



Zentrum Geotechnik

**Recycling- und Verwertungskonzept für mineralische
Restmassen auf dem Gelände der ehemaligen Bayernka-
serne**

**Recycling and reprocessing construction and demolition
waste on the site of the former Bayernkaserne**

Julian Schmidt

Arbeit zur Erlangung des Grades
eines Master of Science (M.Sc.)

an der Technischen Universität München

**Recycling- und Verwertungskonzept für mineralische
Restmassen auf dem Gelände der ehemaligen Bayernka-
serne**

**Recycling and reprocessing construction and demolition
waste on the site of the former Bayernkaserne**

Referent: Prof. Dr.-Ing. Roberto Cudmani,
Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und
Tunnelbau

Betreuer: M. Sc. Stefan Huber

eingereicht von: Julian Schmidt
Eisenhartstr. 60, 81245 München
jusmith@web.de

München 01.12.2017

KURZZUSAMMENFASSUNG

Zur Ressourcenschonung werden im Erd- und Straßenbau vermehrt Primärbaustoffe teilweise durch Sekundärbaustoffe substituiert. Im Zuge der Baufeldfreimachung auf dem Gelände der ehemaligen Bayernkaserne kann die Stadt München durch den Einsatz der dabei anfallenden mineralischen Restmassen nach entsprechender Aufbereitung zur Schonung dieser Ressourcen beitragen. Für dieses Projekt wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verwertungskonzept erstellt, welches auch als Anleitung für ähnliche Projekte dienen soll. Zunächst wird die Menge an mineralischen Baurestmassen dargestellt, die im Verlauf der Baufeldfreimachung anfallen. Diese erreichen mittels Aufbereitung und Gütesicherung den Status von Recycling-Baustoffen (RC-Baustoffen), die weitgehend auf dem Gelände verwertet werden sollen, um die zu entsorgende Menge an mineralischen Restmassen zu minimieren. Dies würde, neben dem Beitrag zur Ressourcenschonung, zu signifikanten Kosteneinsparungen führen. Es werden die bisherigen Erfahrungen der Stadt München mit der Baufeldfreimachung und dem Recycling sowie die gesetzlichen und umwelttechnischen Bedingungen beleuchtet und die technischen Details bezüglich der Aufbereitung und die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten untersucht. Darüber hinaus werden die bautechnischen Eigenschaften von zertifizierten RC-Baustoffen aufgezeigt und die Eignung dieser für mögliche Anwendungsgebiete erläutert. Für die Erstellung des Konzeptes werden zunächst die Besonderheiten des Grundstücks aufgezeigt. Danach folgt die Beschreibung der Maßnahmen Rückbau, Aufbereitung und Verwertung sowie der Schwierigkeiten, die das Recycling betreffen. Zudem wird die Wirtschaftlichkeit der Durchführung der Verwertungsmaßnahmen analysiert und mit den Kosten für konventionelles Material und den damit verbundenen Entsorgungskosten verglichen.

ABSTRACT

In order to promote conservation of resources, primary building materials in road construction are substituted in part by secondary building materials. The City of Munich can, while clearing the land on the site of the former Bayernkaserne, make a contribution by recycling construction and demolition material into recycled aggregates and utilizing this secondary building material on the construction site. For this a recycling concept was drawn up which might also serve as a guidance for further projects. First the amount of mineral construction waste is being depicted. By processing and quality assurance this waste material reaches the status of recycled aggregates which are to be utilized to the largest possible extent on the site. This minimizes the amount of mineral waste which has to be disposed. Therefore, the experiences of the City of Munich in the field of land clearing and recycling as well as the legal and environmental conditions are illustrated and the technical details of recycling as well as the various possible applications are examined. Furthermore, the constructional features of certified RC-materials are pointed out and their suitability for possible application areas is discussed. First the characteristics of the site are illustrated, then the measures of demolition, recycling and utilisation as well as the difficulties involved in recycling are described. The economic efficiency of these processes is analysed and compared with the costs of conventional building material and the associated costs of disposing waste material.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzzusammenfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1. Hintergrund	1
2. Ziel der Arbeit	2
2.1 Motivation	2
2.2 Vorgehen	2
3. Projekt „Baufeldfreimachung ehemalige Bayernkaserne“	3
3.1 Historische und geplante Nutzung des Geländes	3
3.2 Notwendigkeit der Baufeldfreimachung	4
3.3 Bisherige Erfahrungen mit der Baufeldfreimachung	6
4. Regulatorische und normative Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit dem Einsatz von RC-Baustoffen aus aufbereiteten Baurestmassen	8
4.1 Bundesweit gültige Regelwerke	8
4.2 Landesspezifische Regelungen bezüglich der Verwertung von RC- Baustoffen in Bayern	14
4.2.1 Verfüllung von Gruben, Brüchen, Tagebauen	14
4.2.2 Verwertung in technischen Bauwerken	14
5. Aufbereitung von mineralischen Baurestmassen	18
5.1 Rückbau und Aushub	18
5.2 Aufbereitungstechnik	21
5.3 Gütesicherung	24
6. Einsatzmöglichkeiten und Bewertung der bautechnischen Eigenschaften von RC-Baustoffen aus aufbereiteten Baurestmassen	31
6.1 Einsatzmöglichkeiten und bautechnische Anforderungen	31
6.2 Erdbautechnische Eigenschaften	35
6.3 Bewertung der bautechnischen Eignung	42
7. Produktneutrale Ausschreibung von Gewerken im Erd- und Straßenbau	44
8. Recycling- und Wertungskonzept für die ehemalige Bayernkaserne	48
8.1 Grundstücksgegebenheiten	48
8.1.1 Altbebauung	48
8.1.2 Altlastenuntersuchung	49

8.1.3	Baugrundverhältnisse.....	51
8.1.3.1	Allgemeine geologische Einordnung.....	51
8.1.3.2	Bodenschichten	51
8.1.3.3	Grundwasserverhältnisse	54
8.2	Rückbau, Aufbereitung und Verwertung	55
8.2.1	Bisher durchgeführte Arbeiten	55
8.2.2	Anfallende Materialmengen und daraus abgeleitete Materialströme	56
8.2.2.1	Mengenermittlung für den Abbruch.....	57
8.2.2.2	Mengenermittlung für die Aufbereitung	64
8.2.2.3	Wasserrechtliche und planungstechnische Vorgaben.....	66
8.2.2.4	Mengenermittlung für die angestrebte Verwertung.....	69
8.2.2.5	Abgeleitete Materialströme	72
8.2.2.6	Weitere Überlegungen.....	72
8.3	Hemmnisse beim Recycling von RC-Baustoffen.....	74
8.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	75
8.4.1	Kosten für die Aufbereitung	76
8.4.2	Kosten für konventionelles Material und die Entsorgung von mineralischen Baurestmassen.....	77
8.4.3	Kostenvergleich.....	78
9.	Fazit	79
	Anhang.....	VII
	Literaturverzeichnis	VIII
	Erklärung zur Masterarbeit	XIII

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Abbruchphasen der Gebäude und Flächen des alten Flughafens.....	7
Abbildung 2: Hierarchie der Kreislaufwirtschaft	9
Abbildung 3: Verschiedene mechanische Verfahren zur Schadstoffabtrennung	19
Abbildung 4: Mobile Siebanlage (links) und mobiler Brecher (rechts)	23
Abbildung 5: Mobile (links) und stationäre (rechts) Aufbereitungsanlage	24
Abbildung 6: Gütesicherung nach DIN 18200	25
Abbildung 7: Ablauf Aufbereitung und Gütesicherung	28
Abbildung 8: Produktgruppen gemäß BRB	29
Abbildung 9: Einsatzmöglichkeiten von RC-Baustoffen	31
Abbildung 10: Steigende Anforderungen bei unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten	35
Abbildung 11: Leistungsverzeichnis Frostschutzschicht	46
Abbildung 12: Leistungsverzeichnis Lärmschutzwall	47
Abbildung 13: Abbruchphasen.....	55
Abbildung 14: Querschnitt der Asphaltflächen (links) und der Pflasterflächen (rechts).....	62
Abbildung 15: Höchstgrundwasserstände und GOK im Norden, gemittelt und im Süden....	67

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Vorteile und Nachteile eines phasenweisen Abbruchs	7
Tabelle 2: Bestimmte Regelwerke der FGSV mit hoher Verbindlichkeit.....	12
Tabelle 3: Einbauklassen mit den dazugehörigen Zuordnungswerten	15
Tabelle 4: Ausgangsstoffe bzw. Rohmaterial für Recyclingbaustoffe.....	21
Tabelle 5: Ergebnisse der Rammsondierungen und abgeleitete Zustandsgrößen der Bodenschichten	53
Tabelle 6: charakteristische Bodenmechanische Kennwerte	53
Tabelle 7: Höchstgrundwasserstände.....	54
Tabelle 8: Grundwassereigenschaften	54
Tabelle 9: Abhängigkeit der spezifischen Bauschuttmenge von der Bauwerksgröße und der Baukonstruktion für Wohn- und Nichtwohnbauten.....	58
Tabelle 10: Abhängigkeit der spezifischen Baustoffmenge von der Bauwerksgröße für Industriegebäude	59
Tabelle 11: Menge Bauschutt.....	60
Tabelle 12: Menge Keller-Beton	60
Tabelle 13: Menge Bauschutt abzüglich Keller-Beton.....	61
Tabelle 14: Menge Asphalt und Beton der befestigten Flächen.....	62
Tabelle 15: Menge Kalkschrotten und des restlichen Straßenoberbau-Materials.....	63
Tabelle 16: Menge der Verfüllungen.....	64
Tabelle 17: Abstände von Höchstgrundwasserstand zu GOK [m].....	67
Tabelle 18: Grundwasserstände, -Abstände zur GOK und -Koten.....	68
Tabelle 19: Material für die Aufbereitung	76

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS¹

A.a.O.	am angegebenen Ort
ATV	Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen
CBR-Wert	California Bearing Ratio-Wert
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BFM	Baufeldfreimachung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
B-Plan	Bebauungsplan
BRB	Baustoff Recycling Bayern e.V.
BRI	Brutto-Rauminhalt
BYK	Bayernkaserne
d	Durchmesser
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
DepV	Deponieverordnung
D _{Pr}	Verdichtungsgrad nach Proctor in %
E	Erdbau
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FSS	Frostschuttschicht
G	Gebäude
ggf.	gegebenenfalls
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
HGW	Höchster Grundwasserstand
k _r -Wert	Durchlässigkeitsbeiwert in m/s
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LA	Los-Angeles-Koeffizient
LABO	Bund-Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LAGA M 20	Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20
LB By-StB	Leistungsbeschreibung für den Straßen- und Brückenbau in Bayern

¹ Alle Abkürzungen werden sowohl im Singular als auch im Plural verwendet.

MHGW	Mittlerer höchster Grundwasserstand
mineral.	mineralisch
M T S E	Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau
N	Schlagzahl aus Sondierung
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
ProgRess II	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (Fort-schreibung)
RC	Recycling
RC-Leitfaden By 05	Anforderungen an die Verwertung von RC-Baustoffen in technischen Bauwerken (in Bayern 2005)
RKS	Rammkernsondierung
RW	Richtwert
SoB	Schichten ohne Bindemittel
SZ	Schlagzertrümmerungswert
TL	Technische Lieferbedingungen
TL Asphalt-StB	TL für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen
TL Beton-StB	TL für Baustoffe und Baustoffgemische für Trag-schichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton
TL BuB E-StB	TL für Böden und Baustoffe im Erdbau des Stra-ßenbaus
TL Gestein-StB	TL für Gesteinskörnungen im Straßenbau
TL SoB-StB	TL für Baustoffgemische und Böden zur Herstel-lung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
TP	Technische Prüfbestimmungen
TP BF-StB	TP für Boden und Fels im Straßenbau
TP Gestein-StB	TP für Gesteinskörnungen im Straßenbau
u. GOK	unter der Geländeoberkante

ü. GOK	über der Geländeoberkante
ü. NN	über Normalnull
Z	Zuordnungswert
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien
ZTV Asphalt-StB	ZTV für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt
ZTV Beton-StB	ZTV für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton
ZTV E-StB	ZTV für Erdarbeiten im Straßenbau
ZTV SoB-StB	ZTV für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
ZTV Stra Mü	ZTV für die Ausführung von Straßenbauarbeiten in München
ZTV wwG-StB By	ZTV für die einzuhaltenden wasserwirtschaftlichen Güte Merkmale bei der Verwendung von Recycling-Baustoffen im Straßenbau

1. HINTERGRUND

Das Recycling in der Bauindustrie gewinnt immer mehr an Bedeutung, da sie den ressourcenintensivsten Wirtschaftssektor darstellt und zudem den meisten Abfall produziert. Darüber hinaus wächst die Notwendigkeit der Ressourceneffizienz durch die Einführung der europäischen Abfallrahmenrichtlinie im Jahr 2008 und der Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) im Jahr 2012 sowie die Fortschreibung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess II) im Jahr 2016. Grundsätzlich besteht die ausdrückliche Pflicht zur Verwertung nutzbarer Abfälle gemäß KrWG. Allerdings werden zum Teil noch schadstoffbelastete Baumaterialien beim Rückbau unzureichend aussortiert. Folglich können diese mineralischen Baurestmassen nur noch in Abbaustätten verfüllt oder in einer Deponie entsorgt werden. Auch bautechnisch ungeeignete Materialien, wie Putze oder Porenbeton, werden nicht aufbereitet, sondern möglichst aussortiert.

