

Diplomarbeit

**Einsatzmöglichkeiten von Elektroofenschlacke in ungebundenen
Oberbauschichten des Straßenbaus am Beispiel
der Ausbaumaßnahme B 281 Neustadt Orla**

Vorgelegt am: 21.08.2017

Von: **Melissa Wolfram**
Berliner Straße 216
07546 Gera

Studiengang: Bauingenieurwesen
Studienrichtung: Straßen-, Ingenieur- & Tiefbau

Seminargruppe: TB 14

Matrikelnummer: 4001694

Praxispartner: STRABAG AG
Theaterstraße 58
07545 Gera

Gutachter: Dipl.-Ing. (FH) Peter Schiffer (STRABAG AG)
Prof. Dr. Peter Rott (Staatliche Studienakademie Glauchau)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Formelverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
2 Aktueller Stand der Technik	4
2.1 Grundlagen des Straßenbaus	4
2.1.1 Historische Entwicklung des Straßenbaus	4
2.1.2 Heutige Anforderungen an Straßen.....	5
2.1.3 Einflüsse auf den Straßenkörper	8
2.1.4 Standardisierter Straßenaufbau.....	9
2.1.5 Herkömmliche Straßenbaustoffe	14
2.2 Grundlagen zur Elektroofenschlacke	15
2.2.1 Historischer Abriss zum Stahlwerk Thüringen in Unterwellenborn	15
2.2.2 Entstehung und Weiterverarbeitung der Elektroofenschlacke	17
3 Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau	23
3.1 Gesetzliche Grundlagen.....	23
3.1.1 Gesetzliche Grundlagen der Europäischen Union.....	23
3.1.2 Gesetzliche Grundlagen der Bundesrepublik Deutschland	25
3.1.3 Gesetzliche Grundlagen des Freistaates Thüringen.....	27
3.2 Umweltschutzaspekte beim Einbau von Elektroofenschlacke.....	29
3.3 Technische Anforderungen an Elektroofenschlacke als Frostschutzmaterial .	33
4 Untersuchungen zum Einsatz der Elektroofenschlacke auf der B 281	36
4.1 Eckdaten zur Baumaßnahme.....	36
4.2 Vergleich: Elektroofenschlacke und natürliche Gesteinskörnung.....	37
4.3 Einbautechnologie auf der B 281	41
4.3.1 Lieferung und Einbaukriterien.....	41
4.3.2 Einbau und Verdichtung	42
4.3.3 Eigenüberwachung, Mängel und Recherchen zu alternativen Einbaumethoden	45

4.4 Wirtschaftlichkeit des Elektroofenschlackeeinsatzes	49
4.4.1 Einheitspreise der Frostschutzmaterialien	49
4.4.2 Transportkosten.....	51
4.4.3 Geräteinsatz und Zeitaspekt beim Einbau	52
4.4.4 Tatsächliche Einsparungen durch den Einbau von EOS	53
4.5 Weitere Referenzen der Elektroofenschlacke	55
5 Ergebnisse und Bewertung	57
5.1 Bedeutung für das Bauunternehmen	57
5.2 Bedeutung für den Straßenbau	58
5.3 Bedeutung für die Umwelt.....	59
6 Schlussbetrachtung	61
Literaturverzeichnis.....	63
Quellenverzeichnis	68
Anhangverzeichnis.....	70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Nutzung von Straßen	6
Abbildung 2 Frosteinwirkungszonen	9
Abbildung 3 Allgemeiner Aufbau eines Straßenkörpers	10
Abbildung 4 Luftaufnahme Stahlwerk Thüringen	16
Abbildung 5 Flüssige Schlacke im Clean-Pit	17
Abbildung 6 Radlader im glühenden Clean-Pit.....	18
Abbildung 7 Radlader mit frischer Schlacke aus dem Clean-Pit.....	19
Abbildung 8 Verladung der glühenden Schlacke auf den Muldenkipper.....	20
Abbildung 9 Schockkühlung der Schlacke.....	21
Abbildung 10 Weiterverarbeitung der Schlacke auf dem Gelände der RGA	22
Abbildung 11 Abfallhierarchie	24
Abbildung 12 Recycling Kreislauf der Schlacke.....	26
Abbildung 13 Sieblinienvergleich Grauwacke/Elektroofenschlacke	38
Abbildung 14 Grauwacke aus Döbritz	39
Abbildung 15 Elektroofenschlacke aus Unterwellenborn	40
Abbildung 16 Verteilung der Elektroofenschlacke auf dem Planum	43
Abbildung 17 Gummiradwalze auf der B 281	45
Abbildung 18 Ortsumfahrung Kamsdorf mit Stahlwerk Thüringen im Hintergrund....	55
Abbildung 19 Entwicklung der Rohstoffentnahme	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Umrechnung: Verformungsmodule in Verdichtungsgrade	12
Tabelle 2 Chemische Analytik der EOS des SWT nach LAGA M 20	31
Tabelle 3 Gegenüberstellung Messwerte EOS und Prüfwerte nach BBodSchV.....	32
Tabelle 4 Zeitmessung der Einbauvorgänge	53

Formelverzeichnis

Formel 1 Transportkostenberechnung Kilometerpreis Grauwacke Döbritz	51
Formel 2 Transportkostenberechnung Kilometerpreis Elektroofenschlacke	51
Formel 3 Massenberechnung der Elektroofenschlacke	54
Formel 4 Berechnung der Materialkosten für die Elektroofenschlacke	54
Formel 5 Massenberechnung für Grauwacke	54
Formel 6 Berechnung der Materialkosten für die Grauwacke	54

Abkürzungsverzeichnis

BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutzverordnung
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
D _{pr}	Verdichtungsgrad
E	Erdarbeiten
EN	Europäische Norm
EOS	Elektroofenschlacke
E _{V1}	Verformungsmodul nach Erstbelastung
E _{V2}	Verformungsmodul nach Zweitbelastung
FSS	Frostschuttschicht
G	Gestein
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KTS	Kiestragschicht
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
M	Merkblatt
M.-%	Masseprozent
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
RAA	Richtlinie für die Anlage von Autobahnen
RAL	Richtlinie für die Anlage von Landstraßen
RASt	Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen
RGA	Rohstoffgewinnung und Aufbereitung
RStO	Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
SoB	Schichten ohne Bindemittel
StB	Straßenbau
STS	Schottertragschicht
TL	Technische Lieferbedingungen
TMLNU	Thüringer Ministerium für Landwirtschaft Naturschutz und Umwelt
TMWAI	Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur
TPA	Gesellschaft zur Optimierung von Technischen Prozessen, Arbeitssicherheit und Qualität
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
ZTV	Zusätzliche technische Vertragsbedingungen

1 Einleitung

Sommer 2017: In den Medien wechseln sich Berichte über extreme Hitzewellen und starke Unwetter und den dazugehörigen Folgen wie Überschwemmungen und Erdbeben ab. Wo heute noch bei 36 °C Außentemperatur die Sonne scheint, kann es sich schon am nächsten Tag auf herbstliche Temperaturen abkühlen, auf die tagelange Regenfälle folgen. Das alles sind spürbare Folgen des viel diskutierten Klimawandels, dessen Existenz sich nicht mehr abstreiten lässt. In Zeiten, in denen Umwelt- und Naturschutz eine immer bedeutendere Rolle zukommt, sollte auch in der Bauindustrie, welche zweifelsohne einen hohen Verbrauch an natürlichen Ressourcen aufweist, zunehmend Wert auf den verantwortungsvollen Umgang dieser Ressourcen gelegt werden. Um dies zu realisieren, werden in vielen Fällen bereits ausgebaute Straßenbaumaterialien einem Recyclingprozess zugeführt, um später wieder eingesetzt werden zu können. Es kann jedoch nicht jedes Ausbaumaterial recycelt werden, zudem können längst nicht alle Bereiche mit der Verwendung von Recyclingmaterial abgedeckt werden. Deshalb wird in der Regel doch auf natürlich vorkommende Gesteine als Baumaterial zurückgegriffen und somit der Abbau dieser Gesteine in großen Steinbrüchen und Kiesgruben gefördert. Dieser Abbau natürlicher Materialien stellt in den meisten Fällen einen großen Einschnitt in die Natur dar und verändert das umliegende Gelände nachhaltig.

Aus diesem Grund ist es wichtig, natürliche Ressourcen zu schonen und deren Abbau so gering wie möglich zu halten. Die Elektroofenschlacke, die als Nebenprodukt bei der Stahlherstellung entsteht, bietet eine bautechnisch gute Alternative zu natürlichen Gesteinen. Sie wird schon seit vielen Jahren im Straßenbau verwendet, erfreut sich allerdings im Allgemeinen keiner großen Beliebtheit. Spricht man mit Gegnern der Elektroofenschlacke, stellt man schnell fest, dass die Bedenken zum Einsatz des Materials vor allem von dessen Herkunft herrühren. Häufig werden Sorgen bezüglich der Schwermetallbelastung und der Umweltschädlichkeit des gesteinsähnlichen Materials geäußert. Doch sind diese Bedenken tatsächlich begründet und birgt der Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau mehr Risiken als Nutzen? Oder handelt es sich hierbei doch um eine wertvolle Ergänzung natürlicher Gesteinskörnungen, um langfristig gesehen einen verantwortungsvollen Umgang mit natürlichen Rohstoffen zu pflegen? Um diese Fragen soll es in vorliegender Arbeit gehen. Ziel ist es, festzustellen, ob das Material tatsächlich eine potenzielle Gefahr für die Umwelt darstellt oder auf lange Sicht eine angemessene Alternative zu natürlichen Gesteinskörnungen darstellt. Zudem soll geklärt werden welche bautechnischen Vor- und Nachteile sich durch den Einsatz der Elektroofenschlacke ergeben und an Möglichkeiten gearbeitet werden,

potenzielle Nachteile zu minimieren. Abschließend soll ermittelt werden, welchen konkreten Mehrwert die Elektroofenschlacke einem Unternehmen bringt, welches dieses Material auf seinen Baumaßnahmen einsetzt und ob sich die Verwendung der Elektroofenschlacke auch wirtschaftlich betrachtet auszahlt. Da deutschlandweit je nach Bundesland unterschiedlich mit dem Thema industrieller Nebenprodukte im Straßenbau umgegangen wird, soll in vorliegender Arbeit lediglich der Umgang mit dem Material im Freistaat Thüringen betrachtet werden. Hierzu bietet es sich besonders an, dass das betreuende Praxisunternehmen während des Bearbeitungszeitraums der Diplomarbeit an einer komplexen Ausbaumaßnahme arbeitet, im Rahmen derer auch die Verwendung von Elektroofenschlacke als Material für Forstschutzschichten in bestimmten Baubereichen verwendet werden soll.

Um geeignete Antworten auf die aufgeworfenen Fragen zu finden ist die Arbeit mit verschiedenen Methoden angedacht. Zum einen ist die intensive Auseinandersetzung mit Fachliteratur unumgänglich, gleiches gilt für die Arbeit mit Gesetzestexten, Normen, Regelwerken und Vorschriften. Anhand dieser Materialien können dann Vergleiche zum praktischen Beispiel der Ausbaumaßnahme B 281, Neustadt Orla, gezogen werden. Zudem soll eine Analyse der vorhandenen Daten zur Elektroofenschlacke erfolgen. Hierzu gehört beispielsweise ein Abgleich der Laborprüfungen der vorhandenen Inhaltstoffe mit umweltschutzrelevanten Vorgaben von Behörden und Ministerien sowie die Auswertung von Plattendruckversuchen zur Feststellung der Verdichtung des Materials. Außerdem soll anhand der Ausbaumaßnahme B 281 beobachtet werden, wie sich die Elektroofenschlacke beim Einbau handhaben lässt und welche Schwierigkeiten möglicherweise auftreten können.

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich in vier Hauptkapitel. Zu Beginn sollen in Kapitel 2 der aktuelle Stand der Technik ermittelt werden. Beginnend mit einem historischen Abriss bis hin zum heutigen Baugeschehen sollen die Grundlagen des Straßenbaus behandelt werden. Gleiches gilt für die Elektroofenschlacke mit ihrer Herkunft und Entstehung. Anschließend sollen in Kapitel 3 die theoretischen und praktischen Voraussetzungen für eine Verwendung der Elektroofenschlacke im Straßenbau geklärt werden um schließlich in Kapitel 4 den konkreten Einbau auf der Ausbaumaßnahme B 281 in Neustadt Orla genauer zu betrachten und zu untersuchen. Zudem soll unter diesem Kapitel auch ein direkter Vergleich zwischen der verwendeten Elektroofenschlacke und der natürlichen Gesteinskörnung Grauwacke stattfinden. Hierbei spielen Faktoren wie technische Daten, Einbautechnologien und die Wirtschaftlichkeit beider Materialien eine Rolle.

Abschließend sollen die gewonnen Erkenntnisse in Kapitel 5 hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Bauunternehmen, den Straßenbau im Allgemeinen sowie für die Umwelt bewertet werden, um schlussendlich ein Fazit zu den gestellten Ausgangsfragen ziehen zu können.

2 Aktueller Stand der Technik

2.1 Grundlagen des Straßenbaus

2.1.1 Historische Entwicklung des Straßenbaus

Seit Anbeginn der Zeit hat sich der Mensch auf der Erde fortbewegt. Dementsprechend weit ist auch die Geschichte des Wege- und Straßenbaus zurück zu verfolgen. Beginnend mit dem ersten menschlichen Leben auf der Erde entwickelten sich Trampelpfade durch das Unterholz, welche von den Erdbewohnern genutzt wurden, um von einem zum anderen Ort zu gelangen, für die Jagd und das Sammeln von Lebensmitteln. Die Entstehung dieser Pfade folgte jedoch keinem konkreten Konzept und geschah eher zufällig. Dennoch lässt sich der bewusste Bau straßenähnlicher Verkehrswege zur Verbindung wichtiger Anlaufpunkte archäologisch bis in die Frühzeit zurückverfolgen. Diese ersten Entwicklungen resultierten damals besonders aus handelstechnischen und militärischen Ambitionen.

Im Zeitraum des Altertums ließen sich weltweit Fortschritte im Straßenbau verzeichnen. Im Gebiet des südlichen Mesopotamien fand sich in der Keilschrift der Sumerer bereits ein Zeichen für den Begriff „Straße“ und im gesamten Bereich Vorderasiens und des Orients entstanden außerhalb der Städte weitläufige Straßennetze, um militärische Verbindungswege für Streitwagen und Heere zu schaffen. Diese waren teilweise bereits zweispurig, um das gefahrlose Ausweichen bei Gegenverkehr gewährleisten zu können. Entlang der Strecken gab es vereinzelt sogar Raststätten. Innerhalb von Städten fand man Straßen größtenteils in Form von Kieswegen oder befestigter Erde, aber auch gemauerte Dämme hat man im Euphrattal finden können. Generell diente der Straßenbau in der damaligen Zeit aber auch immer dem Ausdruck königlichen Reichtums oder anderen kultischen Zwecken.¹

Auch in Europa, insbesondere in Griechenland, ging man anfangs aufgrund kultischer Absichten dem Straßenbau nach, später jedoch dienten auch hier die Straßen als militärische Verbindungswege von Heeren und Streitwagen. Allerdings war die Durchquerung des Landes im Streitwagen nicht überall problemlos möglich. In den Gebirgen Griechenlands bevorzugte man nach wie vor die Nutztiere wie Esel oder Maultiere oder bestritt den Weg zu Fuß. Zudem fielen viele griechische Straßen im letzten Jahrtausend v. Chr. dem Verfall zum Opfer, nur wenige blieben erhalten.

¹ Vgl.: NATZSCHKA, 2011, S. 1

Große Fortschritte in der Straßenplanung konnte man jedoch im Zeitalter des Hellenismus verzeichnen, als der griechische Städteplaner Hippodamos von Milet erstmals ein Straßennetz erschuf, in dem sich die Straßen orthogonal kreuzten und somit Städte in Bezirke gegliedert werden konnten. Auch heute noch findet man die Anwendung des hippodamischen Systems, vor allem in den US-amerikanischen Städten.

Die Römer waren unterdessen mit einem Straßennetz von 250.000 Kilometern Gesamtlänge zweifellos das Volk mit den bemerkenswertesten Leistungen im Straßenbau. Bis heute sind zahlreiche Römerstraßen erhalten und auch der Aufbau der damaligen Bauwerke ähnelte bereits stark dem des heutigen üblichen Straßenaufbaus. Zudem wurden die damaligen Straßen zentral verwaltet und unterhalten, was die Instandhaltung deutlich erleichterte.²

Das Mittelalter führte zu einer Stagnation in der Entwicklung des Straßenbaus. Viele vorhandene und auch neue Straßen gingen in das Eigentum des Kaisers über, welcher die Straßen an Fürsten verlieh und ihnen somit auch die Verwaltung und Instandsetzung der Straßen überließ.

Mit der Neuzeit erlebte auch der europäische Straßenbau wieder einen Aufschwung. 1712 veröffentlichte der französische Ingenieur Hubert Gautier das erste theoretische Lehrbuch über den Straßenbau und auch in den anderen europäischen Staaten entwickelte man im Laufe des 18. Jahrhunderts individuell angepasste Straßenbaumethoden beginnend beim Schichtaufbau der Straßen über den Einsatz von Bitumen als Bindemittel und der neu aufkommenden Belastung der Straßen durch den Autoverkehr im 19. Jahrhundert bis hin zum heutigen unverzichtbaren Verkehrsnetz.³

2.1.2 Heutige Anforderungen an Straßen

Auch in der heutigen Zeit dienen Straßen nach wie vor der direkten Verbindung zwischen den verschiedenen Lebensbereichen der Menschheit, zwar haben sich die Nutzungsgewohnheiten der Menschen über die Jahrtausende sehr stark verändert, doch das bedeutet keinesfalls einen Rückgang der Straßennutzung oder gar des Ausbaus der Straßenverkehrsnetze. Ganz im Gegenteil, mittlerweile bildet das weltweite Straßenverkehrsnetz eine der wichtigsten Grundsäulen der Infrastruktur unserer gegenwärtigen Gesellschaft.

² Vgl.: NATZSCHKA, 2011, S. 2

³ Vgl.: NATZSCHKA, 2011, S. 3

Mit der Veränderung der verschiedenen Lebensbereiche und der Nutzung der Straßen, beginnend bei der Jagd, über den Bau aus kultischen Hintergründen oder die Verbindung der Heere gigantischer Militärmächte bis hin zum heutigen Fuß-, Rad- und Kraftverkehr haben sich natürlich auch die Anforderungen an Straßen gewandelt und an Komplexität dazu gewonnen. Im Allgemeinen kann man heute in fünf verschiedene Lebensbereiche unterscheiden, die für die Zivilisation und somit für den Bau von Straßen von Bedeutung sind:

- Wohnen
- Arbeiten
- Bilden
- Versorgen
- Erholen

Aus diesen fünf Lebensbereichen resultieren somit drei Hauptverkehrsarten. Es kann in Berufsverkehr, Wirtschaftsverkehr und Erholungsverkehr unterteilt werden. Diese Faktoren müssen bei der Planung von Straßen zwangsläufig berücksichtigt werden, um diese so effizient und umweltschonend wie möglich in das bestehende Gelände einzugliedern.

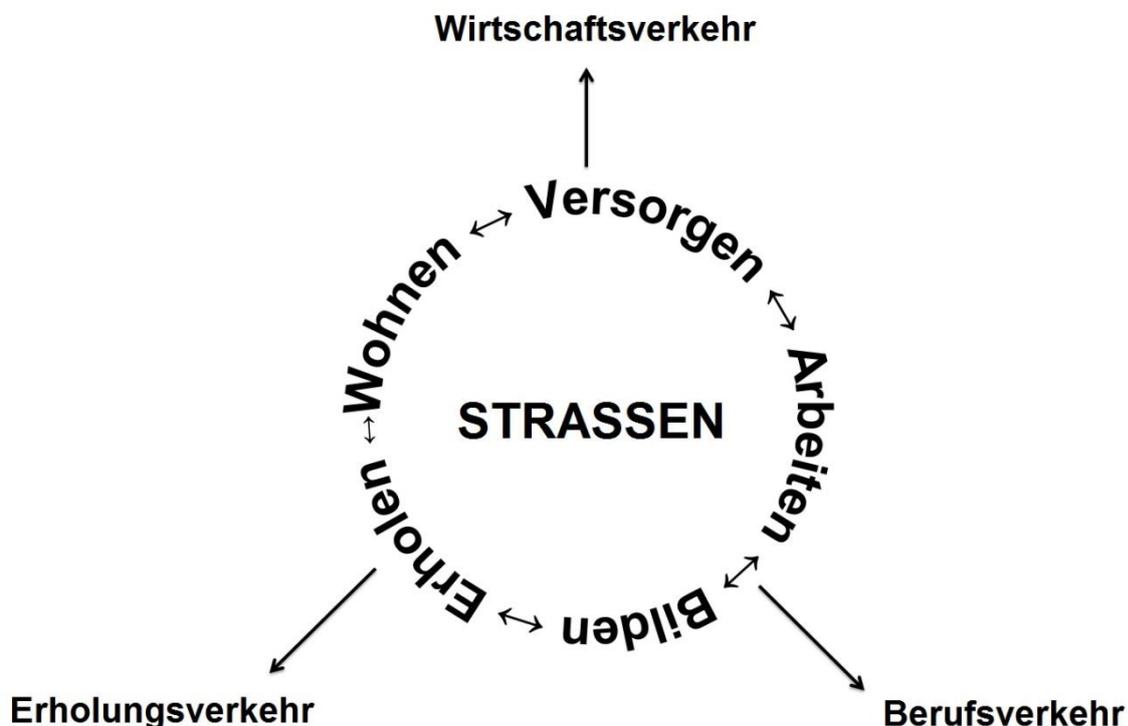


Abbildung 1 Nutzung von Straßen, eigene Darstellung (Vgl. auch: BLÄSI; RIENER; SCHLIEBNER; ZWANZIG, 2001, S. 14)

Entsprechend der Nutzungsabsichten, der umgebenden Bebauung und ihrer geographischen Lage können Straßen zudem in fünf verschiedene Kategoriengruppen aufgeteilt werden, welche sich weiterführend in jeweils zwei bis sechs weitere Kategorien aufspalten. Hieraus lassen sich anschließend die angestrebten Funktionen im Verkehrsnetz erkennen. Anhand der Kategorien und Kategoriengruppen können die verschiedenen Straßen den geltenden Straßenbaurichtlinien wie beispielsweise der Richtlinie für die Anlage von Stadtstraßen (RASt), der Richtlinie für die Anlage von Landstraßen (RAL) oder der Richtlinie für die Anlage von Autobahnen (RAA) zugeteilt werden. Diese Einteilung ist besonders von Bedeutung, um die unterschiedlichen Straßenarten und die dazugehörigen Verantwortlichkeiten den jeweiligen Trägerschaften zuordnen zu können. Autobahnen und Bundesstraßen beispielsweise liegen im Verantwortungsbereich der Bundesrepublik Deutschland, während Land-, Kreis- und Gemeindestraßen hingegen Länder-, Kreis- und Gemeindeangelegenheiten sind. Die jeweiligen Instanzen sind für die Beauftragung des Baus sowie die Instandhaltung der Straßen verantwortlich.⁴

Neben der Art der Nutzung werden allerdings noch zahlreiche weitere Anforderungen an moderne Straßen gestellt. An allererster Stelle steht natürlich die Gewährleistung der Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer. Dabei ist zu beachten, dass Straßen heutzutage nicht mehr nur ausschließlich durch Kraftfahrzeuge, sondern auch von Fußgängern, Radfahrern, Bussen und Straßenbahnen genutzt werden. Es muss also schon während der Planung neuer Straßen eine Mehrfachnutzung bedacht werden. Dementsprechend sind die notwendigen Straßenbereiche wie beispielsweise Fuß- und Radwege, Busspuren oder Bahngleise sowie Bus- und Bahnhaltstellen einzuplanen.

