (als Zn)	97	75	[mg/kg]
		Zinn (als Sn)	1,3	0,92	[mg/kg]
	Organische Summenparameter	Ausblasbare org. gebundene Halogene	<0,05	<0,05	[mg/kg]
		KW-Index	150	94	[mg/kg]
		PAK (16 Verbindungen nach EPA)	0,057	<0,026	[mg/kg]
		PAK (Benzo[a]pyren)	<0,026	<0,026	[mg/kg]
		PCB (7 Verbindungen)	0,027	<0,010	[mg/kg]
		Summe der flüchtigen aromatischen KW	<0,052	<0,051	[mg/kg]
		TOC (als C)	< 0,100	< 0,100	[%-C]

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Gesamtgehalten Teil II (Metalle nach Totalaufschluss) der zwei qualifizierten Stichproben aufgeführt.

Tabelle 15: Gesamtgehalten Teil II (Metalle nach Totalaufschluss) der zwei qualifizierten Stichproben.

	Element	Ergebnisse		Einheit
		qSTP1	qSTP2	
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalten)	Ag (Silber)	< 0,25	< 0,25	[mg/kg]
	Al (Aluminium)	57900	56600	[mg/kg]
	As (Arsen)	5,7	6,1	[mg/kg]
	Ba (Barium)	290	280	[mg/kg]
	Be (Beryllium)	< 2,5	< 2,5	[mg/kg]
	Ca (Calcium)	76700	73900	[mg/kg]
	Cd (Cadmium)	< 0,25	< 0,25	[mg/kg]
	Co (Cobalt)	20	20	[mg/kg]
	Cr (Chrom)	270	260	[mg/kg]
	Cu (Kupfer)	30	29	[mg/kg]
	Fe (Eisen)	33500	33300	[mg/kg]
	Hg (Quecksilber)	< 0,25	< 0,25	[mg/kg]
	K (Kalium)	15800	15300	[mg/kg]
	Li (Lithium)	38	38	[mg/kg]
	Mg (Magnesium)	31800	31100	[mg/kg]
	Mo (Molybdän)	0,39	0,26	[mg/kg]
	N (Stickstoff)	300	300	[mg/kg]
	Na (Natrium)	7150	6930	[mg/kg]
	Ni (Nickel)	200	200	[mg/kg]
	P (Phosphor)	410	420	[mg/kg]
	Pb (Blei)	13	13	[mg/kg]
	Pd (Palladium)	< 0,25	< 0,25	[mg/kg]
	S (Schwefel)	320 (0,08% SO ₃)	350 (0,0875% SO ₃)	[mg/kg]
	Sb (Antimon)	0,5	0,47	[mg/kg]
	Se (Selen)	4,6	4,1	[mg/kg]
	Si (Silizium)	230000	232000	[mg/kg]
	Sn (Zinn)	2,4	2,4	[mg/kg]
	Sr (Strontium)	500	500	[mg/kg]
	Te (Tellur)	< 0,50	< 0,50	[mg/kg]
	Ti (Titan)	2770	2730	[mg/kg]
Tl (Thallium)	0,45	0,45	[mg/kg]	
V (Vanadium)	82	82	[mg/kg]	
W (Wolfram)	1,3	1,2	[mg/kg]	
Zn (Zink)	77	72	[mg/kg]	

In Tabelle 16 sind die aufgelisteten Parameter aus der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) aufgeführt, bei denen ein Wert über 0,025 M- [%] festgestellt wurde.

Die Ergebnisse für folgende Parameter lagen unter 0,025 M- [%]: F; Cl; Sc₂O₃; V₂O₅; CoO; CuO; ZnO; Ga₂O₃; GeO₂; As₂O₃; SeO₂; Br; Rb₂O; Y₂O₃; ZrO₂; Nb₂O₅; MoO; Ru; Rh; Pd; Ag; Re; Os; Ir; Pt; Au; CdO; In₂O₃; SnO₂; Sb₂O₃; TeO₂; I; Cs₂O; BaO; La₂O₃; Ce₂O₃; Pr₂O₃; Nd₂O₃; Sm₂O₃; Eu₂O₃; Gd₂O₃; Tb₄O₇; Dy₂O₃; Ho₂O₃; Er₂O₃; Tm₂O₃; Yb₂O₃; Lu₂O₃; HfO₂; Ta₂O₅; WO₃; HgO; Tl₂O₃; PbO; Bi₂O₃; ThO₂; U₃O₈.

Tabelle 16: Metalle nach RFA.

Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Parameter	Ergebnisse		Einheit
		qSTP1	qSTP2	
	Na ₂ O	0,98	0,94	MA- [%]
	MgO	7,31	7,38	MA- [%]
	Al ₂ O ₃	10,90	11,31	MA- [%]
	SiO ₂	46,68	46,39	MA- [%]
	P ₂ O ₅	0,093	0,097	MA- [%]
	SO ₃	0,14	0,13	MA- [%]
	K ₂ O	1,94	2,01	MA- [%]
	CaO	12,22	11,95	MA- [%]
	TiO ₂	0,453	0,462	MA- [%]
	Cr ₂ O ₃	0,044	0,052	MA- [%]
	MnO	0,112	0,114	MA- [%]
	Fe ₂ O ₃	5,16	5,38	MA- [%]
	NiO	0,031	0,034	MA- [%]
	SrO	0,048	0,050	MA- [%]
	Glühverlust	13,84	13,66	MA- [%]

In der nachfolgenden Tabelle 17 werden die Ergebnisse der Untersuchungen Eluatgehalte der zwei qualifizierten Stichproben aufgelistet.

Tabelle 17: Eluatgehalte der zwei qualifizierten Stichproben.

Gehalt im ELUAT (bei L/S 10)	Parameter	Ergebnisse		Einheit
		qSTP1	qSTP2	
Anorganische Stoffe	Abdampfrückstand	2600	2500	[mg/kg]
	Elektrische Leitfähigkeit	30	30	[mS/m]
	pH-Wert	9,9	9,9	[-]
	Aluminium (als Al)	49	34	[mg/kg]
	Ammonium (als N)	2,4	1,3	[mg/kg]
	Antimon (als Sb)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]
	Arsen (als As)	0,13	0,14	[mg/kg]
	Barium (als Ba)	0,24	1,2	[mg/kg]
	Beryllium (als Be)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]
	Blei (als Pb)	0,24	0,13	[mg/kg]
	Bor (als B)	< 50	< 50	[mg/kg]
	Cadmium (als Cd)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]
	Chlorid (als Cl)	17	13	[mg/kg]
	Chrom gesamt (als Cr)	0,38	0,32	[mg/kg]
	Chrom VI (als Cr)	< 0,5	< 0,5	[mg/kg]
	Cobalt (als Co)	0,034	0,027	[mg/kg]
	Cyanide, gesamt (als CN)	0,289	1,37	[mg/kg]
	Cyanide, leicht freisetzbar (als CN)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]
	Eisen, gesamt (als Fe)	41	29	[mg/kg]
	Fluorid (als F)	7	5,6	[mg/kg]
	Gold (als Au)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]
	Kupfer (als Cu)	0,28	0,27	[mg/kg]
	Molybdän (als Mo)	0,012	0,012	[mg/kg]
Nickel (als Ni)	0,31	0,23	[mg/kg]	
Nitrat (als N)	1,8	1,4	[mg/kg]	
Nitrit (als N)	< 1,6	< 1,6	[mg/kg]	
Phosphat (als P)	< 1,7	< 1,7	[mg/kg]	
Quecksilber (als Hg)	0,025	< 0,010	[mg/kg]	
Selen (als Se)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	

Parameter		Ergebnisse		Einheit
		qSTP1	qSTP2	
Organische Summenparameter	Silber (als Ag)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]
	Sulfat (als SO ₄)	570	560	[mg/kg]
	Thallium (als Tl)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]
	Vanadium (als V)	0,72	0,78	[mg/kg]
	Wolfram (als W)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]
	Zink (als Zn)	0,29	0,25	[mg/kg]
	Zinn (als Sn)	< 0,020	0,27	[mg/kg]
	Adsorbierbare org. gebundene Halogene	< 0,200	< 0,200	[mg/kg]
	Anionenaktive Tenside (als MBAS)	< 1	< 1	[mg/kg]
	Extrahierbare org. gebundene Halogene	< 0,100	< 0,100	[mg/kg]
	KW-Index	0,64	0,88	[mg/kg]
	PAK (16 Verbindungen)	0,00034	< 0,00010	[mg/kg]
	PAK (Benzo[a]pyren)	< 0,00010	0,00052	[mg/kg]
	PCB (7 Verbindungen)	< 0,00010	< 0,00010	[mg/kg]
	Phenolindex	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]
	TOC (als C)	106	117	[mg/kg]

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Gesamt- und Eluatgehalten für sämtliche Rückstellproben aufgelistet.

Tabelle 18: Gesamt- und Eluatgehalte der Rückstellproben (Köwa = Königswasseraufschluss, Total = Totalaufschluss).

Parameter	Ergebnisse												Einheit
	1415-23			1416-23			1417-23			1418-23			
	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	
Elektrische Leitfähigkeit	17,7	-	-	29,5	-	-	18,9	-	-	19,8	-	-	[mS/m]
pH-Wert	8,7	-	-	10,1	-	-	9,5	-	-	10	-	-	[-]
Aluminium (als Al)	4,4	21000	41200	19	33800	46000	54	12600	37200	14	16100	35500	[mg/kg]
Antimon (als Sb)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	0,014	< 1,0	< 2,5	0,01	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Arsen (als As)	0,11	< 10	< 25	0,23	10	< 25	0,11	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	[mg/kg]
Barium (als Ba)	0,038	75	430	0,4	120	310	0,49	43	250	0,28	74	240	[mg/kg]
Beryllium (als Be)	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	0,13	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	[mg/kg]
Blei (als Pb)	0,016	10	13	0,038	24	26	0,22	7,9	11	0,054	9,2	11	[mg/kg]
Cadmium (als Cd)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Calcium (als Ca)	72	73600	76300	42	49500	43100	60	84500	64400	40	100000	104000	[mg/kg]
Chlorid (als Cl)	< 10	-	-	42	-	-	< 10	-	-	10	-	-	[mg/kg]
Chrom gesamt (als Cr)	0,053	140	210	0,15	150	190	1,1	200	280	0,34	140	200	[mg/kg]
Cobalt (als Co)	< 0,020	19	18	0,88	22	21	0,07	20	20	5,1	18	16	[mg/kg]
Eisen, gesamt (als Fe)	4,2	25800	27400	19	46500	45200	110	24800	26200	24	21900	22700	[mg/kg]
Fluorid (als F)	< 5,0	-	-	5,4	-	-	< 5,0	-	-	< 5,0	-	-	[mg/kg]
Kalium (als K)	30	4840	15000	22	10900	17200	22	1630	9530	15	3350	9520	[mg/kg]
Kupfer (als Cu)	0,022	25	26	0,39	41	43	0,13	15	14	1,8	24	22	[mg/kg]
Lithium (als Li)	0,02	29	38	0,078	40	40	0,096	21	21	0,14	28	26	[mg/kg]
Magnesium (als Mg)	30	20700	21300	19	19200	13600	100	28000	29100	30	23900	24300	[mg/kg]
Mangan (als Mn)	0,05	790	790	0,66	660	680	1,6	740	750	2,7	1350	1380	[mg/kg]
Molybdän (als Mo)	0,011	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	0,031	< 1,0	< 2,5	0,012	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Natrium (als Na)	170	660	10100	550	1460	4390	320	520	7070	320	740	6080	[mg/kg]
Nickel (als Ni)	0,046	140	140	0,49	160	150	0,89	210	200	2,1	140	130	[mg/kg]
Palladium (als Pd)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Phosphat (als P)	< 0,10	400	440	1,7	230	210	0,44	190	140	0,07	490	410	[mg/kg]
Quecksilber (als Hg)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Selen (als Se)	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	[mg/kg]

Parameter	Ergebnisse												Einheit
	1415-23			1416-23			1417-23			1418-23			
	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	
Silber (als Ag)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Silicium (als Si)	30	340	214000	89	380	163000	170	260	180000	60	190	158000	[mg/kg]
Strontium (als Sr)	2,9	290	330	1,2	34	370	1,1	260	310	0,86	390	410	[mg/kg]
Sulfat (als SO ₄)	150	-	-	79	-	-	38	-	-	47	-	-	[mg/kg]
Tellur (als Te)	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	[mg/kg]
Thallium (als Tl)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Titan (als Ti)	0,026	300	2670	0,14	370	3070	0,33	250	1680	0,4	280	2190	[mg/kg]
Vanadium (als V)	0,27	46	74	0,22	57	100	0,4	29	51	0,43	36	54	[mg/kg]
Wolfram (als W)	< 0,010	20	35	< 0,010	< 1,0	3	< 0,010	26	39	< 0,010	22	36	[mg/kg]
Zink (als Zn)	< 0,10	73	72	1,6	100	93	0,6	50	47	0,29	56	53	[mg/kg]
Zinn (als Sn)	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	[mg/kg]
TOC (als C)	196	0,248	-	222	0,343	-	296	1,42	-	148	0,267	-	[mg/kg]

Parameter	Ergebnisse												Einheit
	1419-23			1420-23			1421-23			1422-23			
	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	
Elektrische Leitfähigkeit	29,9	-	-	28,2	-	-	32	-	-	27,7	-	-	[mS/m]
pH-Wert	10,1	-	-	10	-	-	10,2	-	-	9,8	-	-	[-]
Aluminium (als Al)	150	14500	42400	130	13400	37500	130	22000	49900	170	14500	38000	[mg/kg]
Antimon (als Sb)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Arsen (als As)	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	0,16	< 10	< 25	[mg/kg]
Barium (als Ba)	0,5	21	220	1,5	40	270	0,51	51	260	0,46	24	220	[mg/kg]
Beryllium (als Be)	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	[mg/kg]
Blei (als Pb)	0,14	11	12	0,16	6,0	9,7	0,26	16	17	0,14	7,9	9,7	[mg/kg]
Cadmium (als Cd)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Calcium (als Ca)	150	91100	85200	260	101000	92700	110	89400	82000	150	92700	86700	[mg/kg]
Chlorid (als Cl)	14	-	-	11	-	-	15	-	-	< 10	-	-	[mg/kg]
Chrom gesamt (als Cr)	2,2	120	160	1,4	120,0	220	1,4	120	150	3,2	170	230	[mg/kg]
Cobalt (als Co)	0,41	80	50	0,61	160	130	0,26	38	30	0,19	21	17	[mg/kg]
Eisen, gesamt (als Fe)	240	30800	31600	110	17900	20300	170	30200	32100	290	26200	27200	[mg/kg]

Parameter	Ergebnisse												Einheit
	1419-23			1420-23			1421-23			1422-23			
	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	Eluat	Köwa	Total	
Fluorid (als F)	< 5,0	-	-	< 5,0	-	-	< 5,0	-	-	< 5,0	-	-	[mg/kg]
Kalium (als K)	26	1560	10500	33	1870	10400	29	4720	13600	24	1790	9130	[mg/kg]
Kupfer (als Cu)	0,21	55	26	0,55	54	44	0,83	45	35	0,47	20	18	[mg/kg]
Lithium (als Li)	0,14	31	26	0,24	37	31	0,13	31	30	0,2	19	18	[mg/kg]
Magnesium (als Mg)	360	22500	23500	120	14800	16300	210	24000	25500	300	20900	21600	[mg/kg]
Mangan (als Mn)	2,5	890	850	2,2	730	770	1,8	840	820	8,8	860	850	[mg/kg]
Molybdän (als Mo)	0,012	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	0,012	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Natrium (als Na)	470	770	5490	510	760,0	6310	520	1230	4450	380	630	6690	[mg/kg]
Nickel (als Ni)	1,9	160	130	0,94	170,0	110	1,7	140	130	1,6	130	120	[mg/kg]
Palladium (als Pd)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Phosphat (als P)	0,87	380	320	1,0	420	340	1,8	300	230	1,8	440	360	[mg/kg]
Quecksilber (als Hg)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Selen (als Se)	< 0,10	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	0,11	< 10	< 25	< 0,10	< 10	< 25	[mg/kg]
Silber (als Ag)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Silicium (als Si)	550	77	157000	310	250	170000	330	310	147000	510	500	171000	[mg/kg]
Strontium (als Sr)	2,8	310	320	6,3	420	450	2,9	370	380	2,3	300	320	[mg/kg]
Sulfat (als SO ₄)	390	-	-	58	-	-	200	-	-	190	-	-	[mg/kg]
Tellur (als Te)	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	[mg/kg]
Thallium (als Tl)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Titan (als Ti)	0,25	170	2210	0,14	220	2250	0,07	220	2700	0,14	340	2250	[mg/kg]
Vanadium (als V)	1,2	31	65	1	34	56	1,1	47	84	1,8	44	65	[mg/kg]
Wolfram (als W)	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	< 2,5	< 0,010	< 1,0	3,9	< 0,010	< 1,0	< 2,5	[mg/kg]
Zink (als Zn)	0,57	69	73	0,53	51	48	0,75	86	76	0,60	55	51	[mg/kg]
Zinn (als Sn)	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	< 0,020	< 2,0	< 5,0	[mg/kg]
TOC (als C)	18,1	0,133	-	326	0,139	-	20,6	0,151	-	38,9	0,230	-	[mg/kg]

In der nachfolgenden Tabelle 19 werden die Ergebnisse der mineralogischen Zusammensetzung dargestellt.

Tabelle 19: Mineralogische Zusammensetzung der Proben (XRD-Analyse) (Bericht von Dipl.-Ing. Dr. Eva Wegerer, MBA).

Mineralphase	Chemische Formel	Ergebnisse		Einheit
		qSTP1	qSTP2	
Quarz	SiO ₂	12	10	[%]
Calcit	CaCO ₃	23	16	[%]
Dolomit	CaMg(CO ₃) ₂	11	10	[%]
Plagioklas (Albit)	NaAlSi ₃ O ₈	15	9	[%]
Kalifeldspat (Mikroclin)	KAlSi ₃ O ₈	4	4	[%]
Glimmer-Gruppe (Muskovit/Illit)	KAl ₂ [(OH,F) ₂ AlSi ₃ O ₁₀]	16	22	[%]
Chlorit	(Fe,Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH)	11	16	[%]
Corrensit	(Ca,Na,K)(Mg,Fe,Al) ₉ (Si,Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₁₀ ·nH ₂ O	8	13	[%]

4.2 Bewertung des Tunnelausbruchsmaterials hinsichtlich Entsorgung- und Verwertungsmöglichkeiten

Die Abbildung 14 veranschaulicht die systematische Herangehensweise an die Untersuchung von Tunnelausbruchsmaterial, beginnend mit der Literaturrecherche über die Anwendung in verschiedenen Branchen bis zur detaillierten Analyse von chemischen und mineralogischen Eigenschaften im Kontext gesetzlicher Vorgaben und branchenspezifischer Spezifikationen. In den anschließenden Unterkapiteln werden verschiedene Branchen näher betrachtet.

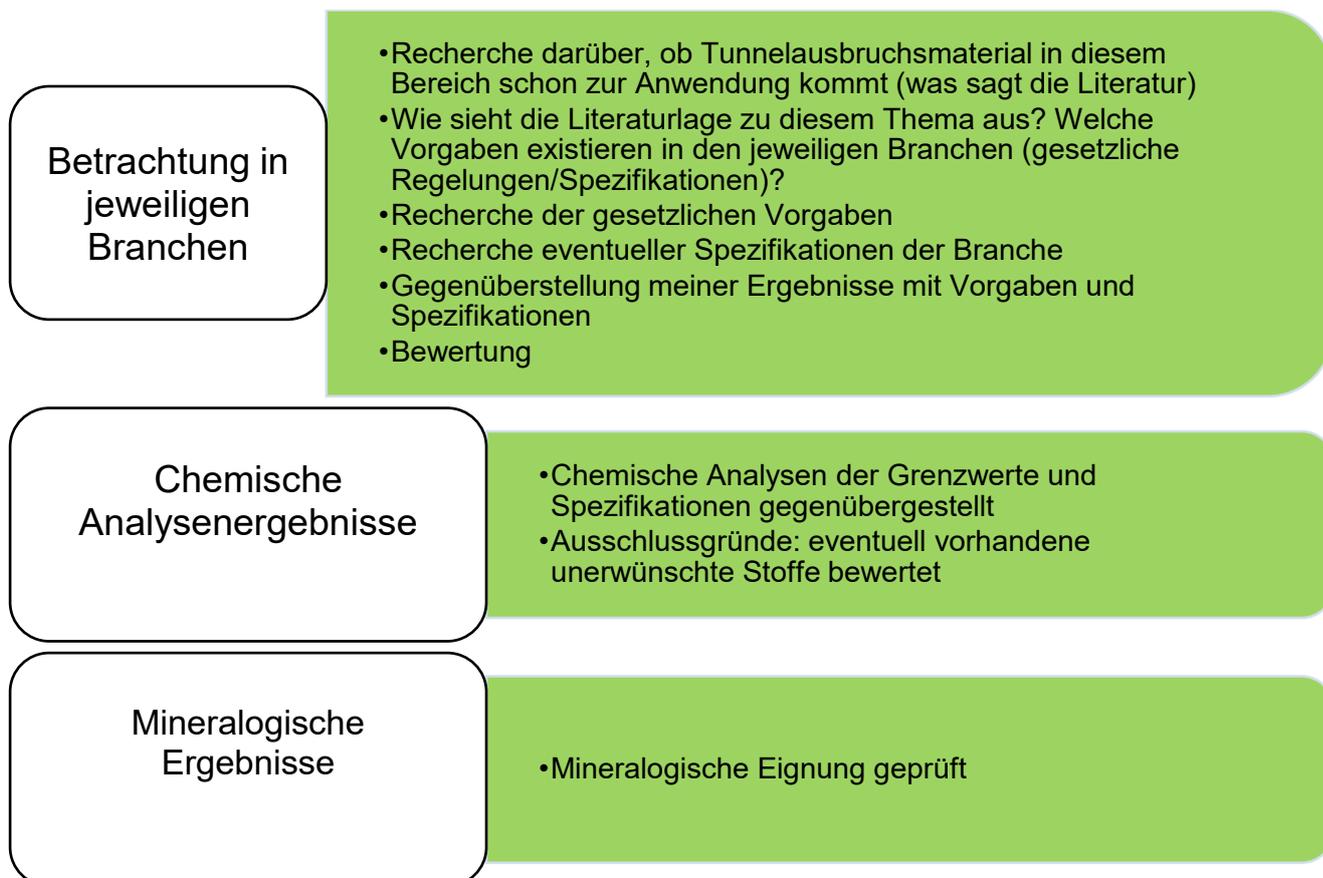


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Untersuchung von Tunnelausbruchsmaterial.