In Deutschland sind im Jahr 2014 insgesamt 202 Mio. t mineralische Bauabfälle angefallen. Von den fünf mengenmäßig und damit für die Praxis relevanten Fraktionen waren es 118,5 Mio. t Boden und Steine (58,7 %), 54,6 Mio. t Bauschutt (27,0 %), 14,6 Mio. t Baustellenabfälle (7,2 %), 13,6 Mio. t Straßenaufbruch (6,8 %) sowie 0,7 Mio. t Bauabfälle auf Gipsbasis (0,3 %).² Zwar wurden immerhin knapp 90 % aller anfallenden mineralischen Restmassen einer Verwertung zugeführt, aber bei ca. 56 % der Gesamtmasse fanden Verfüllmaßnahmen statt, die gemäß KrWG als nachrangigste Form der Verwertung zählen und dazu beitragen, den geforderten Verwertungsprozentsatz von 70 Prozent gemäß § 14 Kreislaufwirtschaftsgesetz zu erreichen bzw. zu übertreffen. Trotzdem wurde etwa ein Drittel des verwerteten Materials dem Recycling, der priorisierten Verwertungsmethode, zugeführt.

Recycling ist nach dem KrWG „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden [...] [und] schließt [...] die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind“ aus.³ Als Verwertung werden die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling sowie die energetische Verwertung und die Verfüllung bezeichnet.⁴ Durch das Baustoffrecycling und die Wiederverwendung von Bodenmaterial kann eine Reduzierung des Energie- und Flächenverbrauchs sowie des CO₂-Ausstoßes erreicht werden, da die aufbereiteten Baurestmassen i.d.R. direkt auf dem Baugrund, auf dem sie angefallen sind, auch wieder verwertet werden und sich somit längere Transportwege erübrigen.

² Vgl. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. 2017, S. 6

³ KrWG, § 3 Abs. 25

⁴ A.a.O., § 3 Abs. 23ff

2. ZIEL DER ARBEIT

2.1 MOTIVATION

Wegen des hohen mineralischen Bauabfallaufkommens und den damit verbundenen Auswirkungen wie den steigenden Entsorgungskosten und zunehmender Entsorgungsengpässen, ist es unabdingbar für Bauherren, alle Aspekte zur Verwertung von mineralischen Baurestmassen zu kennen und zu nutzen. Dabei muss der Verwertungspflicht gemäß KrWG nachgekommen werden. Insbesondere bei einem so großen Projekt, zudem einem Vorzeiprojekt der Stadt München, bieten sich im Zusammenhang mit der Verwertung eine Vielzahl von Möglichkeiten an, die jedoch einige Schwierigkeiten in sich bergen können. Daher soll diese praxisorientierte Arbeit als Anleitung für Personen oder Institutionen verstanden werden, die Aufgabenstellungen in diesem Themenkomplex bearbeiten. Vor allem die Kostenersparnis durch eine Verwertung von aufbereiteten Baurestmassen direkt auf dem Gelände der Bayernkaserne ist ein erheblicher Vorteil gegenüber dem Einsatz von Primärmaterial zusammen mit der Entsorgung der mineralischen Restmassen.

2.2 VORGEHEN

Die Arbeit beinhaltet ein Konzept, das als Anleitung für das Projekt und weitere derartige Projekte dienen soll. Es werden zuerst allgemein gültige Grundsätze abgeleitet, die bei der Verwertung von aufbereiteten mineralischen Baurestmassen zu beachten sind. Daraus resultiert eine detaillierte Herangehensweise bezüglich der Verwertung mineralischer Baurestmassen. Das Projekt „Baufeldfreimachung ehemalige Bayernkaserne“ und die bisherigen Erfahrungen der Stadt München mit der Baufeldfreimachung werden einleitend vorgestellt. Dann werden die gesetzlichen und umwelttechnischen Rahmenbedingungen behandelt, die bei der Verwertung von aufbereiteten Baurestmassen zu beachten sind. Dabei werden die bundesweit geltenden Gesetze und Regelungen betrachtet sowie die landesspezifischen Regelungen in Bayern herausgearbeitet. Anschließend werden die Verfahrensschritte charakterisiert, wie aus einer mineralischen Baurestmasse ein zertifizierter Baustoff wird. Dann werden mögliche Einsatzmöglichkeiten und die erdbautechnischen Eigenschaften von aufbereiteten Baurestmassen beschrieben, um einen Eindruck von der bautechnischen Eignung dieser Materialien zu gewinnen. Darauf folgt das Verwertungskonzept, bei dem zunächst die Besonderheiten auf dem Grundstück erläutert werden. Darüber hinaus werden der Rückbau, die Aufbereitung und die mögliche Verwertung beschrieben. In der Darstellung des Konzeptes verdeutlichen die entstandenen Materialströme die verschiedenen Stufen, die

mineralische Baurestmassen durchlaufen müssen, damit sie am Ende verwertet werden können. Die Schwierigkeiten, die sich aus der Themenstellung für das Projekt ergeben, werden anschließend dargestellt. Schließlich werden die ökonomischen Aspekte beleuchtet, die für die Stadt München vermutlich ein starkes Argument bei der Abwicklung der Baufeldfreimachung darstellen. Die Arbeit ist auf die maximale Verwertung und damit auf die größtmögliche Aufbereitung ausgerichtet. Dies geschieht unter Beachtung der Qualität der RC-Baustoffe, der umwelttechnischen Bedingungen und im Einklang mit den gesetzlichen Regelungen. Es wird von dem Willen der Stadt München ausgegangen, die maximale Verwertung unter Berücksichtigung der vorgenannten Aspekte anzustreben, die dann zusammen mit der minimalen Entsorgung letztendlich die maximale Kostenersparnis zur Folge hat. Ergänzend sind im Anhang und in der Anlage relevante Informationen aufgeführt, die die Verwertung im Zuge der Baufeldfreimachung auf dem Gelände der ehemaligen Bayernkaserne betreffen. In der Anlage befinden sich u.a. größere Pläne, die Tabellen der Mengenkalkulation und die Dokumente bezüglich der Gütesicherung.

3. PROJEKT „BAUFELDFREIMACHUNG EHEMALIGE BAYERNKASERNE“

Auf dem Gelände der ehemaligen Bayernkaserne in München fallen im Zuge von Abbruchmaßnahmen, von der Herstellung der Kampfmittelfreiheit und von der Altlastensanierung durch den Bauherrn, der Stadt München, mineralische Restmassen an, die nach einer geeigneten Aufbereitung wieder auf dem Gelände eingesetzt werden sollen. Zunächst werden die unterschiedlichen Nutzungen des Areals aufgezeigt.

3.1 HISTORISCHE UND GEPLANTE NUTZUNG DES GELÄNDES

Das Gelände der ehemaligen Bayernkaserne (BYK) befindet sich im Stadtteil Freimann im Norden von München zwischen der Heidemannstraße und dem Helene-Wessel-Bogen und umfasst eine Fläche von 483.940 m². Die Bebauung besteht insgesamt aus ca. 70 Gebäuden und einer südlich-mittig gelegenen Sportanlage.⁵ An das Gelände schließen im Osten und Westen beidseitig direkt Nachbarbebauungen an.⁶

⁵ Vgl. Urban und Blazevic 2007, S. 6

⁶ Vgl. Möbius 2017, S. 3

Die bis dato ca. 80-jährige Nutzung des Geländes begann mit dem Bau der Kasernenanlage im Jahre 1936 unter dem damaligen Namen „General Wever Kaserne“. In der Zeit bis 1945 hatte dort das Luftverteidigungsregiment für die Stadt München seinen Standort. Bei Kriegsende wurde das Areal von der US-Army beschlagnahmt, zu „Henry Kaserne“ umbenannt und ein Panzerbataillon stationiert. Der Name wechselte erneut bei der Übernahme durch die Bundeswehr im Jahr 1969 zu „Bayernkaserne“. Es wurden verschiedene Truppenteile stationiert und verlegt. Darauf folgten in den Jahren 2007 bis 2011 unterschiedliche Zwischennutzungen, u.a. durch zivile Betriebe. Mitte des Jahres 2011 wurde die Bayernkaserne vom Bund an die Stadt München übergeben. Derzeitig wird das Gelände als Unterkunft für Asylbewerber, für das Kälteschutzprogramm, für Wohnungslose und für die Verwaltung genutzt.⁷

Zukünftig soll auf dem Gelände, an das noch ein kleineres Nachbargrundstück angeschlossen wird, ein neues Stadtquartier nach Vorbild des Bryant Parks in New York entstehen, mit der Idee einer „[s]chöne[n] Welt: Menschen im Park, Hochhäuser, urbanes Leben [...]“,⁸ mit bis zu 6000 Wohnungen für 15.000 Personen. Das Konzept stammt von den Gewinnern des städtebaulichen Wettbewerbs, dem Münchner Büro Hilmer Sattler Architekten Ahlers Albrecht und dem Kollegen vom Büro Max Dudler sowie dem Landschaftsarchitekten Mahl Gebhard. Das Bebauungsplanverfahren, das 2016 begonnen wurde, soll im Jahre 2018 durch den Billigungs- und den Satzungsbeschluss abgeschlossen werden. Der B-Plan (s. Anlage 1.1) schließt ca. 30 Gebäude mit Bauhöhen zwischen 40 und 70 m, die Mitte des Jahres 2019 bis 2027 realisiert werden sollen, sowie große Freiflächen im Norden und Süden ein.⁹

3.2 NOTWENDIGKEIT DER BAUFELDFREIMACHUNG

Die Baufeldfreimachung hat das Ziel, baureife Flächen für Baufelder, Erschließungsmaßnahmen und Grünflächen auf einem früher bebauten Grundstück zu schaffen. Dabei werden Bauwerke, Verkehrs- und Leitungsanlagen sowie belastete mineralische Baurestmassen beseitigt, um im Resultat ein unbelastetes und freies Baufeld für die Anschlussnutzung zu erhalten.

⁷ Vgl. Urban und Blazevic 2007, S. 11

⁸ Süddeutsche Zeitung 26.04.2017

⁹ Ebenda

Da Käufer heute Grundstücke nur mit einem transparenten Boden erwerben möchten, um die finanziellen Risiken, z.B. durch Altlasten, einschätzen zu können, muss die Baufeldfreimachung durch den Verkäufer möglichst günstig und effizient durchgeführt werden. Das finanzielle Risiko und der Aufwand, der mit dem belasteten Bodenaushub und Baurestmassen verbunden ist, kann nur durch entsprechende Untersuchungen und Erfahrung abgeschätzt werden. Transparent heißt, dass jegliche Besonderheiten des Grundstücks dokumentiert sind bzw. der Kunde weiß, worauf er sich einlässt. Das wird erreicht, indem i.d.R. die vorhandenen belasteten Auffüllungen bis zum gewachsenen Boden ausgetauscht und die belasteten Bauteile entfernt werden.¹⁰

Diese können unter Umständen folgende Risiken enthalten:

- Schadstoffe wie z.B. Asbest, Polychlorierte Biphenyle (PCB), Dichlordiphenyltrichloräthan (DDT), Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder Schwermetalle¹¹
- Kampfmittel von Bombenrichtern, Bodenkämpfen und militärischer Nutzung
- Reste früherer Bauwerke wie Fundamente, Leitungen und Schächte
- Störstoffe wie Plastik, Metall oder Holz

Gerade bei einem so großen Areal wie der Bayernkaserne, das später auf mehrere Investoren verteilt werden soll, ist es im Sinne des Materialrecyclings einfacher, alle Baufelder gemeinsam freizumachen. Die Logistik gestaltet sich zwar komplex, ist aber im Vergleich zu der Logistik, die jedes einzelne Baufeld für sich erfordern würde, in Bezug auf die Lagerung, Nutzung und den Einbau von Abbruchmaterial simpler, da nun das gesamte Gelände zur Verfügung steht.

Die Komplexität steigt insbesondere, weil sich die Vorgänge Abbruch und Zwischennutzung einiger Gebäude durch die aktuelle Nutzung als Unterkunft für Flüchtlinge und Wohnungslose mit denen der Freimachung und Neubau überlagern. Anfallende Deponiegebühren für das Entsorgen von Bauschutt können außerdem verringert werden, da das Material nach einer möglichen Aufbereitung an anderen Stellen, z.B. dem Landschaftsbau, wieder eingesetzt werden kann.¹²

Die Erfahrung bezüglich der Baufeldfreimachung, die die Stadt München als Grundstückseigentümer bereits durch zwei einschlägige Projekte erworben hat, soll im Folgenden dargestellt werden. Ein wichtiger Punkt ist, dass bei beiden Vorhaben im Zuge der Baufeldfreimachung mineralische Baurestmassen zu RC-Baustoffen aufbereitet wurden, die komplett

¹⁰ Vgl. Möbius 2006, S. 6ff

¹¹ Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt 2003, S. 16ff

¹² Vgl. Möbius 2006, S. 6ff

verwertet wurden, obwohl anfangs die Akzeptanz für das RC-Material und der Bedarf für die Baumaßnahmen nicht beurteilt werden konnten.¹³

3.3 BISHERIGE ERFAHRUNGEN MIT DER BAUFELDFREIMACHUNG

Mit der Baufeldfreimachung des Flughafens München-Riem und der Baufeldfreimachung der Alten Messe München konnte die Stadt München bereits Erfahrungen bei dieser Aufgabenstellung sammeln. Die wesentlichen Aspekte, die im Zusammenhang mit der Verwertung und der Entsorgung von mineralischen Baurestmassen stehen, werden erläutert.