Ein weiterer bedeutender Aspekt ist, gerade in Zeiten des Klimawandels und der Erderwärmung, die Umweltverträglichkeit beim Neubau von Straßen. Sie sollen so geplant werden, dass die Belastung für die Umwelt sowohl beim Bau als auch während der späteren Nutzung so gering wie möglich gehalten wird. Hierfür gibt es zahlreiche Unternehmen und Behörden, welche noch während der Planungsphase neuer Straßen unzählige Studien und Nachweise zu den jeweiligen Objekten durchführen, die letztendlich in ökologischen Gutachten niedergeschrieben werden. Diese Gutachten dienen dazu, die Umsetzbarkeit des Vorhabens zu bewerten und aufzuzeigen, welche regulierenden Ausgleichsmaßnahmen anderenorts durchgeführt werden müssen, um die Umweltschäden zu begrenzen, die durch das entsprechende Projekt zu erwarten sind.

⁴ Vgl.: BLÄSI; RIENER; SCHLIEBNER; ZWANZIG, 2001, S. 15

Nicht zuletzt spielen auch die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel eine bedeutende Rolle. Je nach Träger des Bauvorhabens gestalten sich diese sehr unterschiedlich. Generell gilt aber, wie in vielen anderen Bereichen auch, dass sowohl Bau als auch Instandhaltung von Straßen möglichst kostengünstig sein sollen. Das heißt, dass eine Straße die ausreichende Dauerhaftigkeit aufweisen muss, um über die Nutzungsdauer hinweg, möglichst ohne größere Instandhaltungsmaßnahmen, die Baukosten wieder rentabel zu machen.

2.1.3 Einflüsse auf den Straßenkörper

Um eine ausreichende Dauerhaftigkeit erreichen zu können, müssen zu Beginn der Planung die zu erwartenden Einflussfaktoren und deren mögliche Schadenswirkung auf die Straße berücksichtigt werden. Anhand der voraussichtlichen Beanspruchungen wird sowohl die Dicke des erforderlichen Straßenoberbaus definiert als auch die Bauweise, sprich Material und Einbauweise, ausgewählt. So kann bereits während der Projektplanung eine Begrenzung zukünftiger Schäden erfolgen.

Den offensichtlich größten Einfluss auf eine Straße haben der Verkehr und die daraus resultierende mechanische Belastung. Täglich rollen pausenlos Kraftfahrzeuge über die Straßendecke und belasten diese durch die Reifen nicht nur mit Vertikalspannungen, die in die tiefer liegenden Straßenschichten abgetragen werden, sondern durch Brems- und Beschleunigungsvorgänge auch mit horizontalen Schubspannungen. Diese können besonders im Sommer bei hohen Außentemperaturen zu plastischen Verformungen der Asphaltdecke und somit zur Verringerung der Verkehrssicherheit führen.⁵ Deshalb ist es notwendig, zu Beginn der Planung mithilfe verschiedenster Randbedingungen wie beispielsweise Lastgröße und Lastangriff auf der Fahrbahn die maßgebende Verkehrsbelastungszahl zu ermitteln, aufgrund derer eine Einordnung in sieben verschiedene Bauklassen erfolgt. Hierbei ist Bauklasse SV für Schwerlastverkehr jene mit der höchsten Beanspruchung und führt hinab bis Bauklasse VI für befahrbare Wohnwege mit der geringsten Beanspruchung. Die Einordnung in die verschiedenen Bauklassen wird unter anderem nötig, um später einen geeigneten Straßenaufbau auszuwählen.⁶

⁵ Vgl.: VELSKÉ; MENTLEIN; EYMANN, 1998, S. 5

⁶ Vgl.: BLÄSI; RIENER; SCHLIEBNER; ZWANZIG, 2001, S. 17

Neben den vielen weiteren Einflüssen denen eine Straße ausgesetzt ist, beispielsweise Erdbewegungen und der vorhandenen Vegetation im Untergrund, spielen vor allem Witterungseinflüsse eine bedeutende Rolle. Beginnend bei der plastischen Verformung der Asphaltdeckschicht durch direkte Sonneneinstrahlung und die daraus resultierenden hohen Temperaturen im Sommer über Regenwasser, welches so abgeleitet werden muss, dass es im Straßenkörper keine Schäden verursacht, bis hin zu Frosteinflüssen. Frost hat einen maßgebenden Einfluss auf das Tragverhalten von Straßenbauwerken, weshalb es wichtig ist, den Straßenoberbau in jedem Fall frostsicher zu gestalten. Anderenfalls kann es zum Versagen des Tragverhaltens oder zu Straßenschäden kommen. Um dies zu verhindern, wurde Deutschland in unterschiedliche

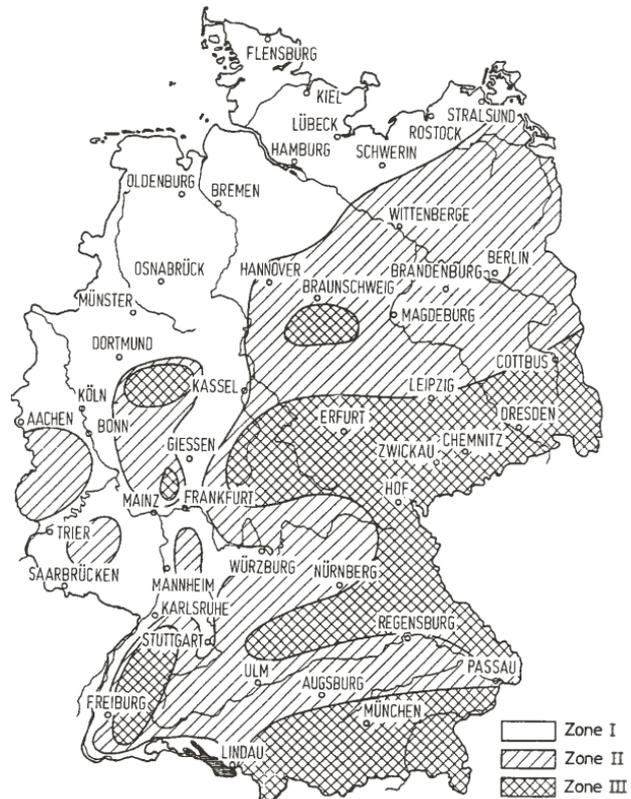


Abbildung 2 Frosteinwirkungszonen
(VELSKE; MENTLEIN; EYMANN, 1998, S. 43)

Frosteinwirkungszonen aufgeteilt. So kann man jeden deutschen Ort je, nach seiner geographischen Lage, in dazugehörige Frosteinwirkungszone einordnen. Außerdem können auch die anstehenden Böden in drei verschiedene Frostempfindlichkeitsklassen, F1 – nicht frostempfindlich, F2 – gering bis mittel frostempfindlich und F3 – sehr frostempfindlich, eingeordnet werden.⁷

2.1.4 Standardisierter Straßenaufbau

Der Aufbau einer Straße muss also entsprechend an die jeweiligen Nutzungsabsichten und Umweltbedingungen vor Ort angepasst werden. Da jedoch, wie an der Karte für die Frosteinwirkungszonen unschwer zu erkennen ist, deutschlandweit die unterschiedlichsten Bedingungen herrschen, gibt es die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO), in denen alle Faktoren, die zur Planung des Straßenaufbaus notwendig sind, zusammengetragen wurden. Mithilfe dieser Richtlinien und den dazugehörigen

⁷ Vgl.: BLÄSI; RIENER; SCHLIEBNER; ZWANZIG, 2001, S. 17

Randbedingungen lässt sich ein geeigneter, standardisierter Straßenaufbau ermitteln.

Betrachtet man den Querschnitt eines Straßenkörpers, so baut sich dieser in mehreren Schichten auf. Die Schichtung verschiedener Materialien dient dazu, eine gleichmäßige Steifigkeit der Straße auszubilden. So können die punktuell wirkenden Lasten auf der Straßenoberfläche in tiefere Lagen des Bauwerkes abgeleitet und dort auf größere Flächen verteilt werden, um schlussendlich die durch den Verkehr ausgelösten Spannungen so weit zu reduzieren, dass alle verwendeten Materialien, einschließlich des Bodens, die auftretenden Belastungen schadlos aufnehmen können. Grundsätzlich kann im Straßenbau in drei Hauptschichten unterschieden werden:

- Oberbau
- Unterbau
- Untergrund

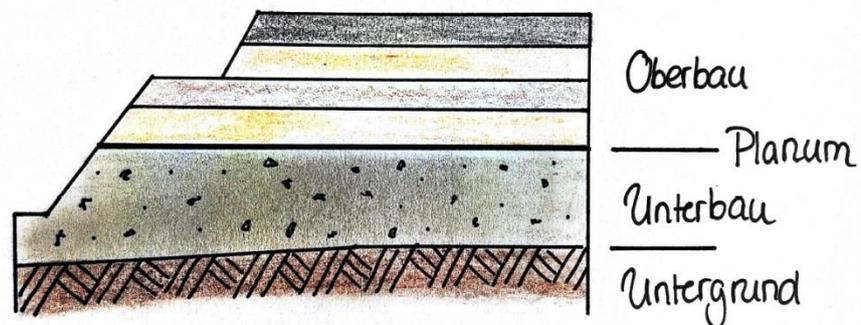


Abbildung 3 Allgemeiner Aufbau eines Straßenkörpers
(abgewandelte Darstellung in Anlehnung an BLÄSER; RIENER; SCHLIEBNER;
ZWANZIG, 2001, S. 15)

Untergrund

Der Untergrund ist der vor Ort anstehende Boden, auf dem das Straßenbauwerk gegründet wird. Nachdem die Mutterbodenschicht und eventuell weitere nicht tragfähige Schichten abgetragen wurden, bildet er somit das Fundament der Straße. Sofern es die umgebende Topographie zulässt und die Straße ohne weitere Dammschüttungen gebaut werden kann, dient der Untergrund als natürlicher Baugrund.⁸ Vor Beginn der Planung muss er jedoch ausreichend erkundet werden, um die vorliegende Bodenart und deren bodenmechanischen Eigenschaften bestimmen und geeignete Maßnahmen, wie eventuell notwendige Verfestigungen, einleiten zu können. Die Verantwortung der Baugrunduntersuchung liegt beim Auftraggeber. Er hat vor Planungs-, spätestens aber vor Baubeginn die nötigen baugrundtechnischen Untersuchungen durchzuführen und die Ergebnisse dem Auftragnehmer zur Verfügung zu stellen. Dieser kann bei Bedarf weitere Beprobungen realisieren. Zur Erkundung des anstehenden Baugrundes können Schürfe, Bohrungen und Sondierungen durchgeführt werden. Eine besondere Bedeutung kommt auch hier der Frostsicherheit des anstehenden Bodens zu. Diese

⁸ Vgl.: STRAUBE; KRASS, 2009, S. 16

ist nicht unwesentlich auch von der Art des anstehenden Untergrundes abhängig und wird später maßgebend für die Tragfähigkeit der Straße. Denn wenn Wasser in den Untergrund eindringt, kommt es im Falle von Frost zur Bildung von Eislinsen im Boden, deren Volumen circa 10 Vol.-% der ursprünglichen Wassermenge entspricht. Sobald die Frostperiode vorüber und das angesammelte Wasser abgeflossen ist, bleiben Hohlräume zurück, die bei Belastung zu plastischen Verformungen der Straßenoberfläche und somit zu Schlaglöchern führen können. Um das zu verhindern, sind in der RStO-12 Mindestdicken für die Gewährleistung eines frostsicheren Oberbaus festgelegt.

Unterbau und Planum

Oberhalb des Untergrundes wird, sofern notwendig, der Unterbau angelegt. Dies ist der Fall, wenn die erforderlichen Höhen allein durch die Herstellung eines Planums nicht realisiert werden können. Der Unterbau ist ein maschinell hergestellter Erdkörper, der meist in Form einer Dammschüttung vorliegt. Je nach Bodenart werden Dämme lagenweise aufgeschüttet und anschließend verdichtet, um die erforderlichen Verdichtungsgrade erreichen zu können. Hierfür sollten, wenn es die Eigenschaften zulassen, möglichst Erdmassen verwendet werden, die in Einschnittbereichen ohnehin anfallen, um so effizient wie möglich zu arbeiten. Der Verdichtungswille der verwendeten Böden hängt dabei von unterschiedlichen Faktoren wie Bodenart, Kornform & -rauigkeit, Korngrößenverteilung und dem Wassergehalt ab. Ziel der Verdichtung ist es laut Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und des Unterbaus im Straßenbau, das Porenvolumen, die Zusammendrückbarkeit und die Durchlässigkeit der Böden zu minimieren und infolge dessen die Tragfähigkeit und Scherfestigkeit zu erhöhen, um somit plastische Verformungen und Straßenschäden zu verhindern.⁹

Die Anforderungen an die Verdichtung von Untergrund und Unterbauschichten im Straßenbau ist in den zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 09) geregelt. Je nach Bodenart und Schichttiefe sind Verdichtungsgrade D_{pr} von 100 %, 98 % oder 97 % zu erreichen. Die Überprüfung dieser Werte erfolgt in der Praxis in der Regel mithilfe eines statischen Plattendruckversuches nach DIN 18134. Hierbei findet wiederholt eine Stufenweise Be- und Entlastung des zu überprüfenden Bodens mit einer kreisförmigen Lastplatte statt. Gemessen wird dabei die Einsenkung der Platte in den Probekörper. Anschließend wird am Computer eine Druck-Setzungs-Linie generiert aufgrund derer unter Zuhilfenahme eines numerischen Verfahrens die

⁹ Vgl.: Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und des Unterbaus im Straßenbau – 2003, Kapitel 3

Verformungsmodul E_{V1} (Verformung nach Erstbelastung) und E_{V2} (Verformung nach Wiederbelastung) errechnet werden können.¹⁰ Die ermittelten Verformungsmodul können laut des Merkblattes zum Plattendruckversuch nach DIN 18134 wie folgt mit dem Verdichtungsgrad D_{pr} in Verbindung gebracht werden.

Bodengruppe	D_{Pr} [%]	E_{V2} [MN/m ²]	E_{V2}/E_{V1} [-]
GW, GI	≥ 100	≥ 100	$\leq 2,3$
	≥ 98	≥ 80	$\leq 2,5$
	≥ 97	≥ 70	$\leq 2,6$
GE, SE, SW, SI	≥ 100	≥ 80	$\leq 2,3$
	≥ 98	≥ 70	$\leq 2,5$
	≥ 97	≥ 60	$\leq 2,6$

Tabelle 1 Umrechnung: Verformungsmodul in Verdichtungsgrade (Merkblatt Plattendruckversuch DIN 18134)

Um die kontinuierliche Einhaltung der geforderten Werte sicher zu stellen, wird in der ZTV E-StB 09 eine Eigenüberwachung der Erdarbeiten durch den Auftragnehmer gefordert. Hierzu sieht die Richtlinie eine Mindestanzahl an Eigenüberwachungsprüfungen vor. Neben zusätzlichen Prüfungen, die vom Auftraggeber im Leistungsverzeichnis ausgeschrieben werden können, muss der Auftragnehmer im Bereich von Untergrund, Unterbau und Planum je angefangenen 1000 m² eine Eigenüberwachungsprüfung durchführen, insgesamt jedoch mindestens zwei Prüfungen. Hierfür muss allerdings nicht immer ein statischer Plattendruckversuch durchgeführt werden. Die Eigenüberwachung kann auch mithilfe einer zuvor kalibrierten, dynamischen Lastplatte realisiert werden.

Besondere Anforderungen an Verdichtung und Tragfähigkeit, Ebenheit und profilgerechten Einbau werden an das sogenannte Planum gestellt. Dies ist die oberste Schicht des Untergrundes beziehungsweise des Unterbaus und stellt somit die Grenze zwischen dem reinen Erdbau und der zum Straßenbau gehörigen Oberbauschicht dar.¹¹ Da die folgenden Tragschichten der Fahrbahn auf das Planum geschichtet werden, hat dessen Qualität einen wesentlichen Einfluss auf die der fertigen Straße. Deshalb sind hier bereits die erforderlichen Querneigungen des endgültigen Straßenverlaufes zu berücksichtigen. Diese erfüllen in der Regel zwei Kernfunktionen: zum einen soll anfallendes Niederschlagswasser so besser von der Straßenoberfläche ablaufen können und somit Aquaplaning oder Eisbildung vermeiden, zum anderen sollen mit der Querneigung in Kurven die auf das Fahrzeug

¹⁰ Vgl.: Merkblatt Plattendruckversuch DIN 18134

¹¹ Vgl.: VELSKÉ; MENTLEIN; EYMANN, 1998, S. 1

wirkenden Zentrifugalkräfte abgemindert und ein Ausbrechen der Fahrzeuge verhindert werden.¹²

Oberbau

Der Oberbau bildet die oberste Schicht der Straße und wird direkt vom Verkehr befahren. Somit erfährt sie auch den größten mechanischen Verschleiß. Sie kann sich aus bis zu drei Tragschichten zusammensetzen und wird von einer Deckschicht abgeschlossen. Um während der Winterzeit in Frost- und Tauperioden plastische Verformungen der Straße auszuschließen, muss der Oberbau frostsicher ausgeführt werden. Hierzu sind, wie bereits zuvor erwähnt, in der RStO-12 standardisierte Bauweisen aufgeführt, die sich anhand verschiedener Faktoren ermitteln lassen. Zunächst wird anhand der Frostempfindlichkeitsklasse des anstehenden Bodens und der vorhandenen Belastungsklasse die Mindestdicke des Oberbaus ermittelt. Anschließend werden in Abhängigkeit der örtlichen Verhältnisse mithilfe folgender Parameter zusätzliche Mehr- oder Minderdicken ermittelt:

- Frosteinwirkungszone
- Kleinräumige Klimaunterschiede
- Wasserverhältnisse im Untergrund
- Lage der Gradienten
- Entwässerung der Fahrbahn/Ausführung der Randbereiche¹³

Die so entstandenen Werte werden zur zuvor ermittelten Mindestdicke addiert, so dass man am Ende einen Wert für die Dicke des frostsicheren Oberbaus erhält. Abschließend kann mit diesem Wert und der vorhandenen Belastungsklasse anhand einer Tabelle in der RStO-12 ein standardisierter Oberbauaufbau gewählt werden. Die Tabelle bietet Bauweisen für Fahrbahnen mit Asphalt-, Beton- und Pflasterdecke sowie für Rad- und Gehwege und vollgebundenen Oberbau.

Für vorliegende Arbeit sind allerdings ausschließlich Oberbaubauweisen für Tragschichten ohne Bindemittel von Interesse. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Tragwirkung auf der inneren Reibung der Korngemische basiert. Hierbei legen sich bei einer gut abgestuften Gesteinskörnung die feineren Bestandteile in die Hohlräume zwischen den größeren Körnern. So wird mithilfe geeigneter Verdichtungsmaßnahmen ein möglichst dichtes und hohlraumarmes Gefüge erzielt.¹⁴ Mögliche Bestandteile eines ungebundenen Oberbaus können sein:

¹² Vgl.: BLÄSI; RIENER; SCHLIEBNER; ZWANZIG, 2001, S. 26

¹³ Vgl.: Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen – RStO - 2012

¹⁴ Vgl.: LÖTHER, 2001, S. 78

- Frostschutzschichten (FSS)
- Kiestragschicht (KTS)
- Schottertragschicht (STS)

In den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (ZTV SoB-StB 04) sowie den Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB 04) werden explizite Anforderungen an den Einbau der verschiedenen ungebundenen Tragschichten gestellt. Oberhalb der ungebundenen Tragschichten folgen in der Regel Tragschicht und Deckschicht aus Asphalt, um die endgültige Straßenoberfläche zu schaffen.