4.2.1 Zementindustrie

Das Ausbruchsmaterial, von dem etwa 9 Millionen m³ erwartet werden, besteht zu 95 % aus Molassematerial des Genfer Beckens, hauptsächlich bestehend aus Mergel und Sandstein, sowie zu 5 % aus Kalkstein (Abada et al., 2019).

Das vorliegende Molassematerial besteht aus verschiedenen Komponenten, darunter Quarz, Silikate und Tonmineralen. Diese Zusammensetzung wurde durch eine XRD-Analyse (vgl. Tabelle 19) bestätigt. Basierend auf dieser Erkenntnis scheint es wahrscheinlich, dass die Hauptbestandteile dieses Materials, nämlich Calciumdioxid CaO, Siliciumdioxid (Kieselsäure) SiO₂, Aluminiumdioxid (Tonerde) Al₂O₃ und Eisenoxid Fe₂O₃, für die Zementindustrie relevante Rohstoffe darstellen.

Das vorliegende Dreistoffdiagramm (Abbildung 15) wurde aus dem Technischen Bericht A-2015/0117-2 der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VDZ) aus dem Jahr 2015 entnommen und um die Ergebnisse der beiden Tunnelausbruchspröben qSTP1 und

qSTP2 ergänzt. Vor der Darstellung im Diagramm wurden die Werte auf 100 normalisiert (Tabelle 20). In der Grafik sind die untersuchten Proben durch blaue Kreise gekennzeichnet.

Tabelle 20: Auf 100 normalisierte RFA-Werte.

Parameter	qSTP1	auf 100 % normalisiert [%]	qSTP2	auf 100 % normalisiert [%]
SiO ₂	46,7	62,3	46,4	61,8
CaO	12,2	16,3	12,0	15,9
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	16,1	21,5	16,7	22,2
Summe	75,0	100,0	75,0	100,0

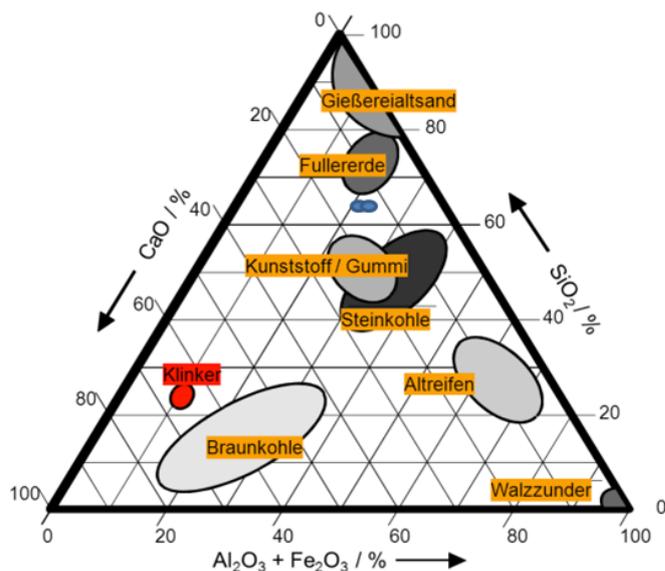


Abbildung 15: Darstellung des Dreistoffdiagramms für die Hauptkomponenten des Zementklinkers sowie der Aschezusammensetzung ausgewählter Brennstoffe, alternativer Rohstoffe und der beiden Tunnelausbruchproben qSTP1 und qSTP2 (dargestellt in blau) (VDZ, 2015).

Gemäß den Richtlinien für Ersatzrohstoffe ist eine Analyse (Totalaufschluss), erforderlich, um festzustellen, ob das vorliegende Material in der Zementindustrie theoretisch verwendet werden kann und ob die geltenden Grenzwerte eingehalten werden. Die durchgeführten Analysen wurden mit den in Österreich als auch den in der Schweiz geltenden Vorgaben verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Länder die Grenzwerte einhalten, mit Ausnahme des Schweizer Richtwertes für alternative Rohstoffe für die Elemente Chrom und Nickel. Dies stellt eine ideale Voraussetzung dar. In der beigefügten Tabelle (Tabelle 21) finden Sie die Ergebnisse des Totalaufschlusses, einschließlich der entsprechenden Grenzwerte, die für die Zementproduktion gelten.

Tabelle 21: Ergebnisse des Totalaufschlusses und zugehörige Grenzwerte in der Zementindustrie in Österreich und der Schweiz (k. R. = kein Richtwert).

Grenzwerte für Ersatzrohstoffe				Richtwerte für max. Schadstoffgehalte gemäß der Zementrichtlinie [REA 05]				Totalaufschluss		
Parameter	Österreich			Schweiz				Ergebnisse		
	Ersatzrohstoffe	Vorsorge-Richtwerte in ZEMENT	Einheit	Alternative Rohstoffe	Klinker	Zement	Einheit	qSTP1	qSTP2	Einheit
Sb	30	15	[mg/kg]	5	10	k. R.	[mg/kg]	0,5	0,47	[mg/kg]
As	30	15	[mg/kg]	20	40	k. R.	[mg/kg]	5,7	6,1	[mg/kg]
Ba	k. R.	k. R.	[mg/kg]	600	1000	k. R.	[mg/kg]	-	-	[mg/kg]
Be	k. R.	k. R.	[mg/kg]	3	5	k. R.	[mg/kg]	-	-	[mg/kg]
Pb	500	200	[mg/kg]	50	100	k. R.	[mg/kg]	13	13	[mg/kg]
Cd	5	4	[mg/kg]	0,8	1,5	1,5	[mg/kg]	< 0,25	< 0,25	[mg/kg]
Cr	500	300	[mg/kg]	100	150	k. R.	[mg/kg]	270	260	[mg/kg]
Co	250	50	[mg/kg]	30	50	k. R.	[mg/kg]	20	20	[mg/kg]
Cu	k. R.	k. R.	[mg/kg]	100	100	k. R.	[mg/kg]	30	29	[mg/kg]
Ni	500	200	[mg/kg]	100	100	k. R.	[mg/kg]	200	200	[mg/kg]
Hg	0,7	0,5	[mg/kg]	0,5	k. R.	0,5	[mg/kg]	< 0,25	< 0,25	[mg/kg]
Se	k. R.	k. R.	[mg/kg]	1	5	k. R.	[mg/kg]	-	-	[mg/kg]
Tl	3	2	[mg/kg]	1	2	2	[mg/kg]	0,45	0,45	[mg/kg]
V	k. R.	k. R.	[mg/kg]	200		k. R.	[mg/kg]	82	82	[mg/kg]
Zn	k. R.	k. R.	[mg/kg]	400	500	k. R.	[mg/kg]	77	72	[mg/kg]
Sn	k. R.	k. R.	[mg/kg]	50	25	k. R.	[mg/kg]	2,4	2,4	[mg/kg]
Cl (anorg.)	k. R.	k. R.	[mg/kg]	k. R.	k. R.	1000	[mg/kg]	-	-	[mg/kg]
S	k. R.	k. R.	[mg/kg]	k. R.	k. R.	3,5 % SO ₃	[mg/kg]	320 (0,08% SO ₃)	350 (0,0875% SO ₃)	[mg/kg]

Kalkmergel, das aus Kalkstein und Ton im Verhältnis 2:1 besteht. Dieses Gemisch wird zunächst abgebaut, indem es gesprengt oder gebrochen und dann zu Schotter gemahlen wird (Bauer et al., 2021).

Dabei basiert die Herstellung von Zement auf Rohstoffen, die die wesentlichen Bestandteile des Zements - nämlich CaO (Kalziumoxid), SiO_2 (Siliziumdioxid), Al_2O_3 (Aluminiumoxid) und Fe_2O_3 (Eisenoxid) – enthalten, welche genau die Bestandteile sind, die auch im untersuchten Tunnelausbruchmaterial aus Molasse in großen Mengen vorhanden sind. Typischerweise werden Kalkstein und Ton bzw. Kalkmergel als Hauptrohstoffe verwendet. Interessanterweise können neben Kalkstein auch Kreide als Kalkkomponente und neben Ton auch Tonschiefer als Tonkomponente in den Herstellungsprozess einfließen. Besonders bemerkenswert ist die Verwendung von Mergel als Zementrohstoff, da er bereits von Natur aus eine Mischung aus Ton- und Kalkkomponenten darstellt (Stark und Wicht, 2000).

2. **Rohmaterialaufbereitung:** Anschließend durchläuft es eine Homogenisierungsphase in einem Mischbett, gefolgt von Trocknung und Mahlen, um Rohmehl zu erzeugen. Um die genaue Zusammensetzung sicherzustellen, werden Korrekturmaterialien hinzugefügt. Diese Materialien wie Sand, Löß und Eisenoxid werden verwendet, um das Verhältnis von Siliziumdioxid (SiO_2) zu Tonerde (Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3) innerhalb enger Grenzen zu kontrollieren (Bauer et al., 2021).
3. **Brennvorgang:** Der Brennvorgang erfolgt in zwei Hauptphasen, der Entsäuerung (Calcinierung) und der Sinterung
 - a) **Entsäuerung:** Im Wärmetauscherturm, genannt Vorwärmer oder Calcinator, wird das Rohmehl auf Temperaturen zwischen 900 und 1.100°C erhitzt. Ab 850°C erfolgt diese Reaktion: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
[Kalkstein -> Calciumoxid (Brannkalk) + Kohlendioxid]
Dieser Vorgang wird als Entsäuerung genannt, bei dem etwa 340 kg CO_2 pro Tonne Rohmehl entweichen.
 - b) **Sinterung:** Der entscheidende Schritt in diesem Prozess ist das Brennen im Drehrohrofen. Die Sinterung findet bei Temperaturen von etwa 1450°C statt, wodurch die Klinkerminerale entstehen. Danach wird der Klinker in Form von rundlichen Granulen mit einem Durchmesser von bis zu 3 cm aus dem Ofen ausgetragen.
Nach der Erhärtung des Zements durch die fortgesetzten Hydratationsreaktionen erfolgt das Abkühlen auf etwa 100°C-300°C, obwohl die Ofenausgangstemperatur weit über 1450°C liegt. Zu diesem Zeitpunkt hat der Zement die Form von Zementstein angenommen, der in der Bauindustrie vielfältig eingesetzt wird und die Grundlage für robuste und dauerhafte Baumaterialien bildet (Bauer et al., 2021).
4. **Mahlung von Zement:** In der Zementproduktion wird der Zementklinker zusammen mit weiteren Hauptbestandteilen wie Hüttsand, Flugasche, Kalkstein und gegebenenfalls getemperten Tonen vermahlen. Dieser Schritt dient dazu, die Erstarrungseigenschaften des Zements zu steuern. Um den Erstarrungsprozess zu regulieren, wird dem zerkleinerten Material Gipsstein oder ein Gemisch aus Gips und Anhydrit hinzugefügt (Bauer et al., 2021). In den letzten Jahren hat sich der Einsatz von Gips aus den Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kohlekraftwerken, auch als "REA-Gips" bezeichnet, in der Zementproduktion zunehmend verbreitet, anstelle von Naturgips (Reiter und Stroh, 1995).
5. **Lagerung/Vertrieb:** Zement durchläuft strenge Qualitätskontrollen während der Herstellung und wird regelmäßig in werkseigenen Labors überprüft. Externe Stellen

entnehmen Stichproben zur Fremdüberwachung. Der fertige Zement wird in Silos oder 25-kg-Säcken verpackt, wobei moderne, nahezu staubfreie Verfahren eingesetzt werden. Informationen wie Normenbezeichnungen und Sicherheitshinweise sind auf den Verpackungen vermerkt (Bauer et al., 2021).

Ersatzrohstoffe bzw. Zuzugstoffe

Alternative Rohstoffe für die Zementproduktion lassen sich aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung in verschiedene Gruppen unterteilen, wie im Technischen Bericht A-2015/0117-2 der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VDZ) erläutert. Diese Gruppen sind nach dem vorherrschenden chemischen Element benannt, das in diesen alternativen Rohstoffen in signifikanten Mengen vorhanden ist und in der Zusammensetzung der Rohmaterialmischung dominiert. Die verschiedenen Gruppen von alternativen Rohstoffen sind:

1. **Ca-Gruppe:** Enthält alternative Rohstoffe wie Industriekalk, Kalkschlämme, Karbidschlamm und Trinkwasserschlamm.
2. **Si-Gruppe:** Diese Gruppe umfasst alternative Rohstoffe wie Gießereialsande, Chromsand, Microsilica, Kieselsäure- und Quarzabfälle sowie Sandfangrückstände.
3. **Fe-Gruppe:** Enthält alternative Rohstoffe wie Kiesabbrand, Hämatit, Rotschlamm, Zinnschlacke, Konverterschlacke und Walzzunder.
4. **Si-Al-Ca-Gruppe:** Zu dieser Gruppe gehören alternative Rohstoffe wie Flugaschen, Aschen aus der Wirbelschicht, Schlacken, Brechsande, Reststoffe aus der Aufbereitung von Natursteinen, Bleicherde, verunreinigte Böden und Aluminiumoxidschlämme.
5. **S-Gruppe:** Enthält alternative Rohstoffe wie REA-Gips und Chemiegips.
6. **F-Gruppe:** Diese Gruppe umfasst alternative Rohstoffe wie CaF_2 -Filterschlämme.

Andererseits laut Stark und Wicht (2000) werden diese Materialien je nach ihren Eigenschaften in folgende Kategorien unterteilt:

1. Latent-hydraulische Stoffe:
 - a. Granulierte Hochofenschlacke (auch als Hüttensand bekannt)
2. Puzzolanische Stoffe:
 - a. Natürliche Puzzolane, darunter Aschen und Gesteine vulkanischen Ursprungs
3. Künstliche Puzzolane:
 - a. Flugaschen, einschließlich Steinkohlenflugasche und Braunkohlenflugasche
 - b. Silicastaub (Microsilica)
 - c. Gebrannter gemahlener Ton
 - d. Ölschieferasche (Rückstände aus der Verbrennung von Ölschiefer)
4. Inerte Stoffe:
 - a. Gesteinsmehle, wie Kalksteinmehl und Augitporphyrit (aus der Diorit-Gruppe)

Diese Materialien werden in verschiedenen Stadien des Zementherstellungsprozesses eingesetzt, um die gewünschten Eigenschaften und Qualitäten des Endprodukts zu erzielen (Stark und Wicht, 2000).

In den Situationen, in denen die chemische Zusammensetzung der verwendeten Rohstoffe nicht den erforderlichen Anforderungen entspricht, werden Korrekturkomponenten hinzugefügt, um die Rohmischung anzupassen. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Sand als Korrekturkomponente, wenn der SiO_2 -Gehalt der Rohstoffe zu niedrig ist. Bei einem Mangel an Fe_2O_3 kann Kieselsäureabfall eingesetzt werden, der bei der Verarbeitung von Eisensulfid anfällt. Dieser Prozess gewährleistet, dass die Rohstoffzusammensetzung den Qualitätsstandards für die Zementproduktion entspricht (Stark und Wicht, 2000).

In der österreichischen Zementindustrie wurden im Jahr 1993 verschiedene Sekundärrohstoffe, die auch als Ersatzrohstoffe bezeichnet werden, verwendet. Dazu gehörten Gießereialsande, LD-Schlacke und weitere Materialien. Ebenso wurden

Sekundärzumahlstoffe, auch als Ersatzzumahlstoffe bekannt, wie Hochofenschlacke, REA-Gips, Flugasche und ähnliche Stoffe eingesetzt (Reiter und Stroh, 1995).

Zusätzlich zu den bereits genannten Materialien werden auch verschiedene andere Ersatzrohstoffe verwendet. Hierzu zählen verschiedene Arten von Aschen, Kiesabbrand, Gangart, Waschberge, Walzzunder, sekundäre Rohstoffe mit Gips- und Tonanteilen, Aluminiumoxidrückstände, Steinmehlrecyclat und viele weitere Materialien (Reiter und Stroh, 1995).

Im Folgenden wird in Tabelle 23 ein Vergleich der vorhandenen Mineralphasen in qSTP1 und qSTP2 mit anderen Ersatzrohstoffen präsentiert.

4.2.1.1 Kennzahlen bzw. Module für die chemische Beurteilung

Die Zementherstellung erfordert sorgfältig ausbalancierte Rohstoffmischungen, die innerhalb bestimmter Grenzwerte liegen müssen, um die gewünschte chemische Zusammensetzung der Zementklinker zu erreichen. Um einen Zement gemäß den Normen herzustellen, ist es entscheidend, dass die Rohstoffmischung eine optimale chemische Zusammensetzung aufweist und diese Zusammensetzung so stabil wie möglich bleibt. Die Zusammensetzung der Rohstoffe wird durch Verhältniswerte, auch Module genannt, charakterisiert. Hierbei werden die in der chemischen Analyse ermittelten prozentualen Anteile der einzelnen Oxide zur Berechnung verwendet (Stark und Wicht, 2000).

Die entscheidenden Informationen zu den Portlandzementen (PZ) sind in Tabelle 24 aufgeführt. Diese Tabelle bietet eine Übersicht über die wesentlichen Bezeichnungen, Abkürzungen, Formeln und die üblichen Bereichswerte.

Tabelle 24: Übersicht über Bezeichnungen, Abkürzungen, Formeln und übliche Bereiche für Portlandzemente (Stark und Wicht, 2000) (Abk. = Abkürzung).

Bezeichnung	Abk.	Formel [%]	Üblicher Bereich für PZ [%]
Kalkstandard I	KSt (I)	$KS = \frac{100 \cdot CaO}{2,8 \cdot SiO_2 + 1,1 \cdot Al_2O_3 + 0,7 \cdot Fe_2O_3}$	92-102
Kalkstandard II	KSt (II)	$KSt = \frac{100 \cdot CaO}{2,8 \cdot SiO_2 + 1,18 \cdot Al_2O_3 + 0,65 \cdot Fe_2O_3}$	-
Kalkstandard III ¹⁾ (für MgO ≤ 2,0 %)	KSt (III)	$KSt (III) = \frac{100 \cdot (CaO + 0,75 \cdot MgO)}{2,80 \cdot SiO_2 + 1,18 \cdot Al_2O_3 + 0,65 \cdot Fe_2O_3}$	90-102
Kalkstandard III (für MgO ≤ 2,0 %)	KSt (III)	$KSt (III) = \frac{100 \cdot (CaO + 1,50 \cdot MgO)}{2,80 \cdot SiO_2 + 1,18 \cdot Al_2O_3 + 0,65 \cdot Fe_2O_3}$	90-102
Silikatmodul	SM	$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	1,8-3,4
Tonerdemodul	TM	$TM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	1,8-2,8

¹⁾ KSt III berücksichtigt, dass bis zu 2,0% MgO im Klinker gebunden werden können. Dabei ersetzt 1 Teil MgO 0,75 Teile CaO.

Durch die Variation der Mengenanteile der einzelnen Rohstoffe gemäß ihrer chemischen Zusammensetzung und unter Verwendung der in Tabelle 25 aufgeführten Formeln können die gewünschten Zielwerte für die verschiedenen Module erreicht werden. Eine Zusammenfassung dieser Zielwerte ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Mithilfe dieser Formeln können Richtwerte für KSt, SM und TM verwendet werden, um die chemische Zusammensetzung des Klinkers zu berechnen und praxisgerecht einzustellen.

Tabelle 25: Übersicht der angestrebten Zielwerte für die einzelnen Module (Stark und Wicht, 2000).

Moduln	Bereich	Bemerkung
KSt	90-97	Klinker für normalen Portlandzement
KSt	97-102	Klinker für schnellhärtenden, hochfesten Portlandzement
SM	=2	Klinker für normalen Portlandzement
SM	>3	Klinker für SiO ₂ -reiche Portlandzemente
SM	<1,8	Klinker für SiO ₂ -arme Portlandzemente
TM	=2	Klinker für normalen Portlandzement
TM	>4	Klinker für Aluminatzement
TM	<1,5	Klinker für sulfatbeständigen Portlandzement

In der Regel wird zur Berechnung des optimalen Klinkergehalts der sogenannte **Kalkstandard** (KSt) verwendet. Dieser Wert gibt den tatsächlichen CaO-Gehalt im

Rohmaterial in Prozent des maximal möglichen CaO-Gehalts wieder, der unter den gegebenen technischen Brenn- und Kühlbedingungen von den vorhandenen Komponenten wie SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 in den kalkreichsten Klinkerphasen gebunden werden kann. Mit anderen Worten, ein KSt-Wert von 100 zeigt an, dass der optimale CaO-Gehalt erreicht wurde (Stark und Wicht, 2000).

Ein zu hoher Überschuss an Kalk, der zur Bildung von Freikalk führen kann, ist unerwünscht. Dieser Wert liegt normalerweise im Bereich von 90 bis 102, wobei bei hochwertigem Zement Werte über 96 bevorzugt werden (Labahn und Kohlhaas, 1982; Reiter und Stroh, 1995).

Der **Silikatmodul** (SM) wird definiert als das Verhältnis von Siliciumoxid (SiO_2) zu Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3). Bei der Sinterung liegt der Siliciumoxid in fester Phase, während Aluminiumoxid bzw. Eisenoxid in flüssiger Phase vorliegen. In technischen Zementen bewegt sich der Silikatmodul (SM) normalerweise im Bereich von 1,8 bis 3,0 (Labahn und Kohlhaas, 1982; Reiter und Stroh, 1995).

Das Verhältnis von Aluminiumoxid zu Eisenoxid wird als **Tonerdemodul** (TM) bezeichnet. In der Regel bewegt sich der Tonerdemodul (TM) im Bereich von 1,3 bis 4,0, wobei die häufigsten Werte zwischen 1,8 und 2,8 liegen. Für bestimmte Spezialzemente kann der Tonerdemodul (TM) in einigen Fällen auf etwa 0,4 reduziert werden. Dieser Modul ist ein entscheidender Indikator für die Zusammensetzung der Schmelzphase während des Klinkerbrennens (Labahn und Kohlhaas, 1982; Reiter und Stroh, 1995).