Mit der Freimachung des Flughafen-Geländes wurde 1992 begonnen. Das Areal umfasste ca. 500 ha und war „[i]n den [...] Jahren [...] die größte Abbruch- und Hochbaustelle in Bayern und in abfallwirtschaftlicher Sicht eine Herausforderung für alle Beteiligten.“¹⁴ Insgesamt fiel bis zum Ende des Rückbaus im Jahre 1998 u.a. eine Bauschuttmenge von 1.240.000 t an. Davon konnten fast zwei Drittel auf dem Gelände wieder eingesetzt werden, während nur ein Prozent entsorgt werden musste. Das Ziel der Stadt München, die bei diesem Projekt eine Vorbildfunktion innehatte, „Wiedereinsatz verwertbarer Materialien auf dem Flughafengelände und damit Vermeidung unnötiger Transporte sowie Inanspruchnahme von Deponieraum nur in Ausnahmefällen“¹⁵, konnte erreicht werden. Der Großteil der RC-Baustoffe wurde im Straßenbau eingesetzt, der Rest als Verfüllmaterial für Kiesgruben und Anschüttungen auf dem Flughafengelände verwertet.

Bei dem Vorhaben wurde ein phasenweises Abbruchkonzept erarbeitet, da auch wegen der Zwischennutzung einiger Gebäude u.a. für Konzerte und Flohmärkte, immer nur die Flächen freigemacht werden konnten, die endgültig für Baumaßnahmen bereitgestellt werden mussten. In der nachfolgenden Abbildung stellen die Farben die verschiedenen Abbruchphasen dar, in denen die farblich gekennzeichneten Gebäude, Flächen und Anlagen zurückgebaut wurden.

¹³ Vgl. Möbius 2017, S. 3

¹⁴ Möbius und Dormuth 1997, S. 5

¹⁵ A.a.O., S. 13

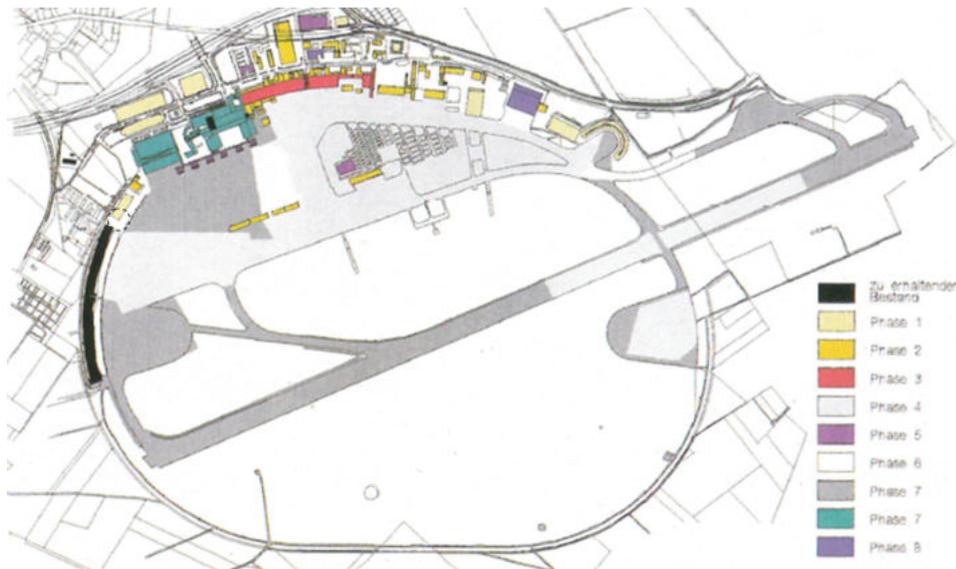


ABBILDUNG 1: ABBRUCHPHASEN DER GEBÄUDE UND FLÄCHEN DES ALTEN FLUGHAFENS¹⁶

Als Vor- und Nachteile der angewandten phasenweisen Abbruchmethode können die folgenden Punkte genannt werden:

TABELLE 1: VORTEILE UND NACHTEILE EINES PHASENWEISEN ABBRUCHS¹⁷

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - Zusätzliche Mieteinnahmen durch die Zwischennutzung - Nutzung der Verkehrsflächen als Baustraßen → geringere Staubentwicklung, weil keine Baustraßen mit ungebundener Deckschicht - Kleinere Arbeitsschritte → Bewältigung auch durch mittelständische Unternehmen - Nutzung der Erfahrung der ersten Abbruchphasen für weitere Ausschreibungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoher Sicherheitsbedarf wegen der Zwischennutzung und der Aufrechterhaltung der Ent- und Versorgungsleitungen - Sperre für den Abbruch von Leitungen in den Abbruchbereichen wegen der Erhaltung - Keine Pufferzeiten für Störungen wegen spätestmöglichem Abbruch der zwischengenutzten Gebäude

¹⁶ Möbius und Dormuth 1997, S. 20

¹⁷ Eigene Darstellung, vgl. Möbius und Dormuth 1997, S. 19f

Die Alte Messe mit ihrer Gesamtfläche von 368.000 m² wurde innerhalb von neun Jahren freigemacht. Dabei konnten von 856.000 t angefallenen Bauschutt und Boden 530.000 t nach entsprechender Aufbereitung verwertet werden. Durch das Recycling und den Einsatz direkt auf dem Gelände und bei anderen städtischen Bauprojekten durch die Stadt München konnten fünf Mio. Euro eingespart werden. Infolge der zusätzlichen Übernahme des Facility Managements und der Baustellenkoordination konnten die noch genutzten Hallen und die Baustellen mit den Medien Strom und Wasser bis zur Neuerschließung des Areals bedient werden. Des Weiteren konnte durch regelmäßige Abstimmung sichergestellt werden, dass nach Baubeginn überall genügend Flächen vorhanden waren und der Bauverkehr nicht beeinträchtigt wurde.¹⁸ Wegen der Zwischennutzung wurde auch bei diesem Projekt ein phasenweises Abbruchkonzept erarbeitet (vgl. Punkt 1.2.2).

4. REGULATORISCHE UND NORMATIVE RAHMENBEDINGUNGEN IM ZUSAMMENHANG MIT DEM EINSATZ VON RC-BAUSTOFFEN AUS AUFBEREITETEN BAURESTMASSEN

Nachfolgend werden die entscheidenden Normen- und Gesetzestexte genannt, die im Zusammenhang mit der Verwertung von RC-Baustoffen stehen. Dazu wird auf das Abfallrecht, das einen Teil des Umweltrechts darstellt, auf die Vertragsbedingungen bei Bauleistungen und auf technische Regelwerke eingegangen.

4.1 BUNDESWEIT GÜLTIGE REGELWERKE

Die wesentlichen übergeordneten Gesetze sind das KrWG von 2012, mit dem die EU-Abfallrahmenrichtlinie in nationales Recht umgesetzt wurde, das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) von 1999 mit der Bundes-Bodenschutz und -Altlasten-verordnung (BBodSchV) als Ergänzung, das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) von 2013 und die Deponieverordnung (DepV) von 2009.

¹⁸ Vgl. Möbius 2006, S.17

Gemäß KrWG, dem Grundlagengesetz im Bereich Abfall, muss die „Schonung der natürlichen Ressourcen [...] [gefördert] und [...] [der] Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen [...] [sichergestellt werden]“. ¹⁹ Die Zielhierarchie stellt sich folgendermaßen dar:



ABBILDUNG 2: HIERARCHIE DER KREISLAUFWIRTSCHAFT²⁰

Das Recycling und die sonstige stoffliche Verwertung sollen gefördert werden.²¹ Abfälle sind laut KrWG § 3 Abs. 1 alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder muss. Eine Vermischung oder Verdünnung von Abfällen soll vermieden werden.²² Überdies ist ein entscheidender Aspekt das Ende der Abfalleigenschaft eines Stoffes, sobald er einer Verwertung zugeführt wurde.²³ Darüber hinaus zählt ausgehobener Boden als Abfall, außer er ist nicht kontaminiert und wird direkt auf der Baustelle verwendet.²⁴ Gemäß KrWG soll möglichst hochwertig verwertet werden.²⁵ Als Abfallerzeuger wird jede natürliche oder juristische Person bezeichnet, durch deren Tätigkeit Abfälle anfallen oder Behandlungen zur Veränderung des Abfalls herbeiführt werden.²⁶ Weiterhin ist der Erzeuger „grundsätzlich derjenige, der als Inhaber der tatsächlichen Sachherrschaft die letzte Ursache für die Umwandlung einer Sache in Abfall gesetzt hat.“²⁷ Darüber hinaus liegt die Entsorgungsverantwortung für die entstandenen Bau- und Abbruchabfälle, bis zur endgültigen Entsorgung, beim Bauherrn.²⁸ Außerdem darf Abfall nur deponiert werden, wenn keine

¹⁹ KrWG, § 1

²⁰ A.a.O., § 6 Abs. 1, zitiert nach BMUB und BMVg 2016, S. 23

²¹ Vgl. KrWG, § 14

²² A.a.O., § 9 Abs. 2

²³ Vgl. KrWG, § 5

²⁴ A.a.O., § 2 Abs. 2 Nr. 11

²⁵ Vgl. KrWG, § 8 Abs. 1

²⁶ A.a.O., § 3 Abs. 8

²⁷ Bundesverwaltungsgericht, Urteil vom 15.10.2014

²⁸ Vgl. KrWG § 15 Abs. 1 und § 50, Abs. 1, zitiert nach BMUB und BMVg 2016, S. 65

andere Option der Verwertung möglich ist.²⁹ Die Vorgehensweise mit diesen Abfällen beschreibt die DepV von 2009.

Das BBodSchG zielt auf die nachhaltige Sicherung oder Wiederherstellung der Funktionen des Bodens ab. Schädliche Bodenveränderungen sind danach abzuwehren.³⁰ Nach § 3 wird das Gesetz allen dort genannten Gesetzen untergeordnet, solange diese Gesetze, z.B. das KrWG, die Belange im Zusammenhang mit der Einwirkung auf den Boden regeln. Gemäß BBodSchG dürfen keine schädlichen Bodenveränderungen hervorgerufen werden. Bezüglich der Verwertung ist der Einbau von belastetem Material möglich, soweit ein Sanierungsplan den Schutz der Allgemeinheit sicherstellt.³¹ Dem BBodSchG steht die BBodSchV ergänzend gegenüber und konkretisiert u.a. Regeln für die Vorsorge gegen das Entstehen von schädlichen Veränderungen.³² So dürfen zur Herstellung einer durchwurzelbaren Bodenschicht in und auf Böden nur Bodenmaterial sowie bestimmtes Baggergut und Gemische von Bodenmaterial mit bestimmten Abfällen verwendet werden.³³ Die durchwurzelbare Bodenschicht ist die „Bodenschicht, die von den Pflanzenwurzeln in Abhängigkeit von den natürlichen Standortbedingungen durchdrungen werden kann.“³⁴ Beim Bau von öffentlichen Straßen gilt das BImSchG, das zum Schutz, zur Vorsorge, zur Vermeidung und zur Verminderung von schädlichen Umwelteinwirkungen dient.³⁵

Eine Erneuerung der Bundesbodenschutzverordnung wird die in die sog. Mantelverordnung eingebettete Ersatzbaustoffverordnung darstellen. „Mit der Mantelverordnung verfolgt das [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit] [...] mehrere Ziele:

1. Schaffung eines [bundesweiten] abgestimmten und in sich schlüssigen Gesamtkonzeptes für die Verwertung von mineralischen Abfällen
2. Deutliche Erleichterungen für den Verwaltungsvollzug und die betroffene Wirtschaft
3. Gewährleistung eines ausreichenden Schutzes des Grundwassers vor Verunreinigungen und des Bodens vor schädlichen Veränderungen“³⁶

Der Entwurf der Mantelverordnung, der am 03. Mai 2017 durch das Bundeskabinett beschlossen wurde, strebt somit eine bundeseinheitliche und rechtsverbindliche Vollzugspraxis für den Einsatz von Sekundärbaustoffen in technischen Bauwerken an.³⁷ Von der Bundesregierung gesetzlich bindend erlassen wird diese Regelung voraussichtlich in der nächsten Legislaturperiode.