2.1.5 Herkömmliche Straßenbaustoffe

An der Abgrenzung in Straßenunterbau und Straßenoberbau durch das Planum lässt sich auch eine Trennung der verwendeten Straßenbaumaterialien fest machen. In Unterbauschichten des Straßenbaus, wie beispielsweise Dämmen oder Einschnitten, wird als Baumaterial in der Regel der anstehende und zuvor auf seine Eignung beprobte Boden verwendet. Sollte der anstehende Boden aufgrund seiner Eigenschaften den erforderlichen Verdichtungsgrad und somit die notwendige Tragfähigkeit nicht erreichen, können durch die Zugabe von Bindemitteln oder Gesteinskörnungen Bodenverbesserungen durchgeführt werden. Diese haben zum Ziel die erforderlichen Voraussetzungen nach ZTVE doch noch erreichen zu können.

Während für die Unterbauschichten in der Regel die natürlich vorkommenden Böden verwendet werden, fächert sich das Spektrum der Materialien, die für Oberbauschichten in Frage kommen, deutlich weiter auf. Neben den natürlichen Gesteinskörnungen finden hier mitunter auch Recyclingbaustoffe oder industrielle Nebenprodukte eine Verwendung. Letztere sind für vorliegende Arbeit besonders von Bedeutung, es finden sich jedoch Anforderungen an alle drei Kategorien in den Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04). Diese Anforderungen gelten für alle Lieferungen von Gesteinskörnungen die zur Herstellung von Oberbauschichten im Straßen- und Wegebau sowie für andere Verkehrsflächen. Zu den Grundanforderungen der TL Gestein-StB 04 gehören beispielsweise die Verwitterungsbeständigkeit der Materialien, die wichtig ist, um ein Quellen, Zerfallen, eine Lösung oder chemische Umsetzung vermeiden zu können. Ebenso ist geregelt, dass die Gesteinskörnungen keine schädlichen Mengen an

organischen Stoffen wie Holz und Pflanzenresten sowie Fremdstoffe enthalten dürfen, die die Qualität der Baustoffe deutlich herabsetzen würden.¹⁵

In der Praxis werden in der Regel vor Baubeginn Steinbrüche ausfindig gemacht, die sich in der Nähe der Baustelle befinden, um mit diesen Lieferverträge für die benötigten Materialien zu schließen. Somit finden bei einem Großteil der Baumaßnahmen natürliche Gesteinskörnungen ihre Verwendung. Dies sind mineralische Gesteine, die aufgrund geologischer Prozesse in der Natur vorzufinden sind und für einen Einsatz als Baustoff lediglich mechanisch aufbereitet, sprich gebrochen und gesiebt werden müssen. Nur selten kommt es tatsächlich zu einem Einsatz von Recycling-Materialien oder industriellen Nebenprodukten. In vielen Ausschreibungen werden Recycling-Materialien und industrielle Nebenprodukte von vornherein durch die Formulierung der Positionstexte im Leistungsverzeichnis ausgeschlossen indem beispielsweise „Baustoffgemische ohne RC-Baustoffe und industriell hergestellte Gesteinskörnungen“¹⁶ oder „gebrochene natürliche Gesteinskörnungen“¹⁷ gefordert werden. Dies hängt womöglich mit der geringen Popularität dieser Materialien und dem somit fehlenden Wissen über den Einsatz zusammen. Doch ist die Verwendung von industriellen Nebenprodukten wie Elektroofenschlacke im Straßenbau tatsächlich nachteilig behaftet oder bietet sie möglicherweise sogar große Chancen und Einsparpotenzial sowohl für den Auftragnehmer als auch letztendlich den Auftraggeber?

2.2 Grundlagen zur Elektroofenschlacke

2.2.1 Historischer Abriss zum Stahlwerk Thüringen in Unterwellenborn

Die 6000 Seelen Gemeinde Unterwellenborn erfreut sich nicht nur innerhalb des im Süd-Osten Thüringens befindlichen Landkreises Saalfeld-Rudolstadt großer Bekanntheit, auch überregional ist sie in Fachkreisen Vielen ein Begriff. Das liegt daran, dass sie den Standort des einzigen und somit auch größten thüringischen Stahlwerks darstellt. Dies hat über die Jahre dazu geführt, dass nicht nur die Gemeinde finanziell und in Form einer ausgeprägten Infrastruktur vom Stahlwerk profitiert, sondern dass sich auch in Städten und Gemeinden im Umkreis nach wie vor verschiedenste Unternehmen ansiedeln, welche eng mit dem Stahlwerk

¹⁵ Vgl.: TL Gestein-StB 04, S. 10

¹⁶ Leistungsverzeichnis der Ausbaumaßnahme B 281, März 2017

¹⁷ Leistungsverzeichnis der Ausbaumaßnahme B 281, März 2017

Thüringen zusammenarbeiten und es somit zum Hauptaushängeschild der Region machen.

Diesen Umstand hat es nicht zuletzt seiner beachtlichen Geschichte zu verdanken, denn die Stahlproduktion spielt in der Region seit nunmehr 145 Jahren eine bedeutende Rolle. Die Historie des Stahlwerkes reicht bis zur Gründung des damaligen Stahl- und Walzwerkes Maxhütte im Jahre 1872 zurück. Im Zeitraum von 1872 bis zur neuen Unternehmensgründung des heutigen „Stahlwerkes Thüringen GmbH“ überstand der Standort Unterwellenborn zwei Weltkriege sowie die Teilung Deutschlands in BRD und DDR, währenddessen die Grundstruktur des Stahlwerkes unter sowjetischer Regierung weitestgehend bestehen blieb. Zudem durchlief es diverse Modernisierungsprozesse und Übernahmen durch ausländische Stahlkonzerne.



Abbildung 4 Luftaufnahme Stahlwerk Thüringen, Quelle: <http://www.stahlwerk-thueringen.de/unternehmen/>

Seit das Unternehmen im Jahre 2012 von der Companhia Siderúrgica Nacional übernommen wurde, arbeiten die rund 600 Mitarbeiter des Stahlwerkes unter brasilianischer Flagge und produzieren im Schichtbetrieb Tag und Nacht aus circa 3.500 Tonnen Schrott pro Tag die unterschiedlichsten Stahlsorten. Dies passiert durch die Schmelzung des Stahlschrottes im Gleichstrom-Lichtbogenofen und unter Zugabe verschiedenster Legierungsmittel. Anschließend wird der entstandene Flüssigstahl in Blöcke gegossen später noch vor Ort unter erneuter Erhitzung gewalzt und in die vom Kunden gewünschten Formen und Längen gebracht. Diese werden von Unterwellenborn aus nicht nur deutschlandweit, sondern sowohl in ganz Europa als auch weltweit versandt.

2.2.2 Entstehung und Weiterverarbeitung der Elektroofenschlacke

Doch wie schon ein altes Sprichwort besagt: „Wo gehobelt wird, fallen Späne“, und so entsteht während des Schmelzprozesses des Stahlschrottes nicht nur das Handelsgut Stahl, sondern auch unvermeidbar das Abfallprodukt Schlacke. Als Schlacke werden die nichtmetallischen, kristallin erstarrten Schmelzrückstände aus der Metallverhüttung bezeichnet.¹⁸

Entstehung

Bei der Produktion des Rohstahls wird der Stahlschrott zunächst auf bis zu 1.600 °C erhitzt, so dass er in den flüssigen Zustand übergeht. Auf dem so entstandenen Metallbad bildet sich währenddessen die sogenannte Schlackendecke. Die ebenfalls flüssige Schlacke schwimmt aufgrund ihrer geringeren Dichte auf dem Metallbad und kann somit relativ unproblematisch vom tatsächlichen Flüssigstahl getrennt werden. Die Trennung von Stahl und Schlacke erfolgt im sogenannten Clean-Pit-Verfahren. Dabei befindet sich auf einer Seite des Schmelztiegels der Clean-Pit, welcher im Fall des Stahlwerkes Thüringen lediglich die Größe einer Garage aufweist. Innerhalb dieses Clean-Pits werden nach jedem Räumungsvorgang kleine Dämme angelegt, um zu verhindern, dass die Schlacke im gesamten Raum verteilt wird. Der Schmelztiegel wird nun zunächst auf die Seite des Clean-Pits entleert, so dass sich die 1.600 °C heiße Schlacke wie die Lava eines Vulkans noch glühend in das zuvor errichtete Becken ergießt, bevor der flüssige Stahl auf der anderen Seite des Schmelztiegels entleert wird.



Abbildung 5 Flüssige Schlacke im Clean-Pit, Foto: Melissa Wolfram

¹⁸ Vgl.: <http://www.rga-schlacke.de/seiten/unserearbeit.html>

Da das Unternehmen Stahlwerk Thüringen GmbH großen Wert auf eine nachhaltige und ressourcenschonende Produktion ihrer Stahlprodukte legt, ist eine externe Firma mit der Aufbereitung und Weiterverwertung der anfallenden Schlacke beauftragt, so dass diese quasi mit Verlassen des Schmelztiegels nicht mehr in den Zuständigkeitsbereich der Stahlwerk Thüringen GmbH fällt.

Bergung aus dem Clean-Pit

Sobald die flüssige Schlacke vollständig aus dem Schmelztiegel in den Clean-Pit entleert ist, beginnt die Arbeit der Rohstoff Gewinnungs- und Aufbereitungs GmbH & Co. KG, kurz auch RGA. Das Unternehmen hat sich auf die Verwertung und Aufbereitung des Materials spezialisiert und übernimmt anschließend auch den Vertrieb der gewonnenen Produkte.

Die Bergung der Schlacke aus dem Clean-Pit stellt vermutlich den riskantesten Part in der Verwertungs- und Verarbeitungskette dar. Aus diesem Grund kann dieser Arbeitsschritt nur unter strengen Sicherheitsvorkehrungen geschehen, um die ausführenden Arbeitskräfte nicht zusätzlichen Gefahren auszusetzen. Zunächst werden, nachdem der Schmelztiegel auch auf der Stahlseite entleert wurde, im Bereich des Tiegels die Arbeiten kurzzeitig eingestellt, so dass sich keiner mehr im Gefahrenbereich befindet, da beim Bewegen der heißen Masse eine enorme Staubentwicklung stattfindet. Dieser heiße Staub entweicht nach oben in Richtung des Schmelztiegels. Sobald die Gefahrenzone geräumt, ist schaltet die am Clean-Pit befindliche Ampelanlage von rot auf grün und signalisiert somit dem Personal der RGA, dass diese in den Pit vordringen können. Bevor dies geschieht, wird jedoch für den Bereich um den Clean-Pit und das dazugehörige Zwischenlager der Durchfahrtsverkehr mithilfe von Schrankensystemen kurzzeitig gesperrt.



Abbildung 6 Radlader im glühenden Clean-Pit, Foto: Melissa Wolfram

Sobald der Bereich um den Clean-Pit abgesichert ist, kommen zwei eigens zum Zweck der Schlackenaufbereitung entwickelte Radlader der Marke Caterpillar zum Einsatz. Diese seien laut Herrn Bauer, dem Vertriebsleiter der RGA GmbH & Co. KG, Sonderanfertigungen und weltweit die einzigen ihrer Art, denn sie müssen täglich den Temperaturen von über 1.000 Grad Celsius trotzen. Dabei spielt zum einen der Schutz der Maschinenführer eine bedeutende Rolle, zum anderen soll aber auch der Verschleiß der Fahrzeuge, den Umständen entsprechend, in Grenzen gehalten werden. Der Einsatz im Clean-Pit erfolgt immer in Zweierteams, so dass im Falle eines Zwischenfalls sofort reagiert werden und der zweite Radlader den havarierten bergen kann. Nur so kann im Ernstfall das Leben des verunglückten Maschinenführers gerettet werden, denn dieser darf unter keinen Umständen das isolierte Fahrzeug verlassen. Anderenfalls würde er aufgrund der enorm hohen Temperaturen beim ersten Atemzug tödliche Verbrennungen der Atemwege erleiden. Während also der erste Radlader in den Pit fährt, hält der zweite draußen vor dem Pit Wache, um im Ernstfall sofort handeln zu können. Sobald dieser die aufgenommene Schlacke am Zwischenlager abgekippt hat, begibt sich der zweite Radlader in den Pit und der erste positioniert sich zur Wache davor. Dieser Vorgang wiederholt sich circa sechs Mal, bis alle Schlackenreste aus dem Clean-Pit entfernt worden sind. Abschließend fährt ein Radlader erneut in den Pit, um den Damm für den nächste Schlackenzklus wiederherzustellen. Für die Arbeit im Pit ist es besonders wichtig, dass die Maschinenführer die Radlader perfekt beherrschen. Ein einziger Fehler kann hier Menschenleben kosten. Deshalb lautet, um Mensch und Maschine zu schützen, Regel Nummer eins im Pit: niemals einen Stillstand erzeugen. Zwar sind die Reifen der Radlader mit Ketten geschützt und werden beim Ein- und Ausfahren mit Wasser gekühlt, dennoch würden sie bei Stillstand sofort Feuer fangen.



Abbildung 7 Radlader mit frischer Schlacke aus dem Clean-Pit, Foto: Melissa Wolfram

Transport zu den Abkühlfeldern

Nachdem sämtliche Schlacke aus dem Clean-Pit und in das Zwischenlager gebracht wurde, beginnt die Verladung auf einen Muldenkipper, welcher die noch heiße Schlacke vom Gelände der Stahlwerk Thüringen GmbH auf das der RGA GmbH & Co. KG befördert. Zwar bedeutet die kurzfristige Zwischenlagerung vor dem Clean-Pit Zeit- und somit Temperaturverlust der Schlacke, ist aber dringend notwendig, um eine zügige Leerung des Pits gewährleisten zu können, da Stahl- und Schlackenproduktion ineinander greifen. Wird der Pit nicht rechtzeitig von den Mitarbeitern der RGA GmbH & Co. KG geräumt, so wird der gesamte Prozess der Stahlproduktion gestört, was enorme Verluste bedeutet.



Abbildung 8 Verladung der glühenden Schlacke auf den Muldenkipper, Foto: Melissa Wolfram

Natürlich kann auch für den Transport zum Gelände der RGA GmbH & Co. KG kein herkömmlicher Muldenkipper verwendet werden, da die Schlacke nach wie vor so heiß ist, dass sie am Fahrzeug erhebliche Schäden anrichten würde. Dafür ist die Ladefläche des Kippers von innen mit einer besonderen Thermoauskleidung ausgestattet, die mithilfe von Luftkammertechnik verhindert, dass die heiße Schlacke direkten Kontakt zur Ladefläche des LKW hat. Da sich das Gelände der RGA GmbH & Co. KG in unmittelbarer Nähe zum Stahlwerk befindet, muss der Muldenkipper keine große Distanz zurücklegen. Zudem genügt eine einzige Fahrt, da die Kapazität des Kippers ausreicht, um die gesamte Schlackenmasse eines Abstiches transportieren zu können. Auf dem Gelände der RGA angekommen, wird die Schlacke erneut in einem Zwischenlager abgekippt. Auch dieser Zwischenschritt

stellt wieder einen Zeit- und Temperaturverlust dar, soll aber im Laufe des kommenden Jahres mithilfe von baulichen Veränderungen auf der Deponie abgeschafft werden. Insgesamt geht jedoch der gesamte Bergungs- und Transportprozess sehr schnell vonstatten. Vom Zeitpunkt an dem der erste Radlader in den Clean-Pit einfährt bis zum Abkippen auf der Deponie der RGA GmbH & Co. KG vergehen gerade einmal 15 Minuten. Von hier aus wird die heiße Schlacke direkt von einem Radlader übernommen und nur wenige Meter weiter endgültig auf dem Abkühlbeet abgekippt, so dass sie kurz vor der Schockkühlung noch eine Temperatur von circa 800 bis 1.000 °C aufweist.

Schockkühlung

Sobald das glühende Material auf das Abkühlbeet verladen wurde, wird es dort mithilfe von Kühlwasser aus Einspritzdüsen schockgekühlt. Ziel ist es dabei, dass die noch weiche Schlacke in eine kristalline Form erstarrt und auf Grund der plötzlichen Abkühlung von 800-1.000 °C Sollbruchstellen im Gefüge des Materials entstehen. Das ist nötig, um die erstarrte Schlacke brechen zu können. In der Vergangenheit wurde der Schritt der Schockkühlung ausgelassen, was zur Folge hatte, dass sich die erstarrte Schlacke aufgrund ihrer Härte nicht brechen lies. Sobald das Kühlwasser auf das glühend heiße Material trifft entsteht eine enorme Wasserdampfwolke, die in den Wintermonaten teilweise für leichte Schneefälle auf und um die Halde herum und somit für ein kleines Mikroklima sorgt.



Abbildung 9 Schockkühlung der Schlacke, Foto: Melissa Wolfram

Durch die Schockkühlung der heißen Schlacke erzeugt das Unternehmen täglich einen extrem großen Wasserverbrauch. Pro Kühlvorgang, der je nach Masse der Schlacke in der Regel zwischen 18 und 25 Minuten dauert, werden drei Kubikmeter

Wasser erforderlich, das entspricht 3000 Litern. Zum Vergleich: der deutsche Durchschnittsbürger hat einen täglichen Wasserverbrauch von circa 125 Litern pro Tag. Für die Kühlung wird jedoch kein Frischwasser verwendet. Stattdessen besitzt das Stahlwerk Thüringen ein großen Vorratsbehälter, welcher mit Wasser des Flusses Saale gespeist wird. Dieses Wasser wird sowohl für Kühlprozesse im Stahlwerk als auch für die Abkühlung der Schlacke verwendet und nach der Nutzung in drei 7 Kubikmeter große Container zurückgeführt. Dort wird es abgekühlt und gereinigt, so dass eine Wiederverwendung gewährleistet werden kann.

Brechen, Sieben, Mischen

Nach der Kühlung kann die erstarrte Schlacke nicht direkt weiter verarbeitet werden, sondern wird vorerst für mindestens sechs Monate gelagert. Anschließend macht sich die RGA GmbH & Co. KG die Magnetisierbarkeit anhaftender Eisenteile zum Vorteil und entfernt diese mithilfe des Magnetscheidungsverfahrens von der Schlacke. Nun kann die Schlacke dank der zuvor erzeugten Sollbruchstellen im Material in Brech-, Sieb- und Mischanlagen je nach Bedarf zu verschiedensten Korngemischen weiter verarbeitet werden um so einen Einsatz als Straßen- und Tiefbaumaterial zu ermöglichen. Um den verschiedenen Anforderungen der TL Gestein-StB 04 gerecht werden zu können und die geforderten Sieblinien zu erreichen, müssen teilweise noch feinkörnigere Materialien, wie beispielsweise Sand, zur Schlacke gemischt werden. So kann stets eine regelkonforme Qualität des Materials gewährleistet werden.



Abbildung 10 Weiterverarbeitung der Schlacke auf dem Gelände der RGA Unterwellenborn, Foto: Melissa Wolfram

3 Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau

3.1 Gesetzliche Grundlagen

3.1.1 Gesetzliche Grundlagen der Europäischen Union

Trotz der akribischen Einhaltung aller Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Aufbereitung der Elektroofenschlacke des Stahlwerkes Thüringen, von der man sich nach Absprache eines Termins mit dem Vertriebsleiter der RGA GmbH & Co. KG sogar problemlos persönlich überzeugen kann, gibt es kaum Befürworter für den Einsatz des Materials als alternativen Baustoff im Straßenbau. Möglicherweise liegt der Grund hierfür in der allgemein gängigen Meinung, dass Schlacke ein Abfallprodukt sei und somit automatisch umweltschädlich sein müsse. Betrachtet man jedoch geltendes EU-Recht etwas genauer, so stellt man fest, dass die Einordnung der Schlacke als reines Abfallprodukt ein vorschnelles Urteil darstellt.

Seit der Gründung der Europäischen Union im November 1993 haben sich bis heute mittlerweile 28 Mitgliedsstaaten zur Aufgabe gemacht, gemeinsam den Frieden und das Wohlergehen der Bevölkerung der dazugehörigen Staaten zu gewährleisten. Neben allerlei wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Interessen ist in den letzten Jahren auch das Thema Umweltschutz immer mehr in den Fokus der Diskussionen gerückt. Ein Kernthema der Umweltdebatte stellt dabei die Entsorgung und Weiterverwendung von Abfällen dar, weshalb das EU-Parlament im Jahr 2008 die neuste „Richtlinie 2008/98/EG der Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien“, kurz auch EU-Abfallrahmenrichtlinie, verabschiedete und somit die alte Richtlinie 2006/12/EG außer Kraft setzte. Diese Richtlinie soll, wie bereits ihre Vorgängerrichtlinie, einen rechtlichen Rahmen für die Abfallgesetzgebung der Mitgliedsstaaten der europäischen Union geben, aufgrund derer die Einzelstaaten individuell ihre länderspezifischen Richtlinien und Gesetzgebungen entwerfen können.