Berechnungen zufolge (Tabelle 26) liegt der Kalkstandard bei den untersuchten Probenmaterialien bei etwa 8 bis 16 %. Dies bedeutet, dass auf jeden Fall die Verwendung von Kalkstein oder anderen kalkhaltigen Materialien in Betracht gezogen werden müsste, um den CaO-Gehalt zu erhöhen.

Tabelle 26: Berechnete Modulwerte.

Bezeichnung	Probennummer		Rohmehlanforderung nach:		
	qSTP1	qSTP2	Labahn und Kohlhaas (1982) [%]	Reiter und Stroh (1995) [%]	Stark und Wicht (2000) [%]
Kalkstandard (I)	8,4	8,2	-	-	92-102
Kalkstandard (II)	8,3	8,1	-	-	92-102
Kalkstandard (III)	12,1	11,9	90-102	90-102	90-102
Kalkstandard (III)	15,8	15,7	-	-	90-102
Silikatmodul	2,9	2,8	1,8-3,0	1,8-3,0	1,8-3,4
Tonerdemodul	2,1	2,1	1,3-4,0 (meist 1,8-2,8)	1,3-4,0	1,8-2,8

4.2.2 Glasindustrie

Glas wird allgemein als amorpher, nichtkristalliner Feststoff definiert, der physikalisch-chemisch als eingefrorene, unterkühlte Flüssigkeit oder Schmelze betrachtet werden kann. Der Begriff "Glas" umfasst sowohl anorganische als auch organische oder gemischte anorganisch-organische Materialien, die unter dem Oberbegriff "Vitroide" fallen. In engerem Sinne bezeichnet Glas ein anorganisches, höchst oxidisches Schmelzprodukt, dies über Einfrieren exklusive Auskristallisation dieser Schmelzphasenkomponenten in den festen Zustand übergeht (Schindler und Ronner, 1999).

Die Hauptkategorien seitens Glasprodukten sind Flachglas, Hohlglas (inbegriffen Behälterglas darüber hinaus Wirtschaftsglas), Glasfasern darüber hinaus sonstiges Glas (inbegriffen Spezialglas darüber hinaus optische Gläser) (Schindler und Ronner, 1999).

Glas ist keine eindeutig definierte chemische Verbindung, sondern setzt sich formell aus einer Vielzahl von Oxiden zusammen. Technisches Glas entsteht durch das Abkühlen von

Schmelzen, die Siliciumdioxid (SiO_2), Calciumoxid (CaO) und Natriumoxid (Na_2O) enthalten. Die exakte Zusammensetzung kann je nach den spezifischen Anforderungen an das Endprodukt variieren und beinhaltet unterschiedliche Mengen an Bortrioxid (B_2O_3), Aluminiumoxid (Al_2O_3), Bleioxid (PbO), Magnesiumoxid (MgO), Bariumoxid (BaO), Kaliumoxid (K_2O) sowie anderen Oxiden (Schindler und Ronner, 1999).

Die Zusammensetzung einiger industriell hergestellter Gläser ist in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Zusammensetzung einiger industriell hergestellter Gläser (Schindler und Ronner, 1999) und Vergleich mit qSTP1 und qSTP2.

Parameter	Probennummer		Floatglas farblos	Behälter- glas farblos	Wirtschaftsglas	Blei- kristall	Beleuchtungs- glas	Chem.-Techn. Glas	Opt. Glas	Einheit
	qSTP1	qSTP2								
SiO ₂	46,7	46,4	72,6	73	74	60	67,6	80,4	61-70	[%]
Al ₂ O ₃	10,9	11,3	0,7	1,4	0,18	0,08	5	2,27	0,3-3	[%]
Fe ₂ O ₃ + TiO	5,7	5,9	0,22	0,1	0,02	0,02	0,25	0,03	-	[%]
CaO	12,2	12,0	8,6	10,5	5,3	-	9,4	-	3	[%]
PbO	< 0,025	< 0,025	-	-	2,8	24	-	-	-	[%]
MgO	7,3	7,4	4,1	1,6	-	-	-	-	-	[%]
Na ₂ O	1,0	0,9	13,3	12,8	5	1	13,6	3,8	bis 5	[%]
K ₂ O	1,9	2,0	0,31	0,4	12,7	14,9	1,8	0,6	12-18	[%]
B ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	12,9	6-20	[%]
SO ₃	0,1	0,1	0,17	0,2	-	-	0,2	-	-	[%]
F	< 0,025	< 0,025	-	-	-	-	4	-	-	[%]

Die chemische Struktur von Glas wird laut Schindler und Ronner (1999) durch verschiedene Oxide beeinflusst, die in drei Hauptgruppen unterteilt werden:

- **Anionenoxide (Netzwerkbildner):** Dazu gehören SiO_2 , Al_2O_3 und B_2O_3 (letzteres für Spezialgläser). Diese Oxide erstarren in einem glasigen Zustand und bilden eine Nahordnung von SiO_4 -Tetraedern, die über Sauerstoffbrücken miteinander verknüpft sind.
- **Alkalioxide (Flussmittel):** Alkalioxide wie Na_2O , K_2O , Li_2O werden als Flussmittel zugefügt, um die Schmelztemperatur zu reduzieren und die Herstellung sowie die Verarbeitung von Glas zu erleichtern.
- **Erdalkalioxide (Stabilisatoren):** Dazu gehören CaO , MgO , BaO und Al_2O_3 . Sie werden als Stabilisatoren bezeichnet, da sie zu wasserunlöslichen Gläsern führen. Tonerde (Al_2O_3) erfüllt eine doppelte Funktion, indem sie einerseits als Netzwerkbildner agiert und andererseits stabilisierende Eigenschaften aufweist.

Die Zugabe dieser Oxide ermöglicht eine Variation der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Glas, wodurch es an die Anforderungen verschiedener technischer Anwendungen angepasst werden kann (Schindler und Ronner, 1999).

In mechanischer Hinsicht zeigt Glas eine spröde Struktur und ist wenig flexibel gegenüber stärkeren Verformungen durch Druck, Stoß oder Schlag. Trotz dieser Sprödigkeit besitzt es im festen und trockenen Zustand hervorragende isolierende und dielektrische Eigenschaften. Chemisch gesehen zeichnet sich Glas durch bemerkenswerte Beständigkeit gegenüber den meisten Substanzen aus, wobei nur bestimmte aggressive Stoffe wie Flusssäure und alkalische Schmelzen in der Lage sind, Glas aufzulösen. Die wirtschaftliche Bedeutung von Glas beruht hauptsächlich auf seiner ausgezeichneten Lichtdurchlässigkeit im sichtbaren Spektrum. Silikatgläser und solche mit einem hohen Anteil an B_2O_3 oder P_2O_5 sind darüber hinaus UV-durchlässig (Schindler und Ronner, 1999).

Die Produktion von Glas ist ein komplexer Prozess, der auf sorgfältig ausgewählten Rohstoffen basiert. Die grundlegenden Komponenten, die die Basis für die Herstellung von Glas bilden, umfassen Sand, Soda, Kalkstein, Dolomit, Feldspäte, Aluminiumsilikate, Borsäure und Borminerale. Ergänzend dazu spielt recyceltes Altglas eine entscheidende Rolle, insbesondere in der Produktion von Glasflaschen und Glaswolle. Die Verwendung von Altglasscherben trägt nicht nur zur nachhaltigen Ressourcennutzung bei, sondern ist auch ein bedeutender Beitrag zur Kreislaufwirtschaft in der Glasindustrie (Schindler und Ronner, 1999).

Um spezifische Eigenschaften des Glases zu beeinflussen, werden verschiedene Zusatzstoffe eingesetzt. Diese können die Farbe und Trübung des Glases beeinflussen. Gewöhnliche Ergänzungen beinhalten die Oxide von Zink, Cadmium, Titan und Blei. Zusätzlich werden geringe Mengen an Läuterungsmitteln, Flussmitteln und Entfärbemitteln verwendet (Schindler und Ronner, 1999).

Ein besonderes Augenmerk gilt dem Eisengehalt der natürlichen Rohstoffe, da ein zu hoher Gehalt zu einer unerwünschten Färbung des Glases führen kann. Um Weißglas herzustellen, werden Oxidationsmittel wie Kaliumnitrat (KNO_3) oder färbende Stoffe wie Manganoxid hinzugefügt, um die unerwünschte Färbung zu entfernen. Als Flussmittel, das die Schmelztemperatur senkt und die Viskosität der Glasschmelze beeinflusst, wird Borsäure verwendet. Für die Läuterung des Glases kommen vor allem Natriumsulfat (Na_2SO_4), Natriumnitrat ($NaNO_3$) und Natriumchlorid ($NaCl$) zum Einsatz (Schindler und Ronner, 1999).

Die Auswahl der Ausgangsmaterialien für die Glasproduktion erfolgt unter Berücksichtigung von Reinheit, Korngröße und Kosten. Die verwendeten Rohstoffe weisen Korngrößen im Bereich von 0,01 bis 2 mm auf. Feinkörnige oder pulverförmige Rohstoffe werden präzise gemischt und gründlich homogenisiert. Etwa 3-4 % Wasser werden während des Mischvorgangs hinzugefügt, um Staubentwicklung zu minimieren und den Einschmelzprozess zu erleichtern. Der gesamte Ablauf, einschließlich Entladen, Lagerung, Aufbereitung und Mischung, erfolgt in speziellen "Gemengeanlagen". Die resultierende Mischung wird anschließend zum Gemengebunker transportiert, der normalerweise direkt am Ofen positioniert ist (Schindler und Ronner, 1999).

Das vorbereitete Gemenge gelangt in einen Schmelzofen und wird bei beeindruckenden Temperaturen von 1540-1600°C zu Glas geschmolzen. Dieser Prozess unterteilt sich in Rauhschmelze und Feinschmelze. Die Rauhschmelze beginnt mit der Entstehung von Silikaten. Hierbei zersetzen sich Hydrate, Carbonate, Sulfate, Nitrate usw. unter den Einflüssen hoher Temperaturen und bilden Silikate, die im Gleichgewicht mit SiO₂ und CO₂ stehen. Diese basischen Silikate weisen eine starke Affinität zu Wasser auf und binden die Feuchtigkeit des darunterliegenden Gemenges als Hydratwasser, wodurch besonders dünnflüssige Schmelzen entstehen. In Gemengen, die Soda enthalten, tritt die Bildung von Silikaten bereits bei Temperaturen von 800-900°C auf. Während des eigentlichen Glasbildungsprozesses löst sich der verbleibende Quarz unter weiterer Gasentwicklung in den Silikaten auf. Die Annahme ist, dass die Glasbildung bei herkömmlichen Gläsern wahrscheinlich bei einer Temperatur von 1200°C abgeschlossen ist. Die resultierende Glasmasse ist von zahlreichen Gasblasen durchzogen und chemisch nicht homogen (Schindler und Ronner, 1999).

In der Phase der Läuterung wird durch Erhöhung der Temperatur die Löslichkeit von Gasen im Glas verringert, was zu einer starken Steigerung der Diffusionsgeschwindigkeit führt. Die Zugabe von Läuterungsmitteln erhöht den Druck der gebundenen Gase, und bei 1400°C erfolgt eine nahezu vollständige Entgasung. Durch das Aufsteigen größerer Blasen und die Scherwirkung der Gasströmung wird eine intensive Homogenisierung der Glasschmelze erreicht. Anschließend an die Feinschmelze, die Läuterung und Homogenisierung beinhaltet, folgt eine Abkühlungsphase, in der das Glas Wärme an die Umgebung abgibt. Dadurch verringert sich die Temperatur der Glasmasse auf etwa 1200°C, was eine geeignete Viskosität für die Weiterverarbeitung gewährleistet (Schindler und Ronner, 1999).

Rohstoffe für die Herstellung von Quarzglas höchster Reinheit dürfen nur geringe Verunreinigungen aufweisen, mit einem Maximum von 150-200 ppm. Dabei müssen die Konzentrationen von Cu (Kupfer), Co (Cobalt), Cr (Chrom), Mn (Mangan), Ni (Nickel) und V (Vanadium) zusammen unter 5 ppm liegen (Lorenz und Gwosdz, 1999).

In Bezug auf die potenzielle Verwendung von Molassematerial in der Glasindustrie lässt sich feststellen, dass die Eignung dieses Materials stark von seiner chemischen Zusammensetzung und den Anforderungen der Glasproduktion abhängt. Die Glasindustrie ist in der Regel auf die Verwendung von spezifischen Rohstoffen angewiesen, um hochwertiges und transparentes Glas herzustellen. Die Glasindustrie bevorzugt in der Regel andere Hauptrohstoffe wie Quarz und Kalk, um hochwertiges, transparentes Glas herzustellen. Diese Rohstoffe bieten die notwendige Reinheit und chemische Zusammensetzung, um die Qualitätsstandards der Glasindustrie zu erfüllen.

Es ist außerdem von wesentlicher Bedeutung sicherzustellen, dass das verwendete Molassematerial frei von schädlichen Verunreinigungen oder Schadstoffen ist, die die Qualität des Glases beeinträchtigen könnten. Basierend auf den Analyseergebnissen und den festgestellten hohen Gehalten an Schwermetallen und Kohlenwasserstoffen kann die Qualität und Transparenz des Glases erheblich beeinträchtigt werden, was unerwünschte Effekte, wie Verfärbungen, Trübungen und Veränderungen in der Glasstruktur zur Folge hat.

4.2.3 Ziegelindustrie

Wenn man die Zusammensetzung des untersuchten Tunnelausbruchsmaterials betrachtet, könnte es auch interessantes Potenzial in der Ziegelindustrie bieten.

Ziegeltonen und -lehme sind naturbedingte Mischungen aus verschiedenen Tonmineralen und anderen Mineralen, und ihre Zusammensetzung kann aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte stark variieren. Ein charakteristisches Merkmal dieser Materialien ist ihr hoher Gehalt an Flussmitteln wie Alkalien, Eisenverbindungen und Kalk. Bereits bei Temperaturen zwischen 950 und 1200°C beginnen Ziegeltonen und -lehme zu schmelzen. Aufgrund dieser variierenden mineralogischen Zusammensetzung können die chemischen Eigenschaften dieser Rohstoffe erheblich variieren (Lorenz und Gwosdz, 1997).

In der technischen Anwendung von Ziegeltonen und -lehmern sind jedoch die physikalischen Eigenschaften, die sich aus der Art der Tonminerale ergeben, von größerer Bedeutung. Daher sind die mineralogische Zusammensetzung der Rohstoffe und ihre Korngrößenverteilung von besonderer Relevanz (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Die Bildung von Ziegeltonen laut Lorenz und Gwosdz (1997) kann auf verschiedene Weisen erfolgen und lässt sich in zwei Hauptkategorien einteilen: autochthone und allochthone Ziegeltonen. Hier ist eine Erläuterung der beiden Kategorien:

1. Autochthone Ziegeltonen:

- Residualtone: Diese entstehen durch die Verwitterung und Zersetzung von Ausgangsmaterialien wie Schiefertönen und Schiefern.
- Tonneubildungen (in situ): Hierbei handelt es sich um die Bildung von Tonen an ihrem ursprünglichen Ort. Dies kann durch hydrothermale Zersetzung, Bodenbildung oder Um- und Neubildung in Salz- und Süßwasser erfolgen.

2. Allochthone Ziegeltonen:

- Sedimentäre Tone und Lehme: Diese Ziegeltonen entstehen durch die Ablagerung von Ton- und Lehmsedimenten in verschiedenen Umgebungen wie Flüssen (fluvial), Seen (lakustrin), durch Wind (äolisch, Löß), in brackischem Wasser oder im Meer (marin). Die Ablagerung dieser Sedimente führt zur Bildung von Ziegeltonen.
- Glazigene Tone und Lehme: Glazigene Ziegeltonen entstehen durch die Ablagerung von Geschiebelehm, der durch Gletscherbewegungen und die Erosion von Gesteinen während der Eiszeit gebildet wurde.

Die Entstehung von Ziegeltonen kann also sowohl durch natürliche Verwitterung und Umwandlungsprozesse als auch durch die Ablagerung von Ton- und Lehmsedimenten in verschiedenen geologischen Umgebungen erfolgen (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Ziegeltonen und -lehme haben zwar keine direkten Ersatzstoffe, aber es gibt alternative Rohstoffe wie Kalksandstein, Naturstein, Beton, Asbestzement, Schiefer, Plastik, Metall, Holz, Gipskartonplatten und Gipszwischenwandplatten, die für die Herstellung ähnlicher Produkte in Betracht gezogen werden können. Aufgrund wirtschaftlicher Erwägungen werden jedoch in den meisten Fällen nur Kalksandstein, Naturstein, Beton und Asbestzement als potenzielle Ersatzmaterialien verwendet, während Holz und andere organische Baustoffe nur selten zum Einsatz kommen (Lorenz und Gwosdz, 1997).

Die durchschnittlichen chemischen Zusammensetzungen von Dachziegel- und Mauerziegelmassen sind in Tabelle 28 dargestellt. Wie ersichtlich ein erhöhter Gehalt an CaO und MgO in den Ziegelmassen ist in der Regel für die Ziegelindustrie nicht ideal, da diese Oxide zu Verunreinigungen führen können und die Qualität der Ziegel beeinträchtigen können.

Tabelle 28: Durchschnittliche chemische Zusammensetzungen von Dachziegel- und Mauerziegelmassen (Lorenz und Gwosdz, 1997) und Vergleich mit qSTP1 und qSTP2.

Chemische Zusammensetzung	Probennummer		Dachziegelmassen	Mauerziegelmassen (Voll- und Hochlochziegel)	Einheit
	qSTP1	qSTP2			
SiO ₂	46,7	46,4	59,0-70,0	49,2-68,0	[M-%]
CaO	12,2	12,0	0,2-3,3	0,3-9,4 ¹⁾	[M-%]
Al ₂ O ₃	10,9	11,3	13,2-17,9	10,2-19,4	[M-%]
MgO	7,3	7,4	0,8-2,7	0,5-2,9	[M-%]
Fe ₂ O ₃	5,2	5,4	4,3-6,9	2,7-8,0	[M-%]
K ₂ O	1,9	2,0	1,7-2,7	1,3-4,0	[M-%]
Na ₂ O	1,0	0,9	0,2-0,8	0,3-1,2	[M-%]
TiO ₂	0,5	0,5	0,8-1,3	0,3-1,7	[M-%]
Glühverlust	13,8	13,7	5,8-9,9	4,2-9,1	[M-%]
¹⁾ für Mergeltone bis 13,5 M.-%. Maximaler Kalkgehalt: 30% CaCO ₃ (=17% CaO); ab ca. 17% CaCO ₃ (=10% CaO) gelbbrennend					

Laut Lorenz und Gwosdz (1997) haben verschiedene Minerale unterschiedliche Auswirkungen auf die Verarbeitungs- und Brenneigenschaften von Ziegelmassen (Tabelle 29).

Tabelle 29: Einfluss verschiedener Minerale auf die Verarbeitungs- und Brenneigenschaften von Ziegelmassen laut Lorenz & Gwosdz (1997).

Quarz	Quarz verringert die Plastizität des Materials und beeinflusst die Bearbeitbarkeit negativ. Er hat eine grobkörnige Textur, die die Materialstruktur stören kann. Die Trockenheitsempfindlichkeit des Materials wird reduziert, aber beim Brennen kann Quarz die Abkühlungsempfindlichkeit erhöhen.
Karbonate (Calcit/Dolomit)	Karbonate wirken magernd und mindern die Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit. Sie haben eine regulierende Wirkung auf die Brennfarbe und können in Verbindung mit Eisenoxid als Flussmittel dienen.
Feldspat (Plagioklas/Kalifeldspat)	Feldspat mindert die Plastizität und wirkt magernd. Dies trägt zur Reduzierung der Trockenheitsempfindlichkeit bei und fördert die Bildung einer Glasphase während des Brennprozesses. Bei höheren Temperaturen kann Feldspat als Flussmittel wirken.
Glimmer-Gruppe (Muskovit/Illit)	Muskovit wirkt magernd und verringert die Plastizität des Materials. Es fördert die grobkörnige Texturbildung und mindert die Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit. Der Erweichungspunkt beim Brennen kann durch Muskovit gesenkt werden. Illit verleiht dem Material eine gute Plastizität, erhöht jedoch teilweise die Trockenheitsempfindlichkeit. Während des Brennens wirkt Illit als Flussmittel und führt zu einem rotbrennenden Ergebnis.
Chlorit	Chlorit kann die Plastizität verringern. Er beeinflusst die Trockenheitsempfindlichkeit, was zu erhöhter oder verminderter Empfindlichkeit führen kann. Beim Brennen führt Chlorit in der Regel zu einer rot-braunen Brennfarbe.

Ursprung des Ziegels

Der Ursprung des Ziegels liegt in Gebieten, in denen Holz und Natursteine für den Baubedarf knapp waren. Die Menschheit entdeckte, dass bestimmte Erdmaterialien im trockenen Zustand eine beeindruckende Festigkeit erreichen können. Infolgedessen begann man damit, Lehmklumpen in eine steinähnliche Form zu bringen, sie zu trocknen und dann zu Mauern zu stapeln. Damit war das erste von Menschenhand hergestellte künstliche Bauelement geboren: der Lehmziegel. Später entwickelte man die Praxis, diese getrockneten Ziegel auch dem Feuer auszusetzen und sie zu brennen. Eine Deutung zur Entstehung gebrannter Ziegel besagt, dass in einem Dorf in Mesopotamien nach einem Brand festgestellt wurde, dass die durch das Feuer beeinflussten Lehmziegel nicht nur fester geworden waren, sondern auch eine ansprechendere Farbe erhielten. Zudem erwiesen sie sich als widerstandsfähiger gegenüber Feuchtigkeit. Aufgrund dieser Entdeckung entschloss man sich, Ziegel nicht mehr nur zu trocknen, sondern auch zu brennen. Zuerst geschah dies für bedeutende Bauten, die den Göttern gewidmet waren, und später auch für Wohnhäuser. Die Ergebnisse des Brennvorgangs hatten einen bedeutenden Einfluss auf die Weiterentwicklung des Ziegels als Baustoff. Durch das Brennen erlangten die Ziegel Festigkeit, Dauerhaftigkeit und insbesondere eine poröse Struktur, die zuvor nicht vorhanden war. Dieser Prozess führte auch zu Formbeständigkeit und einer breiteren Farbpalette bei den Ziegeln (Bender und Händle, 1982).