²⁹ KrWG, § 7 Abs. 2

³⁰ Vgl. BBodSchG, § 1

³¹ A.a.O., § 4 Abs. 1 und § 13 Abs. 5

³² Vgl. BBodSchV, § 10

³³ A.a.O., § 12 Abs. 1

³⁴ BBodSchV, § 2 Nr. 11

³⁵ Vgl. BImSchG, § 1 Abs. 1f

³⁶ Bertram 2015, S. 1

³⁷ Vgl. Gutachterbüro Dipl.-Geol. Gernot Stracke

Für die Planungsphase einer Baumaßnahme sind die „Verdingungsordnungen für Bauleistungen Teil C – Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen“ (ATV) relevant, da diese Hinweise für die Leistungsbeschreibung in Bezug auf allgemeine Regelungen und Erdbauarbeiten enthalten.³⁸ Die darin enthaltene DIN 18299 „Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art“ legt Regeln für Stoffe und Bauteile fest. Dabei gelten RC-Baustoffe, die in ein Bauwerk als Baustoffe eingehen, als ungebraucht, wenn sie für die entsprechende Verwendung geeignet und aufeinander abgestimmt sind. Sie zählen damit gegenüber Primärbaustoffen als gleichwertig.³⁹ Auch die in den ATV enthaltene DIN 18300 „Erdbauarbeiten“ ist von Bedeutung, da hier neben dem Lösen, Laden, Fördern, Einbauen und Verdichten von Boden und Fels das Gleiche für RC-Baustoffe gilt.⁴⁰

Weitere relevante Regelwerke stellen die Regelwerke der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) dar. Um einen eindeutigen, erfüllbaren Bauvertrag abzuschließen, muss der Auftraggeber bei der Ausschreibung eine klare Vorstellung von den erforderlichen Eigenschaften des Bauwerks haben. Hierbei sind die technischen Regelwerke der FGSV zu beachten. Bei einem öffentlichen Auftraggeber sind diese immer Vertragsbestandteil. Es wird u.a. unterschieden in die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien“ (ZTV), die „Technischen Lieferbedingungen“ (TL) und die „Technischen Prüfvorschriften“ (TP). Sie bestehen nebeneinander und haben eine hohe Verbindlichkeit, soweit sie vereinbart werden. Zudem regeln sie unterschiedliche Bereiche und sind wie beim Einsatz von Primärbaustoffen einzelvertraglich festzulegen.

Die ZTV stellen die deutschen Vertragsbedingungen dar, die zur Herstellung einer Schicht im Straßenbau erforderlich sind. Wenn es um die Herstellung und Lieferung eines Baustoffgemisches geht, sind die unterschiedlichen TL einschlägig. Die „TL für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004, Fassung 2007“ (TL Gestein-StB 04/07) gelten für alle Einsatzgebiete bei der Lieferung von Gesteinskörnungen. Die Prüfung von Gesteinskörnungen regeln die „TP für Gesteinskörnungen im Straßenbau“ (TP Gestein-StB) für den Straßenoberbau und die „TP für Boden und Fels im Straßenbau“ (TP BF-StB) für den Straßenunterbau.

³⁸ Vgl. Krass et al. 2006, S. 15f

³⁹ Vgl. DIN 18299, Abschnitt 2.1ff

⁴⁰ Vgl. DIN 18300, Abschnitt 1.1f

Die nächste Tabelle gibt einen Überblick über Regelwerke der FGSV. Dabei können je nach Einsatzgebiet die geltenden Anforderungen abgelesen werden.

TABELLE 2: BESTIMMTE REGELWERKE DER FGSV MIT HOHER VERBINDLICHKEIT⁴¹

Einsatzgebiet Anforderungen	Tragschichten und Fahrbahndecken aus Beton	Verkehrsflächen aus Asphalt	Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (SoB)	Erdarbeiten (E) im Straßenbau
Herstellung einer Schicht	ZTV Beton-StB	ZTV Asphalt-StB	ZTV SoB-StB	ZTV E-StB
Herstellung und Lieferung eines Baustoffgemisches	TL Beton-StB	TL Asphalt-StB	TL SoB-StB	TL BuB E-StB
Lieferung einer Gesteinskörnung	TL Gestein-StB	TL Gestein-StB	TL Gestein-StB	
Prüfung einer Gesteinskörnung	TP Gestein-StB	TP Gestein-StB	TP Gestein-StB	TP BF-StB

Die Inhalte der genannten Regelwerke werden nachfolgend kurz dargelegt, da diese auch im Zusammenhang mit Recyclingvorhaben relevant sind.

In den „ZTV für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“, Ausgabe 2007, Änderung/Ergänzung 2013 (ZTV Beton-StB 07), stehen die Anforderungen für den Bau von gebundenen Tragschichten und Betondecken, die bei der Fertigung von Schichten im Straßenoberbau und bei anderen Straßenflächen von Bedeutung sind.⁴² Die „ZTV für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt“, Ausgabe 2007, Fassung 2013 (ZTV Asphalt-StB 07/13), beschreiben die Anforderungen an die Herstellung von Schichten in Asphaltbauweise.⁴³ Für die Bedingungen die an den Erdbau im Straßenbau gestellt werden, sind die „ZTV für Erdarbeiten im Straßenbau“, Ausgabe 2017 (ZTV E-StB 17), ausschlaggebend.⁴⁴ Wenn es um die Anforderungen an die Herstellung von ungebundenen Schichten im Straßenoberbau geht, müssen die „ZTV für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau“, Ausgabe 2004, Fassung 2007 (ZTV SoB-StB 04), beachtet werden.⁴⁵

⁴¹ Eigene Darstellung in Anlehnung an Benson 2010, S. 9 und Habermann 2009, S. 3

⁴² Vgl. ZTV Asphalt-StB 07/13, Abschnitt 1.1

⁴³ Vgl. ZTV Beton-StB 07, Abschnitt 1.1

⁴⁴ Vgl. ZTV E-StB 17, Abschnitt 1.1

⁴⁵ Vgl. ZTV SoB-StB 04, Abschnitt 1.1

Die „TL für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen“, Ausgabe 2007, Fassung 2013 (TL Asphalt-StB 07/13) beinhalten Bedingungen an Asphaltmischgut, das für die Herstellung von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt genutzt wird.⁴⁶ Die Anforderungen für Baustoffe, die zur Herstellung von Oberbauschichten aus Beton dienen, werden in den „TL für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“, Ausgabe 2007, Änderung/Ergänzung 2014 (TL Beton StB 07), präzisiert.⁴⁷ Rahmenbedingungen für die Lieferung von aufbereiteten mineralischen Restmassen geben die „TL für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus“ (TL BuB E-StB 09) vor. Sie enthalten auch Angaben über die Massenanteile von Ziegel, Asphalt und anderen Fremdstoffen die zur Herstellung von Erdbauwerken im Straßenbau verwendet werden dürfen. Außerdem wird nach Böden (BO), Böden mit Fremdbestandteilen (BmF), Rezyklierten Baustoffen (RC) und anderen industriellen Nebenprodukten unterschieden.⁴⁸ Dabei ist zu erwähnen, dass die unterschiedlichen Regelwerke verschiedene Einteilungen für die Grenze zwischen Boden, Boden mit Fremdbestandteilen und rezyklierten Baustoffen treffen. In den „TL für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau“ (TL SoB-StB 04/07) sind Anforderungen an die mineralischen Massen für das Anfertigen von Frostschutzschichten, Schichten aus frostunempfindlichen Material, Schottertragschichten und Deckschichten ohne Bindemittel dargestellt.⁴⁹ Die TL Gestein-StB 04/07 beinhalten Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen, die zur Herstellung des Straßenoberbaus dienen, sowie u.a. die Häufigkeit und den Umfang von Eigen- und Fremdüberwachungen und von Eignungsnachweisen.⁵⁰ In der TP Gestein-StB und der TP BF-StB sind u.a. Anforderungen an die Durchführung von Prüfverfahren festgelegt.

Ein weiterer Aspekt ist die Verwendung von RC-Baustoffen im Hochbau. Hier kann z.B. das RC-Betonbrechgut zum Einsatz kommen. Ein Beton aus entsprechenden rezyklierten Gesteinskörnungen muss dieselben hohen Anforderungen wie ein Beton aus Primärbaustoffen erfüllen. In welchen Anteilen diese durch rezyklierte Körnung substituiert werden dürfen, hängt von den Betonsorten ab. Regelungen dazu sind in der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe 2010 und der „Alkali-Richtlinie“ festgelegt, wobei rezyklierte Körnungen der Typen 1 und 2 bis zu einer Druckfestigkeitsklasse C30/37 zulässig sind. Die umwelttechnischen Anforderungen sind in DIN 4226-101 und die

⁴⁶ Vgl. TL Asphalt-StB 07/13, Abschnitt 1

⁴⁷ Vgl. TL Beton StB 07, Abschnitt 1

⁴⁸ Vgl. TL BuB E-StB 09, Abschnitt 1.4.2

⁴⁹ Vgl. TL SoB-StB 04/07, Abschnitt 1.1 und 1.3.2

⁵⁰ Vgl. TL Gestein-StB 04/07, Abschnitt 1.1

Qualitätssicherung in DIN 4226-102 geregelt. Am Anfang wurde RC-Beton nur in Pilotprojekten überwiegend in Süddeutschland, nach dem Vorbild der Stadt Zürich in der Schweiz, verwendet, mittlerweile hat sich der Einsatz jedoch auch in gewissem Umfang in der üblichen Baupraxis durchgesetzt.⁵¹

4.2 LANDESSPEZIFISCHE REGELUNGEN BEZÜGLICH DER VERWERTUNG VON RC-BAUSTOFFEN IN BAYERN

Nun werden die wesentlichen regulatorischen Rahmenbedingungen für die Verwertung von mineralischen Baurestmassen erläutert, die in Bayern gelten. Angemerkt sei hierbei, dass für jedes Bundesland zum Teil unterschiedliche Regelungen für diverse Verwertungsmaßnahmen getroffen wurden.

4.2.1 VERFÜLLUNG VON GRUBEN, BRÜCHEN, TAGEBAUEN

Für die Verfüllung von Abbaustellen bzw. Abgrabungen muss der Leitfaden „Verfüllung von Gruben, Brüchen und Tagebauen“ zum sog. Eckpunkte-Papier beachtet werden. Er enthält ergänzende Vollzugshinweise und die Anforderungen an die Verfüllung von mineralischen Restmassen als nachrangigste Verwertungsmaßnahme gemäß KrWG. Dabei spielen die Stoffgehalte in den Feststoffen und die Stoffkonzentrationen im Eluat, d.h. die Schadstoffe liegen in gelöster Form in einer wässrigen Lösung vor, eine wichtige Rolle, um eine ordnungsgemäße, schadlose und somit zulässige Verfüllung mittels mineralischer Restmassen zu gewährleisten.⁵²

4.2.2 VERWERTUNG IN TECHNISCHEN BAUWERKEN

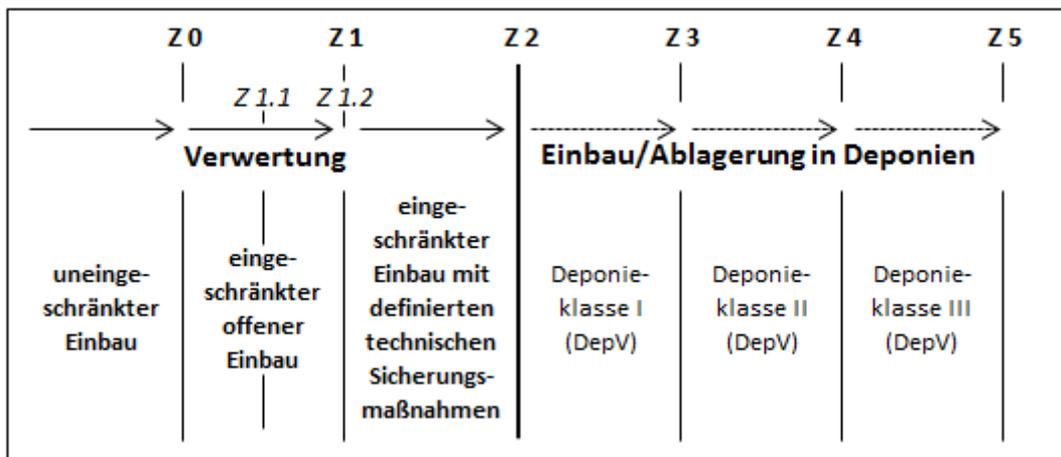
Bei der Verwendung von Bodenmaterial als Sekundärbaustoff gelten die „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen“ in der Fassung von 1997 (LAGA M20), die von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall als Mitteilung Nummer 20 erarbeitet wurden. Die Ziele sind die Verminderung der Abfallmengen und die Entlastung der Deponien, sowie die Energie- und Ressourceneinsparung und der Schutz von Natur und Umwelt.⁵³ Der zweite Teil der Mitteilung enthält die Technischen Regeln für die Verwertung der Restmassen. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit werden diese anhand bestimmter Zuordnungswerte (Z) im Feststoff und Eluat in Einbauklassen eingeteilt.

⁵¹ Vgl. ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

⁵² Vgl. Verfüll-Leitfaden, S. 2

⁵³ Vgl. Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen 1998, S. 6

TABELLE 3: EINBAUKLASSEN MIT DEN DAZUGEHÖRIGEN ZUORDNUNGSWERTEN⁵⁴



Die Einbaumöglichkeiten sind der uneingeschränkte offene Einbau (Einbauklasse 0 bis Z 0) in bodenähnlichen Anwendungen, wobei Z 0 *natürliche* Böden kennzeichnet, der eingeschränkte offene Einbau (Einbauklasse 1 bis Z 1 im Feststoff, Z 1.1 und Z 1.2 im Eluat) in technischen Bauwerken und der eingeschränkte Einbau mit definierten Sicherungsmaßnahmen (Einbauklasse 2 bis Z 2). Danach stellt der Zuordnungswert Z 2 die Obergrenze für den Einbau in technischen Bauwerken dar.⁵⁵ Die Z-Werte im Feststoff sind im Anhang I und die Z-Werte im Eluat sind im Anhang II dargestellt. Werte bis zu einem Z-Wert 0 sollen die möglichen Schadstoffgehalte von natürlichem Boden widerspiegeln. Es ist allerdings nicht ausgeschlossen, dass geogene Böden von Natur aus eine höhere Belastung aufweisen. Solange die Wiederverwendung des Bodenmaterials innerhalb des Gebietes mit den geogen oder großflächig siedlungsbedingt erhöhten Schadstoffwerten stattfindet, dürfen die vorhandenen Hintergrundwerte bei der Bewertung der Umweltverträglichkeit berücksichtigt werden.⁵⁶ Die Forderung eines Z 0-Wertes ist daher wenig praxistauglich.⁵⁷

Bis zu einem Wert von Z 0 ist der uneingeschränkte Einbau von Boden möglich. Ausgenommen davon sind Böden aus der Bodenbehandlung und der Altlastensanierung. Diese dürfen aus Vorsorge nicht auf sensiblen Flächen, wie u.a. Kinderspielplätze, Sportanlagen oder Trinkwasserschutzgebieten (I-II) eingesetzt werden.