Hauptziel der Richtlinie ist natürlich der langfristige Schutz vom Menschen und der Umwelt, in welcher er lebt. Kleinere Maßnahmen zur Erreichung dieses Ziels, wie beispielsweise die Mülltrennung, funktionieren in Ländern wie Deutschland, Österreich und der Schweiz bereits seit vielen Jahren sehr gut. Das liegt an den verschiedenen Systemen der einzelnen Staaten. Aber in genau dieser Individualität der Staaten liegt auch der Grund, weshalb es in vielen südlichen Ländern noch immer Probleme mit der Abfalltrennung und der dadurch entstehenden Verschmutzung der Städte, Wälder und Meere gibt. Aus diesem Grund findet man in

Artikel 4 der EU-Abfallrahmenrichtlinie eine sogenannte Abfall-Hierarchie, welche sich wie folgt gliedert:



Abbildung 11 Abfallhierarchie, Eigene Darstellung in Anlehnung an EU-Abfallrahmenrichtlinie von 2008

Alle 28 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union sind durch Inkrafttreten der EU-Abfallrichtlinie zur Einhaltung dieser Hierarchie im Umgang mit Abfällen verpflichtet. Darüber hinaus bietet die Richtlinie auch zahlreiche Begriffsdefinitionen im Zusammenhang mit Abfallprodukten, um Missverständnisse und Fehldefinitionen zu vermeiden. So ist im Sinne der EU-Abfallrahmenrichtlinie Abfall jeder „[...] Stoff oder Gegenstand, dessen sich sein Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.“¹⁹

Betrachtet man nun die bei der Stahlproduktion anfallende Elektroofenschlacke, wird schnell klar, dass sich die Stahlwerk Thüringen GmbH als Erzeuger und dementsprechend auch Besitzer der Schlacke dieser entledigen will, spätestens aber bei mangelnden Deponiekapazitäten entledigen muss. Die Schlacke kann also vorerst als Abfall nach EU-Abfallrahmenrichtlinie eingestuft werden. Doch neben der Definition für Abfall finden sich in der Richtlinie auch Kriterien, die einen Stoff als Nebenprodukt definieren. Dies ist der Fall, wenn der betreffende Stoff oder Gegenstand, in diesem Fall die Elektroofenschlacke, „[...] das Ergebnis eines Herstellungsverfahrens ist, dessen Hauptziel nicht die Herstellung dieses Stoffes oder Gegenstands ist [...]“²⁰. Bezogen auf die Schlacke bedeutet das: sie entsteht bei der Verhüttung von Schrott, deren Hauptziel die Gewinnung von Stahl und nicht von Schlacke ist. Um anstelle von Abfall als Nebenprodukt eingestuft werden zu können, muss die Elektroofenschlacke allerdings noch folgende Voraussetzungen erfüllen:

¹⁹ Artikel 3, Absatz 1; EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG

²⁰ Artikel 5, Absatz 1; EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG

- Die Weiterverwendung muss sichergestellt sein.
- Die Weiterverwendung ist direkt ohne weitere Verarbeitung, die über normale industrielle Verfahren hinausgeht, möglich.
- Die Entstehung muss integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses sein.
- Die Weiterverwendung muss rechtmäßig sein.²¹

Alle voran stehenden Voraussetzungen werden von der Elektroofenschlacke erfüllt, so dass sie laut EU-Recht anstelle von Abfall als Nebenprodukt eingestuft werden kann. Dies bedeutet, dass der rechtliche Rahmen zur Weiterverwendung als Straßenbaustoff aus Sicht der Richtlinien der Europäischen Union durchaus gegeben und vor allem gewünscht ist, um eine nachhaltige Abfallwirtschaft zu fördern.

3.1.2 Gesetzliche Grundlagen der Bundesrepublik Deutschland

Da die konkrete Umsetzung der EU-Abfallrahmenrichtlinie, wie zuvor bereits erwähnt, jedoch in den Händen der jeweiligen Mitgliedsstaaten liegt, lohnt es sich, einen Blick auf das geltende deutsche Abfallrecht zu werfen. Dieses findet man unter dem Namen „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“, kurz auch Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz orientiert sich in den die Schlacke betreffenden Punkten fast wortwörtlich an den Artikeln der EU-Abfallrahmenrichtlinie, weshalb eine Einordnung der Elektroofenschlacke als Nebenprodukt auch nach geltendem deutschem Recht problemlos möglich ist.

Ziel des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist, wie auch bei der voran gegangenen EU-Abfallrahmenrichtlinie, der Schutz von Mensch und Umwelt. Zudem sollen in Deutschland natürliche Ressourcen geschont werden. Bezüglich der Problematik des Einsatzes von Elektroofenschlacke im Straßenbau handelt es sich bei den betreffenden natürlichen Ressourcen größtenteils um natürlich vorkommende Gesteinsarten, welche, um sie einer Verwendung im Straßenbau zuführen zu können, in Steinbrüchen oder Kiesgruben gewonnen, gebrochen, gesiebt und gemischt werden müssen. Derartige Steinbrüche stellen meist einen großen Einschnitt in die Landschaft dar und müssen zudem aufgrund steigender Nachfragen an den betreffenden Materialien kontinuierlich vergrößert werden. Wohingegen die Schlacke bei der Stahlproduktion ohnehin anfällt und, sofern sie keiner Weiterverwendung zugeführt wird, anderweitig entsorgt, sprich in den meisten Fällen deponiert werden muss.

²¹ Vgl.: Artikel 5, Absatz 1; Satz a bis d; EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG

Da sich die Elektroofenschlacke aufgrund ihrer Eigenschaften allerdings auch als Baustoff in Teilgebieten des Straßenbaus eignet, könnte sie bei gelungenem Einsatz einen funktionierenden Recycling-Kreislauf bilden. Beginnt man mit der Betrachtung eines handelsüblichen Kraftfahrzeuges, so stellt man fest, dass jedes dieser Fahrzeuge einmal das Ende seiner Nutzungsdauer erreichen wird. In der Regel führt der nächste Weg daher zum Schrottplatz. Da, wie bereits zuvor erläutert, im Stahlwerk Thüringen ausschließlich Stahlschrott zu neuem Stahl verarbeitet wird, finden unter anderem auch alte Fahrzeugteile ihren Weg in den Schmelzprozess im Stahlwerk und können so zu neuem Stahl verarbeitet werden. Während dieses Schmelzprozesses entsteht unvermeidbar das Nebenprodukt Schlacke, welches aufbereitet und im Straßenbau eingesetzt werden kann und somit als befahrbarer Untergrund für das Kraftfahrzeug seinen Platz im Recycling-Kreislauf findet. Abschließend kann der neu gewonnene Stahl der Automobilindustrie zugeführt werden und schließt somit den Kreislauf.²²

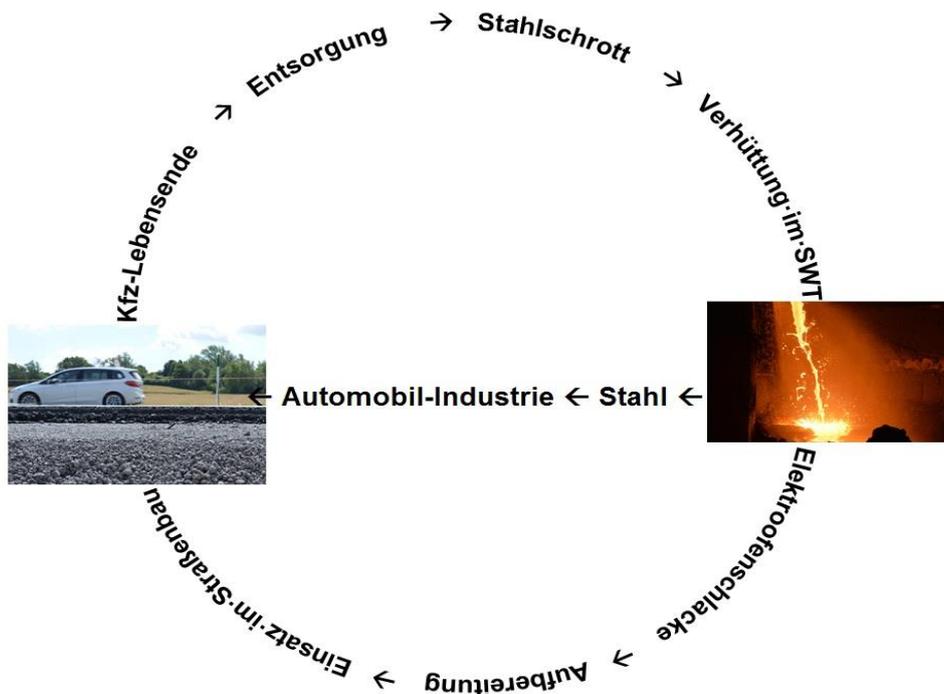


Abbildung 12 Recycling Kreislauf der Schlacke, eigene Darstellung in Anlehnung an Power-Point-Präsentation: Kolloquium für Fortgeschrittene im Straßenwesen am 20.11.2007 der Universität Karlsruhe

Im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist eine Weiterverwendung der Elektroofenschlacke als Straßenbaustoff also durchaus wünschenswert und mit der Umwandlung des ursprünglichen Abfalls in ein Nebenprodukt auch grundsätzlich

²² Vgl.: Power-Point-Präsentation: Kolloquium für Fortgeschrittene im Straßenwesen am 20.11.2007 der Universität Karlsruhe

möglich, sofern dieses neue Produkt die Anforderungen nach den Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04) und der Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB 04) erfüllen.

Sobald es allerdings um den Eingriff in deutschen Boden geht, ist das wichtigste Gesetz in der Bundesrepublik Deutschland das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz, BodSchG), welches Grundsätze und Pflichten im Umgang mit dem Boden regelt. Als Boden gilt hierbei im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes die obere Schicht der Erdkruste mit ihren diversen Funktionen als Lebensraum, Rohstofflagerstätte, Fläche für Siedlung und Erholung und vielen weiteren. Ziel des Gesetzes ist der nachhaltige Schutz des Bodens und seiner Funktionen vor schädlichen Veränderungen durch den Menschen. Angelehnt an das Bundes-Bodenschutzgesetz existiert zudem die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV), welche gewissermaßen einen praktischen Leitfaden zum Bundes-Bodenschutzgesetz darstellt. Darin finden sich Anforderungen an Probenahmen, Analytik und Qualitätssicherung bei Untersuchungen von Böden oder von Materialien, die in Zusammenhang mit dem Boden gebracht werden sollen. Zudem findet man auch die gültigen anzusetzenden Grenzwerte für Schadstoffe und Schwermetalle beispielsweise für den Einsatz auf Kinderspielflächen, in Wohngebieten oder Park- und Freizeitanlagen. Somit gelten auch für die Elektroofenschlacke die Anforderungen des Bundes-Bodenschutzgesetzes und der Bundesbodenschutzverordnung, sobald diese in oder auf dem Boden eingebaut wird.

3.1.3 Gesetzliche Grundlagen des Freistaates Thüringen

Da die Bundesrepublik Deutschland jedoch nach dem Prinzip des Föderalismus organisiert ist, kommt jedem deutschen Bundesland das Recht zu, noch einmal separate Regelungen und Vorschriften über den Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau aufzustellen. Somit hat auch jedes Bundesland die Möglichkeit, mithilfe länderspezifischer Beschlüsse gewisse Anforderungen aus Bundes-Bodenschutzgesetz und -verordnung zu umgehen. So existiert beispielsweise seit Juli 2003 ein gemeinsamer Erlass des Thüringer Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (TMLNU) und des Thüringer Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur (TMWAI) zum Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau. Dieser Erlass besagt, dass ein Einsatz der Elektroofenschlacke im Freistaat Thüringen zugelassen ist, so lange sie die geltenden Zuordnungswerte aus dem Merkblatt 20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen

Reststoffen/Abfällen“ der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA M 20) erfüllt. Zwar kann die Elektroofenschlacke nach EU-Abfallrichtlinie und Kreislaufwirtschaftsgesetz als industrielles Nebenprodukt bezeichnet werden, entsprechend ihrer Herkunft und Entstehung ist sie allerdings nach wie vor ein mineralisches Abfallprodukt, welches, im Falle der Baumaßnahme B 281 ungebunden in das Straßenbauwerk eingebracht werden soll. Die Einordnung des Materials in zwei verschiedene Einbauklassen und deren dazugehörige Zuordnungswerte erfolgt dementsprechend nach LAGA M 20.

An oberster Stelle bei der Einordnung der Schlacke in Einbauklassen steht der Schutz des Grundwassers, um eine Verunreinigung desselbigen durch das Herauslösen gefährlicher Stoffe aus dem Material zu verhindern. Aus diesem Grund sind im Merkblatt LAGA M 20 obere Grenzwerte festgelegt, welche eingehalten werden müssen, um in der jeweiligen Einbauklasse eingesetzt werden zu können. Hält das Material nach einer Laborprobe die folgenden Grenzwerte ein,

- pH-Wert 5-12,5
- Leitfähigkeit 1000 µS/cm
- Chrom (ges.) 50 µg/l
- Nickel 20 µg/l²³

so ist lediglich ein eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen nach Einbauklasse Z2 möglich, weshalb die Elektroofenschlacke ausschließlich „im Straßen- und Wegebau, bei der Anlage von befestigten Flächen in Industrie- und Gewerbegebieten (Parkplätze, Lagerflächen) sowie sonstigen Verkehrsflächen (z.B. Flugplätze, Hafengebiete, Güterverkehrszentren) als Tragschicht unter wasserundurchlässigen Deckschichten“²⁴ wie Beton, Asphalt und Pflaster verwendet werden darf. Die oben genannten Grenzwerte werden bei der Prüfung der Elektroofenschlacke anhand des Eluats gemessen. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass der Wert für polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) nicht über 10 mg/kg liegt. Diese werden allerdings im Feststoff beprobt.

Unterschreiten die gemessenen Werte der beprobten Schlacke die oben aufgeführten und halten stattdessen folgende Grenzen ein,

²³ Vgl.: gemeinsamer Erlass des Thüringer Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt und des Thüringer Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur zum Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau

²⁴ Vgl.: gemeinsamer Erlass des Thüringer Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt und des Thüringer Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur zum Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau

- pH-Wert 5-12
- Leitfähigkeit 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Chrom (ges.) 20 $\mu\text{g}/\text{l}$
- Nickel 20 $\mu\text{g}/\text{l}$ ²⁵

so ist ein eingeschränkter offener Einbau nach Einbauklasse Z1 möglich. Das bedeutet, das Material kann „im Straßen- und Wegebau, bei der Anlage von befestigten Flächen in Industrie- und Gewerbegebieten (Parkplätze, Lagerflächen) sowie sonstigen Verkehrsflächen (z.B. Flugplätze, Hafenbereiche, Güterverkehrszentren) als Tragschicht unter einer Deckschicht“²⁶ eingesetzt werden. Zudem ist eine Verwendung „bei Erdbaumaßnahmen als Lärmschutzwall und Straßendamm (Unterbau) mit Oberflächenabdeckung und Erosionsschutz“²⁷ möglich, welche für vorliegende Arbeit allerdings keine bedeutende Rolle spielt, da es sich hier ausschließlich um ungebundene Oberbauschichten im Straßenbau handeln soll. Trotz der Einstufung in die Einbauklasse Z1 darf die Elektroofenschlacke jedoch nicht überall eingebaut werden. Zu den ausgeschlossenen Einbauorten gehören beispielsweise Biosphärenreservate, Natur- und Wasserschutzgebiete. Zusätzlich zum gemeinsamen Erlass des TMLNU und des TMWAI vom 1. Juli 2003 wurden am 4. Dezember 2009 ergänzende Vorgehenshinweise zum Z1-Einbau der Elektroofenschlacke veröffentlicht. Diese besagen im Grunde, dass ein Einbau an hydrologisch günstigen Standorten möglich, in Entwässerungssystemen oder im Tunnelbau allerdings ausgeschlossen ist. Zudem soll vorbeugend von einem Einbau auf sensiblen Anlagen wie Kinderspielplätzen, Sportanlagen oder Schulhöfen abgesehen werden, da hier auch die Grenzwerte für Schadstoffe nach Bundes-Bodenschutzverordnung deutlich niedriger liegen als in anderen Einbaubereichen.

3.2 Umweltschutzaspekte beim Einbau von Elektroofenschlacke

Natürlich gleicht keine Charge Elektroofenschlacke der anderen. Das liegt daran, dass nie der gleiche Stahlschrott zweimal eingeschmolzen werden kann. Dennoch ist es gerade deshalb sehr wichtig, dass zu Gunsten der Qualität beider Endprodukte, sowohl Stahl als auch Schlacke, der gesamte Herstellungsprozess ständigen Kontrollen unterzogen wird. Diese beginnen bereits beim Ausgangsprodukt, dem Stahlschrott. Das Stahlwerk Thüringen wird hauptsächlich mit Schrott aus einem

²⁵ Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA M 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Teil II, Tabelle II.3.3-1

²⁶ Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA M 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Teil II, Kapitel 3.3.3.1

²⁷ Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA M 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Teil II, Kapitel 3.3.3.1

Umkreis von circa 200 Kilometern um Unterwellenborn beliefert. Dieser Schrott gelangt per Bahn oder LKW nach Unterwellenborn und wird vor Ort zunächst auf Verunreinigungen überprüft. Nachdem es in der Vergangenheit zu Komplikationen gekommen war, gibt es seit einigen Jahren Schleusen, welche die Lieferanten passieren müssen, um sicher zu gehen, dass kein radioaktiv verseuchter Schrott in die Verarbeitung gelangt. Anschließend wird der angelieferte Schrott auf dem stahlwerkeigenen Schrottplatz sortiert, gelagert und kontinuierlich dem Schmelzprozess zugeführt.

Das Stahlwerk Thüringen unterzieht seine Produkte generell bei jedem Schmelzvorgang diversen Laborkontrollen. Sprich, jede neue Stahlcharge wird im Labor auf ihre Eigenschaften überprüft, um eine gleichbleibend tadellose Qualität des Endproduktes gewährleisten zu können. Doch nicht nur der Stahl wird vom Stahlwerk selbst überprüft, auch die Schlacke findet hierbei ihre Beachtung, denn aus ihr können die Verantwortlichen Rückschlüsse auf mögliche Qualitätsmängel im Stahl ziehen. Sollten hierbei also Auffälligkeiten auftreten, kann sofort eingegriffen werden. Im Umkehrschluss bedeutet das auch, dass die Qualität der anfallenden Schlacke maßgeblich von der des eingeschmolzenen Stahls abhängt und somit immer automatisch qualitätssichernden Kontrollen und Maßnahmen unterliegt.

Dennoch genügt eine Kontrolle nur durch das Stahlwerk allein nicht, um den Einsatz der Schlacke als Straßenbaumaterial zu ermöglichen. Hierzu muss die RGA GmbH & Co. KG, in deren Besitz die Schlacke nachdem Abgießen in den Clean-Pit übergeht, ihr Produkt vierteljährlich auf die geforderten Grenzwerte aus dem Merkblatt LAGA M 20 überprüfen lassen, um eine Zulassung zum Einbau vom Thüringer Straßenbauamt zu erhalten. Dies kann in der Regel in Form einer Eigenüberwachung der Produktqualität erfolgen. Im Falle der RGA GmbH und Co. KG ist allerdings, neben der Eigenüberwachung durch das Unternehmen selbst, zusätzlich ein unabhängiges Prüflabor mit Kontrollprüfungen zur Fremdüberwachung beauftragt, um den Vorwurf der Befangenheit von vorn herein auszuschließen. Die Beprobung durch das Prüfinstitut erfolgt dabei nach DIN EN 932-1 und betrifft die für den Straßenbau interessanten Baustoffgemische FSS 0/32, FSS 0/45 und FSS 0/56 inklusive der zugegebenen Feinanteile aus natürlichem, gebrochenem Material, um die geforderten Körnungslinien zu erreichen. Das Prüflabor begutachtet das Material unter Beachtung der Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04) und der Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB 04) hinsichtlich der Kornzusammensetzung, Trockendichte, Wassergehalt, Wasserdurchlässigkeit und der äußeren Beschaffenheit. Am Ende

jedes Prüfprotokolls findet man die chemische Analyse des Materials nach den Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technischen Regeln – der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall und dem gemeinsamen Erlass des TMLNU und des TMWAI, 2003.

Zum Zweck der Verwendung in der vorliegenden Diplomarbeit wurde von der RGA GmbH & Co. KG zu Beginn des Jahres 2017 die bis dato aktuellste Eignungsprüfung der Elektroofenschlacke zur Verfügung gestellt.

Physikalisch-chemische Parameter:	Verfahren	Einheit	Ergebnis	Zuordnungswerte Z1	Zuordnungswerte Z2	Grenzwert TL Gestein-StB 04/07		
						SWS-1	SWS-2	SWS-3
Trockenrückstand	DIN EN 14346	M.-%	100	-	-	-	-	-
pH-Wert (Eluat) 20°C	DIN 38404-C5	-	10,89	5-12	5-12,5	10-13	10-13	10-13
elektrische Leitfähigkeit χ (25°C)	DIN 38404-C6	$\mu\text{S/cm}$	496	1000	1000	1500	1500	1500
Flourid (F ⁻)	DIN 38405-D4	mg/l	1,0	-	-	0,75	2	5
Chrom, ges. (Cr)	DIN EN ISO 17294-2	$\mu\text{g/l}$	12	20	50	30	75	100
Nickel (Ni)	DIN EN ISO 17294-2	$\mu\text{g/l}$	< 1	20	20	-	-	-
Vanadium (V)	DIN EN ISO 17294-2	$\mu\text{g/l}$	120	-	-	50	100	250
Σ PAK nach EPA	DIN ISO 18287	mg/kg	< 0,05	10	10	-	-	-

Tabelle 2 Chemische Analytik der Elektroofenschlacke des SWT nach LAGA M 20, Januar 2017

Die grün markierten Laborergebnisse der Elektroofenschlacke des Stahlwerks Thüringen aus dem Protokoll einer Probe im Januar 2017 liegen insgesamt alle im Rahmen der Zuordnungswerte Z1 nach LAGA M 20. Somit erhält das Material die Zulassung durch das Thüringer Straßenbauamt zum eingeschränkten offenen Einbau im Straßen- und Wegebau.

Dennoch ist im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit trotz Einhaltung der vorgeschriebenen LAGA Grenzwerte auch eine kritische Betrachtung der Verwendung des Materials vorgesehen. Hierzu fiel während der Sichtung der einzuhaltenden Vorschriften und den von der RGA GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellten Prüfzeugnisse und Zulassungen zuerst auf, dass die Forderungen nach LAGA M 20 deutlich geringer ausfallen, als nach Bundes-Bodenschutzverordnung. Da allerdings der Erlass des TMLNU und des TMWAI zum Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau nur die Einhaltung der LAGA Grenzwerte vorsieht, fallen seit Inkrafttreten des Erlasses 2003 auch die Untersuchungen der Eigen- und Fremdüberwachung geringer aus. Es sollte jedoch dabei nicht vergessen werden, dass es sich bei der Schlacke um ein Nebenprodukt der Stahlerzeugung

handelt, weshalb der Gedanke an eine mögliche Schwermetallbelastung nahe liegt. Auf Rückfrage bei der RGA GmbH und Co. KG wurde mitgeteilt, dass der Schwermetallgehalt der Schlacke bis vor einigen Jahren noch regelmäßig detailliert überprüft wurde und entsprechende Prüfprotokolle wurden zur Verwendung in der vorliegenden Arbeit zur Verfügung gestellt. Jedoch sei dies mittlerweile nicht mehr zwingend notwendig, um die Anforderungen an die Einbauklasse Z1 nach LAGA zu erfüllen. Von Zeit zu Zeit würden diese intensiveren Analysen dennoch aus Eigeninteresse stattfinden.