Wenn man die technischen Vorzüge des Ziegels als Baumaterial betonen möchte, ist es unerlässlich, immer wieder auf die einzigartigen Eigenschaften hinzuweisen, die der Ziegel durch seinen Herstellungsprozess erhält. Diese Eigenschaften gehen auf die Verwendung natürlicher Rohstoffe und die endgültige Struktur zurück, die während des Brennvorgangs entsteht. Der Ziegel verdankt seine Schönheit, Festigkeit, Formbeständigkeit, Dauerhaftigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber den Elementen, ohne dass zusätzlicher Schutz erforderlich ist, diesen speziellen Eigenschaften. Es ist diese Kombination von Eigenschaften, die dem Ziegel seine reiche Tradition und vielversprechende Zukunft sichert (Bender und Händle, 1982).

Ziegeleierzeugnisse

Ziegeleierzeugnisse sind weit verbreitete Massenprodukte, die in verschiedenen Bauprojekten als Baumaterial Verwendung finden. Aufgrund ihres breiten Anwendungsbereichs, insbesondere beim Bau von Wohngebäuden, ist es entscheidend, dass ausreichend Rohmaterial an vielen verschiedenen Standorten verfügbar ist. Die weite Verbreitung von Ziegeleiprodukten lässt sich auf die Tatsache zurückführen, dass Lehm und tonige Materialien in praktisch allen Ländern in bestimmten Regionen vorkommen. In Bezug auf die Formgebung unterscheidet man zwischen Strang- und Stempelverpressung. Die Strangverpressung bietet den Vorteil, dass vor allem Hohlziegel mit einem hohen Anteil an Löchern hergestellt werden können. Die Verwendung von Stempelpressen ermöglicht die Trockenverpressung von Ziegeln, wobei nur relativ geringe Wassermengen dem Ton hinzugefügt werden müssen. Diese Methode wird oft bei komplexen Formen wie doppelt verfalzten Preßdachziegeln angewandt. Die traditionelle Handformgebung, wie sie bei Handstrichziegeln üblich war, ist in Industrieländern aufgrund der hohen Arbeitskosten kaum noch anzutreffen. Die Mechanisierung hat es geschafft, maschinengepresste Ziegel so authentisch zu gestalten, dass sie von echten Handstrichziegeln kaum zu unterscheiden sind. Die gebräuchlichere Methode zur Kategorisierung von Ziegelprodukten erfolgt anhand ihres Verwendungszwecks, wie von Bender und Händle im Jahr 1982 empfohlen. Diese Kategorien umfassen Mauerziegel, Vormauerziegel und Klinker, Dachziegel, Deckenziegel sowie sonstige Ziegeleierzeugnisse.

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine kurze Erklärung für jeden dieser Ziegeltypen.

Mauerziegel sind die am häufigsten produzierten Ziegeleierzeugnisse. In Situationen, in denen keine speziellen Anforderungen hinsichtlich Oberfläche und Farbe gestellt werden, beispielsweise wenn das Mauerwerk verputzt wird, werden sie als Hintermauerziegel bezeichnet. In den letzten Jahren hat es signifikante Veränderungen hinsichtlich des Formats und der Lochung dieser Ziegel gegeben. In vielen Ländern wurde das traditionelle Einhandziegel-Normalformat (24 x 11,5 x 7,1 cm) oder Dünnsformat (24 x 11,5 x 5,2 cm) durch den Zweihandziegel mit Formaten von bis zu 20 DF (24 x 30 x 23,8 cm) ersetzt. Dieser Zweihandziegel wird vor allem in Mitteleuropa, insbesondere in Deutschland, Österreich und der Schweiz, als Hochlochziegel hergestellt. Bei diesen Ziegeln verläuft die Druckbelastung im Mauerwerk in Richtung der Lochkanäle. In weniger stark beanspruchten Wänden, leichten Trennwänden und in einigen romanischen Ländern auch in den Außenwänden ist hingegen der Langlochziegel vorherrschend (Bender und Händle, 1982).

Vormauerziegel und Klinker sind spezielle Ziegelarten, die spezielle Anforderungen in Bezug auf Oberfläche und Farbe erfüllen und daher für sichtbares Mauerwerk verwendet werden. Diese Ziegel müssen witterungsbeständig sein, was bedeutet, dass sie Frostresistenz aufweisen müssen. Sie werden hauptsächlich als Einhandziegel in gängigen Formaten wie dem Normal- oder Dünnsformat hergestellt. Der Begriff "Klinker" wird verwendet, wenn diese Ziegel mindestens der Druckfestigkeitsklasse 28 entsprechen, eine Scherbenrohichte von mindestens 1,9 kg/dm³ haben und vollständig gesintert sind. Andernfalls werden sie als Vormauerziegel bezeichnet, sofern sie den entsprechenden Normen entsprechen. Diese Ziegel zeichnen sich durch ihre Vielseitigkeit aus und können den unterschiedlichen Vorlieben von Architekten und Bauherren gerecht werden. Daher werden sie in verschiedenen dekorativen Ausführungen mit strukturierter, besandeter Oberfläche oder in Handstrichqualität hergestellt. Für die Verkleidung von Fassaden stehen dünnere Ziegel in Form von Riemchen (auch als Sparverblender bekannt) mit einer Dicke von 5-6 cm und Spaltplatten mit einer Dicke von 2-3 cm zur Verfügung (Bender und Händle, 1982).

Zur Gestaltung von Ecken, Vorsprüngen und Rundungen werden auch spezielle Formziegel geliefert. Die Produktion von Mauerziegeln in verschiedenen Ländern wird maßgeblich von den baulichen Gegebenheiten der Außenwände beeinflusst, die durch regionale Traditionen und klimatische Bedingungen geprägt sind. In den nordischen Ländern, Großbritannien, Belgien, den Niederlanden und Norddeutschland überwiegen zweischalige Wandkonstruktionen, die zunehmend mit zusätzlicher Dämmung versehen werden. In Mittel- und Süddeutschland sowie in Österreich ist einschaliges verputztes Mauerwerk vorherrschend, während in der Schweiz häufig zweischalige Konstruktionen verwendet werden. In den romanischen Ländern besteht das übliche einschalige verputzte Mauerwerk in der Regel aus Langlochziegeln (Bender und Händle, 1982).

Dachziegel sind vielfältige Baustoffe, die zur Bedachung schräger Dächer verwendet werden und in unterschiedlichen Formen und Ausführungen erhältlich sind. Sie werden entweder in ihrer natürlichen Farbe belassen oder mit keramischer Beschichtung (Engobe) oder Glasur versehen. Zu den bedeutendsten Strangdachziegeln gehören die Biberschwanzziegel und die Hohlpfannen. Ebenso sind gebräuchliche Preßdachziegel wie die Reformpfanne, die Flachdachpfanne und der Flachkremper mit doppelten Kopf- und Seitenfalzen weit verbreitet. Diese Falze dienen dazu, eine effektive Ableitung von Regenwasser sicherzustellen. In den südlichen Regionen sind stark strukturierte Dachflächen beliebt, die beispielsweise durch die Verwendung der Mönch-Nonnen-Deckung erreicht werden (Bender und Händle, 1982).

Deckenziegel profitieren in besonderem Maße von der Strangpressung, da sie filigrane Querschnitte ermöglichen, die sich gut für weitgespannte Decken, Schalen, Kuppeln und Faltwerke eignen. Diese Ziegel weisen Aussparungen auf, um Bewehrungen und Beton aufzunehmen. Sie sind entweder mit Fußleisten oder seitlichen Auflagerflächen ausgestattet, was es ermöglicht, sie als Einhängeziegel zwischen Gitterträgern mit Fußleisten aus gebranntem Ton zu verwenden. Die Deckenziegel verfügen über eine verstärkte obere Druckzone mit feinen Löchern, die es ihnen ermöglicht, Biegedruckkräfte effizient

aufzunehmen. Alternativ können sie auch in Verbindung mit einer zusätzlichen Aufbetonschicht ihre Tragfähigkeit erlangen (Bender und Händle, 1982).

Ziegelerzeugnisse bieten eine bemerkenswerte Diversität. Aufgrund ihrer enormen Vielseitigkeit sind sie in einer umfangreichen Auswahl an Typen und Formaten erhältlich. Das Spektrum der hergestellten Produkte erstreckt sich von Kanalklinkern über Pflasterklinker, Bodenplatten, Kabelschutzhauben bis hin zu Schornsteinziegeln und Ornamentziegeln (Bender und Händle 1982).

Trotz der jahrtausendelangen Verwendung von Ton und Lehm zur Herstellung von grobkeramischen Produkten bleiben die präzisen Zusammenhänge zwischen bedeutenden Rohstoffeigenschaften und dem technologischen Verhalten dieser Rohstoffe in vielen wesentlichen Details noch immer unzureichend erforscht (Bender und Händle, 1982).

Gemäß DIN 105 sind Ziegel definiert als Baustoffe, die aus Ton, Lehm und tonigen Massen geformt und durch Brennen gehärtet werden. Zusätzlich dürfen Zusatzstoffe verwendet werden, sofern sie die grundlegenden Eigenschaften der Ziegel weder kurzfristig noch langfristig negativ beeinflussen. Dies stellt sicher, dass die Qualität und die dauerhafte Stabilität der Ziegel gewährleistet sind, selbst wenn Zusatzstoffe hinzugefügt werden. Diese Norm dient dazu, sicherzustellen, dass Mauerziegel den erforderlichen Qualitätsstandards entsprechen und sicher in der Bauindustrie verwendet werden können.

Die DIN 105 unterteilt Ziegelsteine in verschiedene Kategorien, zu denen Vollziegel, Hochziegel, Mauertafelziegel, Handformziegel, Formziegel, Vormauerziegel und Klinker gehören, von denen jedes eine spezifische Kurzbezeichnung hat. Es ist jedoch erwähnenswert, dass Formziegel und Handformziegel in dieser Klassifikation keine spezifischen Kurzzeichen haben (Tabelle 30).

Tabelle 30: Ziegelarten und ihre Kurzzeichen gemäß DIN 105.

Ziegelarten	Kurzzeichen
Vollziegel	Mz
Hochziegel	HLz
Mauertafelziegel	HLzT
Vormauer-Vollziegel	VMz
Vormauer-Hochlochziegel	VHLz
Vollklinker	KMz
Hochlochklinker	KHLz

Es wird gefordert, dass Ziegel frei von schädlichen Salzen sind, welche das Innere der Ziegel oder den Verputz beeinträchtigen könnten. Die Prüfung auf das Vorhandensein schädlicher Salze gilt als bestanden, wenn der Massenanteil von Magnesiumsulfat (MgSO_4) in nicht vermauerten Proben 0,12% nicht übersteigt.

Zusätzlich müssen Vormauerziegel und Klinker frei von Salzen sein, die Ausblühungen verursachen könnten und somit das Erscheinungsbild der unverputzten Mauerfläche dauerhaft beeinträchtigen würden. Um die Prüfung auf das Vorhandensein schädlicher Salze zu bestehen, dürfen weder der Massenanteil des nachgewiesenen Natrium- und Kaliumsulfates ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4$) noch der gleichzeitig ausgewiesene Massenanteil an Magnesiumsulfat (MgSO_4) 0,08% überschreiten.

Die Rohstoffe der Ziegelindustrie

In der Ziegelherstellung spielen einige wesentliche Minerale eine entscheidende Rolle. Dazu gehören Kaolinit, Illit und Quarz. Bei geeigneter Korngrößenverteilung dieser Minerale können hochwertige Ziegelprodukte hergestellt werden. **Illit** ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) verleiht dem Rohstoff seine Plastizität, **Kaolinit** ($\text{Al}_4[(\text{OH})_8|\text{Si}_4\text{O}_{10}]$) zeigt ein besonders gutes

Sinterverhalten und **Quarz** (SiO_2) fungiert hauptsächlich als Stabilisator (Bender und Händle, 1982).

Zusätzlich zu den in der aktuellen XRD-Analyse identifizierten Mineralen wurden in der vorherigen Doktorarbeit von Haas (2022) auch die Minerale Kaolinit, Serpentin, Gips, Bassanit und Pyrit gefunden. Es ist wahrscheinlich anzunehmen, dass bei einer weiteren Analyse des derzeit untersuchten Materials auch Kaolinit identifiziert wird, basierend auf seiner Vorkommen in vorherigen Proben.

Bei der Ziegelherstellung sind bestimmte Minerale und Beimengungen von besonderer Bedeutung. Dies umfasst Karbonate, insbesondere Calcit, die bei feiner und gleichmäßiger Verteilung die Herstellung von Hintermauersteinen begünstigen. Eisenoxide und Eisenhydroxide sind verantwortlich für die intensive Rotfärbung der Ziegelmasse. Chlorit und Muskovit tragen oft zur frühen Bildung einer Schmelzphase im Ton bei, können jedoch bei grober Verteilung im Rohmaterial unerwünschte Pressstrukturen verursachen. Andere seltene Tonminerale haben normalerweise nur geringen Einfluss auf die keramischen Eigenschaften (Bender und Händle, 1982).

Montmorillonit kann in Anteilen von höchstens etwa 3% nützlich sein, während bei höheren Gehalten an feinem Calcit auch Montmorillonit-Anteile von bis zu 10% toleriert werden können. Röntgenamorphe Substanzen wie Allophane können das frühe Sintern fördern, aber auch zu starken Schrumpfungen führen. Beimengungen von Kohlenwasserstoffen in geringen Mengen können dazu beitragen, die Brennstoffkosten zu senken (Bender und Händle, 1982).

In der Ziegelherstellung sind einige Minerale und Beimengungen weniger bedeutsam. Dazu gehören Feldspäte, die bei den üblichen Brenntemperaturen in der Ziegelindustrie nicht als Flussmittel fungieren. Hornblenden, Augite, Schwerminerale und viele andere Minerale agieren in tonhaltigen Rohstoffen lediglich als passive Füllstoffe. Gesteinsfragmente in der Größe von Sandkörnern, sofern sie frei von Karbonaten sind, dienen in der Regel ebenfalls nur als Füllmaterial (Bender und Händle, 1982).

Minerale und Beimengungen, die in der Ziegelherstellung als problematisch angesehen werden: Montmorillonit, Glimmer (grobkörnig) und Karbonate. Bei Gehalten von mehr als 3% (oder 10%) kann Montmorillonit unter anderem die Anfälligkeit für Trocknungsrisse erhöhen. Glimmerminerale können unter anderem die Bildung laminarer Pressstrukturen im Rohling begünstigen. Insbesondere grobkörnige Kalksteinstücke können im Ziegel zu Kalkabplatzern führen (Bender und Händle, 1982).

Grobstückige Gesteinsreste sind beim Zerkleinern des Materials störend. Organische Substanzen können in höheren Konzentrationen unter anderem zur Bildung von Reduktionskernen im Ziegel führen, während sie bei niedrigeren Konzentrationen oft die Plastizität beeinflussen. Das Vorhandensein von Wurzeln und Holzresten im Ton kann zu Schwierigkeiten beim Schneiden des Preßstranges führen. Schwefelkies (Pyrit, Markasit) kann zu erhöhten SO_2 -Gehalten im Rauchgas führen, was wiederum die Bildung von Trockenausblühungen begünstigt. Gipsreste im Ziegel können ebenfalls zu erhöhten SO_2 -Gehalten und zu Ausblühungen führen. Chloride (wie NaCl) können bereits bei Gehalten unter 1% schwerwiegende Störungen im Ofenbetrieb verursachen. Lösliche Salze, insbesondere von Magnesium und Natrium, können zu starken Ausblühungen am Ziegel führen und oft auch Frostschäden verursachen. Fluorhaltige Tone können in Industrieländern zu erheblichen Immissionsproblemen führen (Bender und Händle, 1982).

Rohstoffaufbereitung

Die Aufbereitung von Ziegelrohstoffen kann auf verschiedene Weisen erfolgen: Trockenaufbereitung, Nassaufbereitung oder Halbnassaufbereitung (Bender und Händle, 1982).

Bei der Trockenaufbereitung erfolgt zunächst die Zerkleinerung des Rohmaterials. Anschließend wird das zerkleinerte Material getrocknet. Nach diesem Schritt erfolgt das Absieben, wodurch das Tonmehl als separater Bestandteil zurückbleibt. Das Tonmehl wird daraufhin mit den zerkleinerten Materialien gemischt. Das resultierende Gemisch kann entweder zur Trockenverformung verwendet werden oder alternativ durch Zugabe von Feuchtigkeit befeuchtet werden. Während des Befeuchtungsprozesses tritt die plastische Verformung des Materials ein (Bender und Händle, 1982).

Bei der Nassaufbereitung erfolgt zunächst das Schlämmen des Rohmaterials. Danach gibt es zwei mögliche Verfahrenszweige: Entweder erfolgt das Abscheiden und Trocknen oder das Abschneiden und Entwässern. Beim Abscheiden und Trocknen des Materials wird das Tonmehl separiert und anschließend mit den verbleibenden Bestandteilen gemischt. Das resultierende Gemisch kann entweder zur Trockenverformung verwendet werden oder alternativ durch Zugabe von Feuchtigkeit befeuchtet werden. Während des Befeuchtungsprozesses erfolgt die plastische Verformung des Materials. Im anderen Verfahrenszweig, dem Abschneiden und Entwässern, wird das Material nach dem Schlämmen gemischt und es erfolgt direkt die plastische Verformung des Materials (Bender und Händle, 1982).

In der Halbnassaufbereitung wird das Rohmaterial zunächst zerkleinert. Anschließend erfolgt die Feuchtekorrektur, gefolgt vom Mischen der Bestandteile. Dieser Prozess führt zur plastischen Verformung des Materials (Bender und Händle, 1982).

Das Verhalten von grobkeramischen Rohstoffen während des Brennprozesses

Während des Erhitzungsprozesses keramischer Rohstoffe erfolgt zunächst die Abspaltung von Wasser aus den Tonmineralien. Bis zu einer Temperatur von etwa 150°C wird zuerst das überschüssige Porenwasser verdampft. Zwischen 400°C und 600°C erfolgt die Freisetzung des chemisch gebundenen Kristallwassers. In diesem Temperaturbereich bleibt der Scherben noch ausreichend porös, um den austretenden Wasserdampf ungehindert entweichen zu lassen (Bender und Händle, 1982).

Im Temperaturbereich bis 900°C treten weitere gasförmige Reaktionen auf, wie die Zersetzung von Calciumcarbonat zu CaO und CO₂. In diesem Stadium ist auch die Oxidation von kohlenstoffhaltigen Bestandteilen, beispielsweise Humusstoffen, von Bedeutung (Bender und Händle, 1982).

Während des Brennvorgangs verschmelzen die feinen Rohstoffpartikel durch Silikatisierung und bilden einen dauerhaften festen Körper. Die Abkühlung der gebrannten Produkte auf Temperaturen von etwa 20°C bis 40°C erfolgt durch Wärmeaustausch mit der in diesem Kühlbereich zirkulierenden Luft. Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist materialabhängig und muss insbesondere im Bereich der Quarzumwandlung (573°C) begrenzt sein, um Schäden zu vermeiden (Bender und Händle, 1982).

4.2.3.1 Ofenarten

In der modernen Ziegelindustrie ist der Tunnelofen die vorherrschende Ofenart. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass es in der Keramikbranche eine Vielzahl von Ofentypen gibt. Dies reicht von periodisch betriebenen Öfen, wie sie in der Antike, bei den Römern, in Meilern oder Feldöfen Verwendung fanden, bis hin zu halbkontinuierlichen Öfen wie gekuppelten

Kammeröfen, Langöfen und Partialringöfen. Darüber hinaus existieren kontinuierlich betriebene Öfen wie Ringöfen, Zick- Zack-Öfen, Kammerringöfen, Tunnelöfen (mit obenliegender oder seitlicher Befeuerung) und Schnellbrandöfen (Durchlauföfen mit Schlitten-, Brenntisch-, Rollen- oder Hubbahnförderung). Die Vielfalt der Ofentypen in der Keramikbranche ist beeindruckend (Bender und Händle, 1982).

Nun erfolgt eine kurze Beschreibung des Tunnelofens, welcher aufgrund seiner herausragenden Bedeutung in der modernen Ziegelindustrie besondere Beachtung findet. In modernen keramischen Betrieben wird der Brennvorgang heute in Tunnelöfen durchgeführt. Im Laufe der Zeit und aufgrund fortlaufender Rationalisierungsbemühungen wurde der Tunnelofen kontinuierlich weiterentwickelt und stellt mittlerweile die wirtschaftlichste Ofenvariante für die Herstellung keramischer Produkte dar. Der Einsatz eines Tunnelofens bringt sowohl für das Betriebspersonal erhebliche Verbesserungen in den Arbeitsbedingungen, indem Hitze- und Staubbelastigungen reduziert werden, als auch für den Unternehmer, da er eine äußerst effiziente, vollautomatisierte Produktionslinie mit günstigem Energieverbrauch ermöglicht. Zudem bietet der Tunnelofen im Vergleich zu anderen Ofentypen den Vorteil kürzerer Aufheiz-, Brenn- und Kühlzeiten für die zu brennenden Keramikprodukte, was eine Steigerung der Produktionskapazität ermöglicht. Die Dimensionen der Tunnelöfen in der Ziegelindustrie variieren zwischen 40 und 200 Metern in der Länge des Brennkanals, etwa 1,0 bis 10 Metern in der Breite des Brennkanals und bis zu 2,20 Metern in der Höhe des Brennkanals (Bender und Händle, 1982).

Mehrheitlich werden in der Ziegelindustrie Tunnelöfen verwendet, die von oben durch die Decke befeuert werden. Bei diesem Verfahren werden die zu brennenden Produkte direkt auf die Tunnelofenwagen platziert, wobei zwischen ihnen Feuerschlitze mit einer Breite von 250 bis 400 mm verbleiben. Diese von oben befeuerten Tunnelöfen bieten den Vorteil, dass durch die Möglichkeit, mehrere Schüttlochöffnungen nebeneinander anzuordnen, der Wärmeaufwand pro Brennstelle und Zeiteinheit vergleichsweise niedrig gehalten werden kann. Dies ermöglicht die Vermeidung örtlicher Übertemperaturen oder Überhitzungen (Bender und Händle, 1982).

Ursprünglich wurden Tunnelöfen mit Seitenfeuerung vorrangig für das Brennen von hochwertigen keramischen Erzeugnissen verwendet. Erst zu Beginn der 1950er Jahre erfolgte die Anwendung der Seitenfeuerung auch in der Grobkeramik (Bender und Händle, 1982).

