




Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit



Sensortechnologien für online- Analysen
von Tunnelausbruchmaterial

Mathias Erdkönig, BSc

Oktober 2023

„Don't let anyone ever put you down,
because only you know your true potential.”

Craig Breen (*1990 – †2023)

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschreibt die Implementierung von sensorgestützter Merkmalanalyse, in Form der online- Analyse, zur Charakterisierung von Tunnelausbruchmaterial. Durch die immer stärker werdenden Klimaproteste und Maßnahmen zur CO₂- Reduktion, besteht die Motivation zur Findung von neuen Ansätzen, damit die Bauindustrie in Zukunft allen ökologischen Zielen entspricht. Zudem kommt es durch die Vernetzung der Gesellschaft zur Errichtung von Infrastrukturprojekten, welche stetig an Größe zunehmen. Vor allem bei Tunnelbauprojekten kommt es mit dem Bau von Basistunneln, zu einer großen Menge an Tunnelausbruchmaterial, welches zurzeit oftmals deponiert wird. Die Deponierung ist weder Ziel der angestrebten Kreislaufwirtschaft noch in der Genehmigungsphase erforderlichen Umweltverträglichkeitsprüfung. Mit dieser Arbeit wird ein Ansatz zur Wiederverwertung dieses Stoffstromes behandelt. Die online- Analyse charakterisiert den anfallenden Stoffstrom direkt am Förderband, durch die Emission von elektromagnetischen Wellen unterschiedlicher Wellenlänge. Durch das unterschiedliche Reflexions- oder Absorptionsverhalten der Geomaterialien, werden die Materialparameter aus den detektierten Strahlungen abgeleitet. Durch eine ausführliche Recherche über Sensortechnologien und Möglichkeiten zur Detektion von Gesteinseigenschaften in Verbindung von Anforderungen an möglichen Endprodukten wird die Umsetzung einer online- Analyseanlage auf einer Tunnelbaustelle geprüft. Anhand der unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten sowie der Vor- und Nachteile wird die Eignung jeder Sensortechnologie geprüft. Anschließend wird aus der resultierenden Sensorkombination eine Prototyp- Anlage, sowohl für zyklische als auch für kontinuierliche Tunnelvortriebe, zusammengestellt. Eine online- Analyseanlage bringt zusätzliche Anforderungen an das Projektmanagement eines Tunnelprojektes. Dafür wird ein Prozess erstellt, welcher die Implementierung einer online- Analyseanlage in den derzeitigen Tunnelbauprozess berücksichtigt, um in Zukunft vielversprechende Ergebnisse zu erhalten. In weiterer Folge sind Ansätze zur Digitalisierung einer Tunnelbaustelle genannt. Diese wird durch die Kombination der Daten aus dem Vortrieb und der online- Analyse aufgebaut. Abschließend sind die Vorteile der Integration einer online- Analyseanlage auf einer Tunnelbaustelle erläutert.

Abstract

This thesis describes the implementation of sensor-based feature analysis, in the form of online- analysis, for the characterization of excavated tunnel material. Due to the increasing climate protests and measures for CO₂- reduction, there is a motivation to find new approaches, so that the construction industry meets all ecological goals in the future. In addition, the interconnectedness of society leads to the construction of infrastructure projects, which are constantly increasing in size. Especially in tunnel construction projects there is, with the construction of base tunnels, a large amount of excavated tunnel material, which is currently often landfilled. Landfilling is neither the aim of the intended circular economy nor of the environmental impact assessment required in the approval phase. This work addresses an approach to recycling this material stream. The online- analysis characterizes the accumulating material flow directly at the conveyor belt, by the emission of electromagnetic waves of different wavelengths. Due to the different reflection or absorption behaviour of the geomaterials, the material parameters are derived from the detected radiations. Through an extensive research on sensor technologies and possibilities for the detection of rock properties in connection with requirements for possible end products, the implementation of an online- analysis system on a tunnel construction site is examined. Based on the different application possibilities as well as the advantages and disadvantages, the suitability of each sensor technology is evaluated. Subsequently, a prototype system will be assembled from the resulting sensor combination, both for cyclic and continuous tunnelling. An online- analysis system brings additional requirements to the project management of a tunnel project. For this purpose, a process is created which considers the implementation of an online- analysis system in the current tunnel construction process in order to obtain promising results in the future. Furthermore, approaches for the digitalization of a tunnel construction site are mentioned. This is built by combining the data from tunnelling and online- analysis. Finally, the advantages of integrating an online- analysis system on a tunnel construction site are explained.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen Menschen bedanken, welche mich während dem Verfassen dieser Diplomarbeit unterstützt und mich während meines Masterstudiums ‚Rohstoffgewinnung und Tunnelbau‘ mit dem Schwerpunktfach ‚Geotechnik und Tunnelbau‘ an der Montanuniversität Leoben, motiviert haben.

Zuerst ein großes Dankeschön an die Betreuer dieser Arbeit. Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler und Frau Dipl.-Ing. Elisabeth Hauzinger, welche mir mit Ratschlägen das Verfassen dieser Arbeit erleichtert haben. Vielen Dank für die flexible und angenehme Zusammenarbeit.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kommilitonen bedanken, die mir während der Prüfungsphasen mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen. Des Weiteren möchte ich mich für die amüsanten Momente und vor allem für die geteilten Erfolge bedanken.

Der wohl größte Dank gebührt meiner Familie und meinen Freunden, welche für mich immer ein offenes Ohr haben und mich während meines Studiums begleitet haben. Besonders danke ich meiner Mutter Barbara, meiner Oma Margarete sowie meiner Freundin Melinda, welche in schwierigen Phasen zu mir stehen und mich ständig ermutigen meine Ziele zu verfolgen.



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

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

Datum 06.10.2023

Unterschrift Verfasser/in
Mathias Erdkönig

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Österreichische Abfallpolitik	1
1.2	Ziele der Richtlinie 2008/98	2
1.3	Österreichische Abfallpolitik im Wandel	2
1.4	Ziele der Republik Österreich in Zukunft – Kreislaufwirtschaftsstrategie	3
1.5	Gliederung der Arbeit	4
2	Optische Merkmalanalyse	6
2.1	Detektion und Datenverarbeitung	8
2.1.1	Messpunktbasierte Datenverarbeitung	9
2.1.2	Objektbasierte Datenverarbeitung	9
2.1.3	Sensorkombination	10
2.2	Arten der optischen Sensoren	10
2.2.1	Visuelle Spektroskopie (VIS)	13
2.2.2	Farbzeilenkameras (CCD- Kameras)	14
2.2.3	Nahinfrarot- Spektroskopie (NIR)	15
2.2.4	Hyperspectral- Imaging (HSI) Technologie	16
2.2.5	Röntgenfluoreszenz- Spektroskopie (XRF)	17
2.2.6	Röntgentransmissions- Analyse (XRT)	19
2.2.7	Radiometrische Analyse	20
2.2.8	UV- Licht Fluoreszenz- Analyse	20
2.2.9	Terahertz (THz)- Bildgebung	21
2.2.10	Laserspektroskopie	22
2.2.11	Laser- induzierte- Fluoreszenz (LIF)	23
2.2.12	Laser- Online- Analyse (LOLA) und Laser- induzierte Plasmaspektroskopie (LIBS)	24
2.2.13	Laser- Raman- Spektroskopie	25
2.2.14	Laserscanning (LIDAR)	25
2.2.15	Lasertriangulation (LT)	26
2.2.16	Volumenstrommessung über das Stoffstrom- Gewicht	27
2.2.17	Mikrowellenspektroskopie	28
2.2.18	Graustufensensor und Farbsensoren	29
2.2.19	Induktions- Sortiersystem (ISS)	29
2.2.20	Marker (Tracer)- basiertes Sortieren (TBS)	30
2.2.21	Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA)	31
2.2.22	Pulsed Fast Thermal Neutron Activation (PFTNA)	32
3	Anforderungen an die Rohstoffe von ausgewählten Industrien	33
3.1	Recyclingbaustoffe	35
3.1.1	Industrieminerale	35
3.1.2	RC- Baustoffe im Straßen- und Erdbau	36
3.1.3	RC- Baustoffe in der Ziegelindustrie	36
3.2	Substitution von sekundären Rohstoffen	37
3.2.1	Anforderungen an die Gesteinskörnung für Beton	38
3.2.2	Low- Carbon- Zement aus thermisch aktivierten Tonen	40
3.2.3	Geopolymere als Alternative zu Zement	41
3.2.4	Ziegelherstellung	43
3.2.5	Lehm- Putze	46
3.2.6	Oberbodenmaterial – Bodenrekultivierung durch Bodenaushubmaterial	47
3.2.7	Straßenunterbau und Tragschichtbildung	49
3.2.8	Tunnelausbruchmaterial als Gleisschotter	53
3.2.9	Bodenverbesserung durch Kalkbeimischung	55

3.2.10	Tunnelausbruchmaterial als Drainagekies.....	55
3.2.11	Tunnelausbruchmaterial als Mineralwolle.....	56
4	Optische Merkmalanalyse im Tunnelbau.....	58
4.1	<i>Anwendbarkeit der sensorgestützten Merkmalanalysen auf Basis der Rohstoff- Anforderungen.....</i>	<i>58</i>
4.2	<i>Prototyp einer online- Analyseanlage zur Merkmalanalyse im Tunnel.....</i>	<i>66</i>
4.3	<i>Berücksichtigung von Ansätzen der Digitalisierung.....</i>	<i>69</i>
4.3.1	Datenkombination.....	69
4.3.2	Datenanalyse mittels Serviceplattform.....	70
4.4	<i>Kombination der Erkenntnisse am Beispiel einer realitätsnahen Baustelle.....</i>	<i>72</i>
4.5	<i>Erforderliche Maßnahmen zur Umsetzung einer online- Analyse im Tunnel.....</i>	<i>77</i>
4.5.1	Optimierung der abfallrechtlichen Bestimmungen.....	77
4.5.2	Einfluss der online- Analyse auf das Projektmanagement.....	77
4.5.3	Einfluss der online- Analyse auf den Bauprozess.....	79
4.5.4	Parameter- Datenbank zur Sensorauswahl und Produktauswahl.....	79
4.5.5	Versuchsanlage zur Abschätzung der Machbarkeit.....	79
4.5.6	Datenmanager mit Materialkenntnis.....	79
4.5.7	Kosten- Nutzen- Analyse & CO ₂ - Bilanz.....	80
4.6	<i>Vorteile durch die Implementierung der online- Analyse auf Tunnelbaustellen.....</i>	<i>80</i>
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	82
	Literaturverzeichnis.....	XII
	Anhang.....	XX
	<i>Parameter, Grenzwerte und Kennwerte für die einzelnen Qualitätsklassen gemäß B-AWP.....</i>	<i>XX</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elektromagnetisches Spektrum [21]	6
Abbildung 2: Eigenschaften des Lichtes [23]	7
Abbildung 3: Grundprinzip der optischen Merkmalanalyse [24].....	8
Abbildung 4: Optische Sensoren: ein Überblick [29]	11
Abbildung 5: Unterschied reflektierende und durchstrahlende Messtechnik.....	12
Abbildung 6: Funktionsprinzip VIS- Spektroskopie [33]	14
Abbildung 7: Aufbau CCD- Chip [34].....	15
Abbildung 8: Funktionsprinzip NIR- Spektroskopie [35].....	16
Abbildung 9: Funktionsprinzip HSI- Technologie [37]	17
Abbildung 10: Funktionsprinzip der XRF- Analyse [41].....	18
Abbildung 11: Aufbau einer XRF- Analyseeinheit [41]	18
Abbildung 12: Funktionsprinzip XRT- Analyse [44]	19
Abbildung 13: Funktionsprinzip der UV- Licht Fluoreszenz [47].....	21
Abbildung 14: Funktionsprinzip THz- TDS [53].....	22
Abbildung 15: Funktionsprinzip der LIBS- Methode [57].....	24
Abbildung 16: Aufbau des Raman- Spektrometers [59]	25
Abbildung 17: Messprinzip LIDAR [62]	26
Abbildung 18: Funktionsprinzip der LT bzw. des Lichtschnittverfahrens [63].....	27
Abbildung 19: Funktionsaufbau einer Bandwaage [64].....	28
Abbildung 20: Unterschiedliche Verfahren der Mikrowellenspektroskopie [67].....	29
Abbildung 21: Funktionsprinzip eines elektromagnetischen Sensors [69]	30
Abbildung 22: Baurohstoffe in Österreich [77].....	34
Abbildung 23: Korngrößendreistoffsystem nach WINKLER (1954) [104].....	45
Abbildung 24: Korngrößenverteilung 16 - 32 mm für Drainagekies [124]	56
Abbildung 25: Darstellung der Anordnung der online- Analyseanlage auf einer Tunnelbaustelle	67
Abbildung 26: Darstellung der Sensoreinheit	68
Abbildung 27: Schematische Darstellung des Datenflusses	68
Abbildung 28: Möglicher Aufbau einer Serviceplattform	70
Abbildung 29: Aufbau des Datentransfers	71
Abbildung 30: Finden der KI- Vorhersage.....	72
Abbildung 31: Anlegen eines neuen Projektes in der Datenbank	73
Abbildung 32: Auswählen von Materialien aus der Datenbank.....	74
Abbildung 33: Struktur der Datenbank	75
Abbildung 34: Klassifikationsmodell.....	75
Abbildung 35: Beurteilung der Wiederverwertung.....	76
Abbildung 36: Prozess zur online- Analyse im Projektmanagement.....	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abfallhierarchie [8]	2
Tabelle 2: Ziele der Kreislaufwirtschafts- Strategie 2022 bis zum Jahr 2030 [16]	4
Tabelle 3: Überblick der Analysemethoden	12
Tabelle 4: Wellenlängenbereiche des sichtbaren Spektrums	13
Tabelle 5: Überblick der wichtigsten Laser [54]	22
Tabelle 6: Verwendungszwecke von RC- Baustoffen gemäß Qualitätsklassen [83]	36
Tabelle 7: Anwendungsfälle von Festgestein [86]	37
Tabelle 8: Anwendungsfälle von Lockergestein [86]	38
Tabelle 9: Anforderungen an die Korngrößenverteilung von Beton- Füllern [89]	39
Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung typischer Rohstoffe für Geopolymere [98]	42
Tabelle 11: Auswirkungen der Rohstoffeigenschaften auf die Ziegelqualität [101]	44
Tabelle 12: Auswirkungen der physikalischen Eigenschaften auf die Ziegelqualität [101]	44
Tabelle 13: Korngrößenverteilung von Voll- und Lochziegel [105]	45
Tabelle 14: Chemische und Mineralogische Zusammensetzung von Mauerziegelmassen [107]	46
Tabelle 15: Verwendungszweck für die Qualitätsklassen gemäß B-AWP [110]	47
Tabelle 16: Bodeneigenschaften für Bodenrekultivierung [111]	48
Tabelle 17: Korngrößenverteilung für Gesteinskörnungen zur Verwendung als Tragschichten [114]	50
Tabelle 18: Anteil an gebrochenen und vollständig gerundeten Körnern in Tragschichten [114]	50
Tabelle 19: Feingehaltanteil in Tragschichten [114]	51
Tabelle 20: Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen in Tragschichten [114]	52
Tabelle 21: Gesteinsvorkommen für Gleisschotter in Österreich [119]	54
Tabelle 22: Chemische Zusammensetzung von Steinwolle [126]	56
Tabelle 23: Anwendungen der Merkmalanalysemethoden	59
Tabelle 24: Vor- und Nachteile der Merkmalanalysemethoden (Teil 1)	60
Tabelle 25: Vor- und Nachteile der Merkmalanalysemethoden (Teil 2)	61
Tabelle 26: Erforderliche Materialparameter für ausgewählte Endprodukte	62
Tabelle 27: Überblick der detektierbaren Materialparameter und Eignung der Analysemethoden	63
Tabelle 28: Schadstoffe infolge Sprengstoffe	74
Tabelle 29: Auflistung der Deponierungs- und Verwertungsmöglichkeiten	76
Tabelle 30_ Anhang 01: Erstanalyse Boden – Gesamtgehalte	XX
Tabelle 31_ Anhang 02: Erstanalyse Boden – Gehalte im Eluat	XXI
Tabelle 32_ Anhang 03: Ergänzungen für QK A2-G – Gehalte im Eluat	XXII

Formelverzeichnis

Formel 1: Zusammenhang Lichtgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge [19]	6
Formel 2: Definition Brechzahl [20]	7
Formel 3: Snellius' sches Brechungsgesetz [20].....	7
Formel 4: Berechnung des Objektabstandes beim Lichtlaufzeitsensor.....	25
Formel 5: Berechnung der Höhendifferenz beim Lichtschnittverfahren	27
Formel 6: Thermische Aktivierung von Tonmineralen.....	41
Formel 7: Empirische Geopolymer- Matrix [95]	42
Formel 8: Berechnung des Größtkorns zur Bestimmung der Frostsicherheit	53
Formel 9: Training der KI	71
Formel 10: Mathematische Gleichung des Lernprozesses	72

Abkürzungsverzeichnis

AG	.....	Auftraggeber
AK	.....	Anwendungsklasse
ALSAG	.....	Altlastensanierungsgesetz
AN	.....	Auftragnehmer
AWG	.....	Abfallwirtschaftsgesetz
B-AWP	.....	Bundes- Abfallwirtschaftsplan
BIM	.....	Building Information Modeling
BMLRT	.....	Bundesministerium für Landwirtschaft
BMK	.....	Bundesministerium für Klimaschutz
CCD	.....	Charge- coupled- device
DVO	.....	Deponieverordnung
FCC	.....	Future Circular Collider
fs	.....	Femtosekunde
GA	.....	Gebirgsart
HSI	.....	Hyperspectral- Imaging
IR	.....	Infrarot
ISS	.....	Induktions- Sortiersystem
KI	.....	Künstliche Intelligenz
LIBS	.....	Laser- induced breakdown spectroscopy
LIDAR	.....	Light detection and ranging
LIF	.....	Laser- induzierte- Fluoreszenz
LOLA	.....	Laser- Online- Analyse
LT	.....	Lasertriangulation
MIR	.....	Mittelwelliger Infrarotbereich
Mt/a	.....	Millionen Tonnen pro Jahr
NAA	.....	Neutronenaktivierungsanalyse
NATM	.....	New Austrian Tunneling Method
NIR	.....	Nahinfrarot- Spektroskopie
PET	.....	Polyethylenterephthalat
PFTNA	.....	Pulsed fast thermal Neutron Activation
PGNAA	.....	Prompt Gamma Neutron Activation Analysis
POI	.....	Point of Interest
R- Beton	.....	Ressourcenschonender Beton
RC- Baustoff	.....	Recyclingbaustoff
StrSchG	.....	Strahlenschutzgesetz
TDS	.....	Zeitbereichsspektroskopie
TBS	.....	Marker (Tracer)- basiertes Sortieren
THz	.....	Terahertz
TVM	.....	Tunnelvortriebsmaschine
UV	.....	Ultraviolett
UVP	.....	Umweltverträglichkeitsprüfung
VIS	.....	Visuelle Spektroskopie
XRF	.....	Röntgenfluoreszenz- Sensor

1 Einleitung

Tunnelbauprojekte, ob groß oder klein, unterliegen im nationalen, sowohl als auch im internationalen Raum, immer strenger werdenden Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP). Daher kommt es immer häufiger zu nachhaltigeren Tunnelbaulösungen. So werden beispielsweise unlängst beim Grand Paris Express Projekt (Lot 16) in Frankreich Tübinge aus Stahlfaserbeton eingesetzt. Dadurch können mehr als 10.000 t CO₂, durch den geringeren Stahlverbrauch, eingespart werden [1].

Die Deponierung von Tunnelausbruchmaterial ist nach wie vor die einzige Lösung, welche angestrebt wird, um sich vom anfallenden Stoffstrom zu trennen [2]. Um dennoch die Auswirkungen des Tunnelbaus auf die Umwelt signifikant zu reduzieren, gilt es das in großen Mengen anfallende Tunnelausbruchmaterial sinnvoll zu nutzen. Dafür ist eine zielgerichtete Bestimmung der Materialkennwerte erforderlich. Zurzeit werden die Parameter während den Erkundungsmaßnahmen, im Vorfeld eines Projektes, ermittelt und dienen hauptsächlich der Beurteilung der Standfestigkeit des Gebirges. Die Nutzung der Parameter für die Wiederverwendung von Tunnelausbruchmaterial wird nicht oder nur teilweise in Pilotprojekten angestrebt [3].

Ein Vorzeigeprojekt, auf diesem Gebiet zur Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial, ist das Projekt ‚Future Circular Collider‘ (FCC) am CERN. Bereits mit dem internationalen Wettbewerb ‚Mining the Future‘ welcher in der Vorprojektphase des Projektes stattfand, wurde in einer frühen Planungsphase Wert, auf den Umgang mit Tunnelausbruchmaterial, gelegt [4].

1.1 Österreichische Abfallpolitik

Österreichs Abfallwirtschaft ist nach dem Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG) geregelt. Nach dieser aktuell gültigen Rechtsvorschrift (§2 Abs. 1), sind Abfälle all jene Stoffe oder Sachen, von denen sich der Besitzer entledigen will und wenn deren Aufbewahrung, Verarbeitung oder Beförderung das öffentliche Interesse (§2 Abs. 1) nicht beeinträchtigen. Das öffentliche Interesse ist nur dann nicht beeinträchtigt, wenn die Sache neu ist oder einer bestimmten Verwendung zugeordnet ist.

Zudem sind Nebenprodukte (§2 Abs. 3a) Stoffe oder Sachen, welche bei einem Herstellungsprozess anfallen aber nicht das Hauptprodukt jenes Prozesses sind. Als Nebenprodukt gelten sie nur dann, wenn der Stoff erstens weiterverwendet wird, zweitens ohne weitere Verarbeitung verwendet werden kann, drittens als essenzieller Bestandteil des Herstellungsprozesses gilt und viertens ohne Beeinträchtigung der Schutzgüter (§1 Abs. 3) sinnvoll verwendet werden kann.

Wird ein Stoff oder Gegenstand als Abfall deklariert, so gilt er so lange als Abfall bis sein Abfallende (§5 Abs. 1) eingetreten ist. Das Abfallende eines Stoffes tritt nur dann ein, wenn der Stoff einen Primärrohstoff ersetzt oder wenn das Verwertungsverfahren im Sinne einer Vorbereitung zur Wiederverwendung (§2 Abs. 5 Z6) abgeschlossen ist. Diese Verwertungsverfahren sind zum Beispiel die Reinigung, Prüfung oder Reparatur von Abfällen, sodass sie ihr Abfallende erreichen und ohne weitere Behandlung verwendet werden können [5].

Aushubmaterial oder Bodenaushubmaterial ist all jenes Material, welches durch Ausheben des natürlich gewachsenen Untergrundes entsteht [6].

Infolgedessen ist Tunnelausbruchmaterial, nach Deponieverordnung 2008 (DVO), Bodenaushubmaterial, aus Locker- und Festgestein vorkommend in ihrer natürlichen Lage, welches bei der Errichtung von offenen und geschlossenen Tunnelbauwerken, Voreinschnitten, Schächten, Stollen oder Kavernen erzeugt wird [7].

Im Gegensatz dazu stehen nicht kontaminierte Böden. Diese sind nach Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (§3 Abs. 1 Z8), Bodenaushubmaterialien, welche in ihrem natürlichen Zustand für Bauzwecke, an der Stelle an der sie ausgehoben wurden, verwendet werden. Der Geltungsbereich des Gesetzes gilt für diese Art von Böden nicht und daher gelten sie nicht als Abfall [5].

1.2 Ziele der Richtlinie 2008/98

In der Richtlinie 2008/98, der Europäischen Union, über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, sind Ziele der europäischen Abfallpolitik gelistet, welche von den Mitgliedsstaaten, bei der Erstellung der nationalen Gesetze, zu berücksichtigen sind.

Die Ziele sind wie folgt:

- 1.) Oberstes Ziel ist die Reduktion von negativen Auswirkungen der Abfallerzeugung auf den Menschen und der Umwelt.
- 2.) Die Erhaltung von Primärrohstofflagerstätten.
- 3.) Die Umsetzung der Abfallhierarchie.

Hierarchie	Art der Option
1	Vermeidung
2	Vorbereitung zur Wiederverwendung
3	Recycling
4	sonstige Verwertung
5	Beseitigung

Tabelle 1: Abfallhierarchie [8]

- 4.) Die Erhöhung des wirtschaftlichen Wertes von Abfall.
- 5.) Die Schaffung einer Recycling- Gesellschaft bzw. einer Kreislaufwirtschaft. [9]

In einem Verfahren des Europäischen Gerichtshofes (Erste Kammer), vom 17. November 2022, wurden die Begriffsdefinitionen „Abfall“, „Nebenprodukt“ und „Ende der Abfalleigenschaft“ des Abfallwirtschaftsgesetzes 2002 mit dem aktuell gültigen Unionsrecht, der Richtlinie 2008/98, verglichen.

Grund dafür ist ein Bauvorhaben eines österreichischen Bauunternehmens, bei dem das Aushubmaterial zur Verbesserung bzw. Rekultivierung von landwirtschaftlichen Flächen genutzt wurde. Seitens der zuständigen Bezirkshauptmannschaft wurde mit einem Bescheid erwirkt, dass das Aushubmaterial, gemäß Abfallwirtschaftsgesetz 2002, als Abfall zu behandeln ist, bei dem das Abfallende noch nicht eingetreten ist [10].

Dementsprechend ist ein Altlastensanierungsbeitrag, gemäß Altlastensanierungsgesetz 1989, zu leisten [11].

1.3 Österreichische Abfallpolitik im Wandel

Auf Grund einer Beschwerde, eines österreichischen Bauunternehmens, beim zuständigen Landesverwaltungsgericht, kam es zu einer Behandlung jenes Falles beim Europäischen Gerichtshof. Dem Urteil ist zu entnehmen, dass nach österreichischem Gesetz die Kriterien für das Abfallende von Aushubmaterialien strenger sind als für übliche Abfälle. Nach nationaler Rechtsgrundlage reicht die Vorbereitung zur Wiederverwendung, zur Beseitigung der Abfalleigenschaft für Aushubmaterialien, nicht aus. Der Europäische Gerichtshof sieht diese Klausel als unionsrechtswidrig, da der Entfall der Abfalleigenschaft einschränkt wird.

Weiters leitet sich die Begriffs- Definition „Abfall“ von einem Verhalten des Besitzers ab, weil er sich einer Sache entledigen will. Liegt nun ein Verwendungszweck oder gar eine wirtschaftliche Wiederverwendung für den Stoff vor, so ist er gemäß der oben genannten Definition nicht als Abfall einzustufen.

Zudem beschloss der Gerichtshof, dass eine Qualitätskontrolle des vorliegenden Materials, ein „Verfahren der Prüfung“ darstellt und dadurch unter den Begriff „Vorbereitung zur Wiederverwendung“ fällt. Eine Prüfung hinsichtlich der Qualität ist notwendig, um festzustellen, ob es sich um nicht kontaminiertes Aushubmaterial handelt [10].

Die jeweiligen Klassen sowie Grenzwerte, werden in einem mindestens sechs Jahres Zyklus, im Bundes-Abfallwirtschaftsplan (B-AWP) des Bundesministeriums veröffentlicht [12].

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass:

- Sobald ein Verwendungszweck für ein Aushubmaterial nachgewiesen werden kann, ist es kein Abfall und dementsprechend ist kein Altlastensanierungsbeitrag zu leisten.
- Eine Qualitätskontrolle, ein Verfahren der Prüfung darstellt und dadurch ausreichend ist, dass die Abfalleigenschaft endet.
- Die Wiederverwendung von Aushubmaterial, entsprechend den Qualitätsklassen, zum Beispiel als landwirtschaftliche Rekultivierung, der Kreislaufwirtschaft beiträgt [10].

1.4 Ziele der Republik Österreich in Zukunft – Kreislaufwirtschaftsstrategie

Auf Grund der enorm steigenden Verbrauchszahlen an natürlichen Rohstoffen kommt es zur Erhöhung des Material- Fußabdruckes. Einhergehend ist die Zunahme an Abfall. Gründe für die exponentiell steigende Materialverwendung sind unter anderem das Bevölkerungswachstum und eine lineare Abfallwirtschaftspolitik. Die österreichische Regierung setzt sich mit der Kreislaufwirtschaftsstrategie 2022 zum Ziel, Vorreiter bei der Umsetzung von Klimaschutzzielen zu sein. Dazu ist die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft essenziell. Im Gegensatz zur linearen Wirtschaftsweise, bei der Rohstoffe gewonnen, Produkte erzeugt und nach kurzer Lebensdauer entsorgt werden, werden bei der Kreislaufwirtschaft nur Stoffe als Abfall deponiert welche keinen Nutzen haben. Dadurch werden Primärrohstoffe umweltschonend gewonnen. Produkte erzeugt, welche eine lange Lebensdauer haben. Anfallende Abfälle wiederverwertet und dadurch Primärrohstoffe substituiert.

„2018 wurden in Österreich 167 Millionen Tonnen pro Jahr (Mt/a) an Material verbraucht. Darunter fielen 95 Mt/a auf Baurohstoffe, was in etwa 57 % entspricht.“ [13]

Die österreichische Regierung setzt sich zum Ziel, dass bis 2050 eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft umgesetzt ist. Daraus resultiert, dass in Zukunft Sekundärrohstoffe eine wichtige Rolle in der österreichischen Wirtschaft einnehmen werden. Nicht nur die Rohstoffpolitik ist Teil einer nachhaltigen Gesellschaft, sondern auch die Umsetzung einer Infrastruktur, welche geringe Treibhausgasemissionen ausstößt. Um den Bahnverkehr in ganz Europa attraktiver zu gestalten sind Hochleistungszugstrecken erforderlich. Einhergehend ist der Bau von Tunnel unumgänglich. Bei der Herstellung von Tunnel entsteht, nach noch aktuellem österreichischem Recht, Abfall. Um die Klimaziele und das Umsetzen einer Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen, wird es in Zukunft notwendig sein diesen Abfall in Sekundärrohstoffe umzuwandeln. Dadurch ist einerseits eine nachhaltige Rohstoffpolitik möglich und andererseits wird die Infrastruktur an die neuen Anforderungen angepasst [13].

Nachfolgend sind die Hauptziele der Kreislaufwirtschafts- Strategie 2022 bis zum Jahr 2030, im Vergleich zu 2020, aufgelistet. Die Werte wurden entnommen aus einem Bericht der Bundesanstalt Statistik Österreich, der Kreislaufwirtschafts- Strategie und der Ressourcennutzung in Österreich 2020 des BMK [13] [14] [15].

Ziel	2020	2030	Quelle
Reduktion des inländischen Materialverbrauchs	18,8 t pro Kopf/Jahr	< 14 t pro Kopf/Jahr	Statistik Austria
Reduktion des Material-Fußabdruckes	25 t pro Kopf/Jahr	< 7 t pro Kopf/Jahr	Ressourcennutzung in Österreich 2020
Steigerung der Ressourcenproduktivität	2,1 € BIP je kg Materialverbrauch	Steigerung um 50%	Statistik Austria
Steigerung der Zirkularitätsrate	12%	Steigerung auf 18%	Kreislaufwirtschafts- Strategie 2022
Reduktion des Konsums privater Haushalte	23644 € pro Person	Reduktion um 10%	Statistik Austria

Tabelle 2: Ziele der Kreislaufwirtschafts- Strategie 2022 bis zum Jahr 2030 [16]

Das Urteil vom Europäischen Gerichtshof, bezüglich dem Streitfall zwischen einem österreichischen Bauunternehmen und einer Bezirkshauptmannschaft, ist ein erster und wichtiger Schritt in die Wiederverwertung von Bodenaushubmaterial.

Es bedarf einer Neu- Gestaltung der rechtlichen Rahmenbedingung, sowie die Entwicklung von nationalen Rechtsvorschriften, welche die Wiederverwendung von Aushubmaterial unterstützen.

Zudem ist es erforderlich, dass innovative Lösungen geschaffen werden und der Einsatz von neuen Technologien, für die Erstklassifizierung von Aushubmaterial, erprobt wird. Des Weiteren müssen Qualitätskriterien für Sekundärrohstoffe gesucht und erarbeitet werden. Dazu gehört auch die Bestimmungen des Anteils an Sekundärrohstoffen in neuen Produkten, damit die Qualität der Produkte darunter nicht leidet und eine lange Lebensdauer ermöglicht werden kann [13].

1.5 Gliederung der Arbeit

Beide notwendigen Rahmenbedingungen, für eine schnelle und zielorientierte Umsetzung der Kreislaufwirtschaftsstrategie, werden in dieser Arbeit umgesetzt. Die Ziele der Arbeit werden in den einzelnen Kapiteln abgearbeitet und sind nachfolgend zusammengefasst aufgelistet.

Im zweiten Kapitel der Arbeit wird mit einer sehr detaillierten Recherche, in der Müll- Recycling Industrie sowie in anderen Industrien, nach Sensortechniken zur online- Analyse gesucht. Die ermittelten Technologien werden analysiert und anhand von Kriterien gefiltert. Ziel ist es, Anwendungsmöglichkeiten der Sensoren im Tunnelbau zu finden. Vorrangig werden optische Sensoren behandelt, da das Ziel eine schnelle Erstbeurteilung des Aushubmaterials ist. Das Kapitel soll einen Überblick über bereits vorhandene Sensortechnologien geben.

Um die Sensoren, in Zukunft einfach und präzise auszuwählen, werden in Kapitel drei der Arbeit, mögliche Endprodukte, welche in Zukunft aus Sekundärrohstoffen produziert werden können, gesucht. Aus diesen Produkten werden Parameter und Anforderungen an den wiederverwerteten Rohstoff abgeleitet und aufgelistet. Ziel der Arbeit ist ein detaillierter Überblick über mögliche Endprodukte, welche durch die Substitution von Tunnelausbruchmaterial, hergestellt werden können. Die Produktpalette ist sehr weit gestreut, damit in Zukunft das Bodenaushubmaterial sinnvoll wiederverwendet werden kann.

Anhand der recherchierten Daten werden im vierten Kapitel der Arbeit, die für den Tunnelbau geeigneten Sensortechnologien aufgelistet und deren Vor- und Nachteile gegenübergestellt. Daraus wird eine Tabelle generiert um in Zukunft effizient, mit den gewonnenen Daten, arbeiten zu können. Zudem wird ein Prototyp für eine Tunnelbaustelle entwickelt, welcher universell eingesetzt werden kann. Dieser beinhaltet die am besten geeigneten Technologien, damit die online- Analyse vor Ort durchgeführt werden kann. In Kombination zum Prototyp werden Aspekte der Digitalisierung berücksichtigt, sodass das System mit einer digitalen Baustelle verknüpft werden kann. Des Weiteren wird zusammen mit Ansätzen von Künstlicher Intelligenz (KI) die Digitalisierung, welche einen großen Stellenwert in der österreichischen Kreislaufwirtschaft hat, berücksichtigt. Dabei werden Ansätze zur Datengewinnung, -speicherung und -

analyse gegeben. Anhand einer praxisnahen Demobaustelle wird die Implementierung der online- Analyse in eine Tunnelbaustelle, schematisch als auch in Worten erläutert. Dabei wird besonders auf die zuvor festgelegten Schnittstellen eingegangen.

Zu guter Letzt, wird im fünften Kapitel eine Zusammenfassung der Ergebnisse dargelegt und ein Ausblick über weitere notwendige Forschungsarbeiten gegeben.

2 Optische Merkmalanalyse

Sensorgestützte Merkmalanalyse hat in der Müllverwertung einen großen Stellenwert, da einerseits die Rechenleistung von Computern in den letzten Jahren stark gestiegen ist und andererseits, weil dieses Verfahren viele Möglichkeiten der Analyse von Stoffstromeigenschaften und der Sortierung bietet [18]. Des Weiteren kommt die sensorgestützte Analyse bei der Aufbereitung von Sekundärrohstoffen immer häufiger zum Einsatz. Gründe dafür sind unter anderem die schnelle Zunahme von neuen Sensortechniken in kurzer Zeit, sowie die Steigerung der Effizienz von Aufbereitungsprozessen. Mit Hilfe von sensorgestützter Analyse kann ein Stoffstrom, mit verminderter Qualität, nachhaltig und effizient sortiert und anschließend für die Herstellung von neuen Produkten verwendet werden. Dies trägt zur Schaffung neuer Rohstoffquellen bei und reduziert dadurch den materiellen Fußabdruck.

Zudem sind diese Systeme auch als Sortierverfahren in Verwendung. Bei der Anwendung von optischen Sortierverfahren wird eine breite Einsatzmöglichkeit erreicht, da im Gegensatz zu herkömmlichen Sortierverfahren, die optische Sortierung nicht auf eine Trennkraft beruht. Infolgedessen kann bei der optischen Sortierung, durch unterschiedliche Konfigurationen, nach verschiedenen Merkmalen der Probe sortiert werden.

Herkömmliche Sortierverfahren wie zum Beispiel die Dichtesortierung, die Flotation, die Magnetscheidung oder die Elektroscheidung basieren auf physikalische Trennmerkmale. Diese Trennmerkmale sind durch physikalische Trennkraften, zum Beispiel die Haltekraft, die Ablenkraft oder die Auftriebskraft, des zu trennenden Mediums, charakteristisch [19].

Die physikalische Grundlage für optische Sortierverfahren ist die Optik und die Ausbreitung des Lichtes. Licht ist eine elektromagnetische Welle, welche sich nach den Gesetzen der Wellenmechanik ausbreitet. Elektromagnetische Wellen werden nach dem elektromagnetischen Spektrum eingeteilt. Dabei werden sie nach deren Wellenlänge und deren Frequenz in unterschiedliche Bereiche eingeteilt. Das elektromagnetische Spektrum ist in Abbildung 1 dargestellt [20].

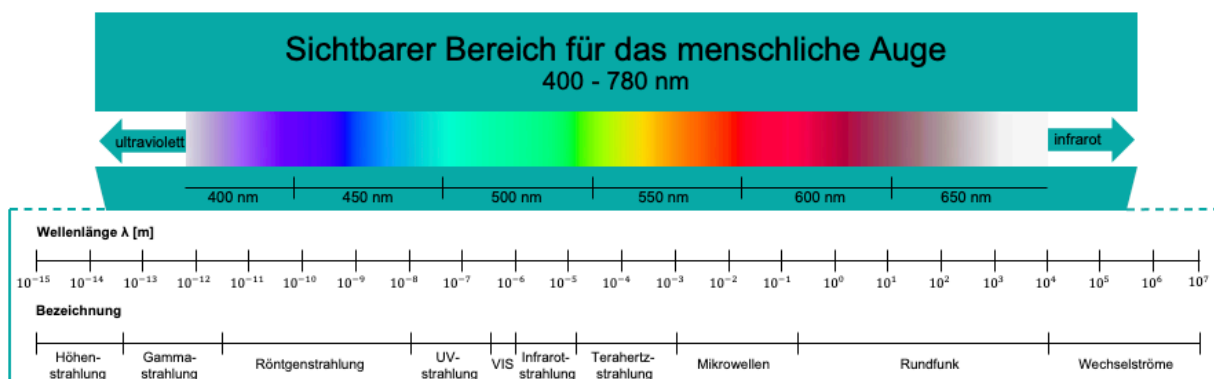


Abbildung 1: Elektromagnetisches Spektrum [21]

Der Zusammenhang zwischen der Frequenz, der Wellenlänge einer elektromagnetischen Welle und der Lichtgeschwindigkeit lautet wie folgt.

$$c = \lambda * f$$

Formel 1: Zusammenhang Lichtgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge [19]

c	Lichtgeschwindigkeit	[m/s]
λ	Wellenlänge	[m]
f	Frequenz	[Hz]

Licht breitet sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8$ m/s (gerundet) aus. In transparenten Medien wie zum Beispiel Luft oder Glas ist die Geschwindigkeit des Lichtes geringer. Das Verhältnis der Geschwindigkeitsdifferenz ist für das jeweilige Medium charakteristisch und wird mit seiner Brechzahl n angegeben.

$$n = \frac{c}{c_n}$$

Formel 2: Definition Brechzahl [20]

n	Brechzahl	[-]
c	Lichtgeschwindigkeit	[m/s]
c_n	Geschwindigkeit im Medium	[m/s]

Trifft in weiterer Folge ein Lichtstrahl, mit einem Winkel θ_{in} , auf die Grenzfläche zweier Medien, wird ein Teil des Lichtstrahls gebrochen und der andere Teil reflektiert. Beide Effekte, die Brechung und die Reflexion, sind Eigenschaften des Lichtes.

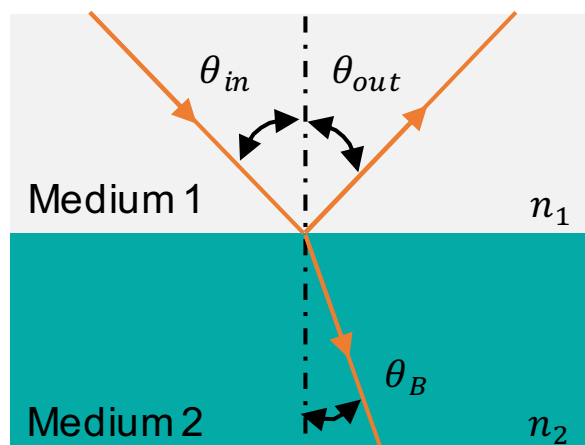


Abbildung 2: Eigenschaften des Lichtes [23]

In Abbildung 2 sind beide Effekte des Lichtes dargestellt. Bei der Reflexion gilt das Reflexionsgesetz. Das Reflexionsgesetz, welches für alle Arten von elektromagnetischer Strahlung anwendbar ist, besagt, dass der Reflexionswinkel θ_{out} gleich dem Einfallswinkel θ_{in} ist. Bei der Brechung, also jener Teil des Lichtstrahls, welcher in das zweite Medium eintritt und gebrochen wird, breitet sich der Lichtstrahl mit dem Brechungswinkel θ_B aus. Der Zusammenhang zwischen Einfallswinkel, Brechzahlen und Brechungswinkel stellt das Snellius'sche Brechungsgesetz dar [20].

$$n_1 * \sin(\theta_{in}) = n_2 * \sin(\theta_B)$$

Formel 3: Snellius'sches Brechungsgesetz [20]

n_1	Brechzahl des Mediums 1	[-]
θ_{in}	Einfallswinkel	[°]
n_2	Brechzahl des Mediums 2	[-]
θ_B	Brechungswinkel	[°]

Optische Sortierverfahren verwenden spezifische, äußere Merkmale von Materialien, welche von einem Sensor erfasst werden. Eine Sensoreinheit besteht aus einem Emitter, welche elektromagnetische Strahlung aussendet und einem Detektor, welcher die reflektierten Strahlen des Materials aufnimmt. Die detektierte Strahlung wird in elektrische Signale umgewandelt und zu einer Datenverarbeitungsstation geschickt [18]. Emissionsstrahlung tritt auf, wenn elektrische Strahlung mit festen Körpern eine Wechselwirkung eingeht. Dabei kommt es zu unterschiedlichen Arten der Emission: [19]

- Spiegelreflexion
Ist die Reflexion an einer glatten Oberfläche.
- Diffuse Streuung bzw. Reflexion

Die Strahlen werden an einer Oberfläche regellos in unterschiedliche Richtungen reflektiert.

- Totalreflexion
Bei einem Einfallswinkel, bei dem ein Brechungswinkel $>90^\circ$ resultiert, kommt es zu keiner Brechung. Infolgedessen wird der gesamte Strahl reflektiert. Tritt nur auf, wenn der Strahl von einem Medium mit der größeren Brechzahl auf die Grenzfläche von einem Medium mit geringerer Brechzahl trifft.
- Transmissionsstrahlung
Strahlung, welche durch das Medium durchgeht und an der Rückseite wieder austritt. Entspricht der Durchlässigkeit des Mediums [20].
- Lumineszenz
Bei der Lumineszenz wird ein System durch Energiezufuhr angeregt und emittiert Photonen. Im Gegensatz dazu steht die Fluoreszenz, bei der kein Aktivierungsprozess, zwischen der Absorption und Emission, stattfindet [19].

In der nachfolgenden Abbildung ist das Funktionsschema einer optischen Sensoreinheit dargestellt.