Besonders interessant sind diese umfangreicheren Prüfungen der Schlacke im Hinblick auf deren Einsatz als Frostschutzschicht, welche im Falle von Sickerwasser eine ableitende Funktion hat. In diesem Fall würde die Ausspülung von schädlichen Salzen oder Schwermetallen ein erhebliches Umweltrisiko darstellen. Aus diesem Grund lohnt sich eine Gegenüberstellung der an der Elektroofenschlacke gemessenen Werte aus dem umfangreichen Prüfprotokoll der RGA GmbH & Co. KG mit den Prüfwerten zur Beurteilung des Wirkungspfads Boden-Grundwasser aus der Bundes-Bodenschutzverordnung. Die Prüfwerte beziehen sich auf das Eluat des Materials, weshalb die Dimension der vorhandenen Elemente in Mikrogramm je Liter angegeben wird.

Parameter	Dimension	Messwert in EOS	Prüfwert BBodSchV
Flourid	µg/l	< 200	750
Cyanid	µg/l	< 10	50
Arsen	µg/l	< 1	10
Cadmium	µg/l	< 1	5
Chrom	µg/l	19	50
Kupfer	µg/l	< 5	50
Quecksilber	µg/l	< 0,5	1
Molybdän	µg/l	30	50
Nickel	µg/l	< 5	50
Blei	µg/l	< 5	25
Zink	µg/l	< 10	500

Tabelle 3 Gegenüberstellung Messwerte EOS und Prüfwerte nach Bundes-Bodenschutzverordnung, eigene Darstellung

Die Laborprüfung enthielt neben den hier aufgeführten Salzen Cyanid und Flourid auch noch Ergebnisse für den Gehalt von Sulfaten und Chloriden, für die es in der Bundes-Bodenschutzverordnung jedoch keine Prüfwerte gibt, weshalb hier von einem Vergleich abgesehen wird. Dennoch ist anhand der grün hinterlegten Prüfergebnisse deutlich zu erkennen, dass alle überprüften Elemente weit unter den

Richtwerten der Bundes-Bodenschutzverordnung liegen und dementsprechend ein Einbau als Frostschuttschicht als unbedenklich betrachtet werden kann. Diese Schlussfolgerung kann allerdings längst nicht verallgemeinert werden. Nach DIN 4301 – Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen – kann in ganze 18 unterschiedliche Schlackearten unterschieden werden. Gerade im Hinblick auf die Schwermetallbelastung sollten hier individuell Kontrollen durchgeführt werden.

3.3 Technische Anforderungen an Elektroofenschlacke als Frostschuttsmaterial

Sind alle gesetzlichen und umweltspezifischen Voraussetzungen geklärt, gilt es, sich mit den technischen Erfordernissen für den Einsatz als Material für eine Frostschuttschicht auseinander zu setzen. Die Frostschuttschicht stellt die unterste Schicht des Oberbaus dar und liegt direkt über dem Planum. Sie soll, wie der Name bereits vermuten lässt, den Boden vor Frosteinwirkungen schützen. Hierzu ist es notwendig, dass das eingesetzte Material ausreichend wasserdurchlässig ist, um den Straßenoberbau ordnungsgemäß entwässern zu können und zusätzlich aufsteigendes Grund- oder Schichtenwasser aus dem Boden aufzunehmen und abzuleiten, ohne dabei selbst an Frostsicherheit zu verlieren. Hierfür wird bei gebrochenen Materialien wie der Elektroofenschlacke ein Feinkornanteil von mindestens 15 Prozent benötigt.²⁸

Zudem gelten für den Einsatz als Gesteinskörnung für Frostschuttschichten diverse technische Normen und Regeln welche sich grob in die vier wichtigsten Regelwerke unterteilen lassen:

- **DIN EN 13242** – Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für den Ingenieur- und Straßenbau
- **DIN EN 13285** – Ungebundene Gemische – Anforderungen
- **TL SoB-StB 04** – Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
- **TL Gestein – StB 04** – Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau

²⁸ Vgl.: LÖTHER; 2001; S. 79

Die beiden DIN-Normen sind Bestandteile des Teils C – Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB/C) – und sind somit beim Abschluss eines Bauvertrages nach VOB zwingend einzuhalten.

Die DIN EN 13242 ist dabei deutlich umfangreicher was ihre Anforderungen an die Gesteinskörnungen angeht. Hier wird unterschieden in Anforderungen an die Geometrie, physikalischen Eigenschaften, chemischen Eigenschaften und an die Dauerhaftigkeit der verwendeten Gesteinskörnungen, wobei diese in der Norm nicht konkret festgelegt sind. Sie gibt lediglich die möglichen Kategorien zur Einordnung und die dazugehörigen Prüfnormen an.

Geometrische Anforderungen

Je nach späterer Korngruppe gelten bestimmte Kornverteilungen, welche nach den Anforderungen der DIN EN 13242 überprüft werden müssen. Ebenso gelten Anforderungen an die Form des Kornes, welches möglichst kubisch sein sollte, um eine gute Verdichtbarkeit gewährleisten zu können. Hierfür gibt es die Prüfverfahren zur Bestimmung der Plattigkeit und der Kornform nach DIN EN 933-3 und DIN EN 933-4.

Physikalische Anforderungen

Zu den physikalischen Anforderungen gehört die Einordnung in Kategorien zum Widerstand gegen Zertrümmerung und Verschleiß der Gesteinskörnungen sowie die Ermittlung von Rohdichte, Schüttdichte, Wasseraufnahme und Wassersaughöhe.

Chemische Anforderungen

In diesem Abschnitt finden sich Prüfverfahren auf die chemischen Inhaltsstoffe der Gesteinskörnungen und die dazugehörigen Zuordnungswerte für die einzelnen Kategorien. Dazu gehören beispielsweise Höchstwerte für den Gesamtschwefelgehalt oder den Gehalt an wasser- oder säurelöslichen Sulfaten.

Dauerhaftigkeit

Die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der Gesteinskörnungen hängen im Grunde genommen stark mit der Frostsicherheit zusammen. Hier sind Höchstwerte für die Wasseraufnahme nach 24 Stunden, den Frostwiderstand und den Frost-Tausalz-Widerstand festgelegt, in die das beprobte Material eingeordnet werden kann.

Die tatsächlichen Anforderungen, die an die Gesteinskörnungen gestellt werden, finden sich allerdings nicht in der DIN-Norm selbst, welche, wie bereits erwähnt, nur

für die Kategorisierung zuständig ist, sondern in den dazugehörigen Technischen Lieferbedingungen. Dabei sorgt die TL SoB-StB 04 für die konkrete nationale Umsetzung der DIN EN 13285 und die TL Gestein-StB 04 für die Umsetzung der DIN EN 13242. Hier werden nun tatsächliche Werte für die oben genannten Kategorien festgelegt, welche durch die Materialien eingehalten werden müssen, um dem Einbau in der Frostschuttschicht des Straßenoberbaus gerecht zu werden. Die TL Gestein-StB 04 bezieht sich dabei auf Gesteinskörnungen, aus denen die Baustoffgemische gefertigt werden, während sich die TL SoB-StB 04 auf die fertigen Gemische selbst bezieht. Beide bieten vorgaben, an denen sich Planer orientieren, um Normgerecht zu planen. Die für das ausführende Unternehmen relevanten Parameter finden sich anschließend im Leistungsverzeichnis und der Baubeschreibung. Das Unternehmen hat dann darauf zu achten, die geforderten Kriterien bei der Auswahl der Baustoffe zu erfüllen und muss diese dem Auftraggeber anhand der in der Norm beschriebenen Prüfungen auch nachweisen und dokumentieren.

4 Untersuchungen zum Einsatz der Elektroofenschlacke auf der B 281

4.1 Eckdaten zur Baumaßnahme

Bei der Bundesstraße B 281 handelt es sich um eine viel befahrene Zubringerstraße, welche die thüringischen Landkreise Saalfeld-Rudolstadt und Saale-Orla mit der Anschlussstelle Triptis der Bundesautobahn A 9 verbindet. Sie stellt somit eine wichtige Verkehrsader für die Region dar. Jedoch ist sie geprägt von zahlreichen Durchfahrten durch kleine Ortschaften und bietet auf einem Teilabschnitt von rund 20 Kilometern gerade einmal zwei Möglichkeiten zum sicheren Überholen in Form von zweispurigen Überholabschnitten. Dies allerdings auch nur in Richtung zur Autobahnanschlussstelle, so dass sich zu Stoßzeiten in der Gegenrichtung lange PKW-Kolonnen hinter von der Autobahn kommenden Lastwagen her ziehen. Der Ausbau eines Teilabschnittes zwischen den vorhandenen Anschlussstellen K 508 und Neustadt Orla nach RAL 2012 soll die momentan vorherrschenden Bedingungen verbessern und das Unfallrisiko senken. Hinzu kommen Ausbau und Erneuerung verschiedener Knotenpunkte sowie Entwässerungsarbeiten und Umbeziehungsweise Neuverlegungsarbeiten von Telekommunikationsleitungen. Entsprechend der Vielfalt der auszuführenden Arbeiten gestaltet sich auch die Anzahl der Auftraggeber. Denn es handelt sich hier um eine Gemeinschaftsmaßnahme folgender Beteiligten:

- Straßenbauamt Ostthüringen
- Stadtverwaltung Neustadt an der Orla
- Stadtwerke Neustadt an der Orla
- Zweckverband Wasser/Abwasser Neustadt an der Orla
- Deutsche Telekom Technik GmbH

Zudem spielen die umliegenden Gemeinden Neunhofen und Lausnitz ebenfalls eine Rolle. Diese Vielzahl an Auftraggebern und Beteiligten hat dazu geführt, dass für den Bereich der Hauptstrecke B 281, welcher vom Straßenbauamt Ostthüringen beauftragt wurde, ein Einsatz von Elektroofenschlacke in den ungebundenen Oberbauschichten möglich ist. In den Nebenstrecken, die anschließend in den Besitz der Gemeinden übergehen sollen, wurde die Elektroofenschlacke sofort mit entsprechenden Formulierungen im Leistungsverzeichnis ausgeschlossen. Ein Blick in das Baugrundgutachten der Maßnahme zeigt, dass dieser Ausschluss trotz der Nähe der B 281 zur Orla Aue aus hydrogeologischer Sicht völlig unbegründet ist. Laborproben des bereits vorhandenen Materials aus den Bankettbereichen wiesen

sogar deutlich höhere Belastungswerte für Blei, Cadmium, Kupfer und Zink auf, als die Proben der Elektroofenschlacke aus dem Stahlwerk Thüringen.

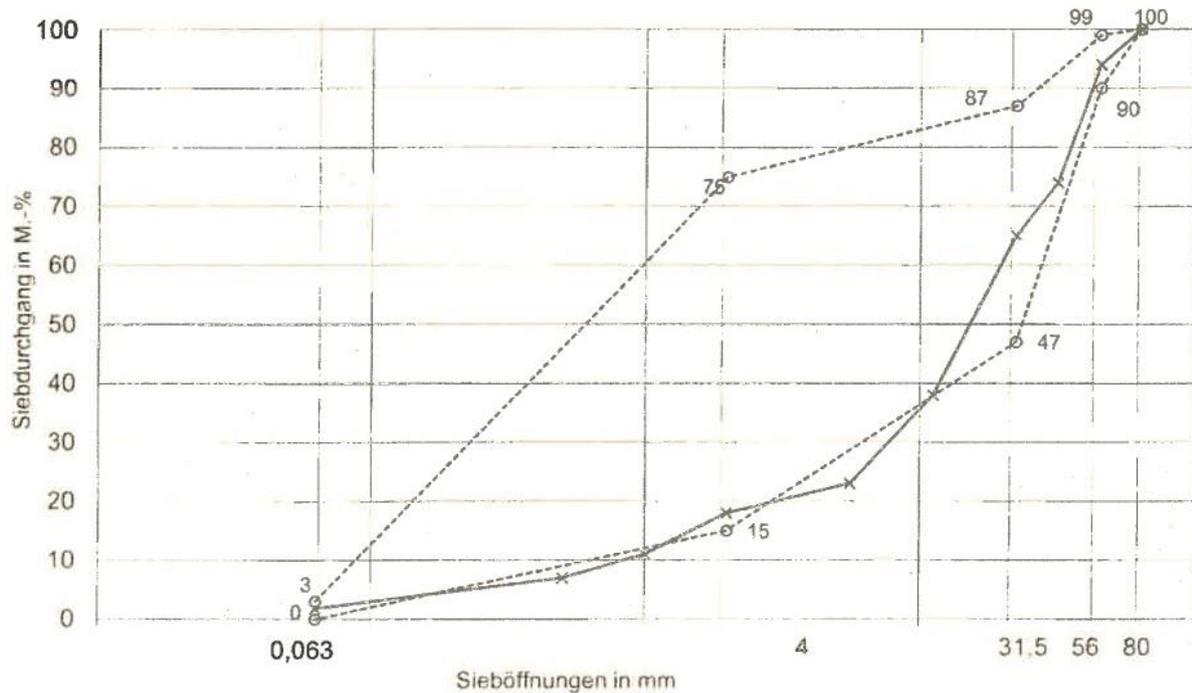
4.2 Vergleich: Elektroofenschlacke und natürliche Gesteinskörnung

Dennoch kommt die Elektroofenschlacke in diesem Fall nur auf der vom Straßenbauamt Ostthüringen beauftragten Hauptstrecke zum Einsatz. Für die dazugehörigen Nebenstrecken wird ein natürliches Material aus der Zweigstelle Döbritz der Hartsteinwerke Burgk verwendet. Doch gibt es, abgesehen von der Herkunft, gravierenden Unterschiede zwischen beiden Materialien, die eine Ablehnung der Elektroofenschlacke rechtfertigen würden? Um einen neutralen Vergleich zu gewährleisten, werden in beiden Fällen die Baustoffgemische FSS 0/45 betrachtet.

Die Anforderungen aus dem Leistungsverzeichnis hinsichtlich der Eigenschaften der Baustoffgemische und deren Verdichtungswerte sind für beide Varianten der Frostschutzschicht identisch. Es werden in beiden Fällen die Kategorien C100/1; C90/1; C90/3 oder C95/1 für den Anteil des gebrochenen Kornes sowie Schlagzertrümmerungswerte $S_Z \leq 24$ M.-% und $S_D \leq 28$ M.-% vorausgesetzt. Im Hinblick auf die Verdichtung soll auf beiden Frostschutzschichten bei der Prüfung mit dem statischen Plattendruckversuch ein Zweitbelastungswert E_{V2} von mindestens 120 MN/m^2 erreicht werden.

Beide verwendeten Baustoffgemische bestehen aus gebrochenen Gesteinskörnungen. Das gilt sowohl für die Grauwacke aus dem Steinbruch der Hartsteinwerke Burgk in Döbritz als auch für die Elektroofenschlacke aus Unterwellenborn inklusive ihrer beigefügten Feinanteile des Granitwerks Fischer aus Heberndorf. Zum Vergleich der oben genannten Forderungen aus dem Leistungsverzeichnis liegen die Eignungsprüfungen des jeweiligen Materials vor. Da es sich bei beiden Baustoffgemischen um gebrochene Materialien handelt, erfüllen sie problemlos die Anforderung C100/0, was bedeutet, sie bestehen zu 100 M.-% aus vollständig gebrochenen Körnern ab einem Korndurchmesser größer 4 mm. Auch der Höchstwert für die Schlagzertrümmerung wird von keinem der Baustoffgemische unterschritten. Hinsichtlich ihrer Frostsicherheit können beide Baustoffgemische die Anforderung Kategorie F4 erfüllen.

Sieblinie Grauwacke FSS 0/45



Sieblinie Elektroofenschlacke FSS 0/45

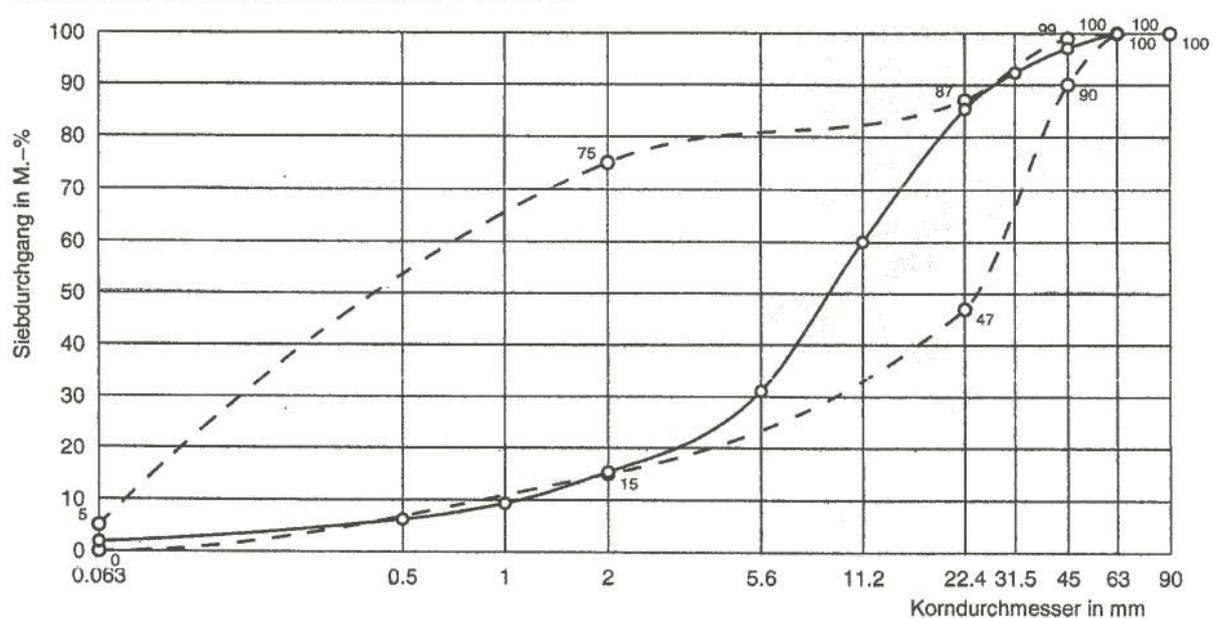


Abbildung 13 Sieblinienvergleich Grauwacke/Elektroofenschlacke, Quelle: Prüfprotokolle Eignungsprüfung

Wirft man nun einen Blick auf die Sieblinien der Gesteinskörnungen stellt, man fest, dass beide Ausreißer aus den Körnungsbereichen aufweisen. Dabei mangelt es bei der Elektroofenschlacke aufgrund ihres Entstehungsprozesses an feinem Sandkorn, während die Grauwacke den Körnungsbereich sowohl im feinen Sand- als auch Kieskornbereich verlässt. Jedoch können die fehlenden Anteile durch Zugabe von Sand ausgeglichen werden.

Der wohl größte Unterschied zwischen den unterschiedlichen Baustoffen scheint die Rohdichte zu sein. Während sich diese im Fall der Grauwacke bei rund $2,6 \text{ t/m}^3$ befindet, liegt der Wert der Elektroofenschlacke bereits bei $3,74 \text{ t/m}^3$ und ist somit fast um die Hälfte höher als die der Grauwacke. Dieser Umstand hat natürlich Auswirkungen auf den Einbau und den Transport des Materials. Beide Komponenten sollen im weiteren Verlauf der Arbeit noch einmal genauer hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Elektroofenschlacke betrachtet werden, weshalb an dieser Stelle vorerst nicht genauer auf diesen Aspekt eingegangen wird.

Neben den chemischen und physikalischen Unterschieden wird eines besonders offensichtlich: beide Materialien unterscheiden sich extrem in ihrer äußeren Form. Was natürlich Auswirkungen auf ihre bautechnischen Eigenschaften hat.



Abbildung 14 Grauwacke aus Döbritz, Foto: Melissa Wolfram

Die Grauwacke aus dem Steinbruch in Döbritz weist eine dunkelgraue, teilweise sandige Farbe auf. Sie hat insgesamt eine ebene Oberfläche, jedoch lässt sich an den vertikalen Bruchstellen deutlich die Schichtung erkennen, welche an Schiefergestein erinnert. Diese ist auf die Entstehung des Sedimentgesteins zurück zu führen. An einigen Stellen lassen sich auch die für die Grauwacke typischen Bestandteile aus Feldspat erkennen. Die äußere Form der Gesteine ist in der Regel sehr kantig und insgesamt eher kubisch, so dass sich die einzelnen Körner der

Grauwacke beim Einbau unter den geeigneten Verdichtungsmaßnahmen problemlos miteinander verzahnen und so eine ordnungsgemäße Verfestigung stattfinden kann.



Abbildung 15 Elektroofenschlacke aus Unterwellenborn, Foto: Melissa Wolfram

Die einzelnen Steine der Elektroofenschlacke haben hingegen eher eine rundliche Form, was die Verdichtung des Materials deutlich erschwert. Durch die runde Form mangelt es dem Gestein an größeren glatten Flächen und Kanten, welche sich durch die Verdichtung miteinander verkeilen können, umso die gewünschten Verdichtungswerte zu erreichen. Das liegt daran, dass sich das Material an sich kaum spalten lässt. Wie im Kapitel 2.2.2 Entstehung und Weiterverarbeitung der Elektroofenschlacke bereits erklärt, weist die Schlacke enorme Festigkeiten auf, so dass sie sich mit herkömmlichen Methoden und Maschinen nicht brechen lässt. Aus diesem Grund wurde durch das Unternehmen RGA GmbH & Co. KG in Unterwellenborn die Schockkühlung eingeführt, um Sollbruchstellen im Gestein zu erzeugen und somit das Material zumindest an eben diesen zuvor erzeugten Sollbruchstellen zerkleinern zu können. Dies funktioniert allerdings nur in einem gewissen Maße und nicht bis in kleinste Dimensionen, was auch den Grund für die mangelnden Feinanteile im Gemisch darstellt. Diese werden später in Form von scharfkantigem Bruchsand aus einem Granitwerk ergänzt. Zudem folgen die entstandenen Sollbruchstellen keiner geradlinigen Form und somit kommt es nur vereinzelt vor, dass sich im Gemisch kubische Körner finden. Die Oberfläche der Elektroofenschlacke ist äußerst rau und von großen Poren geprägt. Sie erinnert

damit nicht nur durch ihren Entstehungsprozess stark an andere magmatische Gesteine wie Lava oder Bimstein. Teilweise finden sich im Gestein Eiseneinschlüsse, die in ihrer rotbräunlichen Farbe hervor schimmern.