4.2.3.2 Schäden durch Fluorgase

Fluor ist unter den emittierten Schadstoffen, die aus den Öfen der Ziegelindustrie austreten, von gewisser Relevanz. Die keramischen Rohstoffe enthalten geringe Mengen an Fluor, in der Spanne von 0,01 bis 0,1%. Während des Brennvorgangs wird ein Teil des Fluors in gasförmiger Form als Fluorwasserstoff freigesetzt und zusammen mit den Abgasen ausgestoßen. Die absoluten Mengen dieses Fluors in einem Tunnelofen belaufen sich lediglich auf etwa 0,6 bis 0,9 kg F/h. In Bezug auf Fluoremissionen ist die Ziegelindustrie zweifellos im Vergleich zu anderen Branchen ein vergleichsweise geringer Emittent. Dennoch können selbst niedrige Konzentrationen gasförmiger Fluorverbindungen unter ungünstigen Witterungsbedingungen empfindliche Pflanzen schädigen (Bender und Händle, 1982).

Die Zugabe von Kalk kann die Emission von Fluor wesentlich reduzieren, wobei diese positive Wirkung besonders bei Rohstoffen mit geringem Kalkgehalt zum Tragen kommt. Bei Materialien, die bereits reich an Kalk sind, könnte die Zugabe von weiterem Kalk zu einer erhöhten Porosität des Scherbens führen und möglicherweise die Emissionen verstärken. Daher ist eine sorgfältige Abwägung der Rohstoffzusammensetzung und der Zusätze erforderlich, um unerwünschte Auswirkungen zu vermeiden. Auch die Beigabe von Sintermehl, obwohl kostenintensiver, kann die Freisetzung von Fluor verringern. Ein

wirtschaftlich interessanterer Ansatz ist die Verwendung von Metallhydroxiden, die als Abfallprodukte in der Metallindustrie anfallen. Versuche in Ziegeleien haben gezeigt, dass die Freisetzung von Fluor durch Zugabe von Metallhydroxiden reduziert werden kann. Dies könnte nicht nur zur Entsorgung von Abfallprodukten beitragen, sondern sollte auch sorgfältig untersucht werden, um sicherzustellen, dass keine anderen Emissionen oder Qualitätsprobleme bei den hergestellten Ziegeln auftreten (Bender und Händle, 1982).

4.2.3.3 Porenbeton

Porenbeton, als mineralischer Massivbaustoff der Leichtbeton-Gruppe, bietet herausragende Eigenschaften, die die Errichtung monolithischer Wandkonstruktionen ermöglichen und gleichzeitig höchste Anforderungen an Wärme-, Brand-, Feuchte- und Schallschutz sowie Tragfähigkeit erfüllen (BV-Porenbeton, 2023).

Die bemerkenswerte Wärmedämmfähigkeit von Porenbeton basiert auf seiner geringen Rohdichte (300 bis 1.000 kg/m³) und einem bedeutenden Luftanteil. Etwa 20 % des Volumens des Massivbaustoffs bestehen aus Feststoffen, während bis zu 80 % aus Luft bestehen. Dies ermöglicht die Produktion von 4 bis 5 m³ Porenbeton unter Verwendung von nur 1 m³ Rohstoffen. Das Ergebnis dieser einzigartigen Zusammensetzung zeigt sich in einer Kombination aus hoher Festigkeit, niedriger Wärmeleitfähigkeit, ausgezeichnetem Wärmespeichervermögen und erstklassiger Wärmedämmung. Dank dieser Merkmale und seiner geschlossenzelligen Porenstruktur kann Porenbeton zuverlässig statische, baukonstruktive und bauphysikalische Funktionen erfüllen – oft sogar ohne den Bedarf an zusätzlichen Maßnahmen oder ergänzenden Baustoffen (BV-Porenbeton, 2023).

Zusätzlich zeichnet sich der mineralische Baustoff durch seine Dampfdiffusionsfähigkeit aus, was zu feuchteregulierenden Eigenschaften führt. Porenbeton ist schadstofffrei, emissionsarm und nicht brennbar. Aufgrund seines geringen Volumengewichts gestaltet sich die Verarbeitung auf der Baustelle als unkompliziert und wirtschaftlich. Porenbeton präsentiert sich somit als eine vielseitige und effiziente Lösung, die nicht nur ökologische, sondern auch bauphysikalische Standards erfüllt und eine breite Palette von Baufunktionen abdeckt (BV-Porenbeton, 2023).

In Abbildung 17 werden die Anteile der Rohstoffe bei der Herstellung von Porenbeton dargestellt. Diese Grafik gibt einen Überblick über die verschiedenen Bestandteile, die in dem Herstellungsprozess verwendet werden.

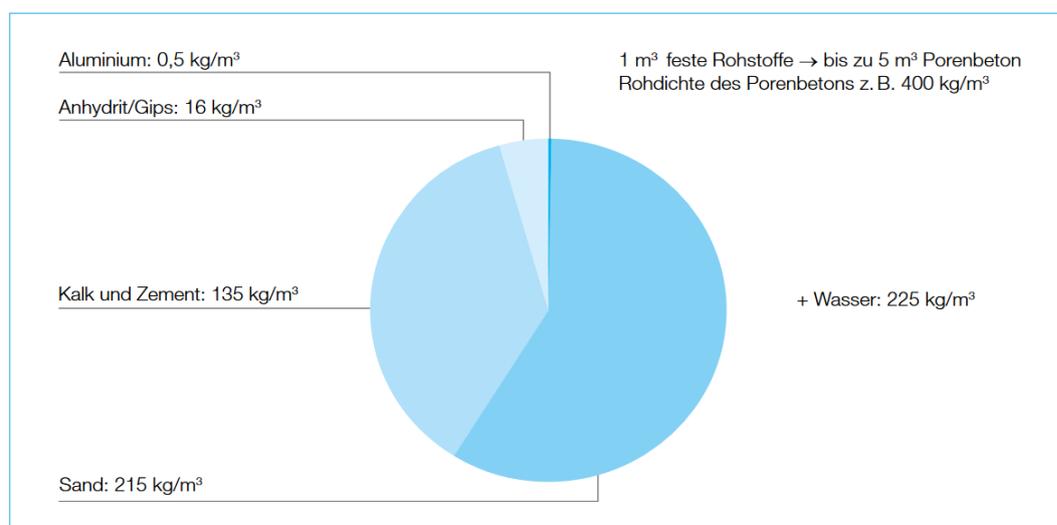


Abbildung 17: Anteile der Rohstoffe bei der Herstellung von Porenbeton (BV-Porenbeton, 2023).

Der Einsatz von robusten Vollsteinen aus Porenbeton repräsentiert eine fortschrittliche Strategie, um den anspruchsvollen Standards in verschiedenen Baubereichen gerecht zu werden. Hierbei liegt der Fokus insbesondere auf den Gebieten des Wärmeschutzes, Brandschutzes, Schallschutzes, Tragfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Wohngesundheit (BV-Porenbeton, 2023).

Wärmeschutz: Der Einsatz von massivem Porenbeton erfüllt bereits mit 36,5 cm dicken Außenwänden die aktuellen Standards des Gebäudeenergiegesetzes (GEG), ohne dass zusätzliche Dämmmaßnahmen erforderlich sind (BV-Porenbeton, 2023).

Brandschutz: Porenbeton ist als mineralischer Baustoff der höchsten Baustoffklasse A1 gemäß DIN 4102-4 zugeordnet, da er keine brennbaren Bestandteile enthält. Im Brandfall entstehen weder Rauch noch giftige oder entzündbare Gase. Die Verformung unter Hitzeeinwirkung ist gering, und Porenbeton trägt nicht zur Brandausbreitung bei (BV-Porenbeton, 2023).

Schallschutz: Porenbeton-Wandkonstruktionen erzielen ohne zusätzliche Maßnahmen einen normgerechten Schallschutz. Die homogene Verteilung der Luftporen im Baustoff gewährleistet eine gleichmäßige Schalldämmung in alle Richtungen, was besonders im Wohnungsbau für die Wohn- und Lebensqualität von Bedeutung ist (BV-Porenbeton, 2023).

Tragfähigkeit: Die massiven Porenbetonsteine zeichnen sich durch ihre monolithische Struktur ohne Luftkammern oder hochkantige Stege aus. Die Lastabtragung erfolgt über die volle Steinfläche, wodurch Lastkonzentrationen vermieden werden. Trotz geringer Rohdichte weist Porenbeton hohe Festigkeit auf und ermöglicht den Einsatz in mehrgeschossigen Gebäuden. Die durchschnittlichen Werte der Druckfestigkeit der Steine variieren im Bereich von 2,5 bis 10,0 N/mm² (BV-Porenbeton, 2023).

Wirtschaftlichkeit: Abgestimmte Porenbeton-Systembausteine optimieren Bauabläufe und zeichnen sich durch ihre einfache und wirtschaftliche Verarbeitung aufgrund ihres geringen Volumengewichts aus. Die exzellente Wärmedämmung von Porenbeton ermöglicht die Einhaltung der Vorgaben der Energieeinsparverordnung (EnEV) ohne den Bedarf an zusätzlichen Dämmmaßnahmen, was langfristig zu erheblichen Einsparungen bei den Heizenergiekosten führt (BV-Porenbeton, 2023).

Wohngesundheit: Als mineralischer Baustoff, der aus natürlichen Rohstoffen gewonnen wird, ist Porenbeton vollständig schadstofffrei und emittiert keine Substanzen in die Raumluft. Die dampfdiffusionsoffenen, hoch wärmedämmenden und wärmespeichernden Eigenschaften von Porenbeton tragen dazu bei, ein ausgeglichenes Raumklima zu schaffen. Insgesamt präsentiert sich Porenbeton als vielseitige und effiziente Lösung, die die aktuellen und künftigen Anforderungen moderner Baukonzepte umfassend erfüllt (BV-Porenbeton, 2023).

4.2.3.3.1 YTONG-Porenbeton

YTONG Porenbeton, ein fortschrittlicher Baustoff aus Quarzsand, Zement, Kalk und Wasser, vereint eine Reihe herausragender Eigenschaften und Vorteile im Bauwesen. Mit exzellenten Wärmedämmeigenschaften, nachhaltigem CO₂-Management, und einer Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, hebt sich YTONG als ein innovativer und ökologisch verträglicher Baustoff hervor (YTONG, 2023).

Die Rohstoffzusammensetzung von Porenbeton, bestehend aus Sand, Kalk und anderen Komponenten, zeigt Ähnlichkeiten zu Molassematerialproben, die Sandstein, Mergel und Kalk enthalten (BV-PORENBETON, 2023). Diese Ähnlichkeiten könnten auf vergleichbare Eigenschaften hindeuten, insbesondere im Hinblick auf Baueigenschaften wie Wärmedämmung und Festigkeit. Daher ist eine positive Bewertung für den Einsatz in der

Bauindustrie wahrscheinlich, sofern weitere Tests die Eignung für spezifische Anwendungen bestätigen.

4.2.4 Landwirtschaft

Eine alternative Möglichkeit liegt in der gezielten Verwertung von Tunnelausbruchsmaterial in der Landwirtschaft, insbesondere für die Herstellung von Düngemitteln.

Gemäß dem österreichischen Düngemittelgesetz von 2021 obliegt die Zulassung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln dem Bundesamt für Ernährungssicherheit. Wenn ein Produkt den in der Düngemittelverordnung von 2004 oder in der Verordnung (EU) 2019/1009 für EU-Düngeprodukte festgelegten Typen entspricht, bedarf es keiner separaten Registrierung. Wenn ein Produkt jedoch aufgrund seiner Zusammensetzung, der Inhaltsstoffe oder der Ausgangsmaterialien nicht den in der Düngemittelverordnung von 2004 definierten Typen entspricht, kann es per behördlichen Bescheid gemäß § 9 des Düngemittelgesetzes von 2021 zugelassen werden (BAES, 2024).

Laut Düngemittelverordnung 2004 werden diese Düngemittel je nach ihrem Nährstoffgehalt in verschiedene Kategorien (vgl. Tabelle 33) eingeteilt:

- Primärnährstoffe, zu denen Elemente wie Stickstoff, Phosphor und Kalium gehören.
- Sekundärnährstoffe, wie Calcium, Magnesium, Natrium und Schwefel.
- Spurennährstoffe, darunter Bor, Kobalt, Kupfer, Eisen, Mangan, Molybdän und Zink.

Bei der Angabe von Phosphor (P) und Kalium (K) sowie den Sekundärnährstoffen besteht die Möglichkeit, zusätzlich zur Oxid- oder Karbonatform die Elementform anzugeben. Die Umrechnung der Gehalte erfolgt wie folgt (Tabelle 31):

Tabelle 31: Umrechnung der Gehalte der zwei qualifizierten Stichproben.

Parameter	Probennummer		Faktor	Elementarform	Probennummer		Einheit
	qSTP1	qSTP2			qSTP1	qSTP2	
P_2O_5	0,093	0,097	x 0,436	= P (Phosphor)	0,041	0,042	[%]
K_2O	1,94	2,01	x 0,830	= K (Kalium)	1,610	1,668	[%]
CaO	12,22	11,95	x 0,715	= Ca (Calcium)	8,737	8,544	[%]
$CaCO_3$	-	-	x 0,400	= Ca (Calcium)	-	-	[%]
$CaCO_3$	-	-	x 0,560	= CaO (Calciumoxid)	-	-	[%]
MgO	7,31	7,38	x 0,603	= Mg (Magnesium)	4,408	4,450	[%]
$MgCO_3$	-	-	x 0,288	= Mg (Magnesium)	-	-	[%]
$MgCO_3$	-	-	x 0,478	=MgO (Magnesiumoxid)	-	-	[%]
SO_3	0,14	0,13	x 0,400	= S (Schwefel)	0,056	0,052	[%]
Na_2O	0,98	0,94	x 0,742	= Na (Natrium)	0,727	0,697	[%]
SO_4	-	-	x 0,333	= S (Schwefel)	-	-	[%]

Bei Düngemitteln sollte der Gehalt an Sekundärnährstoffen, wie Calcium (als CaO), Schwefel (als S), Magnesium (als MgO) und Natrium (als Na_2O) angegeben werden, sobald sie jeweils einen Gehalt von 5% erreichen. Zusätzlich sollten die Gehalte an Spurennährstoffen in Düngemitteln und Kultursubstraten unter Angabe des jeweiligen Spurennährstoffs angegeben werden, wenn sie die folgenden Konzentrationen überschreiten:

- Bor (B) ab 0,01 %,
- Kobalt (Co) ab 0,002 %,
- Kupfer (Cu) ab 0,01 %,
- Eisen (Fe) ab 0,5 %,
- Mangan (Mn) ab 0,1 %,
- Molybdän (Mo) ab 0,001 % und

- Zink (Zn) ab 0,03 %.

Zusätzlich wurde eine ICP-MS (Induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie) Analyse (halbquantitativ) durchgeführt, deren Ergebnisse in der beiliegenden Tabelle 32 ersichtlich sind.

Tabelle 32: Messwerte für Gesamtgehalte von qSTP1 und qSTP2.

Elemente	Ergebnisse		Einheit	Umrechnung in [%]	
	Probennummer			Probennummer	
	qSTP1	qSTP2		qSTP1	qSTP2
Ag (Silber)	< 0,25	< 0,25	[mg/kg]	< 0,000025	< 0,000025
Al (Aluminium)	57900	56600	[mg/kg]	5,8	5,7
Ba (Barium)	290	280	[mg/kg]	0,03	0,03
Be (Beryllium)	< 2,5	< 2,5	[mg/kg]	< 0,00025	< 0,00025
Ca (Calcium)	76700	73900	[mg/kg]	7,7	7,4
Fe (Eisen)	33500	33300	[mg/kg]	3,4	3,3
K (Kalium)	15800	15300	[mg/kg]	1,6	1,5
Li (Lithium)	38	38	[mg/kg]	0,0038	0,0038
Mg (Magnesium)	31800	31100	[mg/kg]	3,2	3,1
Mo (Molybdän)	0,39	0,26	[mg/kg]	0,000039	0,000026
N (Stickstoff)	300	300	[mg/kg]	0,030	0,030
Na (Natrium)	7150	6930	[mg/kg]	0,72	0,69
P (Phosphor)	410	420	[mg/kg]	0,041	0,042
Pd (Palladium)	< 0,25	< 0,25	[mg/kg]	< 0,000025	< 0,000025
Se (Selen)	4,6	4,1	[mg/kg]	0,00046	0,00041
Si (Silizium)	230000	232000	[mg/kg]	23	23
Sr (Strontium)	500	500	[mg/kg]	0,05	0,05
Te (Tellur)	< 0,50	< 0,50	[mg/kg]	< 0,00005	< 0,00005
Ti (Titan)	2770	2730	[mg/kg]	0,28	0,27
W (Wolfram)	1,3	1,2	[mg/kg]	0,00013	0,00012

Es gibt eine Vielzahl von Düngemittelkategorien (

Tabelle 33), die in der Landwirtschaft Verwendung finden:

Tabelle 33: Düngemittelkategorien (DMV, 2004).

TYPEN	MINDESTGEHALT
Mineralische Stickstoffdünger	10% N.
Mineralische Phosphatdünger	10% P ₂ O ₅ .
Mineralische Kalidünger	10 % K ₂ O.
Mineralische Kalk- und Magnesiumdünger	65 % CaCO ₃ + MgCO ₃ bzw. 30 % CaO + MgO basierend auf dem Produkt.
Mineralische Calcium-, Magnesium- und Schwefeldünger	10 % CaO, 10 % MgO, 10 % S.
Mineralische Spurennährstoffdünger	0,2 % B; 0,02 % Co; 0,1 % Cu; 1 % Fe; 0,5 % Mn ; 0,01 % Mo; 0,1 % Zn.
Mineralische Mehrnährstoffdünger	3 % N; 5 % P ₂ O ₅ ; 5 % K ₂ O.
Organische Dünger	„mindestens 20 % organische Substanz i.d. TS und einer der nachgenannten Gehalte: 1 % N; 1 % P ₂ O ₅ ; 1 % K ₂ O.“
Biogasgülle	„mindestens 50 % organische Substanz i.d. TS und einer der nachgenannten Gehalte in der Frischmasse: 0,2 % N; 0,1 %

	P_2O_5 ; 0,3 % K_2O .
Organisch-mineralische Dünger	10 % Organische Substanz i.d. TS und mindestens 1 % N oder 1 % P_2O_5 oder 1 % K_2O .
Kultursubstrate	Kein Richtwert.
Bodenhilfsstoffe	Kein Richtwert.
Pflanzenhilfsmittel	Kein Richtwert.

Die nachfolgende Tabelle (Tabelle 34) illustriert die Schwermetallkonzentrationen in den untersuchten Proben sowie die zugehörigen Grenzwerte.

Tabelle 34: Schwermetallkonzentration – Grenzwerte (DMV, 2004).

Schwermetall	Probennummer		Grenzwerte			Einheit
	qSTP1	qSTP2	Düngemittel*, Bodenhilfsstoffe, Pflanzenhilfsmittel	Mineralische Düngemittel**	Kultursubstrate	
Blei	13	13	100	100	50	[mg/kg]
Cadmium	0,1	< 0,10	3	75 [mg/kg] P_2O_5		[mg/kg]
Chrom VI	< 2	< 2	2	2	2	[mg/kg]
Nickel	220	210	100	100	100	[mg/kg]
Quecksilber	< 0,10	< 0,10	1	1	0,5	[mg/kg]
Vanadium	50	49	-	1500	-	[mg/kg]
Arsen	3,8	3,9	40	40	40	[mg/kg]

*ausgenommen mineralische Düngemittel mit mehr als 5 % P_2O_5 .

**mit mehr als 5 % P_2O_5 .

Tabelle 35 illustriert die organischen Summenparameter in den untersuchten Proben sowie die zugehörigen Grenzwerte.

Tabelle 35: Organische Summenparameter – Grenzwerte (DMV, 2004).

Organische Summenparameter	Probennummer		Grenzwert	Einheit
	qSTP1	qSTP2		
PAK (16 Verbindungen nach EPA)	0,057	<0,026	6	[mg/kg]
PCB (7 Verbindungen)	0,027	<0,010	0,2	[mg/kg]

Das untersuchte Tunnelausbruchsmaterial erweist sich aufgrund seiner erheblichen Nickelkonzentration, als ungeeignet für landwirtschaftliche Anwendungen, wie beispielsweise die Verwendung als Düngemittel. Schwermetalle im Boden können erhebliche ökologische Auswirkungen verursachen und sind in erhöhten Konzentrationen schädlich für die Tierwelt, die Pflanzenwelt und die menschliche Gesundheit.

Hier erfolgt eine Erläuterung der Toleranzen laut DMV (2004).

Für **mineralische Stickstoffdünger** ist eine Toleranz von 1 % (gemessen am absoluten Gewichtsprozent) des deklarierten Gesamtstickstoffgehalts vorgesehen. Wenn die Produktkennzeichnung mehrere Formen von Stickstoff angibt, wird die Toleranz für den Gehalt jeder einzelnen Stickstoffform auf 1/10 des Gehaltes dieser spezifischen Form festgelegt. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die insgesamt festgelegte Toleranz für den Gesamtstickstoffgehalt nicht überschritten werden darf.

Bei **mineralischen Phosphatdüngern** ist eine Toleranz von 1,5 % (in Bezug auf das absolute Gewichtsprozent) des deklarierten Phosphatgehalts vorgeschrieben. Falls auf der Produktkennzeichnung mehrere Angaben zur Phosphatlöslichkeit gemacht werden, wird die Toleranz für den Gehalt jeder spezifischen Phosphatlöslichkeit auf 1/10 des deklarierten Gesamtgehalts der betreffenden Phosphatlöslichkeit festgelegt. Es ist jedoch entscheidend zu beachten, dass die insgesamt festgelegte Toleranz für den gesamten P_2O_5 -Gehalt nicht

überschritten werden darf. Für andere zugesetzte Nährstoffe in diesen Düngemitteln beträgt die Toleranz 1/5 des deklarierten Gehaltes des jeweiligen Nährstoffs.