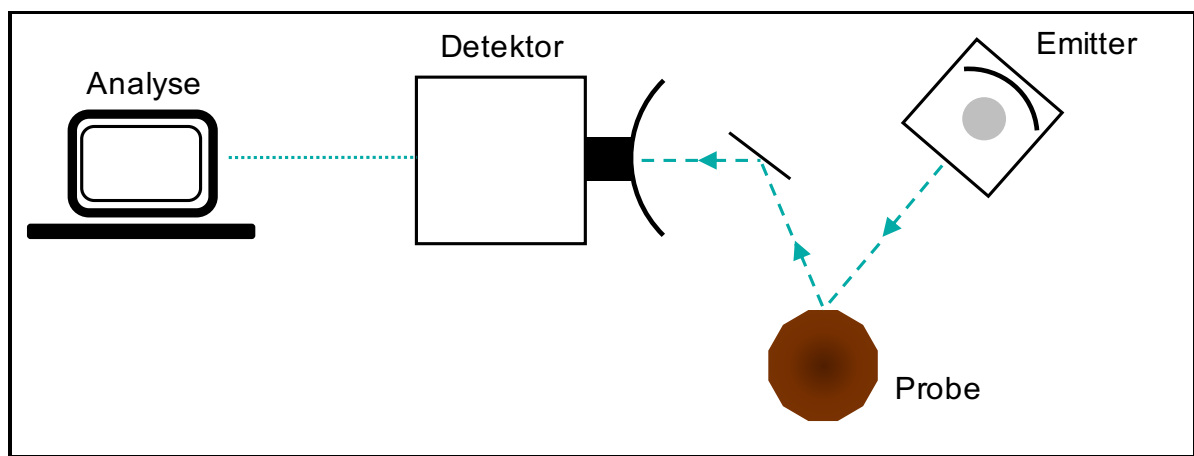


Abbildung 3: Grundprinzip der optischen Merkmalanalyse [24]

Eine Voraussetzung, dass die optische, sensorgestützte Merkmalanalyse vergleichbare Resultate zeigt, ist eine gleichmäßige Verteilung des Materials auf einem Förderband. Bei einer Überfüllung des Förderbandes werden Teilbereiche des Materials nicht erfasst und können dadurch nicht sortiert werden. Der optimale Volumenstrom des Förderbandes, müsste für Geomaterialien in einem Versuch untersucht werden. Des Weiteren ist ein Kontrast zwischen dem zu sortierenden Material und dem Stromträger, wie zum Beispiel dem Förderband, sicherzustellen. Vor allem bei der Verschmutzung des Förderbandes durch den Stoffstrom kann es zu ungenauen Geometrie- Detektionen kommen. Dadurch sind Filter notwendig, um das Bild der aufgenommenen Messdaten in ein verwertbares Bild zu transformieren. In der Kunststoff-Recyclingindustrie werden Schwellwert-, Erosions- und Dilatationsfilter benutzt [18].

2.1 Detektion und Datenverarbeitung

Die Detektion des Lichtes sowie seiner Intensität ist, bei allen spektroskopischen Verfahren, von großer Bedeutung. Daher ist die Detektor- Auswahl nicht zu vernachlässigen [25].

Der Detektor detektiert die charakteristische Strahlung vom Stoffstrom und wandelt diese in brauchbare Informationen um. Die Berechnungszeit ist dabei von der Geschwindigkeit des Stoffstromes abhängig. Bei der sensorgestützten Sortierung beträgt die Dauer des Informationsaustausches zwischen dem Analysegerät und der Sortiereinheit nur wenige Millisekunden. Hingegen spielt bei der sensorgestützten Merkmalanalyse diese Entscheidungsfrage keine Rolle, da im Anschluss keine Sortierung stattfindet [26].

Die Strahlungsdetektoren müssen charakteristische Eigenschaften aufweisen, um sie für den Entscheidungsprozess beurteilen zu können. Zuerst gilt es den Wellenlängenbereich festzulegen, indem

der Detektor benutzt werden kann. Dafür hat jeder Strahlendetektor eine spektrale Empfindlichkeitskurve, in der er angewendet werden kann. Des Weiteren spielt die rauschäquivalente Strahlungsleistung eine große Rolle. Dies ist das Detektorrauschen, wenn keine Strahlung auf den Detektor trifft. Zudem muss sichergestellt sein, dass der Leistungsbereich des Detektors unabhängig von der Strahlenleistung P ist. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist das Zeitverhalten des Detektors. Vor allem bei schnellen, gepulsten Strahlungen ist die Ansprechzeit des Detektors darüber ausschlaggebend, ob er Strahlung detektiert oder nicht.

Auf Grund der zahlreichen charakteristischen Eigenschaften gibt es viele Arten von Detektoren. Sie lassen sich aber in zwei Hauptdetektortypen einteilen:

- Thermische Detektoren
- Direkte Photodetektoren

Bei thermischen Detektoren wird die Temperaturerhöhung, welche durch die Absorption der eintreffenden Strahlung entsteht, als Messgröße verwendet. Daraus resultiert, dass thermische Detektoren unabhängig von der Wellenlänge sind. Im Gegensatz dazu folgen die direkten Photodetektoren, den Prinzipien des äußeren, inneren oder photovoltaischen Effekts. Direkte Photodetektoren haben eine spektrale Empfindlichkeitskurve und müssen dadurch an das Wellenlängen- Spektrum angepasst werden. Nachfolgend ist ein Überblick über einsetzbare direkte Photodetektoren gegeben:

- Photodioden
 - Photoleiter
 - Photovoltaische Detektoren
 - Lawinendioden
 - Schnelle Photodioden
- Diodenanordnungen und CCD- Detektoren
- Photomultiplier
- Photonenzählmethode
- Bildverstärker und optische Vierkanal- Analysatoren
- Kanal- Photomultiplier
- Kanalplatten- Verstärker [25]

Die elektromagnetische Strahlung, welche vom Detektor aufgenommen wird, wird an die Auswerteeinheit geschickt, an der die Daten verarbeitet werden. Ziel ist es, anhand der charakteristischen Strahlung, welche vom Stoffstrom emittiert wird, eine Merkmalextraktion durchzuführen. Es gibt zwei Arten der Datenverarbeitung. Die messpunktbasierte und die objektbasierte Datenverarbeitung.

2.1.1 Messpunktbasierte Datenverarbeitung

Dabei wird jeder Messpunkt, an dem ein Signal detektiert wird, direkt ermittelt. Die Lage dieses Punktes wird der Austrageinheit übermittelt. Dadurch ist eine gezielte Sortierung, von undurchsichtigen und lichtundurchlässigen Materialien, sichergestellt. Vorteil dieser Methode ist die schnelle Arbeitsweise. Auf Grund dessen, dass die Messpunkte direkt und unabhängig voneinander ermittelt werden, ist eine Aufnahme der Form, Länge, Breite oder Helligkeitsverteilung eines spezifischen Teilchens im Stoffstrom, nicht möglich.

2.1.2 Objektbasierte Datenverarbeitung

Die Messpunkte werden jeweils für einen Abschnitt am Förderband ermittelt. Diese Zone wird zwischengespeichert und besteht aus mehreren Aufnahmen. Über Bildüberlagerungen werden Messpunkte von Einzelstücken im Förderstrom zusammengefasst und abgespeichert. Dadurch lässt sich das Einzelstück nach seiner Geometrie, oder sogar nach seinem Volumen, sortieren.

In der Kunststoff- Recyclingindustrie ist nach dem Sensor eine Austrageinheit, die eigentliche Sortiereinheit, angebracht. Durch messpunktbasierte Datenverarbeitung wird am richtigen Ort zur

richtigen Zeit ein Ventil geöffnet und das gewünschte Teilchen des Stoffstromes, über Luftdruck ausgetragen.

2.1.3 Sensorkombination

Die Sensorkombination oder auch Sensorfusion ist die Kombination von unterschiedlichen Sensoren, um mehrere Parameter zeitgleich zu erfassen [26]. Je nach Erfordernis können unterschiedlichste Sensorkombinationen ermöglicht werden.

Zum Beispiel wird mit der Kombination eines Induktionssensors und einer 3D- Erkennung, eine Sortierung von Nichtmetallen aus einem Metallstoffstrom ermöglicht. Eine Kombination von Röntgentransmissions-Analyse (XRT) und 3D- Erkennung erweitert die Bewertungsmöglichkeiten und macht das Sensorsystem dadurch empfindlicher und genauer. Sensorkombinationen sind immer kundenspezifisch und individuell ausgelegt. Ziel ist es ein flexibles Sensorsystem zu kreieren, um alle Anforderungen bestmöglich abzudecken.

Die wichtigsten Vorteile, welche mit einer Sensorfusion erzielt werden können, sind nachfolgend zusammengefasst:

- Erhöhung der Sortiertiefe
- Erhöhung der Informationsmenge
- Variable Sortierung
- Einsatz in der online- Analyse
- Merkmalanalyse von heterogenen Stoffströmen
- Individuelle und flexible Sortiersysteme [27]

Welche Sensorkombinationen für geologische Materialien, wie zum Beispiel Tunnelausbruchmaterial, in Frage kommen, wird in dieser Arbeit beantwortet.

2.2 Arten der optischen Sensoren

Optische Sensoren senden elektromagnetische Strahlung aus. Diese wird am Objekt reflektiert oder gestreut und von einem Sensor empfangen. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf die Geometrie, Position oder Eigenschaft des Objektes ziehen. Optische Sensoren werden in nahezu jeder Industrie verwendet, da eine schnelle, kontaktlose und automatisierbare Eigenschaftserkennung möglich ist. In der folgenden Abbildung sind die gebräuchlichsten Sensor- Technologien zusammengefasst [28].

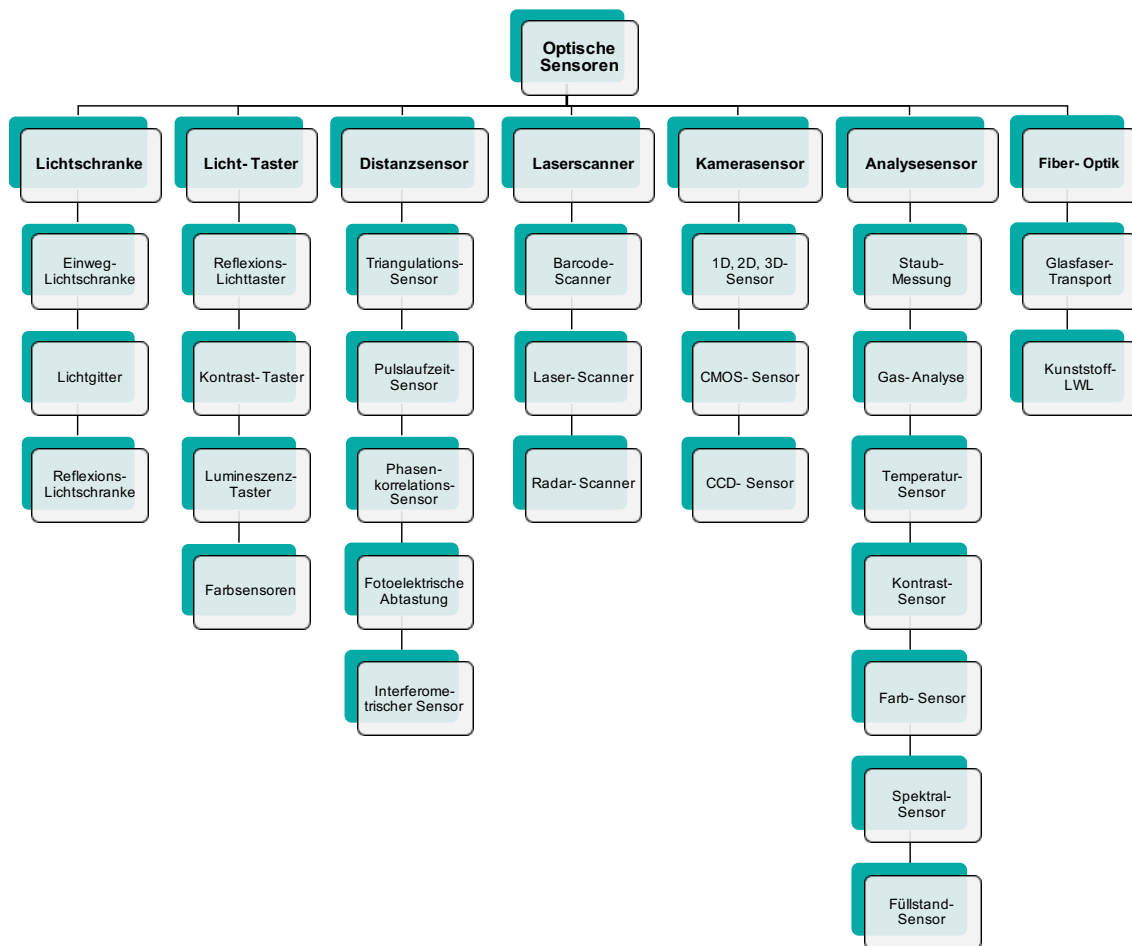


Abbildung 4: Optische Sensoren: ein Überblick [29]

Zur Sortierung von mineralischen Rohstoffen werden grundsätzlich Lichtschranken, Kamerasensoren und Analysensensoren verwendet. Es werden Sensortypen eingesetzt, welche das gesamte elektromagnetische Spektrum umfassen. Dadurch können verschiedenste Eigenschaften des Stoffstromes erfasst werden. Unter anderem finden in der Sekundärrohstoff- Aufbereitung folgende Sensortypen Anwendung:

- Sensoren zur Detektion der Oberflächeneigenschaften
- Sensoren zur Detektion der Partikeleigenschaften
- Sensoren zur Detektion von primären Eigenschaften
- Sensoren zur Detektion von sekundären Eigenschaften

Primäre Eigenschaften vom Stoffstrom sind zum Beispiel der Elementargehalt oder die mineralische Zusammensetzung. Wobei sekundäre Eigenschaften zum Beispiel die Farbe, die Reflexion, die Helligkeit, die Leitfähigkeit, die Dichte, die Suszeptibilität und die Radioaktivität sind.

Die Materialeigenschaften können über zwei Grundmesstechniken detektiert werden. Zum einen wird die reflektierende Messtechnik, welche zum Beispiel optische Kameras als Funktionsprinzip haben, und zum anderen wird die durchstrahlende Messtechnik verwendet. Die durchstrahlende Messtechnik kommt zum Beispiel bei Röntgentransmissionssensoren zum Einsatz. Dies hat unter anderem Auswirkungen auf die Anordnung von Emittent und Detektor. Bei der reflektierenden Messtechnik wird der Emittent und der Detektor, wie in Abbildung 5 gezeigt, auf der gleichen Seite des Stoffstromes platziert. Im Gegensatz dazu muss bei der durchstrahlenden Messtechnik der Emittent und der Detektor gegenüberliegend platziert werden. In Abbildung 5 sind die beiden Bauarten gegenübergestellt.

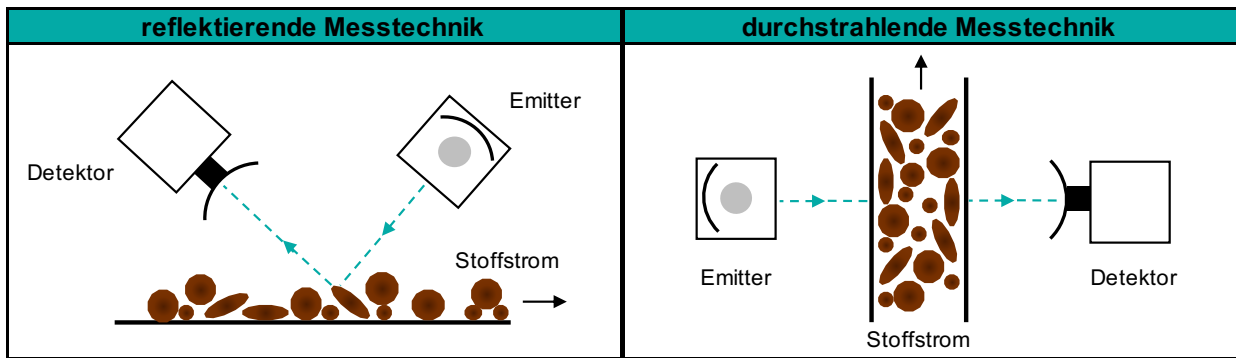


Abbildung 5: Unterschied reflektierende und durchstrahlende Messtechnik

Des Weiteren wird unter aktiven und passiven Sensoren unterschieden. Aktive Sensoren sind mit einer externen Strahlungsquelle, zum Beispiel mit einer Nahinfrarot- Strahlungsquelle, ausgestattet, um die Merkmale des Stoffstromes zu analysieren. Im Gegensatz dazu wird bei passiven Sensoren keine externe Strahlungsquelle benötigt. Diese Sensorart detektiert die natürliche Objektstrahlung, wie zum Beispiel die natürliche Radioaktivität eines Stoffstromes [31].

Auf Grund der Vielzahl an unterschiedlichen Verfahren sind in der nächsten Tabelle alle, in dieser Arbeit beschriebenen Sensortechnologien, übersichtlich zusammengefasst.

elektromag. Spektrum	Methode (de)	Abkürzung
VIS	Visuelle Spektroskopie	VIS
	Farbzeilenkameras	CCD- Kamera
	Graustufen- und Farbsensor	-
IR	Nahinfrarot- Spektroskopie	NIR
	Hyperspectral- Imaging Technologie	HSI
Röntgenstrahlung	Röntgenfluoreszenz- Spektroskopie	XRF
	Röntgentransmissions- Analyse	XRT
	Radiometrische Analyse	-
UV	UV- Licht/Fluoreszenz	-
Terahertz	Terahertz- Imaging	THz
Röntgenstrahlung bis IR	Laserspektroskopie	-
UV & VIS	Laser- induzierte- Fluoreszenz	LIF
UV, VIS, IR	Laser- induzierte Plasmaspektroskopie	LIBS (LOLA)
VIS & IR	Laser- Raman- Spektroskopie	-
UV, VIS, IR	Laserscanning	LIDAR
UV & VIS	Lasertriangulation	LT
Mikrowellen	Mikrowellenspektroskopie	-
-	Volumenstrommessung über Stoffstromgewicht	-
	Induktions- Sortiersystem	ISS
	Marker (Tracer)- basiertes Sortieren	TBS
	Prompt Gamma Neutron Activation Analysis	PGNAA
	Pulsed Fast Thermal Neutron Activation	PFTNA

Tabelle 3: Überblick der Analysemethoden

Auf die einzelnen Verfahren wird in den folgenden Unterkapiteln detailliert eingegangen, dabei wird besonderer Wert auf die Funktionsweise gelegt, um Rückschlüsse auf die Verwendbarkeit für die Klassifizierung von Tunnelausbruchmaterial ziehen zu können.

2.2.1 Visuelle Spektroskopie (VIS)

Die Merkmalanalyse nach der Farbe, des menschlichen Sehvermögens, ist die älteste Sortiermethode in der Aufbereitung. Bereits seit den Anfängen der Rohstoffgewinnung ist die manuelle Klaubung ein Teil des Aufbereitungsprozesses, sowie die Basis für weitere Sortierverfahren. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts als die Automatisierung und Mechanisierung vorangetrieben wurde, wurde die manuelle Klaubung von optischen Systemen abgelöst. Das Grundprinzip der Sortierung blieb jedoch unverändert [19].

Die visuelle Spektroskopie (VIS) nutzt den, für das menschliche Auge sichtbaren, visuellen Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums. Dieser erstreckt sich von ca. 400 – 700 nm. Der Detektor erfasst ausschließlich reflektierte Strahlung in diesem zuvor genanntem Wellenlängenbereich und wandelt diese in ein elektrisches Signal um. Dieses wird ausgewertet und die Auswerteeinheit liefert die Farbe, zum Beispiel grün, rot, blau, des detektierten Partikels im Stoffstrom. Die wiedergegebene Farbe ist für einen bestimmten Wellenlängenbereich der reflektierten Strahlung spezifisch [18]. In Tabelle 4 sind die Wellenlängenbereiche des sichtbaren Spektrums wiedergegeben.

Wellenlängenbereich	Farbe
380 - 435	violett
435 - 495	blau
495 - 550	grün
550 - 610	gelb
610 - 635	orange
635 - 780	rot

Tabelle 4: Wellenlängenbereiche des sichtbaren Spektrums

Die Funktionsweise der VIS beruht auf einem VIS- Sensor welcher die Farbe und die Form der Partikel im Stoffstrom, anhand der Wellenlänge der reflektierten Strahlung, detektiert. Die derzeit am Markt verfügbaren Geräte haben eine maximale Kapazität von 50 – 140 t/h und können Korngrößenfraktionen von 0,8 – 250 mm sortieren. Auf Grund des speziellen Aufbaus können beliebige Sensorkombinationen, wie zum Beispiel die Kombination von VIS, UV, NIR und XRT, erreicht werden [32].

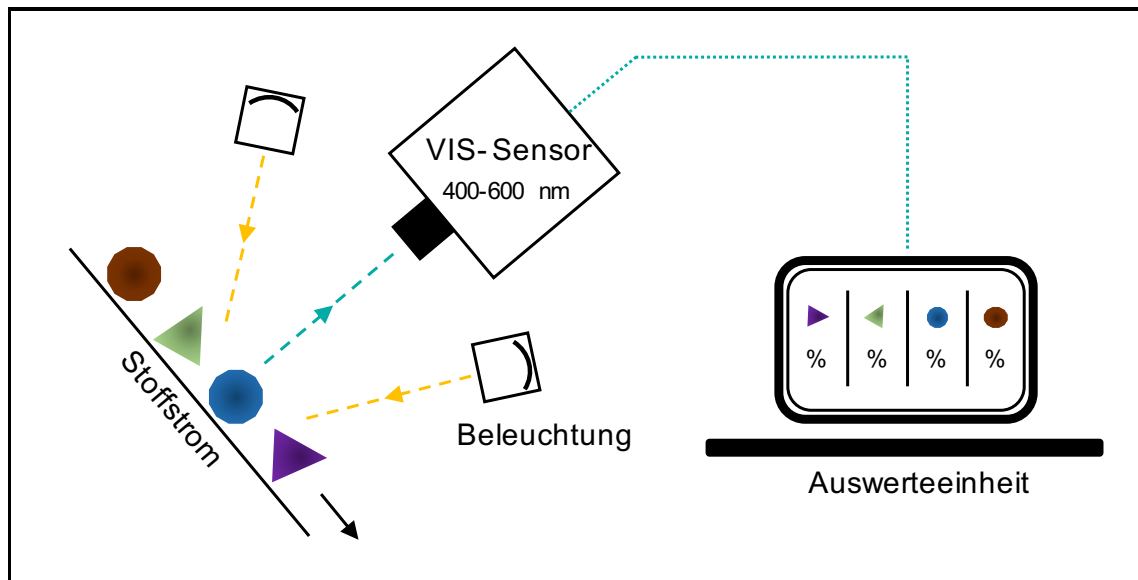


Abbildung 6: Funktionsprinzip VIS- Spektroskopie [33]

Anwendung findet die VIS in nahezu allen Industrien. In der Altglas- Aufbereitung wird die VIS verwendet um nichttransparente Bestandteile, wie zu Beispiel Steine, Kunststoffe, usw. von Glas zu trennen. Des Weiteren wird die VIS in der Kunststoffaufbereitung verwendet. Dabei werden Polyethylenterephthalat (PET)- Kunststoffe in Flakes zerkleinert, welche in der Faserindustrie benötigt werden. Auf Grund der Anforderungen an die Produktqualität muss der Anteil an Farbverunreinigungen gering sein. Mittels VIS ist die Abscheidung dieser Farbverunreinigungen möglich [26].

Sowohl in der Baurestoffaufbereitung als auch in der Sekundärrohstoffaufbereitung werden VIS-Systeme verwendet. Sie dienen dazu, die Qualität von Sekundärrohstoff- Lagerstätten zu verbessern [32].

2.2.2 Farbzeilenkameras (CCD- Kameras)

Farbzeilenkameras sind optische Sensoren, welche wie die VIS im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums funktionieren. Der Name CCD- Kamera leitet sich vom englischen Begriff „charge- coupled- device“ ab. Dieser beschreibt den Datentransport im Sensor. Vor allem in der Astronomie finden diese Systeme eine breite Anwendung, da sie die Lichtempfindlichkeit von Teleskopen stark verbessern.

Die Funktionsweise des CCD- Sensors beruht auf den photoelektrischen Effekt. Dabei geht ein Elektron, bei der Bestrahlung eines Siliziumkristalls, aus einem Valenzband in ein energetisch höheres Leitungsband über. Grund dafür ist die Energie von Photonen, wobei diese mindestens der Bindungsenergie des Elektrons entsprechen müssen. Im Falle des Siliziumatoms entspricht dies einer Energie von 1,11 eV. Die Photoleitung ist materialabhängig und entspricht im Falle des Siliziums, Licht mit einer maximalen Wellenlänge von 1120 nm. Oberhalb dieser Grenzwellenlänge wird der Sensor lichtunempfindlich.

Mit Farbzeilenkameras können ähnliche Merkmale wie beim VIS gemessen werden. Die Analyse ist auf die Eigenschaften der Partikeloberfläche begrenzt. Unter anderem kann die Farbe, Form, Größe und Oberflächenstruktur aufgenommen werden.

Der Chip beinhaltet eine lichtempfindliche Fläche, welche in der Bildebene positioniert ist. Abhängig von der Belichtung entsteht ein Muster. Dieses Muster ist entsprechend der Ladungen der Pixel. Ein Verstärker verstärkt das Signal des seriellen Registers in ein zeitabhängiges elektrisches Signal, welches ausgewertet werden kann. In Abbildung 7 ist der Aufbau eines CCD- Chips dargestellt [28].

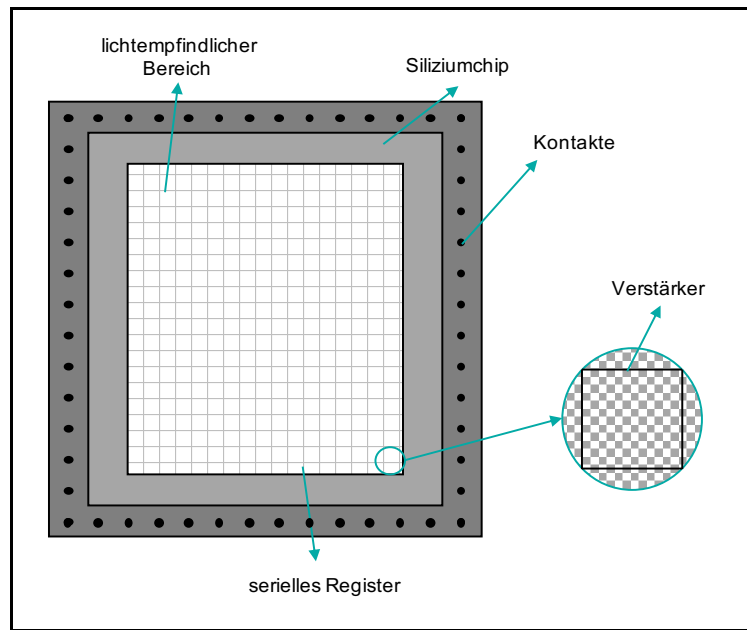


Abbildung 7: Aufbau CCD- Chip [34]

2.2.3 Nahinfrarot- Spektroskopie (NIR)

Die Nahinfrarot- Spektroskopie wird in der Kunststoffaufbereitung am häufigsten eingesetzt. Grund dafür ist, dass Leichtverpackungen anhand ihrer chemischen Zusammensetzung analysiert werden. Dadurch wird eine Merkmalanalyse nach Materialart sichergestellt. Im Gegensatz zur VIS spielt die Farbe, bei der Sortierung mit NIR- Strahlung, keine Rolle. Infolgedessen können unterschiedliche Kunststoffarten, wie zum Beispiel Polypropylen oder PET- Kunststoffe getrennt werden.

Bei der NIR- Sortierung können Materialien auf Grund ihrer „Farbe“ im NIR- Spektrum und ihrer Konzentration sortiert werden. Die „Farbe“ ist für jedes Material charakteristisch und wird in der Infrarotkamera als charakteristische Wellenlänge identifiziert. Die Konzentration des Materials im Stoffstrom wird über die Intensität der reflektierten Strahlung detektiert. Infolgedessen können mit der NIR- Merkmalanalyse die primären Partikeleigenschaften analysiert werden.

Bei der NIR- Spektroskopie wird eine Infrarotkamera über dem Stoffstrom platziert. Diese sendet NIR- Strahlung im Wellenlängenbereich von ca. 780 – 2500 nm aus. Dabei werden die Moleküle unterschiedlich stark angeregt. Zeitgleich detektiert die Infrarotkamera die reflektierte charakteristische Strahlung vom Stoffstrom und übermittelt die Daten an eine Auswerteeinheit. In der Auswerteeinheit muss eine Datenbank über die produktspezifischen Eigenschaften hinterlegt sein, damit die Materialien durch eine Software identifiziert werden können.

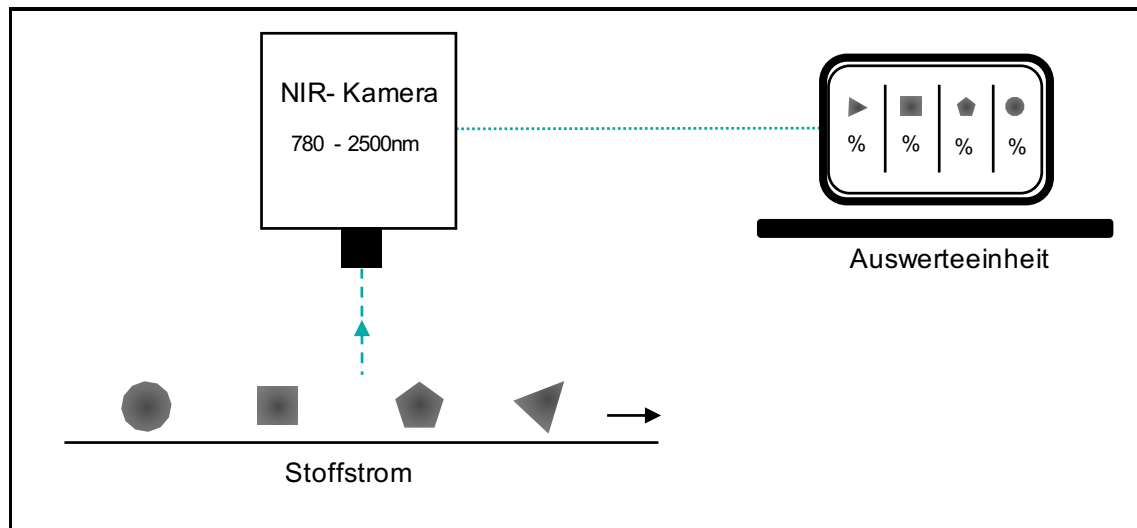


Abbildung 8: Funktionsprinzip NIR- Spektroskopie [35]

In der Kunststoffaufbereitung kommt die NIR- Spektroskopie an ihre Grenzen, wenn schwarze Kunststoffe oder opake PET- Kunststoffe sortiert werden müssen. Schwarze Kunststoffe enthalten Kohlenstoff, welcher keine Strahlung im VIS- Spektrum reflektiert und zudem keine Strahlung im UV- und NIR- Spektrum absorbiert. Infolgedessen wird vom Sensor keine Strahlung aufgenommen [18].

Die NIR- Detektion wird auch zunehmend in Aufbereitungsanlagen, welche Baumischabfälle trennen, verwendet. Dabei werden die einzelnen Komponenten, in einem Stoffstrom mit einem Korngrößenbereich von 25 – 400 mm, detektiert. Bei speziellen Sensoren, welche im mittelwelligen Infrarotbereich (MIR) arbeiten können auch schwarze Materialien identifiziert werden. Grund dafür ist, dass im MIR- Bereich nahezu alle organischen Stoffe die Strahlung absorbieren und dadurch die Farbe bei der Analyse keine Bedeutung hat [26].

Bereits durchgeführte Versuche mit Mineralen zeigen, dass diese eine charakteristische Wellenlänge zwischen 1300 und 2550 nm aufweisen. Wie bereits erwähnt, können dunkle und schwarze Minerale nicht detektiert werden. Des Weiteren dürfen sie nicht zu stark verwachsen sein, da die Auflösung des Sensors mindestens 5 mm beträgt [31].

Ein weiteres Anwendungsbeispiel der NIR- Spektroskopie ist die Bestimmung der Oberflächenfeuchte. Dabei werden Rückschlüsse zwischen der Intensität des reflektierten Spektrums und des Feuchtegehalts gezogen. Wichtig dabei ist, dass die Intensität des diffus reflektierten Spektrums proportional der Oberflächenwasserkonzentration, einer feuchten Probe, ist. Diese Methode ist jedoch dadurch limitiert, dass zuvor eine Kalibration notwendig ist. Dadurch wird der Zusammenhang zwischen gemessenen Wert und Referenz- Wert hergestellt. Des Weiteren kommt es durch die heterogenen Eigenschaften, wie Dichteunterschiede oder Temperaturunterschiede, zu einer Streuung der Messergebnisse [36].

2.2.4 Hyperspectral- Imaging (HSI) Technologie

Hyperspectral- Imaging oder auch NIR- Hyperspectral- Imaging arbeitet im NIR- Spektrum von 900 – 1700 nm. Der Unterschied zur NIR- Spektroskopie liegt im Bildverarbeitungssystem. Das HSI entspricht einer hochauflösenden Zeilenkamera welche Strahlung im NIR- Bereich aufnimmt und analysiert. Die Kamera scannt dabei die gesamte Förderbandbreite ab, detektiert die reflektierte und absorbierte NIR- Strahlung und erstellt pro Objektpixel ein NIR- Spektrum. Das entstandene Wellenlängen- Spektrum ist abhängig von der Molekulanordnung und Molekülgruppierung vom jeweiligen gescannten Objekt. Dieses ortsabhängige, hochauflösende Spektrum wird in der Auswerteeinheit analysiert. Bereits kleinste Differenzen in den Spektren ermöglichen eine Materialunterscheidung. In Abbildung 9 ist der Aufbau der HSI- Technologie dargestellt.

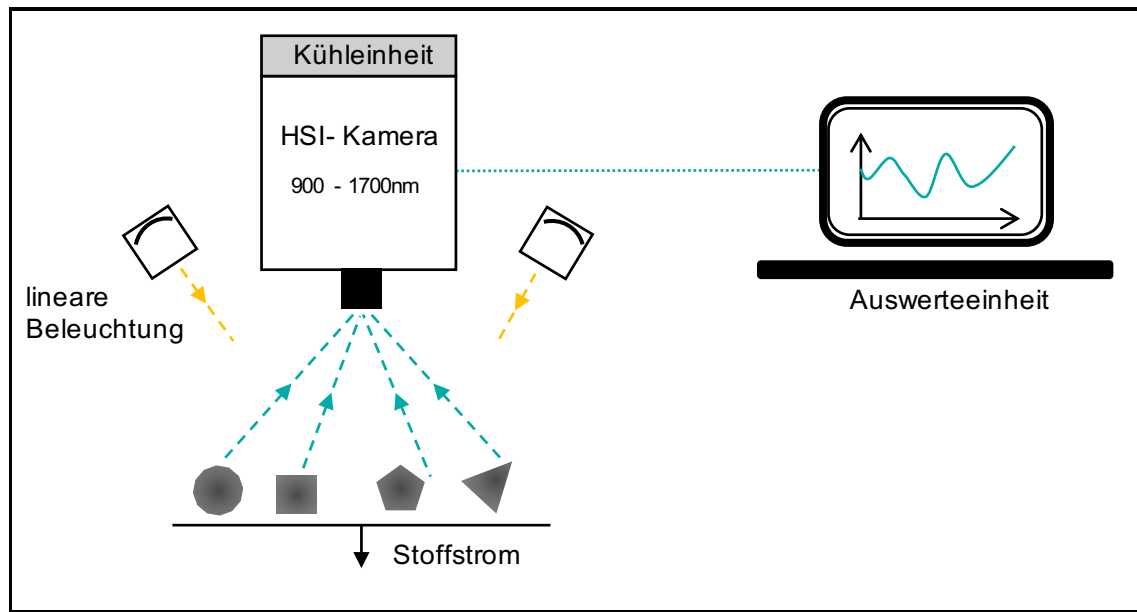


Abbildung 9: Funktionsprinzip HSI- Technologie [37]

Mit der HSI- Technologie werden die primären Eigenschaften des Stoffstroms detektiert und ausgegeben. Neben der chemischen Zusammensetzung können unter anderem Farbkoordinaten und Schichtdickeninformationen aus den Daten ausgelesen werden [39].

Im Gegensatz zur NIR- Spektroskopie können mit der HSI- Technologie auch schwarze Kunststoffe detektiert werden, da die Merkmalanalyse auf der Bestimmung der chemischen Zusammensetzung beruht und die Farbe des Objektes, bei der Analyse, keine Bedeutung hat [40].

2.2.5 Röntgenfluoreszenz- Spektroskopie (XRF)

Die Röntgenfluoreszenz- Analyse (XRF für Englisch x-ray fluorescence spectroscopy) wird für die Analyse der primären Partikeleigenschaften verwendet. Infolgedessen wird die elementare Zusammensetzung der Partikeloberfläche, durch Röntgenstrahlung im Wellenlängenbereich von 0,01 – 10 nm, identifiziert. Dafür liegt die Röntgenröhre, welche als Emittor dient, und der Detektor auf derselben Seite des Stoffstromes [31].

Bei der XRF- Analyse wird der Stoffstrom durch die Röntgenquelle mit Röntgenstrahlung bestrahlt und kommt es zu einer Erregung der oberflächennahen Atome, des durch Röntgenstrahlen bestrahlten Partikels. Die angeregten Elektronen springen aus den inneren Schalen des Atoms und versetzen es in einen instabilen Zustand. Elektronen der äußeren Hüllen füllen die entstanden Lücken auf und entsenden dabei eine Fluoreszenzstrahlung. Diese emittierte Strahlung ist für jedes einzelne Element charakteristisch und wird vom Detektor aufgenommen. Dieser wandelt es in ein elektrisches Signal um und an einer Auswerteeinheit kann die atomare Zusammensetzung abgelesen werden [18].

In Abbildung 10 ist das Funktionsprinzip der XRF- Analyse schematisch dargestellt.

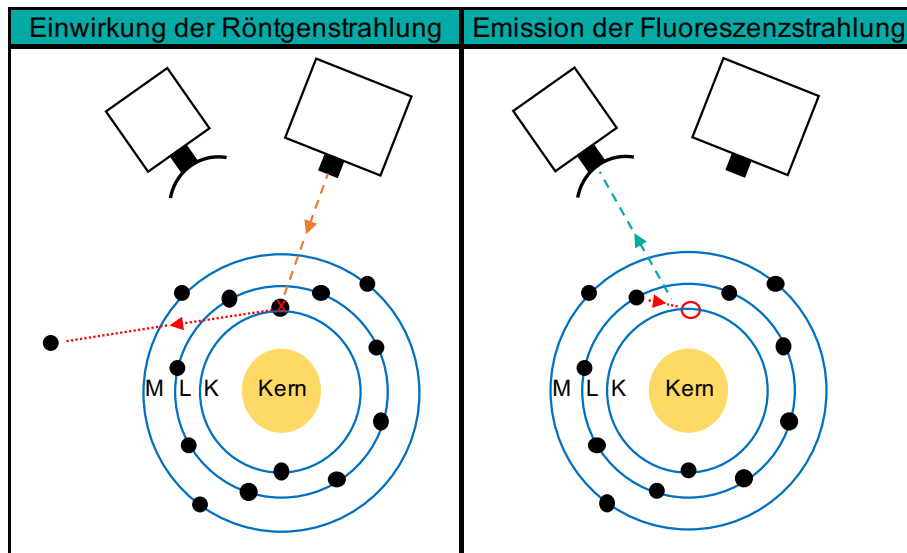


Abbildung 10: Funktionsprinzip der XRF- Analyse [41]

Der Aufbau eines XRF- Analysesystems ist in Abbildung 11 abgebildet.

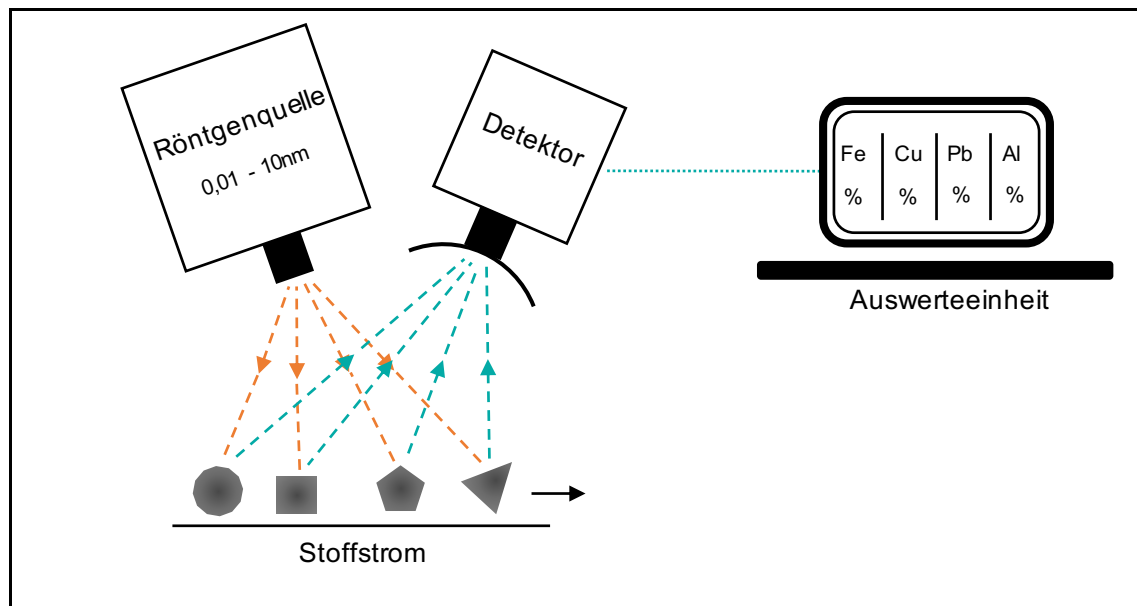


Abbildung 11: Aufbau einer XRF- Analyseeinheit [41]

Im Gegensatz zu anderen optischen Merkmalanalyse- Systemen hat die XRF- Analyse eine geringe Ortsauflösung von nur 50 – 100 mm. Daher ist die gleichzeitige Messung von mehreren Elementen beschränkt. Des Weiteren muss für eine optimale Merkmalunterscheidung eine hohe Konzentration der Zielelemente vorliegen. Dies ist unter anderem der Grund, warum die XRF- Analyse, bei der industriellen Anwendung, auf Reicherze beschränkt ist [31].

Beim Einsatz von XRF- Analysegeräten muss, auf Grund der Strahlenbelastung, auf die Arbeitsplatzsicherheit geachtet werden. Röntgenanalysegeräte unterliegen den Erfordernissen des Strahlenschutzgesetzes (StrSchG). Daher müssen sämtliche Regelungen des Gesetzes berücksichtigt werden [43].

2.2.6 Röntgentransmissions- Analyse (XRT)

Die Röntgentransmissions- Analyse (XRT für Englisch x-ray transmission) beruht auf der durchstrahlenden Messtechnik. Zudem werden die sekundären Eigenschaften des Stoffstromes identifiziert. Das Haupttrennmerkmal ist der Dichteunterschied der detektierten Materialien. Infolgedessen wird die XRT- Analyse, in der Kunststoffindustrie, zur Erkennung von Kunststoffen mit oder ohne Flammhemmer, angewandt [18].

Mit der XRT- Analyse werden die inneren Eigenschaften der Partikel erfasst. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Analysetechnologien, ist die XRT- Analyse unabhängig von der Oberfläche der Partikel.

Ein XRT- Analysesystem besteht aus einer Röntgenquelle, welche über einem Förderband platziert ist. Diese bestrahlt den Stoffstrom mit Röntgenstrahlen im Wellenlängenbereich von 0,01 – 10 nm. Bei der XRT- Analyse wird vom Detektor, welcher sich unterhalb des Förderbandes befindet, die absorbierte Röntgenstrahlung detektiert. Werden die Partikel des Stoffstromes mit einer Röntgenstrahlung bestrahlt, wird diese nach der Transmission durch den Stoffstrom, unterschiedlich stark abgeschwächt. Die Absorption der Röntgenstrahlung ist abhängig von den einzelnen Partikeln des Stoffstromes. Die beiden Einflussfaktoren, welche die Röntgenstrahlung am meisten beeinflussen ist die Materialstärke und das Atomgewicht der Partikel. Der Detektor generiert ein Röntgenbild, meist ein schwarz/weiß Bild, welches abhängig vom Abschwächungsgrad unterschiedliche Helligkeitswerte beinhaltet. Der Helligkeitsunterschied entsteht, da schwerere Atome mehr Röntgenstrahlung absorbieren als leichtere Atome. Die Materialstärke wird über zwei unterschiedliche Energieniveaus, der Strahlung, gemessen.

In Abbildung 12 ist der Aufbau und das Funktionsprinzip einer XRT- Analyse dargestellt.