⁵⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung an Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen 1998, S. 14

⁵⁵ Vgl. Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen 1998, S. 18ff

⁵⁶ A.a.O., S. 22f

⁵⁷ Vgl. Benson 2010, S. 24

Bei Schadstoffgehalten bis zu Z 1, dies bedeutet Z 1.1 und gegebenenfalls Z 1.2, wird der offene Einbau eingeschränkt (s. Anhang III). Es wird ein Abstand von einem Meter zwischen dem höchsten Grundwasserstand (GW-Stand) und dem RC-Material gefordert. Bei Einhaltung von Z 1.1 kann auch bei ungünstigen hydrogeologischen Gebieten von einer schadlo- sen Verwertung ausgegangen werden. Bei Z 1.2 müssen hydrogeologisch günstige Gege- benheiten vorherrschen. Ein Beispiel dafür wäre ein Gebiet mit einer mächtigen bindigen Schicht von zwei m über dem Grundwasserleiter, das dadurch ein hohes Rückhaltevermö- gen aufweist. Zusätzlich ist bei Z 1.2 ein Erosionsschutz erforderlich. Verwertungsgebiete für mineralische Restmassen mit Schadstoffgehalten bis zu Z 1 sind bergbauliche Rekultivie- rungsgebiete, Straßenbau und der begleitende Erdbau und Industrieflächen. Die Obergrenze für den Einbau stellt der Z 2 dar. Der Einbau findet dabei eingeschränkt mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen statt und zwar

- in hydrogeologisch günstigen Bereichen als Lärmschutzwall oder Straßendamm oder
- im Straßen- und Wegebau bzw. befestigten Flächen (s. Anhang III),

wobei ein Abstand zum höchsten GW-Stand von mindestens einem Meter eingehalten werden soll. Die Verwertung soll vor allem in Großbaumaßnahmen geschehen. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass der Einsatz von Sekundärbaustoffen aus Bodenmaterial bei Flächen erfolgt, die nicht oft aufgebrochen werden.⁵⁸ Die Ausnahmen für die jeweiligen Zuordnungswerte sind im Anhang III unter jeder Einbauklasse dargestellt.

Die „Anforderung an die Verwertung von Recycling-Baustoffen in technischen Bauwerken“ von 2005, kurz „RC-Leitfaden“, ist in Bayern das ausschlaggebende Regelwerk für den Einsatz von RC-Baustoffen im kommunalen, privaten und gewerblichen Straßen-, Wege-, Verkehrswege- und Erdbau und gilt bis zum Erlass der Ersatzbaustoffverordnung bzw. bis zum 31.12.2017. Der Leitfaden soll nicht nur zu einer Verbesserung des Recyclingprozesses von Sekundärbaustoffen beitragen, sondern präzisiert auch die Anwendung und Güteüber- wachung von RC-Material aus bau- und umwelttechnischer Sicht. Er korreliert mit den TL Gestein-StB und den TL SoB-StB in Verbindung mit den „Zusätzlichen Technischen Ver- tragsbedingungen und Richtlinien für die einzuhaltenden wasserwirtschaftlichen Gütemerk- male“ (ZTV wwG-StB By) von 1992 in der Fassung von 2005 bei der Verwendung von Recycling-Baustoffen im Straßenbau⁵⁹. Außerdem erhalten RC-Baustoffe, die nach den Bedingungen des RC-Leitfadens bzw. der ZTV wwG-StB By hergestellt, güteüberwacht und zertifiziert werden und somit die Anforderungen der höheren Umweltverträglichkeitsklasse

⁵⁸ Vgl. Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen 1998, S. 22-27

⁵⁹ Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2005b, S. 1f

bzw. Richtwert (RW) erfüllen, den Produktstatus (bei RW 1). Dass Produkte nicht dem Abfallrecht unterliegen, ist hierbei ausschlaggebend.⁶⁰

Wichtige Begriffe nach Abschnitt 2 des RC-Leitfadens, die nachfolgend erläutert werden, sind RC-Baustoffe, Bodenaushub, Bauschutt und technische Bauwerke. RC-Baustoffe im Sinne des Leitfadens sind zur Verwendung bzw. Verwertung geeignete aufbereitete mineralische Baustoffe. Als Bodenaushub wird natürlich anstehendes oder umgelagertes Locker- und Festgestein bezeichnet, das bei Baumaßnahmen ausgehoben oder abgetragen wird. Ab einem Anteil von über 10 Volumen-% an mineralischen Fremdbestandteilen wird Bodenaushub als Bauschutt definiert. Dieser stellt mineralisches Material dar, das bei Abbruch-, Sanierungs- und Umbauarbeiten anfällt. Technische Bauwerke sind bestimmte Bauweisen, die zur Herstellung einer technischen Funktion in, auf oder außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht dienen. Dazu zählen z.B.:

- Arbeitsraumhinterfüllungen
- Baustraßen
- Lärmschutzwälle
- Parkplatzunterbau
- Mechanische Bodenverbesserung

Die ZTV wwG-StB By behandeln die Anforderungen, Prüfungen und Einsatzmöglichkeiten bezüglich wasserwirtschaftlicher Gütemerkmale.⁶¹ Eine Bestimmung der Umweltverträglichkeit des RC-Materials findet daher durch den Gehalt an Schadstoffen im Feststoff bzw. Eluat statt (s. Anhang IV). Dabei erfolgt die Beurteilung durch den Vergleich zwischen den geprüften Werten und den zulässigen Richtwerten. Dadurch wird das RC-Material in uneingeschränkt verwertungsfähig (RW 1), eingeschränkt verwertungsfähig (RW 2) und nicht verwertungsfähig eingeteilt.⁶² Ferner dürfen RC-Baustoffe untereinander nicht mit dem Ziel vermischt werden, eine andere Verwertungsmöglichkeit zu erreichen.⁶³ Mit dem Ziel einen Baustoff zu generieren, dürfen RC-Baustoffe vermischt werden. Das neu entstandene Gemisch erhält dann den RW des Materials mit dem schlechtesten RW.

Die zusammenfassende Darstellung der Einbaukriterien für Sekundärbaustoffe des RC-Leitfadens befindet sich im Anhang V. Danach werden beim Einbau von RW 1-Material der offene Einbau und der eingeschränkt offene Einbau unterschieden. Diese hängen von dem eingebauten Volumen an RC-Baustoffen ab. Die Grenze liegt pro Baumaßnahme bei 5.000 m³ und bei mehrfachem Einbau im gleichen Baugebiet bei 10.000 m³. Weiterhin unterschiede-

⁶⁰ Vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2005a, Einführung, S. 1ff

⁶¹ Vgl. ZTV wwG-StB By 05, Abschnitt 1

⁶² A.a.O., Abschnitt 5

⁶³ ZTV wwG-StB By 05, Abschnitt 7.1

den wird der Einbau von RW 2-Material. Dieser darf nur unter bestimmten technischen Sicherungsmaßnahmen geschehen. Beim Einbau von RC-Baustoffen (RW 1 und RW 2) mit technischen Sicherungsmaßnahmen gibt es keine Mengenbegrenzung.

Bis zur Erläuterung des Verwertungskonzeptes werden die mineralischen Baurestmassen Bodenaushub und Bauschutt betrachtet. Bei dem Konzept für die Bayernkaserne wird nur Bauschutt im Sinne des RC-Leitfadens behandelt. Das ist insofern folgeschwer, da dabei davon ausgegangen wird, dass das Bodenmaterial, aufgrund der außergewöhnlichen Vorgeschichte, über 10 Volumen-% an mineralischem Fremdmaterial enthält. Damit wird ausschließlich der RC-Leitfaden für die Verwertung in technischen Bauwerken maßgebend.

5. AUFBEREITUNG VON MINERALISCHEN BAURESTMASSEN

An dieser Stelle werden die bedeutenden Prozesse im Zusammenhang mit der Aufbereitung von mineralischen Baurestmassen aufgezeigt. Diese ist gemäß KrWG Teil der Verwertung und macht das Verwerten von RC-Baustoffen erst möglich. Zunächst wird die Gewinnung von Bauschutt und Bodenaushub beschrieben. Danach folgen die verschiedenen Techniken der Aufbereitung. Schließlich wird die Gütesicherung behandelt, nach der die aufbereiteten mineralischen Restmassen gleichwertig zu entsprechenden Primärbaustoffen eingesetzt werden können.

5.1 RÜCKBAU UND AUSHUB

Beim Rückbau wird grundsätzlich zwischen dem konventionellen und dem kontrollierten Rückbau unterschieden. Die konventionelle bzw. unqualifizierte Methode ist auf eine Minimierung der Abbruchdauer ausgerichtet und stellt keine zwingenden Bedingungen an die Entrümpelung, die Entkernung und die Entsorgung. Die kontrollierte bzw. selektive oder systematische Vorgehensweise zielt dagegen auf die sortenreine Trennung der Baumaterialien und größtmögliche sowie hochwertigste Verwertung ab und ist dadurch wesentlich zeitaufwendiger.⁶⁴ Hierbei sei auf die Arbeitshilfe „Kontrollierter Rückbau: Kontaminierte Bausubstanz, Erkundung, Bewertung, Entsorgung“ des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz verwiesen. Sie stellt eine Hilfestellung bzw. Informationsquelle für Personen und Institutionen dar, deren Aufgabenstellungen im Themenbereich des kontrollierten Rückbaus angesiedelt sind.

⁶⁴ Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt 2003, S. 5

Vorteile des kontrollierten Rückbaus sind u.a. die Reduzierung des Aufwandes der nachgeschalteten Aufbereitung und der Entsorgungskosten. Bei dem systematischen Rückbau können die Schritte Entrümpelung, Demontage von entleerten und gereinigten Anlagen, Entkernung, Schadstoff- und Störstoffentfernung und Abbruch des mineralischen Restmaterials abgegrenzt werden.⁶⁵ „Mit der Konzeption des Rückbaus eines Gebäudes wird damit die entscheidende Weichenstellung vorgegeben zur Weiterverwendung von Bauteilen und ganzer Gebäudebestandteile sowie zur hochwertigen Verwertung der verbleibenden Abfallmassen.“⁶⁶

Belastetes oder Störmaterial kann mittels mechanischer, mechanisch-hydraulischer und thermischer Verfahren separiert werden, bei denen die gemeinsamen Prinzipien Lösen, Abtragen oder Trennen verwendet werden. Unter die mechanischen Verfahren fallen u.a. das Abschaben bzw. Abkratzen, Abstemmen oder Abschlagen, Schneiden, Fräsen, Schleifen und trockenes Sandstrahlen.



ABBILDUNG 3: VERSCHIEDENE MECHANISCHE VERFAHREN ZUR SCHADSTOFFABTRENNUNG⁶⁷

Für dünne oberflächige schadstoffbelastete Schichten, z.B. alte Farbanstriche, die einfach abzulösen sind, wird das Verfahren Abkratzen (s. Abbildung 3, links) eingesetzt. Das Abschlagen wird angewendet, wenn Putz oder Bodenbeläge flächenhaft abgetragen werden sollen. Auch wegen der starken Lärm- und Staubemission ist das Abstemmen mit Abbruchhämmern und Druckluftschlaggeräten (s. Abbildung 3, Mitte) stark körperlich belastend. Durch Fräsverfahren können die schadstoffbelasteten Bauteile schichtenweise mittels tiefeneinstellbarer maschineller Fräsköpfe (s. Abbildung 3, rechts) unter starker Staub- und Lärmentwicklung abgetragen werden. Des Weiteren sind das Hochdruckwasserstrahlen, das zu den mechanisch-hydraulischen Verfahren gehört, und das Flammstrahlen sowie die Vereisung, die unter die thermischen Verfahren fallen, zu nennen. Bei den Verfahren ist auf die Entstehung potentieller Gefährdungen der arbeitenden Personen und der Umwelt durch Emissionen, wie z.B. Staub, Lärm, Erschütterung oder kontaminiertes Wasser, zu achten.