Für **mineralische Kalidünger** ist eine Toleranz von 1,5 % (absoluter Wert in Bezug auf das Gewichtsprozent) des deklarierten Kaligehalts vorgeschrieben. In Bezug auf andere zugesetzte Nährstoffe beträgt die Toleranz 1/5 des deklarierten Gesamtnährstoffgehalts. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die Toleranz für Magnesiumoxid nicht über 0,9 % des absoluten Gewichtsprozentsatzes liegen darf.

Für **mineralische Kalk- und Magnesiumdünger** beträgt die Toleranz 1/20 des deklarierten Nährstoffgehalts. Dabei darf der Toleranzwert jedoch nicht mehr als 3,0 % CaO oder $CaCO_3$ und 1,0 % MgO oder $MgCO_3$ in absoluten Gewichtsprozenten übersteigen. Wenn auf der Produktkennzeichnung die Angabe in Karbonatform erfolgt, wird die Toleranz auf die berechnete Oxidform bezogen.

Hinsichtlich der **Sekundärnährstoffe** ist eine Toleranz festgelegt, die 1/4 des deklarierten Gehalts nicht überschreitet, wobei sie jedoch maximal 1 % ausmacht.

Wenn der Gehalt an **Spurennährstoffen** über 2% liegt, sollte die Toleranz auf 0,4 Gewichtsprozent begrenzt werden. Wenn der Gehalt an Spurennährstoffen bis zu 2 % beträgt, beträgt die Toleranz 1/5 des deklarierten Gehalts.

Mineralische Mehrnährstoffdünger unterliegen Toleranzen, die 1/5 des deklarierten Nährstoffgehalts entsprechen, jedoch für einzelne Nährstoffe bestimmte Obergrenzen nicht überschreiten dürfen: Die Toleranzgrenze für Stickstoff (N), Phosphat (P_2O_5) und Kaliumoxid (K_2O) beträgt jeweils 1,1 % des angegebenen Gehalts jeder Substanz. Für Kalk (CaO) liegt die Toleranzgrenze bei 3,0 % des angegebenen Gehalts, während für Magnesiumoxid (MgO) die Toleranzgrenze 0,9 % des angegebenen Gehalts beträgt. Für Chlorid (Cl) beträgt die Toleranzgrenze 0,2 % des angegebenen Gehalts.

Es ist erlaubt, dass negative Abweichungen vom angegebenen Gesamtgehalt an Primärnährstoffen insgesamt innerhalb bestimmter Grenzen liegen:

- NP-Dünger: 1,5% Abweichung,
- NK-Dünger: 1,5% Abweichung,
- PK-Dünger: 1,5% Abweichung und
- NPK-Dünger: 1,9% Abweichung.

Die Toleranz für Gehalte an Stickstoffformen und Phosphatlöslichkeiten beträgt 1/10 des jeweiligen Gehalts im Verhältnis zum Gesamtgehalt des Düngemittels, jedoch nicht mehr als 2 Gewichtsprozent. Wichtig ist, dass die festgelegten Toleranzwerte für die einzelnen Nährstoffe und die Gesamtgehalte nicht überschritten werden dürfen.

Für **organische und organisch-mineralische Dünger** beträgt die Toleranz für den einzelnen Nährstoffgehalt 1/5 des angegebenen Gehalts, wobei bestimmte Obergrenzen in absoluten Gewichtsprozenten nicht überschritten werden dürfen: Für Stickstoff (N) beträgt die Toleranzgrenze 1,2 % des angegebenen Gehalts, für Phosphat (P_2O_5) liegt sie bei 2,0 % und für Kaliumoxid (K_2O) bei 1,2 %. Calciumoxid (CaO) hat eine Toleranzgrenze von 3,0 % des angegebenen Gehalts, während Magnesiumoxid (MgO) eine Toleranzgrenze von 1,0 % des angegebenen Gehalts aufweist.

Zusätzlich sind maximale Abweichungen von den angegebenen Gehalten erlaubt, wenn eine wertvermindernde Anpassung für Stickstoff (N), Phosphat (P_2O_5) und Kaliumoxid (K_2O) insgesamt 3 Gewichtsprozent nicht überschreitet.

Die Toleranz für den Nährstoffgehalt in **Biogasgülle** beträgt die Hälfte des angegebenen Gehalts, jedoch nicht mehr als die folgenden absoluten Werte in Gewichtsprozenten: Für Stickstoff (N) und Kaliumoxid (K_2O) beträgt die maximale Abweichung jeweils 0,1 %, während für Phosphat (P_2O_5) maximal 0,05 % erlaubt sind.

Die Analyseergebnisse deuten darauf hin, dass es wenig sinnvoll ist, das Tunnelausbruchmaterial in der Landwirtschaft einzusetzen. Die vorhandenen Nährstoffe sind bereits in geringen Mengen vorhanden, was deren Verwertung problematisch macht. Besonders besorgniserregend ist der hohe Nickelgehalt, was ein erhebliches Hindernis darstellt.

5 Zusammenfassung

Die Hauptaufgabe dieser Masterarbeit bestand darin, die umweltgeologische Bewertung von Entsorgungs- und Verwertungsmöglichkeiten für Tunnelausbruchsmaterial, das im Rahmen des FCC-Projekts anfallen wird, durchzuführen. Dabei lag der Fokus auf einer vergleichenden Studie der rechtlichen Rahmenbedingungen und experimentellen Untersuchungen in den Ländern Österreich, der Schweiz und Frankreich. Dies umfasste die detaillierte Evaluierung der Materialqualität sowie potenzieller Verwertungslösungen in den genannten Ländern, unter Berücksichtigung der rechtlichen Aspekte und der praktischen Umsetzbarkeit. Die Integration von theoretischen und experimentellen Ansätzen sollte präzise Einblicke in die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Umsetzbarkeit der identifizierten Verwertungsoptionen ermöglichen.

Die Probenahme umfasste die Gewinnung von zwei repräsentativen Proben (qSTP1 und qSTP2), die anschließend einer Probenaufbereitung unterzogen wurden. Die chemische Analyse wurde in mehreren Teilen durchgeführt: Zum einen wurden die Gesamtgehalte nach Totalaufschluss und Königswasseraufschluss bestimmt, zum anderen die Eluatgehalte der gezogenen Proben. Die durchgeführten Analysen dienten als Basis für die Gegenüberstellung von Grenz- und Richtwerten. Auf Basis der Ergebnisse der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der Proben qSTP1 und qSTP2 wurde die Möglichkeit eine Verwertung des Tunnelausbruchmaterials in den nachstehenden Branchen bewertet. Hierzu wurde recherchiert, um festzustellen, ob Tunnelausbruchsmaterial in ähnlichen Anwendungen bereits Verwendung findet. Die gesetzlichen Vorgaben und eventuelle Spezifikationen der Branche wurden ebenfalls erhoben.

Ein Abgleich zur Überprüfung der Repräsentativität erfolgte zwischen den gezogenen Proben und Rückstellproben aus vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeiten. An diesen Rückstellproben wurden ausgewählte chemische Analysen durchgeführt. Die gezogenen Proben qSTP1 und qSTP2 zeigten gute Übereinstimmung für sämtliche untersuchten Parameter. Das zeigt, dass die beiden gezogenen Proben als durchaus repräsentativ für die bisher vorhandenen Segmente zu sehen sind.

Basierend auf der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der Tunnelausbruchsmaterialproben qSTP1 und qSTP2, lassen sich die Bewertungen für die einzelnen Branchen wie folgt zusammenfassen:

1. Zementindustrie:

- Die zentralen Hauptrohstoffe in der Zementindustrie, nämlich CaO, SiO₂, Al₂O₃ und Fe₂O₃, sind im Tunnelausbruchmaterial in großer Menge (~ 47 % SiO₂; ~ 12 % CaO; ~ 11 % Al₂O₃; ~ 5 % Fe₂O₃) vorhanden.
- Der ermittelte Kalkstandard liegt im Bereich von 8 bis 16 %, was erheblich unter den geforderten 90-102 % liegt. Dies deutet auf einen potenziellen Mangel an Kalk hin. Im Gegensatz dazu erfüllen sowohl das Silikatmodul als auch das Tonerdemodul die Rohlmehlanforderungen. Dies legt nahe, dass die Integration von Kalkstein oder anderen kalkhaltigen Materialien in Erwägung gezogen werden muss, um den Gehalt an Calciumoxid (CaO) zu erhöhen.
- Die Grenzwerte der österreichischen Ersatzrohstoffrichtlinie werden für qSTP1 und qSTP2 eingehalten.

2. Glasindustrie:

- Die Zusammensetzung des Tunnelausbruchmaterials weicht erheblich von den typischen Bestandteilen industriell hergestellter Gläser ab (60-80 % SiO₂; 3-10,5 % CaO; 0,08-5 % Al₂O₃; 0,02-0,25 % Fe₂O₃) und ist für die Glasindustrie grundsätzlich eher ungeeignet.
 - Der hohe Eisengehalt könnte Verfärbungen verursachen. Außerdem besteht aufgrund hoher Gehalte an Schwermetallen und Kohlenwasserstoffen das Risiko erheblicher Beeinträchtigungen von Glasqualität und Transparenz.
-

- Das Material entspricht nicht den Qualitätsstandards der Glasindustrie und eine Verwertung in dieser Branche ist als wenig wahrscheinlich einzustufen.
- 3. Ziegelindustrie:**
- Das Tunnelausbruchsmaterial könnte aufgrund seiner mineralogischen Zusammensetzung in der Ziegelindustrie für Mauerziegelmasse (Voll- und Hochziegel) verwendet werden.
 - Allerdings weist es einen erhöhten Gehalt an Magnesiumoxid (MgO), was zu Verunreinigungen führen könnte. Auch der leicht erhöhte Gehalt an Calciumoxid (CaO) könnte potenzielle Probleme wie Kalkabplatzern verursachen.
 - Das Tunnelausbruchsmaterial bietet aufgrund seiner Zusammensetzung die notwendigen Rohstoffe für die Herstellung von Baumaterialien wie YTONG Porenbeton, daher wäre ein Einsatz für dieses Produkt weiter zu prüfen.
- 4. Landwirtschaft:**
- Aufgrund der erhöhten Konzentration von Nickel ist das analysierte Tunnelausbruchsmaterial ungeeignet für landwirtschaftliche Anwendungen, wie beispielsweise die Verwendung als Düngemittel.
 - Die vorhandenen Nährstoffe sind in äußerst begrenzten Mengen vorhanden, was ihre effiziente Nutzung nahezu unmöglich macht.

Gemäß der Deponieverordnung (2008) handelt es sich um nicht gefährlichen Abfall, der sowohl die Grenzwerte für Baurestmassendeponie als auch für Massenabfalldeponie einhält. Dies wäre jedoch der ungünstigste Fall. Andererseits könnte nach Recycling-Baustoffverordnung (2016) das ausgehobene Tunnelmaterial als Zuschlagstoff (insbesondere für recycelten Asphalt) für die Herstellung von Asphaltmischungen oder für die Schaffung einer ungebundenen Oberschicht gemäß § 13 Z 9 verwendet werden, und zwar mit der Qualitätsklasse B-D. Dennoch darf das ausgehobene Tunnelmaterial aus rechtlicher Sicht nicht verwendet werden. Gemäß dem Bundesabfallwirtschaftsplan (2023) erfüllt das Tunnelausbruchsmaterial keine Qualitätsklasse.

Des Weiteren ist für die Bewertung von Verwertungsmöglichkeiten zu berücksichtigen, dass sich sehr große Mengen (9 Millionen m³) Tunnelausbruchsmaterial im Rahmen des FCC-Projektes ergeben werden und die Materialzusammensetzung in chemischer und mineralogischer Hinsicht auch gewissen Schwankungen unterliegen wird. Das bedeutet, dass eine Branche, die grundsätzlich das Tunnelausbruchsmaterial nur in Form von kleinen Mengen einsetzen könnte (Zuschlagstoff etc.), sollte grundsätzlich nachrangig bewertet werden. Dasselbe gilt für Branchen, die hinsichtlich der Qualität und Zusammensetzung ihrer Rohstoffe nur geringe Schwankungsbreiten dulden.

Die vorliegende umweltgeologische Bewertung des Tunnelausbruchsmaterials liefert wertvolle Einblicke in dessen Eignung für verschiedene Industriezweige und Anwendungen. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Optimierung der Materialzusammensetzung konzentrieren, um die Eignung für bestimmte industrielle Anwendungen weiter zu verbessern. Dies könnte durch gezielte Auswahl oder Mischung von Materialien geschehen, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Großes Potenzial für das Tunnelausbruchsmaterial wird in der Zementindustrie gesehen, insbesondere angesichts der hohen Nachfrage nach Zement. Ein nächster Schritt wären technische Eigenschaften der Produkte bei Einsatz des Tunnelausbruchsmaterials als Ersatzrohstoff.

6 Verzeichnisse

6.1 Literatur

- Abada, A., Abbrescia, M., AbdusSalam, S.S., et al., 2019. FCC-ee: The Lepton Collider. In: The European Physical Journal Special Topics 228 (2019), Heft 2, S. 261-623.
- BAES (Bundesamt für Ernährungssicherheit), 2024. Düngemittelzulassung. Aufrufbar unter: <https://www.baes.gv.at/zulassung/duengemittel>.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt), 2021: Verwertung von Aushub- und Ausbruchmaterial. Teil des Moduls Bauabfälle der Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen. Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1826: 36 S.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt), 2022: Messmethoden im Abfall- und -Altlastenbereich. 1. aktualisierte Auflage 2022. Erstausgabe 2017. Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1715: 106 S.
- Bauer, C., Friedle, R., Papsch, F., Spaun, S., Dankl, C., Stuzka, C., Teschner, S., 2021. Die Zementherstellung in Österreich. Wien: Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H. im Auftrag der VÖZ (Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie). 8. Auflage. www.zement.at
- BAWP (Bundes-Abfallwirtschaftsplan), 2023. Bundes-Abfallwirtschaftsplan Teil 1-3. Wien.
- Bender, W., Händle, F., Ash, E., Baeumer, E. A., Bekker, P. C. F., 1982. Handbuch für die Ziegelindustrie: Verfahren und Betriebspraxis in der Grobkeramik = Brick and tile making: procedures and operating practice in the heavy clay industries. Wiesbaden [etc.]: Bauverlag.
- BMK (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie), 2024. Grundsätze der Abfallwirtschaft. Abrufbar unter: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/awsgrundsaeetze.html (zuletzt abgerufen am 03.01.2024).
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft), 2017. Wien: Technische Grundlagen für den Einsatz von Abfällen als Ersatzrohstoffe in Anlagen zur Zementerzeugung. Online verfügbar unter Abfälle als Ersatzrohstoffe (bmk.gv.at)
- Bromiley, L., Osborne, J. A. (2022). FCC-ee Civil Engineering and Infrastructure Studies.
- BSKRB (BAUSTOFFKREISLAUF REGIO BASEL), 2024. Aufrufbar unter: <https://www.bskrb.ch/grundlagen/deponietypen/>.
- BV-Porenbeton, 2023. Abrufbar unter: <https://www.bv-porenbeton.de/index.php/porenbeton/eigenschaften> (zuletzt abgerufen am 29.11.2023).
- de Jager-Janisch, O., (2014). Ermittlung der chemischen und mineralogischen Anforderungen der Mineralrohstoffindustrie an mineralische Lagerstätten-Verwendungspotentiale von Tunnelausbruch am österreichischen Abschnitt des Brenner Basistunnels. [Masterarbeit, Montanuniversität Leoben].
- DMV (Düngemittelverordnung), 2004. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der Bestimmungen zur Durchführung des Düngemittelgesetzes 1994 erlassen werden (Düngemittelverordnung 2004).
-

- DVO (Deponieverordnung), 2008. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien.
- EDM, 2024. Liste von in der Deponieverordnung 2008 angeführten Bestimmungsmethoden. Abrufbar unter [https://edm.gv.at/edm_portal/redaList.do?seqCode=ufejqz2dkig4uqundentireLsq=trueundsearch=\(zuletzt abgerufen am 28.01.2024\)](https://edm.gv.at/edm_portal/redaList.do?seqCode=ufejqz2dkig4uqundentireLsq=trueundsearch=(zuletzt%20abgerufen%20am%2028.01.2024)).
- Elsner, H., 2017. Kaolin in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar unter: www.bgr.bund.de.
- Elsner, H., 2019. Spezialtone und -sande in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar unter: www.bgr.bund.de.
- Étarès Environnement, 2014. Valeurs limites applicables aux déchets admissibles dans une ISDND ((Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux) et une ISDI (Installation de Stockage de Déchets Inertes). Abrufbar unter: <https://www.unifer.fr/wp-content/uploads/2021/07/liste-des-parametres-et-seuils-de90-version-c.pdf>
- Fern, E. J., Di Murro, V., Soga, K., Li, Z., Scibile, L., Osborne, J. A., 2018. Geotechnical characterisation of a weak sedimentary rock mass at CERN, Geneva. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, 249-260.
- Gwosdz, W., Röhling, S., Lorenz, W. (2006). Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden: Teil 11: Glimmer.
- Haas, M., 2022. Geological and multi-analytical investigations on the predictability of application scenarios for weak, clay-rich sedimentary rock for CERN's future subsurface infrastructure in the Geneva Basin (Switzerland-France) [Doktorarbeit, Montanuniversität Leoben].
- INERIS (L'Institut national de l'environnement industriel et des risques), 2016. Classification réglementaire des déchets. Guide d'application pour la caractérisation en dangerosité. Abrufbar unter: <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/rapport-drc-15-149793-06416a-guidehp-vf2-1456135314.pdf>.
- Kumari, N., Mohan, C., 2021. Basics of clay minerals and their characteristic properties. *Clay and Clay Minerals*.
- Labahn, O., Kohlhaas, B., 1982: Ratgeber für Zementingenieure, Wiesbaden: Bauverlag. 6. Auflage.
- Lenes, J., 2022. Abschätzung der Verwertbarkeit von Tunnelausbruchmaterial. [Masterarbeit, Montanuniversität].
- Lorenz, W., Gwosdz, W., 1997. Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden: Teil 1: Tone.
- Lorenz, W., Gwosdz, W., 1999. Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden: Teil 3: Quarzrohstoffe.
- Lorenz, W., Gwosdz, W., 2003. Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden: Teil 7: Feldspäte und andere Flussmittel.
- Nievoli, G. (2023). Geotechnische Untersuchungen der westalpinen Molasse im Rahmen der Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial. [Masterarbeit, Montanuniversität Leoben].
-

- ÖNORM EN 197-1, 2011. Zement, Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Wien: ON Österreichisches Normungsinstitut.
- RBV (Recycling-Baustoffverordnung), 2016. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Pflichten bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten, die Trennung und die Behandlung von bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, die Herstellung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen.
- RECORD (REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement), 2017. Gestion et réutilisation de matériaux excavés. Comment favoriser l'économie circulaire? Abrufbar unter: https://record-net.org/storage/etudes/15-0159-1A/rapport/Rapport_record15-0159_1A.pdf
- Reiter B., Stroh R., 1995. Bundesministerium für Umwelt. Wien: Umweltbundesamt; Behandlung von Abfällen in der Zementindustrie.
- Schindler, I., Ronner, C., 1999. Stand der Technik bei der Glasherstellung. Umweltbundesamt.
- Schlunegger, F., Mosar, J., 2011. The last erosional stage of the Molasse Basin and the Alps. *International Journal of Earth Sciences*, 100, 1147-1162.
- Stark, J., Wicht, B., 2000. Zement und Kalk: Der Baustoff als Werkstoff.
- Umweltbundesamt, 2016. Abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0589.pdf> (zuletzt abgerufen am 28.01.2024).
- USG (Umweltschutzgesetz), 1983. Bundesgesetz vom 7. Oktober 1983 über den Umweltschutz. SR 814.01. Stand am 1. Januar 2024.
- VDZ, 2015. (Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie), Technischer Bericht A-2015/0117-2. Düsseldorf: Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess – Hintergrundwissen, technische Möglichkeiten und Handlungsempfehlungen.
- Viczek, S. A., Aldrian, A., Pomberger, R., Sarc, R., 2020. Determination of the material-recyclable share of SRF during co-processing in the cement industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 156, 104696.
- VVEA (Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen) vom 4. Dezember 2015). Abfallverordnung. SR 814.600. Stand am 1. April 2022.
- Wegerer, E., (2023). Bericht zur röntgendiffraktometrischen Analyse (XRD) der Proben EHa1 und EHa2.
- YTONG, 2023. Abrufbar unter: <https://www.ytong.de/> (zuletzt abgerufen am 29.11.2023).
-

6.2 Tabellen

Tabelle 1: Vergleich der festgelegten Prüfverfahren in den drei Ländern.....	13
Tabelle 2: Kationenaustauschkapazitäten und spezifische Oberflächen von Tonmineralen (Kumari und Mohan, 2021).....	21
Tabelle 3: Rohstoffanforderungen an Kaolin in Deutschland (Elsner, 2017).	23
Tabelle 4: Physikalische Anforderungen und chemische Zusammensetzung von Kaolin und kaolinitischen Tonen (Lorenz und Gwosdz, 1997).	25
Tabelle 5: Anforderungen an feuerfeste Tone (Lorenz und Gwosdz, 1997).	30
Tabelle 6: Orientierungswerte für die Merkmale von maschinell gepressten Schamottsteinen für generelle industrielle Anwendungen (Lorenz und Gwosdz, 1997).	31
Tabelle 7: Probennummer und Gewicht inkl. Eimer.	34
Tabelle 8: Rückstellproben - Probenbezeichnung und Probennummer.	34
Tabelle 9: Durch ein Unterauftragslabor durchgeführten Prüfverfahren.	36
Tabelle 10: Analysierte Elemente und zugehörige Prüfverfahren.	36
Tabelle 11: Analyse der Elemente durch Totalaufschluss mithilfe der ICP-MS.	37
Tabelle 12: Analysierte Elemente und durchgeführte Prüfverfahren in einem Unterauftragslabor.....	38
Tabelle 13: Untersuchte Parameter im Eluat gemäß den aufgelisteten Verfahren	38
Tabelle 14: Gesamtgehalte Teil I (Metalle nach Königswasseraufschluss) der zwei qualifizierten Stichproben.	41
Tabelle 15: Gesamtgehalte Teil II (Metalle nach Totalaufschluss) der zwei qualifizierten Stichproben.....	42
Tabelle 16: Metalle nach RFA.	43
Tabelle 17: Eluatgehalte der zwei qualifizierten Stichproben.	43
Tabelle 18: Gesamt- und Eluatgehalte der Rückstellproben (Köwa = Königswasseraufschluss, Total = Totalaufschluss).....	45
Tabelle 19: Mineralogische Zusammensetzung der Proben (XRD-Analyse) (Bericht von Dipl.- Ing. Dr. Eva Wegerer, MBA).....	48
Tabelle 20: Auf 100 normalisierte RFA-Werte.	50
Tabelle 21: Ergebnisse des Totalaufschlusses und zugehörige Grenzwerte in der Zementindustrie in Österreich und der Schweiz (k. R. = kein Richtwert).....	51
Tabelle 22: Hauptrohstoffe für die Zementherstellung (Bauer et al., 2021).	52
Tabelle 23: Vergleich der vorhandenen Mineralphasen in qSTP1 und qSTP2 mit anderen Ersatzrohstoffen.	56