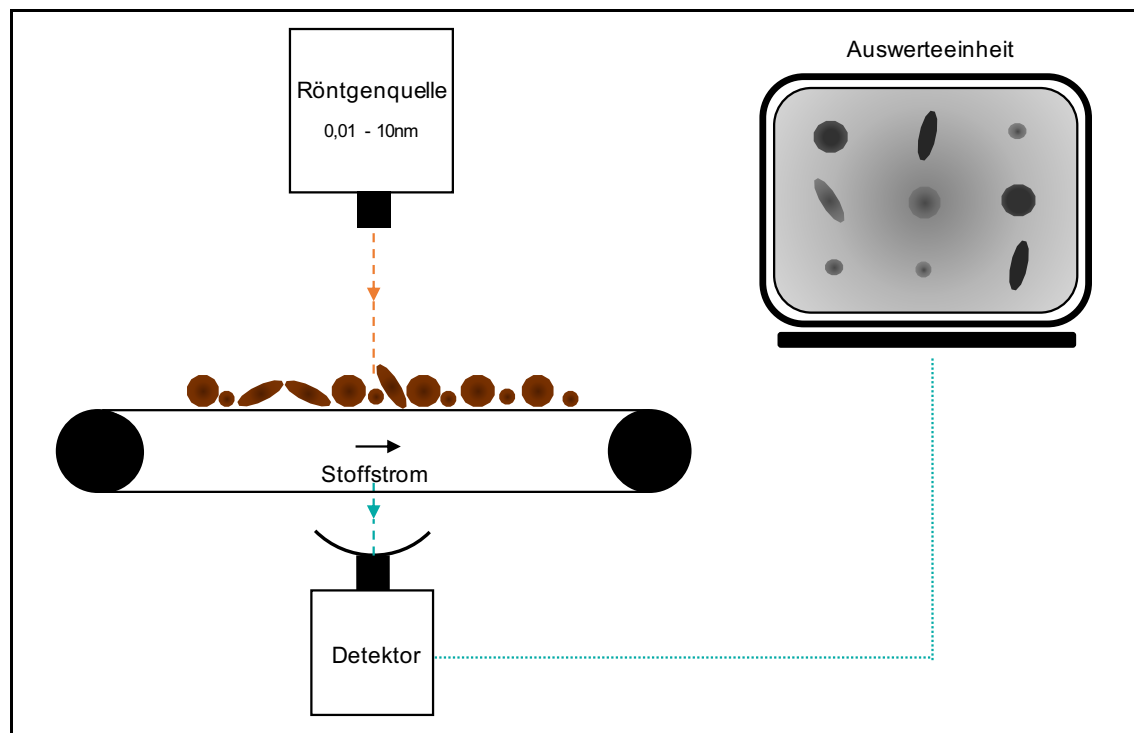


Abbildung 12: Funktionsprinzip XRT- Analyse [44]

In der Rohstoffindustrie wird die XRT- Analyse bei der Sortierung von Kohle, verschiedenen Erzen zum Beispiel Chromit, Wolframit, Scheelit, und bei der Diamantsortierung eingesetzt. Dabei wird der Absorptionsunterschied zwischen werthaltigen und wertlosen Partikeln, zur Trennung, ausgenutzt. Die XRT- Analyse hat im Gegensatz zur XRF- Analyse eine höhere Auflösung von ca. 0,5 mm. Des Weiteren können Durchsätze von ca. 100 t/h je Meter Breite erreicht werden. Limitiert ist die XRT- Analyse bei der möglichen Dicke des Stoffstromes. Diese liegt bei Gesteinen bei maximal 40 mm und bei Kohle bei maximal 100 mm [31].

2.2.7 Radiometrische Analyse

Die sensorgestützte, radiometrische Analyse beruht auf der natürlichen Radioaktivität von bestimmten Partikeln innerhalb des Stoffstromes. Die natürliche Radioaktivität wird durch die Anwesenheit von bestimmten Elementen ausgelöst. Diese sind unter anderem Uran, Thorium und Kalium. Infolgedessen wird die radiometrische Analyse hauptsächlich bei der Aufbereitung von Uranerz verwendet. Dabei wird das Nebengestein, zumeist Calcit, vom Uranerz getrennt.

Der Aufbau, einer radiometrischen Analyseeinheit, ist mit einem Förderband und Szintillationsdetektoren, unterhalb des Bandes, im Gegensatz zu anderen sensorgestützten Technologien, einfach. Ein Szintillationsdetektor besteht aus einem Photomultiplier und einem ohmschen Widerstand. Das Funktionsprinzip beruht auf der Emission von Photonen, welche auf die lichtempfindliche Kathode des Photomultipliers auftreffen. Dadurch werden Elektronen ausgelöst, welche am ohmschen Widerstand abfließen. Der dabei entstehende Spannungsimpuls wird detektiert und analysiert [31].

Der Aufbau und das Funktionsprinzip werden an dieser Stelle nicht explizit dargestellt, da das Vorkommen von Uranerzen auf Tunnelbaustellen vom Autor als sehr gering eingeschätzt wird.

2.2.8 UV- Licht Fluoreszenz- Analyse

Bei der UV- Licht Fluoreszenz- Analyse handelt es sich um eine Methode, welche die Nachleuchtzeit von bestrahlten Materialien auswertet. Dabei wird das Objekt mit UV- Licht angeblitzt. Das bestrahlte Objekt leuchtet, abhängig von seiner Materialart, unterschiedlich lange nach. Die Sensoren detektieren die Intensität und die Dauer des reflektierten Lichtimpulses. Für das menschliche Auge ist die Nachleuchtzeit nicht ersichtlich, da dies ein Vorgang von nur wenigen Milliardstel Sekunden ist. In einer Auswerteeinheit wird das Material aufgrund seiner spezifischen Reflexions- Intensität und Nachleuchtdauer identifiziert. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 13 dargestellt.

In der Kunststoffindustrie wurden mit diesem Verfahren ausschließlich Laborversuche an der Ludwig-Maximilians- Universität in München durchgeführt. Diese zeigten, dass jedes Polymer eine charakteristische fluoreszierende Eigenschaft besitzt [18].

Bei Mineralien wurde derselbe Effekt nachgewiesen, wenn sie mit UV- Licht bestrahlt werden. Das für diesen Effekt bekannteste Mineral, der Fluorit (CaF_2), wurde auf Grund seiner Fluoreszenz unter UV- Licht, demnach benannt. Bei Mineralien treten zwei Effekte auf. Die Fluoreszenz und die Phosphoreszenz. Wobei die Phosphoreszenz den Nachleuchteffekt beschreibt. Die Fluoreszenz endet, wenn die Lichtquelle erlischt. Beide Effekte werden unter dem Überbegriff der Photolumineszenz zusammengefasst [45].

Der physikalische Hintergrund der UV- Licht- Fluoreszenzanalyse beruht auf der Anregung von Elektronen, wenn sie mit UV- Licht im Wellenlängenbereich von 200 – 380 nm bestrahlt werden. Die angeregten Elektronen fallen, in kürzester Zeit, unter Relaxation, wieder in ihren Grundzustand zurück. Der Effekt der Relaxation beschreibt, dass die Elektronen bei ihrem Übergang in den Grundzustand, Energie in Form von Photonen im sichtbaren Spektrum emittieren [46].

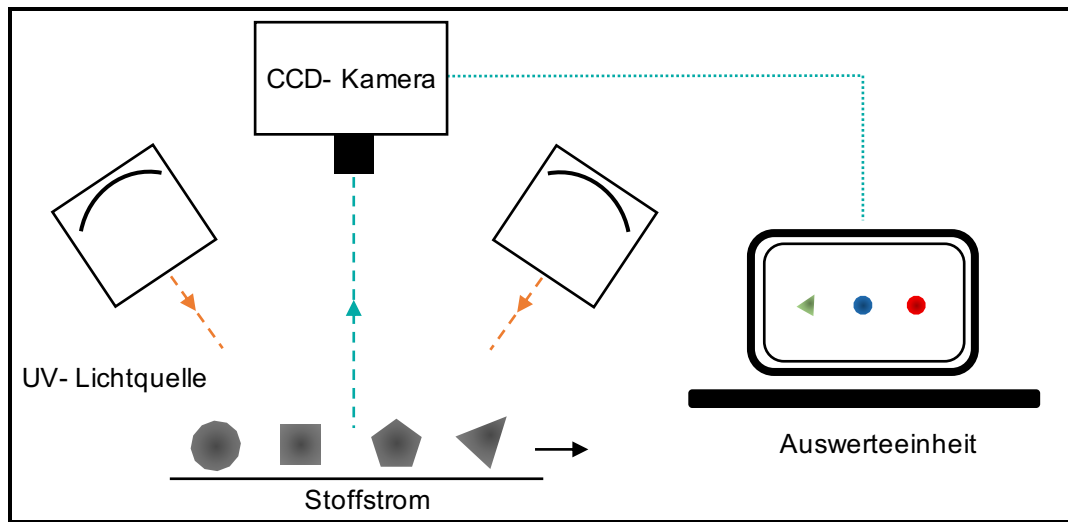


Abbildung 13: Funktionsprinzip der UV- Licht Fluoreszenz [47]

2.2.9 Terahertz (THz)- Bildgebung

Die Terahertz- (THz) Messung ist einer der jüngsten hier behandelten Analysemethoden. Die industrielle Anwendung ist noch eingeschränkt und viele Versuche wurden nur unter Laborbedingungen durchgeführt. Eine der am häufigsten verwendeten Methoden ist die THz- Zeitbereichsspektroskopie (TDS für time domain spectroscopy). Grund der häufigen Anwendung ist die Tatsache, dass die THz- TDS Messung die Amplitude und die Phase des elektrischen Feldes gleichzeitig identifiziert. Infolgedessen können die Komplikationen, welche zum Beispiel bei der NIR- Spektroskopie auftreten, entfallen. Dadurch entwickelten sich viele Anwendungsmöglichkeiten. Unter anderem kann mit der THz- TDS, der Innenraum von Verpackungen analysiert werden, da gewisse Materialien im THz- Spektrum spezifische Resonanzeigenschaften aufweisen, während die Verpackung transparent erscheint. Bei Sicherheitskontrollen wird dieser Effekt ausgenutzt, um versteckte Drogen zu detektieren. Des Weiteren weisen viele Materialien eine hohe Absorption im THz- Frequenzbereich auf. Dies hat Auswirkungen auf die Eindringtiefe der THz- Wellen, welche vor allem bei Proben mit hohem Wassergehalt, nur wenige Millimeter entspricht.

Die Weiterentwicklung der THz- Spektroskopie ist jedoch in gewissen Bereichen limitiert, da die Wellenlänge der THz- Strahlung mit den geometrischen Merkmalen der Proben übereinstimmen. Dadurch kann es zu einer Verdeckung der spektralen Materialeigenschaften kommen [49]. Des Weiteren ist die industrielle Anwendung, auf Grund der hohen Kosten im Zusammenhang mit der THz- Technologie, beschränkt. THz- Wellen durchdringen viele Gegenstände, die kein Wasser oder Metall enthalten. Daraus resultiert, dass Wasser und Metalle die THz- Strahlung effektiv absorbieren oder reflektieren. Zum Beispiel können kleine Hohlräume bzw. Fehlstellen in Stromkabel detektiert werden [50].

Die Funktionsweise der THz- TDS beruht auf elektromagnetische Transienten, welche einem impulshaften Einschwingprozess entsprechen. Diese werden opto- elektrisch durch Femtosekunden- (fs) Laserpulse erzeugt. Dadurch wird eine Helligkeit erreicht, welche herkömmliche Ferninfrarot- Quellen übersteigt. Zusammen mit hochempfindlichen Detektoren entsteht eine Bildgebung im THz- Bereich [51]. Die nur wenige zehn fs langen Laserpulse werden von einem Strahlteiler geteilt. Ein Teil wird zum THz- Emitter geleitet, an dem sie THz- Strahlung anregen. Der andere Teil wird über eine Verzögerungsstrecke zum Detektor geleitet, an dem die THz- Strahlung detektiert wird. Die Verzögerungsstrecke dient ausschließlich der zeitlichen Verschiebung zwischen Erregung und Detektion, damit eine zeitliche Abtastung sichergestellt werden kann. Der THz- Emitter und Detektor sind photoleitende Antennen, welche aus einem schnellen, optischen Schalter bestehen. An der Auswerteeinheit wird das Signal vom Detektor verstärkt und am Computer angezeigt. Dargestellt wird das THz- Spektrum, ermittelt mit der Fourier- Transformation aus dem THz- Puls [52].

In der folgenden Abbildung ist das Funktionsprinzip der THz- TDS schematisch dargestellt.

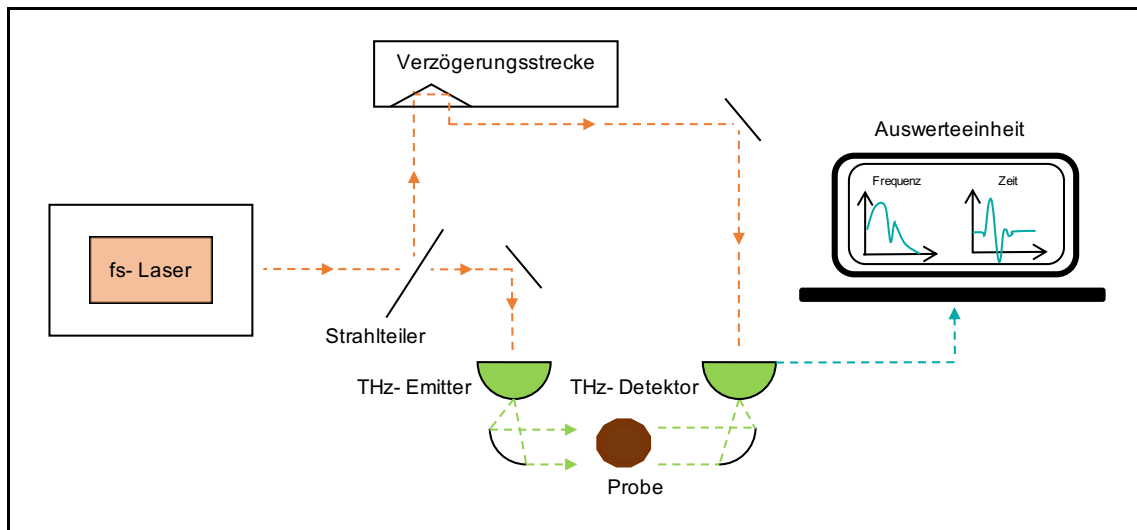


Abbildung 14: Funktionsprinzip THz- TDS [53]

Ein weiterer Vorteil der THz- Strahlung ist, dass sie nicht ionisierend ist. Daher ist THz- Strahlung sicherer als Röntgenstrahlung [50].

2.2.10 Laserspektroskopie

Bei Laser- Analysemethoden gibt es keinen bestimmten Spektrum- Bereich per se, weil Laser eine Abkürzung für den Prozess der Lichterzeugung darstellt. Laser bedeutet zu Deutsch: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung und stellt eine Lichtquelle dar. Laser sind Lichtquellen, bei denen die Atome nicht einzeln spontan Licht in allen Richtungen streuen, sondern das Licht synchronisieren. Das Licht wird dadurch in gleicher Phase und Richtung abgestrahlt. Sie erstrecken sich im elektromagnetischen Spektrum vom weichen Röntgenstrahlenbereich bis in den fernen Infrarotbereich.

Auf Grund der speziellen Art der Lichterzeugung haben Laser charakteristische Eigenschaften. Unter anderem besitzt Laserlicht eine hohe Kohärenz, wodurch es in der Messtechnik Anwendung findet. Des Weiteren strahlen Laser Licht aus, dass eine sehr hohe Wellenlängenstabilität besitzt. Zudem ist der Strahl nahezu parallel, dies führt zu einer hohen Intensität. Eine weitere Eigenschaft von Lasern ist das Aussenden von sehr kurzen Pulsen, wobei deren Dauer nur wenige fs beträgt [25].

In Tabelle 5 ist ein Überblick über die wichtigsten Laser, mit ihrer Anwendung, zusammengestellt.

Lasersystem	Laserart	Wellenlänge [µm]	Anwendung
Gaslaser	CO ₂ - Laser	9,1 - 11,0	LIDAR, Materialbearbeitung
	Excimerlaser	0,193 - 0,351	Photochemie
	Cu- Dampfaser	0,51 / 0,58	Pumplaser
	He- Ne- Laser	0,63 / 1,15 / 3,39	Holographie
	Ar ⁺ - Laser	0,35 - 0,53	Pumplaser
Farbstofflaser	Farbstofflaser	0,3 - 1,3	Spektroskopie
Festkörperlaser	Nd:YAG- Laser	1,064	Messtechnik, , Materialbearbeitung
	Ti- Saphir- Laser	0,65 - 0,9	LIDAR
Halbleiterlaser	GaAlAs- Laser	0,65 - 0,9	CD
	InGaAsP- Laser	1,2 - 1,6	Nachrichtenübertragung
freie Elektronenlaser	-	0,5 - 1000	-
Plasma- Superstrahlungslaser	-	0,004 - 0,1	-

Tabelle 5: Überblick der wichtigsten Laser [54]

Die Laserspektroskopie gleicht nahezu allen anderen Spektroskopie- Arten, bringt aber durch die Verwendung einer anderen Lichtquelle, mehrere Vorteile mit sich. Im Gegensatz zur herkömmlichen Spektroskopie, mit einer breitbandigen Lichtquelle, wird bei der Laser- Spektroskopie eine schmalbandige Lichtquelle, der Laser, verwendet. Dies resultiert in:

- einer höheren spektralen Auflösung, welche nicht durch die verwendeten Instrumente, sondern durch die Doppler- Breite der Absorptionslinien, begrenzt ist.
- einer höheren Empfindlichkeit, auf Grund der Verringerung des minimal noch messbaren Absorptionskoeffizienten.
- vernachlässigbar geringe Störsignale, auf Grund der hohen spektralen Leistungsdichte des Lasers.
- geringe Intensitätsschwankungen, durch Reduzierung der Amplitudenstabilisierung.
- einer Verwendung von langen Absorptionswegen, durch die räumliche Bündelung der Strahlung.

Auf Grund der oben genannten Vorteile wurden zahlreiche Methoden entwickelt. Die wichtigsten Methoden der Laserabsorptionsspektroskopie werden nachfolgend erläutert.

- Absorptionsspektroskopie
 - = Messung der Laserleistungsänderung durch die Absorption der Probe
 - o Frequenzmodulation des Lasers
 - o Messung der Abklingzeit eines optischen Resonators (Cavity- Ringdown- Spectroscopy)
 - o Absorptionsspektroskopie innerhalb des Laserresonators
- Direkte Messung der absorbierten Photonen
 - = Messung der absorbierten Energie
 - o Anregungsspektroskopie
 - o Photoakustische Spektroskopie
 - o Ionisationsspektroskopie
 - o Optogalvanische Spektroskopie
 - o Optothermische Spektroskopie
- Magnetische Resonanz- und Stark- Spektroskopie
 - = Bestimmung der Absorptionslinien mit Hilfe von magnetischen oder elektrischen Feldern
- Geschwindigkeitsmodulations- Spektroskopie
 - = Messung der Absorptionsspektren in molekularen Gasentladungen

Die oben erwähnten Methoden beruhen auf der Detektion der Laserwellenlänge über mehrere Absorptionsübergänge hinweg [55].

Das Laserspektroskopie- Verfahren wird in der Kunststoffaufbereitung verwendet. Jeder Kunststoff hat sein eigenes spezifisches Spektrum. Der Spektrometer zeichnet dieses Spektrum auf und kann es sehr genau dem bestimmten Kunststoff zuordnen. In der Kunststoffaufbereitung können dadurch Fremdkörper vom Stoffstrom abgetrennt werden. Im Gegensatz zur NIR- Spektroskopie können auch schwarze Kunststoff- Flakes detektiert und abgetrennt werden [18].

2.2.11 Laser- induzierte- Fluoreszenz (LIF)

Im Gegensatz dazu wird bei der Laser- Fluoreszenzspektroskopie der Laser auf einem Übergang festgehalten. Infolgedessen wird die, des angeregten Zustandes, emittierte Fluoreszenz gemessen. Der Vorteil bei der Verwendung eines Lasers liegt darin, dass jeder beliebige Übergang beleuchtet werden kann. Dadurch ist eine selektive Anregung einzelner atomarer Niveaus möglich. Es entstehen einfache Fluoreszenzspektren, welche schnell identifiziert werden können.

Die LIF- Methode ist, unter anderem, die empfindlichste Messmethode im VIS- und UV- Spektralbereich. Grund dafür ist die hohe Quantenausbeute durch die sehr kurze Lebensdauer der angeregten Zustände. Im IR- Spektrum ist die Empfindlichkeit geringer, da die Quantenausbeute geringer ist. Zudem sind die IR- Detektoren nicht so leistungsstark. Daraus resultiert, dass im IR- Bereich die photoakustische Spektroskopie, bei der die Wärme der Anregungsenergie detektiert wird. Die Anwendung beschränkt sich jedoch auf die Messung der molekularen Luftverunreinigung, wie zum Beispiel die Messung der Schadstoffkonzentration in Abgasen [55].

2.2.12 Laser- Online- Analyse (LOLA) und Laser- induzierte Plasmaspektroskopie (LIBS)

Die Laser- Online- Analyse (LOLA) basiert auf der Laser- induzierten Plasmaspektroskopie (LIBS, aus dem Englischen „laser- induced breakdown spectroscopy“) und resultiert auf einer Online Messung der Materialparameter in Stoffströmen. Dadurch können die Qualitätsparameter von Kohle, Holz oder Glas am Förderband detektiert werden.

Bei der LIBS, oder auch bezeichnet als Laser- Plasma- Emissionsspektroskopie, wird eine kleine Probenmenge mit Hilfe eines Lasers, meist ein Nd:YAG- Laser, verdampft. Dabei kommt es zu einer Plasmaentladung. Anschließend wird eine optische Spektralanalyse des induzierten Mikroplasmas durchgeführt. Dabei kommt es zu einer Anregung der elektronischen Übergänge durch die LIF- Methode. Infolgedessen emittieren die Atome des Plasmas eine charakteristische Linienstrahlung. Diese Strahlung wird detektiert und es können Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Probe gezogen werden. Des Weiteren kann mit Hilfe der LIBS- Methode die Art und Konzentration der verschiedenen Atome und Ionen im Plasma bestimmt werden [55] [56]. Das Funktionsprinzip der LIBS- Methode ist in der nachfolgenden Abbildung beschrieben.

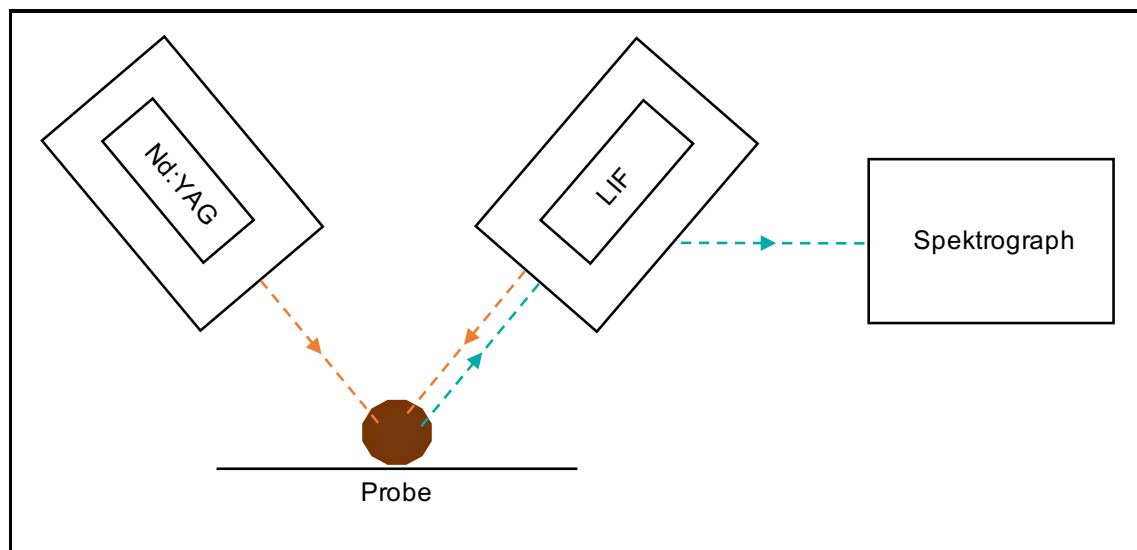


Abbildung 15: Funktionsprinzip der LIBS- Methode [57]

Der Vorteil dieser Methode ist, dass das Verfahren ohne Probenvorbereitung durchgeführt werden kann. Daher eignet sich die LIBS als online- Analyseverfahren. Bei der LOLA wird aus der detektierten charakteristischen Linienstrahlung, über eine statistische Methode die Materialparameter berechnet. Anschließend werden die berechneten Parameter mit Proben bekannter Zusammensetzung verglichen.

Bei der Anwendung in der Kohleindustrie wurde der Wassergehalt, der Aschegehalt, der Heizwert sowie die elementare Zusammensetzung ermittelt [56].

2.2.13 Laser- Raman- Spektroskopie

Die Raman- Spektroskopie ist eine der wichtigsten Methoden in der Mikroelektrik, Mineralwissenschaft, Kristallographie und Medizin. Dabei wird die Raman- Streuung an der Oberfläche eines Materials erfasst. Die Raman- Streuung ist die nicht- elastische Streuung eines Photons.

Die Probe wird mit Laserlicht bestrahlt, dabei kommt es an der Moleküloberfläche zur Emission der Raman- Streuung. Diese wird vom Spektrographen abgebildet und anschließend durch eine CCD- Kamera identifiziert. In Abbildung 16 ist der Aufbau des Raman- Spektrometers dargestellt.

Mit Hilfe der Raman- Spektroskopie lässt sich die chemische Struktur, wie zum Beispiel die chemischen Bindungen und chemischen Gruppen, der Probe nachweisen. Des Weiteren kann die Kristallstruktur von Mineralen identifiziert werden. Auf Grund der vielseitigen und einfachen Anwendung etablierte sich die Raman- Spektroskopie in der Keramik, zur Analyse der Mikrostruktur, Textur und Orientierung, sowie in der Kunststoff- Analyse, zur Untersuchung von Molekülstrukturen von Polymerketten [58].

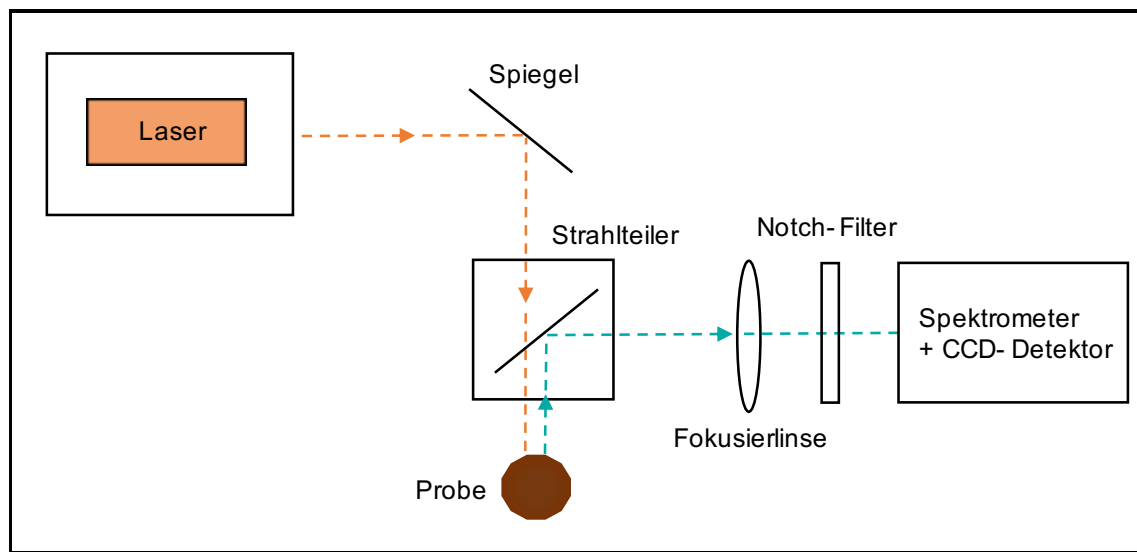


Abbildung 16: Aufbau des Raman- Spektrometers [59]

2.2.14 Laserscanning (LIDAR)

LIDAR (aus dem Englischen, für „light detection and ranging“) basiert auf dem Prinzip des Lichtlaufzeitsensors. Ein Lichtlaufzeitsensor detektiert die Laufzeit des Lichtes vom Sensor zum Objekt und wieder zurück. Auf Basis einer hochauflösenden Zeitmessung (t) wird der Abstand (d) des Objektes zum Sensor, mit Hilfe der in Formel 4 dargestellten Zusammenhänge, berechnet.

$$d = \frac{1}{2} * c * t$$

Formel 4: Berechnung des Objektabstandes beim Lichtlaufzeitsensor

d	Abstand des Objektes	[m]
c	Lichtgeschwindigkeit	[m/s]
t	Laufzeit des Lichtes	[s]

Beim LIDAR- Verfahren wird der Objektraum in Form eines 2D- Schnittes vermessen. Daraus resultiert die Entfernung mehrerer Objektpunkte vom Sensor, unter Berücksichtigung des Winkels, der Scanebene. Die technischen Grenzen eines LIDAR- Sensors müssen bei der Auslegung der Anlage berücksichtigt werden. Diese sind wie folgt:

- 90° Gesichtsfeld
- 0,5° Winkelauflösung
- 1 cm Tiefenauflösung

Des Weiteren muss bei dynamischen Prozessen die Verzerrung der Objektgeometrie berücksichtigt werden. Dennoch können 3D- Messungen erfolgen, indem mehrere Laserscanner angeordnet werden. Daraus resultiert eine zusätzliche Scan- Ebene [60].

Das LIDAR- Verfahren wird bereits mehrfach in der Bergbauindustrie eingesetzt. Einerseits wird der Volumenstrom am Förderband, unabhängig von der Feuchtigkeit des Stoffstromes, detektiert. Andererseits können weitere Faktoren wie zum Beispiel die Bandgeschwindigkeit, die Füllhöhe, der Schwerpunkt des Stoffstromes gemessen, sowie eine Bandlaufkontrolle durchgeführt werden [61].

In Abbildung 17 ist das Messprinzip der LIDAR- Volumstrommessung dargestellt.

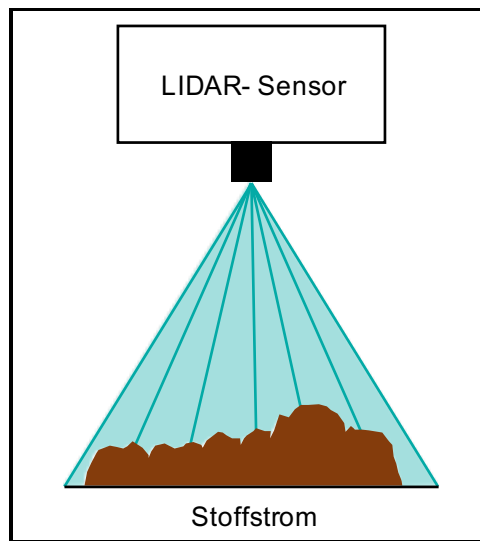


Abbildung 17: Messprinzip LIDAR [62]

2.2.15 Lasertriangulation (LT)

Ein weiteres Verfahren zur Ermittlung des Volumenstroms auf einem Förderband ist die Lasertriangulation (LT). Das Verfahren beruht auf der Entfernungsmessung, mit Hilfe der Geometrie von ebenen Dreiecken. Bei der LT wird die Seitenlänge eines Dreieckes, die Basis, sowie die beiden angrenzenden Winkeln, bestimmt. Auf Grund geometrischer Beziehungen kann infolgedessen die gesuchte Entfernung zum Objekt berechnet werden. Es wird dabei zwischen zwei Verfahren unterschieden:

- Lasertriangulation: Ein Winkel und eine Seitenlänge sind bekannt, der zweite Winkel wird gemessen.
- Stereorekonstruktion: Die Basislänge ist bekannt, die Winkel werden gemessen.

Bei der LT wird der Laserstrahl vom Objekt gestreut und vom Detektor detektiert. Am besten dafür geeignet sind opake – nicht transparente – Materialien. Als Detektoren werden Zeilenkameras verwendet. Während die Position des Lasers und des Detektors bekannt ist, wird die Position des Objektes berechnet.

Ein weiteres Verfahren, welches auf dem Prinzip der LT beruht, ist das Lichtschnittverfahren. Dabei wird das Objekt mit einem 1D- Schnitt, wie ein Fächer, abgetastet. Das vom Objekt gestreute Licht wird von einem 2D- Sensor detektiert und in weiterer Folge ausgewertet. Die Auswerteeinheit berechnet dabei die Höhendifferenz des Objektes zum Nullpunkt. Der formelmäßige Zusammenhang ist in Formel 5 und Abbildung 18 erläutert. Daraus entsteht ein 2D- Bild des gescannten Objektes.

$$h = \frac{d}{\tan(\alpha)}$$

Formel 5: Berechnung der Höhendifferenz beim Lichtschnittverfahren

h	Höhendifferenz des Prüfobjektes	[m]
d	laterale Auslenkung des Lichtfächers	[m]
α	Triangulationswinkel	[°] [60]

In der folgenden Abbildung ist das Prinzip der LT auf Basis des Lichtschnittverfahrens dargestellt und erläutert.

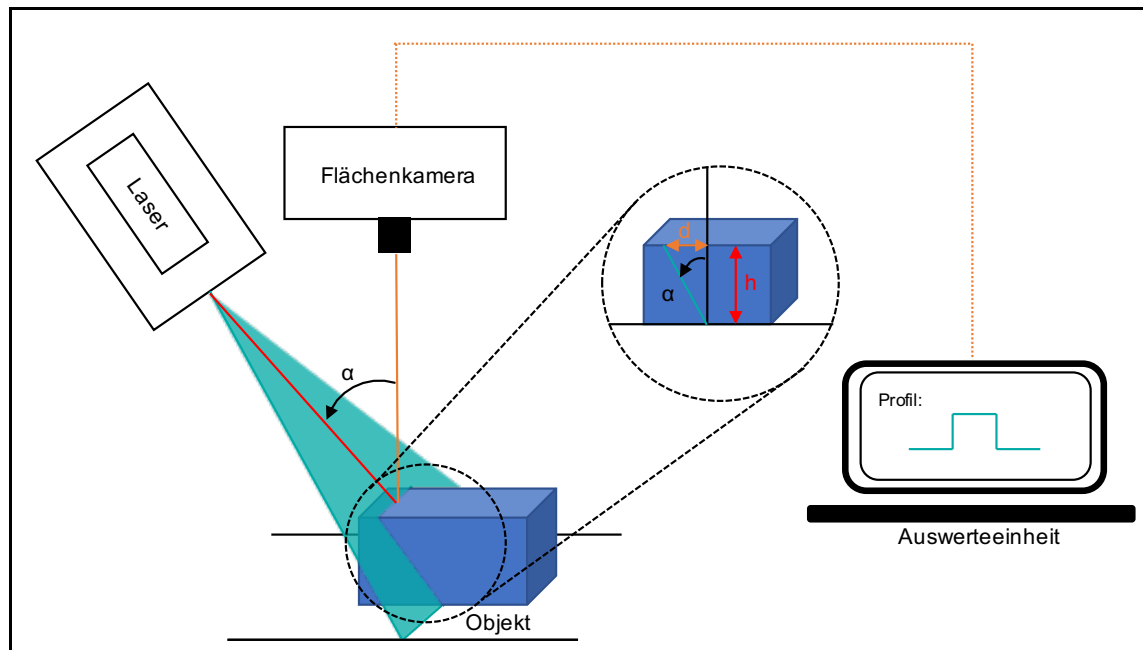


Abbildung 18: Funktionsprinzip der LT bzw. des Lichtschnittverfahrens [63]

2.2.16 Volumenstrommessung über das Stoffstrom- Gewicht

Die Messung des Stoffstrom- Gewichts am Förderband ist eine alte Methode zur Beurteilung des Volumenstroms sowie der Förderleistung. Im Gegensatz zur LIDAR- oder LT- Methode müssen jedoch die Material- Schüttdichte und die Förderbandgeschwindigkeit bekannt sein. Es gibt unterschiedliche Verfahren zur Detektierung des Stoffstrom- Gewichts:

- Bandwaage
- Dosierwaagen
- Prallplattenwaage

Bei der Bandwaage wird das Gewicht über Kraftaufnehmer gemessen. Diese sind unter Wiegerollen des Förderbandes angeordnet. Die Messgenauigkeit ist abhängig von der Dauer des Materials auf der Messstrecke, daher müssen die Konstruktionsvorgaben eingehalten werden. Des Weiteren muss eine geringe Förderbandgeschwindigkeit eingehalten werden, damit die Verweildauer dem Erfassungsbereich der Kraftaufnehmer entspricht. Infolgedessen ist neben der Messung der Bandwaage eine Geschwindigkeitsmessung des Förderbandes essenziell. Beide gemessenen Parameter, die Geschwindigkeit und die Masse, werden in der Wiegeelektronik ausgewertet.

Der Aufbau einer Bandwaage ist in Abbildung 19 dargestellt.

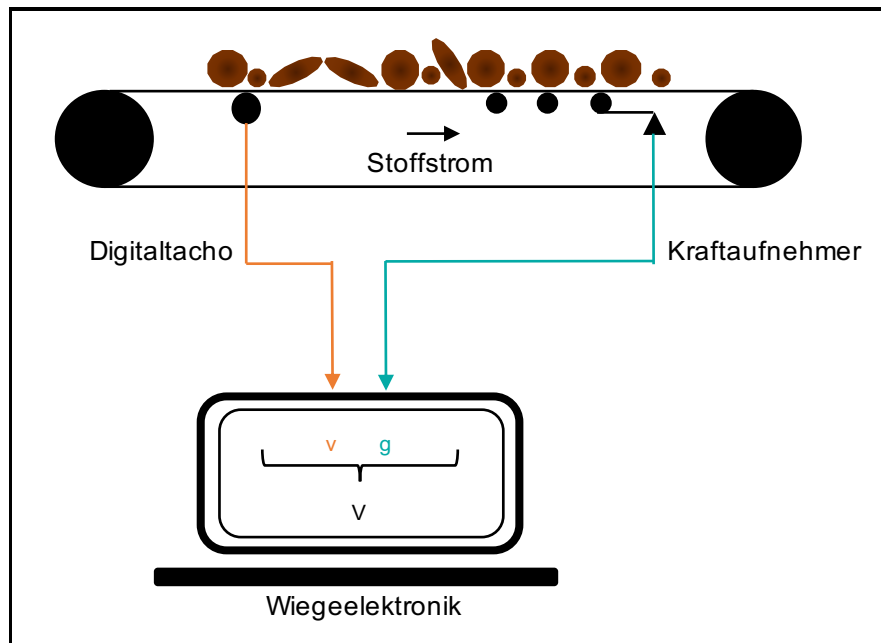


Abbildung 19: Funktionsaufbau einer Bandwaage [64]

Dosierwaagen beruhen auf demselben Prinzip wie Bandwaagen, jedoch kann zusätzlich die Förderbandgeschwindigkeit automatisch geregelt werden, sodass sich ein gleichmäßiger Massestrom am Förderband befindet. Dies kann notwendig sein, wenn ein nachgeschalteter Prozess von einem definierten Massestrom abhängig ist.

Bei Prallplattenwaagen wird die Aufprallkraft, des Stoffstromes, auf eine schräge Ebene gemessen und auf das Gewicht zurückgerechnet [65].

2.2.17 Mikrowellenspektroskopie

Die Mikrowellenspektroskopie dient, im Gegensatz zur NIR- Spektroskopie, zur Messung der Gesamtfeuchte. Auf Grund der Absorption, Reflexion und Streuung der Mikrowellen in feuchten Stoffen gibt es drei unterschiedliche Verfahren der Feuchtebestimmung. Wobei das Transmissions- und Reflexionsverfahren demselben Prinzip wie der NIR- Spektroskopie entsprechen.

Hingegen ist das Resonatorverfahren ein sehr genaues Labormessverfahren. Dabei wird die Probe, in einem Hohlraumresonator, durch Mikrowellen, zum Schwingen gebracht. Die Wassermoleküle verändern dadurch das Mikrowellenfeld und in weiterer Folge, ist die Resonanzfrequenzverschiebung sowie die Amplitudenänderung messbar. Die Methode erfordert jedoch eine Kalibrierung und ist für eine kontinuierliche Messung nicht geeignet.

Für kontinuierliche Messungen, der Feuchte, eignet sich derzeit nur das Transmissions- oder Reflexionsverfahren [36].

Bei beiden Verfahren wird der Unterschied der Dielektrizitätskonstanten von Wasser und dem Stoffstrom ausgenutzt. Daraus resultiert, dass die Mikrowellen mit den polaren Wassermolekülen interagieren. Es kommt zu einer Abschwächung der Mikrowellenenergie, welche proportional zum Wassergehalt ist. Die Anwendung als online- Analyse auf Förderbändern ist erprobt und in Abbildung 20 dargestellt [66].

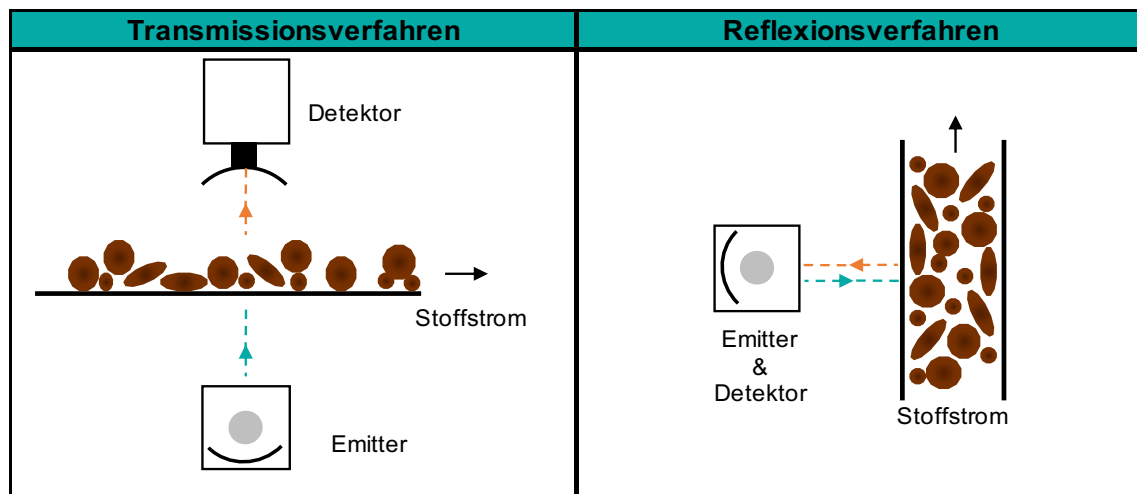


Abbildung 20: Unterschiedliche Verfahren der Mikrowellenspektroskopie [67]

2.2.18 Graustufensensor und Farbsensoren

Bei der automatischen Sichtprüfung kommen graustufen- oder Farbsensoren zum Einsatz. Die Funktion dieser Sensor basiert auf der Analyse von aufgenommenen Bildern. Dabei ist entscheidend, dass das Bild ausreichend Kontrast aufweist. Ein Bild des Graustufensensors besteht aus 256 unterschiedlichen Grautönen. Beim Farbsensor lassen sich 16 Millionen Farbtöne darstellen. Diese kleinen Unterschiede in der Bildhelligkeit werden bei der Merkmalidentifikation ausgenutzt [68].

In der Kunststoffrecycling- Industrie werden diese Sensoren zur Aussortierung von Kunststoffen mit falscher Farbe am Förderband verwendet, um die geforderte Produktreinheit zu gewährleisten [18].

2.2.19 Induktions- Sortiersystem (ISS)

Die elektromagnetische (induktive) Sortierung ist weit verbreitet. Dabei wird der Stoffstrom durch ein elektromagnetisches, induktiv erzeugtes, Feld geführt. Dieses entsteht durch das Anlegen einer Wechselspannung an einer Spule im Sensor. Bei der Interaktion der Stoffstrompartikel mit dem elektromagnetischen Feld entstehen Wirbelströme, welche das Feld des Sensors beeinflussen. Diese Beeinflussung kann gemessen werden. In Abbildung 21 ist das Prinzip eines elektromagnetischen Sensors beschrieben.