⁶⁵ Weimann et al. 2013, S. 63

⁶⁶ Dechantsreiter et al. 2015, S. 165

⁶⁷ Bayerisches Landesamt für Umwelt 2003, S. 54

Einerseits soll die emissionsärmste Technik gewählt werden und andererseits sollen Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen, z.B. durch Einhausen oder Absaugen, getroffen werden.⁶⁸

Das Bereitstellen von Bodenmaterial erfordert den Aushub bzw. Abtrag von Boden oder Fels aus Gruben, die aus Sand, Kies, Ton oder Lehm bestehen, sowie aus Steinbrüchen und anderen Entnahmestellen.⁶⁹ Mutterboden bzw. Humus, Bankettschälgut und Bergematerial gehören nicht zum Aushub.⁷⁰ Der Geltungsbereich der ATV DIN 18300 „Erdarbeiten“ umfasst u.a. das Lösen, Laden und Fördern von Boden, Fels und sonstigen Stoffen.⁷¹ Zudem findet eine Unterteilung von Boden und Fels in Homogenbereiche statt. Ein Homogenbereich stellt einen begrenzten Bereich im Zustand vor dem Lösen dar, der für die Baugeräte z.B. hinsichtlich des Lösens, Ladens, Transportierens und Verfüllens vergleichbare Eigenschaften besitzt, wobei Stoffe für die Umweltrelevanz zu berücksichtigen sind.⁷² Dies bedeutet, dass Böden mit Schadstoffen von unbelasteten Böden abgegrenzt werden. Es gilt gleichermaßen die Einteilung in Homogenbereiche für künstliche Böden, die Auffüllungen, Recyclingstoffe und Böden mit Fremdbestandteilen einschließen.⁷³ In der Regel findet der Aushub von Baugruben mit schweren Maschinen, wie z.B. Raupen, Baggern und LKWs, und nur in Ausnahmefällen händisch statt.⁷⁴ Auch vernetzte Baumaschinen, wie smarte Bagger, finden in Zeiten der Digitalisierung immer mehr Anwendung.⁷⁵

⁶⁸ Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt 2003, S. 54ff

⁶⁹ Vgl. Dachroth 2017, S. 270

⁷⁰ Vgl. Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen 1998, S. 19

⁷¹ DIN 18300, Abschnitt 1.1

⁷² A.a.O., Abschnitt 2.3

⁷³ DIN 18300, Abschnitt 2.4

⁷⁴ Vgl. Dachroth 2017, S. 270

⁷⁵ Vgl. Martin Kölling 2017

Nach dem Rückbau oder dem Aushub können u.a. folgende Ausgangsstoffe für RC-Baustoffe entstehen:

TABELLE 4: AUSGANGSSTOFFE BZW. ROHMATERIAL FÜR RECYCLINGBAUSTOFFE⁷⁶

Ungebunden	Hydraulisch gebunden	Bituminös gebunden
<ul style="list-style-type: none"> - Naturwerksteine - Natursteine - Kies und Sand - sonstige mineral. Massen 	<ul style="list-style-type: none"> - Beton, Mörtel - Kalksandsteinmauerwerk - Ziegelmauerwerk - Baukeramik 	<ul style="list-style-type: none"> - Asphalt, teerfrei
z.B. aus: Dammbaustoffen, Gleis- schotter, Frostschutzschich- ten, Tragschichten ohne Bindemittel, Fliesen und Fassadenplatten aus Natur- stein	z.B. aus Betonfahrbahndecken, Trag- schichten mit hydraulischen Bindemitteln, Mauerwerksab- bruch, Betonrohren, Beton- schwellen, Beton- oder Stahl- betonelementen, Bordsteinen und Platten, Zementestrichen	z.B. aus: Asphaltfräsgut, Asphalt- aufbruch, aus dem Ver- kehrswegebau, Gussas- phaltestrich

5.2 AUFBEREITUNGSTECHNIK

Bei der Aufbereitung erfolgt als erster Schritt zumeist eine Vorsortierung. Die Störstoffe wie z.B. Holzreste und Kunststoff werden mittels händischem Aussortierens (Klauben) entfernt. Je größer die Bestandteile sind, desto leichter können sie sortiert werden. Weiterhin werden allgemein die Phasen Zerkleinerung und Aufschluss, Klassierung und Sortierung unterschieden.⁷⁷ Die Aufbereitung und Lagerung von Böden und Baustoffen soll z.B. nach TL BuB E-StB so durchgeführt werden, dass diese „gleichbleibende Eigenschaften aufweisen und die gestellten Anforderungen erfüllen. Sie sind gleichmäßig durchfeuchtet und gleichmäßig gemischt herzustellen und zu liefern.“⁷⁸ Außerdem ist auf das Verhindern von Schädigungen der Qualität u.a. durch Verunreinigungen oder Vermischungen zu achten.⁷⁹

Die entstandene unaufbereitete mineralische Restmasse wird nach der Entfernung der Bewehrungseisen zunächst gesiebt und dann in Brechern zerkleinert, wobei das Vorsiebmaterial gesondert verwertet wird. Für das Aussortieren der Bewehrung muss bereits ein Auf-

⁷⁶ Benson 2010, S. 6

⁷⁷ Vgl. Weimann et al. 2013, S. 68

⁷⁸ TL BuB E-StB 09, Abschnitt 1.4.1

⁷⁹ Vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2005a, Abschnitt 3.2

schluss erfolgt sein. Ziele sind das Erhalten einer optimalen Korngrößenverteilung und Kornform, je nach Anwendungsgebiet, der Aufschluss von Fremd- und Störstoffen sowie das Lösen des Betonverbundes zwischen Zuschlagkorn und Zementstein. Der Prozess Siebklassierung teilt das Material in vorgesehene Korngrößenklassen ein. Ein weiterer Schritt ist die Sortierung, wozu auch die eventuelle Vorsortierung am Anfang des Aufbereitungsprozesses zählt, um die Störstoffe zu beseitigen. Weitgehend erübrigen sich diese Prozesse allerdings bei den durch selektiven Rückbau erhaltenen, sortenreinen Fraktionen.⁸⁰ Trotzdem ist „[d]ie Sortierung der aufgeschlossenen und wenn erforderlich zerkleinerten und klassierten festen Abfälle recyclingverträgliche[r] Werkstoffgruppen oder sortenreine[r] Werkstofftypen [...] die entscheidende Prozessstufe für die meisten Verfahren des Werkstoffrecyclings.“⁸¹

Bei der Aufschlusszerkleinerung wird zwischen den beiden am häufigsten, wegen ihrer Eignung für hartes bis sehr hartes mineralisches Material, eingesetzten Typen, den Backenbrechern und den Prallbrechern unterschieden. Eine Zusammenfassung der spezifischen Eigenschaften beider Brecher befindet sich im Anhang VI. Weitere Zerkleinerungsaggregate wären der Schlagwalzenbrecher, der Kreiselbrecher, Kegelbrecher, Hammerbrecher oder Shredder.⁸² Anhand der Stückgröße des zu zerkleinernden Materials kann dieser Prozess mittels Durchmesser (d) in die Grobzerkleinerung ($d > 100$ mm), Mittelzerkleinerung ($d = 5-100$ mm), Feinzerkleinerung ($d = 0,1-5$ mm) und Feinstzerkleinerung ($d < 0,1$ mm) unterteilt werden.⁸³

Bei der Klassierung wird das gebrochene Material durch die Wahl der Maschenweite des eingesetzten Siebes, z.B. Spannwellen- und Schwingsieb, nach der Korngröße getrennt. Aufgaben dieser Aufbereitungstechnik sind folgende⁸⁴:

- Begrenzung der oberen Korngröße
- Erzeugung bestimmter Korngrößenverteilungen für die nachfolgende Verwertung
- Abtrennen von Grobanteilen zum Schutz nachgeschalteter Brecher vor der Überlastung und Beschädigung
- Abtrennen von Feianteilen zur Entlastung von Zerkleinerungsanlagen, zum Schutz vor Verschleiß, zum Vermeiden von Verstopfungen, zur Begrenzung des Feianteils
- Vorbereitung der Sortierung

In Siebmaschinen werden unterschiedliche Roste eingesetzt. Während die festen Roste zur Vorsortierung des Materials dienen, erfolgt durch die beweglichen Roste der Materialtransport. Weitere wichtige Aspekte sind einerseits die Möglichkeit, kleinere oder mobile Aufberei-

⁸⁰ Vgl. Weimann et al. 2013, S. 68f

⁸¹ Vgl. Martens 2011, S. 24

⁸² Vgl. Weimann et al. 2013, S. 71

⁸³ Vgl. Martens 2011, S. 17

⁸⁴ Müller, S. 2

tungsanlagen als einfache Siebstationen betreiben zu können und andererseits die Möglichkeit der Durchführung einer Siebung als Sortierschritt, wenn nur die Feianteile aussortiert werden sollen. Diese sind aufgrund der großen Oberfläche i.d.R. am höchsten belastet.⁸⁵



ABBILDUNG 4: MOBILE SIEBANLAGE (LINKS) UND MOBILER BRECHER (RECHTS)⁸⁶

Das Sortieren als weiterer Teil der Aufbereitung unterscheidet Verfahren der Nass- und der Trockenaufbereitung, wobei erstere für die Aufbereitung von mineralischen Restmassen zu RC-Baustoffen oft zu aufwändig ist. Das Material soll von Störstoffen, z.B. Metall oder Holz, getrennt werden. Zu der Trockenaufbereitung zählen u.a. die Windsichtung als Dichtesortierung, die Magnetabscheidung als Sortierung in Magnetfeldern und das Klauben als Sortierung nach optischen Eigenschaften. Die beiden letzten Verfahren zählen in der Aufbereitung von mineralischen Restmassen zu den wichtigsten, da große Fremdkörper gezielt separiert werden und die Bewehrung als Schrott wiederverkauft werden kann. Über die Windsichtung werden leichte Stoffe wie Holz, Styropor und Kunststofffasern entfernt.⁸⁷

Bei den Aufbereitungsanlagen wird zwischen mobilen, semimobilen und stationären Anlagen unterschieden. Sehr kleine mobile Anlagen erreichen einen Durchsatz von 20-120 t/h und werden direkt auf der Baustelle, also vor Ort, eingesetzt. Da sie aus einer minimalen Anzahl an Komponenten und einer Transporteinheit bestehen und nicht immer alle Aufbereitungsschritte durchführen, sind sie nur für die Aufbereitung geringer Materialaufkommen geeignet. Dennoch sind die Vorteile wie der Wegfall des Transportweges zu einer stationären Anlage und der geringe Vorbereitungsaufwand ausschlaggebend. Mit einer semistationären Anlage können üblicherweise Durchsätze von bis zu 200 t/h erzielt werden. Sie ist aus mehreren Transporteinheiten aufgebaut und kann zwar einen höheren Durchsatz erreichen, wegen des höheren Aufwandes bezüglich Investitionskosten und Montagezeit ist sie jedoch für die Praxis bei kleineren Baustellen, wenn es um eine Aufbereitung vor Ort geht, kaum von Bedeutung.⁸⁸ Stationäre Anlagen beinhalten i.d.R. zwei Brecherstufen und zusätzliche

⁸⁵ Vgl. Weimann et al. 2013, S. 71

⁸⁶ Möbius 2006, S. 12f

⁸⁷ Vgl. Weimann et al. 2013, S. 71f

⁸⁸ Vgl. Battermann 2000, Kap. Anlagenarten

Sortieraggregate. Daher können sie größere Durchsatzleistungen, bessere Produktqualitäten und höhere Produktvielfalt erzielen, wodurch allerdings sehr viel höhere Investitionskosten und aufwändigere Vorplanungen in Kauf genommen werden müssen. Durch die feste Inneninstallation werden die Emissionen stark vermindert.⁸⁹

Schemata einer mobilen und einer stationären Anlage sind nachfolgend dargestellt. Dabei steht X bei 0/X für eine Körnung in mm, z.B. 0/32.

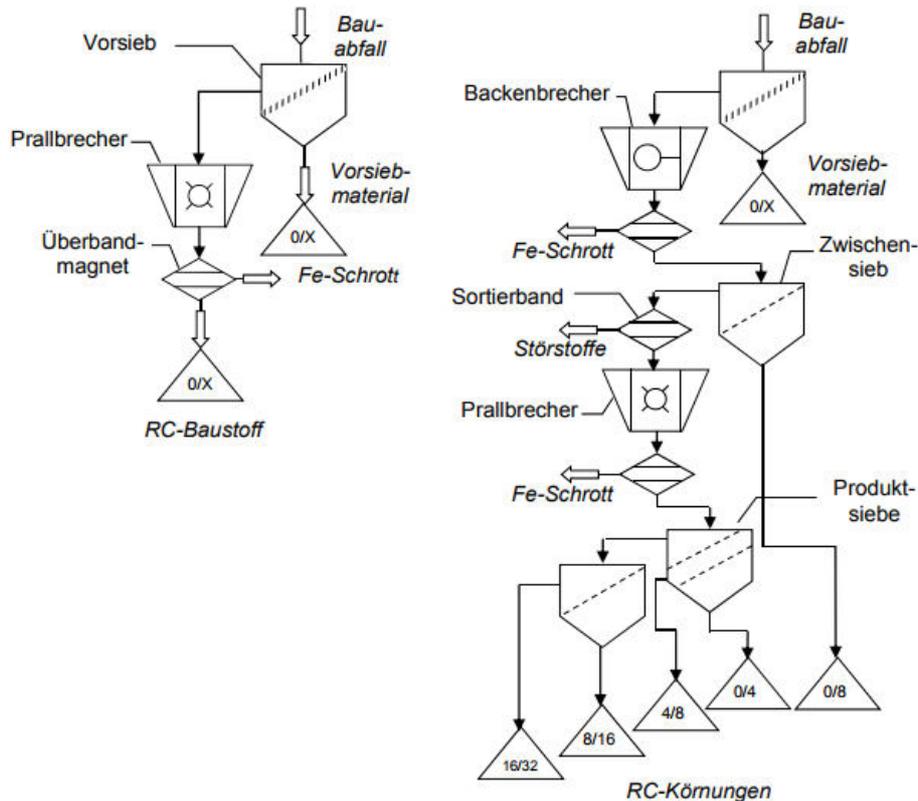


ABBILDUNG 5: MOBILE (LINKS) UND STATIONÄRE (RECHTS) AUFBEREITUNGSANLAGE⁹⁰

5.3 GÜTESICHERUNG

Zur Gewährleistung einer gewissen Qualität und zur Steigerung der Akzeptanz bei den Anwendern ist die Gütesicherung unerlässlich. Dabei ist die Bedeutung der Gütesicherung für die Anwender entscheidender als der Vorgang. Nach Abschnitt 5.3 des RC-Leitfadens soll der Einsatz von RC-Baustoffen in technischen Bauwerken nur mittels geprüften, überwachten und zertifizierten Materials erfolgen. Darüber hinaus sind die vorgeschriebenen Grundsätze der DIN 18200 „Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte – Werkseigene