Tabelle 24: Übersicht über Bezeichnungen, Abkürzungen, Formeln und übliche Bereiche für Portlandzemente (Stark und Wicht, 2000) (Abk. = Abkürzung).....	57
Tabelle 25: Übersicht der angestrebten Zielwerte für die einzelnen Module (Stark und Wicht, 2000).....	57
Tabelle 26: Berechnete Modulwerte.	58
Tabelle 27: Zusammensetzung einiger industriell hergestellter Gläser (Schindler und Ronner, 1999) und Vergleich mit qSTP1 und qSTP2.	60
Tabelle 28: Durchschnittliche chemische Zusammensetzungen von Dachziegel- und Mauerziegelmassen (Lorenz und Gwosdz, 1997) und Vergleich mit qSTP1 und qSTP2.	64
Tabelle 29: Einfluss verschiedener Minerale auf die Verarbeitungs- und Brenneigenschaften von Ziegelmassen laut Lorenz & Gwosdz (1997).	64
Tabelle 30: Ziegelarten und ihre Kurzzeichen gemäß DIN 105.....	67
Tabelle 31: Umrechnung der Gehalte der zwei qualifizierten Stichproben.	73
Tabelle 32: Messwerte für Gesamtgehalte von qSTP1 und qSTP2.	74
Tabelle 33: Düngemittelkategorien (DMV, 2004).	74
Tabelle 34: Schwermetallkonzentration – Grenzwerte (DMV, 2004).....	75
Tabelle 35: Organische Summenparameter – Grenzwerte (DMV, 2004).	75

6.3 Abbildungen

Abbildung 1: Verbindende Elemente der Materialcharakterisierung: Verknüpfung von geotechnischen, mineralogischen und geochemischen Analysen.	4
Abbildung 2: Darstellung der Struktur der unterirdischen Einrichtungen am CERN. Das Probenmaterial stammt vom Punkt 1 - ATLAS (Fern et al., 2018).	5
Abbildung 3: Projektgebiet und geologische Verhältnisse: Der blaue Kreis repräsentiert den derzeitigen Standort des Large Hadron Collider (LHC) (Bromiley und Osborne, 2022). .	5
Abbildung 4: Hauptstruktur des geplanten Future Circular Collider (Bromiley und Osborne, 2022).....	6
Abbildung 5: Geologische Karte (Schlunegger und Mosar, 2011).....	6
Abbildung 6: Potenzielle Recyclingszenarien für Tunnelmaterial: Ein Überblick über Vorschläge; nach (Lenes, 2022; de Jager-Janisch, 2014).	8
Abbildung 7: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens 2020 (BAWP, 2023).	10
Abbildung 8: Abfallpyramide (BMK, 2024).	12
Abbildung 9: Klassifizierung von Tonmineralen (Kumari und Mohan, 2021).	22
Abbildung 10: Der experimentelle Teil in Überblick.....	33
Abbildung 11: "Abfallhaufen" am ZAB (Foto von Dipl.-Ing. Elisabeth Hauzinger).....	33
Abbildung 12: Tunnelausbruchsmaterial.....	34
Abbildung 13: Rückstellproben.	34
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Untersuchung von Tunnelausbruchsmaterial.	49
Abbildung 15: Darstellung des Dreistoffdiagramms für die Hauptkomponenten des Zementklinkers sowie der Aschezusammensetzung ausgewählter Brennstoffe, alternativer Rohstoffe und der beiden Tunnelausbruchsproben qSTP1 und qSTP2 (dargestellt in blau) (VDZ, 2015).....	50
Abbildung 16: Zementherstellung-Produktionsablauf (Bauer et al., 2021).....	52
Abbildung 17: Anteile der Rohstoffe bei der Herstellung von Porenbeton (BV-Porenbeton, 2023).....	71

Anhang

Qualitätsklassen für Bodenrekultivierung und Erdbaumaßnahmen (BAWP, 2023).

Qualitätsklasse	Landwirtschaftliche Bodenrekultivierung	Nicht landwirtschaftliche Bodenrekultivierung	Erdbaumaßnahmen	Erdbaumaßnahmen im oder unmittelbar über dem Grundwasser
A1	JA	JA	JA*	NEIN
A2	NEIN	JA	JA	NEIN
A2-G	NEIN	JA	JA	JA
BA	JA**	JA**	JA**	NEIN
<i>„Nur bei Einhaltung der Grenzwerte sowohl für den TOC-Gesamt als auch den TOC im Eluat der Qualitätsklasse A2.“</i>				
<i>** „Nur in Abstimmung mit der für den Einbau örtlich zuständigen Abfallbehörde und nicht im oder unmittelbar oberhalb des Grundwassers.“</i>				

Betrachtung der Ergebnisse im Feststoff nach BAWP (2023) (QK = Qualitätsklasse).

		Parameter	Ergebnisse		Einheit	Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP, 2023)			
			qSTP1	qSTP2		QK A1	QK A2-G	QK A2	QK BA
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Anorganische Stoffe	Antimon (als Sb)	0,26	0,23	[mg/kg]				
		Arsen (als As)	3,8	3,9	[mg/kg]	20	30	30	50
		Barium (als Ba)	61	58	[mg/kg]				
		Blei (als Pb)	13	13	[mg/kg]	100	100	150	150
		Cadmium (als Cd)	0,1	< 0,10	[mg/kg]	0,5	1,1	1,1	2
		Chrom gesamt (als Cr)	200	200	[mg/kg]	90	90	90	300
		Chrom VI (als Cr)	< 0,2	< 0,2	[mg/kg]				
		Cobalt (als Co)	20	20	[mg/kg]	50	30	50	50
		Gold (als Au)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]				
		Kupfer (als Cu)	43	30	[mg/kg]	60	60	90	100
		Molybdän (als Mo)	0,28	0,25	[mg/kg]				
		Nickel (als Ni)	220	210	[mg/kg]	60	55	60	100
		Quecksilber (als Hg)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	0,5	0,7	0,7	1
		Selen (als Se)	3,6	3,6	[mg/kg]				
		Silber (als Ag)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]				
		Thallium (als Tl)	0,19	0,19	[mg/kg]				
		Vanadium (als V)	50	49	[mg/kg]				
		Wolfram (als W)	0,31	0,14	[mg/kg]				
		Zink (als Zn)	97	75	[mg/kg]	150	300	450	500
		Zinn (als Sn)	1,3	0,92	[mg/kg]				
	Organische Summenparameter	Ausblasbare org. gebundene Halogene	<0,05	<0,05	[mg/kg]				
		KW-Index	150	94	[mg/kg]	50	20	50	50
		PAK (16 Verbindungen nach EPA)	0,057	<0,026	[mg/kg]	2	2	4	4
		PAK (Benzo[a]pyren)	<0,026	<0,026	[mg/kg]	0,2	0,2	0,4	0,4
		PCB (7 Verbindungen)	0,027	<0,010	[mg/kg]	0,1	0,1	0,1	1
		Summe der flüchtigen aromatischen KW	<0,052	<0,051	[mg/kg]				
		TOC (als C)	< 0,100	< 0,100	[%-C]		5000	10.000	10.000

Betrachtung der Ergebnisse im Eluat nach BAWP (2023) (QK = Qualitätsklasse).

Parameter		Ergebnisse		Einheit	Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP, 2023)				
		qSTP1	qSTP2		QK A1	QK A2-G	QK A2	QK BA	
Gehalt im ELUAT (bei L/S 10)	Anorganische Stoffe	Abdampfrückstand	2600	2500	[mg/kg]		5000		
		Elektrische Leitfähigkeit	30	30	[mS/m]	50	50	50	150
		pH-Wert	9,9	9,9	[-]	6,5-11,0	6,5-9,5	6,5-11,0	6,5-11,0
		Aluminium (als Al)	49	34	[mg/kg]				
		Ammonium (als N)	2,4	1,3	[mg/kg]	8	3,5	8	8
		Antimon (als Sb)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]		0,06		
		Arsen (als As)	0,13	0,14	[mg/kg]	0,3	0,1	0,3	0,5
		Barium (als Ba)	0,24	1,2	[mg/kg]	10	5	10	10
		Beryllium (als Be)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]				
		Blei (als Pb)	0,24	0,13	[mg/kg]	0,3	0,1	0,3	0,5
		Bor (als B)	< 50	< 50	[mg/kg]				
		Cadmium (als Cd)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	0,03	0,03	0,03	0,05
		Chlorid (als Cl)	17	13	[mg/kg]	800	800	800	800
		Chrom gesamt (als Cr)	0,38	0,32	[mg/kg]	0,3	0,3	0,3	0,5
		Chrom VI (als Cr)	< 0,5	< 0,5	[mg/kg]		0,2		
		Cobalt (als Co)	0,034	0,027	[mg/kg]	1	0,1	1	1
		Cyanide, gesamt (als CN)	0,289	1,37	[mg/kg]				
		Cyanide, leicht freisetzbar (als CN)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]	0,2	0,1	0,2	0,2
		Eisen, gesamt (als Fe)	41	29	[mg/kg]				
		Fluorid (als F)	7	5,6	[mg/kg]	20	15	20	20
		Gold (als Au)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]				
		Kupfer (als Cu)	0,28	0,27	[mg/kg]	0,6	0,6	0,6	2
		Molybdän (als Mo)	0,012	0,012	[mg/kg]	0,5	0,35	0,5	0,5
		Nickel (als Ni)	0,31	0,23	[mg/kg]	0,4	0,2	0,4	0,4
		Nitrat (als N)	1,8	1,4	[mg/kg]	100	70	100	100
		Nitrit (als N)	< 1,6	< 1,6	[mg/kg]	2	0,5	2	2
		Phosphat (als P)	< 1,7	< 1,7	[mg/kg]	5	1	5	5
		Quecksilber (als Hg)	0,025	< 0,010	[mg/kg]	0,01	0,01	0,01	0,01
		Selen (als Se)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	0,1	0,1	0,1	0,1
		Silber (als Ag)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	0,2	0,2	0,2	0,2
Sulfat (als SO ₄)	570	560	[mg/kg]	2500	1500	2500	2500		

	Parameter	Ergebnisse		Einheit	Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP, 2023)			
		qSTP1	qSTP2		QK A1	QK A2-G	QK A2	QK BA
Organische Summenparameter	Thallium (als TI)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]				
	Vanadium (als V)	0,72	0,78	[mg/kg]				
	Wolfram (als W)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]				
	Zink (als Zn)	0,29	0,25	[mg/kg]	4	4	4	4
	Zinn (als Sn)	< 0,020	0,27	[mg/kg]	2	0,5	2	2
	Adsorbierbare org. gebundene Halogene	< 0,200	< 0,200	[mg/kg]	0,3	0,3	0,3	0,3
	Anionenaktive Tenside (als MBAS)	< 1	< 1	[mg/kg]	1	1	1	1
	Extrahierbare org. gebundene Halogene	< 0,100	< 0,100	[mg/kg]				
	KW-Index	0,64	0,88	[mg/kg]	5	1	5	5
	PAK (16 Verbindungen)	0,00034	< 0,00010	[mg/kg]				
	PAK (Benzo[a]pyren)	< 0,00010	0,00052	[mg/kg]				
	PCB (7 Verbindungen)	< 0,00010	< 0,00010	[mg/kg]				
	Phenolindex	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	1	0,2	1	1
	TOC (als C)	106	117	[mg/kg]		100	100	100

Qualitätsklassen gemäß Deponieverordnung.

Qualitätsklasse	Deponieverordnung (DVO, 2008)
Bodenaushubdeponie	Auf dieser Deponie dürfen nur nicht kontaminierte Bodenaushubmaterialien und nicht kontaminierte Bodenbestandteile abgelagert werden.
Inertabfalldeponie	Diese Deponie ist für die Entsorgung von inerten Abfällen, nicht kontaminierte Bodenaushubmaterialien und Bodenbestandteile sowie Gleisschotter vorgesehen.
Baurestmassendeponie	Auf der Baurestmassendeponie dürfen ausschließlich nicht gefährliche Abfälle sowie Materialien wie Aushubmaterial, Gleisschotter, Asbestabfälle, LD-Schlacke und Elektroofenschlacke direkt aus der Produktion, schlackenhaltiger Ausbauasphalt und technisches Schüttmaterial mit Schlackenanteilen sowie künstliche Mineralwolleabfälle mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften abgelagert werden.
Reststoffdeponie	Zusätzlich zu den in der Baurestmassendeponie erlaubten Abfällen dürfen in der Reststoffdeponie auch Rückstände aus thermischen Prozessen und teerhaltiger Straßenaufbruch abgelagert werden.
Massenabfalldeponie	Auf dieser Deponie ist ausschließlich die Ablagerung von nicht gefährlichen Abfällen gestattet. Dazu gehören Aushubmaterial, Gleisschotter, Asbestabfälle, schlackenhaltiger Ausbauasphalt sowie künstliche Mineralwolleabfälle mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften.

Betrachtung der Ergebnisse im Feststoff nach DVO (2008) (BAP = Bodenaushubdeponie, IAD = Inertabfalldeponie, BRMD = Baurestmassendeponie, RSD = Reststoffdeponie, MAD = Massenabfalldeponie).

		Parameter	Ergebnisse		Einheit	Deponieverordnung (DVO, 2008)				
			qSTP1	qSTP2		BAP	IAD	BRMD	RSD	MAD
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Anorganische Stoffe	Antimon (als Sb)	0,26	0,23	[mg/kg]					
		Arsen (als As)	3,8	3,9	[mg/kg]	50	200	200	5000	500
		Barium (als Ba)	61	58	[mg/kg]					10000
		Blei (als Pb)	13	13	[mg/kg]	150	500	500		5000
		Cadmium (als Cd)	0,1	< 0,10	[mg/kg]	2	4	10	5000	30
		Chrom gesamt (als Cr)	200	200	[mg/kg]	300	500	500		8000
		Chrom VI (als Cr)	< 0,2	< 0,2	[mg/kg]					
		Cobalt (als Co)	20	20	[mg/kg]	50	50	100		500
		Gold (als Au)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]					
		Kupfer (als Cu)	43	30	[mg/kg]	100	500	500		5000
		Molybdän (als Mo)	0,28	0,25	[mg/kg]					
		Nickel (als Ni)	220	210	[mg/kg]	100	500	500		2000
		Quecksilber (als Hg)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	1	2	3	20	20
		Selen (als Se)	3,6	3,6	[mg/kg]					
		Silber (als Ag)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]					100
		Thallium (als Tl)	0,19	0,19	[mg/kg]					
		Vanadium (als V)	50	49	[mg/kg]					
	Wolfram (als W)	0,31	0,14	[mg/kg]						
	Zink (als Zn)	97	75	[mg/kg]	500	1000	1500		5000	
	Zinn (als Sn)	1,3	0,92	[mg/kg]						
Organische Summen- parameter	Ausblasbare org. gebundene Halogene	< 0,05	< 0,05	[mg/kg]					1000	
	KW-Index	150	94	[mg/kg]	50	500	1000	5000	20000	
	PAK (16 Verbindungen nach EPA)	0,057	< 0,026	[mg/kg]	4	20	30	300	300	
	PAK (Benzo[a]pyren)	< 0,026	< 0,026	[mg/kg]	0,4	2				
	PCB (7 Verbindungen)	0,027	< 0,010	[mg/kg]		1				
	Summe der flüchtigen aromatischen KW	< 0,052	< 0,051	[mg/kg]						
TOC (als C)	< 0,100	< 0,100	[%-C]	30000	30000	30000	50000	50000		

Betrachtung der Ergebnisse im Eluat nach DVO (2008) (BAP = Bodenaushubdeponie, IAD = Inertabfalldeponie, BRMD = Baurestmassendeponie, RSD = Reststoffdeponie, MAD = Massenabfalldeponie).

Parameter		Ergebnisse		Einheit	Deponieverordnung (DVO, 2008)					
		qSTP1	qSTP2		BAP	IAD	BRMD	RSD	MAD	
Gehalt im ELUAT (bei L/S 10)	Anorganische Stoffe	Abdampfrückstand	2600	2500	[mg/kg]				60000	100000
		Elektrische Leitfähigkeit	30	30	[mS/m]	150	150	800		
		pH-Wert	9,9	9,9	[-]	6,5-11	6,5-12	6,5-13	6-12	6-13
		Aluminium (als Al)	49	34	[mg/kg]				100	
		Ammonium (als N)	2,4	1,3	[mg/kg]	8	8	40	300	10000
		Antimon (als Sb)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]		0,06		0,7	5
		Arsen (als As)	0,13	0,14	[mg/kg]	0,5	0,5	0,75	2	25
		Barium (als Ba)	0,24	1,2	[mg/kg]	10	20	20	100	300
		Beryllium (als Be)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]					
		Blei (als Pb)	0,24	0,13	[mg/kg]	1	0,5	2	10	50
		Bor (als B)	< 50	< 50	[mg/kg]			30		
		Cadmium (als Cd)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	0,05	0,04	0,5	1	5
		Chlorid (als Cl)	17	13	[mg/kg]		800	5000	1	1
		Chrom gesamt (als Cr)	0,38	0,32	[mg/kg]	1	0,5	2	10	70
		Chrom VI (als Cr)	< 0,5	< 0,5	[mg/kg]	1	1	0,5		20
		Cobalt (als Co)	0,034	0,027	[mg/kg]	1	1	2	5	50
		Cyanide, gesamt (als CN)	0,289	1,37	[mg/kg]					
		Cyanide, leicht freisetzbar (als CN)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]	0,2	0,2	1	1	20
		Eisen, gesamt (als Fe)	41	29	[mg/kg]				20*	
		Fluorid (als F)	7	5,6	[mg/kg]	20	10	50	150	500
		Gold (als Au)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]					
		Kupfer (als Cu)	0,28	0,27	[mg/kg]	2	2	10	50	100
		Molybdän (als Mo)	0,012	0,012	[mg/kg]		0,5		10	30
		Nickel (als Ni)	0,31	0,23	[mg/kg]	1	0,4	2	10	40
		Nitrat (als N)	1,8	1,4	[mg/kg]	100	100	500		1
		Nitrit (als N)	< 1,6	< 1,6	[mg/kg]	2	2	10	15	1000
		Phosphat (als P)	< 1,7	< 1,7	[mg/kg]	5	5	50	50	
Quecksilber (als Hg)	0,025	< 0,010	[mg/kg]	0,01	0,01	0,05	0,1	0,5		
Selen (als Se)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]		0,1		0,5	7		
Silber (als Ag)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	0,2	0,2	1	1	10		

Parameter	Ergebnisse		Einheit	Deponieverordnung (DVO, 2008)					
	qSTP1	qSTP2		BAP	IAD	BRMD	RSD	MAD	
Sulfat (als SO ₄)	570	560	[mg/kg]		1000	6000		25000	
Thallium (als Tl)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]						
Vanadium (als V)	0,72	0,78	[mg/kg]						
Wolfram (als W)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]						
Zink (als Zn)	0,29	0,25	[mg/kg]	20	4	20	50	200	
Zinn (als Sn)	< 0,020	0,27	[mg/kg]	2	2	10	20	200	
Organische Summenparameter	Adsorbierbare org. gebundene Halogene	< 0,200	< 0,200	[mg/kg]					
	Anionenaktive Tenside (als MBAS)	< 1	< 1	[mg/kg]	1	1	5	20	1
	Extrahierbare org. gebundene Halogene	< 0,100	< 0,100	[mg/kg]					
	KW-Index	0,64	0,88	[mg/kg]	5	5	50	100	200
	PAK (16 Verbindungen)	0,00034	< 0,00010	[mg/kg]					
	PAK (Benzo[a]pyren)	< 0,00010	0,00052	[mg/kg]					
	PCB (7 Verbindungen)	< 0,00010	< 0,00010	[mg/kg]					
	Phenolindex	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]		1			1000
	TOC (als C)	106	117	[mg/kg]	200	500	500	500	2500
	* "Nur gültig für mit hydraulischen Bindemitteln stabilisierte Abfälle, ausgenommen stabilisierte Schlacken und Aschen aus (Mit-)Verbrennungsanlagen im Sinne der Abfallverbrennungsverordnung, BGBl. II Nr. 389/2002, in der Fassung der Verordnung BGBl. II Nr. 296/2007, sofern die Anforderungen des Anhangs 5 Kapitel 3.2.3 a) eingehalten werden."								

Qualitätsklassen gemäß Recycling-Baustoffverordnung (RBV, 2016).

Qualitätsklasse	Verwendung gemäß Recycling-Baustoffverordnung (RBV, 2016)
U-A; U-B	Gesteinskörnungen für den ungebundenen sowie für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz
U-E	Gesteinskörnungen zur Verwendung im Trapez des Gleiskörpers oder in Verkehrsflächen gemäß § 13 Z 4 sowie für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz
H-B	Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton ab der Festigkeitsklasse C12/15 oder für die Herstellung von Beton der Festigkeitsklasse C8/10 ab der Expositionsklasse XC1 gemäß ÖNORM B 4710-1
B-B; B-C; B-D	Gesteinskörnungen (insbesondere Ausbauasphalt) zur Herstellung von Asphaltmischgut oder zur Herstellung einer ungebundenen oberen Tragschicht gemäß § 13 Z 9

Betrachtung der Ergebnisse im Feststoff nach RBV (2016) (QK = Qualitätsklasse).