4.3 Einbautechnologie auf der B 281

4.3.1 Lieferung und Einbaukriterien

Trotz ihrer völlig unterschiedlichen äußeren Gestalt sind allerdings sowohl die Elektroofenschlacke aus Unterwellenborn als auch die Grauwacke aus Döbritz für den Einsatz auf der Ausbaumaßnahme B 281 geeignet und somit stellen die RGA GmbH Co. KG und das Werk Döbritz der Hartsteinwerke Burgk die beiden Hauptlieferanten für die benötigten Frostschutzmaterialien dar.

Nach Fertigstellung des Erdplanums wird der entsprechende Baustoff auf die Baustelle geliefert, im Falle der Hauptstrecke also die Elektroofenschlacke. Der Transport erfolgt durch das im Landkreis Saalfeld-Rudolstadt ansässige Transportunternehmen Loquitz Trans mithilfe von vierachsigen Muldenkippern. Hier kann man bereits einen ersten Unterschied zwischen den beiden Materialien feststellen, welcher aufgrund der unterschiedlichen Materialrohichten zustande kommt. In beiden Fällen werden die zum Transport genutzten Kippfahrzeuge mit im Schnitt 25 Tonnen Frostschutzmaterial beladen. Legt man nun die beiden Rohdichten zugrunde und teilt die Tonnage durch die jeweilige Dichte der Materialien, wird man schnell feststellen, dass während eines Umlaufes rund 10 m^3 Grauwacke, allerdings nur rund 7 m^3 Elektroofenschlacke auf die Baustelle geliefert werden können. Dieser Umstand kann allerdings relativ problemlos durch den Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeugs gelöst werden und stellt keine ernstzunehmende Beeinträchtigung dar.

Sobald der Achskipper seine Ladung auf dem Planum abgekippt und die Baustelle verlassen hat, beginnt die Weiterverarbeitung des Frostschutzmaterials. Hierfür gibt es im Falle der Ausbaumaßnahme B 281 sowohl für die Elektroofenschlacke als auch für die Grauwacke eine Arbeitsanweisung der zum Konzern gehörenden Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH TPA, welche beide Materialien im Zuge der Eigenüberwachung bereits im Labor überprüft hat. Vergleicht man die Angaben der beiden Arbeitsanweisungen stellt man fest, dass sich diese bis auf einige wenige Details – wie beispielsweise optimaler Wassergehalt oder Proctordichte – kaum unterscheiden. Dieser Umstand stellt eine gute

Ausgangsbedingung dar, um zu vergleichen, ob und wenn ja inwiefern sich die beiden Materialien im praktischen Vergleich unterscheiden.

Einbau Elektroofenschlacke

- Einbau vor Kopf mittels Grader
- Einbaustärke in zwei Schüttungen á 25 cm
- 4 Übergänge mit der Glattmantelwalze Typ Dynapac CA 302
- Kleine Amplitude
- 2 Übergänge mit der Gummiradwalze
- Kontrolle des natürlichen Wassergehalt bei Anlieferung wegen Entmischungen
- optimaler Wassergehalt 4,0 M.-% bei $\rho_{Pr}=2,47 \text{ g/cm}^3$
- optische Kontrolle bei Anlieferung als homogenes Korngemisch
- Tragfähigkeitsprüfung mit statischem Plattendruckversuch laut Prüfplan $E_{V2} \geq 120,0 \text{ MN/m}^2$
- $E_{V2}/E_{V1} \leq 2,2$
- Kontrolle der Einbaudicke von 50 cm

Einbau Grauwacke

- Einbau vor Kopf mittels Grader oder Raupe
- Einbaustärke in zwei Schüttungen á 25 cm
- 4 Übergänge mit der Glattmantelwalze Typ Bomag BW 174 AP
- Kleine Amplitude
- 2 Übergänge mit der Gummiradwalze
- Kontrolle des natürlichen Wassergehalt bei Anlieferung wegen Entmischungen
- optimaler Wassergehalt 5,6 M.-% bei $\rho_{Pr}=2,23 \text{ g/cm}^3$ laut Prüfbericht
- optische Kontrolle bei Anlieferung als homogenes Korngemisch
- Tragfähigkeitsprüfung mit statischem Plattendruckversuch laut Prüfplan $E_{V2} \geq 120,0 \text{ MN/m}^2$
- $E_{V2}/E_{V1} \leq 2,2$
- Kontrolle der Einbaudicke von 50 cm

4.3.2 Einbau und Verdichtung

Entsprechend der Arbeitsanweisung der TPA wurde die Elektroofenschlacke also zunächst mithilfe eines Graders über den gesamten Bereich des Planums verteilt. Hier stellte sich laut Baustellenpersonal zum ersten Mal ein merkbarer Unterschied zum Frostschutzmaterial aus Grauwacke ein, welches mit Raupen verteilt wurde.

Demnach ließe sich die Elektroofenschlacke im Gegensatz zur Grauwacke deutlich schwieriger verteilen und benötige mehr Maschinenkraft, um die gewünschten Ergebnisse zu erreichen. Dieser Umstand ist, ebenso wie die kleineren Transportmengen, auf die vergleichsweise hohe Rohdichte der Elektroofenschlacke zurückzuführen. Aufgrund ihrer hohen Dichte wiegt das gleiche Volumen an Elektroofenschlacke fast die Hälfte mehr als das Frostschutzmaterial aus Grauwacke.



Abbildung 16 Verteilung der Elektroofenschlacke auf dem Planum, Foto: Melissa Wolfram

Sobald das Material verteilt ist, erfolgt laut Einbauanweisung der erste Verdichtungsvorgang mit einer Glattmantelwalze. Die ordnungsgemäße Verdichtung der Frostschutzschicht ist sehr wichtig, da diese neben ihrer Frostschutzfunktion auch bereits eine Tragwirkung bieten soll. Somit ist es wichtig, die Hohlräume zwischen dem locker aufgeschütteten Gestein so gut wie möglich zu entfernen, um eine dichte und somit stabile Lagerung zu erzielen. Dies soll spätere Straßenschäden durch Nachverdichtungen verhindern. In der Praxis gibt es in der Regel drei gängige Verdichtungsprinzipien:

- Verdichtung durch Stampfen
- Verdichtung durch Vibration
- Verdichtung durch Gewicht/Pressung²⁹

Je nach Beschaffenheit des zu verdichtenden Materials werden für den Einbau eine oder mehrere passende Verdichtungsmethoden und die dazugehörigen Verdichtungsgeräte ausgewählt, um so die bestmögliche Verdichtung und vor allem die vom Auftraggeber geforderten Verdichtungswerte zu erreichen.

Verdichtung durch Stampfen

Die Verdichtung durch Stampfen ist wohl die gängigste und einfachste Methode, die gerade im privaten Bereich gerne genutzt wird, da ein Vibrationsstampfer im

²⁹ Vgl.: online: HKL-Baumaschinen, 2017 (09.08.2017)

Gegensatz zu anderen Verdichtungsgeräten relativ handlich und leicht zu bedienen ist. Doch auch im täglichen Baustellengeschehen kommen derartige Stampfer häufig in Rohrgräben zum Einsatz. Sie werden hier beispielsweise zur Verdichtung der Rohrleitungszonen im Kanal- und Rohrleitungsbau genutzt, da die beengten Platzverhältnisse im Rohrgraben den Einsatz größerer Verdichtungsgeräte nicht erlauben. Die Verdichtung durch Stampfen basiert auf dem Prinzip der kinetischen Energie, welche vom Gerät aus in das zu verdichtende Material eingeleitet wird und somit die Körner in die gewünschte Struktur stampft und Hohlräume entfernt. Sie gehört zur Gruppe der dynamischen Verdichtungsmethoden.³⁰

Verdichtung durch Vibration

Auch die Verdichtung durch Vibration zählt zu den dynamischen Verdichtungsmethoden. Sie erfolgt in der Regel mit Vibrationsplatten oder Vibrationswalzen. Hierbei wird das zu verdichtende Material durch die Vibration in Schwingungen versetzt, so dass eine Umlagerung der Körner stattfindet und die Feinanteile der Gesteinskörnung die Hohlräume zwischen den größeren Körnern ausfüllen. Je nach Materialart und Verdichtungsanforderung können Frequenz und Amplitude der Schwingungen angepasst werden.³¹

Verdichtung durch Gewicht/Pressung

Hierbei handelt es sich um eine statische Verdichtungsmethode, welche das Material lediglich durch das Aufbringen großer Lasten verdichtet. Dieses wird beispielsweise durch Walzenzüge, Tandemwalzen oder Gummiradwalzen aufgebracht. Gummiradwalzen haben im Gegensatz zu Walzenzügen und Tandemwalzen den Vorteil, dass sie gleichzeitig eine knetende Wirkung auf den Untergrund haben, die zusätzlich zur Verringerung der Hohlräume im Baustoffgemisch beiträgt.

Für die Verdichtung der Frostschutzschichten der B 281 werden sowohl das Prinzip der dynamischen Verdichtung als auch das der statischen Verdichtung genutzt. Begonnen wird in beiden Fällen mit der Verdichtung durch Glattmantelwalzen. Hierbei unterscheiden sich die beiden Verdichtungsvorgänge lediglich durch den verwendeten Maschinentyp. Während für die Elektroofenschlacke eine Glattmantelwalze vom Typ Dynapac CA 302 (Walzenzug) gefordert wird, soll für die Verdichtung der Grauwacke eine Tandemwalze des Typs Bomag BW 174 AP verwendet werden. Ansonsten unterscheidet sich die Verdichtung der beiden Materialien allerdings lediglich noch durch den optimalen Wassergehalt. Dieser gibt

³⁰ Vgl.: online: HKL-Baumaschinen, 2017 (09.08.2017)

³¹ Vgl.: online: HKL-Baumaschinen, 2017 (09.08.2017)

an, wie viel Wasser im Material vorhanden sein muss, um die maximale maschinell erreichbare Verdichtung erzielen zu können. Das Wasser wirkt dabei wie eine Art Gleitmittel und verringert die Oberflächenreibung der Körner, so dass sie besser in die zu verdichtenden Hohlräume gleiten können. Ist weniger Wasser im Material als vom optimalen Wassergehalt angegeben, herrscht eine höhere Reibung im Kornsystem, welches somit eine schlechtere Verdichtbarkeit aufweist. Ist der Wassergehalt höher als er im Optimalfall sein sollte, wirkt sich auch das negativ auf die Verdichtbarkeit des Materials aus. Der optimale Wassergehalt kann mithilfe des Proctorversuches nach DIN 18127 untersucht und festgestellt werden.



Abbildung 17 Gummiradwalze auf der B 281, Foto: Melissa Wolfram

Nachdem der erste von der TPA angeordnete Verdichtungsvorgang erfolgt ist, kommt laut Arbeitsanweisung für beide Frostschutzmaterialien eine Gummiradwalze zum Einsatz. Sie verdichtet die Frostschutzschicht nur statisch, ohne die Einwirkung von Vibration und macht sich dazu die Knetwirkung ihrer profillosen Gummiräder zu Nutzen.

4.3.3 Eigenüberwachung, Mängel und Recherchen zu alternativen Einbaumethoden

Sobald das Frostschutzmaterial entsprechend der Arbeitsanweisung eingebaut und verdichtet wurde, finden zeitnah Eigenüberwachungsprüfungen durch die TPA GmbH statt. Diese erfolgen in Form von statischen Plattendruckversuchen nach DIN 18134. Hierbei konnten signifikante Unterschiede zwischen den beiden Frostschutzmaterialien festgestellt werden. Während die Frostschutzschicht aus

Grauwacke durchgehend die gestellten Anforderungen nach ZTV SoB-StB und Leistungsverzeichnis erfüllt und sich mit den Verformungsmodulen der Zweitbelastung immer im Bereich knapp oberhalb der geforderten 120 MN/m^2 bewegt und auch den geforderten Verhältniswert $E_{V2}/E_{V1} \leq 2,2$ nie überschreitet, gestaltet sich die Einhaltung dieser Werte durch die verarbeitete Elektroofenschlacke schwieriger. Die bisher durchgeführten Plattendruckversuche zeigen dabei deutliche Überschreitungen des nach ZTV SoB-StB zu fordernden Kriteriums $E_{V2}/E_{V1} \leq 2,2$. In bisweilen acht Prüfungen ergaben sich Werte $E_{V2}/E_{V1} = 2,23 \dots 2,81$, im Mittel ein Wert von $E_{V2}/E_{V1} = 2,61$. Dafür wurden hingegen die Forderungen an das Verformungsmodul aus der Zweitbelastung regelmäßig deutlich überschritten. Hier bildeten sich Werte von $E_{V2} = 110,9 \text{ MN/m}^2 \dots 195,37 \text{ MN/m}^2$ und somit im Mittel ein Wert von $E_{V2} = 157,68 \text{ MN/m}^2$ ab. Diese eigentlich positiven Werte wirken sich natürlich ungünstig auf die Einhaltung des Verhältniswertes E_{V2}/E_{V1} aus. Denn je größer der Verformungsmodul der Zweitbelastung ausfällt, desto schwieriger ist es, beim Dividieren durch einen relativ gleichbleibend kleinen Verformungsmodul der Erstbelastung von im Durchschnitt $E_{V1} = 65 \text{ MN/m}^2$ ein Verhältnis von kleiner gleich 2,2 zu erreichen. Geht man vom höchsten in den Prüfungen erreichten E_{V2} -Wert von $195,37 \text{ MN/m}^2$ aus, müsste in der Erstbelastung bereits ein Wert von $88,8 \text{ MN/m}^2$ erzielt werden, um dem Verhältnis gerecht zu werden. Derartig hohe Werte in der Erstbelastung werden jedoch noch nicht einmal von der Grauwacke erreicht. Der Verhältniswert E_{V2}/E_{V1} kann jedoch laut ZTV SoB-StB nach oben korrigiert werden, sofern der E_{V1} -Wert mindestens 60 Prozent des geforderten E_{V2} -Wertes erreicht.³² Im Fall der Elektroofenschlacke müsste also für den Verformungsmodul der Erstbelastung mindestens ein Wert von 72 MN/m^2 erreicht werden, um die Forderung des Verhältniswertes von 2,2 umgehen zu können. Laut den auf der Frostschutzschicht der B 281 durchgeführten Plattendruckversuchen erreicht die Elektroofenschlacke jedoch ausschließlich Werte, die unterhalb der Grenze von 72 MN/m^2 liegen und somit kann auch diese Regelung nach ZTV SoB-StB nicht angewendet werden. Dies hat im Laufe des Baugeschehens zu einer ersten Mängelrüge durch das Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr geführt. Danach sind durch das Ausführende Unternehmen Maßnahmen zu ergreifen, um die geforderten Werte nach ZTV SoB-StB zu erreichen. Anderenfalls würde man dem weiteren Einbau der Elektroofenschlacke als Material zum Bau der Frostschutzschicht nicht mehr zustimmen.

Um die zukünftig die Anforderungen nach ZTV SoB-StB erfüllen zu können, ist die TPA GmbH mit der Anlage von Probefeldern beauftragt, anhand derer die zuvor erstellten Einbauanweisungen angepasst oder korrigiert werden können. Da jedoch

³² Vgl.: ZTV-SoB-StB 04, S. 17

der weitere Einbau von Elektroofenschlacke auf der B 281 voraussichtlich erst im November erfolgen soll und der zeitliche Rahmen der vorliegenden Arbeit begrenzt ist, sollen im Folgenden aufgrund der gegebenen Materialdaten und Eigenschaften eigene Vorschläge zur besseren Verdichtung und Erreichung der geforderten Werte aus der ZTV SoB-StB erörtert werden.

Zugabe von gebrochenem Sand

Da sowohl Auftraggeber als auch Auftragnehmer daran interessiert sind, die Materialkosten möglichst gering zu halten, ist auch die RGA GmbH & Co. KG bestrebt, ihr Frostschutzmaterial aus Elektroofenschlacke möglichst günstig anzubieten. Weil jedoch die Anforderungen an die Sieblinie eines 0/45 Frostschutzgemisch allein durch die Elektroofenschlacke nicht erfüllt werden können, muss die RGA GmbH & Co. KG zusätzlich gebrochenen Sand beimischen um die Mindestanforderung von 15 Prozent Sand zu erfüllen. Aus Kostengründen wird allerdings versucht, die Sandzugabe so gering wie möglich zu halten, so dass die geforderte Kornverteilung gerade so erreicht wird.

Dieser Umstand spiegelt sich allerdings in den Verdichtungseigenschaften des Materials deutlich wieder. Da das Ziel der Verdichtung darin besteht, die Hohlräume innerhalb des Materials so klein wie möglich zu halten und sich dazu die feineren Körnungsanteile in die Hohlräume zwischen den größeren Körnern legen sollen, muss das Material auch dementsprechend abgestuft sein. Die Elektroofenschlacke weist allerdings im Gegensatz zu Grauwacke beispielsweise eine viel porösere Oberfläche auf, zudem ist die Kornform eher rund als kubisch, was dazu führt, dass sich deutlich mehr Hohlräume ergeben, die durch feinkörnige Anteile ausgefüllt werden müssen. Geschieht dies nicht, spiegelt sich das im Ergebnis der Plattendruckversuche wieder. Denn hier werden nun durch die Erstbelastung die übrigen Hohlräume temporär statisch nachverdichtet, so dass es zu einem kleinen E_{V1} -Wert, dafür aber zu einem deutlich höheren E_{V2} -Wert kommt. Erste Tests dahingehend zeigten bereits, dass sich die E_{V1} -Werte des Plattendruckversuchs unter Erhöhung des Sandkornanteils nachweislich verbessern. Während des ersten Einbauabschnitts auf der B 281 wurde der Sandanteil von den ursprünglich geforderten 15 Prozent schrittweise auf 19 Prozent erhöht. Zwar erreichte man damit nach wie vor nicht den Verhältniswert der ZTV SoB-StB, allerdings bewegt sich die Sieblinie mit einem Sandanteil von 19 Prozent nach wie vor an der unteren Grenze des Körnungsbereiches, so dass eine weitere Erhöhung durchaus erstrebenswerte Fortschritte erzielen könnte.

Wasserzugabe beim Einbau und Vermeidung der Entmischung

Aufgrund der äußerst hohen Dichte der Elektroofenschlacke ist das Material sehr entmischungsanfällig. Bereits auf dem Gelände der RGA GmbH & Co. KG kann man an manchen Materialschüttungen erkennen, wie sich die Sandanteile vom restlichen Korn aus Elektroofenschlacke getrennt haben. Durch den Vertriebsleiter des Unternehmens wurde bestätigt, dass in vielen Fällen vor Abtransport vom Gelände der RGA GmbH & Co. KG zur Baustelle eine erneute Vermischung des Materials stattfindet, um die gewünschte Einbauqualität wieder herzustellen. Allerdings besteht auch das Risiko, dass sich das Frostschutzmaterial während des Transportes zur Baustelle erneut entmischt und somit beim Einbau nicht die nötigen Anforderungen erfüllt werden können. Aus diesem Grund ist es ratsam, dass angelieferte Material vor Einbau auf eine mögliche Entmischung zu überprüfen und wenn nötig, ein weiteres Mal zu vermischen.

Zudem wird die Entmischung des Materials auch durch einen zu geringen Wassergehalt deutlich begünstigt. Doch dieser hat nicht nur Einfluss auf die Mischqualität des Materials, sondern ebenso auf die Verdichtbarkeit. Wie bereits zuvor im Verlaufe der Arbeit beschrieben, gibt es einen bestimmten Wassergehalt, welcher entscheidend zur optimalen Verdichtung des Baustoffgemischs beiträgt. Der erste Einbauzeitraum der Elektroofenschlacke fand jedoch in einer sehr heißen Witterungsperiode im Juni 2017 statt. Bei teilweise bis zu 35 °C im Schatten besteht die Gefahr, dass das Material schon während des Transports beginnt auszutrocknen. Hinzu kommt die begünstigte Absorption des Sonnenlichts durch die dunkelgraue Farbe der Elektroofenschlacke, welche sich dadurch natürlich schneller aufheizt und somit zur Verdunstung des Wassers beiträgt. Um also kontinuierlich den optimalen Wassergehalt in der Gesteinskörnung sicherzustellen, sollte diese während des Einbauprozesses gewässert werden.