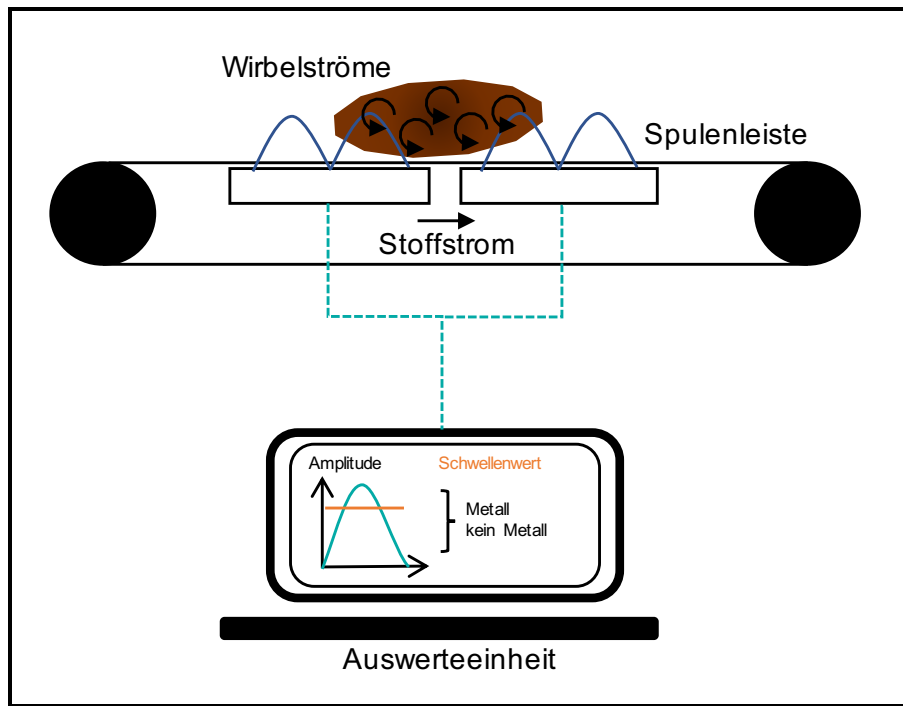


Abbildung 21: Funktionsprinzip eines elektromagnetischen Sensors [69]

Die Sensoren werden hauptsächlich in der Sekundärrohstoff- Aufbereitung verwendet. Entscheidend für die Anwendung dieser Sensoren ist das Vorkommen von leitenden bzw. metallhaltigen Partikel im Stoffstrom, da nichtleitende Bestandteile nicht detektiert werden können. Die Detektion von Bewehrungseisen im Stoffstrom ist ein weiteres Anwendungsgebiet dieser Sensoren. Die maximale Auflösung ist jedoch mit 15 mm limitiert [31].

Zudem gibt es unterschiedliche Bauformen des Induktions- Sortiersystems (ISS). Es wird unterschieden zwischen Flächen- und Tunnel- Metalldetektoren. Bei Flächendetektoren sind die Sensoren unterhalb des Förderbandes angebracht. An der Analyseeinheit kann die Signalschwankung durch das Vorhandensein von metallischen Gegenständen abgelesen werden. Tunneldetektoren können zudem auch metallische Bestandteile, welche eingeschlossen sind, detektieren [18].

Bei der Auslegung einer Sortieranlage muss berücksichtigt werden, dass die Spulenleiste möglichst nahe am Gurt befestigt wird, da die magnetische Induktion mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Des Weiteren ist die Kombination mit Farbzeilenkameras sinnvoll, damit die detektierten metallischen Bestandteile lokalisiert werden können [26].

2.2.20 Marker (Tracer)- basiertes Sortieren (TBS)

Das Tracer- basierte Sortierverfahren (TBS) ist auch in der Kunststoff- Aufbereitung ein noch junges Verfahren. Es basiert auf Fluoreszenz, welche beim Auftreten einer elektromagnetischen Strahlung und energetischen Übergängen emittiert wird. Als Energiequelle dient UV- Strahlung, welche die Fluoreszenzmarker anregt. Infolgedessen kommt es zu einer Emission von charakteristischen Linien in einem kürzeren Wellenlängenbereich. Dieser Wellenlängenbereich entspricht dem VIS- Bereich und die Emissionslinien können, durch sichtbares Licht, identifiziert werden. Derselbe Effekt erscheint, wenn fluoreszierende Leuchtstoffe sichtbares Licht emittieren, wenn sie mit UV- Strahlung bestrahlt werden.

Die Fluoreszenz- Partikel werden in bestimmte Bestandteile des Stoffstroms integriert um sie anschließend detektieren zu können. In der Kunststoffindustrie eignen sich unter anderem organische Moleküle oder Seltenerdelemente als Fluoreszenz- Marker. Daraus resultiert, dass alle beliebigen Stoffe unabhängig ihrer physikalischen Eigenschaften getrennt werden können [71].

2.2.21 Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA)

Die Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA), zu Deutsch, die Prompt- Gamma- Neutronen- Aktivierungs- Analyse, basiert auf einer Kernreaktion, welche bei jedem Isotop eines Elementes stattfindet. Als einzige Ausnahme gilt das stabile Isotop des Heliums ^4He . Bei der Kernreaktion handelt es sich um die Einfangreaktion von Neutronen. Daraus resultiert, dass mit der PGNAA- Methode eine vollständige Element- und Isotopenanalyse durchgeführt werden kann. Anfangs war diese Methode jedoch keine Standardmethode und wurde nur als ergänzendes Analyseinstrument eingesetzt. Grund dafür war das Auftreten von vielen Gammastrahlenpeaks, welche eine genaue Kalibrierung des Detektionssystems erforderlich machten.

Bei der Einfangreaktion von Neutronen in wasserhaltigen Materialien wurde 1934, erstmals, die Emission einer prompten Gammastrahlung, eine stark durchdringende Gammastrahlung, detektiert. Daraus entwickelte sich die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA), welche eine der wichtigsten Techniken für die Spurenelementanalyse ist. Auf Grund der zunehmenden Verbesserung der Redaktoren und Detektoren etablierte sich die PGNAA- Methode.

Die Grundlage der PGNAA basiert auf Neutronen, da ihre elektrische Ladung gleich Null ist. Dies führt dazu, dass sich ihre kinetische Energie bei der Annäherung zu einem Kern nicht ändert. In weiterer Folge können Neutronen jeder beliebigen Energie Kernreaktionen auslösen. Anhand dieser Reaktionen können die Eigenschaften des Materials analysiert werden.

Die wichtigste Reaktion, welche als Grundprozess der PGNAA bezeichnet wird, ist die Einfangreaktion von Neutronen bzw. die (n, γ) - Reaktion. Dabei wird ein Neutron vom Kern eingefangen, ohne ein anderes Teilchen zu emittieren. Dadurch entsteht ein zusammengesetzter Kern mit einer bestimmten Anregungsenergie. Diese Anregungsenergie ist gleich der Bindungsenergie plus der kinetischen Energie des Neutrons. Der zusammengesetzte Kern zerfällt in seinen Grundzustand und gibt die Bindungsenergie in Form von Gammastrahlen ab. Diese prompten Gammastrahlen sind charakteristisch. Dabei entspricht der Energiewert dem Kern und die Intensität korreliert mit der Anzahl der Atome.

Ein PGNAA- Messsystem besteht aus einer Neutronenquelle, welche ein charakteristisches Energiespektrum aufweist. Einem Kollimationsstrahlrohr, mit welchem der Neutronenstrahl auf die Probe gerichtet wird. Der Verschluss dient zur Steuerung des Strahls. Damit die Probe reproduzierbar platziert werden kann ist das Messsystem mit einer Zielanordnung ausgestattet. Zur Detektion der Gammastrahlung dient ein Gammastrahlendetektor. Um das Messergebnis zu verbessern wird ein Strahlenstopp verwendet, welcher die Neutronen, die nicht von der Probe absorbiert werden, filtert. Die Arbeitssicherheit auf Grund der Neutronen- und Gammastrahlung wird durch eine Abschirmung sichergestellt.

Der Vorteil der Neutroneneinfangreaktion liegt darin, dass die Neutronen sowie die Gammastrahlung sehr durchdringend sind. Des Weiteren kommt es zu einem vernachlässigbar kleinen Anteil an Selbstabsorption. Zudem ist die PGNAA matrixunabhängig, da der Neutronenstrahl die gesamte Dicke des Materials durchleuchtet und dadurch eine durchschnittliche Zusammensetzung wiedergibt. Der Analyst muss bei dicken Proben, mehrerer Zentimeter, vorsichtig sein, da es zu einer Selbstabschirmung der Neutronen kommen kann.

Die Anwendung der PGNAA erstreckt sich über weite Bereiche. Zum Beispiel eignet sich die PGNAA sehr gut für die Multielementanalyse von geologischem Material. Es wurden bereits mehrere geologische Materialien, unter anderem Gesteine, Tone, Ölschiefer oder Böden, untersucht [72].

In der Industrie wird die PGNAA vorwiegend als online- Analyse Methode eingesetzt. Vor allem für die Qualitätssicherung in der Kohle und Zementindustrie. Des Weiteren wird die Methode zur Messung des Aluminiumgehalts in Bauxit- Erzen verwendet. Im Gegensatz zur XRF- Analyse weist die PGNAA eine höhere Durchdringungskraft auf und ist dadurch in der Lage die gesamte Masse des Stoffstroms zu detektieren. Eine Analyse am Förderband ist, daraus resultierend, möglich [73].

2.2.22 Pulsed Fast Thermal Neutron Activation (PFTNA)

Die Pulsed Fast Thermal Neutron Activation (PFTNA), zu Deutsch, die schnelle thermische Aktivierung mit gepulsten Neutronen, basiert auf demselben physikalischen Prinzip wie die PGNA. Die Unterschiede liegen hauptsächlich in der Art der Neutronenquelle. Bei der PFTNA werden die Neutronen elektrisch in gepulster Form erzeugt. Hingegen werden bei der PGNA Isotope zur Erzeugung der Neutronen verwendet. Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Arbeitssicherheit. Bei der PFTNA kann, durch die elektrische Schaltung, die Neutronenemission jederzeit gestoppt werden. Dies ist bei der PGNA nicht möglich.

Die PFTNA- Analyse hat zudem Vorteile in der analytischen Auswertung. Auf Grund der hochenergetischen Neutronen kann im Gegensatz zu PGNA auch Kohlenstoff und Sauerstoff analysiert werden. Vor allem in der Kohleindustrie ist das von großer Bedeutung, da der Heizwert und die Feuchtigkeit dadurch direkt berechnet werden können. Des Weiteren ist die Methode gut für die online Anwendung geeignet, da die höherenergetischen Neutronen die Empfindlichkeit erhöhen [74].

Am Markt gibt es viele Geräte, welche die PFTNA- Analysemethode verwenden. Diese Maschinen, welche direkt über dem Förderband installiert werden, werden in der Branche als Cross- Belt Analyzer bezeichnet.

3 Anforderungen an die Rohstoffe von ausgewählten Industrien

In diesem Kapitel werden die Wiederverwendungsmöglichkeiten von Tunnelausbruchmaterial beschrieben. Es werden bestimmte Produkte angeführt und die Anforderungen an den Rohstoff aufgelistet. Um dies zu ermöglichen, wird zuerst eine Verknüpfung, der vorwiegend in Österreich vorkommenden, primären Rohstoffe mit Trassen bekannter Tunnelbauwerke, hergestellt. Der Fokus hierbei wird auf Baurohstoffe liegen. Daraus resultiert eine zielgerichtete Produktpalette, welche in Zukunft mit Tunnelausbruchmaterial hergestellt werden kann.

In Österreich wurden im Jahr 2020 ca. 167 Mt an Ressourcen verbraucht. Dies entspricht ca. 19 t pro Kopf im Jahr. Davon werden jährlich ca. 80 Mt mineralische Rohstoffe als Baurohstoff, für die Errichtung von Häusern, Straßen, Schienen, usw. benötigt. Hochrechnungen gehen davon aus, dass der Verbrauch an mineralischen Rohstoffen, vor allem von Grafit, Lithium und Kobalt, bis 2050 um nahezu 500% steigen wird. Ein Haupttreiber dieses enormen Zuwachses an Verbrauch von Rohstoffen ist die Umsetzung der Klimaziele selbst. Im Gegensatz zu einem Auto mit Verbrennungsmotor, welches ca. 40 kg an Kupfer und Mangan benötigt, ist der Rohstoffbedarf eines Elektroautos, welches ca. 205 kg an Kupfer, Mangan, Lithium, Grafit, usw. benötigt, deutlich höher. Infolgedessen sieht der Masterplan Rohstoffe 2030 des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) vor, dass ungenutzte Stoffströme, wie zum Beispiel Tunnelausbruch, in den Kreislauf der Rohstoffproduktion miteingehen [75].

Zukünftige Tunnelbauprojekte, wie zum Beispiel das Projekt FCC am CERN mit einem Volumen an Tunnelausbruchmaterial von ca. 9 Millionen m³, zeigen, dass Tunnelausbruchmaterial kein vernachlässigbarer Stoffstrom ist [4]. Zudem kann beobachtet werden, dass im Umfeld von Tunnelbaustellen Betriebe sind, welche mineralische Rohstoffe in Form von Primärrohstoffen abbauen [3].

Österreichs Geologie wird aufgeteilt in die Böhmisches Masse, das Alpenvorland sowie in die Alpen, bestehend aus Voralpen, Nördliche Kalkalpen, Zentrale Ostalpen und die Südalpen. Die Böhmisches Masse erstreckt sich mit ihrem südlichsten Teil im Mühlviertel und Waldviertel. Die typischen Gesteine sind Granit und Gneis. Das Alpenvorland erstreckt sich über die nördlichen Bereiche der Bundesländer Salzburg, Oberösterreich und Niederösterreich sowie über den Osten und Südosten von Österreich. Des Weiteren ist es gekennzeichnet durch unvollständig verfestigte Sedimente. Die typischen Gesteine sind Sande, Kiese, Tone sowie Tegel. Die Voralpen befinden sich südlich des Alpenvorlandes und weisen weiche Gesteine wie zum Beispiel Mergelstein, Sandstein, Flysch, Kalkstein und Konglomerate auf. Die Nördlichen Kalkalpen durchziehen ganz Österreich und bestehen aus Kalk- und Dolomitgestein. Südlich der Nördlichen Kalkalpen erstrecken sich die Zentralen Ostalpen. Typische Gesteine silikatische Gesteine, wie zum Beispiel Phyllit, Glimmerschiefer, Gneis und Amphibolit. Die Südalpen befinden sich im südlichen Kärnten und sind geprägt von Kalk, Dolomit, Schiefer und Konglomerat [76].

Bereits vom geologischen Aufbau Österreichs, wie oben beschrieben, geht hervor, dass die vorkommenden Gesteine eine gute Grundlage für Baurohstoffe sind. Dies untermauert zudem die Kartierung der Geologischen Bundesanstalt. In Abbildung 22 sind Lagerstätten von Baurohstoffen in Österreich dargestellt. In allen genannten geologischen Zonen findet ein Abbau von Baurohstoffen statt. Hervorzuheben ist die Böhmisches Masse mit: Granit, Gneis, Marmor; die Helvetische Zone mit: Kieselkalk; die Flyschzone mit: Zementrohstoffen; die Kalkalpen mit: Kalkstein und Dolomit; die Grauwackenzone mit: Diabase, Quazite und Karbonatgesteine und die Zentralalpen mit: metamorphen Gesteinen und Basalt. Die in Österreich gewonnenen mineralischen Rohstoffe finden eine breite Anwendung als Baustoffe (Kies und Sand), in keramische Produkte (Ton), als Natursteine und in der Zementindustrie.

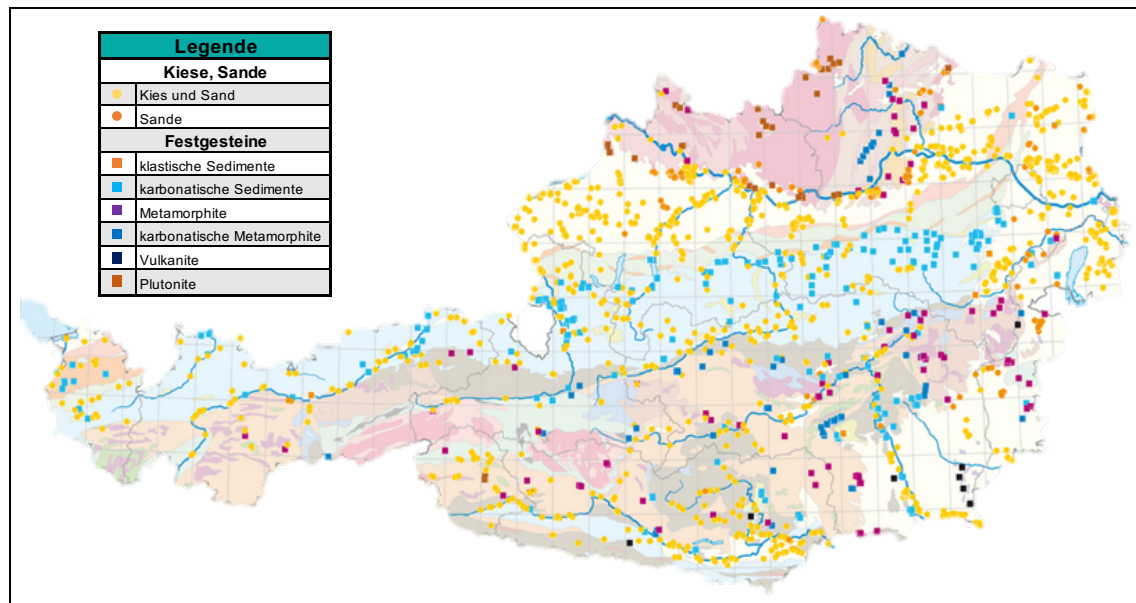


Abbildung 22: Baurohstoffe in Österreich [77]

Baurohstoffe bestehen aus Lockergestein und Festgestein. Lockergestein ist nicht verfestigtes Material. Beispiele sind Sand und Kies. Festgestein ist im Gegensatz dazu verfestigt. Die Bestandteile werden durch atomare Bindungen oder Kohäsionskräfte zusammengehalten. Werden in einem geologischen System die Trennflächen mitberücksichtigt, wird das System als Fels bezeichnet [78].

Die Ansiedelung von Rohstoffbetrieben in der Nähe von Tunnelbauprojekten, das nahezu flächendeckende Vorkommen von Baurohstoff- Lagerstätten in Österreich und das große Volumen an Material, das auf zukünftigen Tunnelbaustellen anfällt, sind Indikatoren dafür, dass Tunnelausbruchmaterial keineswegs nur Abfall ist und ein großes Potential, zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft, bietet. Des Weiteren haben vergangene Projekte im DACH- Raum gezeigt, dass Möglichkeiten für die Wiederverwendung bestehen. So konnten zum Beispiel während des Baus des Gotthard- Basistunnels ca. 35% des Tunnelausbruchmaterials, als Betonzuschlagsstoff, wiederverwendet werden. Infolgedessen hat eine Forschungsgruppe, unter Beteiligung der Forschungsförderungsgesellschaft und mehreren Auftraggebern und Baufirmen, bis November 2011, Wiederverwendungsmöglichkeiten von Tunnelausbruchmaterial in Österreich, untersucht. In diesem Forschungsprojekt wurden die Lithologien, unterschiedlichster Projekte, auf deren Tauglichkeit als Betonzuschlagsstoff, Ziegelrohstoff und Zementrohstoff, untersucht. Die unterschiedlichen Gesteinsarten wurden auf folgende Gesteinskennwerte untersucht:

- Mineralbestand
- Siebanalyse, Kornform
- Dichte, Porosität
- Wasseraufnahme
- Frost- Tau Widerstand
- Geochemische Parameter
- Geotechnische Parameter
- Weißegrad
- Spurenelemente
- Anwendungsspezifische Untersuchungen (z.B.: Brennversuche für Ziegelei) [79]

Bei der Einhaltung der in den Unterkapiteln beschriebenen Qualitäts- und Eignungskriterien, darf Aushubmaterial als:

- Rohstoff für die Bodenrekultivierung
- Untergrundverfüllung

- Komposterden
- Recyclingbaustoffe

verwendet werden. Nur wenn kein sinnvoller Zweck vorliegt, ist das Aushubmaterial zu entsorgen [80].

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf spezifische Anwendungsmöglichkeiten eingegangen. Es wird unterteilt in Recyclingbaustoffe und in die Substitution von sekundären Rohstoffen. Das Kapitel der Recyclingbaustoffe beinhaltet die Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial als Industriemineral. Im Kapitel der Substitution von sekundären Rohstoffen ist eine breite Produktpalette aufgelistet. Das Hauptaugenmerk liegt bei diesen Verwertungsmöglichkeiten, da der Ersatz von Primärrohstoffen durch sekundäre Rohstoffe von großer Bedeutung ist. Des Weiteren werden die Anforderungen an das Rohmaterial beschrieben. Die Beispiele beschränken sich nicht nur auf den österreichischen Raum. Somit werden in diesem Kapitel internationale Ideen gesammelt und erläutert.

3.1 Recyclingbaustoffe

Recyclingbaustoffe (RC- Baustoffe) sind Sekundärrohstoffe, welche durch eine mobile oder stationäre Aufbereitung, von mineralischen Bauabfällen oder Abbruchabfällen, entstehen. Ziel ist die Herstellung von definierten Gesteinskörnungen, damit der aufbereitete Rohstoff erneut verwendet werden kann. Maßgeblich für eine technisch sinnvolle Wiederverwendung ist die Qualität des Aufgabematerials. Des Weiteren spielen die Art und die Intensität der Aufbereitung eine Rolle.

Daraus resultiert, dass es durchaus sinnvoll ist, die Gehalte an Schadstoffen und Verunreinigungen direkt an der Baustelle, durch den Einsatz von online- Analysesystemen, zu detektieren. Die sortenreinen Abfallfraktionen können in weiterer Folge zu hochwertigen sekundären Gesteinskörnungen weiterverarbeitet werden. Je früher diese Inhaltstoffe vom Stoffstrom getrennt werden, desto kürzer sind die Transportwege. Dies wirkt sich positiv auf das Klima und den Gewinn der Baustelle aus. Des Weiteren wird eine Umsetzung der Kreislaufwirtschaft erzielt und Primärrohstoff- Lagerstätten geschont [81].

3.1.1 Industriemineralie

Industriemineralie sind Minerale, die als Rohstoffe, direkt in der Industrie eingesetzt werden. Sie dienen nicht der Erzeugung von Energie, sind nichtmetallisch und werden nicht zur Herstellung von Edelmetallen verwendet. Die bekanntesten Industriemineralie sind: Flußspat, Schwerspat, Kaolin, Quarz, Salz und Gips. Der Grund warum Industriemineralie eine große Bedeutung haben, liegt in deren chemischen und physikalischen Eigenschaften. Auf Grund ihrer charakteristischen Härte, Farbe, Dichte oder Lichtbrechung finden sie Anwendung in der Farb-, Lack-, Foto-, Schleifmittel-, Werkzeug-, Optischen-, Keramik-, Glas- und Schmuckindustrie [82].

In Bezug auf Tunnelausbruchmaterial, wurden bereits einige Studien über die Verwendung von sekundären Rohstoffen als Industriemineralie untersucht. Die Wiederverwendungsmöglichkeiten beschränkten sich auf:

- Kalkstein als Rohstoff in der Hüttenindustrie
- Kalkstein als Füllstoff
- Kalkstein als Rohstoff in der Futtermittelindustrie
- Glimmer als Rohstoff in der Farben-/Lackindustrie

Auf Grund der steigenden Nachfrage nach Industriemineralen, ist die Substitution dieser durch Tunnelausbruchmaterial ein interessantes Thema, jedoch sind die Qualitätsanforderungen, zum Beispiel an die Reinheit, so hoch, dass der Aufbereitungsprozess sich wirtschaftlich nicht lohnt. Im Primärrohstoffbereich findet die online- Analyse zur Sortierung von Industriemineralen bereits Anwendung [31].

3.1.2 RC- Baustoffe im Straßen- und Erdbau

Ein weiterer Hauptanwendungsbereich von RC- Baustoffen ist der Straßen- und Erdbau. Dabei gilt folgendes zu unterscheiden:

- Straßenoberbau:
 - Schottertragschicht
 - Frostschutzschicht
 - Hydraulisch gebundene Tragschicht
- Erdbau:
 - Ungebundener Straßenunterbau
 - Gebundener Straßenunterbau
 - Damm/Aufschüttungen/Hinterfüllungen
 - Lärmschutzwall

Je nach Anwendungsfall müssen RC- Baustoffe die jeweils geltenden Qualitätsanforderungen erfüllen. Dabei handelt es sich um stoffliche, geometrische und physikalische Eigenschaften. Diese Qualitätsanforderungen werden fortgeschrieben und als Normen oder Richtlinien veröffentlicht [81].

Die im B-AWP veröffentlichten Qualitätsklassen (A1, A2, A2-G, BA und IN) werden auch für die Beurteilung von RC- Baustoffen verwendet. Die Ermittlung und Bedeutung der Klassen sind im Kapitel 3.2.6 dieser Arbeit erläutert. Vom B-AWP geht hervor, dass RC- Baustoffe als ungebundene oder gebundene Anwendungen verwendet werden. Die Verwendungszwecke sind abhängig von der Zuordnung der Qualitätsklasse. In Tabelle 6 sind die Anwendungsfälle aufgelistet. Auf Grund von zusätzlichen Anforderungen bzw. Nachweisen sind gewisse Verwendungszwecke nicht eindeutig mit Ja und Nein zu beantworten und in Tabelle 6 mit (JA) gekennzeichnet [12].

Verwendungszweck	A1	A2	A2-G	BA	IN
Ungebundene Anwendung	JA	JA	JA	(JA)	NEIN
Ungebundene Anwendung im und unmittelbar über dem Grundwasser	NEIN	NEIN	JA	NEIN	NEIN
Gebundene Anwendung	JA	JA	JA	JA	JA

Tabelle 6: Verwendungszwecke von RC- Baustoffen gemäß Qualitätsklassen [83]

Werden im Zuge von Straßenbauten RC- Baustoffe verwendet, müssen sie neben den bautechnischen Anforderungen auch den umweltrechtlichen Auflagen entsprechen. Dabei handelt es sich um den für die Umwelt schadlosen und ordnungsgemäßen Einbau der RC- Baustoffe. Besonders zu berücksichtigen sind der Grundwasser- und Bodenschutz.

Obwohl in Deutschland bereits 77,9% vom Bauschutt, durch Aufbereitungsanlagen, zu RC- Baustoffen weiterverarbeitet werden, ist das Potential noch nicht ausgeschöpft. Einerseits wird der aufbereitete RC- Baustoff als niederwertiger Bestandteil in Erdbau verwendet. Nach heutigem Stand der Technik ist die Aufbereitung von qualitativ hochwertigen RC- Baustoffen sogar zur Verwendung als Straßenoberbau möglich. Des Weiteren gibt es immer noch einen großen Stoffstrom an Bauschutt, der zur Verfüllung von Steinbrüchen und dergleichen, verwendet wird. Die Anwendung einer online- Analyse trägt dazu bei, dass das Potential vom Bauschutt früh erkannt wird und daraus RC- Baustoffe entstehen [81].

3.1.3 RC- Baustoffe in der Ziegelindustrie

Neuartige Ziegel mit erhöhter Wärmedämmung haben keine Luftkanäle, sondern verwenden RC- Baustoffe, wie zum Beispiel Sägemehl, Papierfasern oder Polystyrol als Wärmedämmmaterial.

Die Wiederverwendung von Altziegeln, als RC- Baustoff, ist gefragt, da sich dafür viele Ziegelarten eignen. Dabei werden Mauerziegel, Pflasterklinker, Dachziegel und Tondachziegel in einer Baustoff-

Recyclinganlage sortenrein aufbereitet. Der RC- Baustoff eignet sich anschließend als Sekundärrohstoff in der Ziegelherstellung selbst, als Baustoff im Straßenbau, als Kultursubstrat, als Gesteinskörnung für ressourcenschonenden Beton (R- Beton) sowie als Tennissand [84].

3.2 Substitution von sekundären Rohstoffen

Bei der Substitution von sekundären Rohstoffen, werden primäre Rohstoffe durch Sekundärrohstoffe ersetzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Qualität der aufbereiteten Fraktion gleichwertig zu den Primärrohstoffen sein muss. Des Weiteren ist die Verwendung von Sekundärrohstoffen nicht zulässig, wenn die Qualität des Endproduktes durch den Rohstoffersatz, beeinträchtigt wird. Bei ausreichender Qualität können die Sekundärrohstoffe zum Beispiel in der Zementindustrie oder Landwirtschaft verwendet werden. Daraus resultieren folgende Vorteile:

1. **Kosteneinsparung:** Abfallerzeuger werden entlastet, weil die Aufwendungen für Entsorgungsbeiträge, wie zu Beispiel ALSAG- Gebühren, entfallen. Des Weiteren können Betreiber von Aufbereitungsanlagen ihr Tätigkeitsfeld erweitern.
2. **Flexibilität:** Sekundärrohstoffe bilden einen Stoffstrom, welcher zum Teil unterschiedlichste Eigenschaften hat. Daraus resultiert, dass sich von einem Stoffstrom mehrere Endprodukte ableiten lassen. Zudem ist die Versorgung durch einen weiteren Stoffstrom auf eine längere Zeit sichergestellt.
3. **Verfügbarkeit:** Sekundärrohstoffe fallen in allen Regionen an. Primärrohstoffe sind zum Teil stark lokalisiert und sind ausschließlich an Hotspots vorhanden. Durch die Substitution von sekundären Rohstoffen, wird die Verfügbarkeit in rohstoffarmen Gebieten erhöht.
4. **Markt:** Der Markt für die Wiederverwendung von sekundären Rohstoffen ist breit aufgestellt.
5. **Umwelt:** Durch Sekundärrohstoffe werden primäre Rohstoffquellen geschont. Zudem kommt es zu geringeren Transportstrecken, daraus resultiert eine verbesserte Ökobilanz [85].

Auf Grund der, in Abbildung 22 dargestellten, weitgestreuten Verteilung der Rohstoffverfügbarkeit in Österreich ist nachfolgend ein tabellarischer Überblick über mögliche Anwendungsfälle von Fest- und Lockergestein gegeben.

Anwendung Festgestein	Zuschlagstoff für karbonatischen Beton	Zuschlagstoff für silikatischen Beton	Metallurgie	Landwirtschaftliche Böden	Mineralfasern	Flussmittel	Filterstoff	Wasseraufbereitung	Zementindustrie	Glasindustrie	Futtermittel	Chemische Industrie	Nahrungsmittelindustrie	Füllstoffe	Feuerfestindustrie	Farb-/Lackindustrie	Betonkörnungen	Gleisschotter
	Karbonate (Kalk, Dolomit)	x		x	x					x		x	x	x	x	x	x	x
karbonatische Metamorphite (Marmor)	x		x	x					x		x	x	x	x	x	x	x	
Silikatische Metamorphite		x		x					x									
basische Vulkanite				x	x	x	x	x										x
saure Vulkanite				x		x			x	x								
Plutonite (granit)		x																x

Tabelle 7: Anwendungsfälle von Festgestein [86]

	Anwendung						
	Zuschlagstoff für Beton	Zementindustrie	Ziegelindustrie	Abdichtung	Glasindustrie	Keramik	Farb-/Lackindustrie
Lockergestein							
Kies	x						
Sand	x						
Mergel		x					
Ton			x	x			
Quarz		x			x	x	x

Tabelle 8: Anwendungsfälle von Lockergestein [86]

Die zahlreichen Anwendungsfälle von Fest- und Lockergestein lassen auf eine ebenso breite Verwendungsmöglichkeit von Tunnelausbruchmaterial schließen. In den weiteren Unterkapiteln wird auf Endprodukte, aus der Substitution von sekundären Rohstoffen, eingegangen. Es wurden Produkte gewählt, bei denen der Autor vermutet, dass sie in Zukunft, erhöhte Aufmerksamkeit durch die Industrie, erhalten werden. Wiederum werden die Anforderungen an den Rohstoff hervorgehoben um in weiterer Folge, die Verbindung zu online- Analysemethoden, herstellen zu können.

3.2.1 Anforderungen an die Gesteinskörnung für Beton

Beton, ein weiterer Baustoff, welcher in der Bauindustrie Anwendung findet. Womöglich ist Beton der wichtigste Baustoff in unserem Leben. Vor allem im Tunnelbau findet Beton, in Form von Spritzbeton, Anwendung. Bestehend aus vier Hauptzutaten, dem Zement, die Gesteinskörnung, dem Wasser und den Betonzusätzen, verwandelt sich das Gemenge zu einem robusten und langlebigen Baustoff. In dieser Arbeit wird speziell auf die Gesteinskörnung eingegangen.

Die Anforderungen an die Zuschlagstoffe für Beton sind genormt bzw. festgelegt in:

- ÖNORM EN 12620 2015: Gesteinskörnungen für Beton
- ÖNORM B 3131 2016: Gesteinskörnungen für Beton – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620
- ÖNORM B 4710-1 2018: Beton – Fertigung, Herstellung, Verwendung und Konformität (Teil 1)
- ÖNORM B 3140 2020: Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie Beton
- ÖBV- Richtlinie 2012: Innenschalenbeton
- ÖBV- Richtlinie 2009: Spritzbeton
- ÖBV- Richtlinie 2009: Tübbingsysteme aus Beton

Die Gesteinskörnung ist ein Gemisch aus runden und kantigen Kornformen, welche durch bestimmtes Vermischen unterschiedlicher Korngrößen, ein dichtes Gefüge bilden. Dieses wird mit Zementleim, dem Gemisch aus Zement und Wasser, verklebt und durch Erhärtung zu Beton. Die Gesteinskörnung kann sowohl natürlich gewonnen oder aus gebrochenem Gestein bestehen. Die optimalen Kornfraktionen

werden anhand einer Sieblinie dargestellt, wobei das Größtkorn die obere Grenze ist. Des Weiteren wird die Gesteinskörnung nach ihrer Herkunft, ihrem Gefüge und ihrer Kornrohichte definiert. Nach der Kornrohichte wird die Körnung in leichte, normale und schwere Gesteinskörnung eingeteilt. Die normale Gesteinskörnung hat eine Rohdichte zwischen 2 t/m^3 und 3 t/m^3 [87].

Die Gesteinskörnung für Beton muss den nachfolgenden Anforderungen entsprechen. Des Weiteren beeinflusst der Ort, an dem der Beton eingebaut wird, die Qualität der Gesteinskörnung. Sie ist an die Umgebungsbedingungen, sowie an die vorgesehene Verwendung des Betons anzupassen [88].

Nachfolgend wird auf die Anforderungen gemäß den oben genannten Normen eingegangen. Die verwendete Gesteinskörnung wird als Korngruppe angegeben. Diese ist definiert von zwei Sieb-Maschenweiten, zum Beispiel 8/16. Wobei die Maschenweiten in mm angegeben werden. Das Verhältnis zwischen oberer und unterer Maschenweite muss größer sein als 1,4. Die Anforderungen an die Gesteinskörnung kann in drei Bereiche eingeteilt werden:

- Geometrische Anforderungen (Korngruppe, Kornzusammensetzung)
- Physikalische Anforderungen
- Chemische Anforderungen

Die Anforderungen sind abhängig von ihrer Wichtigkeit in Kategorien eingeteilt. In der Kategorie X_{xx} sind Grenzwerte, als Zahlenwerte, festgelegt. Bei $X_{\text{angegeben}}$ sind keine Grenzwerte festgelegt aber die Eigenschaft ist gefordert. Eigenschaften, welche nicht gefordert sind, werden in der Kategorie X_{NR} zusammengefasst. Die Eigenschaften der beiden ersten Kategorien müssen geprüft werden.

Bei der Kornzusammensetzung werden die Anforderungen unterteilt in grobe, feine und natürlich zusammengesetzte Gesteinskörnungen. Feine Gesteinskörnungen, haben ein Größtkorn $<4 \text{ mm}$. Der Hersteller muss immer die Sieblinie, welche im Mittel vorkommt, angeben. Zudem muss ein Überkornanteil von mindestens 1 M.- % und maximal 15 M.- % gewährleistet sein. Diese Anforderungen sind auch für natürlich zusammengesetzte Gesteinskörnungen gültig. Bei groben Gesteinskörnungen muss mindestens 1 M.- % und maximal 20 M.- % an Überkorn und maximal 20 M.- % an Unterkorn vorhanden sein.

Die Anforderungen an die Kornform, wird angegeben durch die Plattigkeitskennzahl FI (flakiness index) oder durch die Kornformkennzahl SI (shape index). Die Form soll im Allgemeinen möglichst gedungen sein. Gesteinskörnungen für Beton sollen nicht mehr als 55 M.- % bei der Verwendung der Kornformkennzahl bzw. 50 M.- % bei Verwendung der Plattigkeitskennzahl, an plattige Anteile beinhalten. Feinanteile beeinträchtigen den Beton normalerweise nicht, wenn sie nicht mehr als 3 M.- % der Gesteinskörnung überschreiten. Als Feinanteil ist der Durchgang eines $0,063 \text{ mm}$ Siebes definiert.

Zur Verbesserung der Kornabstufung werden Gesteinsmehle, sogenannte Füller, der Gesteinskörnung zugegeben. Dies sind Kornfraktionen kleiner 2 mm und unterliegen folgender Kornzusammensetzung: [87]

Siebgröße [mm]	Siebdurchgang [M.- %]	Größe des vom Hersteller anzugebenden Bereiches [M.- %]
2	100	-
0,125	85 - 100	10
0,063	70 - 100	10

Tabelle 9: Anforderungen an die Korngrößenverteilung von Beton- Füllern [89]

Die physikalischen Anforderungen an die Gesteinskörnung für Beton, gemäß ÖNORM B 3131 Tabelle 1, auf nationaler Ebene in Österreich, sind:

- Widerstand gegen Zertrümmerung (Los- Angeles- Koeffizient)
- Widerstand gegen Polieren
- Kornrohichte

- Frost- Tau- Widerstand

Des Weiteren sind folgende chemische Anforderungen zu berücksichtigen:

- Alkali- Kieselsäure- Reaktivität
- Gehalt an wasserlöslichen Chloriden in natürlichen Gesteinskörnungen
- Gehalt an säurelöslichen Chloriden in rezyklierten Gesteinskörnungen
- Säurelösliches Sulfat
- Gehalt an wasserlöslichen Sulfaten in rezyklierten Gesteinskörnungen
- Gehalt an leichtgewichtigen organischen Verunreinigungen
- Einfluss von rezyklierten Gesteinskörnungen an den Erstarrungsbeginn von Zement [90]

Die Anwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Herstellung von Beton ist zulässig, wenn die Grenzwerte gemäß ÖNORM EN 12620 Tabelle 22, eingehalten werden. Zudem gibt es die ÖNORM B 3140, welche die Anforderungen an die rezyklierte Gesteinskörnung, regelt und die Gesteinskörnung in Klassen einteilt. Dabei spielt die Herkunft der rezyklierten Gesteinskörnung eine wichtige Rolle. Abhängig vom Anteil an Verunreinigungen, wie zum Beispiel Beton (Rc), Naturstein (Ru), Ziegel (Rb), bitumenhaltige Materialien (Ra), schwimmendes Material (FL), Glas (Rg) oder sonstige Materialien (X), werden unterschiedliche Grenzwerte vorgegeben [87].

3.2.2 Low- Carbon- Zement aus thermisch aktivierten Tonen

Neben der Sicherstellung der Rohstoffverfügbarkeit durch die Substitution von sekundären Rohstoffen, muss in Zukunft der CO₂- Ausstoß berücksichtigt werden. Der Tunnelbau ist abhängig vom Beton. Infolgedessen bildet dieser den größten Teil des CO₂- Fußabdruckes eines Projektes ab. Die Verwendung von herkömmlichen Zement führt zu CO₂- Emissionen, welche durch die Verwendung von CO₂- armen Zementen, sogenannten Low- Carbon- Zementen, um ein Vielfaches reduziert werden können [91].

In der Zementindustrie wird der Zement, zumeist Portlandzement, mit Betonzusatzstoffen gemischt. Diese mineralischen Zusätze, aus natürlichen oder künstlichen anorganischen Stoffen, werden verwendet, um die Eigenschaften des Zements zu verbessern. Im Gegensatz dazu, werden Betonzusatzmittel verwendet, um die Eigenschaften des Frischbetons zu beeinflussen.

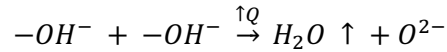
Bei der Herstellung von herkömmlichen Zement werden Betonzusatzstoffe, wie zum Beispiel Hochofenschlacke, natürliche Puzzolane oder Flugasche, verwendet. Dabei gilt zu unterscheiden, dass es aktive und inaktive Betonzusatzstoffe gibt. Die inaktiven Zusatzstoffe unterscheiden sich von den aktiven darin, dass sie nicht mit dem Zement und dem Wasser reagieren und werden daher als Füllstoffe bezeichnet. Beispiele dafür sind unter anderem Gesteinsmehle wie Quarzmehl oder Kalksteinmehl. Im Gegensatz dazu reagieren die aktiven oder puzzolanischen Zusatzstoffe mit dem Calciumhydroxid, der Hydratationsreaktion, und erhärten [92].

Bei der thermischen Aktivierung von Tonen, werden hochreaktive künstliche Puzzolane erzeugt, die als aktiver Zusatzstoff im Beton verwendet werden können. Das Herstellungsverfahren beruht auf den Gehalten an reaktivem Siliziumdioxid (SiO₂^r), auch Kieselsäure genannt und reaktivem Aluminiumoxid (AlO₃^r), auch Tonerde genannt. Dadurch entsteht ein hochwertiger Betonzusatzstoff, der bessere Eigenschaften, höhere Haltbarkeit und geringere Emissionen bietet. Durch die Verwendung von aktivierten Tonen, anstelle von Portlandklinker, können die CO₂- Emissionen bis zu 70% reduziert werden. Zudem ist die Herstellung von aktivierten Tonen energieschonender.

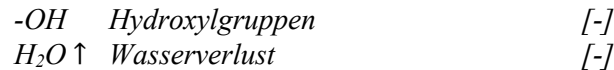
Bei der Verwendung von Ton als Betonzusatzstoff müssen zwei Begriffe unterschieden werden. Kalzinierter Ton, welcher in der Keramik und Ziegelindustrie verwendet wird, und aktivierter Ton. Der Unterschied liegt in der puzzolanischen Aktivität. Aktivierter Ton ist puzzolanisch aktiver und kann in der Zementindustrie verwendet werden. Puzzolane wurden, nach ihrer Herkunft oder nach ihrer chemischen Zusammensetzung, vorwiegend nach ihrem Gesamtgehalt an Oxiden, charakterisiert. Bei der Anwendung von aktivierten Tonen, wird die Reaktivität nach ihrem Gehalt an SiO₂^r und AlO₃^r festgestellt. Des

Weiteren beeinflusst der Gehalt an hydraulischen Faktoren die Eigenschaften des Betons. Daher ist die Bestimmung des Kieselsäure- und Tonerde- Gehalts essenziell.

Tonminerale wie zum Beispiel Kaolinit, Montmorillonit und Illit, können durch Erhitzung aktiviert werden. Dabei kommt es entweder zu einer Dehydroxilierung oder zum Verlust von OH- Gruppen. Die Aktivierung von Tonmineralen kann durch folgende chemische Reaktion beschrieben werden:



Formel 6: Thermische Aktivierung von Tonmineralen



Die für die Dehydroxilierung notwendige Temperatur ist abhängig von der Zusammensetzung des Tonminerals und beträgt zwischen 600 und 800 °C. Der Verlust von Feuchtigkeit beginnt bereits bei 120 °C. Bei steigender Temperatur tritt die Dehydroxilierungsphase ein, bei der sich Hydroxylgruppen (-OH) abspalten. Auf Grund der hohen Schwingungsenergie kommt es zur Bildung eines Wassermoleküls, welches in die Atmosphäre entweicht, sowie zu einem amorphen Zustand des aktivierten Tons. Ab einer Temperatur von 920 °C wird der aktivierte Ton instabil.

Die Aktivierung erzeugt ein künstliches Puzzolan, welches sehr schnell mit der flüssigen Phase des Portlandzements reagiert. Im Gegensatz zur Anwendung von Flugasche als Betonzusatzstoff, weist aktivierter Ton mehrere Vorteile auf. Er ist reaktionsfreudiger, sein physikalischer Zustand ist amorph und Tonminerale kommen in größeren Mengen vor.

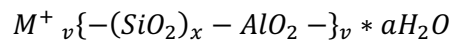
Bei der Wahl der Tonminerale zur Herstellung eines Betonzusatzstoffes gibt es keine Einschränkungen. Die Eignung muss aber durch die Messung des Gehalts an SiO₂⁻ und AlO₃⁻ nachgewiesen werden [93].