⁸⁹ Vgl. Weimann et al. 2013, S. 76f

⁹⁰ Müller, S. 3

Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung von Produkten“ zu berücksichtigen. Die Norm charakterisiert das Verfahren zum Nachweis der Übereinstimmung für Bauprodukte mit technischen Kriterien, u.a. Produktnormen und Zustimmungen im Einzelfall, und legt im zweiten Abschnitt die Terminologie fest. Zertifizierung bedeutet in diesem Zusammenhang die Feststellung der Konformität anhand der Beurteilung und Bewertung der Ergebnisse der Fremdüberwachung, wie auch das Erteilen eines Prüfzeugnisses durch eine unabhängige Zertifizierungsstelle. Weiterhin ist ein Zertifikat (Beispiel s. Anlage 2.1) eine Bestätigung, die das Übereinstimmen mit den zugrunde liegenden technischen Spezifikationen (z.B. RC-Leitfaden), der werkseigenen Produktionskontrolle und der Fremdüberwachung in Bezug auf das Bauprodukt bescheinigt.⁹¹

Das Prinzip der Gütesicherung ist nachfolgend dargestellt:

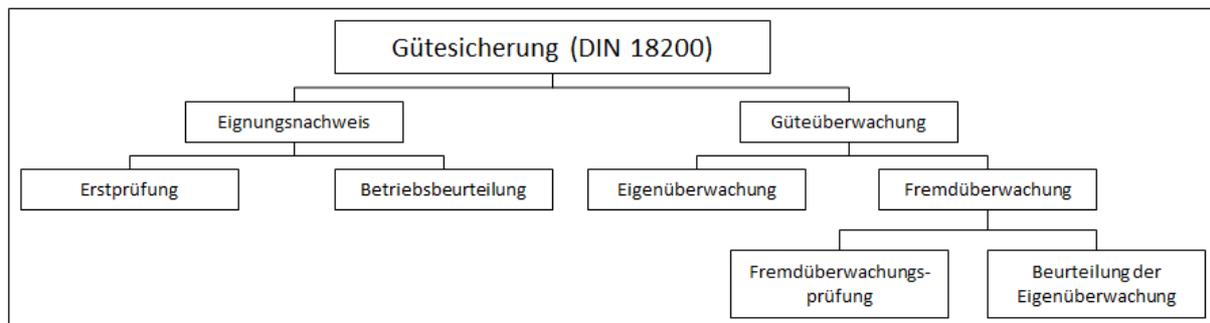


ABBILDUNG 6: GÜTESICHERUNG NACH DIN 18200⁹²

Bezüglich der Gütesicherung ist der fünfte Abschnitt des RC-Leitfadens entscheidend. Um den Anforderungen dieses Leitfadens gerecht zu werden, muss die Qualität des zukünftig eingesetzten Materials vor dem Einbau überprüft werden. Folgende Parameter sind hierbei u.a. ausschlaggebend:⁹³

- Stoffliche Zusammensetzung
- Korngrößenverteilung
- Kornform
- Bruchflächigkeit
- Reinheit und schädliche Bestandteile
- Widerstandsfähigkeit gegen Schlagbeanspruchung (Schlagzertrümmerungswert)
- Schadstoffe

⁹¹ Vgl. DIN 18200, Abschnitt 2.4f

⁹² Vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2005a, Anlage 3

⁹³ Eigene Darstellung in Anlehnung an BMUB und BMVg 2016, S. 62

Die Art und Häufigkeit der Prüfungen bezüglich der Umweltverträglichkeit ist aus dem Anhang VII ersichtlich. Einerseits können die Ersatzbaustoffe von stationären und andererseits von mobilen Aufbereitungsanlagen stammen. Die regelmäßige Güteüberwachung bei der Herstellung eines zertifizierten Produktes sieht für die Qualitätssicherung des Materials die Vorgänge

- Eignungsnachweis für die Aufbereitungsanlage,
- Eigenüberwachung bzw. werkseigene Produktionskontrolle und
- Fremdüberwachung

vor. Der Eignungsnachweis besteht aus der Erstprüfung (Häufigkeit s. Anhang VII), die bei der Verwendung von stationären Anlagen einmalig für jeden Aufbereitungsort und im Falle der mobilen Aufbereitung für jedes Abbruchobjekt durchgeführt werden muss, mit einer Betriebsbeurteilung, wobei die Kontinuität der Qualität im Verlauf des Prozesses eine große Rolle spielt, und zusätzlich aus der Erstellung folgender Dokumente:

- Verzeichnis der Ausgangsstoffe (s. Anlage 2.2)
- Sortenverzeichnis der Recycling-Baustoffe (s. Anlage 2.3)
- Aufnahmebericht (s. Anlage 2.4)
- Prüfzeugnis (s. Anlage 2.5)

Die Eigenüberwachung gliedert sich in die Eingangskontrolle, bei der der Betreiber die Sicherstellung der Umweltverträglichkeit des Ausgangsmaterials gewährleistet, und die Eigenüberwachungsprüfungen. Wenn bei der Eingangskontrolle die Umweltverträglichkeit nicht durch chemische Analysen durch den Anlieferer zweifelsfrei belegt werden kann, sollte das Material abgewiesen werden. Des Weiteren müssen die Ergebnisse der Eingangskontrolle für jede Lieferung entsprechend dokumentiert werden. Bis zur Bearbeitung des Materials werden die eingegangenen Stoffe getrennt gelagert. Gleichzeitig werden bei Zweifeln hinsichtlich der Umweltverträglichkeit der Ausgangsstoffe nach dem Entladen die Herkunft geprüft sowie chemische Analysen durchgeführt. Bei den Eigenüberwachungsprüfungen werden die Feststoffgehalte täglich und die Eluatgehalte wöchentlich geprüft (s. Anhang VII). Ferner sollte beachtet werden, dass bei einer Aufbereitungsmenge von weniger als 10.000 t/a die Ermittlung des pH-Werts und der elektrischen Leitfähigkeit wegfällt.

Die Fremdüberwachung, deren Umfang sich aus Anhang VII ergibt, hat durch eine anerkannte Prüfstelle⁹⁴ zu erfolgen, die nach den „Richtlinien für die Anerkennung von Prüfstellen für Baustoffe und Baustoffgemische im Straßenbau“ von der Obersten Baubehörde durchgeführt

⁹⁴ Eine Liste der anerkannten Prüfstellen in Bayern ist auf der Homepage der Bundesanstalt für Straßenwesen unter www.bast.de einsehbar.

wurde. Daneben ist die Häufigkeit der Prüfungen abhängig von der Produktionsweise, die auf Halde, diskontinuierlich und kontinuierlich stattfinden kann. Auf Halde müssen alle angefangenen 10.000 t überprüft werden, dagegen wird bei der diskontinuierlichen Herstellung das Material vierteljährlich und bei der kontinuierlichen Produktion alle 13 Wochen kontrolliert. Ein Beispiel für einen Prüfauftrag zur Fremdüberwachung ist in Anlage 2.6 und für einen Überwachungsbericht in Anlage 2.7 zu finden.

Beim Einsatz von mobilen Aufbereitungsanlagen ist der Aspekt wichtig, dass derjenige, der die aufbereiteten Ersatzbaustoffe vom mobilen Prozess in Verkehr bringt, für das Vorlegen des Eignungsnachweises zuständig ist. Daher liegt beim Einbau der aufbereiteten Sekundärbaustoffe vor Ort die Verantwortung für das Erstellen dieses Nachweises beim Bauherrn. Darüber hinaus ist mineralisches Abbruchmaterial einer emissionsarmen Aufbereitung in einer zugelassenen Aufbereitungsanlage entsprechend 4. BImSchV zuzuführen. Mobile Aufbereitungsanlagen benötigen keine Genehmigung, wenn sie weniger als 12 Monate betrieben werden.⁹⁵

Der Einbau von RW 2-Material erfordert im Zuge der Qualitätssicherung die Prüfung des zu verwendenden Materials bezüglich des Einbauorts, der technischen Sicherungsmaßnahmen und der Herkunft zur Gewährleistung der stoffspezifischen und anwendungsbezogenen Bedingungen. Dabei werden die Prüfungen von Prüfstellen ausgeführt, die über die Anerkennung für die entsprechenden Fachgebiete verfügen.

Zu erwähnen ist die Dokumentationspflicht über die genutzten Entsorgungswege als fester Bestandteil der Qualitätssicherung, um die Einhaltung des RC-Leitfadens nachweisen zu können. Die Dokumentation, die das Ausfüllen des Lieferscheins (s. Anlage 2.8) darstellt, ist der Prüfstelle für die Fremdüberwachung und der zuständigen Behörde auf Verlangen vorzulegen.⁹⁶ Hinsichtlich der Gütesicherung beim staatlich klassifizierten Straßenbau gelten die Definitionen und Anforderungen der TL SoB-StB und der TL BuB E-StB in Verbindung mit der TL Gestein-StB.

⁹⁵ 4. BImSchV, § 1 Abs. 1

⁹⁶ Vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2005a, Abschnitt 6

Eine Zusammenfassung des Ablaufs von der Eingangskontrolle bis zum gütegesicherten Produkt stellt folgende Abbildung dar:

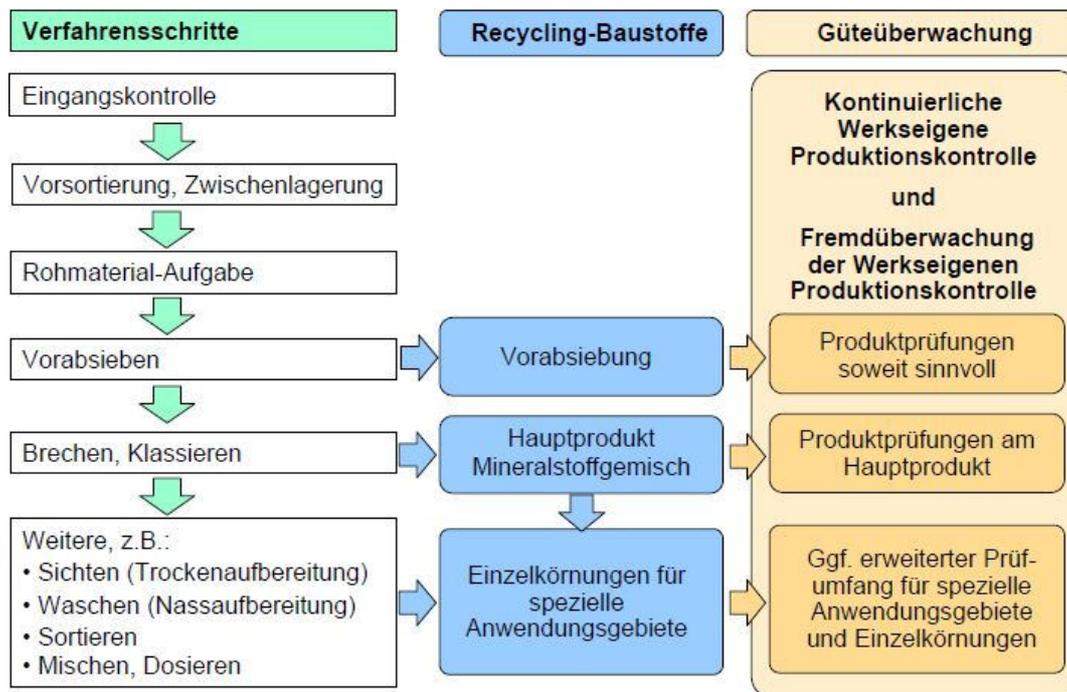


ABBILDUNG 7: ABLAUF AUFBEREITUNG UND GÜTESICHERUNG⁹⁷

Auf der linken Seite werden die Verfahrensschritte genannt, die aufbereitete Baurestmassen bei der Aufbereitung durchlaufen können. Unterschiedliche mineralische Baurestmassen durchlaufen eine diverse Anzahl an Schritten, bis RC-Baustoffe entstehen (Mitte). Die dritte Ebene (rechts) ist der letzte Schritt, damit die Verwertung von RC-Baustoffen in technischen Bauwerken unter Beachtung der bau- und umwelttechnischen Vorgaben durchgeführt werden kann.