Erhöhung des Walzengewichtes oder statische Verdichtung statt dynamischer Verdichtung

Der dritte und letzte Vorschlag zur Optimierung der Verdichtung hängt eng mit der äußeren Form der Elektroofenschlacke zusammen. Wie auf der Abbildung, welche sich in Kapitel 4.2 Vergleich: Elektroofenschlacke und natürliche Gesteinskörnung findet, unschwer zu erkennen ist, weist die Elektroofenschlacke im Gegensatz zur Grauwacke eine eher kompakte und runde äußere Form auf. Zudem ist sie gekennzeichnet durch ihre offenporige Oberflächenstruktur, weshalb zwischen den einzelnen Körnern vergleichsweise große Hohlräume entstehen. Laut der ersten erteilten Einbauanweisung der TPA sollte das Frostschutzmaterial aus Elektroofenschlacke nach Einbau zunächst dynamisch mithilfe einer Glattmantelwalze mit kleiner Amplitude verdichtet werden, um es anschließend noch

vier Übergängen mit der Gummiradwalze zu unterziehen. Die Struktur des Gesteins lässt allerdings vermuten, dass durch die Vibration der dynamischen Verdichtung weniger der Effekt des Verkeilens der einzelnen Körner erzielt wird, sondern eher, dass die feinkörnigeren Anteile abwärts in die unteren Schichten gerüttelt werden. Dort setzen sie sich gesammelt in den vorhandenen Hohlräumen fest während die der oberen Schichten ungefüllt bleiben. Diese Vermutung ließ sich auch durch die Eigenüberwachungsprüfungen nach Verdichtung der Frostschutzschicht bestätigen. Hierbei wurde neben dem generell geringen Anteil des Feinkorns zudem festgestellt, dass sich dieses kaum in den oberen Bereichen der Frostschutzschicht fand, sondern bis in die unteren Schichten durchgefallen ist. Die so übrig gebliebenen Hohlräume werden anschließend vermutlich durch die Erstbelastung des Plattendruckversuches nachverdichtet, so dass sich der enorme Unterschied zwischen beiden Belastungsversuchen ergibt. Das nicht hinreichend verdichtete Material lässt sich von der Lastplatte noch zusammendrücken und führt somit zu den kleinen, im Mittel bei 65 MN/m^2 liegenden E_{V1} -Werten. Die zwangsläufige Nachverdichtung durch die Lastplatte und die generell sehr hohe Festigkeit der Elektroofenschlacke führt anschließend dazu, dass in der Zweitbelastung extrem hohe Werte, teilweise bis zu 200 MN/m^2 , erreicht werden. Um also trotzdem in der Erstbelastung einen ausreichenden Verformungsmodul zu erreichen, könnte eine Erhöhung des Walzengewichtes bei der dynamischen Verdichtung möglicherweise die gewünschten Ergebnisse erzielen, so dass man für die Erstverdichtung beispielsweise eine Walze vom Typ BOMAG BW 214 verwendet. Um allerdings das Durchfallen der ohnehin wenigen, feineren Körner nach ganz unten zu verhindern, wird empfohlen, gänzlich auf die Verdichtung mit dynamischen Walzen zu verzichten und stattdessen großflächig mit statischen Methoden zu verdichten.

4.4 Wirtschaftlichkeit des Elektroofenschlackeeinsatzes

4.4.1 Einheitspreise der Frostschutzmaterialien

Vergleicht man die beiden auf der B 281 verwendeten Frostschutzmaterialien lediglich anhand der Einheitspreise, wird man sofort feststellen, dass die Elektroofenschlacke im Gegensatz zu dem Material aus Grauwacke deutlich günstiger ist. Konkret bedeutet das, dass für die Elektroofenschlacke ein Preis von $3,50 \text{ €/t}$ verhandelt wurde, während die Grauwacke mit einem Einheitspreis von $8,45 \text{ €/t}$ zu Buche schlägt und somit mehr als doppelt so teuer ist wie die Elektroofenschlacke. Dieser Preis setzt sich im Falle der Grauwacke aus $6,55 \text{ €/t}$ reinen Materialkosten, welche sowohl Material und Produktion beziehungsweise

Aufbereitung beinhalten, sowie 1,90 €/t Transportkosten vom Werk Döbritz zur Baustelle zusammen. Bei der Elektroofenschlacke gestaltet sich die Preiszusammensetzung deutlich schwieriger, obgleich der endgültige Einheitspreis deutlich geringer als der der Grauwacke ist. Dies liegt an der Herkunft der Schlacke und der damit einhergehenden Entsorgungsproblematik. Da es sich bei der Elektroofenschlacke ohnehin um einen von der Allgemeinheit eher ungeliebten Baustoff handelt, muss dieser zumindest preislich so hervorstechen, dass er eine deutliche Einsparung gegenüber herkömmlichen Straßenbaumaterialien vorweisen kann. Betrachtet man den Prozess der Schlackeaufbereitung und setzt diesen ins Verhältnis zum letztendlichen Einheitspreis inklusive Transportkosten, wird man schnell feststellen, dass es sich hierbei um keine kostendeckende Rechnung handeln kann. Wie in Kapitel 2.2.2 Entstehung und Weiterverarbeitung der Elektroofenschlacke beschrieben, besteht die Aufbereitung der Schlacke aus folgenden Kernprozessen:

- Bergung aus dem Clean-Pit mit wartungsintensiven Spezialradladern
- Transport zur Halde mit sondergefertigtem Thermo-LKW
- Schockkühlung
- Siebung und Mischung in Gesteinskörnungen

Allein durch diese Prozesse entstehen Kosten, die den Einheitspreis von 3,50 €/t bei weitem überschreiten würden und von der RGA GmbH & Co. KG teilweise noch nicht einmal konkret zugeordnet werden können. Laut Vertriebsleiter der RGA GmbH & Co. KG belaufen sich die Kosten für die reine Siebung des Materials auf circa 1,40 €/t. Hinzu kommt die Zugabe des Sandes, um die Erfüllung der Körnungslinie gewährleisten zu können. Die Kosten hierfür liegen bei circa 0,60 € bis 0,75 € je Tonne Elektroofenschlacke, abhängig von der nötigen Zugabemenge. Dieser Wert kann sich noch erhöhen, wenn höhere Sandmengen notwendig werden. Zudem würden noch die Transportkosten zur Baustelle dazu kommen, welche sich im Fall B 281 ursprünglich auf 3,70 €/t beliefen.

Wie kann es nun allerdings sein, dass das Frostschutzmaterial aus Elektroofenschlacke dennoch so günstig angeboten werden kann? Die Lösung zu dieser Frage ist denkbar einfach. Die Differenz zwischen anfallenden Kosten und tatsächlich angebotenen Preis trägt das Stahlwerk Thüringen selbst. Da es als Produzent des Stahls gleichzeitig auch als Abfallproduzent agiert, ist es auch selbst für die Entsorgung des eigentlichen Abfallproduktes Elektroofenschlacke zuständig. Hierbei kann es sich die Einstufung der Schlacke als industrielles Nebenprodukt und somit die Möglichkeit selbiges als Baustoff im Straßenbau einsetzen zu können, zum Vorteil machen. Wäre dies nicht möglich, müsste das Stahlwerk Thüringen als

Abfallerzeuger für die ordnungsgemäße Deponierung des Materials sorgen, was hinsichtlich der Platzkapazitäten am Standort Unterwellenborn auf einen längeren Zeitraum zu Problemen führen würde. Sobald dieser Fall einträte, müsste das Stahlwerk Thüringen auf andere Deponien ausweichen und somit hohe Transport- und Deponiekosten tragen, da sich geeignete Deponien nicht im engeren Umkreis des Stahlwerkes Thüringen befinden. Aus diesem Grund ist man bestrebt, die Elektroofenschlacke als Baustoff zu attraktiven Preisen an Bauunternehmen und Privatkunden zu verkaufen, da die ausgleichende Kostendifferenz laut Vertriebsleiter der RGA GmbH & Co. KG deutlich geringer sei, als die anfallenden Kosten für eine ordnungsgemäße Deponierung außerhalb des Stahlwerkgeländes. Somit trägt der Kunde im Endeffekt lediglich die Kosten für den Transport der Schlacke zur Baumaßnahme. Hierfür besteht zwischen der RGA GmbH & Co. KG und dem regionalen Frachtunternehmen Loquitz Trans ein Kooperationsvertrag, welche ebenfalls dafür sorgt, die Kosten möglichst gering zu halten.

4.4.2 Transportkosten

Hinsichtlich der Standorte der beiden Werke, welche die Baustelle mit Frostschutzmaterial versorgen, ist das Grauwacke Werk in Döbritz deutlich besser gelegen als das Stahlwerk Thüringen. Der Steinbruch Döbritz befindet sich nur circa 7 Kilometer vom Einsatzort des Frostschutzes entfernt und bietet somit sehr kurze Anfahrtswege und daraus resultierende Umlaufzeiten. Die Transportkosten zur Baustelle belaufen sich hier auf 1,90 €/t. Setzt man dies nun ins Verhältnis mit der zurückzulegenden Strecke:

$$\frac{1,90 \text{ €/t}}{7,0 \text{ km}} = 0,27 \frac{\text{€}}{\text{km} * \text{t}}$$

Formel 1 Transportkostenberechnung Kilometerpreis Grauwacke Döbritz

ergibt sich ein Transportpreis von 0,27 Euro pro Kilometer und Tonne. Die gleiche Rechnung kann auch noch für die Elektroofenschlacke aus Unterwellenborn aufgestellt werden, welche hingegen eine Strecke von 26 Kilometern bis zur Einbaustelle zurück zu legen hat.

$$\frac{3,50 \text{ €/t}}{26 \text{ km}} = 0,13 \frac{\text{€}}{\text{km} * \text{t}}$$

Formel 2 Transportkostenberechnung Kilometerpreis Elektroofenschlacke Unterwellenborn

Unter Berücksichtigung der Transportkosten von 3,50 €/t ergibt sich für die Schlacke somit ein Kilometerpreis von 0,13 Euro pro Kilometer und Tonne.

Auch hier wird schnell ersichtlich, dass die Elektroofenschlacke die Grauwacke hinsichtlich der Transportkosten unterbietet, was natürlich auf die Kostenübernahme des Stahlwerks Thüringen zurück zu führen ist. Allerdings spielen die Transportkosten für eine Berechnung der tatsächlichen Einsparung durch den Elektroofenschlackeeinsatz keine Rolle, da in den abgeschlossenen Verträgen eine Lieferung der Materialien frei Bau vereinbart wurde. Das bedeutet, dass die Transportkosten im Tonnagepreis bereits eingerechnet sind und somit die Kilometer für den Transport der Schlacke beziehungsweise der Grauwacke außer Acht gelassen werden können.

4.4.3 Geräteeinsatz und Zeitaspekt beim Einbau

Ein weiterer Aspekt, der beachtet werden sollte, wenn es um die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit des Schlackeeinsatzes geht, sind die unterschiedlichen Materialeigenschaften der beiden Baustoffe und deren Auswirkung auf Einbautechnologie und Einbauzeiten. Grundlage hierfür ist die vorläufige Einbauanweisung der TPA, welche bereits im Kapitel 4.3.1 Lieferung und Einbaukriterien zu finden ist. Entgegen der zuvor bestehenden Erwartung, dass sich der Einbau aufgrund der teilweise signifikanten Abweichung der Eigenschaften ebenfalls stark unterscheiden müsste, zeigt die Einbauanweisung anderes auf. Danach sollen Elektroofenschlacke und Grauwacke nahezu auf identische Art und Weise sogar mit den gleichen Geräten eingebaut werden. Lediglich der optimale Wassergehalt der beiden Baustoffgemische unterscheidet sich erwartungsgemäß. Hinsichtlich der Gerätekosten lässt sich also kein Unterschied zwischen den beiden Frostschutzmaterialien ausmachen, der in eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit mit einfließen könnte.

Interessant erschien allerdings auch, ob sich aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften zeitliche Unterschiede beim Einbau der beiden Frostschutzmaterialien feststellen lassen. Auf Befragung des Baustellenpersonals hin stellte sich bereits heraus, dass sich die Elektroofenschlacke schwieriger verteilen ließ als üblicherweise verwendete Frostschutzmaterialien. Dieser Umstand ist natürlich auf die große Dichte und das daraus resultierende höhere Gewicht zurück zu führen. Aber machen sich der Gewichtsunterschied und die Rolligkeit des Materials beim Einbau auch zeitlich bemerkbar? Um hierüber eine Aussage treffen zu können, wurden stichprobenartig die Zeiten von jeweils drei verschiedenen Einbauvorgängen beider Materialien festgehalten. Ein Einbauvorgang ist dabei definiert als der Zeitraum vom

ersten Abkippen des jeweiligen Materials durch einen Muldenkipper über die Verteilung durch den Grader oder die Raupe bis zur Ankunft und dem Abkippen des nächsten LKW. Folgende Werte sind dabei entstanden:

Einbauvorgang	Elektroofenschlacke	Grauwacke
1	11 min 05 s	09 min 29 s
2	09 min 56 s	10 min 55 s
3	10 min 43 s	10 min 02 s
Ø	10 min 58 s	10 min 03 s

Tabelle 4 Zeitmessung der Einbauvorgänge

Anhand der Tabelle wird ersichtlich, dass der Einbau der Elektroofenschlacke im Schnitt nur circa eine Minute länger dauert als der des Frostschutzmaterials aus Grauwacke. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Differenzen zum Teil auch von menschlichen Faktoren beeinflusst wurden. Da es sich hierbei um minimale Zeitabweichungen handelt, haben sie keinen signifikanten Einfluss auf die Kosten, die dem Bauunternehmen durch die Verwendung des Materials entstehen.

4.4.4 Tatsächliche Einsparungen durch den Einbau von EOS

In den voran gegangenen Kapiteln wird deutlich, dass die Elektroofenschlacke nicht nur einen enorm günstigen Einheitspreis vorzuweisen hat, sondern auch was Einbau und Geräteaufwand angeht, kaum Unterschiede zur herkömmlichen Frostschutzmaterialien aufweist. Doch um welches finanzielle Einsparpotenzial handelt es sich tatsächlich, wenn man den Einsatz natürlicher Gesteinskörnungen durch das Material aus Elektroofenschlacke ersetzt? Besteht eventuell die Möglichkeit, dass der günstige Einheitspreis am Ende aufgrund der hohen Dichte gar keinen so großen Einfluss auf die Gesamtmaterialekosten hat? Um hierfür eine konkrete Zahl ermitteln zu können, muss zunächst das Leistungsverzeichnis der Baumaßnahme auf Frostschutzpositionen untersucht werden, die einen Einsatz der Elektroofenschlacke nicht von vorn herein durch ihre Formulierung ausschließen. Hiervon finden sich im Leistungsverzeichnis der Ausbaumaßnahme B 281 fünf Positionen.

- 12.000,00 m³ Frostschutzschicht im Bereich Tragschichten Bauteil 1
- 50,00 m³ Frostschutzschicht für Profilausgleich im Bereich Tragschichten Bauteil 1
- 10.500,00 m³ Frostschutzschicht im Bereich Tragschichten Bauteil 2
- 120,00 m³ Frostschutzschicht für Profilausgleich im Bereich Tragschichten Bauteil 2
- 20,00 m³ Frostschutzschicht für Rad- & Gehwege Bauteil 4

Insgesamt dürfen also 22.690 m³ Elektroofenschlacke als Frostschutzmaterial eingebaut werden. Mithilfe dieses Volumens und der Dichte der Elektroofenschlacke lässt sich nun das Gesamtgewicht der verwendeten Schlacke berechnen.

$$\text{Masse} = \text{Dichte} \cdot \text{Volumen}$$

$$m [t] = \rho \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot V [m^3]$$

$$m [t] = 3,74 \frac{t}{m^3} \cdot 22.690 m^3 = 84.860,60 t$$

Formel 3 Massenberechnung der Elektroofenschlacke

Setzt man für diese benötigte Tonnage nun den vertraglich vereinbarten Einheitspreis an, erhält man die reinen Materialkosten für die Elektroofenschlacke.

$$84.860,60 t \cdot 3,50 \frac{\text{€}}{t} = 297.012,10 \text{ €}$$

Formel 4 Berechnung der Materialkosten für die Elektroofenschlacke

Man erhält also einen reinen Materialpreis von circa 300.000,00 € für die Elektroofenschlacke.

Vergleichsweise soll nun errechnet werden, wie hoch die Kosten für die gleiche Menge Frostschutzmaterial aus Grauwacke wäre, um am Ende eine Differenz bilden zu können.

$$\text{Masse} = \text{Dichte} \cdot \text{Volumen}$$

$$m [t] = \rho \left[\frac{t}{m^3} \right] \cdot V [m^3]$$

$$m [t] = 2,6 \frac{t}{m^3} \cdot 22.690 m^3 = 58.994,00 t$$

Formel 5 Massenberechnung für Grauwacke

Anschließend wird auch hier wieder die Tonnage mit dem vereinbarten Einheitspreis multipliziert und so erhält man:

$$58.994 t \cdot 8,45 \frac{\text{€}}{t} = 498.499,30 \text{ €}$$

Formel 6 Berechnung der Materialkosten für die Grauwacke

Würde man also für die oben ermittelten Massen statt Elektroofenschlacke die Grauwacke aus Döbritz als Frostschutzmaterial einsetzen, erhielte man eine Differenz von 201.487,20 €. Bei einer Gesamtauftragssumme von 6.268.169,00 € macht das immerhin 3 % der Auftragssumme aus, was dem Unternehmen bei der Angebotsabgabe einen deutlichen Wettbewerbsvorteil einbringt. Im Falle der Ausbaumaßnahme B 281 hatten lediglich zwei Bauunternehmen Angebote

abgegeben, welche in der Kalkulation den Einsatz der Elektroofenschlacke als Alternative zu herkömmlichen Frostschutzmaterialien berücksichtigt hatten. Zum einen die STRABAG AG, zum anderen die ebenfalls in Gera ansässige Max Bögl Stiftung & Co. KG. Beide Bauunternehmen lagen in der Submission weit vor den anderen Bietern, unterschieden sich jedoch nur minimal von den Angeboten des jeweils anderen, so dass am Ende dennoch die STRABAG AG die Submission für sich entscheiden und somit den Auftrag akquirieren konnte.

4.5 Weitere Referenzen der Elektroofenschlacke

Trotz der weit verbreiteten eher negativen Meinung zur Elektroofenschlacke hat die RGA GmbH & Co. KG auf ihrer Referenzliste einige große Projekte in der Region des Landkreises Saalfeld-Rudolstadt vorzuweisen. Diese Projekte reichen, was die Einbaumassen der Elektroofenschlacke angeht, an die der Ausbaumaßnahme der B 281 in Neustadt Orla heran oder überschreiten diese sogar. Besonders hervorzuheben sind hierbei zwei Ortsumfahrungen in unmittelbarer Nähe zum Stahlwerk in Unterwellenborn. Zum einen die Ortsumfahrung Kamsdorf, für die 26.000 Tonnen Elektroofenschlacke als Frostschutzmaterial zum Einsatz kamen und zum anderen die Ortsumfahrung Gorndorf, für die man sogar 110.000 Tonnen der Elektroofenschlacke verbaute.



Abbildung 18 Ortsumfahrung Kamsdorf mit Stahlwerk Thüringen im Hintergrund, Foto: Melissa Wolfram

Die Ortsumfahrung Kamsdorf wurde im November 2006, die Ortsumfahrung Gorndorf im Juni 2007 für den Verkehr freigegeben.³³ Beide Straßen befinden sich also seit

³³ Vgl.: Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr, Abgeschlossene Bauprojekte Straßenbau, http://www.thueringen.de/th9/tlbv/abgeschlossene_bauprojekte/index.aspx, 14.08.2017

zunehmend zehner Jahren in Betrieb und weisen trotz des hohen Verkehrsaufkommens noch keine sichtbaren Verschleißerscheinungen oder Schäden auf, die von einer mangelnden Standfestigkeit des Untergrundes herrühren, beispielsweise Spurrinnen oder Risse.

Für die größere der beiden Baumaßnahmen, die Ortsumfahrung Gorndorf, wurden zu Recherchezwecken für diese Arbeit Laborprüfungen und die Ergebnisse der Verdichtungsprüfungen mithilfe des statischen Plattendruckversuches zur Verfügung gestellt. Auch hier fällt auf, dass die gleichen Probleme wie beim Einsatz der Elektroofenschlacke in Neustadt an der Orla auftraten. Die Sieblinie bewegt sich im Sandkornbereich sehr nah an der unteren Grenze des Körnungsbereiches und auch hier traten beim Einbau in den Sommermonaten vermehrt Probleme auf, den geforderten E_{V2}/E_{V1} -Wert von 2,2 nicht zu überschreiten. Interessant ist hierbei, dass der Grenzwert von 2,2 im weiteren Einbauverlauf ab Ende September scheinbar mühelos eingehalten werden konnte. Dieser Umstand ist vermutlich auf die Witterungsverhältnisse beim Einbau zurück zu führen. Da allerdings zehner Jahre nur circa der Hälfte der üblichen Nutzungsdauer einer Straße entsprechen, bevor die Deckschicht erneuert werden muss, kann anhand dieser Projekte noch kein Rückschluss über die langfristige Qualität der Schlacke als Frostschutzschicht getroffen werden.

5 Ergebnisse und Bewertung

5.1 Bedeutung für das Bauunternehmen

Wie im voran gegangenen Kapitel errechnet, bietet die Elektroofenschlacke dem ausführenden Bauunternehmen ein deutliches Einsparpotenzial gegenüber herkömmlichen Frostschutzmaterialien. Zwar beruht hier der Vorteil mit Sicherheit auf Gegenseitigkeit, sowohl für das Bauunternehmen als auch für das Stahlwerk Thüringen, welches Sorge für die Deponierung oder Entsorgung der Elektroofenschlacke zu tragen hat, dennoch stellt die Schlacke besonders für ausführende Bauunternehmen eine interessante Alternative dar. Im konkreten Fall der Ausbaumaßnahme B 281 bedeutet das, dass der niedrige Einheitspreis der Elektroofenschlacke maßgebend für die Akquirierung des Auftrages war, welcher aktuell die bedeutendste Baumaßnahme der Gruppe Gera darstellt.