3.2.3 Geopolymere als Alternative zu Zement

Beton ist neben Wasser die am häufigsten verwendete Ressource der Erde. Die Herstellung von Portlandzement für die Betonherstellung ist nach aktuellen Verfahren sehr energieintensiv. Des Weiteren beträgt der Anteil an den gesamten globalen CO₂- Emissionen, durch die Calcinierung, ca. 10%. Neben den, im vorherigen Kapitel genannten, thermisch aktivierten Tönen, werden weitere alternative Bindemittel erforscht. Eines davon ist Geopolymerbeton, welcher zu ähnlichen Eigenschaften wie Standard- Beton, hergestellt werden kann. Die Vorteile gegenüber Standard- Beton sind:

- Um 80% geringere CO₂- Emissionen bei der Herstellung
- Substitution von sekundären Rohstoffen
- Gleichbleibende Qualität [94]

Geopolymere wurden erstmals von Davidovits J. im Jahr 1976 beschrieben und sind anorganische Aluminosilikat- Polymere aus Silizium- und Aluminium- Sauerstoff- Tetraedern, die über Sauerstoffbrücken verbunden sind. Hergestellt werden Geopolymere aus Aluminiumsilikat (Al₂SiO₅), bestehend aus Aluminiumoxid (Al₂O₃) und Siliziumdioxid (SiO₂), welches sich unter Zugabe einer Alkali-Aktivierungslösung auflöst. Dabei kommt es zur Bildung von Silizium- und Aluminium- Monomeren. Durch das Aushärten bei einer Temperatur zwischen 20 und 100 °C entsteht ein dreidimensionales Geopolymernetzwerkgel. Dieses härtet aus und bildet das Geopolymer. Geopolymere weisen eine empirische Formel der Matrix gemäß Formel 7 auf.



Formel 7: Empirische Geopolymer-Matrix [95]

M^+	Alkali-Kation von K^+ oder Na^+	[-]
v	Polymerisationsgrad	[-]
x	Si/Al-Verhältnis	[-]
a	Menge an Wasser	[-]

Als Geo- Ausgangstoff eignet sich Metakaolin (calciniertes Ton) und Flugasche. Alkali- Aktivatoren sind Natriumhydroxid (NaOH)-, Kaliumhydroxid (KOH)-, Natriumsilikat (Na_2SiO_3)-, und Kaliumsilikat (K_2SiO_3)- Lösungen [96]. Ziel ist die Wiederverwendung von industriellen und landwirtschaftlichen Nebenprodukten wie zum Beispiel Flugasche, Schlacke oder natürlichen Puzzolanen mit hohem Aluminiumsilikat- Gehalt. Durch die vielseitigen Ausgangsstoffe entstehen unterschiedliche Geopolymere. Die häufigsten sind nachfolgend aufgelistet:

- Geopolymere aus Flugasche
- Geopolymere aus Schlacken
- Geopolymere aus Tonmineralen
- Geopolymere aus unterschiedlichen Gemischen [94]

Neben Industrie- Abfällen eignen sich auch primäre bzw. sekundäre Rohstoffe als Ausgangsprodukte. Tone eignen sich besonders gut für die Herstellung von Geopolymeren. Ton ist ein Aluminiumsilikatsalz mit Partikeln kleiner $2 \mu m$ und kommt als unterschiedliche Minerale vor. Am besten eignen sich Kaolin bzw. Metakaolin und Zeolith. Bei der Verwendung von Kaolin entstehen besondere Eigenschaften wie zum Beispiel Wärmedämmung und Lärmdämmung. Geopolymere aus Zeolith weisen mechanische Beständigkeit und eine poröse Struktur auf. Neben Tonmineralen eignet sich zudem auch Laterit, bekannt als Ziegelstein. Geopolymere aus Laterit weisen eine hohe mechanische Festigkeit auf. Weitere natürlich vorkommende Geopolymer- Ausgangsstoffe sind: Bentonit, Mullit, Halloysit, Diatomeen (Diatomit) oder Bauxit. Auf Grund des geringen amorphen Gehaltes müssen einige Materialien vorbehandelt werden. Dabei werden sie hohen Temperaturen ausgesetzt. In Tabelle 10 sind einige natürliche Rohstoffe mit deren chemischen Zusammensetzung aufgelistet. Auf Grund der Lagerstätten- Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung ist eine typische Bandbreite angegeben [97].

Rohstoff	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	SO ₃ [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]
Kaolin	39,00 - 46,00	36,00 - 49,00	0,50 - 2,00	0,04 - 0,80	0,25 - 0,40	0,00 - 0,06	0,50 - 1,50	1,50 - 2,15
Metakaolin	51,50 - 59,00	35,50 - 45,00	0,50 - 2,70	0,01 - 0,02	0,20 - 0,30	-	0,00 - 0,30	0,15 - 1,50
Laterit	6,50 - 65,00	19,00 - 37,20	13,70 - 32,50	0,10 - 0,30	0,00 - 0,20	-	0,00 - 0,06	0,03 - 0,65
Zeolith	78,68	11,68	1,12	3,43	1,12	0,02	0,44	3,08
Diatomit	80,30	6,10	6,79	1,04	0,65	0,12	0,62	0,44
Halloysit	55,50	29,08	2,55	0,02	0,02	-	0,10	0,10

Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung typischer Rohstoffe für Geopolymere [98]

Abraum aus dem Bergbau eignet sich, auf Grund seiner unterschiedlichen Zusammensetzung, nur bedingt als Ausgangsstoff. Vielmehr werden diese Materialien als Zuschlagstoffe verwendet, um gewisse Eigenschaften des Geopolymers hervorzurufen. Dafür muss aber das Material zuvor thermisch aktiviert werden. Zum Beispiel erhöht die Zugabe von 20% Eisenerz- Abraum die Druckfestigkeit des Geopolymers um 16,2 %.

Das Gemisch, welches aus dem Feststoff und dem Alkali- Aktivator besteht, hat sehr charakteristische Eigenschaften. Neben hervorragenden mechanischen Eigenschaften hat das Geopolymer eine hohe Haltbarkeit und eine hohe Säure- und Wärmebeständigkeit. Des Weiteren zeichnet das Material eine

günstige und CO₂- arme Herstellung aus [96]. Das Material hat sich zudem, gegenüber Standard- Beton, als besser erwiesen, wenn es rauen Bedingungen, wie zum Beispiel Bränden, ausgesetzt ist [94].

Die Eigenschaften von Geopolymere sind abhängig von der chemischen Zusammensetzung, der Morphologie, der Partikelgröße, der Wärmeleitfähigkeit sowie weiteren Eigenschaften von festen Abfällen. Geopolymere aus festen Abfällen haben ein großes Potential im Bereich Beton, feuerfesten Materialien, undurchlässige Materialien, usw. [96]. Je besser das Ausgangsmaterial für Geopolymer-Beton bekannt ist, desto schneller können Zuschlagstoffe entwickelt werden, um gleiche Ergebnisse gegenüber Standard- Beton zu erhalten. Feste Abfälle sollen in Zukunft nicht mehr deponiert werden, da die Deponierung einerseits kostenintensiv und andererseits eine Umweltverschmutzungs- Quelle darstellt. Ziel ist, durch eine selektive Abtrennung von sekundären Rohstoffen mit hohem Aluminiumsilikat- Gehalt, die Umweltbelastungen zu reduzieren und Endprodukte hoher Qualität zu erzeugen [94].

3.2.4 Ziegelherstellung

Der Ziegel, ein Produkt, welches in der Baubranche Anwendung findet und unser tägliches Leben ständig mitverfolgt. Die Vorteile, wie zum Beispiel Brandschutz, Wärmeschutz, Wärmespeicherung, Schallschutz und eine hohe Lebensdauer, machen den Ziegel für den Hausbau attraktiv [99].

Bei der Ziegelherstellung wird der Rohstoff, in Mühlen oder Kollergang, gemahlen und anschließend aufbereitet. Zur Optimierung der Eigenschaften werden Zuschlags- und Hilfsstoffe, wie zum Beispiel Sand oder Quarzmehl, zugegeben. Die Formung geschieht in Gussformen oder mittels Stangenpressen, nachdem die fertige Rohmasse die gewünschte Konsistenz, durch Wasserzugabe, erreicht hat. Die Rohlinge werden nach dem Formen getrocknet. Der anschließende Brennvorgang ist für die Produktqualität entscheidend. Die Ziegel werden in Tunnelöfen bei Temperaturen zwischen 950 °C und 1050 °C gebrannt. Ab Temperaturen von 1100 °C, kommt es zur Aufschmelzung der Oberfläche und besondere Eigenschaften, wie erhöhte Druckfestigkeit, können erreicht werden. Dieses Verfahren wird Sintern genannt [84].

Zur Herstellung von Ziegel werden die Primärrohstoffe Ton und Lehm benötigt. Ton gehört zu den Schichtsilikaten und hat eine Korngröße $< 2 \mu\text{m}$. Dabei sind die wichtigsten Tonminerale Kaolinit, Halloysit, Illit und Montmorillonit. Bei der Ziegelherstellung wird unter anderem die Quellfähigkeit und Plastizität der Tone ausgenutzt. Zudem hat Ton die Eigenschaft Metall- Ionen auszutauschen, dies beeinflusst die Farbgebung während des Brennvorganges. Es ist sicherzustellen, dass sich keine giftigen oder radioaktiven Elemente im Ton eingelagert haben.

Für die Erstklassifizierung des Tunnelausbruchmaterials, als Sekundärrohstoff für Ziegel, ist eine Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung essenziell. Der Gehalt an Kaolinit, Montmorillonit, Illit, usw. ist für die Lagerstättenbeurteilung vorrangig. Tonlagerstätten sind zumeist sedimentär oder terrestrisch entstanden. Die Qualitätsanforderungen bei der Ziegelherstellung sind im Allgemeinen gering. Beimengungen anderer Minerale wie zum Beispiel Quarz, Karbonat, Eisenhydroxid können während des Brennvorganges, zu positiven Nebeneffekten und Färbungen führen [100].

Die Rohstoffeigenschaft hat unterschiedliche Auswirkungen auf die Herstellung und Qualität des Ziegels. In Tabelle 11 sind diese aufgelistet. Daraus resultiert, dass schwefelhaltige Minerale, zum Beispiel Markasit und Pyrit auf Grund von Ausblühungen, durch die Freisetzung von SO₃, nicht erwünscht sind.

Eigenschaft	Auswirkungen	Resultat
Korngröße	Je größer das Korn, desto größer die notwendige Brandtemperatur	höherer Energieaufwand
Fremdminerale	Beeinflussen das Brennverhalten und die Brennfarbe	unerwünschte Abweichungen
Organische Anteile	Entstehung von Hohlräumen beim Brennen	Verringerung der Dichte
Schwefel (Pyrit, Markasit)	Freisetzung von SO ₃ Entstehung großräumiger Poren	Beeinflussung der Belastbarkeit
Karbonat (Calcit, Dolomit, Ankerit, Siderit)	In geringen Mengen vorteilhaft (Entgasung) Entstehung von Poren und Kanälen	Beeinflussung der Belastbarkeit
Metalloxide, -hydroxide (Goethit, Hämatit)	Hervorrufen von charakteristischen Farben	Lagerstättencharakteristik
Schwermetalle/Radioaktivität	Beeinflussung der Gesundheit/Umwelt	fragliche/unmögliche Verwendung

Tabelle 11: Auswirkungen der Rohstoffeigenschaften auf die Ziegelqualität [101]

Die daraus resultierenden physikalischen Eigenschaften des Rohziegels, beeinflussen den Prozess folgendermaßen:

Eigenschaft	Auswirkungen	Resultat
Plastizität	Formbarkeit Gießfähigkeit	Vielfalt an Formen (Mauer-, Dachziegel)
Quellfähigkeit	vollständiger Wasser- Entzug zwischen und in den Tonkristallen	Gewichtsreduktion - Abnahme der Rohdichte
Ionen absorbieren	Ausschließlich negative Einflüsse - Schwermetalle	Eingeschränkte Verwendbarkeit
Sintervermögen	Kaolin, Bauxit - Erhöhung der Sintertemperatur Ca, K, Na - Senkung der Sintertemperatur	Sintertemperaturregelung

Tabelle 12: Auswirkungen der physikalischen Eigenschaften auf die Ziegelqualität [101]

Neben der mineralogischen Zusammensetzung, welche die Tonlagerstätte charakterisiert, ist die Korngrößenverteilung für den Sinterprozess maßgebend. Die Zusammensetzung der einzelnen Fraktionen bestimmt die Ziegeleigenschaften. Diese Kornzusammensetzungen werden im sogenannten Korngrößendreistoffsystem nach WINKLER (1954) dargestellt [102].

Aus dem Diagramm können Rückschlüsse, auf Grund der Korn- Fraktionszusammensetzung, auf die Verwendung des Rohstoffes gezogen werden. Je nach Zusammensetzung des Rohmaterials kann dieses für Vollsteine, Gittersteine, Dachziegel oder dünnwandige Deckensteine verwendet werden [103].

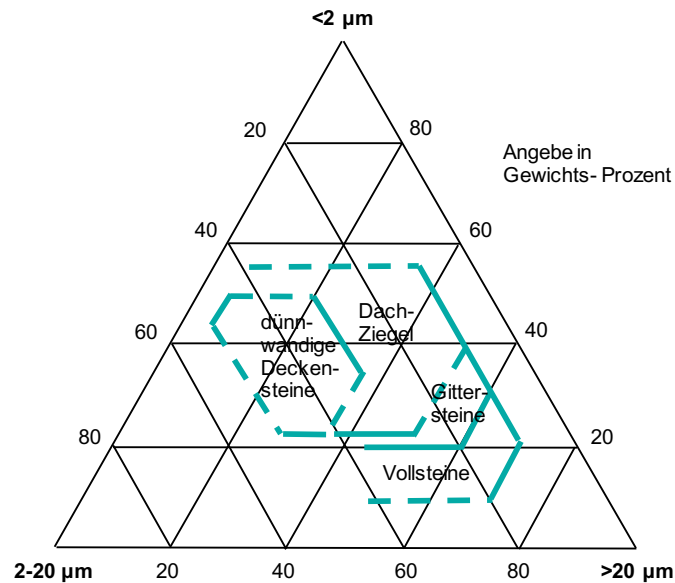


Abbildung 23: Korngrößendreistoffsystem nach WINKLER (1954) [104]

Daraus lässt sich die durchschnittliche Korngrößerverteilung von Ziegelton ableiten. Diese ist in Tabelle 13 zusammengefasst. Dabei wird unterschieden zwischen Vollziegel, mit bis zu maximal 15% Lochanteil und Lochziegel.

Korngrößenbereich	Korngrößerverteilung [M.-%]	
	Vollziegel	Lochziegel
> 20 μm	50 - 70	40 - 60
2 - 20 μm	15 - 35	15 - 35
< 2 μm	10 - 25	20 - 35

Tabelle 13: Korngrößerverteilung von Voll- und Lochziegel [105]

Mit Hilfe der online- Analyse kann, die zuvor erwähnte mineralogische und chemische Zusammensetzung des Tunnelausbruchmaterials bestimmt werden. In Tabelle 14 ist die durchschnittliche Zusammensetzung von Mauerziegelmassen aufgelistet. Die Werte in der Tabelle sind Richtwerte und von der Ton- Lagerstätte abhängig.

Chemische Zusammensetzung	durchschnittliche Zusammensetzung [M.-%]
SiO ₂ - Siliziumdioxid	49,2 - 68,0
Al ₂ O ₃ - Aluminiumoxid	10,2 - 19,4
Fe ₂ O ₃ - Eisen(III)-oxid	2,7 - 8,0
TiO ₂ - Titan(IV)-oxid	0,3 - 1,7
CaO - Calciumoxid (gebrannter Kalk)	0,3 - 9,4
MgO - Magnesiumoxid	0,5 - 2,9
K ₂ O - Kaliumoxid	1,3 - 4,0
Na ₂ O - Natriumoxid	0,3 - 1,2
CaCO ₃ - Calciumcarbonat	0 - 18
C _{org}	0,04 - 1,0
Schwefel	0,04 - 0,56
Glühverlust	4,2 - 9,1
Mineralogische Zusammensetzung	durchschnittliche Zusammensetzung [M.-%]
Kaolinit	0 - 15
Sericit & Illit	10 - 20
Smektit	0 - 5
Chlorit	0 - 5
Quarz	30 - 55
Feldspat	0 - 13
Calcit	0 - 10
Dolomit & Ankerit	<1
Goethit	<1
Hämatit	<1
Siderit	<1
Pyrit	<1
Gips	<1
Hornblende	<1
Röntgenamorpher Rest	1 - 10

Tabelle 14: Chemische und Mineralogische Zusammensetzung von Mauerziegelmassen [107]

Tone werden auch in anderen Industrien verwendet. Zum Beispiel werden sie bei der Keramikherstellung, bei Deponieabdichtungen, bei der Herstellung von Wärmedämmungen (Blähton) und bei der Farbherstellung benötigt. Die Anforderungen sind jedoch höher als bei der Ziegelherstellung [100].

3.2.5 Lehm- Putze

Der Lehm, das Bauen mit Produkten aus Lehm, ist auf Grund zahlreicher Vorteile eine beliebte Bauart beim Hausbau. Neben ökologischen Vorteilen spielen der einfache Herstellungsprozess sowie die leichte Verarbeitung eine wichtige Rolle. Baustoffe aus Lehm sind natürlich vorkommend und bestehen aus einem Gemisch von Tonmineralen und Schluffen mit einer Korngröße $\geq 2 \mu\text{m}$, Sanden mit einer Korngröße $\geq 63 \mu\text{m}$, sowie organischen Bestandteilen.

Lehm wird in Gruben als Grubenlehm, getrocknet als Trockenlehm oder recycelt aus Abbruchbauteilen gewonnen. Rohstoffe für Lehmstoffe müssen frei von Verunreinigungen sein, damit die Eigenschaften des Endproduktes nicht beeinflusst werden. Die Bestimmung des Mineralgerüsts, welches durch die unterschiedlichen Körnungen gebildet wird, sowie die Bestimmung der Farbe sind einfache Prüfungen, um die Eignung der Rohstoffe zu beurteilen. Weiteres wird durch die chemische Zusammensetzung beeinflusst. Die Ausgangsmaterialien beeinflussen die Eigenschaften der Baustoffe. Wichtig ist, dass Lehmstoffe folgende Eigenschaften aufweisen:

- Einfache Verarbeitung
- Tragfähigkeit
- Wasserdampfdurchlässigkeit
- Schimmelresistenz [108]

3.2.6 Oberbodenmaterial – Bodenrekultivierung durch Bodenaushubmaterial

Der Boden ist die oberste Verwitterungsschicht, auch genannt der A-Horizont des Bodenprofils, der Erdkruste und besteht aus Gesteins- und Mineralbruchstücken. Diese sind zum Teil auch chemisch verändert. Die oberste Schicht des Bodens, auch genannt der Oberboden, ist nach der Bodenklassifizierung der Bodenklasse 1, zugeordnet. Der Oberboden setzt sich zusammen aus Mutterboden, Humus und Zwischenboden und enthält zum Teil große Mengen an organischen Substanzen, welche bereits zersetzt oder sich noch im Zersatz befinden. Mutterboden ist die oberste Bodenschicht und ist das Gemisch aus Humus, mineralischen Bodenarten und Bodenlebewesen. Humus setzt sich aus abgestorbenen organischen Substanzen zusammen. Der Zwischenboden ist stark gefärbt und liegt zwischen Mutterboden und Unterboden [109].

Gemäß B-AWP 2023, werden Bodenaushubmaterialien in unterschiedliche Qualitätsklassen eingeteilt. Für die Einteilung in die entsprechenden Klassen sind chemische Analysen durchzuführen. Diese sind in der Deponieverordnung 2008 genauer beschrieben. Die Zuordnung erfolgt über eine Erstanalyse der Gesamtgehalte sowie der Gehalte im Eluat. Nach der Ermittlung der Parameter wird das Aushubmaterial folgenden Klassen zugeteilt:

- Qualitätsklasse A1: landwirtschaftliche Bodenrekultivierung
- Qualitätsklasse A2: Erdbaumaßnahmen
- Qualitätsklasse A2-G: Erdbaumaßnahmen im und unmittelbar über dem Grundwasser
- Qualitätsklasse BA: Aushubmaterial mit Bodenaushubdeponiequalität
- Qualitätsklasse IN: Aushubmaterial mit Inertabfallqualität

Erfolgte eine Zuteilung in die entsprechenden Qualitätsklassen, ergeben sich für das Bodenaushubmaterial unterschiedliche Verwendungszwecke. Diese sind in Tabelle 15 aufgelistet. Auf Grund von zusätzlichen Anforderungen bzw. Nachweisen sind gewisse Verwendungszwecke nicht eindeutig mit Ja und Nein zu beantworten und in Tabelle 15 mit (JA) gekennzeichnet [12].

Verwendungszweck	A1	A2	A2-G	BA
Landwirtschaftliche Bodenrekultivierung	JA	NEIN	NEIN	(JA)
Nicht landwirtschaftliche Bodenrekultivierung	JA	JA	JA	(JA)
Erdbaumaßnahmen	(JA)	JA	JA	JA
Erdbaumaßnahmen im oder unmittelbar über dem Grundwasser	NEIN	NEIN	JA	NEIN

Tabelle 15: Verwendungszweck für die Qualitätsklassen gemäß B-AWP [110]

Die Verwertung von Bodenaushubmaterial, als Rohstoff für die Bodenrekultivierung, ist abhängig von technischen sowie auch qualitativen Kriterien. Ziel ist die Herstellung von Untergrundverfüllungen, Komposterden oder sonstiger Erden. Die Kriterien bzw. Grenzwerte sind im Bundesabfallwirtschaftsplan veröffentlicht. Die aktuell gültigen Grenzwerte sind zudem dem Anhang dieser Arbeit beigelegt. Der Nachweis für die Eignung als Bodenrekultivierungs- Rohstoff wird durch in- situ Versuche, vor Baustellenbeginn, durchgeführt. Die Verwendung einer online- Analyse trägt zur Qualitätskontrolle bei. Des Weiteren kann der Verwertungszweck vor Ort festgestellt werden. Auf Grund der Reifedauer im Kompostierprozess muss die Platzinanspruchnahme berücksichtigt werden. Dabei kann durch die online- Analyse Zeit eingespart werden und vorhandene Lagerplätze zielgerichtet angesteuert werden.

Bei der Verwertung von Bodenaushubmaterial, als Rohstoff für die Bodenrekultivierung, müssen die folgenden Eigenschaften berücksichtigt werden.

- Guter Wuchs der Bepflanzung
- Gute Stabilität der Schüttung bei Hanglagen
- Geringe Verdichtung bei Befahrung
- Funktionierender Wasserhaushalt

Neben der Eignung des Ausgangsstoffes spielt die Marktsituation eine entscheidende Rolle, ob Bodenaushubmaterial verwertet werden kann oder nicht. Zu berücksichtigen ist, dass der Transportradius auf Grund von CO₂- Bilanz und Wirtschaftlichkeit, nicht mehr als 30 km beträgt. Zudem müssen in einer frühen Phase des Projektes Abnehmer gesucht und gefunden werden [80].

Bei der Wiederverwendung von Tunnelausbruchmaterial muss allen voran, die geogene und anthropogene Verunreinigung, detektiert werden. Bei Einhaltung der oben genannten Grenzwerte, kann anschließend die Eignung des Rohstoffes untersucht werden. Dabei sind vor allem die chemischen, physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften entscheidend. In Tabelle 16 sind diese übersichtlich zusammengefasst.

Haupteigenschaft	Eigenschaft	Auswirkungen	Grenzwerte
Chemisch	pH- Wert	→ Maß für den aktiven Säuregehalt	→ optimales Wachstum bei neutralem pH- Wert (6 - 7,5) → < pH 5,5 vermindertes Wachstum
	Fruchtbarkeit	→ Gehalt an Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) → Gehalt an Eisen (Fe), Mangan (Mn), Kupfer (Cu), Zink (Zn)	→ Gehalte bestimmen die Zugabe von Düngemittel → organisches Material ist Nährstoffquelle von N, P, K → gute Fruchtbarkeit bei > 0,75% an organischem Kohlenstoff → Fe (> 4,5 mg/kg), Mn (> 1,0 mg/kg), Cu (> 0,4 mg/kg), Zn (> 1,0 mg/kg) unerlässlich für Pflanzenwachstum
Physikalisch	Gesteinsgehalt	→ Korngrößenverteilung	→ Partikel < 2 mm essentiell für Wasser- und Nährstoffhaltevermögen → Partikel > 2 mm zu geringes Wasserhaltevermögen → maximaler Grobkomanteil 50%
	Bodenbeschaffenheit	→ Menge an Sand (2,0 - 0,05 mm), Schluff (0,05 - 0,002 mm) und Ton (< 0,002 mm)	→ sandige Böden: geringere Wasser- und Nährstoffaufnahme → schluffige Böden: Neigung zu Oberflächenkrusten → lehmige Textur ideal
	Bodenaggregation	→ Steuerung der Bodenhydrologie, Bodendiffusion, Nährstoffverfügbarkeit, Erosionspotential → Stabilisierung des organischen Kohlenstoffs	→ Anteil an Mikro- und Makroaggregaten
	Feuchtigkeit	→ wichtig für das Pflanzenwachstum	→ abhängig von: Zeitpunkt (Winter/Sommer), Steingehalt, organischer Kohlenstoff, Beschaffenheit und Dicke der Bodenschichten
	Schüttdichte	→ Einfluss der Druchwurzelungstiefe	→ produktive natürliche Böden: 1,1 bis 1,5 g/cm ³ → maximale Schüttdichte: 1,7 g/cm ³
	Verdichtung	→ Einfluss des Pflanzenwachstums	→ Zusammenspiel mehrerer Parameter: Schüttdichte, Durchwurzelungstiefe, Felsbrocken, Wasserhaltevermögen → > 90 cm an lockerem, nicht verdichteten Bodenmaterial erforderlich
	Stabilität	→ Auswirkung auf Verwendungsmöglichkeit	→ Böschungen > 15% Neigung nicht geeignet für Ackerbau → geringe Stabilität kann zur Erhöhung der Schüttdichte führen
	Farbe	→ Farbe korreliert mit Verwitterungsgeschichte und chemischen, physikalischen Eigenschaften	→ leuchtend rot, braun: oxidiert und ausgelaugt (wenig fruchtbar) → grau: Mangel an Oxidation und Auslaugung (höher fruchtbar) → dunkelgrau, schwarz: organisches Material und sauer (wenig fruchtbar)
Biologisch	Mikrobenpopulation	→ beeinflusst die Stabilisierung der Aggregate → gemessen als ATP- Konzentration (Adenosin-Tri- Phosphatase)	→ mikrobielle Aktivität nimmt mit der Tiefe und Zeit ab → aktive Bodenmikrobengemeinschaft führt zu einer stabilen Bodenaggregation → geringe mikrobielle Aktivität führt zu verdichteten Böden und schlechte Aggregation
	Bakterien	→ Zersetzung von organischen Material in der frühen Phase	→ Anteil an Rhizobien (einzellige Bakterien)
	Mykorrhiza- Pilze	→ Einfluss des Pflanzenwachstums	→ Anteil an Mykorrhizapilzen

Tabelle 16: Bodeneigenschaften für Bodenrekultivierung [111]

3.2.7 Straßenunterbau und Tragschichtbildung

Tragschichten sind schichtenförmig aufgebaut und werden bei Bau von Straßen und Parkplätzen eingebaut. Sie dienen dazu, dass die Lasten vom Verkehr aufgenommen und in den Untergrund verteilt werden. Die wichtigsten Eigenschaften von Tragschichten sind:

- Tragfähigkeit
- Verformungsstabilität
- Wasserdurchlässigkeit

Tragschichten werden, abhängig ihrer Bindung in unterschiedlichen Gruppen unterteilt:

- Ungebundene Tragschichten:
 - o Obere ungebundene Tragschichten
 - o Untere ungebundene Tragschichten
- Gebundene Tragschichten:
 - o Hydraulisch gebundene Tragschichten
 - o Bituminös gebundene Tragschichten

Ungebundene Tragschichten bestehen aus Schotter oder Kies ohne Bindemittel. Abhängig von ihrer Verwendung können die Schichten als Frostschutzschichten, Schottertragschichten oder Kiestragschichten ausgeführt sein. Im Gegensatz dazu wird bei gebundenen Tragschichten ein Bindemittel beigemischt. Dadurch verfügen sie über eine größere Tragfähigkeit sowie einem höheren Verformungswiderstand. Je nach Anwendung können Dränbetontragschichten oder wasserdurchlässige Asphalttragschichten hergestellt werden [113].

Die Anforderungen an die Ausgangsstoffe für Tragschichten sind genormt bzw. festgelegt in:

- ÖNORM EN 13242 2014: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau
- ÖNORM B 3132 2016: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 1324
- RVS 08.15.01 2010: Ungebundene Tragschichten
- RVS 08.15.02 2021: Ungebundene Tragschichten mit Asphaltgranulat
- RVS 08.17.01 2019: Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten

Die wichtigsten Anforderungen aus den oben genannten Normen und Richtlinien, welche auch mit der online- Merkmalanalyse nachweisbar sind, werden nachfolgend behandelt.

Als Gesteinskörnung gilt körniges Material, welches Anwendung im Bauwesen findet. Die Herkunft der Materialien kann natürlich, industriell oder rezykliert sein. Natürliche Materialien stammen aus mineralischen Vorkommen und werden vor Ort mechanisch aufbereitet. Im Gegensatz dazu entstehen industrielle und rezyklierte Gesteinskörnungen aus vorherigen Prozessen und können ohne weiterer Aufbereitung wiederverwendet werden.

Die geometrischen Anforderungen sind nach Korngruppen gegliedert. Eine Korngruppe ist das Verhältnis der oberen Siebgröße D zur unteren Siebgröße d . Dieses Verhältnis D/d darf nicht kleiner als 1,4 sein. Daraus leiten sich die zulässigen Korngrößenverteilungen ab, welche in Tabelle 17 aufgelistet sind.

Körnung	Korngröße [mm]	Siebdurchgang [M.-%]					Kategorie
		2 D	1,4 D	D	d	d/2	
grob	$d \geq 1$ & $D > 2$	100	98 - 100	85 - 99	0 - 15	0 - 5	G _C 85 - 15
		100	98 - 100	80 - 99	0 - 20	0 - 5	G _C 80 - 20
fein	$d = 0$ & $D \leq 6,3$	100	98 - 100	85 - 99	-	-	G _F 85
		100	98 - 100	80 - 99	-	-	G _F 80
gemischt	$d = 0$ & $D > 6,3$	-	100	85 - 99	-	-	G _A 85
		100	98 - 100	80 - 99	-	-	G _A 80
		100	-	75 - 99	-	-	G _A 75

Tabelle 17: Korngrößenverteilung für Gesteinskörnungen zur Verwendung als Tragschichten [114]

Bei weitgestuften groben Gesteinskörnungen mit $D/d \geq 2$ müssen zusätzliche Anforderungen gemäß ÖNORM EN 13242: Tabelle 3 eingehalten werden. Für enggestufte, grobe Gesteinskörnungen mit $D/d < 2$ müssen keine weiteren Anforderungen berücksichtigt werden.

Es kann die Notwendigkeit bestehen, dass bei feinen Gesteinskörnungen Siebaufzeichnungen angegeben werden müssen. Die Toleranzen sind nach ÖNORM EN 13242: Tabelle 3 zu berücksichtigen.

Zudem kann bei groben Gesteinskörnungen ein Nachweis über die Plattigkeitskennzahl gefordert sein. Die Plattigkeitskennzahl kann als Referenzkennzahl für die Kornformkennzahl verwendet werden. Die jeweiligen Anforderungen zur Plattigkeits- und Kornformkennzahl sind in ÖNORM EN 13242: Tabelle 5 und Tabelle 6 aufgelistet.

Des Weiteren kann ein Nachweis über die Gehalte von gebrochenem und vollständig gerundetem Korn in groben Gesteinskörnungen gefordert sein. Die Anforderungen bezüglich der Massenanteile sind in Tabelle 18 dargestellt.

Anteil gebrochener Körner [M.-%]	Anteil vollständig gerundeter Körner [M.-%]	Kategorie
90 - 100	0 - 3	C _{90/3}
50 - 100	0 - 10	C _{50/10}
50 - 100	0 - 30	C _{50/30}
-	0 - 50	C _{NR/50}
-	0 - 70	C _{NR/70}
angegebener Wert	angegebener Wert	C _{angegeben}
keine Anforderung	keine Anforderung	C _{NR}

Tabelle 18: Anteil an gebrochenen und vollständig gerundeten Körnern in Tragschichten [114]

Bei Gesteinskörnungen, welche aus Felsgestein ausgebrochen werden, ist anzunehmen, dass sie der Kategorie C_{90/3}, gemäß Tabelle 18, entsprechen. Es ist keine weitere Prüfung der Kategorie notwendig.

Unter bestimmten Voraussetzungen kann der Gehalt an Feinanteilen gefordert sein. Die Massenanteile sind in Tabelle 19 aufgelistet. Der Feinanteil ist die Summe des Massenanteils, welcher durch das 0,063 mm Sieb durchgeht.

Körnung	Siebdurchgang durch das 0,063 mm Sieb [M.-%]	Kategorie
grob	≤ 2	f_2
	≤ 4	f_4
	> 4	$f_{\text{angegeben}}$
	keine Anforderung	f_{NR}
fein	≤ 3	f_3
	≤ 7	f_7
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	$f_{\text{angegeben}}$
	keine Anforderung	f_{NR}
gemischt	≤ 3	f_3
	≤ 5	f_5
	≤ 7	f_7
	≤ 9	f_9
	≤ 12	f_{12}
	≤ 15	f_{15}
	> 15	$f_{\text{angegeben}}$
	keine Anforderung	f_{NR}

Tabelle 19: Feingehaltanteil in Tragschichten [114]

Die physikalischen Anforderungen an die Gesteinskörnung für Tragschichten sind:

- Widerstand gegen Zertrümmerung (Los- Angeles- Koeffizient)
- Schlagzertrümmerungswert
- Widerstand von groben Gesteinskörnungen gegen Verschleiß (Micro- Deval- Koeffizient)
- Rohdichte (Nachweis in Österreich nicht gefordert)
- Wasseraufnahme

Da sich diese Eigenschaften noch nicht mit der online- Analyse bestimmen lassen können, werden sie nicht detaillierter angeführt.

Werden rezyklierte Gesteinskörnungen bei der Herstellung von Tragschichten verwendet, müssen, abhängig der Herkunft bzw. Materialart, bestimmte Gehalte eingehalten werden. Als rezyklierte Gesteinskörnungen kommen aufbereitete Materialien von Betonprodukten, Natursteinen, Ziegeln, bituminöse Produkte und glashaltige Produkte in Frage. In Tabelle 20 sind die zulässigen Massenanteile dargestellt.

Bestandteil	Gehalt [M.-%]	Kategorie
Rc	≥ 90	RC ₉₀
	≥ 80	RC ₈₀
	≥ 70	RC ₇₀
	≥ 50	RC ₅₀
	< 50	RC _{angegeben}
	keine Anforderung	RC _{NR}
Rc + Ru + Rg	≥ 90	Rcug ₉₀
	≥ 70	Rcug ₇₀
	≥ 50	Rcug ₅₀
	< 50	Rcug _{angegeben}
	keine Anforderung	Rcug _{NR}
Rb	≤ 10	Rb ₁₀₋
	≤ 30	Rb ₃₀₋
	≤ 50	Rb ₅₀₋
	> 50	Rb _{angegeben}
	keine Anforderung	Rb _{NR}
Ra	≥ 95	Ra ₉₅
	≥ 80	Ra ₈₀
	≥ 50	Ra ₅₀
	≥ 40	Ra ₄₀
	> 30	Ra ₃₀
	≤ 30	Ra ₃₀₋
	≤ 20	Ra ₂₀₋
	≤ 10	Ra ₁₀₋
	≤ 5	Ra ₅₋
	≤ 1	Ra ₁₋
	keine Anforderung	Ra _{NR}
Rg	≤ 2	Rg ₂₋
	≤ 5	Rg ₅₋
	≤ 25	Rg ₂₅₋
	keine Anforderung	Rg _{NR}
X	≤ 1	X ₁₋
Bestandteil	Gehalt [cm ³ /kg]	Kategorie
FL	≤ 5	FL ₅₋
	≤ 10	FL ₁₀₋
Rc	Beton, Betonprodukte, Mörtel, Betonsteine	
Ru	ungebundene / hydr. gebundene Gesteinskörnung, Naturstein	
Rb	Mauerziegel, Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton	
Ra	bitumenhaltige Materialien	
Rg	Glas	
FL	schwimmendes Material	
X	sonstiges: bindige Böden, Holz, Kunststoff, Gummi, Metalle, Gips	

Tabelle 20: Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen in Tragschichten [114]

Neben den geometrischen und physikalischen Anforderungen gibt es auch chemische Anforderungen. Diese beziehen sich auf den Nachweis des säurelöslichen Sulfatanteils, des Gesamtschwefelgehalts und des wasserlöslichen Sulfatgehalts. Des Weiteren gibt es Anforderungen an die Dauerhaftigkeit wie zum Beispiel „Sonnenbrand“ von Basalt und Frost- Tau- Wechselbeständigkeit [115]. Die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit sind auf nationaler österreichischer Ebene, gemäß ÖNORM B 3132, bei der Anwendung auf ungebundene Tragschichten nicht gefordert [116].

Die Frostsicherheit von ungebundenen Tragschichten ist gegeben, wenn der Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm) maximal 3 M.-% im Anlieferungszustand beträgt. Des Weiteren darf der Anteil an Korngrößen $< 0,020$

mm, im verdichteten Zustand, bezogen auf das rechnerische Größtkorn, nicht mehr als 8 M.-%, betragen. Das Größtkorn berechnet sich folgendermaßen:

$$D = d_{85} * \sqrt{2}$$

Formel 8: Berechnung des Größtkorns zur Bestimmung der Frostsicherheit

D	rechnerisches Größtkorn	[mm]
d_{85}	Siebdurchgang 85% Masseanteil	[mm]

Weitere Kriterien zur Beurteilung der Frostsicherheit ist das Korngrößenkriterium, Mineralkriterium und die Frosthebungsprüfung [117].

3.2.8 Tunnelausbruchmaterial als Gleisschotter

Gleisschotter besteht aus einer natürlichen, gebrochenen, ungebundenen Gesteinskörnung und dient dem Bau der obersten Schicht von Bahnkörpern. Zur Anwendung kommen hauptsächlich Festgesteine, wie zum Beispiel Basaltschotter, Kalksandstein oder Granitschotter. Die Gesteinskörnung darf nur verwendet werden, wenn die Oberfläche zu 100% vollständig gebrochen ist. Gleisschotter kann natürlich, industriell oder recycelt hergestellt werden [118].

Der Gleisschotter hat folgende Aufgaben:

- Lastabtragung
- Widerstand gegen Schwellenverschiebung
- Wiederherstellen der ursprünglichen Gleislage
- Drainage
- Erhaltung der Untergrundtragfähigkeit
- Ableiten von Niederschlagswasser
- Belüftung

Die Anforderungen an die Gesteinskörnungen für Gleisschotter sind genormt bzw. festgelegt in:

- ÖNORM EN 13450-1 2021: Gesteinskörnungen für Gleisschotter – Teil 1: Produktstandard
- ÖNORM EN 13450-2 2021: Gesteinskörnungen für Gleisschotter – Teil 2: Ergänzende Informationen
- ÖNORM B 3133 2003: Gleisschotter – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13450
- ÖBB BH700 2011: Technische Lieferbedingungen für Oberbauschotter

Die Anforderungen gemäß ÖBB BH700 wurden von der europäischen Norm EN 13450 abgeleitet und legt die Lieferbedingungen für Gleisschotter in Österreich fest. Wie oben bereits erwähnt eignen sich viele Gesteinsarten in Österreich als Gleisschotter. In Tabelle 21 sind Hartgesteinsarten und deren typischen Lagerstätten aufgelistet.

Gesteinsart	Vorkommen
Granite	Böhmische Masse
Granitporphyr	Grenzbereich Böhmische Masse und Molassezone
Granulit	Böhmische Masse
Diabas	nördliche Grauwackenzone und Bleiberger Hochtal
Basalt	Osten und Südosten Österreichs
Dunit, Peridotit, Bronzit	mittlere austroalpine Grundgebirgsdecke der Steiermark
Kalkstein (Dolomit)	Nördliche Kalkalpen

Tabelle 21: Gesteinsvorkommen für Gleisschotter in Österreich [119]

Die Anforderungen an Gleisschotter sind sehr streng und viele Gesteinsarten eignen sich nur bedingt. Auf Grund der zahlreichen Aufgaben von Gleisschotter muss die Gesteinskörnung folgende Anforderungen erfüllen:

- Verwitterungsbeständigkeit und geringe Rissbildung
- Zähigkeit, Härte und geringe Spaltbarkeit
- Keine Beimengungen von Lehm, Erde oder Feinteilen
- Scharfkantigkeit

Die ÖBB hat für Lieferanten zwei Gesteinskörnungen, Körnung I und II, freigegeben und bestimmte Prüfverfahren vorgegeben. Daraus resultieren geometrische, physikalische und chemische Vorgaben, welche zu erfüllen sind.

Gesteinskörnungen der Kategorie I (31,5/63) entsprechen, der Korngrößenverteilung gemäß ÖNORM EN 12450 Tabelle 1, der Klasse G_{CRB} B. Dabei ist zu beachten, dass der Siebdurchgang der Maschenweite 31,5 bis 63 mm 70 – 100 M.-% entspricht. Der Kornanteil < 22,4 mm darf maximal 3 M.-%, der Gesteinskörnung entsprechen. Der Feinkorn-, Korn < 0,5 mm, und Feinstkornanteil, Korn < 0,063 mm, sind mit maximal 1,0 M.-% begrenzt. Gesteinskörnungen der Kategorie II (16/31,5) werden ausschließlich bei Abstell- und Verschiebe- Bereiche verwendet und dienen hauptsächlich dem Arbeitnehmerschutz. Des Weiteren müssen geometrische Anforderungen bezüglich der Kornform und Kornlänge, gemäß ÖNORM EN 12450 Tabelle 3 und 4, eingehalten werden.

Die physikalischen Anforderungen an die Gesteinskörnung für Gleisschotter sind:

- Widerstand gegen Zertrümmerung (Los- Angeles- Koeffizient)
- Schlagzertrümmerungswert
- Widerstand gegen Verschleiß (Micro- Deval- Koeffizient)
- Rohdichte
- Verwitterungsbeständigkeit

Die chemischen Anforderungen müssen den geltenden Gesetzen gemäß Umweltverträglichkeit entsprechen und dienen dazu, dass der Gleisschotter recycelt bzw. kostengünstig entsorgt werden kann [120].

3.2.9 Bodenverbesserung durch Kalkbeimischung

Bauvorhaben, wie zum Beispiel Straßen, Parkplätze, usw., erfordern Böden mit einer bestimmten Steifigkeit und Festigkeit. Falls die geforderten Parameter mit dem ursprünglichen Baugrund nicht erfüllt werden können, kann eine Bodenverbesserung durchgeführt werden. Durch Bodenverbesserungen, wie zum Beispiel Bodenaustausch, Verdichtungen, Injektionen, Konsolidierungen, Vermörtelungen oder Vereisungen, werden die Steifigkeits- und Festigkeitsparameter des Bodens erhöht oder seine Durchlässigkeit verringert.

Die Verdichtbarkeit eines bindigen Bodens hängt vom Wassergehalt ab. Der optimale Wassergehalt wird nach Proctor ermittelt. Das Tragverhalten des Bodens bzw. die Verdichtung oberflächennaher Schichten wird durch den Plattendruckversuch ermittelt. Bei zu hohem Wassergehalt des Bodens verhindert der Porenwasserdruck eine optimale Verdichtung. In diesem Fall kann Kalk zugegeben werden. Abhängig von der Kalkart sowie der Kalkmenge werden unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Kalke werden eingeteilt in Feinkalk (Kalziumoxid CaO), Kalkhydrat (Kalziumhydroxid Ca(OH)_2) und hochhydraulischem Kalk. Feinkalk und Kalkhydrat werden bei feinkörnigen Böden verwendet. Hochhydraulische Kalke werden vorwiegend bei grobkörnigen Böden verwendet.

Bei der Beimengung von Feinkalk reagiert das CaO mit dem H_2O im Boden und es entsteht Ca(OH)_2 und Wärme. Infolgedessen wird durch die Bindung und durch Verdunstung dem Boden Wasser entzogen (= Bodenverbesserung). Des Weiteren wird durch Langzeitreaktionen die Festigkeit, Steifigkeit und Volumenbeständigkeit verbessert (= Bodenverfestigung). Die Verringerung des Wassergehaltes beträgt bei Feinkalk ca. das Zweifache und bei Kalkhydrat ca. das Einfache des Kalkgewichtes. Der maximale Kalkanteil ist abhängig von der Verwendungsart, Bodenverbesserung oder Bodenverfestigung und von der Kalkart [121].

Das Kalken ist vor allem in der Landwirtschaft eine beliebte Methode. Dabei wird die Fruchtbarkeit des Bodens verbessert indem der Boden entsäuert wird. In Deutschland wird für die Erhaltungskalkung zwischen 500 und 2000 kg CaO pro ha Ackerfläche benötigt [122].