		Parameter	Ergebnisse		Einheit	Recycling-Baustoffverordnung (RBV, 2016)						
			qSTP1	qSTP2		QK U-A	QK U-B	QK U-E	QK H-B	QK B-B	QK B-C	QK B-D
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Anorganische Stoffe	Antimon (als Sb)	0,26	0,23	[mg/kg]							
		Arsen (als As)	3,8	3,9	[mg/kg]			50				
		Barium (als Ba)	61	58	[mg/kg]							
		Blei (als Pb)	13	13	[mg/kg]	150	150	150	150	150	150	500
		Cadmium (als Cd)	0,1	< 0,10	[mg/kg]			2				
		Chrom gesamt (als Cr)	200	200	[mg/kg]	90	90	300	90	90	90	2500
		Chrom VI (als Cr)	< 0,2	< 0,2	[mg/kg]							
		Cobalt (als Co)	20	20	[mg/kg]			50				
		Gold (als Au)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]							
		Kupfer (als Cu)	43	30	[mg/kg]	90	90	100	90	90	90	500
		Molybdän (als Mo)	0,28	0,25	[mg/kg]							
		Nickel (als Ni)	220	210	[mg/kg]	60	60	100	60	60	60	500
		Quecksilber (als Hg)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	0,7	0,7	1	0,7	0,7	0,7	0,7
		Selen (als Se)	3,6	3,6	[mg/kg]							
		Silber (als Ag)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]							
		Thallium (als Tl)	0,19	0,19	[mg/kg]							
		Vanadium (als V)	50	49	[mg/kg]							
		Wolfram (als W)	0,31	0,14	[mg/kg]							
	Zink (als Zn)	97	75	[mg/kg]	450	450	500	450	450	450	450	
	Zinn (als Sn)	1,3	0,92	[mg/kg]								
Organische Summenparameter	Ausblasbare org. gebundene Halogene	< 0,05	< 0,05	[mg/kg]								
	KW-Index	150	94	[mg/kg]	150	200	150	200	200	200	200	
	PAK (16 Verbindungen nach EPA)	0,057	< 0,026	[mg/kg]	12	20	12	20	20	300	20	
	PAK (Benzo[a]pyren)	< 0,026	< 0,026	[mg/kg]			1,2					
	PCB (7 Verbindungen)	0,027	< 0,010	[mg/kg]								
	Summe der flüchtigen aromatischen KW	< 0,052	< 0,051	[mg/kg]								
	TOC (als C)	< 0,100	< 0,100	[%-C]			30000					

Betrachtung der Ergebnisse im Eluat nach RBV (2016) (QK = Qualitätsklasse).

Parameter		Ergebnisse		Einheit	Recycling-Baustoffverordnung (RBV, 2016)							
		qSTP1	qSTP2		QK U-A	QK U-B	QK U-E	QK H-B	QK B-B	QK B-C	QK B-D	
Gehalt im ELUAT (bei L/S 10)	Anorganische Stoffe	Abdampfrückstand	2600	2500	[mg/kg]							
		Elektrische Leitfähigkeit	30	30	[mS/m]	150	150	150		150	150	150
		pH-Wert	9,9	9,9	[-]	7,5-12,5	7,5-12,5	7,5-12,5	<12,5	7,5-12,5	7,5-12,5	<12,5
		Aluminium (als Al)	49	34	[mg/kg]							
		Ammonium (als N)	2,4	1,3	[mg/kg]	4	8	4	8	8	8	8
		Antimon (als Sb)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]							
		Arsen (als As)	0,13	0,14	[mg/kg]							
		Barium (als Ba)	0,24	1,2	[mg/kg]							
		Beryllium (als Be)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]							
		Blei (als Pb)	0,24	0,13	[mg/kg]							
		Bor (als B)	< 50	< 50	[mg/kg]							
		Cadmium (als Cd)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]							
		Chlorid (als Cl)	17	13	[mg/kg]	800	1000	800	1000	1000	1000	1000
		Chrom gesamt (als Cr)	0,38	0,32	[mg/kg]	0,6	1	0,6	1	1	1	1
		Chrom VI (als Cr)	<0,5	<0,5	[mg/kg]							
		Cobalt (als Co)	0,034	0,027	[mg/kg]			1				
		Cyanide, gesamt (als CN)	0,289	1,37	[mg/kg]							
		Cyanide, leicht freisetzbar (als CN)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]							
		Eisen, gesamt (als Fe)	41	29	[mg/kg]							
		Fluorid (als F)	7	5,6	[mg/kg]			10				10
		Gold (als Au)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]							
		Kupfer (als Cu)	0,28	0,27	[mg/kg]	1	2	1	2	2	2	2
		Molybdän (als Mo)	0,012	0,012	[mg/kg]			0,5				0,5
		Nickel (als Ni)	0,31	0,23	[mg/kg]	0,4	0,6	0,4				
		Nitrat (als N)	1,8	1,4	[mg/kg]							
		Nitrit (als N)	< 1,6	< 1,6	[mg/kg]	2	2	2		2	2	2
Phosphat (als P)	< 1,7	< 1,7	[mg/kg]									
Quecksilber (als Hg)	0,025	< 0,010	[mg/kg]									
Selen (als Se)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]									
Silber (als Ag)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]									
Sulfat (als SO ₄)	570	560	[mg/kg]	2500	6000	2500	6000	6000	6000	6000		

	Parameter	Ergebnisse		Einheit	Recycling-Baustoffverordnung (RBV, 2016)						
		qSTP1	qSTP2		QK U-A	QK U-B	QK U-E	QK H-B	QK B-B	QK B-C	QK B-D
Organische Summenparameter	Thallium (als Tl)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]							
	Vanadium (als V)	0,72	0,78	[mg/kg]							
	Wolfram (als W)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]							
	Zink (als Zn)	0,29	0,25	[mg/kg]							
	Zinn (als Sn)	< 0,020	0,27	[mg/kg]							
	Adsorbierbare org. gebundene Halogene	< 0,200	< 0,200	[mg/kg]							
	Anionenaktive Tenside (als MBAS)	< 1	< 1	[mg/kg]			1				
	Extrahierbare org. gebundene Halogene	< 0,100	< 0,100	[mg/kg]							
	KW-Index	0,64	0,88	[mg/kg]			5				
	PAK (16 Verbindungen)	0,00034	< 0,00010	[mg/kg]							
	PAK (Benzo[a]pyren)	< 0,00010	0,00052	[mg/kg]							
	PCB (7 Verbindungen)	< 0,00010	< 0,00010	[mg/kg]							
	Phenolindex	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]							
	TOC (als C)	106	117	[mg/kg]	100	200	100	200			

Betrachtung der Ergebnisse im Feststoff gemäß der EU-Deponierichtlinie.

Parameter		Ergebnisse		Einheit	Grenzwerte für Abfälle, die auf Deponien für <u>INERTABFÄLLE</u> angenommen werden	Grenzwerte für <u>NICHT GEFÄHRLICHE</u> <u>ABFÄLLE</u>	
		qSTP1	qSTP2				
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Anorganische Stoffe	Antimon (als Sb)	0,26	0,23	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Arsen (als As)	3,8	3,9	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Barium (als Ba)	61	58	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Blei (als Pb)	13	13	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Cadmium (als Cd)	0,1	< 0,10	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Chrom gesamt (als Cr)	200	200	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Chrom VI (als Cr)	< 0,2	< 0,2	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Cobalt (als Co)	20	20	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Gold (als Au)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Kupfer (als Cu)	43	30	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Molybdän (als Mo)	0,28	0,25	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Nickel (als Ni)	220	210	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Quecksilber (als Hg)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Selen (als Se)	3,6	3,6	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Silber (als Ag)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Thallium (als Tl)	0,19	0,19	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Vanadium (als V)	50	49	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Wolfram (als W)	0,31	0,14	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Zink (als Zn)	97	75	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Zinn (als Sn)	1,3	0,92	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
Organische Summen- parameter	Ausblasbare org. gebundene Halogene	<0,05	<0,05	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
	KW-Index	150	94	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
	PAK (16 Verbindungen nach EPA)	0,057	<0,026	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
	PAK (Benzo[a]pyren)	<0,026	<0,026	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
	PCB (7 Verbindungen)	0,027	<0,010	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
	Summe der flüchtigen aromatischen KW	<0,052	<0,051	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
	TOC (als C)	< 0,100	< 0,100	[%-C]	kein Richtwert	kein Richtwert	

Betrachtung der Ergebnisse im Eluat gemäß der EU-Deponierichtlinie.

Parameter		Ergebnisse		Einheit	Grenzwerte für Abfälle, die auf Deponien für <u>INERTABFÄLLE</u> angenommen werden	Grenzwerte für <u>NICHT</u> <u>GEFÄHRLICHE</u> <u>ABFÄLLE</u>	
		qSTP1	qSTP2				
Gehalt im ELUAT (bei L/S 10)	Anorganische Stoffe	Abdampfrückstand	2600	2500	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Elektrische Leitfähigkeit	30	30	[mS/m]	kein Richtwert	kein Richtwert
		pH-Wert	9,9	9,9	[-]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Aluminium (als Al)	49	34	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Ammonium (als N)	2,4	1,3	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Antimon (als Sb)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	0,06	0,7
		Arsen (als As)	0,13	0,14	[mg/kg]	0,5	2
		Barium (als Ba)	0,24	1,2	[mg/kg]	20	100
		Beryllium (als Be)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Blei (als Pb)	0,24	0,13	[mg/kg]	0,5	10
		Bor (als B)	< 50	< 50	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Cadmium (als Cd)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	0,04	1
		Chlorid (als Cl)	17	13	[mg/kg]	800	15000
		Chrom gesamt (als Cr)	0,38	0,32	[mg/kg]	0,5	10
		Chrom VI (als Cr)	< 0,5	< 0,5	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Cobalt (als Co)	0,034	0,027	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Cyanide, gesamt (als CN)	0,289	1,37	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Cyanide, leicht freisetzbar (als CN)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Eisen, gesamt (als Fe)	41	29	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Fluorid (als F)	7	5,6	[mg/kg]	10	150
		Gold (als Au)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Kupfer (als Cu)	0,28	0,27	[mg/kg]	2	50
		Molybdän (als Mo)	0,012	0,012	[mg/kg]	0,5	10
		Nickel (als Ni)	0,31	0,23	[mg/kg]	0,4	10
		Nitrat (als N)	1,8	1,4	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
		Nitrit (als N)	< 1,6	< 1,6	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
Phosphat (als P)	< 1,7	< 1,7	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert		
Quecksilber (als Hg)	0,025	< 0,010	[mg/kg]	0,01	0,2		
Selen (als Se)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	0,1	0,5		

Parameter	Ergebnisse		Einheit	Grenzwerte für Abfälle, die auf Deponien für <u>INERTABFÄLLE</u> angenommen werden	Grenzwerte für <u>NICHT</u> <u>GEFÄHRLICHE</u> <u>ABFÄLLE</u>	
	qSTP1	qSTP2				
Silber (als Ag)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
Sulfat (als SO ₄)	570	560	[mg/kg]	1000	20000	
Thallium (als Tl)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
Vanadium (als V)	0,72	0,78	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
Wolfram (als W)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
Zink (als Zn)	0,29	0,25	[mg/kg]	4	50	
Zinn (als Sn)	< 0,020	0,27	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert	
Organische Summenparameter	Adsorbierbare org. gebundene Halogene	< 0,200	< 0,200	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
	Anionenaktive Tenside (als MBAS)	< 1	< 1	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
	Extrahierbare org. gebundene Halogene	< 0,100	< 0,100	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
	KW-Index	0,64	0,88	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
	PAK (16 Verbindungen)	0,00034	< 0,00010	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
	PAK (Benzo[a]pyren)	< 0,00010	0,00052	[mg/kg]	kein Richtwert	kein Richtwert
	PCB (7 Verbindungen)	< 0,00010	< 0,00010	[mg/kg]	1	kein Richtwert
	Phenolindex	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	1	kein Richtwert
	TOC (als C)	106	117	[mg/kg]	30000	kein Richtwert

Qualitätsklassen gemäß VVEA.

Qualitätsklasse	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA)
Typ A	Deponien des Typs A sind speziell für unverschmutztes Boden- und Aushubmaterial bestimmt, das nicht für Wiederverwertung oder Rekultivierung geeignet ist. Dies umfasst Aushub- und Ausbruchmaterial, Kieswaschschlamm, abgetragenen Ober- und Unterboden sowie Geschiebe aus Geschiebesammlern (BSKRB, 2024).
Typ B	Deponien des Typs B nehmen wenig schadstoffhaltige, gesteinsähnliche Abfälle auf, die nicht recycelt werden können. Das umfasst unter anderem wenig bis leicht verschmutztes Aushubmaterial, nicht wiederverwertbare Bauabfälle mit einem hohen Anteil an Steinen oder gesteinsähnlichen Bestandteilen, mineralische Abfälle mit fest gebundenen Asbestfasern sowie industrielle Inertstoffe wie Flach- und Verpackungsglas oder Abfälle aus der Keramik, Ziegel, Fliesen und Steingutproduktion nach dem Brennvorgang (BSKRB, 2024).
Typ C	Deponien des Typs C sind für die Entsorgung von industriellen Reststoffen mit erhöhtem Schadstoffgehalt und geringer Schadstofflöslichkeit vorgesehen. Diese Abfälle werden in der Regel nach einer Vorbehandlung abgelagert, die oft notwendig ist, um die Umweltauswirkungen zu minimieren. Dazu gehören Rückstände und Schlämme aus der industriellen Abwasserbehandlung, Rauchgasreinigungsrückstände aus Abfallverbrennungsanlagen mit vorheriger Metallrückgewinnung, Ofenauskleidungen und andere metallhaltige, anorganische sowie schwerlösliche Abfälle (BSKRB, 2024).
Typ D	Deponien des Typs D sind für die Entsorgung von Verbrennungsrückständen wie Schlacke aus Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA), Asche aus Klärschlammverbrennungsanlagen und anderen schadstoffbelasteten Abfällen vorgesehen (BSKRB, 2024).
Typ E	Deponien des Typs E dienen der Aufnahme von Abfällen mit einem erhöhten organischen Anteil und Schadstoffbelastung. Diese umfassen unter anderem belastetes Aushubmaterial von Bauvorhaben auf kontaminierten Standorten, Rückstände aus der Behandlung von Sandfangmaterial, Abfälle infolge von Hochwasser- oder Brandereignissen sowie verschiedene Arten von Aschen wie Filterasche, Bettasche und Rostasche (BSKRB, 2024).

Betrachtung der Ergebnisse im Feststoff gemäß der VVEA in der Schweiz.

Parameter		Ergebnisse		Einheit	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA)					
		qSTP1	qSTP2		TYP A	TYP B	TYP C	TYP D	TYP E	
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	Anorganische Stoffe	Antimon (als Sb)	0,26	0,23	[mg/kg]	3	3		50	50
		Arsen (als As)	3,8	3,9	[mg/kg]	15	15		50	50
		Barium (als Ba)	61	58	[mg/kg]					
		Blei (als Pb)	13	13	[mg/kg]	50	50		2000	2000
		Cadmium (als Cd)	0,1	< 0,10	[mg/kg]	1	1		10	10
		Chrom gesamt (als Cr)	200	200	[mg/kg]	50	50		1000	1000
		Chrom VI (als Cr)	< 0,2	< 0,2	[mg/kg]	0,05	0,05		0,5	0,5
		Cobalt (als Co)	20	20	[mg/kg]					
		Gold (als Au)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]					
		Kupfer (als Cu)	43	30	[mg/kg]	40	40		5000	5000
		Molybdän (als Mo)	0,28	0,25	[mg/kg]					
		Nickel (als Ni)	220	210	[mg/kg]	50	50		1000	1000
		Quecksilber (als Hg)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	0,5	0,5	5	5	5
		Selen (als Se)	3,6	3,6	[mg/kg]					
		Silber (als Ag)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]					
		Thallium (als Tl)	0,19	0,19	[mg/kg]					
		Vanadium (als V)	50	49	[mg/kg]					
		Wolfram (als W)	0,31	0,14	[mg/kg]					
		Zink (als Zn)	97	75	[mg/kg]	150	150		5000	5000
	Zinn (als Sn)	1,3	0,92	[mg/kg]						
Organische Summenparameter	Ausblasbare org. gebundene Halogene	< 0,05	< 0,05	[mg/kg]						
	KW-Index	150	94	[mg/kg]	50	50	500	500	5000	
	PAK (16 Verbindungen nach EPA)	0,057	< 0,026	[mg/kg]	3	3	25	25	250	
	PAK (Benzo[a]pyren)	< 0,026	< 0,026	[mg/kg]	0,3	0,3	3	3	10	
	PCB (7 Verbindungen)	0,027	< 0,010	[mg/kg]	0,1	0,1	1	1	10	
	Summe der flüchtigen aromatischen KW	< 0,052	< 0,051	[mg/kg]						
TOC (als C)	< 0,100	< 0,100	[%-C]			20000	20000	50000		

Betrachtung der Ergebnisse im Eluat gemäß der VVEA in der Schweiz.

Parameter		Ergebnisse		Einheit	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA)					
		qSTP1	qSTP2		TYP A	TYP B	TYP C	TYP D	TYP E	
Gehalt im ELUAT (bei L/S 10)	Anorganische Stoffe	Abdampfrückstand	2600	2500	[mg/kg]					
		Elektrische Leitfähigkeit	30	30	[mS/m]					
		pH-Wert	9,9	9,9	[-]			6-12		
		Aluminium (als Al)	49	34	[mg/kg]					
		Ammonium (als N)	2,4	1,3	[mg/kg]		0,5	5		
		Antimon (als Sb)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]					
		Arsen (als As)	0,13	0,14	[mg/kg]					
		Barium (als Ba)	0,24	1,2	[mg/kg]					
		Beryllium (als Be)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]					
		Blei (als Pb)	0,24	0,13	[mg/kg]					
		Bor (als B)	< 50	< 50	[mg/kg]					
		Cadmium (als Cd)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]					
		Chlorid (als Cl)	17	13	[mg/kg]					
		Chrom gesamt (als Cr)	0,38	0,32	[mg/kg]					
		Chrom VI (als Cr)	< 0,5	< 0,5	[mg/kg]			0,1		
		Cobalt (als Co)	0,034	0,027	[mg/kg]					
		Cyanide, gesamt (als CN)	0,289	1,37	[mg/kg]					
		Cyanide, leicht freisetzbar (als CN)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]		0,02	0,1	0,02	0,3
		Eisen, gesamt (als Fe)	41	29	[mg/kg]					
		Fluorid (als F)	7	5,6	[mg/kg]		2	10		
		Gold (als Au)	< 0,020	< 0,020	[mg/kg]					
		Kupfer (als Cu)	0,28	0,27	[mg/kg]					
		Molybdän (als Mo)	0,012	0,012	[mg/kg]					
		Nickel (als Ni)	0,31	0,23	[mg/kg]					
Nitrat (als N)	1,8	1,4	[mg/kg]							
Nitrit (als N)	< 1,6	< 1,6	[mg/kg]		1	1				
Phosphat (als P)	< 1,7	< 1,7	[mg/kg]			10				
Quecksilber (als Hg)	0,025	< 0,010	[mg/kg]							
Selen (als Se)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]							
Silber (als Ag)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]							

Parameter		Ergebnisse		Einheit	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA)				
		qSTP1	qSTP2		TYP A	TYP B	TYP C	TYP D	TYP E
Organische Summenparameter	Sulfat (als SO ₄)	570	560	[mg/kg]					
	Thallium (als Tl)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]					
	Vanadium (als V)	0,72	0,78	[mg/kg]					
	Wolfram (als W)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]					
	Zink (als Zn)	0,29	0,25	[mg/kg]					
	Zinn (als Sn)	< 0,020	0,27	[mg/kg]					
	Adsorbierbare org. gebundene Halogene	< 0,200	< 0,200	[mg/kg]					
	Anionenaktive Tenside (als MBAS)	< 1	< 1	[mg/kg]					
	Extrahierbare org. gebundene Halogene	< 0,100	< 0,100	[mg/kg]					
	KW-Index	0,64	0,88	[mg/kg]					
	PAK (16 Verbindungen)	0,00034	< 0,00010	[mg/kg]					
	PAK (Benzo[a]pyren)	< 0,00010	0,00052	[mg/kg]					
	PCB (7 Verbindungen)	< 0,00010	< 0,00010	[mg/kg]					
	Phenolindex	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]					
	TOC (als C)	106	117	[mg/kg]					

Qualitätsklassen gemäß Étarès Environnement.

Qualitätsklasse	Étarès Environnement, 2014
Klasse 1	Deponien für gefährliche Abfälle.
Klasse 2	Deponien für nicht gefährliche Abfälle.
Klasse 3	Deponien für inerte Abfälle.

Betrachtung der Ergebnisse im Feststoff als auch im Eluat gemäß Étarès Environnement in Frankreich.

Parameter	Ergebnisse		Einheit	Étarès Environnement, 2014		
	qSTP1	qSTP2		Klasse 3	Klasse 2	
Gehalt im FESTSTOFF (Gesamtgehalte)	KW-Index	150	94	[mg/kg]	500	5000
	PAK (16 Verbindungen nach EPA)	0,057	< 0,026	[mg/kg]	50	100
	PCB (7 Verbindungen)	0,027	< 0,010	[mg/kg]	1	50
	TOC (als C)	< 0,100	< 0,100	[%-C]	30000	50000
Gehalt im ELUAT (bei L/S 10)	Antimon (als Sb)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	0,06	0,7
	Arsen (als As)	0,13	0,14	[mg/kg]	0,5	2
	Blei (als Pb)	0,24	0,13	[mg/kg]	0,5	10
	Cadmium (als Cd)	< 0,010	< 0,010	[mg/kg]	0,04	1
	Chlorid (als Cl)	17	13	[mg/kg]	800	15000
	Chrom gesamt (als Cr)	0,38	0,32	[mg/kg]	0,5	10
	Fluorid (als F)	7	5,6	[mg/kg]	10	150
	Kupfer (als Cu)	0,28	0,27	[mg/kg]	2	50
	Molybdän (als Mo)	0,012	0,012	[mg/kg]	0,5	10
	Nickel (als Ni)	0,31	0,23	[mg/kg]	0,4	10
	Quecksilber (als Hg)	0,025	< 0,010	[mg/kg]	0,01	0,2
	Selen (als Se)	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	0,1	0,5
	Sulfat (als SO ₄)	570	560	[mg/kg]	1000	20000
	Zink (als Zn)	0,29	0,25	[mg/kg]	4	50
	Phenolindex	< 0,10	< 0,10	[mg/kg]	1	10
	TOC (als C)	106	117	[mg/kg]	500	800