Kritisch zu betrachten ist jedoch der zusätzliche Aufwand, den die Elektroofenschlacke, zumindest zu Einbaubeginn, mit sich bringt. Sofern noch keine Erfahrung mit dem Einbau des Materials besteht, tauchen vermehrt die erörterten Probleme wie beispielsweise grenzwertige Körnungslinien, Probleme bei der Verdichtung oder das Nichterreichen der geforderten Verhältnisswerte in der Verdichtung auf. Um diesen Schwierigkeiten vorzubeugen, sollten möglichst noch vor Einbaubeginn Versuche mit dem zu verwendenden Material durchgeführt werden, um die günstigsten Einbaubedingungen zu ermitteln und diese später umsetzen zu können. Im Falle der STRABAG AG sollten solche vorzeitigen Versuche und Prüfungen jedoch keine größeren Schwierigkeiten darstellen, da diese im Rahmen der Eigenüberwachung von der konzerneigenen TPA Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH übernommen werden können und somit durch die Erarbeitung funktionstüchtiger Einbaurichtlinien direkt ein Mehrwert für eventuelle Folgeprojekte geschaffen werden könnte. Im Rahmen dieser Diplomarbeit entwickelte Vorschläge für den Einbau der Elektroofenschlacke sind:

- Zugabe von gebrochenem Sand
- Wasserzugabe beim Einbau
- Vermeidung der Entmischung
- Erhöhung des Walzengewichts oder statische Verdichtung statt dynamischer Verdichtung

Jedoch liegen im Moment noch keine verbindlichen Einbaurichtlinien für das verwendete Material aus Elektroofenschlacke vor und die Probleme mit der Erreichung des Verhältniswertes E_{V2}/E_{V1} träten laut Aussage des Vertriebsleiters der RGA GmbH & Co. KG regelmäßig auf. Aus diesem Grund wäre auch die Überlegung, eine alternative Variante zur Gewährleistung der Einhaltung des Verhältniswertes zu schaffen, sinnvoll. Maßgebend für die konsequente Überschreitung des Verhältniswertes $E_{V2}/E_{V1} = 2,2$ ist der äußerst hohe Verformungsmodul der Zweitbelastung, der durch die Elektroofenschlacke erreicht wird. Dieser hat jedoch erfahrungsgemäß bei vorhergehenden Baumaßnahmen immer für eine ausreichende Standfestigkeit gesorgt, so dass es eine Überlegung wert wäre, grundsätzlich bei Vertragsschluss mit dem Auftraggeber eine höheren anzusetzenden Verhältniswert von beispielsweise 2,7 oder 2,8 zu vereinbaren. Dieser ließe sich durch die besonderen Eigenschaften der Elektroofenschlacke rechtfertigen und würde, auch laut Meinungen der Laboranten der TPA, die Tragfähigkeit der späteren Straße nicht beeinflussen.

5.2 Bedeutung für den Straßenbau

Aufgrund ihrer guten bautechnischen Eigenschaften wie beispielsweise der hohen Tragfähigkeit und Festigkeit, der Verwitterungsbeständigkeit sowie dem Widerstand gegen Frost- und Tauwechsel stellt die Elektroofenschlacke eine interessante Alternative für Frostschutzschichten im Straßenbau dar. Der Einsatz der Elektroofenschlacke ist durch das zuständige Thüringer Straßenbauamt durchaus gewollt und durch den Erlass zum Einsatz des Materials auch gestattet. Er wird allerdings aufgrund der Herkunft des Materials sehr genau überwacht und nach wie vor von vielen Planungsbüros grundsätzlich aus den Baubeschreibungen ausgeschlossen. Nur in seltenen Fällen ist es den Bauunternehmen möglich, in Nebenangeboten die Elektroofenschlacke als Alternative zu den natürlichen Baustoffen anzubieten. Da sich jedoch bautechnisch kein nachteiliger Unterschied gegenüber herkömmlichen Straßenbaumaterialien feststellen lässt, die Elektroofenschlacke, gerade in Sachen Festigkeit, teilweise sogar bessere Eigenschaften als natürliche Gesteinskörnung vorweisen kann, erscheint ein verbreiteter Einsatz des Materials durchaus sinnvoll und sollte durch die zuständigen Behörden gefördert und nicht durch spezifische Formulierungen in den Ausschreibungen unterbunden werden. Dafür spricht auch, dass nicht nur das ausführende Bauunternehmen wirtschaftliche Vorteile in Form von besseren Wettbewerbschancen aus dem Elektroofenschlackeeinsatz ziehen kann. Auch für die

Auftraggeber bedeutet der Einsatz des künstlichen Mineralstoffs das Potenzial zu Einsparungen, welche später für andere Projekte mit eingesetzt werden können.

5.3 Bedeutung für die Umwelt

Nicht zuletzt sollte der Einsatz der Elektroofenschlacke unter dem Aspekt des Umweltschutzes betrachtet werden. In Zeiten von Klimawandel und zunehmenden Naturkatastrophen ist es unabdingbar, die Erde und ihre natürlichen Ressourcen nach bestem Wissen und Gewissen zu schonen. Dazu gehören nicht nur kleine Maßnahmen wie Wasser und Strom sparen, Müll trennen oder Bus, Bahn und Fahrrad statt Auto zu nutzen, die jeder Einzelne selbst berücksichtigen kann, sondern auch ganzheitliche Maßnahmen zum Umwelt- und Ressourcenschutz. Mit fortschreitender Globalisierung und Industrialisierung der Welt ist auch ein stetiger Anstieg der Nutzung natürlicher Rohstoffe zu verzeichnen.

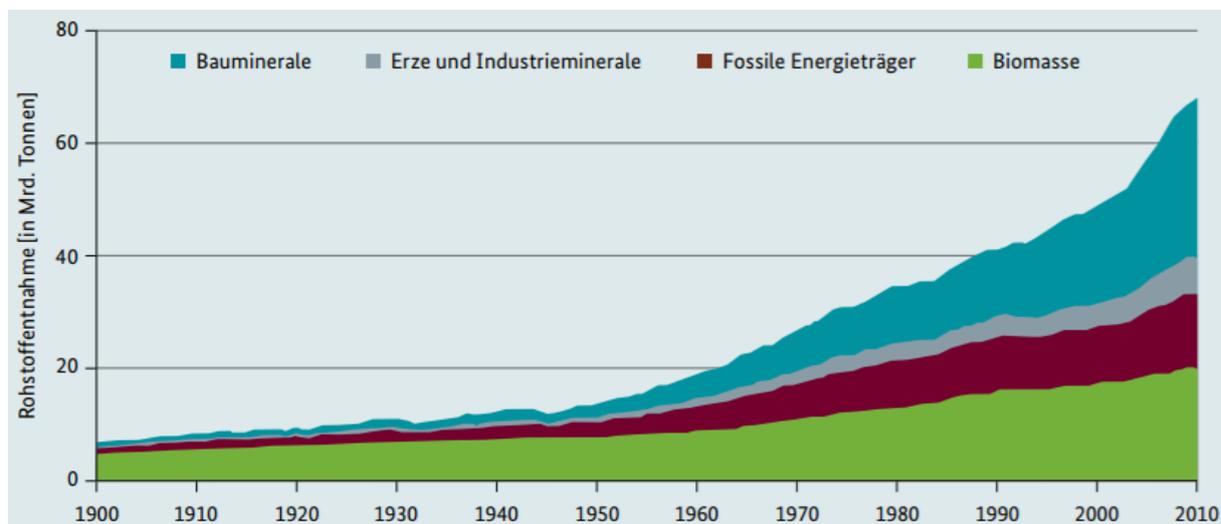


Abbildung 19 Entwicklung der Rohstoffentnahme Quelle: Deutsches Ressourceneffizienzprogramm, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), S. 18

Wie in der Grafik gut zu erkennen ist, sind Bauminerale nicht nur die am meisten gewonnenen natürlichen Ressourcen, sondern haben gleichzeitig auch das größte Wachstum zu verzeichnen. Lag der Verbrauch im Jahr 1990 noch bei knapp 40 Milliarden Tonnen, so ist er innerhalb von 20 Jahren um fast 30 Milliarden Tonnen angestiegen und lag im Jahr 2010 bereits bei fast 70 Milliarden Tonnen. Von einem weiteren kontinuierlichen Anstieg ist auszugehen. Diese Entwicklung ist besonders im Hinblick auf den sogenannten „Earth Overshoot Day“ besorgniserregend. Der „Earth Overshoot Day“ oder zu Deutsch auch „Ökoschuldentag“, beschreibt den Tag im Jahr, an dem die Menschheit, rein rechnerisch alle reproduktiven Ressourcen der Erde des vergangenen Jahres aufgebraucht hat und nun auf Kredit lebt. Dieser Tag wird nunmehr seit fast 50 Jahren durch das Global Footprint Network aufgrund

diverser Annahmen und unter Beobachtung zeitgemäßer Entwicklungen berechnet. Erschreckend ist, dass auch hier das Datum des Ökoschuldentages immer näher an den Jahresbeginn rückt. Im Jahr 1971 fand laut Global Footprint Network zum ersten Mal eine kritische Überschreitung der Rohstoffnutzung zum 21. Dezember statt. Dieses Datum hat sich in den letzten 46 Jahren bis auf den 2. August 2017 vorverlegt, so dass die Menschheit am Ende des Jahres 2017 theoretisch die Rohstoffe von circa eineinhalb Erden verbraucht hätte.³⁴

Im Hinblick auf diese Entwicklung ist ein ressourcenschonender Umgang mit Baumaterialien unabdinglich und somit der Einsatz von Elektroofenschlacke als Material für den Straßenbau unbedingt erstrebenswert, natürlich immer unter der Voraussetzung, dass die Verwendung des Materials keinen nachteiligen Folgen hinsichtlich des Natur- und Umweltschutzes hat. Da jedoch die Bedingungen für den Einbau im gemeinsamen Erlass des Thüringer Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (TMLNU) und des Thüringer Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur (TMWAI) zum Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau und auf der Basis der LAGA M 20 klar geregelt sind, unterliegt die Elektroofenschlacke aus Unterwellenborn einer ständigen Qualitätskontrolle, sowohl durch Eigen- als auch durch Fremdüberwachung. Zudem wird das Material vierteljährlich im Labor hinsichtlich seiner chemischen Inhaltsstoffe überprüft und unterschreitet die geforderten Werte deutlich, weshalb es durch die Verwendung als Baustoff in ungebundenen Oberbauschichten des Straßenbaus keine relevanten Umweltrisiken birgt.

³⁴ Vgl.: <http://www.overshootday.org>; 14.08.2017

6 Schlussbetrachtung

Die Problemstellung der vorliegenden Diplomarbeit bestand in der Erforschung der Einsatzmöglichkeiten des industriellen Nebenproduktes Elektroofenschlacke in ungebundenen Oberbauschichten des Straßenbaus und deren Auswirkungen auf die spätere Straße selbst, die Umwelt und das Bauunternehmen.

Im Rahmen der Untersuchungen konnte anhand von Vergleichen zwischen den Laborwerten der Elektroofenschlacke mit verschiedensten Normen, Richtlinien und Regelwerken festgestellt werden, dass der Einsatz des Materials keine unnötige Belastung der Umwelt darstellt. Die Inhaltsstoffe der Elektroofenschlacke erfüllen die Anforderungen der LAGA M 20 und können somit als Z1 Material eingestuft werden. Selbst die Prüfwerte zur Beurteilung des Wirkungspfads Boden-Grundwasser aus der Bundes-Bodenschutzverordnung werden durch die von der Elektroofenschlacke erreichten Werte deutlich unterboten. Der beschränkte offene Einbau nach Einbauklasse Z1 ist also gewährleistet und aufgrund der erreichten Werte unbedenklich hinsichtlich einer potenziellen Umweltgefährdung. Zudem ist durch die Eigen- und Fremdüberwachung des Materials ohnehin eine ständige Qualitätssicherung gegeben. Gegenteilig zu den Befürchtungen, der Einsatz von Elektroofenschlacke wirke sich negativ auf die Umwelt aus, bietet dieser sogar einen umwelttechnischen Mehrwert, da er vorhandene Ressourcen schont und somit aktiv zum Umweltschutz beiträgt. Aus diesem Grund ist ein Einsatz des Materials, sofern alle rechtlichen Voraussetzungen erfüllt sind, unbedingt zu empfehlen, denn auch für den Straßenbau selbst liefert die Schlacke beste Voraussetzungen.

Aufgrund der Betrachtung voran gegangener Projekte wurde ersichtlich, dass es sich bei der Schlacke um ein äußerst standfestes Material handelt, welches sich dementsprechend als Baustoff für den Straßenbau sehr gut eignet und dabei aufgrund der Förderung durch das Stahlwerk Thüringen auch noch preislich eine attraktive Alternative darstellt. Durch die Einsparungen, die mit der Verwendung von Elektroofenschlacke erzielt werden können, öffnen sich dem Bauunternehmen völlig neue Wettbewerbschancen in Ausschreibungssituationen.

Einzig die Probleme bei Erreichung der geforderten Verdichtungswerte stellen ein Defizit beim Einsatz der Elektroofenschlacke dar. Zwar haben diese anfänglichen Abweichungen zu den Forderungen nach ZTV SoB-StB erfahrungsgemäß keine Auswirkungen auf die spätere Standsicherheit der Straße, dennoch muss hierfür eine geeignete Lösung gefunden werden, mit der sowohl das ausführende

Bauunternehmen als auch der Auftraggeber gleichermaßen einverstanden sind. Zudem wären weiterführende Forschungen zu geeigneten Verdichtungsmaßnahmen des Materials sehr zu empfehlen, um die Anforderungen künftig erfüllen zu können und nicht auf Vereinbarungen mit dem Auftraggeber angewiesen sein zu müssen.

Letztendlich erscheint ein Einsatz der Elektroofenschlacke im Straßenbau allerdings tatsächlich sinnvoll und bietet sowohl bau- als auch umweltschutztechnisch Auftraggebern und Auftragnehmern die Möglichkeit, ihre Projekte im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes abzuwickeln.

Literaturverzeichnis

Fachbücher

ALBERT, A.: Bautabellen für Ingenieure 21. Auflage,
Bundesanzeiger Verlag, Köln, 2014

BLÄSI, H., RIENER, M., SCHLIEBNER, H., & ZWANZIG, J.
Lernfeld Bautechnik, Fachstufen Straßenbauer
Verlag Handwerk und Technik GmbH, Hamburg, 2001

HUTSCHENREUTHER, J., & WÖRNER, T.
Asphalt im Straßenbau (Bd. 1)
Verlag für Bauwesen Berlin, 1998:.

KÖNIG, F.
Verdichtung im Erd- und Straßenbau
Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, Wuppertal, 1994.

LÖTHER, W.
Straßenbau-Praxis
Bauwerk Verlag Berlin, 2001

NATZSCHKA, H
Straßenbau - Entwurf und Bautechnik (Bd. 3)
Springer Verlag, Wiesbaden, 2011

STRAUBE, E., & KRASS, K.
Straßenbau und Straßenerhaltung - Ein Handbuch für Studium und
Praxis (Bd. 9)
Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin, 2009

VELSKE, S., MENTLEIN, H., & EYMANN, P.
Straßenbautechnik (Bd. 4)
Werner-Ingenieur-Texte WIT, Düsseldorf, 1998

Normen und Regelwerke

Deutsches Institut für Normung e. V. . (Juni 2009).

DIN 4301. Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen

Deutsches Institut für Normung e. V. . (Juli 2010).

DIN EN 1097-2. Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung

Deutsches Institut für Normung e. V. . (August 2013).

DIN EN 13242 . Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für den Ingenieur- und Straßenbau

Deutsches Institut für Normung e. V. . (Januar 2015).

DIN EN 933-4. Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl

Deutsches Institut für Normung e. V. (April 2011). DIN EN 1097-1. Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß (Micro-Deval)

Deutsches Institut für Normung e. V. (April 2012)

DIN EN 933-3. Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung der Kornform - Plattigkeitskennzahl

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (2004)

Merkblatt über geotechnische Untersuchungen und Berechnungen im Straßenbau - M GUB

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (2003)

Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und des Unterbaus im Straßenbau. Köln: FGSV Verlag

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (2009)

Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten
im Straßenbau ZTV E-StB 09, FGSV

Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement (2012)

Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen –
RstO 12, FGSV

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau (2004)

TL Gestein-StB 04. Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im
Straßenbau

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau (2004)

TL SoB-StB 04. Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und
Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau (2004)

ZTV SoB-StB 04. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen für den Bau
von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,
Arbeitsgruppe Mineralstoffe im Straßenbau (Mai 1995)

Merkblatt für die Herstellung von Trag- und Deckschichten ohne Bindemittel,
FGSV

Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (06. November 2003)

Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA M 20), Anforderungen
an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen
- Technische Regeln -

Gesetze und Verordnungen

Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) (17. März 1998)

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten

Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV) (12. Juli 1999)

Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union (22. November 2008)

EU-Abfallrahmenrichtlinie. Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.

Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG (24. Februar 2012)

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen.

Umweltbundesamt. (Februar 2015)

Deutsches Ressourceneffizienzprogramm - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen.

Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (10. Dezember 2001)

Abfallverzeichnis-Verordnung-AVV.

Zeitungsartikel

Bayerische Gemeinde Zeitung. (26. September 2013)

Elektroofenschlacke als Ersatzbaustoff. Bayerische Gemeinde Zeitung, 8.

Dokumente aus dem Internet

BOMAG (2004)

http://www.bomag.com/de/media/pdf/WM9701_0403_rdr.pdf,

Abgerufen im Juli 2017

BSN Stahl-Nebenprodukte GmbH (April 2014)

http://www.bsn-kehl.de/bsn-de-wAssets/docs/BSN-EOS-Broschur_dt.pdf,
Abgerufen im Juli 2017

Chakar, L. (20. November 2007)

https://www.ise.kit.edu/rd_download/SBT/Kolloquium_SBT_07-11_L._Chakar.pdf, Abgerufen im Juli 2017

HKL BAUMASCHINEN GmbH (08. August 2017)

<https://www.hkl-baumaschinen.de/HKL-MIETPARK-Magazin/Ausgabe-1/HKL-Bautipp-Verdichtung>
Abgerufen im August 2017

IGEWA GmbH (2006)

<http://www.igewa.de/merkblaetter/plattendruckversuch/plattendruckversuch.pdf>
Abgerufen im Juli 2017

Karcher, K. (23. November 2011)

https://www.ise.kit.edu/rd_download/SBT/Kolloquium_SBT_2011-11-23_C.Karcher.pdf
Abgerufen im Juli 2017

Karlsruher Institut für Technologie (2013)

http://www.ise.kit.edu: http://www.ise.kit.edu/EuB_SBT_2013.pdf
Abgerufen im Juli 2017

RGA GmbH & Co. KG (2017)

<http://www.rga-schlacke.de/seiten/unserearbeit.html>
Abgerufen im August 2017

Ruppert, T., Boullie, M., Barthel, M., Lutz, R., & Haag, M. (August 2008)

Institut für Mobilität und Verkehr, Vorlesungsskript Straßenbau II:
http://transport.arubi.uni-kl.de/web/skripte/stra_bau/Entwurf_Skript_StabauII.pdf
Abgerufen im August 2017

Quellenverzeichnis

- [1] NATZSCHKA, 2011, S. 1
- [2] NATZSCHKA, 2011, S. 2
- [3] NATZSCHKA, 2011, S. 3
- [4] BLÄSI; RIENER; SCHLIEBNER; ZWANZIG, 2001, S. 15
- [5] VELSKE; MENTLEIN; EYMANN, 1998, S. 5
- [6] BLÄSI; RIENER; SCHLIEBNER; ZWANZIG, 2001, S. 17
- [7] BLÄSI; RIENER; SCHLIEBNER; ZWANZIG, 2001, S. 17
- [8] STRAUBE; KRASS, 2009, S. 16
- [9] Merkblatt für die Verdichtung des Untergrundes und des Unterbaus im Straßenbau – 2003, Kapitel 3
- [10] Merkblatt Plattendruckversuch DIN 18134
- [11] VELSKE; MENTLEIN; EYMANN, 1998, S. 1
- [12] BLÄSI; RIENER; SCHLIEBNER; ZWANZIG, 2001, S. 26
- [13] Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
- [14] LÖTHER, 2001, S. 78
- [15] TL Gestein-StB 04, S. 10
- [16] Leistungsverzeichnis der Ausbaumaßnahme B 281, März 2017
- [17] Leistungsverzeichnis der Ausbaumaßnahme B 281, März 2017
- [18] <http://www.rga-schlacke.de/seiten/unserearbeit.html>

- [19] Artikel 3, Absatz 1; EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG
- [20] Artikel 5, Absatz 1; EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG
- [21] Artikel 5, Absatz 1; Satz a bis d; EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG
- [22] Power Point Präsentation: Kolloquium für Fortgeschrittene im Straßenwesen am 20.11.2007 der Universität Karlsruhe
- [23] gemeinsamer Erlass des Thüringer Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt und des Thüringer Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur zum Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau
- [24] gemeinsamer Erlass des Thüringer Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt und des Thüringer Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur zum Einsatz von Elektroofenschlacke im Straßenbau
- [25] Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA M 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Teil II, Tabelle II.3.3-1
- [26] Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA M 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Teil II, Kapitel 3.3.3.1
- [27] Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA M 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Teil II, Kapitel 3.3.3.1
- [28] LÖTHER; 2001; S. 79
- [29] online: HKL-Baumaschinen, 2017 (09.08.2017)
- [30] online: HKL-Baumaschinen, 2017 (09.08.2017)
- [31] online: HKL-Baumaschinen, 2017 (09.08.2017)
- [32] ZTV-SoB-StB 04, S. 17

Anhangverzeichnis

- Anhang 1 Prüfprotokoll Elektroofenschlacke
- Anhang 2 Prüfprotokoll Grauwacke
- Anhang 3 Fotodokumentation EOS von der Entstehung bis zum Einbau

Anhang 3: Fotodokumentation EOS von der Entstehung bis zum Einbau



Flüssige Schlacke im Clean-Pit



Bergung der Schlacke



Zwischenlagerung vor dem Clean-Pit



Verladung auf den Spezial-Muldenkipper



Schockkühlung im Abkühlbeet



Schockkühlung im Abkühlbeet



Mischanlage



Einbau auf B 281



Einbau mit dem Grader



Verdichtung mit Gummiradwalze



Elektroofenschlacke unter Asphalt

Ehrenwörtliche Erklärung

"Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich",

1. dass ich meine Diplomarbeit mit dem Thema

Einsatzmöglichkeiten von Elektroofenschlacke in ungebundenen Oberbauschichten
des Straßenbaus am Beispiel der Ausbaumaßnahme B 281 Neustadt Orla

ohne fremde Hilfe angefertigt habe,

2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe und

3. dass ich meine Diplomarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Ort, Datum

Unterschrift