3.2.10 Tunnelausbruchmaterial als Drainagekies

Kies, der bei Lockergesteinsvortrieben anfällt, ist ein Schüttgut, welches auf Grund seiner unterschiedlichen Gesteinskörnung vielfältig verwendet wird. Nach Korngrößenklassen gehört Kies zu den nicht bindigen Böden mit einer Korngröße von 2 bis 63 mm. Dazwischen wird unterteilt in Feinkies (2 – < 6,3 mm), Mittelkies (6,3 – < 20 mm) und Grobkies (20 – 63 mm).

Als Drainagekies, welcher direkt auf der Tunnelbaustelle wiederverwendet werden kann, eignen sich Gesteinskörnungen im Mittelkies- und Grobkies- Bereich. Am häufigsten werden die Korngrößenverteilungen 8 – 16 mm oder 16 – 32 mm verwendet. Der Feinkornanteil < 0,063 mm soll 4 M.-% nicht überschreiten. Des Weiteren begünstigt eine runde Kornform die Wasserdurchlässigkeit. Infolgedessen werden bei der Aufbereitung die Gesteinskörnungen ausschließlich gewaschen und gesiebt. Gebrochenes Korn kann verwendet werden, kann aber das Vlies oder die Rohre beschädigen. In Abbildung 24 ist eine typische Sieblinie, für Drainagekies, der Korngröße 16 – 32 mm dargestellt [123].

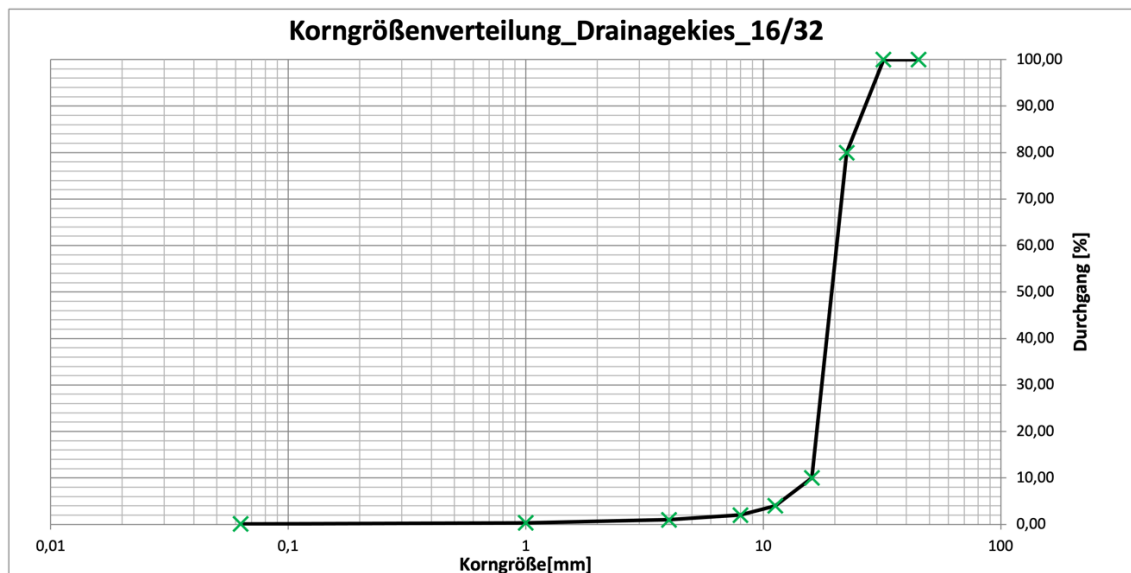


Abbildung 24: Korngrößenverteilung 16 - 32 mm für Drainagekies [124]

3.2.11 Tunnelausbruchmaterial als Mineralwolle

Mineralwollen werden hauptsächlich als Dämmstoffe von Häusern verwendet. Neueste Ziegelarten beruhen auf Mineralwolle gedämmte Kammern, anstelle von luftgefüllten Kammern. Mineralwollen werden aus den unterschiedlichsten Materialien hergestellt. Die Ausgangsstoffe sind entweder Naturfasern oder künstlich hergestellte Fasern. Tunnelausbruchmaterial kann in der Herstellung von Glas- und Steinwolle eingesetzt werden. Diese gehören zur Gruppe der künstlichen Mineralfasern.

Zur Erzeugung von Steinwolle werden Gesteinsarten, wie zum Beispiel Kalkstein, Diabas und Dolomit benötigt. In nachfolgender Tabelle ist ein Überblick über die chemische Zusammensetzung von Steinwolle gegeben.

Parameter	Anteil im Produkt [M.-%]
Na ₂ O	3,07
MgO	9,24
Al ₂ O ₃	11,42
SiO ₂	46,43
CaO	17,89
Fe ₂ O ₃	4,41
FeO	4,72
TiO ₂	1,47
Anmerkung: Enthalten sind gemittelte Werte aus 10 Analysen, zudem nur jene Bestandteile > 1 M.-%.	

Tabelle 22: Chemische Zusammensetzung von Steinwolle [126]

Des Weiteren finden mineralische Rohstoffe bei der Herstellung von Glaswolle Anwendung. Dabei wird jedoch vorwiegend nur Quarz (SiO₂) benötigt [127].

Zudem kann bei der Entsorgung von Mineralwolleabfall, dieser als Sinterhilfsmittel in der Ziegelherstellung verwendet werden. Dabei wird die Mineralwolle zerkleinert und dem Brennvorgang zugegeben [126].

4 Optische Merkmalanalyse im Tunnelbau

Ziel dieses Kapitels ist, die in Kapitel 2 genannten Analysemethoden mit den erforderlichen Parametern aus Kapitel 3 zu verknüpfen. Dazu werden die wichtigsten Parameter zur Beurteilung der Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial gefiltert und übersichtlich wiedergegeben. Anschließend werden die genannten Analysetools nach deren Anwendungsmöglichkeit als online- Analysemethode sortiert. Daraus wird ein Prototyp entworfen, der universell an unterschiedlichen österreichischen Tunnelbaustellen eingesetzt werden kann. Die Prototypanlage detektiert alle Parameter, welche für die in Kapitel 3 aufgelisteten Wiederverwendungsmöglichkeiten erforderlich sind. Des Weiteren soll mit der Anlage der Tunnelausbruchstoffstrom aufgeteilt werden, sodass die Rohstoffe für die jeweilige Wiederverwendung direkt auf der Baustelle separiert werden können. Um in Zukunft eine digitale Tunnelbaustelle, im Hinblick auf „Building Information Modeling“ (BIM), umsetzen zu können werden beim Entwurf des Prototyps, Ansätze der Digitalisierung, berücksichtigt. Die Funktionsweise der Anlage wird anhand einer fiktiven Baustelle erläutert. Dabei werden Schnittstellen, welche für die Datenanalyse mittels KI notwendig sind, aufgezeigt und erfasst. Zudem wird der Entwurf eines Klassifikationsmodells vorgestellt, mit dem der Stoffstrom nachvollziehbar klassifiziert wird. Durch eine Beurteilungsmatrix wird der Grad der Wiederverwertung erfasst und daraus die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme, gegenüber der Deponierung, beurteilt.

Am Ende des Kapitels werden zudem Maßnahmen genannt, welche im Sinne des Autors erforderlich sind, um eine online- Analyseanlage auf einer österreichischen Tunnelbaustelle umsetzen zu können. Dabei wird auf rechtliche, wirtschaftliche, administrative und bauprozessbedingte Aspekte eingegangen.

4.1 Anwendbarkeit der sensorgestützten Merkmalanalysen auf Basis der Rohstoff- Anforderungen

Die Möglichkeit der Detektierung von Parametern aus Tunnelausbruchmaterial, wurde bereits im Jahr 2015 im Zuge des Forschungsprojektes DRAGON, beurteilt. Dabei wurde die Machbarkeit der Umsetzung einer online- Analyseanlage auf einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) geprüft. Das positive Ergebnis führte zu weiteren Überlegungen auf diesem Gebiet. Beim DRAGON- Projekt wurde die Korngrößenverteilung mittels photooptischer Messgeräte analysiert. Die elementare Zusammensetzung des Stoffstroms wurde mittels XRF- Methode detektiert [128].

Ziel dieser Arbeit ist, die online- Analyse unabhängig der Tunnelbaumethode zu etablieren. Dadurch soll ein variables System entstehen, welches bei zyklischen (NATM-) als auch bei kontinuierlichen (TVM-) Vortrieben angewendet werden kann. Welche Voraussetzungen dafür erforderlich sind, sind in Kapitel 4.5.3 beschrieben.

Um aus den in Kapitel 2 genannten Sensortechnologien, jene auszuwählen, welche für die Charakterisierung von Tunnelausbruchmaterial geeignet sind, sind die Anwendungen der Technologien in Tabelle 23 aufgelistet.

Spektrum	Methode (de)	Abkürzung	Anwendung
VIS	Visuelle Spektroskopie	VIS	→ Detektion der Farbe im visuellen Wellenlängenbereich → Trennung von transparenten und nicht transparenten Bestandteilen
	Farbzeilenkameras	CCD- Kamera	→ Detektion der Farbe, Form, Größe und Oberflächenstruktur
	Graustufen- und Farbsensor	-	→ Detektion der Unterschiede in der Bildhelligkeit bzw. der Farben
IR	Nahinfrarot- Spektroskopie	NIR	→ Detektion der charakteristischen Wellenlänge (im IR- Bereich) der Bestandteile → Detektion der Konzentration über die Intensität → Detektion der Oberflächenfeuchte
	Hyperspectral- Imaging Technologie	HSI	→ Detektion der chemischen Zusammensetzung → Detektion von Farbkoordinaten → Detektion von Schichtdickeninformationen
Röntgenstrahlung	Röntgenfluoreszenz- Spektroskopie	XRF	→ Detektion der elementaren Zusammensetzung
	Röntgentransmissions- Analyse	XRT	→ Detektion der inneren Partikeleigenschaften z.B: Dichteunterschied, Absorptionsunterschied
	Radiometrische Analyse	-	→ Detektion der natürlichen Radioaktivität
UV	UV- Licht/Fluoreszenz	-	→ Detektion der Nachleuchtzeit welche charakteristisch für die Materialart ist
Terahertz	Terahertz- Imaging	THz	→ Detektion von spezifischen Resonanzeigenschaften im THz- Spektrum
Röntgenstrahlung - IR	Laserspektroskopie	-	→ Detektion von charakteristischen Spektren
UV & VIS	Laser- induzierte- Fluoreszenz	LIF	→ Detektion von charakteristischen Fluoreszenzspektren → Messung der Schadstoffkonzentration in Abgasen
UV, VIS, IR	Laser- induzierte Plasmaspektroskopie	LIBS (LOLA)	→ Detektion von Qualitätsparametern → Detektion der Konzentration und Art der Atome und Ionen → Detektion vom Wassergehalt, Aschegehalt, Heizwert und der elementaren Zusammensetzung von Kohle
VIS & IR	Laser- Raman- Spektroskopie	-	→ Detektion der Raman- Streuung an der Oberfläche → Detektion der chemischen Bindungen und Gruppen → Detektion der Kristallstruktur von Mineralen → Detektion der Mikrostruktur, Textur und Orientierung
UV, VIS, IR	Laserscanning	LIDAR	→ Detektion des Volumenstroms unabhängig von der Feuchtigkeit → Detektion der Bandgeschwindigkeit, Füllhöhe und des Schwerpunktes
UV & VIS	Lasertriangulation	LT	→ Detektion des Einzelkörpervolumens
Mikrowellen	Mikrowellenspektroskopie	-	→ Detektion der Gesamtfuchte und Dichteverteilung
-	Volumenstrommessung ü. Stoffstromgewicht	-	→ Detektion des Volumenstroms und der Förderleistung → Detektion der Bandgeschwindigkeit
	Induktions- Sortiersystem	ISS	→ Detektion von leitenden bzw. metallhaltigen Bestandteilen
	Marker (Tracer)- basiertes Sortieren	TBS	→ Detektion von Partikeln, welche zuvor bewusst markiert wurden
	Prompt Gamma Neutron Activation Analysis	PGNAA	→ Detektion einer vollständigen Element- und Isotopenanalyse → Multielementanalyse von geologischem Material → Qualitätssicherung in der Kohle- und Zementindustrie
	Pulsed Fast Thermal Neutron Activation	PFTNA	→ Detektion vom Heizwert und der Feuchtigkeit in der Kohleindustrie

Tabelle 23: Anwendungen der Merkmalanalysemethoden

Um die Auswahl zu spezifizieren sind in Tabelle 24 und Tabelle 25 die Vor- und Nachteile aller Merkmalanalysemethoden genannt. Des Weiteren ist ihre Anwendung am Förderband ersichtlich. Die Tabelle wurde auf Grund der besseren Lesbarkeit in zwei Teile aufgeteilt.

Methoden (de)	Abk.	Vorteile	Nachteile	Förderband
Visuelle Spektroskopie	VIS	+ Korngrößenfraktionen von 0,8 - 250 mm + Sensorkombinationen möglich + hohe Trennschärfe + Materialerkennung durch Auswert-Algorithmus + hoher Durchsatz 50 - 140 t/h + schnell und kostengünstig	- signifikanter Farbunterschied erforderlich - eingeschränkter Wellenlängenbereich - Abhängig von Umgebungsbedingungen (z.B. Licht)	ja
Farbzeilenkameras	CCD-Kamera	+ hohe Geschwindigkeit + automatisierte Überwachung möglich + hohe Auflösung + geringes Rauschen und Verzerrung + präzise Farbwiedergabe	- ausschließlich Eigenschaften der Oberfläche - empfindlich gegenüber Bewegungsunschärfen - abhängig von der Beleuchtung - hohe Kosten	ja
Graustufen- und Farbsensor	-	+ Erkennung minimaler Helligkeitsunterschiede + Detektion von SpC + hohe Empfindlichkeit + geringe Datenmenge + Positionsbestimmung am Förderband möglich + kostengünstig	- Kombination mit Bildverarbeitungssoftware - Umgebungslichtabhängig - Probleme bei verschmutzten Bestandteilen	ja
Nahinfrarot- Spektroskopie	NIR	+ Korngrößenfraktion 25 - 400 mm + Bestimmung der Oberflächenfeuchte + hohe Trennschärfe + keine Probenvorbereitung erforderlich + geringer Wartungsaufwand	- schwarze Materialien nicht detektierbar - Partikel dürfen nicht stark verwachsen sein - Datenbank notwendig - hauptsächlich für organische Stoffe - geringere Wertstoffausbringung - hohe Kosten - empfindlich gegenüber Umgebungsbedingungen	ja
Hyperspectral- Imaging Technologie	HSI	+ präzise Messung der chemischen Zusammensetzung + Bestimmung der Oberflächenfeuchte + hohe Trennschärfe + hohe Auflösung + hohe Wertstoffausbringung + Detektion von schwarzen Materialien	- große Datenmenge - hohe Kosten - anfällig gegen Vibrationen, Staub, Lärm	ja
Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie	XRF	+ elementare Zusammensetzung + hohe Wertstoffausbringung + schnell und präzise	- geringe Ortsauflösung von 50 - 100 mm - gleichzeitige Messung mehrerer Elemente beschränkt - keine Messung von leichten Elementen (C, H, O) - hohe Konzentration der Zielelemente notwendig - geringer Durchsatz 10 - 30 t/h - Strahlenschutz notwendig - hohe Kosten bei rauen Umgebungen	ja
Röntgentransmissions-Analyse	XRT	+ innere Eigenschaften der Partikel + Messung der Dichte und Materialzusammensetzung + keine Reinigung der Oberfläche notwendig + hoher Durchsatz 100 t/h pro Meter Förderbandbreite + hohe Auflösung 0,5 mm	- Monoschicht erforderlich max. 40 mm bei Gestein - Strahlenschutz - hohe Kosten bei rauen Umgebungen - Materialheterogenitäten beeinflussen die Messung	ja
Radiometrische Analyse	-	+ schnell und präzise	- natürliche Radioaktivität notwendig (z.B. Uranerz)	ja
UV- Licht/Fluoreszenz	-	+ schnell + kostengünstig	- Material muss unter UV- Licht fluoreszieren	ja

Tabelle 24: Vor- und Nachteile der Merkmalanalysemethoden (Teil 1)

Methoden (de)	Abk.	Vorteile	Nachteile	Förderband
Terahertz-Imaging	THz	+ keine ionisierende Strahlung + keine Probenvorbereitung erforderlich	- hohe Kosten - Einfluss der Materialdicke - Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit - schwierige Datenausarbeitung	ja
Laserspektroskopie	-	Vorteile siehe nachfolgende Verfahren	Nachteile siehe nachfolgende Verfahren	-
Laser-induzierte Fluoreszenz	LIF	+ sehr empfindlich + leistungsstark	- an Gesteinen nicht erprobt - erkennt nicht alle Elemente - begrenzt auf bestimmte Materialien - meist als unterstützende Methode zu XRF oder Raman-Sp.	ja
Laser-induzierte Plasmaspektroskopie	LIBS (LOLA)	+ online-Analyse möglich (LOLA) + keine Probenvorbereitung notwendig + schnell und effizient + detektiert auch leichte Elemente	- Referenzproben notwendig - Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit	ja
Laser-Raman-Spektroskopie	-	+ chemische Zusammensetzung von Gesteinsproben + identifiziert anorganische und organische Verbindungen + keine Probenvorbereitung notwendig + schnelle Analysetechnik	- eingeschränkter Messbereich - Einfluss von Umweltfaktoren (z.B. Temperatur)	ja
Laserscanning	LIDAR	+ Volumenstrom unabhängig von der Feuchtigkeit + Durchführung der Bandlaufkontrolle möglich + hohe räumliche Auflösung + Größe und Form von Stoffstrompartikel (auch 3D)	- Einfluss von Umgebungsbedingungen (z.B. Staub) - hohe Kosten	ja
Lasertriangulation	LT	+ Positionsdetektion + hohe Förderbandgeschwindigkeit	- nur opake Materialien - Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit - Einfluss von Umgebungsbedingungen (z.B. Staub) - anwendbar auf Einzelobjekte nicht geeignet bei Stoffstrom	ja
Mikrowellenspektroskopie	-	+ Messung der Gesamtfeuchte + kontinuierliche Messung möglich	- bei dichten Gesteinen nicht effektiv - präzise Kalibrierung notwendig	ja
Volumenstrommessung ü. Stoffstromgewicht	-	+ am Förderband erprobt + einfache Gewichtsmessung	- Schüttdichte muss bekannt sein - Förderbandgeschwindigkeit muss bekannt sein - geringe Förderbandgeschwindigkeit erforderlich	ja
Induktions-Sortiersystem	ISS	+ Detektion von Bewehrungsseisen + auch eingeschlossene Bestandteile detektierbar	- leitende bzw. metallische Bestandteile erforderlich - maximale Auflösung nur bei 15 mm - magnetische Induktion nimmt mit Entfernung stark ab - Kombination mit Farbzeilenkameras sinnvoll	ja
Marker (Tracer)-basiertes Sortieren	TBS	+ präzise durch charakteristischen Marker	- Partikel müssen vorher markiert werden - keine Anwendung für mineralische Stoffe - schwierige Umsetzung bei Gesteinen	ja
Prompt Gamma Neutron Activation Analysis	PGNAA	+ online-Analyse möglich + Multielementanalyse + matrixunabhängig + geologische Materialien erprobt + hohe Durchdringungskraft + hoher Durchsatz + flexible Probenanforderungen + Massenprobenanalyse	- O und C nicht ermittelbar - Abschirmung notwendig - Vorsicht bei Proben großer Dicke - komplexer Aufbau - hohe Kosten - Vorsicht bei Proben geringer Dichte	ja
Pulsed Fast Thermal Neutron Activation	PFTNA	+ online-Analyse möglich (Cross-Belt-Analyser) + vollständige Element-Analyse auch C und O + hohe Empfindlichkeit + Strahlung kann jederzeit gestoppt werden	- empfindlich gegenüber Dicke, Feuchtigkeit und Dichte - hohe Kosten	ja

Tabelle 25: Vor- und Nachteile der Merkmalanalysemethoden (Teil 2)

Des Weiteren spielen die zu ermittelnden Parameter bzw. Eigenschaften eine entscheidende Rolle. Diese wurden in Kapitel 3 beschrieben und sind für einen besseren Überblick in Tabelle 26 zusammengefasst.

Endprodukt Parameter	Gesteinskörnung für Beton	thermisch aktivierte Tone	Geopolymere	Roherde- Ziegel	Lehm Putze	Oberbodenmaterial	Tragschichten	Gleisschotter	Bodenverbesserung durch Kalke	Drainagekies	Mineralfolle
chemische Zusammensetzung gem. BAWP				x		x	x				x
mineralogische Zusammensetzung		x	x	x					x		x
→ Al ₂ SiO ₅ Gehalt		x	x								
→ Kaolingehalt		x									
→ Kalkgehalt (CaO, CA(OH) ₂)									x		
elementare Zusammensetzung	x	x	x	x		x	x	x	x		x
Korngrößenverteilung	x			x	x	x	x	x		x	
Feinkornanteil							x	x			
Kornform	x						x	x		x	
Farbe					x						
Schüttdichte						x		x			
Rohdichte							x				
pH- Wert						x					
Oberflächenfeuchte	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
Gesamtfeuchte	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
Stoffstrom- Volumen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Anteil Spritzbeton (Chromat)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Anteil Bewehrungsstahl	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
systembedingte Verunreinigungen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
→ Holz	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
→ Sprengstoffrückstände (NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
→ Öle, Fette, Treibstoffe, Konditionierungsmittel	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
→ Masseanteil an rezyklierter Gesteinskörnung	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Festigkeitseigenschaften	x						x	x			
Oberflächeneigenschaften	x						x	x		x	

Tabelle 26: Erforderliche Materialparameter für ausgewählte Endprodukte

Aus der Ermittlung der Anwendbarkeit und der Vor- und Nachteile der Analysemethoden sowie der erforderlichen Materialparameter ergibt sich die Eignung der unterschiedlichen Analysemethoden. Auf Grund dessen, dass alle Methoden am Förderband einsetzbar sind, werden bei der Entscheidung vorrangig die ermittelbaren Parameter und die Sinnhaftigkeit, in Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Verwendung im Rohstoffbereich, der jeweiligen Methode beurteilt. In Tabelle 27 ist das Ergebnis der Methodenauswahl, anhand der zuvor genannten Kriterien, dargestellt.

Analysemethode Parameter	VIS	Farbbeilokamera	Graustufen- und Farbsensor	NIR	HSI	XRF	XRT	Radiometrisch	UV Licht/Fluoreszenz	THz	LIF	LIBS (LOLA)	Laser-Raman-Spektroskopie	LIDAR	LT	Mikrowellen-Spektroskopie	Bandwaage	ISS	TBS	PGNAA	PFTNA	
	chemische Zusammensetzung				x	x	x						x	x							x	x
mineralogische Zusammensetzung				(x) ¹	(x) ¹		x	(x) ⁵	(x) ⁶		(x) ⁶	x	x							x	x	
→ Al ₂ SiO ₅ Gehalt				x	x						x	x	x							x	x	
→ Kaolingegehalt				x	x			x			x	x	x								x	
→ Kalkgehalt (CaO, CA(OH) ₂)				x	x						x	x	x							x	x	
elementare Zusammensetzung						x	(x) ²	(x) ⁵			(x) ⁶	x								x	x	
Korngrößenverteilung		x					x							x	x ¹²							
Feinkornanteil		x					x															
Kornform		x					x								x ¹²							
Farbe	x	x	x																			
Schüttdichte				x	x												x					
Rohdichte				x	x		(x) ³			(x) ⁷						x				x	x	
pH- Wert																						
Oberflächenfeuchte				x	x																	
Gesamtfeuchte									(x) ⁸							x				x	x	
Stoffstrom- Volumen														x ¹¹		x						
Anteil Spritzbeton (Chromat)	x	x	x	x	x							(x) ⁹								x	x	
Anteil Bewehrungsstahl	x	x	x									x						x				
systembedingte Verunreinigungen													x	x								
→ Holz	x	x	x	x	x							x	x							x	x	
→ Sprengstoffrückstände (NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺)				x	x							(x) ⁹								x	x	
→ Öle, Fette, Treibstoffe, Konditionierungsmittel				x	x			x		x	x											
→ Masseanteil an rezyklierter Gesteinskörnung	x	x		x	x	x						x	x							x	x	
Festigkeitseigenschaften							(x) ⁴			(x) ⁴		(x) ⁴	(x) ¹⁰									
Oberflächeneigenschaften		x												x	x							
Bandgeschwindigkeit														x	x		x					
Eignung für Tunnelausbruchmaterial	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Anmerkungen:																						
1	Es können nur Rückschlüsse gezogen werden.																					
2	Elemente werden über Helligkeitsstufen, abhängig von deren Absorptionsgrad, dargestellt.																					
3	Die Dichte kann nur über die Absorption berechnet werden.																					
4	Detektion von Rissen und Brüchen bzw. Poren in Materialien, dadurch können Rückschlüsse auf die Festigkeitseigenschaften gezogen werden.																					
5	Ausschließlich Minerale und Elemente, welche natürliche Radioaktivität aufweisen.																					
6	Ausschließlich Minerale, welche Fluoreszenzeigenschaften aufweisen.																					
7	Die Dichte kann nur durch Rückschlüsse von der Schallgeschwindigkeit detektiert werden.																					
8	Es können nur Feuchtigkeitsunterschiede detektiert werden.																					
9	Eignet sich nur bedingt, da die Detektion von vielen Faktoren wie z.B.: dem Matrixeffekt abhängt.																					
10	Die Raman- Spektren können genutzt werden, um Deformations- und Spannungszustände in Gesteinen zu identifizieren.																					
11	Unabhängig von der Feuchtigkeit.																					
12	Jedoch nur von Einzelpartikel. Ist nur bedingt im Stoffstrom anwendbar.																					

Tabelle 27: Überblick der detektierbaren Materialparameter und Eignung der Analysemethoden

Auf Grund der Daten, aus den oben angeführten Tabellen, eignen sich für die Charakterisierung von Tunnelausbruchmaterial, folgende Merkmalanalysetechnologien am besten:

- Visuelle Spektroskopie:

Die VIS eignet sich vor allem zur Detektion von Verunreinigungen geogener als auch anthropogener Natur. Trotz des einfachen Aufbaus zeichnet diese Methode eine hohe Trennschärfe aus. Zur Analyse von Tunnelausbruchmaterial eignet sich diese Methode, weil durch die Kombination mit anderen Technologien sehr gute Ergebnisse erzielt werden können.

- Farbzeilenkamera:

Farbzeilenkameras sind notwendig, um die Korngrößenverteilung, den Feinkorngehalt, die Kornform als auch die Farbe der Partikel zu bestimmen. Des Weiteren können Verunreinigungen auf Grund von Farbunterschieden erkannt werden. Durch die Detektion der Oberflächeneigenschaften kann diese Methode zur Beurteilung von Kiesen als Betonzuschlagsstoff oder Drainagekies signifikante Ergebnisse liefern.

- Graustufen- bzw. Farbsensor:

Die Verwendung eines Graustufen- bzw. Farbsensors ist in Kombination mit Farbzeilenkameras eine vielversprechende Detektionsmethode. Die Sensorkombination erhöht die Genauigkeit vor allem, wenn geringe Helligkeits- bzw. Farbunterschiede vorhanden sind.

- Nahinfrarot- Spektroskopie bzw. Hyperspektrale Bildgebung:

Die NIR bzw. HSI ist eine weit verbreitete Methode. Dadurch ist ihr Einsatz durch mehrere Anwendungen verifiziert. Vor allem die Ermittlung der Oberflächenfeuchtigkeit zeichnet diese Methode aus. Des Weiteren kann die mineralogische Zusammensetzung detektiert werden, welche für die Einteilung des Bodenaushubmaterials in die Qualitätsklassen entscheidend ist. Verunreinigungen werden durch die hohe Trennschärfe einfach detektiert, wodurch belastete Stoffströme sehr gut abgetrennt werden können.

- Röntgenfluoreszenzanalyse:

Die XRF ist eine gute Methode zur quantitativen und der qualitativen Ermittlung der elementaren Zusammensetzung. Die Methode eignet sich für Tunnelausbruchmaterial, jedoch ist die Kombination der XRF mit anderen Technologien fraglich, da der geringe Durchsatz die Leistung einer online- Analyseanlage beeinträchtigen kann.

- Röntgentransmissionsanalyse:

Die XRT eignet sich für die Merkmalanalyse von Tunnelausbruchmaterial. Vor allem die Messung der Dichte sowie die Rückschlüsse auf die Festigkeitseigenschaften von Gesteinen wecken das Interesse an der XRT. Inwieweit die Aussagen bzw. Rückschlüsse in der Praxis verwendet werden können, muss durch Versuche verifiziert werden.

- Laserfluoreszenzanalyse:

Die LIF kann zur Detektion von Tonmineralien und Kalken verwendet werden. Die Anwendung dieser Methode ist abhängig von der Verwendung weiterer Methoden, da Tonminerale und Kalke auch durch andere Technologien detektiert werden können.

- Laser- induzierte Plasmaspektroskopie:

Die Verwendung der LIBS als online- Analyse ist erprobt und zeichnet sich durch eine schnelle und effiziente Methode aus. Sie eignet sich für Tunnelausbruchmaterial, da

einerseits der Stoffstrom nicht vorbereitet werden muss und andererseits, mit Hilfe der LIBS- Technologie auch leichte Elemente detektiert werden können.

- Laser- Raman Spektroskopie:

Die Laser- Raman Spektroskopie ergänzt sich mit der LIBS, da durch die Detektion der Raman- Streuung nicht nur die chemische Zusammensetzung, sondern auch die Kristallstruktur ermittelt werden kann.

- Laserscanning:

Die Ermittlung des Volumenstroms am Förderband ist essenziell um die Produktivität bzw. die wahre Menge des Ausbruches zu detektieren. Zudem kann mit Hilfe dieser Methode eine Bandlaufkontrolle durchgeführt werden und dadurch Wartungen gezielt gesteuert werden.

- Mikrowellenspektroskopie:

Die Mikrowellenspektroskopie eignet sich dann, wenn die Gesamtfeuchte des Stoffstroms von hoher Bedeutung ist. Des Weiteren kann die Dichteverteilung von Gesteinen detektiert werden.

- Bandwaage:

Vor allem in der Bergbauindustrie finden Bandwaagen Anwendung. Die einfache Gewichtsmessung ist am Förderband erprobt und liefert zuverlässige Ergebnisse. Voraussetzung für die Anwendung dieser Methode ist die Vorabermittlung der Schüttdichte und der Förderbandgeschwindigkeit.

- Induktions- Sortiersystem:

In Lockergesteinsvortrieben mit Ortsbruststützung wird das Tunnelausbruchmaterial immer wieder mit Bewehrungsstahl verunreinigt. Die einfachste Detektion dieser Verunreinigungen kann mit der ISS- Methode erzielt werden.

- PGNAA bzw. PFTNA:

Sowohl die PGNAA als auch die PFTNA eignen sich für die Analyse von Tunnelausbruchmaterial. Welche Methode Anwendung findet, hängt vom Auftreten leichter Elemente ab, diese können nur durch die PFTNA detektiert werden.

Die anderen Technologien eignen sich nicht bzw. nur bedingt, weil:

- Das Vorkommen von natürlich radioaktiven Bestandteilen in Tunnelausbruchmaterial als sehr gering eingeschätzt wird.
- Bestandteile des Stoffstroms welche unter UV- Licht fluoreszieren auch durch andere Methoden detektiert werden können. Zudem ist die Methode wenig erprobt.
- Die THz- Methode nicht wirtschaftlich ist und Proben mit hohem Wassergehalt nur bedingt analysiert werden können.
- Die LT für die Analyse von Einzelkörpern geeignet ist und die detektierbaren Parameter auch durch andere Technologien ermittelt werden können.
- Das Einbringen von Markern in gewissen Stoffstrombestandteilen im Tunnelbau schwierig umsetzbar ist.

4.2 Prototyp einer online- Analyseanlage zur Merkmalanalyse im Tunnel

Wie in der Kapiteleinleitung erwähnt, ist das Ziel eine Prototypanlage zu entwickeln, welche universell eingesetzt werden kann. Nichtsdestotrotz muss die Eignung der genannten Bestandteile, abhängig vom jeweiligen Projekt überprüft werden. Zum Beispiel spielt die Geologie eine Hauptrolle bei der Auswahl der Endprodukte sowie bei der Auswahl der online- Analysetechnologien.

Auf Grund dessen, dass eine online- Analyseanlage in die Kategorie der Aufbereitungsanlagen gehört, muss berücksichtigt werden, dass die Anlage nach Vortriebsende abgebaut und im Zuge von Nachfolgeprojekten wiederverwendet werden kann. Es ist üblich, dass Aufbereitungsanlagen über mehrere Jahre abgeschrieben werden und dazu ein Tunnelbauprojekt mittlerer Größe nicht ausreichen wird.

Die Anlage ist dafür ausgelegt, dass Tunnelausbruchmaterial sowohl vom kontinuierlichen als auch vom zyklischen Vortrieb stammend, charakterisiert werden kann. Die Endprodukte sind bei diesem theoretischen Prototyp nicht von der Geologie abhängig und umfassen jene, welche in Kapitel 3 dieser Arbeit behandelt wurden. Infolgedessen eignen sich dieselben Technologien wie in Tabelle 27 aufgelistet. Mit Hilfe der Anlage soll eine rasche online- Analyse von Tunnelausbruchmaterial gewährleistet werden, um den Verwendungszweck des Materials auf der Baustelle festzustellen.

Für folgende Rahmenbedingungen bzw. Annahmen ist die Anlage ausgelegt:

- Tunnelquerschnitt von 50 m²
- Abschlaglänge von 2,50 m → pro Abschlag 125 m³
- Zyklischer Sprengvortrieb → erwartete Korngrößenverteilung 0/500 mm
- Schüttern über Förderband → Förderbandgeschwindigkeit 3 m/s
- Schutterzeit 60 Minuten → 125 m³/h → 0,035 m³/s Aufgabe
- Ausbau: Gitterbögen, Spritzbeton, Bewehrungsmatten und Anker

Verwendete online- Analysetechnologien:

- CCD- Kamera:
Zur Detektion der Korngrößenverteilung, Kornform und Oberflächeneigenschaften.
- HSI:
Zur Detektion der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung, Dichte, Oberflächenfeuchtigkeit und Verunreinigungen.
- LIBS:
Zur Detektion der chemischen, mineralogischen und elementaren Zusammensetzung.
- Laser- Raman- Spektroskopie:
Zur Detektion der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung.
- LIDAR:
Zur Detektion der Korngrößenverteilung und des Volumenstroms.
- PFTNA:
Zur Detektion der elementaren Zusammensetzung.

Um die Anlage übersichtlich zu gestalten ist der Standort einer möglichen online- Analyseanlage in Abbildung 25 dargestellt und kurz erläutert.

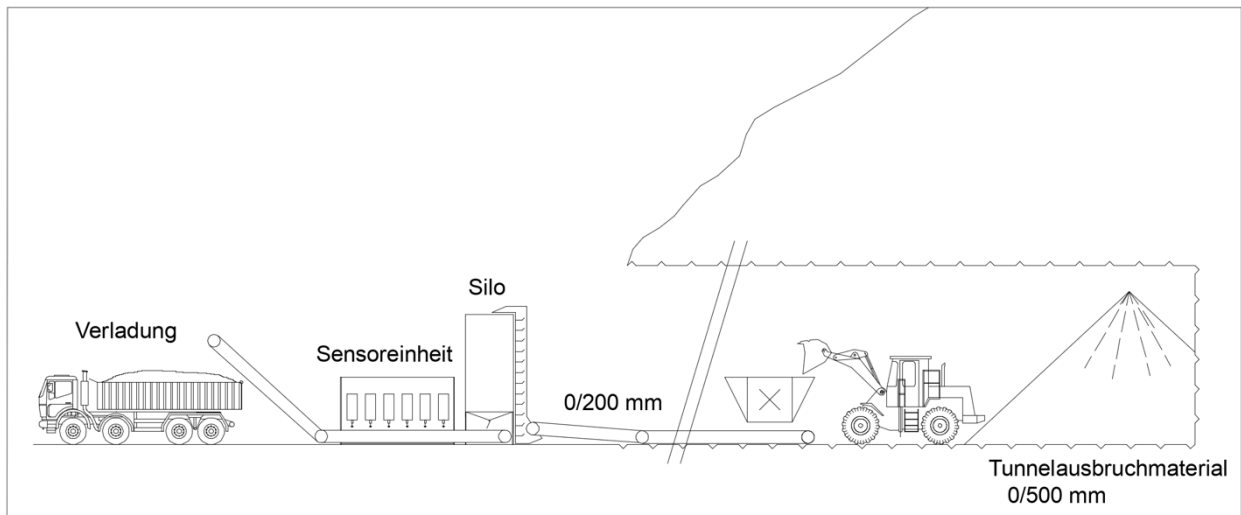


Abbildung 25: Darstellung der Anordnung der online- Analyseanlage auf einer Tunnelbaustelle

Obwohl die Charakterisierung des Materials an der Ortsbrust von großer Bedeutung ist, ist bei Standard-Tunnelvortrieben das Platzangebot sehr eingeschränkt. Infolgedessen ist es sinnvoll ausschließlich die erste Brecher- Stufe innerhalb des Tunnels zu platzieren. Durch das sofortige Schüttern, nach dem Lösen des Gesteins, wird das Tunnelausbruchmaterial über ein Förderband aus dem Tunnel gefördert. Es ist davon auszugehen, dass durch die Förderung das Tunnelmaterial nur gering beeinflusst wird. Neben den besseren Platzverhältnissen im Tunnel, kann die Wartung der Anlage im Portalbereich einfacher und effizienter durchgeführt werden. Des Weiteren muss die Anlage, welche sensible Sensoren beinhaltet, nicht ständig bewegt und mit dem Vortrieb in Richtung Ortsbrust gezogen werden. Zusätzlich sind weitere Überlegungen hinsichtlich des Arbeitnehmerschutzes zu treffen. Einerseits muss beurteilt werden, wo das Förderband platziert wird. Es ergeben sich drei sinnvolle Orte. Im Bereich des Ulms (auf Höhe der temporären Baustellensohle) im Bereich des Kämpfers oder in der Firste des Tunnels. Andererseits muss eine mögliche Einhausung des Förderbandes berücksichtigt werden.

Die online- Analyseanlage, welche im Portalbereich platziert wird, setzt sich zusammen aus einem Silo, der Sensoreinheit und dem Kontrollraum. Der Silo dient dazu, das Tunnelausbruchmaterial zu sammeln, um die Sensoreinheit mit einem kontinuierlichen Stoffstrom zu beschicken. Abhängig von der getroffenen Technologieauswahl, können unterschiedliche maximale Schichtdicken am Förderband erforderlich sein. Des Weiteren können zusätzliche Brecher- Stufen vor der Anlage notwendig sein. Diese sind in Abbildung 25 nicht dargestellt. Die Sensoreinheit besteht aus den ausgewählten Merkmalanalysemethoden und ist das Herzstück der Anlage. Bei der Verwendung von gewissen Technologien, wie zum Beispiel der PFTNA, muss der Strahlenschutz berücksichtigt werden. Es empfiehlt sich, die gesamte Sensoreinheit einzuhausen, damit einerseits die Anlage von Umwelteinflüssen geschützt ist und andererseits ein erforderlicher Strahlenschutz sichergestellt werden kann. In Abbildung 26 ist der theoretische Aufbau der Sensoreinheit dargestellt. Anzumerken ist, dass die dargestellten Objekte nicht denen der Realität entsprechen. Zudem wurde die Einhausung nicht konstruiert. Der Kontrollraum befindet sich entweder neben der Anlage oder direkt im Baubüro. Sinn dieses Raumes, ist die Sammlung aller Daten aus der Sensoreinheit. Durch ein Zusammenspiel aus detektierten Parametern und erforderlichen Rohstoffeigenschaften wird das Tunnelausbruchmaterial, im Voraus definierten, Materialklassen zugeordnet. In Kapitel 4.3.2 ist die Datenanalyse weiter erklärt.

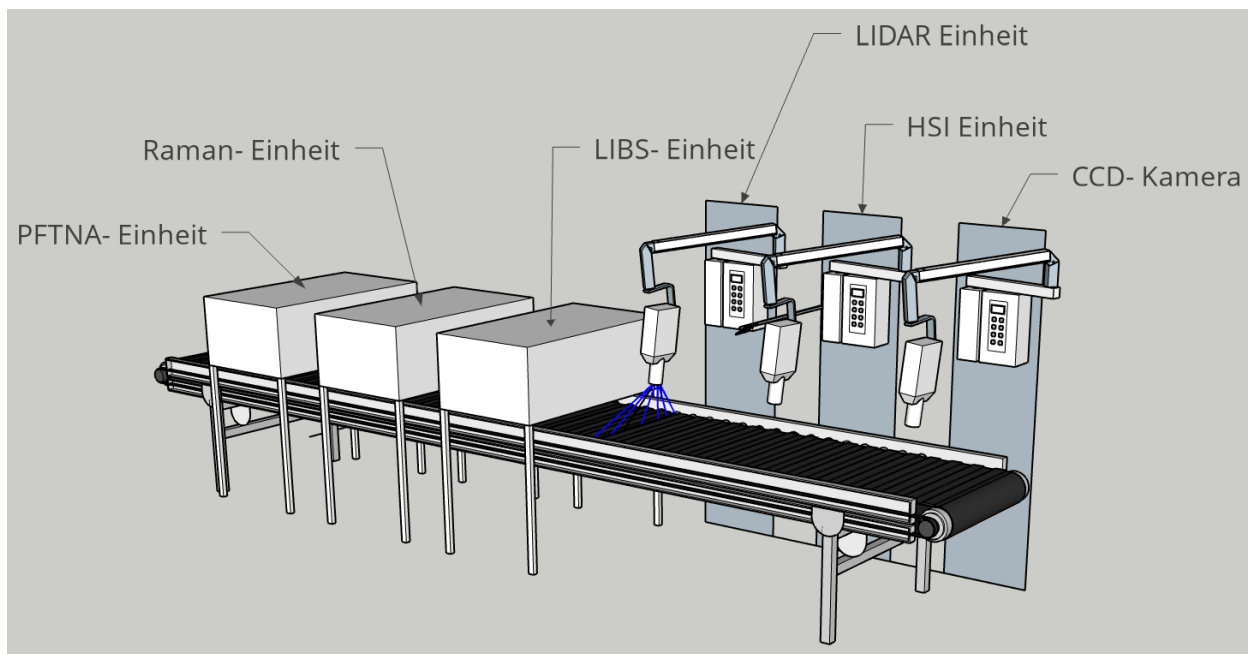


Abbildung 26: Darstellung der Sensoreinheit

Nach der erfolgreichen Zuordnung, in Materialklassen, wird das Tunnelausbruchmaterial entweder Verladen und gezielt zu den Abnehmern geliefert oder im Baustellenbereich zwischengelagert.

In Abbildung 27 ist der Informationsfluss von Abbildung 26 schematisch dargestellt. Dabei wird auf die Daten-Sammlung durch die Sensoreinheit, die Daten-Speicherung in der Datenbank sowie die Daten-Analyse mit Hilfe der Serviceplattform eingegangen.

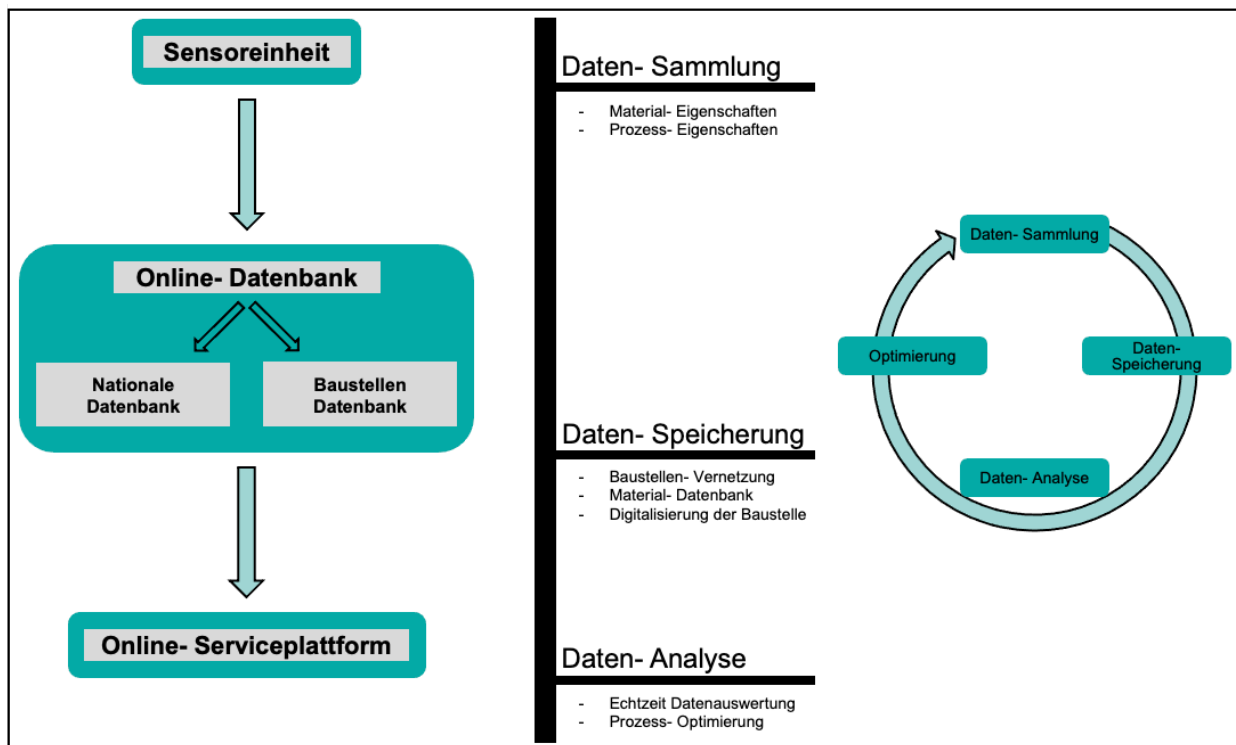


Abbildung 27: Schematische Darstellung des Datenflusses

4.3 Berücksichtigung von Ansätzen der Digitalisierung

Die Digitalisierung der Tunnelbaustelle ist ein immer wichtiger werdendes Thema. Einerseits fallen an einer Tunnelbaustelle viele Daten an, welche zurzeit wenig genutzt werden und andererseits werden Schichtberichte, Abschlagsblätter, usw. händisch bearbeitet. Falls es zu einer Umsetzung einer online-Analyseanlage kommt, ist eine digitale Baustelle erforderlich. Wie im vorherigen Unterkapitel erwähnt, wird es einen Kontrollraum geben, indem alle Daten zusammenfließen. Zur Einbringung der Digitalisierung kann es zu einer neuartigen Verknüpfung der Maschinendaten und der Materialparameter kommen. Des Weiteren kann eine Serviceplattform entstehen, in der die Daten gesammelt und analysiert werden.

Anhand von Ansätzen der KI, können Abnutzungserscheinungen angelernt werden. Dadurch entsteht eine völlig neuartige Art der Planung von Wartungsintervallen im Tunnelbau. Vor allem bei der Verwendung einer online- Analyse muss die Funktionstüchtigkeit des Förderbandes vorausgesetzt sein. Neben den materialcharakteristischen Parametern ist die Detektion von Maschinendaten essenziell. Zudem kann das Anlernen von gewissen Korngrößen oder Farbkombinationen bei der Zuteilung des Stoffstromes in die Anwendungsklassen (AK) verwendet werden.

4.3.1 Datenkombination

Ziel der Digitalisierung ist es Daten, welche vorhanden sind so aufzubereiten, sodass sie einen Nutzen haben und Prozesse dadurch verbessern und optimieren. Im Tunnelbau gibt es viele Ansätze der Digitalisierung, diese beschränken sich jedoch auf die Planungsphase oder die Betriebsphase des Projektes. Die Ausführungsphase rückt bei Digitalisierungsansätzen oftmals in den Hintergrund. Wobei speziell in dieser Phase besonders viele Daten anfallen, welche für nachgeschaltete Prozesse durchaus wertvoll sein können.

Daten entstehen bei Tunnelbaustellen auf unterschiedlichste Art und Weise:

- Daten aus dem Vortrieb
 - Maschinendaten
 - Geotechnische Messdaten
 - Abschlagsprotokolle
 - Schichtberichte
 - usw.
- Daten aus der Bautätigkeit
 - Materialmengen
 - Arbeitsstunden
 - usw.

Die österreichische Tunnelbaumethode, sprich die NATM, setzt die Beobachtungsmethode voraus. Durch geotechnische Messungen werden Daten aus dem Gebirge aufgenommen und in weiterer Folge verwendet, um Aussagen über das Systemverhalten zu treffen. Die geotechnischen Messdaten werden anhand von Diagrammen, wie zum Beispiel Verschiebungsverlaufdiagramme, Weg- Zeit- Diagramme, Einflusslinien, Trendlinien, Vektordiagramme, usw. dargestellt. Des Weiteren werden mit Hilfe von Messtechnik Daten aus den eingebauten Stützmitteln gewonnen. In diesem Bereich ist die Digitalisierung bzw. die Datenaufbereitung bereits etabliert [129].

Hingegen werden Maschinendaten, aus dem zyklischen Vortrieb, nahezu nicht verwendet. Beim Bohren von Bohrlöchern, Rohrschirmen oder Ankern werden Daten wie maximales Drehmoment, Vorschubkraft, usw. durch den Bohrwagen aufgenommen.

Ein Ziel der Digitalisierung muss sein, diese Daten zu sammeln und mit anderen zu verknüpfen. Über die gebohrte Bohrlochlänge und Anzahl der verwendeten Bohrkronen können Rückschlüsse auf die Abrasivität des Gesteins gezogen werden. In Kombination mit dem aus der online- Analyse stammenden Quarzgehalt besteht die Möglichkeit vielversprechende Ergebnisse bzw. Werte zu erfassen. Die

Abrasivität ist wiederum entscheidend für die Verwendungsmöglichkeit des Materials. Dadurch kann es gelingen, Parameter, welche nicht per se durch die online- Analyse detektierbar sind, zu erfassen und im Hinblick auf die Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial verwendet werden.

4.3.2 Datenanalyse mittels Serviceplattform

Die zuvor beschriebene Datenkombination kann nur in einer eigens dafür entwickelten Datenbank erfolgen. Diese Serviceplattform muss nach den Anforderungen der Mitwirkenden aufgebaut werden, um vielversprechende Ergebnisse zu liefern. Es sind ‚Point of Interests (POIs)‘ festzulegen um die Daten gezielt zu steuern. Über einfache Schaltflächen wie sie in Abbildung 28 dargestellt sind können Informationen über die Baustelle online abgerufen werden.

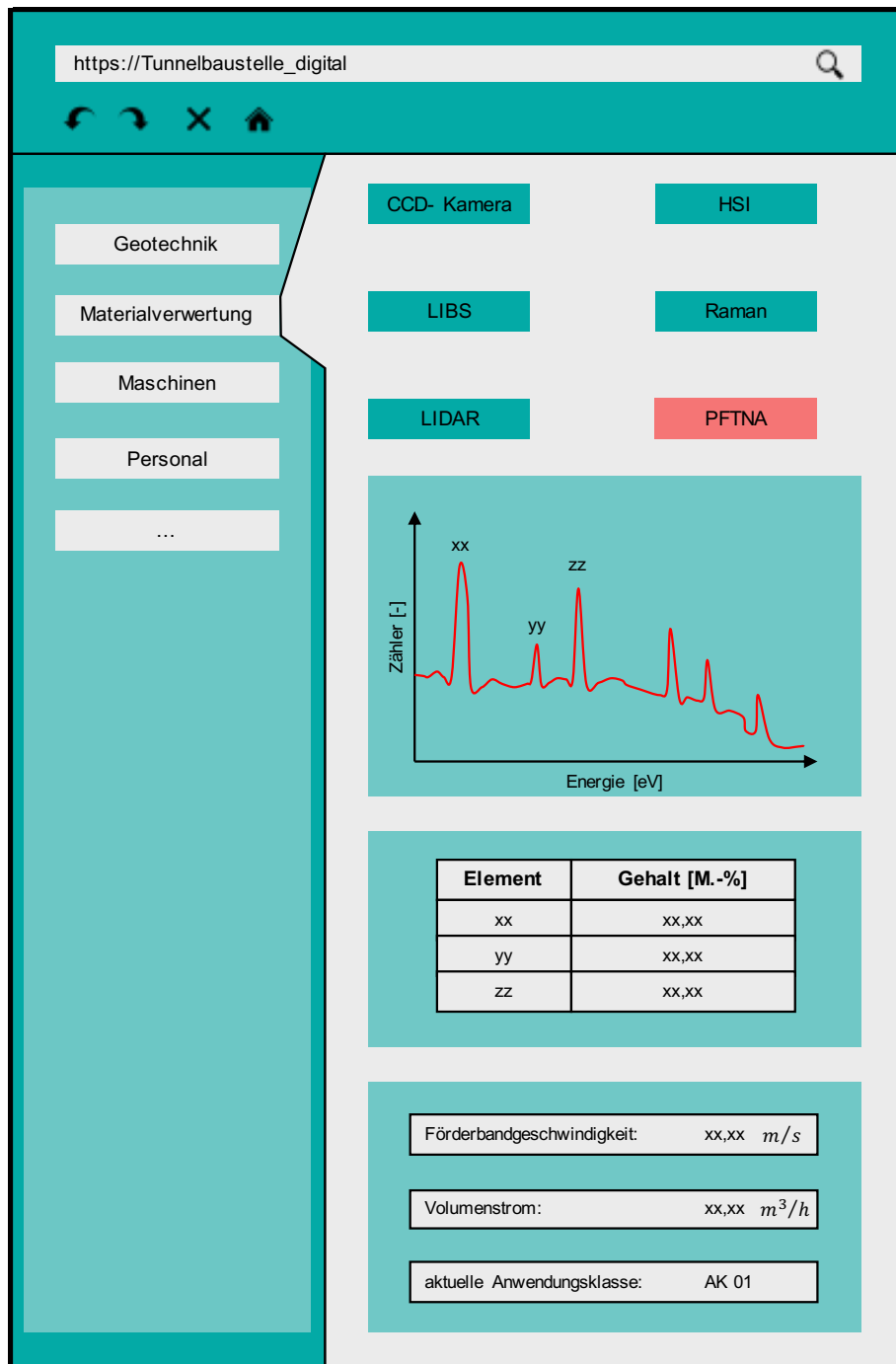


Abbildung 28: Möglicher Aufbau einer Serviceplattform

Eine derartige Plattform ermöglicht viele weitere Vorteile. Mit dem Einbinden von Lieferanten können Bestellprozesse automatisiert werden. Über die Daten der online- Analyse, wie zum Beispiel durch die Aktivierung des Förderbandes können Sperrbereiche, während des Schüttens, eingerichtet werden. Eine einheitliche Plattform, welche vom Arbeitnehmer, Arbeitgeber, und der örtlichen Bauaufsicht genutzt wird, ermöglicht zudem eine neue unkomplizierte Form der Kommunikation. Des Weiteren kann es zu einer Vereinfachung des Abrechnungsprozesses kommen, indem die eingesetzten Mengen bzw. die Menge des Ausbruchmaterials detektiert werden kann.

In diesem Bereich spielt weiters die Anwendung von KI eine große Rolle. Diese setzt sich aus unterschiedlichen Schnittstellen zusammen:

- Online- Analysesensoren
- Rechner im Kontrollzentrum der Anlage
- Datenbank in Form eines Servers
- Hauptrechner als Operator der KI

Diese Hauptbestandteile sind durch einen Datentransfer, welcher kabelgebunden oder online funktioniert, miteinander verbunden. Die Sensoreinheit erstellt durch die Analyse des Stoffstromes Daten, einer gewissen Größe, welche an einem Netzwerk gebunden Rechner transportiert werden. Dieser Rechner dient dazu, dass die detektierten Daten an eine Datenbank gesendet werden. Eine Datenbank besteht aus einem Speichermedium, welches im Falle einer nationalen Verwendung in einem zentralen Serverraum hinterlegt ist. Der Hauptrechner ist die Arbeitsplattform der KI und enthält alle angelernten Algorithmen. Als Ergebnis wird durch den ständigen Austausch der KI mit der Datenbank, nach Regeln der Algorithmen, die zutreffende AK ausgegeben. Der beschriebene Aufbau ist in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

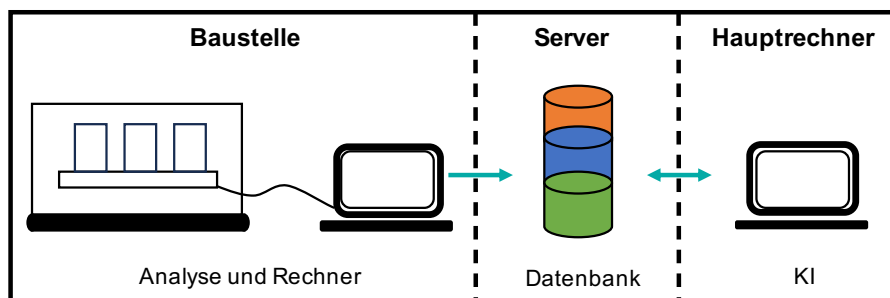


Abbildung 29: Aufbau des Datentransfers

Der Algorithmus, mit dem die KI arbeitet, muss zuvor trainiert werden. Dies geschieht über mathematische Funktionen. In Formel 9 ist das Training beschrieben. Dadurch ist eine optimale Vorhersage, die das Ziel der online- Analyse ist, gegeben. Es wird überprüft, ob die Vorhersage der KI mit der Wahrheit aus dem Sensor übereinstimmt. Dies ist der Fall, wenn die mathematische Differenz der beiden gleich Null ist [130].

$$\|u - \ddot{u}\|_2^2 \longrightarrow 0$$

Formel 9: Training der KI

u	<i>Vorhersage</i>	$[-]$
\ddot{u}	<i>Wahrheit</i>	$[-]$

Beim Trainieren der KI wird das für mehrere tausend Argumente durchgeführt. Dadurch lässt sich der oben beschriebene mathematische Zusammenhang, wie folgt, als Gleichung darstellen.

$$\vec{a} = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \|u - \ddot{u}\|_2^2$$

Formel 10: Mathematische Gleichung des Lernprozesses

u	Vorhersage	[-]
\ddot{u}	Wahrheit	[-]
a	Ergebnisvektor	[-]

Mit dem Befehl “argmin“ wird das Argument des Minimums einer Funktion gesucht. Bei optimaler Vorhersage ist das Argument gleich Null. Der Prozess der Ermittlung der Vorhersage kann mit Hilfe eines Blockschaubildes, welches in Abbildung 30 dargestellt ist, erklärt werden.

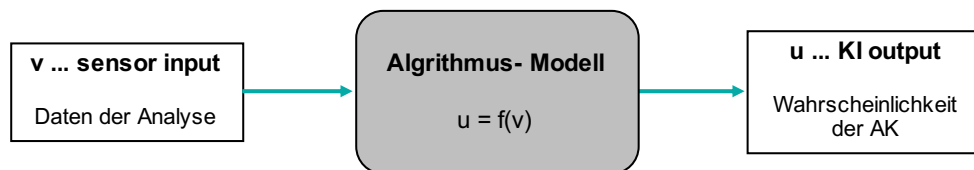


Abbildung 30: Finden der KI- Vorhersage

Nachdem das neuronale Netzwerk der KI mit ausreichend Daten gewichtet wurde, kann die KI den Stoffstrom selbstständig in den entsprechenden AK einteilen. Dieser Prozess wird in Kapitel 4.4 erläutert.

4.4 Kombination der Erkenntnisse am Beispiel einer realitätsnahen Baustelle

In diesem Unterkapitel werden die zuvor genannten Schnittstellen zusammengeführt. Dadurch wird die Anwendung der online- Analyse auf einer Tunnelbaustelle systematisch dargestellt. Infolgedessen werden die Prozessschritte zur Sensorauswahl verdeutlicht, die Struktur der Datenbank anhand von Beispielen erklärt und ein Klassifikationsmodell, mit welchem der Stoffstrom eingeteilt wird, vorgestellt.

Wie bei jedem Tunnelbauprojekt, startet zu Beginn die Planungsphase. Wichtig für die Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial ist die Trassenwahl, die Wahl des Vortriebsverfahrens und die geotechnische Erkundung. Die Erkenntnisse, welche in dieser Phase gewonnen werden, sind Teil der projektspezifischen Datenbank. In Abbildung 31 wird dargestellt, wie der Auftraggeber (AG) das neue Projekt in der Datenbank anlegt und die ermittelten Gebirgsarten (GA) in die Datenbank hochlädt.

Abbildung 31: Anlegen eines neuen Projektes in der Datenbank

Neben den geologischen Eigenschaften des Projektes, werden die in der Planungsphase, siehe Abbildung 36, ermittelten Abnehmer des Tunnelausbruchmaterials in die Datenbank eingespielt. Hierbei ist zu beachten, dass die jeweilige Branche (Betonwerke, Landwirtschaft, ...) sowie die abnehmbare Menge definiert wird.

Anhand der zuvor festgelegten Vortriebsmethode wird die Datenbank auf mögliche Sensortechnologien durchsucht. Dazu werden von der KI Standard- Materialien ausgewählt und Kenntnisse aus vergangenen Projekten verwendet, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu liefern. Dieser Schritt wird vor der Ausschreibungsphase des Projektes durchgeführt, um die online- Analyse in das Leistungsverzeichnis übernehmen zu können.

Nach der Ausschreibung des Projektes legt der Bestbieter bzw. Arbeitnehmer (AN), nach der vorgegebenen Vortriebsmethode, die Materialien fest. Die Eigenschaften der Standard- Materialien werden zuvor von den Herstellern in die Datenbank eingespielt. Spezial- Materialien können baustellenspezifisch vom AN in die Datenbank eingefügt werden. Als Beispiel dafür, ist in Abbildung 32 der Materialauswahlprozess, anhand von Sprengstoff, erklärt.

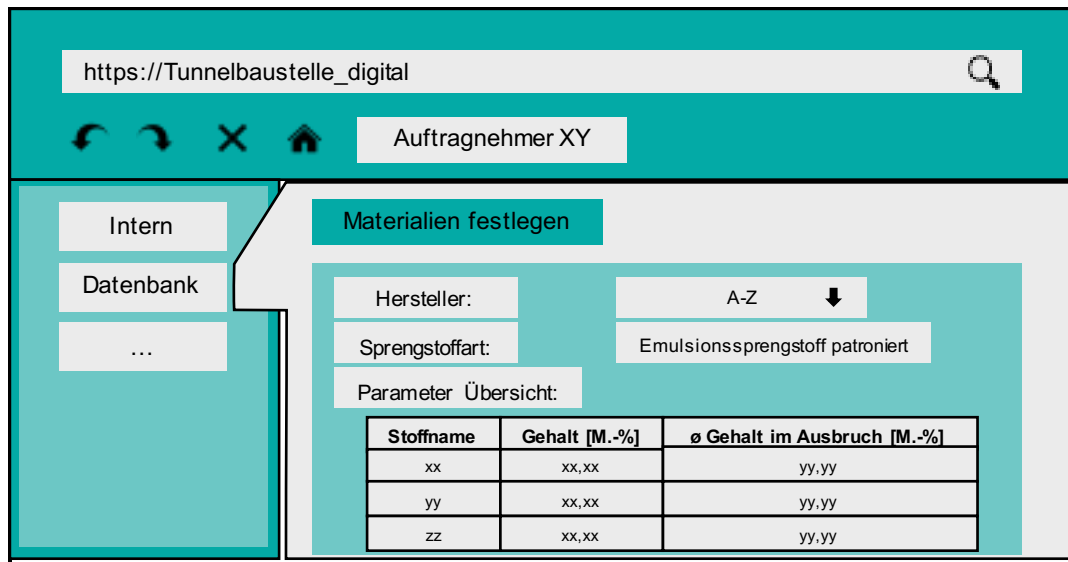


Abbildung 32: Auswählen von Materialien aus der Datenbank

Die Randbedingungen, für das realitätsnahe Tunnelbauprojekt, schließen an denen in Kapitel 4.2 genannten Grundeigenschaften an. Als Sprengstoff für den Sprengvortrieb wird standardmäßig patronierter Emulsionssprengstoff verwendet. Diese bestehen aus einem in Wasser gelösten Ammonsalpeter (NH_4NO_3) welcher mit Mineralöl emulgiert. Durch nicht detonierten Sprengstoff und bei der Detonation vorkommende Reaktionen gelangen Schadstoffe in das Tunnelausbruchmaterial. In Tabelle 28 sind die kritischen Schadstoffe aus dem Sprengvortrieb und ihre Herkunft dargestellt [131]. Auf Verunreinigungen des Tunnelausbruchmaterials durch den Einsatz von Maschinen und Materialien, wie zum Beispiel Spritzbeton, wird in diesem Beispiel nicht weiter eingegangen.

Schadstoff	chem. Formel	Herkunft
Ammonium	NH_4^+	Sprengversager
Nitrat	NO_3^-	Sprengversager
Nitrit	NO_2^-	Raktionsprodukt
Kohlenwasserstoffe	KW	Sprengversager

Tabelle 28: Schadstoffe infolge Sprengstoffe

Nachdem vom AN alle Materialien festgelegt wurden, kontrolliert die KI, ihre in der Planungsphase festgelegten Sensortechnologien, auf Plausibilität. Die KI prüft ihre Auswahl vorrangig auf die Detektion von Schadstoffen bedingt durch die Vortriebsmethode und die Detektion von Materialeigenschaften, welche in Tabelle 27 zusammengefasst sind. Durch ein flexibles Vertragsmodell werden Sensor-Änderungen ohne Mehrkostenforderungen durchgeführt.

Während der Vortriebsarbeiten werden die Daten des Stoffstroms direkt in die Datenbank übermittelt. Anhand eines Klassifikationsmodells wird das Tunnelausbruchmaterial in die zuvor definierten AK eingeteilt. Bevor das Klassifikationsmodell vorgestellt wird, ist in Abbildung 33 die Struktur der Datenbank dargestellt.

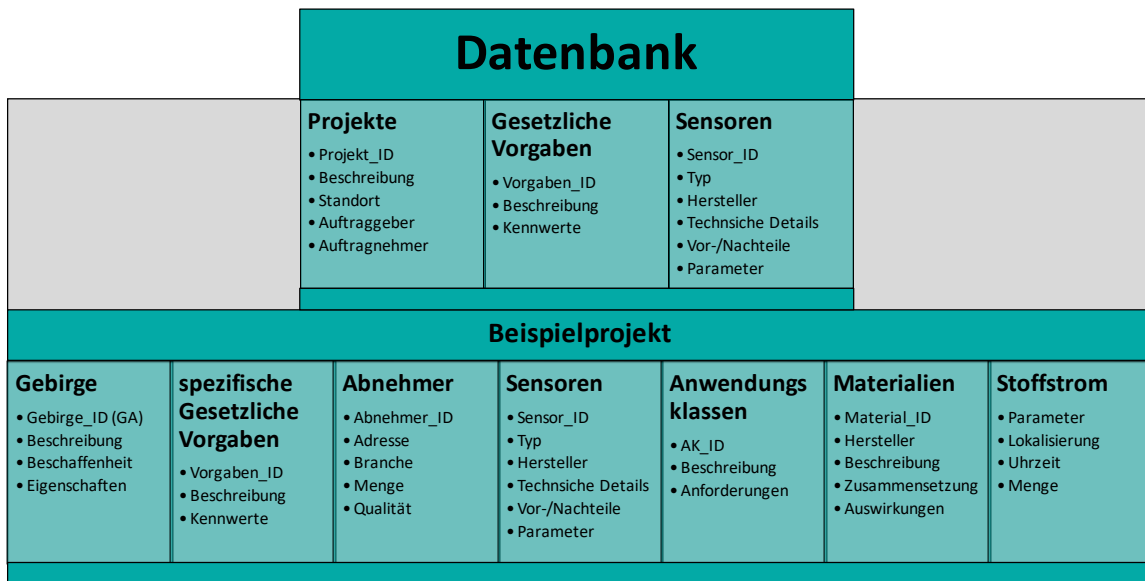


Abbildung 33: Struktur der Datenbank

Die Datenbank ist in Form von Tabellen mit charakteristischen Attributen aufgebaut. Zweck der Sammlung ist eine Strukturierung der unsortierten Daten, um daraus Informationen zu gewinnen. Die Tabellen werden über Schlüsselwerte definiert, um diese eindeutig zu identifizieren. Vor allem für die Anwendung des Klassifikationsmodell ist müssen die Informationen der Datenbank eindeutig zuordbar sein, da die Datenabfrage schnell und genau erfolgen muss.

Das Klassifikationsmodell ist derart aufgebaut, dass es auf Basis von Datenbeziehungen, die zutreffende AK auswählt. Dazu werden die Grenzwerte der AK, welche anhand von Laborversuchen in der Planungsphase definiert wurden, mit den Werten der online- Analyse verglichen. Die Klassifizierung ist in der nächsten Abbildung dargestellt.

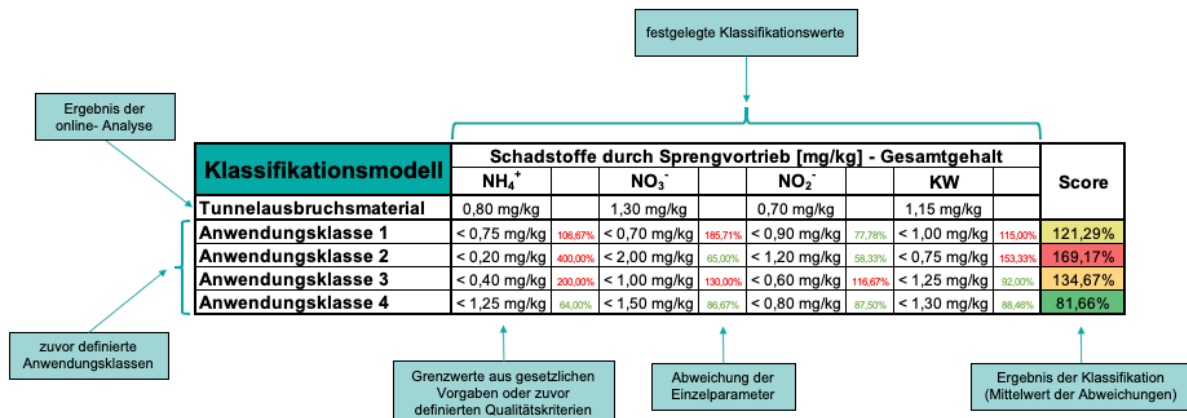


Abbildung 34: Klassifikationsmodell

Es ist anzumerken, dass zum jetzigen Stand der Erkenntnisse noch keine Grenzwerte angegeben werden können. Daher wurden in Abbildung 34 erfundene Werte in die Tabelle eingesetzt, sodass das Funktionsprinzip des Klassifikationsmodells veranschaulicht werden kann. Grund dafür ist, dass in Normen die Beurteilung des Ausbruchmaterials über Eluat- Versuche erfolgt. Daraus werden Ergebnisse in mg/kg Trockenmasse erzielt, welche mit der online- Analyse nicht ermittelbar sind. Infolgedessen gibt es noch keine Grenzwerte für mögliche Endprodukte, damit eine Klassifikation des Ausbruchmaterials durchgeführt werden kann.

Nachdem die zutreffende Anwendungsklasse durch das Klassifikationsmodell detektiert wurde, wird durch eine Matrix geprüft, ob die Wiederverwertung des Tunnelausbruchmaterials gegenüber der Deponierung sinnvoll ist. Die Beurteilungsmatrix ist ähnlich aufgebaut wie eine Risikomatrix. Die erste Ordnungszahl stellt den Grad der Wiederverwertung dar. Dabei wird unter anderem die maximal verwertbare Menge und der Aufwand der Wiederverwertung beurteilt. Die zweite Ordnungszahl beschreibt die Auswirkungen der Methode auf die Umwelt, den Rohstoffmarkt, die Abnehmer und auf den finanziellen Aufwand. Die Beurteilung erfolgt anhand von sieben Unterteilungen der Ordnungszahlen. Zur Bewertung werden beide Ordnungszahlen multipliziert. Ein Beispiel dafür ist in Tabelle 29 aufgelistet.

Beschreibung	Kategorie	Auswirkungen	Grad der Wiederverwertung	Bewertung		
Bodenaushubdeponie	Deponierung	katastrophal	7	sehr gering	7	49
Inertabfaldeponie	Deponierung	katastrophal	7	gering	6	42
Reststoffdeponie	Deponierung	kritisch	6	sehr gering	7	42
Massenabfaldeponie	Deponierung	kritisch	6	gering	6	36
RC- Baustoff	Verwertung	begrenzt	1	hoch	2	2
Beton	Verwertung	wenig	3	eher hoch	3	9
Low Carbon Zement	Verwertung	begrenzt	1	hoch	2	2
Geopolymere	Verwertung	begrenzt	1	hoch	2	2
Ziegelherstellung	Verwertung	wenig	3	mittel	4	12
Lehm- Putze	Verwertung	sehr wenig	2	mittel	4	8
Oberbodenmaterial	Verwertung	sehr wenig	2	sehr hoch	1	2
Tragschichten	Verwertung	sehr wenig	2	hoch	2	4
Gleisschotter	Verwertung	sehr wenig	2	hoch	2	4
Drainagekies	Verwertung	sehr wenig	2	hoch	2	4

Tabelle 29: Auflistung der Deponierungs- und Verwertungsmöglichkeiten

Die Ergebnisse werden, wie folgt, in einer Beurteilungsmatrix dargestellt.

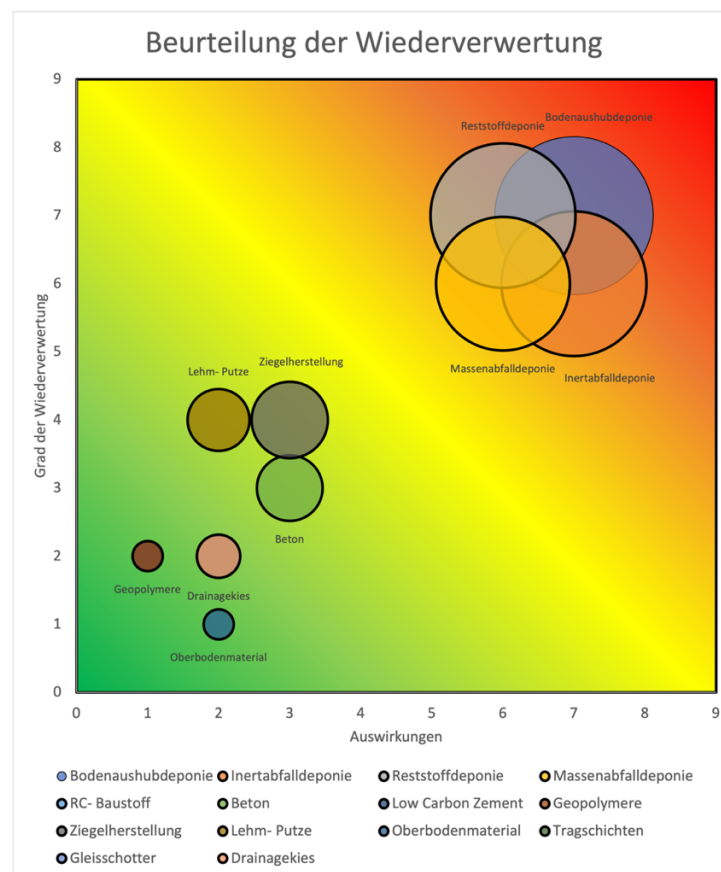


Abbildung 35: Beurteilung der Wiederverwertung

Die Ermittlung der Vor- und Nachteile sowie die Auswirkungen der jeweiligen AK sind projektspezifisch zu ermitteln. Grund dafür sind die zahlreichen unterschiedlichen Rahmenbedingungen, welche bei Tunnelbauprojekten vorkommen.

4.5 Erforderliche Maßnahmen zur Umsetzung einer online- Analyse im Tunnel

Die Umsetzung einer online- Analyseanlage auf einer Tunnelbaustelle ist keineswegs einfach und schnell durchführbar. Die Implementierung verändert nicht nur die Materialwirtschaft, sondern auch den Planungsprozess und den Bauprozess. Die größten Veränderungen sind in den folgenden Unterkapiteln aufgezeigt.

4.5.1 Optimierung der abfallrechtlichen Bestimmungen

Wie in der Einleitung erwähnt, sind nach AWG 2002, Bodenaushubmaterialien Abfall, weil sich der Besitzer deren entledigen will. Anhand dieser Formulierung ist eine Implementierung einer online-Analyse nicht umsetzbar. Das Urteil vom Europäischen Gerichtshof zeigt, dass es Widersprüche in der nationalen Formulierung gibt. Es ist ein erster Ansatz, dass die nationale Gesetzgebung adaptiert werden muss. Eine Ausnahmeregelung für Bodenaushubmaterialien, welche nach den geforderten Qualitätskriterien für gewisse Endprodukte zulässig sind, kann erfolgen und ist mit einem geringen Maß an Aufwand umsetzbar. Neben dem Urteil des Europäischen Gerichtshof wird auch im Masterplan Rohstoffe 2030 des BMLRT, hierzu ein Handeln gefordert und lautet:

„Es wird angeregt, unbelasteten, verwertbaren Bodenaushub aus dem Abfallregime herauszunehmen (z.B. Aushubkies).“ [75]

Des Weiteren müssen Überlegungen hinsichtlich der Prüfung nach der Eignung angestrebt werden. In vielen Normen entspricht die Anforderung gemäß der Korngrößenverteilung, der Sieblinie. Diese kann zwar mit Hilfe der online- Analyse ermittelt werden, entspricht aber nicht der ordnungsgemäßen Prüfung nach den Normen. Entweder werden sensorgestützte Korngrößenermittlungen zugelassen oder es muss, bei Übereinstimmung der Anforderungen an die chemische oder mineralogische Zusammensetzung, eine Klassierungs- Stufe nach dem Prozess der online- Analyse eingebaut werden.

4.5.2 Einfluss der online- Analyse auf das Projektmanagement

Bei einer Implementierung der online- Analyse in Tunnelprojekte gilt es hinsichtlich Projektmanagement einiges zu beachten. Die Verwertung von Tunnelausbruchmaterial muss in einer möglichst frühen Projektphase berücksichtigt werden. Zum Beispiel kann durch eine adäquate Trassenauswahl, der anfallende Stoffstrom beeinflusst werden. Zudem muss in der Genehmigungsphase eine mögliche Umweltverträglichkeitsprüfung der Aufbereitungsanlage berücksichtigt werden.

Neben diesen organisatorischen Randbedingungen müssen auch marktspezifische Randbedingungen berücksichtigt werden. Die Angebotslegung muss den Mehraufwand der online- Analyseanlage klar ersichtlich darstellen. Darunter fällt unter anderem:

- Herstellen der Anlagenhalle
- Anschaffen der Sensoren
- Betreiben und Bereithalten der Aufbereitungsanlage
- Betreiben und Bereithalten der Serviceplattform
- Mehraufwand bezüglich Energieverbrauch
- Räumen der Anlage
- Umsetzung Sicherheit- und Gesundheitsschutzplan
- Zeitgebundene Kosten der Aufbereitungsanlage

In nachfolgender Abbildung ist der Prozess zur Durchführung einer online- Analyse auf einer Tunnelbaustelle dargestellt. Zweck des Prozesses ist ein reibungsloses Projektmanagement zur Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial. Ersichtlich ist, dass eine gründlich durchgeführte

Erkundungsphase erforderlich ist, sodass im Vorfeld des Projektes mögliche AK definiert werden können. Durch eine, im Umfeld der Tunnelbaustelle durchgeführte Datenerhebung können die wiederverwertbaren Mengen abgeschätzt und die zuvor festgelegten AK fixiert werden. Während der Ausführungsphase des Projektes müssen die durch die online- Analyse detektierten Parameter mit jenen der Laborergebnisse aus der Erkundungsphase verglichen werden, damit eine richtige Zuteilung der Stoffströme in die jeweiligen Klassen ermöglicht wird.

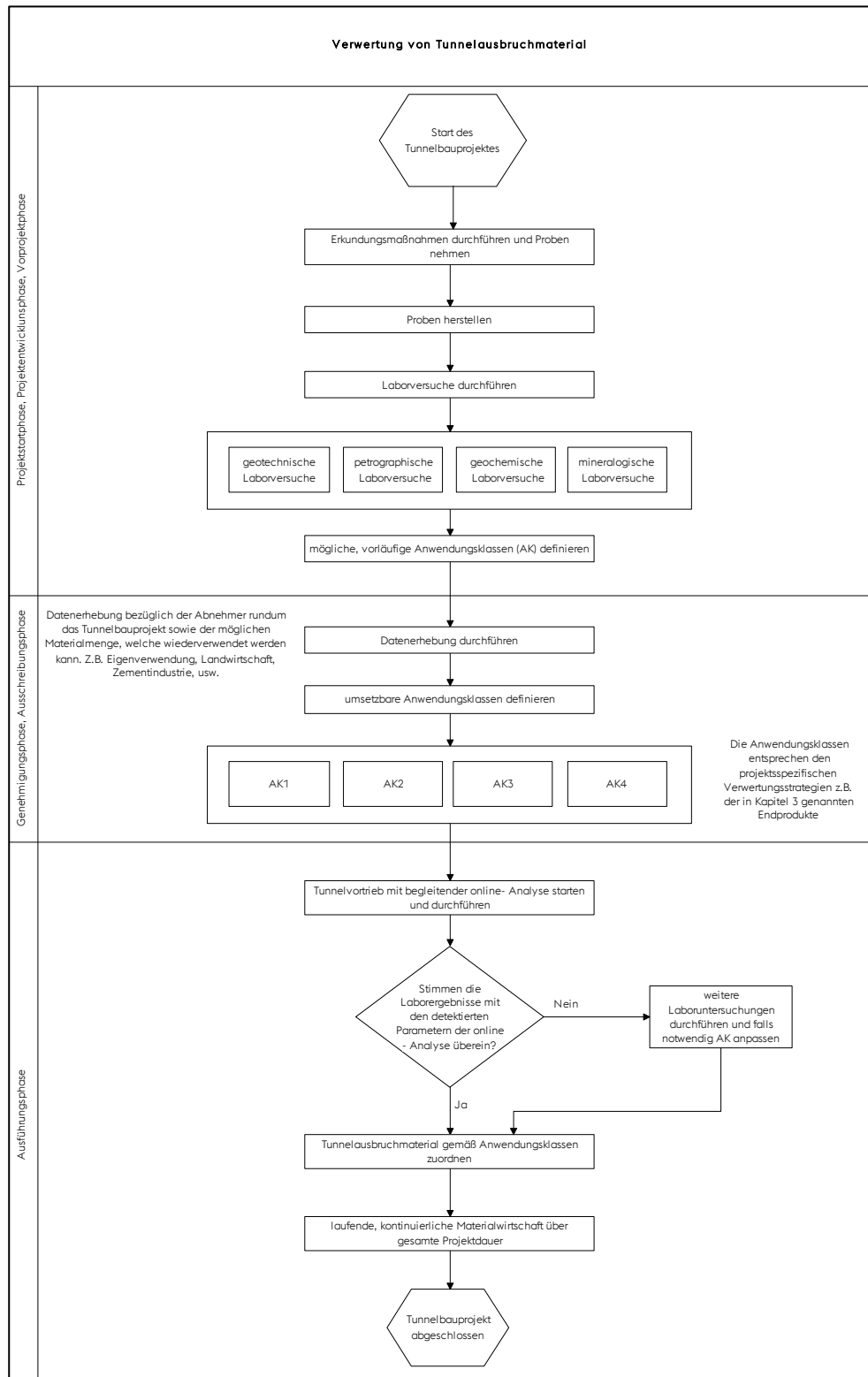


Abbildung 36: Prozess zur online- Analyse im Projektmanagement

4.5.3 Einfluss der online- Analyse auf den Bauprozess

Vor allem bei zyklischen Vortrieben, bei denen der Schutterprozess nach wie vor mit LKW oder Mulden erfolgt wirkt sich die Implementierung der online- Analyse stark aus. Überlegungen hinsichtlich einer online- Analysebrücke, welche das Tunnelausbruchmaterial an der Ladefläche von LKWs detektiert, sind sicherheitsrechtlich bedenklich. Bei der Anwendung von ionisierender Strahlung kann es zu erheblichen Einschränkungen solcher Anlagen kommen. Des Weiteren können die meisten der in Kapitel 2 genannten Merkmalanalysetechnologien nur eine relativ dünne Materialschicht detektieren. Dies führt dazu, dass ausschließlich die Oberfläche analysiert wird.

Die Umstellung des Schutterkonzeptes von LKW gebundener Förderung auf Förderband gebundener Förderung wird bei der Anwendung einer online- Analyse notwendig sein. Neben diesen systembedingten Randbedingungen bringt ein Schutterkonzept mit Förderband weitere Vorteile mit sich. Zum Beispiel werden dadurch die Emissionen der Dieselmotoren im Tunnel reduziert.

4.5.4 Parameter- Datenbank zur Sensorauswahl und Produktauswahl

Bereits im Jahr 2015 wurde eine Tunnelausbruchverwaltungsplattform, in Zuge des DRAGON- Projektes vorgestellt. Mit MineralBay, einem System, welches Projektbeteiligte verbindet und die Wiederverwertung von Bodenaushubmaterialien vereinfachen soll wurde ein großer Schritt in Richtung einer Parameter- Datenbank gemacht. Des Weiteren wird dadurch eine österreichweite Plattform erschaffen, in die alle bekannten Parameter zusammenfließen [132].

Durch die Verknüpfung einer national einheitlichen Parameter- Datenbank, wie MineralBay, und der Serviceplattform einer Baustelle, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, kommt es zur Digitalisierung der gesamten Branche. Das Potential zur Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial wird dadurch signifikant erhöht. Die Anforderungen an den Rohstoff können so direkt an der Baustelle abgerufen werden, wodurch ein maßgeschneiderter Endprodukt- Stoffstrom erzeugt werden kann. Des Weiteren können im Zuge einer frühen Projektphase Abnehmer in einem gewissen Umkreis der Baustelle gefunden werden.

4.5.5 Versuchsanlage zur Abschätzung der Machbarkeit

Auf Grund der noch nicht vollständig etablierten Anwendung aller in Kapitel 2 genannten Merkmalanalysemethoden im Rohstoffsektor, wird eine kontinuierliche Entwicklung einer Versuchsanlage empfohlen. Beginnend mit einer Einzelsensor- Detektion sollen die in Tabelle 27 hervorgehobenen Technologien verifiziert werden. In weiterer Folge muss die vorgeschlagene Sensorkombination im Zuge einer Versuchsanlage getestet werden. Zur vollständigen Etablierung der online- Analyse auf Tunnelbaustellen ist ein Prototypprojekt zu erstellen, um die online- Analyse von Tunnelausbruchmaterial auf einer echten Baustelle zu bewerten.

Im Zuge dessen müssen Grenzwerte für Endprodukte ermittelt werden, welche mit der online- Analyse bestimmt werden können. Dazu ist ein Abgleich mit den geforderten Eluat- Grenzwerten erforderlich. Die Eichung erfolgt über eine Bestimmung der Eluat- Werte einer Probe im Labor und anschließender Ermittlung der chemischen Zusammensetzung in einer online- Analyseversuchsanlage.

4.5.6 Datenmanager mit Materialkenntnis

Um die zuvor erwähnte Serviceplattform zu betreiben ist auf der Baustelle ein Materialmanagement erforderlich. Dieses beschäftigt sich mit der Ermittlung der AK und in weiterer Folge mit der Verteilung der Stoffströme. Die wichtigsten Eigenschaften dieses Managements sind Materialkenntnis, Bauprozesskenntnis und Fähigkeiten in der Logistik. Die Spezialisten in diesem Bereich verfügen über tunnelbauspezifische Kenntnisse, damit das Tunnelausbruchmaterial bereits vor und während dem Lösen, in Richtung der Anforderungen an die Endprodukte, beeinflusst wird. Des Weiteren setzt sich das Management mit der Logistik der Stoffströme auseinander und regelt die Anschaffung von Abnehmern sowie den Abtransport der in AK eingeteilten Rohstoffe. Neben diesen Aufgaben ist dieses Expertenteam zuständig für die Ermittlung der Parameter mittels der online- Analyse und Verwaltung dieser in der Serviceplattform. Dieser Ansatz bringt womöglich einen neuen Berufszweig auf eine Tunnelbaustelle.

4.5.7 Kosten- Nutzen- Analyse & CO₂- Bilanz

Die Umsetzung eines Pilotprojektes bringt weitere Notwendigkeiten mit. Nach einer erfolgreichen Versuchsanlage können die Kosten besser abgeschätzt werden. Infolgedessen sind diese mit den Kosten aus der reinen Deponierung von Tunnelausbruchmaterial gegenüberzustellen. Des Weiteren muss eine CO₂- Bilanz ermittelt werden, damit das Potential einer online- Analyseanlage auf einer Tunnelbaustelle abgeschätzt werden kann. Zudem können diese Ergebnisse in zukünftige Umweltverträglichkeitsanträge miteinfließen.

In weiterer Folge sind Kennwerte für die Umsetzung derartiger Projekte zu definieren. Es ist zu eruieren, ab welcher Vortriebslänge eine online- Analyseanlage sinnvoll ist. Des Weiteren sind charakteristische geologische Längenschnitte zu definieren. Bei Lockergesteinsvortrieben mit homogener Geologie ist womöglich keine online- Analyse erforderlich.

4.6 Vorteile durch die Implementierung der online- Analyse auf Tunnelbaustellen

Zum Abschluss der in diesem Kapitel behandelten Themen wird in diesem Unterkapitel auf die Vorteile der sensorgestützten Merkmalklassenanalyse in Bezug auf Tunnelausbruchmaterial eingegangen und erläutert.

Die Vorteile einer Implementierung der online- Analyse, anstatt der vollständigen Deponierung von Tunnelausbruchmaterial sind folgende:

- Substitution von sekundären Rohstoffen:
Dadurch kommt es zur Wahrung der Primärrohstoff- Lagerstätten bei steigendem Rohstoffverbrauch.
- Geringerer CO₂- Ausstoß:
Durch eine mögliche Eigenverwendung von Tunnelausbruchmaterial sowie eine gezielte Berücksichtigung der Transportlänge kann es zu einer signifikanten Verringerung der CO₂- Emissionen kommen.
- Verringerung der Kosten:
Durch eine mögliche gewinnbringende Vermarktung von potenziellen Rohstoffen sowie einer Verringerung des Materialverbrauchs durch Eigenverwertung kann es trotz der hohen Anschaffungskosten zu einer positiven Bilanz kommen.
- Detektion von unbeeinflusstem Material:
Auf Grund dessen, dass die online- Analyseanlage im Nahbereich des Tunnelportals platziert wird, werden die unbeeinflussten Parameter des Tunnelausbruchmaterials detektiert.
- Geringere gesellschaftliche Auswirkungen:
Durch einen hohen Anteil an Eigenverwertung wird die LKW- Anzahl verringert, wodurch es zu einem geringeren Verkehrsaufkommen und zu geringeren Lärmemissionen kommt.
- Geringere Auswirkungen auf das Landschaftsbild:
Durch die Reduktion der Deponierungsmenge wird der Platzbedarf an Deponieflächen reduziert. Dadurch wird das natürliche Landschaftsbild im Umkreis von Tunnelbaustellen in Zukunft bewahrt.
- Nationale Parameter- Datenbank:
Durch die Implementierung einer österreichweiten Bodenaushubmaterialplattform können in Zukunft Trassen nach der Rohstoffeffizienz ausgewählt werden. Zudem wird die Suche nach AK vereinfacht.

- Förderung der Digitalisierung:
Durch die Kombination von geotechnischen, geologischen und systembedingter Daten wird die Digitalisierung der Tunnelbaustelle während der Ausführungsphase vorangetrieben.
- Förderung der Forschung:
Das Zusammenwirken von Politik, Auftraggebern, Ingenieurbüros, Bauunternehmen und Universitäten bei der Implementierung der online- Analyse im Rohstoffsektor fördert die Forschung.
- Minimierung von Risiken auf der Baustelle:
Durch das erforderliche Schutterkonzept mittels Förderband wird der Einsatz von Großgeräten in Tunneln verringert, wodurch das Unfallpotential verringert wird.

Durch die genannten Vorteile wird ersichtlich, dass die Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial einen großen Teil zur Erfüllung der Klimaziele der Republik Österreich beiträgt. Die Implementierung einer Merkmalcharakterisierung mittels online- Analyse ist erforderlich, damit das Ausbruchmaterial direkt an der Baustelle in AK eingeteilt werden kann und in weiterer Folge zur Eigennutzung verwendet oder an potenzielle Abnehmer übergeben werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Wiederverwertung von Tunnelausbruchmaterial ist, ein seit mehreren Jahren diskutiertes, Thema, welches vorrangig durch die nationalen gesetzlichen Rahmenbedingungen limitiert ist. Durch Verfahren des Europäischen Gerichtshofes werden die Unstimmigkeiten der nationalen Interpretationen immer wieder aufgedeckt. Die klar definierte Abfallhierarchie stellt die Wiederverwertung von geogenen Materialien vor deren Deponierung. Infolgedessen wird das Interesse an einer wirtschaftlichen und ökologischen Substitution von sekundären Rohstoffen geweckt.

Durch die Planung von großen Infrastrukturprojekten entsteht ein mengenmäßig großer Stoffstrom an Aushubmaterialien. Dazu gilt die Baubranche als der größte CO₂- Treiber in Österreich. In der Tunnelbaubranche entstehen dadurch immer mehr Pilotprojekte, welche sich mit der Wiederverwertung von Aushubmaterialien auseinandersetzen. Das Hauptziel dieser Projekte ist die Findung von Endprodukten, welche aus Tunnelausbruchmaterial hergestellt werden können.

Es hat sich gezeigt, dass die Wiederverwertung primär von den Gesteinseigenschaften abhängt. Um diese vor Ort auf der Baustelle zu detektieren ist die Implementierung einer online- Analyseanlage vorgesehen. Dadurch können die Stoffstromparameter in- situ ermittelt und das Tunnelausbruchmaterial direkt auf der Baustelle in seine zukünftigen AK eingeteilt werden. Auf Grund der noch seltenen Anwendung von optischen Merkmalklassenanalysemethoden im Rohstoffsektor, wurde nach Technologien in anderen Industrien gesucht und beschrieben. Durch die Ermittlung der Vor- und Nachteile sowie der technischen Rahmenbedingungen wurden folgende Methoden für die Charakterisierung von Tunnelausbruchmaterial, als anwendbar eingestuft.

- Visuelle Spektroskopie
- Farbzeilenkamera
- Graustufen- bzw. Farbsensor
- Nahinfrarot- Spektroskopie bzw. Hyperspektrale Bildgebung
- Röntgenfluoreszenzanalyse
- Röntgentransmissionsanalyse
- Laserfluoreszenzanalyse
- Laser- induzierte Plasmaspektroskopie
- Laser- Raman Spektroskopie
- Laserscanning
- Mikrowellenspektroskopie
- Bandwaage
- Induktions- Sortiersystem
- PGNAA bzw. PFTNA

Bei den empfohlenen Methoden muss angemerkt werden, dass bei der Anwendung von ionisierender Strahlung besondere Vorkehrungen, bezüglich der Arbeitssicherheit, eingehalten werden müssen. Vor allem bei der XRF, XRT und PGNAA bzw. PFTNA werden Auflagen des Arbeitsinspektorats zu berücksichtigen sein. Damit die Analyseanlage wirtschaftlich und effizient geplant werden kann, wird ein frühzeitiger Genehmigungsantrag empfohlen.

Neben den online- Analysetechnologien wurde nach Möglichkeiten zur Verwendung von Tunnelausbruch gesucht. Der Fokus liegt dabei auf der Substitution von sekundären Rohstoffen, da die Qualitätsanforderungen, für die Verwendung von Tunnelausbruch, für Industrieminerale sehr hoch sind. Das Ziel der Wiederverwertung ist die Schonung von Primärrohstoff- Lagerstätten, indem Sekundärrohstoffe als Hauptrohstoff verwendet werden. Österreichs Geologie bietet eine Vielzahl an möglichen Endprodukten. Diese sind nachfolgend aufgelistet.

- Gesteinskörnung für Beton
- Thermisch aktivierte Tone als Zement
- Geopolymere als Zement
- Ziegel

- Lehm- Putze
- Oberbodenmaterial
- Tragschichtbildung
- Gleisschotter
- Bodenverbesserung
- Drainagekies
- Mineralwolle

In dieser Arbeit, wurden die Anforderung an den Rohstoff aus den Endprodukten abgeleitet, damit eine zielgerichtete Merkmalanalyse durchgeführt werden kann. Dabei wurde erkannt, dass nur gewisse Parameter detektierbar sind. Grund dafür ist, dass die genannten Technologien auf die Detektion von elektromagnetischer Strahlung basieren und auf Grund dessen nur bestimmte Parameter ermittelbar sind. Vor allem die elementare, chemische und mineralogische Zusammensetzung des Stoffstroms lassen sich mit der online- Analyse gut identifizieren. Zudem können geogene und anthropogene Verunreinigungen herausgefiltert werden. Dies ermöglicht eine schnelle Einteilung in AK. Festigkeitsparameter oder physikalische Eigenschaften können nicht direkt ermittelt werden. Eine Ableitung der Parameter aus speziellen Zusammensetzungen ist jedoch durchführbar.

Als Ergebnis der Produktermittlung und der Recherche über die Sensortechnologien entstand eine Prototypanlage für eine Tunnelbaustelle. Diese wurde theoretisch aufgebaut und beinhaltet die wichtigsten Rahmenbedingungen, welche für eine Implementierung im Projektprozess erforderlich sind. Sie besteht aus einer Sensorkombination, aus sechs ausgewählten Sensortypen, mit denen es möglich gemacht wird, die wichtigsten Parameter des Stoffstromes zu detektieren. Des Weiteren wurde die Anlage mit Ansätzen der Digitalisierung verknüpft, sodass es in Zukunft zu einer erfolgreichen Materialwirtschaft kommt. Zudem wird eine Serviceplattform vorgestellt, welche als zentrale Schnittstelle der Tunnelbaustelle arbeitet, um die zahlreichen Vorteile der Digitalisierung auszuschöpfen.

Die Implementierung einer online- Analyseanlage auf einer Tunnelbaustelle ist derzeit noch im Gedanken von Prototypprojekten und wird in der Praxis noch nicht ausgeführt. Mit dieser Arbeit wird ein Überblick für den Einstieg in die in- situ Charakterisierung von Tunnelausbruchmaterial gegeben. Zur vollständigen Umsetzung müssen aber noch wichtige Schritte berücksichtigt werden. Einerseits muss es zu einer Adaptierung der gesetzlichen Rahmenbedingungen kommen, damit Bodenaushubmaterial nicht als Abfall gesehen wird und andererseits muss die Umsetzung bzw. die Anwendbarkeit der unterschiedlichen Technologien in Kleinversuche erprobt werden. Zudem muss eine Kosten- Nutzen- Analyse durchgeführt werden, damit die Größe der Tunnelbauprojekte, bei denen eine online- Analyseanlage gerechtfertigt ist, identifiziert wird.

Nichtsdestotrotz bringt die schnelle Charakterisierung des Stoffstromes einige Vorteile mit sich. Diese wirken sich nicht nur auf das Tunnelprojekt, sondern auch auf die Umwelt aus. Es wird erwartet, dass die Kosten durch die Wiederverwertung reduziert werden, da ein hoher Anteil des Stoffstromes der Eigenverwendung dient. Zudem spielt die CO₂- Reduktion eine große Rolle und muss im Zuge einer Öko-Bilanz ermittelt werden. Durch den Einsatz eines Materialmanagers, welcher sich ausschließlich mit der Wiederverwertung des Tunnelausbruchmaterials beschäftigt, können Transportwege verkürzt und somit die Auswirkungen auf Gesellschaft und Umwelt reduziert werden. Die Erstellung einer nationalen Datenbank verknüpft alle Daten der Tunnelbauprojekte, wodurch in Zukunft die Findung von AK vereinfacht wird. Des Weiteren kommt es dadurch zur Einbindung von Lieferanten, wodurch Lieferketten optimiert werden können. Auf Grund dessen, dass die Entwicklung dieser Anlagen im Rohstoffsektor noch nicht vollständig etabliert ist, kommt es zu neuen Forschungsansätzen, in denen die österreichische Industrie wiederum Vorreiter werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Bischoff, J.-L. & Eberli, M.: Grand Paris Express Los 16 – Nachhaltiger Infrastrukturbau in Paris, Geomechanik und Tunnelbau 15, H. 6, S. 767-773 (2022). <https://doi.org/10.1002/geot.202200060>.
- [2] Resch, D.: Verwendung von Tunnelausbruchmaterial - Entscheidungsgrundlagen, Montanuniversität Leoben, Dissertation – Lehrstuhl Mineral Resources and Petroleum Engineering (2012).
- [3] Galler, R. & Voit, K.: Tunnelausbruch – wertvoller mineralischer Rohstoff, Beton- Kalender 2014, S. 423-468 (2013). <https://doi.org/10.1002/9783433603352.ch11>.
- [4] CERN: Mining the Future, in: CERN, 20.05.2023 [online] <http://miningthefuture.web.cern.ch/>.
- [5] Rechtsinformationssystem des Bundes: Abfallwirtschaftsgesetz §2, §3 Abs. 1 Z8, §5 (AWG) 2002, Fassung vom 20.05.2023 [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086>.
- [6] Amt der Tiroler Landesregierung: Anforderungen an die Verwertung von Aushubmaterialien gemäß Bundesabfallwirtschaftsplan 2017, 2. Auflage: Oktober 2018, 20.05.2022, S. 5 [online] https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/abfallwirtschaft/downloads/leitfaden_bodenaushubverwertung_arbeitskreis_03.10.2018n.pdf.
- [7] Rechtsinformationssystem des Bundes: Deponieverordnung §3 Abs. 9 (DVO) 2008, Fassung vom 20.05.2023 [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005653>.
- [8] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [9].
- [9] EUR-Lex: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, Fassung vom 05.07.2018, 20.05.2023 [online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>.
- [10] EUR-Lex: Urteil des Gerichtshofs (Erste Kammer), Vorlage zur Vorabentscheidung – Umwelt – Abfälle – Richtlinie 2008/98/EG – Art. 3 Nr. 1 – Art. 5 Abs. 1 – Art. 6 Abs. 1 – Aushubmaterial – Begriffe ‚Abfall‘ und ‚Nebenprodukt‘ – Ende der Abfalleigenschaft, Fassung vom 17. November 2022, 20.05.2023 [online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:62021CJ0238&qid=1673592221523&from=EN>.
- [11] Rechtsinformationssystem des Bundes: Altlastensanierungsgesetz §3 1989, Fassung vom 20.05.2023 [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010583>.
- [12] Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Bundes- Abfallwirtschaftsplan (B-AWP) 2023, 20.05.2023 [online] https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_ awp/bawp2023.html.
- [13] Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Kreislaufwirtschafts- Strategie 2022, 20.05.2023, S. 4ff [online] https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/strategie.html.
- [14] Bundesanstalt Statistik Österreich: Wie geht’s Österreich? 2021, Indikatoren und Analysen von 2000 bis zum COVID-19-Krisenjahr 2020, Statistik Austria, S. 121, 125, 139 (2021). ISBN: 978-3-903393-03-05.

- [15] Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Ressourcennutzung in Österreich 2020, Band 3 (2020), 20.05.2023, S. 124 [online] https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/nachhaltigkeit/ressourceneffizienz/publikationen/bericht2020.html.
- [16] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [17].
- [17] Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Infografiken zur österreichischen Kreislaufwirtschafts- Strategie 2022, 20.05.2023, S. 4 [online] https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/strategie.html.
- [18] Neubauer, C., Stoifl, B., Tesar, M. & Thaler, P.: Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich: Status 2019, Umweltbundesamt GmbH, 2. Korrigierte Auflage, S. 96-103 (Wien 2021).
- [19] Huber, R.: Weiterentwicklung optischer Sortiertechnik und Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten in der Aufbereitung primärer und sekundärer Rohstoffe, Montanuniversität Leoben, Dissertation – Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, S. 26ff. (2016).
- [20] Tipler, P.-A. & Mosca, G.: Physik – für Wissenschaftler und Ingenieure, Springer Spektrum, 7. deutsche Auflage, S. 988ff (Berlin 2015). DOI 10.1007/978-3-642-54166-7.
- [21] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [22].
- [22] MTA-R.de: Elektromagnetisches Spektrum, 20.05.2023 [online] <https://www.mta-r.de/blog/elektromagnetisches-spektrum/>.
- [23] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [20].
- [24] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [19].
- [25] Litfin, G.: Technische Optik in der Praxis, Springer, 3. Aktualisierte und erweiterte Auflage, S. 245ff (Berlin 2005). ISBN 978-3-540-21884-5.
- [26] Pretz, T. & Julius, J.: Stand der Technik und Entwicklung bei der berührungslosen Sortierung von Abfällen, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 07-08, S. 105-112 (2008).
- [27] Steinert: Kombinationssysteme, 20.05.2023 [online] <https://steinertglobal.com/de/magnete-sensorsortierer/sensorsortierung/kombinations-sortiersysteme/>.
- [28] Hering, E. & Martin, R.: Photonik – Grundlagen, Technologie und Anwendung, Springer, 1. Auflage, S. 175ff (Berlin 2006). ISBN-10 3-540-23438-1.
- [29] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [30].
- [30] Hering, E. & Schönfelder, G.: Sensoren in Wissenschaft und Technik, Vieweg+Teubner, 1. Auflage, S. 118ff (Wiesbaden 2012). ISBN 978-3-8348-0169-2.
- [31] Wotruba, H., Knapp, H., Neubert, K. & Schropp, C.: Anwendung der sensorgestützten Sortierung für die Aufbereitung mineralischer Rohstoffe, Chemie Ingenieur Technik 86, No. 6, S. 773-783 (2014). DOI: 10.1002/cite.201300174.
- [32] Binder+Co AG: Mineraliensortierung – Minexx mineral, 20.05.2023 [online] <https://www.binder-co.at/1060/MINEXX-mineral>.
- [33] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [32].

- [34] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [28].
- [35] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [19].
- [36] Bernstein, H.: Messelektronik und Sensoren – Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung, Springer, S. 311ff (Wiesbaden 2014). DOI 10.1007/978-3-658-00549-8.
- [37] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [38].
- [38] Al Ktash, M., Stefanakis, M., Boldrini, B., Ostertag, E. & Brecht, M.: Characterization of Pharmaceutical Tablets Using UV Hyperspectral Imaging as a Rapid In-Line Analysis Tool, *Sensors* 21, 4436, S. 5 (2021). <https://doi.org/10.3390/s21134436>.
- [39] Bauverlag BV GmbH: recovery – recycling technology worldwide, volume 6, S. 28 ff (2015). https://www.recovery-worldwide.com/download/1257620/recovery_6_2015.pdf.
- [40] Bauverlag BV GmbH: recovery – recycling technology worldwide 2023, 20.05.2023 [online] <https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/steinert-unisort-sorting-technology-for-black-plastics-3932622.html>.
- [41] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [42].
- [42] Bauverlag BV GmbH: AT Mineral Processing, 20.05.2023 [online] https://www.at-minerals.com/de/artikel/at_Variabel_einsetzbar-1549333.html.
- [43] Rechtsinformationssystem des Bundes: Strahlenschutzgesetz (StrSchG) 2020, Fassung vom 20.05.2023, [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011197>.
- [44] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [31].
- [45] Mineralienatlas: Fluoreszenz von Mineralien, 20.05.2023 [online] <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Fluoreszenz>.
- [46] Naumer, H. & Heller, W.: Untersuchungsmethoden in der Chemie, Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 3. Erweiterte und neubearbeitete Auflage, S. 267ff (Weinheim 1997). ISBN: 978-3-527-30863-7.
- [47] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [48].
- [48] Greateyes GmbH: Photolumineszenz (PL) Methode, 20.05.2023 [online] <https://www.greateyes.de/de/PhotoluminescenceApplications.html>.
- [49] Peiponen, K.-E., Kuwata-Gonokami, M. & Zeitler, J.-A.: Terahertz Spectroscopy and Imaging, Springer, Springer Series in Optical Sciences, Volume 171, S. 95 (Berlin 2013). DOI 10.1007/978-3-642-29564-5.
- [50] Rostami, A., Rasooli, H. & Baghban, H.: Terahertz Technology – Fundamentals and Applications, Springer, Lecture Notes in Electrical Engineering, Volume 77, S. 6ff. (Berlin 2011). DOI 10.1007/978-3-642-15793-6.
- [51] Miles, R.-E., Harrison, P. & Lippens, D.: Terahertz Sources and Systems, Springer, NATO Science Series II – Mathematics, Physics and Chemistry, Volume 27, S. 225 (Chateau de Bonas 2001). DOI 10.1007/978-94-010-0824-2.
- [52] Recendt GmbH: Terahertz Technologie, 20.05.2023 [online] <https://www.recendt.at/de/THz.html>.

[53] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [52].

[54] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [25].

[55] Demtröder, W.: Laserspektroskopie 2 – Experimentelle Techniken, Springer, 6. Neu bearbeitete und aktualisierte Auflage, S. 4ff (Berlin 2013). DOI 10.1007/978-3-642-21447-9.

[56] Fuge, R., Maldener, J., Löbe, K. & Lucht, H.: Laser-Online-Analyse (LOLA) zur Messung von Materialparametern in Stoffströmen, Chemie Ingenieur Technik 72, No. 9, S. 1125 (2000). [https://doi.org/10.1002/1522-2640\(200009\)72:9<1125::AID-CITE11250>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/1522-2640(200009)72:9<1125::AID-CITE11250>3.0.CO;2-T).

[57] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [55].

[58] Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS: Raman- Spektroskopie zur Materialuntersuchung (2016), 20.05.2023 [online] https://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/downloads/energy_bio_medical_technology/bio_nanotechnology/IKTS_460_W_Raman_Spektroskopie_zur_2016-02-02_x.pdf.

[59] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [58].

[60] Beyerer, J., Puente León, F. & Frese, C.: Automatische Sichtprüfung – Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, Springer, 2. Erweiterte und verbesserte Auflage, S. 315ff (Berlin 2016). DOI 10.1007/978-3-662-47786-1.

[61] Sick AG: Bulscan, 20.05.2023 [online] <https://www.sick.com/at/de/fluidsensorik/durchflusssensoren/bulscan/c/g253553>.

[62] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [61].

[63] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [60].

[64] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [65].

[65] Ratzinger, E.: Kontinuierliche Messung und Dosierung von Schüttgütern, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Vol. 156 (6), S. 209-214 (2011). DOI 10.1007/s00501-011-0653-4.

[66] Berthold Technologies GmbH & Co. KG: Online- Feuchtemessung, 20.05.2023 [online] <https://www.berthold.com/de/prozessmesstechnik/produkte/online-feuchtemessung/>.

[67] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [66].

[68] Kefersteine, C.- P., Marxer, M.: Fertigungsmesstechnik – Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren, Springer, 8. Vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 161ff (Wiesbaden 2015). DOI 10.1007/978-3-8348-2583-4.

[69] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [70].

[70] Uepping, R.: Sensorgestützte Sortiertechnik, Recycling und Rohstoffe 6, S. 375 (2013). ISBN 978-3-935317-97-9.

[71] Woidasky, J., Moesslein, J., Wendler, P., Kirchenbauer, D., Wacker, D., Gao, G. & Lang-Koetz, C.: Kunststoffidentifikation und -sortierung in der Circular Economy durch Fluoreszenzmarker, Chemie Ingenieur Technik 92, No. 4, S. 1-12 (2020). DOI: 10.1002/cite.201900126.

- [72] Molnár, G. L.: Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams, Kluwer Academic Publishers, 1. Auflage, S. 1ff (Dordrecht 2004). DOI 10.1007/978-0-387-23359-8.
- [73] Oliveira, C., Salgado, J. & Carvalho, F. G.: Prompt γ - Neutron Activation, Encyclopedia of Analytical Chemistry, John Wiley & Sons, Ltd., S. 16 (2006). DOI: 10.1002/9780470027318.a6212.
- [74] Vourvopoulos, G. & Womble, P. C.: Pulsed fast/thermal neutron analysis – a technique for explosives detection, Elsevier, Talanta 54, S. 459-468 (2001). DOI: 10.1016/s0039-9140(00)00544-0.
- [75] Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT): Masterplan Rohstoffe 2030, 20.05.2023 [online]
<https://www.bmf.gv.at/themen/bergbau/mineralrohstoffpolitik/oesterreich/masterplan-rohstoffe-2030.html>.
- [76] Geologische Bundesanstalt, Baurohstoffe in Österreich, 20.05.2023 [online]
<https://www.geologie.ac.at/forschung-entwicklung/kartierung-landesaufnahme/rohstoffe/baurohstoffe>.
- [77] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [76].
- [78] Witt, K. J.: Grundbau- Taschenbuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen, Ernst & Sohn, 7. Auflage (Berlin 2008). ISBN 978-3-433-01843-9.
- [79] Resch, D., Lassnig, K., Galler, R. & Ebner, F.: Tunnelausbruchmaterial – hochwertiger Rohstoff, Geomechanik und Tunnelbau 2, H. 5, S. 612-618 (2009). <https://doi.org/10.1002/geot.200900047>.
- [80] Wellacher, M., Pomberger, R., Vollprecht, D., Poschacher, F., Liebhard, P. & Jelecevic, A.: Verwertung von Aushubmaterialien, Recy & DepoTech 2018, S. 745-752 (Leoben 2018).
- [81] Kurth, P., Oexle, A. & Faulstich, M.: Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft, Kapitel 26 – Mineralische Bauabfälle, verfasst von: Klöckner, J. & Heuser, B., Springer, 1. Auflage, S. 486ff (Wiesbaden 2018). <https://doi.org/10.1007/978-3-658-17045-5>.
- [82] Steine und Minerale: Industrieminerale, 20.05.2023 [online] <https://www.steine-und-minerale.de/artikel.php?topic=5&ID=150>.
- [83] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [12].
- [84] Pröll, M.: Ziegel Lexikon Mauerwerk, Ziegel Zentrum Süd, Ausgabe 2020, 20.05.2023 [online]
https://ziegel.de/sites/default/files/2020-01/2020_ZiegelLexikon.pdf.
- [85] Martens, H. & Goldmann, D.: Recyclingtechnik – Fachbuch für die Lehre, Springer, 2. Auflage, S. 1ff (Berlin 2016). ISBN: 978-3-658-02786-5.
- [86] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [2].
- [87] ÖNORM EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton, Austrian Standards International (Wien 2015).
- [88] ÖNORM B 4710-1: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität – Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton, Austrian Standards International (Wien 2018).
- [89] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [87].
- [90] ÖNORM B 3131: Gesteinskörnungen für Beton – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620, Austrian Standards International (Wien 2016).

- [91] Aldrian, W., Bantle, A. & Juhart, J.: CO₂- Reduktion im Tunnelbau aus materialtechnologischer Sicht, *Geomechanik und Tunnelbau* 15, H. 6, S. 799-810 (2022).
<https://doi.org/10.1002/geot.202200036>.
- [92] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Kampen, R. & Richter, T.: Betonzusätze – Zusatzmittel und Zusatzstoffe, *Zement- Merkblatt Betontechnik B3* (2014). www.beton.org.
- [93] Aramburo-Varela, C. H., de Pinho, L. F., Nieto-Márquez, C. P. & Talero-Morales, R.: Activated Clays and Their Potential in the Cement Industry, *Clay and Clay Minerals*, S. 1-13 (2021).
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.99461>.
- [94] Zakka, W. P., Lim, N. H. A. S. & Khun, M. C.: A scientometric review of geopolymer concrete, *Journal of Cleaner Production* 280, 124353, S. 1-24 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124353>.
- [95] Nergis, D. D. B., Abdullah, M. M. A. B., Vizureanu, P. & Tahir, M. F. M.: Geopolymers and Their Uses: Reviw, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 374, 012019, S. 1-10 (2018).
doi:10.1088/1757-899X/374/1/012019.
- [96] Ren, B., Zhao, Y., Bai, H., Kang, S., Zhang, T. & Song, S.: Eco- friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review, *Chemosphere* 267, 128900, S. 1-21 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128900>.
- [97] Cong, P. & Cheng, Y.: Advances in geopolymer materials: A comprehensive review, *Journal of traffic and transportation engineering* 8 (3), S. 283-314 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>.
- [98] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [97].
- [99] Verband Österreichischer Ziegelwerke, 20.05.2023 [online]
<https://www.ziegel.at/information/produktion>.
- [100] Technische Universität Bergakademie Freiberg (TU-BAF): Thema: Ziegelton, Oberseminarvortrag, Institut für Geologie, S. 1-10 (1999).
- [101] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [100].
- [102] Peters, T.: Mineralogische Untersuchungen an einigen schweizerischen Ziegeleirohstoffen, *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, Band 49, Heft 2, S. 391-405 (Zürich 1969).
- [103] Salmang, H. & Scholze, H.: *Keramik*, Springer, 7. Auflage (2007). ISBN: 978-3-540-49469-0.
- [104] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [103].
- [105] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [106].
- [106] Lorenz, W. & Gwosdz, W.: *Handbuch zur geologisch-technischen Bewertung von mineralischen Baustoffen*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland - *Geologisches Jahrbuch, Sonderheft Reihe H, Heft SH 16*, S. 414. (Hannover 2003).
- [107] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [2].
- [108] Dachverband Lehm e.V.: Volhard, F. & Röhlen, U.: *Lehmbau Regeln*, Vieweg, 2. Korrigierte Auflage, S. 1-111 (2002). DOI 10.1007/978-3-322-9689.

- [109] ÖNORM B 2205: Erdarbeiten – Werksvertragsnorm, Austrian Standards International (Wien 2022).
- [110] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [12].
- [111] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [112].
- [112] Sheoran, V., Sheoran, A. S. & Poonia, P.: Soil Reclamation of Abandoned Mine Land by Revegetation: A Review, International Journal of Soil, Sediment and Water, Volume 3, Issue 2, Article 13, S. 1-20 (2010). <https://scholarworks.umass.edu/intljssw/vol3/iss2/13>.
- [113] Betonverband: Planung und Ausführung – 5.2 Tragschichten, 20.05.2023 [online] <https://www.betonstein.org/technik/flaechenbefestigungen-mit-pflasterdecken-aus-beton-ungebundene-ausfuehrung/5-planung-und-ausfuehrung/52-tragschichten/>.
- [114] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [115].
- [115] ÖNORM EN 13242: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau, Austrian Standards International (Wien 2014).
- [116] ÖNORM B 3132: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13242, Austrian Standards International (Wien 2016).
- [117] ÖNORM B 4811: Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau – Bewertung der Frostsicherheit, Austrian Standards International (Wien 2013).
- [118] ÖNORM EN 13450-1: Gesteinskörnungen für Gleisschotter – Teil 1: Produktstandard, Austrian Standards International (Wien 2021).
- [119] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [120].
- [120] Kuttelwascher, C. & Zuzic, M.: Oberbauschotter – Kompendium für Österreich, Plasser & Theurer, Eisenbahn Ingenieur Kalender 2013, S. 100-126 (2012).
- [121] Kolymbas, D.: Geotechnik – Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, Springer, 3. Neu bearbeitete Auflage, S. 357ff (Berlin 2011). DOI 10.1007/978-3-642-20482-1.
- [122] Agrarheute: Kalken: Nach der Ernte ist der richtige Zeitpunkt, 20.05.2023 [online] <https://www.agrarheute.com/pflanze/getreide/kalken-ernte-richtige-zeitpunkt-571268>.
- [123] Bonke- Baulogistik GmbH: Informationen Kies – Allgemein, 20.05.2023 [online] <https://bonke-baulogistik.de/kies.html>.
- [124] Eigene Darstellung in Anlehnung an: [125].
- [125] Leube: Produktdatenblatt - Rundkies 16/32 – Stand 06/2021, 20.05.2023 [online] https://www.leube.eu/fileadmin/user_upload/downloads/quarzsande/sand_kies_schotter_granit/produktdatenblatt_leube_rundkies_16-32_gewaschen.pdf.
- [126] Müller, A., Leydolph, B. & Stanelle, K.: Stoffliche Verwertung von Mineralwolleabfällen – Technologien für die Strukturumwandlung. Keramische Zeitschrift, S. 367-375 (2009). <https://www.researchgate.net/publication/269410773>.

-
- [127] Pfundstein, M., Rodolphi, A., Spitzner, M. H. & Gellert, R.: Dämmstoffe – Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Walter de Gruyter, DETAIL Praxis, S. 1-112 (2007). <https://doi.org/10.11129/detail.9783955530211>.
- [128] Galler, R.: Development of resource- efficient tunneling technologies – Results of the European research project DRAGON, Geomechanik und Tunnelbau 8, H. 4, S. 302-309 (2015). <https://doi.org/10.1002/geot.201500017>.
- [129] Golser, J., Keuschnig, M. & Weichenberger, F.: NÖT – Rückblick und Ausblick, Geomechanik und Tunnelbau 13, H. 5, S. 466-474 (2020). <https://doi.org/10.1002/geot.202000015>.
- [130] Murphy, P. K.: Machine Learning – A Probabilistic Perspective, MIT Press (2012) ISBN: 978-0-262-01802-9
- [131] Geo Patner AG: Umweltrelevante Erfahrungen beim Tunnelbau mit Sprengvortrieb – mit Massnahmen zur Optimierung einer umweltgerechten Entsorgung und Verwertung von Tunnelausbruchmaterial, Cercle Déchets Ost, Baudirektion des Kantons Zürich (2018).
- [132] Erben, H., Galler, R. & Grechenig, T.: MineralBay – das Portal für mineralische Rohstoffe und Projekte aus dem Untertagebau, Geomechanik und Tunnelbau 8, H. 4, S. 321-332 (2015). DOI: 10.1002/geot.201500009.

Anhang

Parameter, Grenzwerte und Kennwerte für die einzelnen Qualitätsklassen gemäß B-AWP

Die hier angeführten Tabellen stammen aus dem B-AWP 2023 des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.

Parameter [mg/kg TM]	Qualitätsklasse A1	Qualitätsklasse A2-G	Qualitätsklasse A2	Qualitätsklasse BA	
				Spalte I	Spalte II ¹
Arsen (als As) ²	20	30	30	50	200
Blei (als Pb) ²	100	100	150	150	500
Cadmium (als Cd) ²	0,5 ¹⁵	1,1	1,1	2	4
Chrom gesamt (als Cr) ²	90	90	90	300	500
Cobalt (als Co) ²	50	30	50	50	50
Kupfer (als Cu) ²	60	60	90	100	500
Nickel (als Ni) ²	60	55	60	100	500
Quecksilber (als Hg) ²	0,5	0,7	0,7	1	2
Zink (als Zn) ²	150	300	450	500	1.000
BTEX ^{3, 11}	0,5	1	1	1	
LHKW ^{3, 8, 9, 11}	0,3	0,3	0,3	0,3	
KW-Index	50/100/200 ^{4, 5}	20 ⁷	50/100/200 ⁴	50/100/200 ^{4, 5}	
PAK (16 Verbindungen)	2	2	4	4	
PAK (Benz[a]pyren)	0,2	0,2	0,4	0,4	
EOX ¹²	_ ¹²	_ ¹²	_ ¹²	_ ¹²	
PFAS ^{3, 10}	0,002	0,002	0,002	0,002 ¹⁴	
PCB ^{3, 13} (7 Verbindungen)	0,1	0,1	0,1	1	
TOC (als C)	_ ⁶	5000 ⁷	10000 ⁶	10000 ^{5, 6}	
Anmerkungen:					
1 Ist der Gehalt eines Schadstoffes geogen bedingt, gilt der höhere Grenzwert der Spalte II.					
2 Bei Verwertung zur landwirtschaftlichen Bodenrekultivierung (nur möglich für Material der Qualitätsklasse A1 oder BA) ist für jede Feldprobe zusätzlich der Gesamtgehalt von Arsen bis Zink in der Fraktion < 2 mm zu untersuchen und der jeweilige Grenzwert einzuhalten.					
3 nur bei Verdacht zu untersuchen.					
4 50 mg/kg TM gilt für Bodenaushub und -material mit TOC ≤ 5.000 mg/kg TM 100 mg/kg TM gilt für Bodenaushub und -material mit TOC > 5.000 mg/kg TM und ≤ 20.000 200 mg/kg TM gilt für Bodenaushub und -material mit TOC > 20.000 mg/kg.					
5 Im Einzelfall kann für humus- und torfhaltiges Bodenaushubmaterial durch die für die Verwertung örtlich zuständige Abfallbehörde ein höherer Grenzwert festgelegt werden.					
6 Für Material zur Bodenrekultivierung gelten die Kennwerte der Rekultivierungsrichtlinie, wobei sich diese auf den Einbauzustand beziehen.					
7 Im Einzelfall kann durch die, für die Verwertung örtlich zuständige, Abfallbehörde ein TOC Gesamtgehalt bis zu 10.000 mg/kg festgelegt werden. In diesem Fall beträgt der Grenzwert für den KW- Index 100 mg/kg TM.					
8 Die Beurteilung eines Aushubmaterials hinsichtlich LHKW hat auf Basis von Einzelproben zu erfolgen, es gelten die spezifischen Vorgaben zur Probenahme und analytischen Bestimmung des Kapitels 4.5.2. (des B-AWP) sowie der Deponieverordnung.					
9 Summe der leichtflüchtigen halogenierten C1- und C2-Kohlenwasserstoffe, einschließlich Trichlormethan; Tribrommethan; Bromdichlormethan; Dibromchlormethan; Tetrachlormethan; Dichlormethan; 1,1-Dichlorethen; 1,2-Dichlorethan; Tetrachlorethen; Trichlorethen; 1,1,1-Trichlorethan; cis-1,2-Dichlorethen; trans-1,2-Dichlorethen. Bei Verdacht auf Vorliegen weiterer LHKW sind diese zusätzlich in den Analyseumfang mitaufzunehmen.					
10 Summe der 20 Parameter gemäß Anhang III Teil B Punkt 3 der EU-Trinkwasserrichtlinie (EU-RL 2020/2184), Bestimmung gemäß DIN 38414-14:2011. Die Berücksichtigung der Einzelsubstanzen bei der Summenbildung über die 20 Parameter erfolgt erst ab einer Konzentration von 0,2 µg/kg TM (= 0,0002 mg/kg TM) („lower bound“ Ansatz). Alle Einzelsubstanzen über 0,2 µg/kg TM gehen in die Summe der 20 Parameter ein. Die Untersuchung von PFAS ist auch im nicht akkreditierten Bereich zulässig.					
11 Die Berücksichtigung der Einzelsubstanzen bei der Summenbildung erfolgt erst ab einer Konzentration über der Bestimmungsgrenze („lower bound“ Ansatz). Alle Einzelsubstanzen über der Bestimmungsgrenze gehen in die Summe ein.					
12 Der Wert ist zu bestimmen und im Analysenbericht anzugeben. Bei der Bewertung ist der Grenzwert der Bodenaushubdeponie gemäß Deponieverordnung heranzuziehen. Der EOX im Gesamtgehalt kann im gemeinsamen Extrakt mit PAK (16 Verbindungen) z. B. mittels n-Hexan/Aceton 1:1 bestimmt werden, weiters gilt die DIN 38414-S17:2017. Diese Untersuchung von EOX ist auch im nicht akkreditierten Bereich zulässig.					
13 Summe der polychlorierten Biphenyle PCB-28, PCB-52, PCB-101, PCB-118, PCB-138, PCB-153, PCB-180.					
14 Im Einzelfall kann durch die für die Verwertung örtlich zuständige Abfallbehörde ein höherer Grenzwert festgelegt werden.					
15 Bei einem pH-Wert ≥ 6 gilt ein Grenzwert von 1 mg/kg TM, dabei gilt als pH-Wert der Wert gemäß ÖNORM L 1083.					

Tabelle 30_Anhang 01: Erstanalyse Boden – Gesamtgehalte

Parameter [mg/kg TM]	Qualitätsklasse A1	Qualitätsklasse A2-G	Qualitätsklasse A2	Qualitätsklasse BA
pH-Wert	6,5 ¹ - 11,0	6,5 - 9,5 ²	6,5 ¹ - 11,0	6,5 ¹ - 11,0 ³
elektrische Leitfähigkeit [mS/m]	50	50	50	150 ³
Abdampfdruckstand	- ⁴	5.000	- ⁴	- ⁴
Aluminium (als Al)	- ⁴	- ⁴	- ⁴	- ⁴
Antimon (als Sb)	- ⁴	0,06	- ⁴	- ⁴
Arsen (als As)	0,3	0,1	0,3	0,5
Barium (als Ba)	10	5	10	10
Blei (als Pb)	0,3	0,1	0,3	0,5
Cadmium (als Cd)	0,03	0,03	0,03	0,05
Chrom gesamt (als Cr)	0,3	0,3	0,3	0,5
Cobalt (als Co)	1	0,1	1	1
Eisen (als Fe)	- ⁴	- ⁴	- ⁴	- ⁴
Kupfer (als Cu)	0,6	0,6	0,6	2
Molybdän (als Mo)	0,5	0,35	0,5	0,5
Nickel (als Ni)	0,4	0,2	0,4	0,4
Quecksilber (als Hg)	0,01	0,01	0,01	0,01
Selen (als Se)	0,1	0,1	0,1	0,1
Silber (als Ag)	0,2	0,2	0,2	0,2
Zink (als Zn)	4	4	4	4
Zinn (als Sn)	2	0,5	2	2
Ammonium (als N)	8	3,5 ⁵	8	8 ⁶
Cyanide - leicht freisetzbar (als CN)	0,2	0,1	0,2	0,2
Chlorid (als Cl)	800	800	800	800 ⁶
Fluorid (als F)	20	15	20	20
Nitrat (als N)	100	70	100	100
Nitrit (als N)	2	0,5 ⁵	2	2 ⁶
Phosphat (als P)	5	1 ⁵	5	5 ⁶
Sulfat (als SO ₄)	2.500	1.500	2.500	2.500 ⁶
AOX als (Cl)	0,3 ⁷	0,3 ⁷	0,3 ⁷	0,3 ⁷
KW-Index	5	1	5	5
PFAS ^{8,9}	0,001	0,001 ⁸	0,001	0,001 ⁶
Phenolindex	1,0	0,2	1,0	1,0
anionenaktive Tenside (als MBAS) ^{10,11}	1	1	1	1
TOC (als C)	4	100	100 ¹²	100 ¹²
Anmerkungen:				
1 Für aufgrund natürlicher Entwicklung versauerten Bodens gilt ein unterer pH-Grenzwert von 3,5.				
2 Für einen aufgrund natürlichen Kalkgehaltes (Karbonatgesteine) erhöhten pH-Wert gilt ein oberer pH-Grenzwert von 10,0.				
3 Werden die Schwermetall-Gesamtgehalte von Arsen bis Zink der Spalte I in Tabelle 114 eingehalten, so gilt ein oberer pH-Grenzwert von 12,0. In diesem Fall beträgt bei einem pH-Wert zwischen 11 und 12 der Grenzwert für die elektrische Leitfähigkeit 250 mS/m.				
4 Der Wert ist zu bestimmen und im Analysebericht anzugeben.				
5 Im Einzelfall kann durch die, für die Verwertung örtlich zuständige Abfallbehörde ein Ammonium-Grenzwert bis zu 8 mg/kg TM, ein Nitrit-Grenzwert bis zu 2 mg/kg TM und ein Phosphat-Grenzwert bis zu 5 mg/kg TM festgelegt werden.				
6 Im Einzelfall kann durch die für die Verwertung örtlich zuständige, Abfallbehörde ein höherer Grenzwert festgelegt werden.				
7 Der Grenzwert gilt als eingehalten, wenn der Parameter EOX nicht mehr als 0,3 mg/ kg TM beträgt.				
8 Nur bei Verdacht zu untersuchen; für eine Zuordnung zu A2-G ab dem 12.1.2026 (Gültigkeit des PFAS-Grenzwerts gemäß EU-Trinkwasserrichtlinie) verpflichtend zu untersuchen.				
9 Summe der 20 Parameter gemäß Anhang III Teil B Punkt 3 der EU-Trinkwasserrichtlinie (EU-RL 2020/2184), Bestimmung gemäß DIN 38407-42:2011. Die Berücksichtigung der Einzelsubstanzen bei der Summenbildung über die 20 Parameter im Eluat erfolgt erst ab einer Konzentration von 10 ng/l im L/S=10 l/kg TM (entsprechend ab 0,1 µg/kg TM = 0,0001 mg/kg TM) („lower bound“ Ansatz). Alle Einzelsubstanzen über 10 ng/l bzw. 0,1 µg/kg TM gehen in die Summe der 20 Parameter ein. Die Untersuchung von PFAS ist auch im nicht akkreditierten Bereich zulässig.				
10 Nur bei Verdacht zu untersuchen.				
11 Der Grenzwert gilt nicht für huminstoffreiche oder torfhaltige Böden.				
12 Grenzwert gilt nicht für Material zur Bodenrekultivierung.				

Tabelle 31_Anhang 02: Erstanalyse Boden – Gehalte im Eluat

Parameter [mg/kg TM]	Qualitätsklasse A2-G
Beryllium (als Be)	0,05
Bor (als B)	5
Mangan (als Mn)	0,5
Thallium (als Tl)	0,1
Vanadium (als V)	0,5
Chrom VI (als Cr) ¹	0,2
Cyanide gesamt (als CN)	0,1

Anmerkungen:

1 Auf die Bestimmung von Chrom VI (als Cr) im Eluat kann in einer Feldprobe verzichtet werden, wenn das Untersuchungsergebnis des Parameters Chrom gesamt (als Cr) im Eluat derselben Feldprobe bereits den Grenzwert für Chrom VI einhält.

Tabelle 32_Anhang 03: Ergänzungen für QK A2-G – Gehalte im Eluat