Mittels Gütesicherung können nach dem „Baustoff Recycling Bayern e.V.“ (BRB) verschiedene Produktgruppen entstehen. Der BRB steht für die Interessen der mittelständischen Baustoffrecyclingindustrie in Bayern und ist in den „Bundesverband für Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.“ eingegliedert. Die Qualitätssicherung und die Zertifizierung über den BRB stellen etablierte Prozesse dar, die zur Steigerung der Akzeptanz der Anwender beitragen. Die Dokumente des BRB, z.B. die Merkblätter zu den einzelnen Produktgruppen, besitzen keine rechtliche Verbindlichkeit, sondern sind eine Hilfestellung für Anwender.

⁹⁷ Benson 2010, S. 13

Im Folgenden sind die nach dem BRB beliebig festgelegten Produktgruppen dargestellt.



ABBILDUNG 8: PRODUKTGRUPPEN GEMÄß BRB⁹⁸

Eine Übersicht über die wesentlichen Informationen zu den Produktgruppen, u.a. die Bezeichnungen, den Anwendungsbereich und die Prüfbestimmungen bzw. die Prüfparameter, wie z.B. die stoffliche Zusammensetzung, geben die Merkblätter des BRB (s. Anlage 2.9.1 bis 2.9.9).

Die aufbereiteten mineralischen Baurestmassen werden im Zuge der Aufbereitung zertifiziert. Damit diese Massen den Produktgruppen nach BRB entsprechen, wird das größtmögliche Prüfprogramm durchgeführt, um die qualitätsmäßig hochwertigste Produktgruppe zu erhalten, die nach den vorhandenen Eigenschaften des RC-Baustoffs möglich ist. So wird ein RC Beton, der die erforderlichen Anforderungen nach Anlage 2.9.1 aufweist, als RC FSS-StB Beton zertifiziert.

Für die Verantwortlichen, wie private Bauherren oder die öffentliche Hand, ist es wichtig, dass die Qualität der zertifizierten Baustoffe gleichbleibend und regional unabhängig bzw. vergleichbar ist. Dies wird durch die bundesweit geltenden TL geregelt. Gegenüber der Umweltverträglichkeit und dem Erscheinungsbild der aufbereiteten Ersatzbaustoffe, das aus der heterogenen Zusammensetzung durch die unterschiedlichen Massenanteile beeinflusst wird (insbesondere durch den Ziegelanteil) und wodurch oft fälschlicherweise auf schlechte bautechnische Eigenschaften geschlossen wird, gibt es noch Vorbehalte. Diese sind allerdings nicht gerechtfertigt, wie ein Forschungsvorhaben zu den Ersatzbaustoffen zeigte. Dabei wurde das RC-Material dreier am Markt etablierter Firmen aus dem Raum Nürnberg und München untersucht. Bei der Umweltverträglichkeit wurden alle RW 1 bei RC-Beton und RC-Mix eingehalten, lediglich der Sulfat-Grenzwert eines Aufbereiteters wurde etwas überschritten. Im Falle des Überschreitens wurde das Material folglich ordnungsgemäß entsorgt.

⁹⁸ Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmidmeyer 2017, S. 15

Bei der stofflichen Zusammensetzung ergab sich eine kleine Streuung der Massenanteile unter zehn Prozent für die Fraktion „Kalksandsteine, Putze, weichgebrannte Ziegel“, eine Streuung von unter fünf Prozent für den Anteil „mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, Glas- und Bimsbeton“ sowie eine nicht nennenswerte Streuung für die Fraktionen „Glas“, „Asphalt und Asphaltgranulat“, „Fremdstoffe“ und „Metalle“. Das Ergebnis lässt darauf schließen, dass „die Aufbereitung qualitätsgesicherter und güteüberwachter Ersatzbaustoffe [...] [durch etablierte Unternehmen dieser Branche] bereits heute sorgfältig und verlässlich erfolgt und dass [...] unerwünschte Bestandteile oder Wertstoffe wie Metalle zuverlässig entfernt werden.“⁹⁹

Damit ein RC-Baustoff nach der Aufbereitung die gewünschte RW-Klassifikation erhält, findet üblicherweise zu den anderen Schadstoffuntersuchungen vor dem Rückbau eine Einschätzung durch das Ziehen von Bohrkernen und die folgende Analyse statt. Insbesondere bei der Sulfat-Problematik, die ab den 70er bis 80er Jahren an Bedeutung gewinnt¹⁰⁰, ist die Analyse, getrennt nach Putz und dem restlichen Material im Bohrkern, unverzichtbar. Zudem wird in München aufgrund erhöhter Sulfatgehalte vermehrt auf diese Thematik geachtet.

⁹⁹ Huber 2017, S. 18

¹⁰⁰ Müller 2012, S. 28

6. EINSATZMÖGLICHKEITEN UND BEWERTUNG DER BAUTECHNISCHEN EIGENSCHAFTEN VON RC-BAUSTOFFEN AUS AUFBEREITETEN BAURESTMASSEN

6.1 EINSATZMÖGLICHKEITEN UND BAUTECHNISCHE ANFORDERUNGEN

Es gibt eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten für RC-Baustoffe. Eine Übersicht der üblichen Verwendungsmöglichkeiten befindet sich in Anhang VIII. Eine Zusammenfassung der Bereiche mit jeweils einem Beispiel für eine zugehörige Einsatzmöglichkeit zeigt die nächste Abbildung. Die Einteilung wurde wie in den „Arbeitshilfen Recycling“ des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und des Bundesministerium der Verteidigung von 2016 vorgenommen. Auch in den Merkblättern des BRB sind die Verwendungsmöglichkeiten abgebildet (s. Anlage 2.9.1 bis 2.9.9).

<i>Straßenoberbau</i>	<i>Erdbau und Straßenunterbau</i>	<i>Verkehrswegebau, Sportplatzbau und Landschaftsbau</i>	<i>Sonstiges</i>
<i>u.a. ungebundene Tragschichten</i>	<i>u.a. Lärmschutzwälle, Dämme</i>	<i>u.a. ungebundene Deckschichten</i>	<i>u.a. Schotterrasen</i>

ABBILDUNG 9: EINSATZMÖGLICHKEITEN VON RC-BAUSTOFFEN

Als Nächstes wird bei bestimmten Anwendungen, deren Ausführung auch auf dem Gelände der Bayernkaserne in Frage kommt, auf relevante Anforderungswerte eingegangen. Grundsätzlich gelten für den Oberbau andere Anforderungen als für den Erdbau. Im Oberbau spielen gerade eine hohe Steifigkeit und eine hohe Tragfähigkeit eine Rolle, während es im Erdbau besonders auf eine ausreichende Verdichtung ankommt. In beiden Fällen ist die Dauerhaftigkeit bedeutend, die von der Beständigkeit der eingesetzten Baustoffe z.B. gegenüber mechanischen Einflüssen oder Witterungseinflüssen abhängt. Bezüglich der Frostbeanspruchung ist der Oberbau prinzipiell stärker gefährdet als der Unter- bzw. der Erdbau. Wegen diesen Anforderungen sind für den Straßenoberbau ebenfalls verschiedene Untersuchungen, die im Erdbau nicht relevant sind, vorgesehen. So bestehen für Baustoffe, die als Gesteinskörnungen im Oberbau eingesetzt werden sollen, beispielsweise Anforderungen an den Widerstand gegen Zertrümmerung, den Widerstand gegen Polieren, den Widerstand

gegen Oberflächenabrieb, den Widerstand gegen Verschleiß und den Frost-Widerstand, die in Untersuchungen an den jeweiligen Baustoffen nachgewiesen werden müssen.¹⁰¹

Ungebundene Tragschichten

Ungebundene Tragschichten bzw. Tragschichten ohne Bindemittel sind Kiestragschichten, Schottertragschichten und Frostschutzschichten (FFS) und gehören zum Straßenoberbau. Die Baustoffe für diese Anwendung können natürliche und gebrochene Gesteinskörnungen, wie beispielsweise Sand-Kies-Gemische, künstliche Gesteinskörnungen, z.B. Schlacken, und Gesteinskörnungen aus RC-Material, z.B. RC-Beton, sein. Bei dieser Einsatzmöglichkeit gelten die Regelwerke der FGSV für die Schichten ohne Bindemittel (SoB), siehe Tabelle 2 (Punkt 4.1).

Gemäß TL SoB-StB bestehen Anforderungen an den Verformungsmodul E_{v2} der eingebauten Schicht. Es wird mindestens ein E_{v2} von 150-180 MN/m² je nach Einbaudicke gefordert. Ein E_{v2} von 150 MN/m² gilt für Kiestragschichten mit einer Einbaudicke von 20 cm und für Schottertragschichten mit einer Einbaudicke von 15 cm. Bei Kiestragschichten mit 25 cm und Schottertragschichten mit 20 cm muss der E_{v2} dann 180 MN/m² betragen. Ebenfalls gelten Anforderungen an den Verdichtungsgrad D_{Pr} , für den mindestens ein Wert von 103 % für eine FSS in den oberen 20 cm erzielt werden muss, während darunter ein D_{Pr} von 100 % notwendig ist. Für die Tragschicht verwendete Böden weisen i.d.R. einen Reibungswinkel zwischen 30° und 40° auf, s. Anhang IX. Dieser Anhang gibt einen Überblick über die gewöhnlichen Reibungswinkel von natürlichen Böden. Baustoffe zur Herstellung von Kies- und Schottertragschichten müssen einen California Bearing Ratio-Wert (CBR-Wert) von 80 % erreichen.¹⁰² Außerdem sind für FSS die Einhaltung eines Schlagzertrümmerungswertes (SZ) von 32 bzw. Los-Angeles-Koeffizienten (LA) von 40 und für STS die Einhaltung eines SZ von 28 bzw. LA von 35 sowie eines Schotterschlagwertes von 33 M.-% gefordert.¹⁰³ Sowohl das Einzelkorn wie auch das Korngemisch müssen in der Tragschicht eine ausreichende Frost- & Witterungsbeständigkeit besitzen.¹⁰⁴ Für die Tragfähigkeit und Lebensdauer einer Straßenbefestigung spielen die Gleichmäßigkeit des Verdichtungsgrades und des Verformungswiderstandes von Unterbau und ungebundener Tragschicht eine große Rolle.¹⁰⁵ Es lässt sich ableiten, dass die Anforderungswerte E_{v2} , CBR und der Verdichtungsgrad nach TL SoB-StB, eine hohe Steifigkeit, eine geringe Verformbarkeit und eine hohe Tragfähigkeit der ungebundenen Tragschicht gewährleisten. Für die hohe Dauerhaftigkeit sorgen u.a. die Anforderungswerte LA und SZ.

¹⁰¹ Vgl. Baumgärtel 2008, S. 27

¹⁰² Vgl. TL SoB-StB 04/07, Abschnitt 2.3

¹⁰³ A.a.O., Abschnitt 1.4.2

¹⁰⁴ Vgl. Brandl 1977, S. 98

¹⁰⁵ A.a.O., S. 186

Lärmschutzwall

Beim Anlegen eines Lärmschutzwalls können i.d.R. gewisse Verformungen zugelassen werden. Da nur geringe Belastungen durch die Grünpflege erwartet werden, muss die Steifigkeit nicht den höchsten Anforderungen entsprechen. Bei dieser Einsatzmöglichkeit, die in den Bereich des Erdbaus fällt, gelten die Regelwerke für den Erdbau (E), siehe Tabelle 2. Nach ZTV E-StB Abschnitt 11.2 muss ein Verdichtungsgrad D_{Pr} von mindestens 95 % erreicht werden. Des Weiteren muss bei den weniger tragfähigen Bodenklassen nach DIN 18196, wie GU*, GT*, SU*, ST*, U, T, OU, OT, zusätzlich ein Luftporenanteil von weniger als 12 % eingehalten werden, da bei diesen Böden Wasserzutritte zu einer Verringerung der Konsistenz der feinkörnigen Anteile führen können. Normalerweise werden in einfachen Fällen, bei Böden mit mitteldichter bis dichter Lagerung, die Böschungsneigung von 1:2 für Feinsand, 1:1,7 für Grobsand und 1:1,5 für Kies und Steine verwendet.¹⁰⁶ Darüber hinaus sollten die Böschungen rechtzeitig bepflanzt werden, um diese gegen Abtrag und Erosion zu schützen und ein Auflockern zu vermeiden. Aus den Anforderungswerten lässt sich ableiten, dass im Erdbau durch die Verdichtungsanforderungen, wie Verdichtungsgrad und Luftporenanteile, eine dauerhafte Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit gewährleistet werden soll. Zusätzlich ist bei einem Lärmschutzwall eine hohe Scherfestigkeit gefordert, um die Standsicherheit zu garantieren.

Hinterfüllung bzw. Baugruben-Verfüllung

Sie zählen zu den Erdbauwerken und müssen zumindest über eine Standfestigkeit gegenüber dem eigenen Eigengewicht verfügen. Auch hier gelten die Regelwerke für den Erdbau (E), siehe Tabelle 2. Deformationen sind ausschließlich zugelassen, wenn der Bereich nicht baulich genutzt werden soll.¹⁰⁷ Bei Hinterfüllungen soll ein Verdichtungsgrad D_{Pr} von 100 % erreicht werden.¹⁰⁸ Das zu verwendende Material, welches die Anforderungen nach ZTV E-StB Abschnitt 10.2.4 erfüllt, ist in der Regel grobkörniger Boden (SW, SI, SE, GW, GI, GE), gemischtkörniger Boden (SU, ST, GU, GT) und Boden, der nur in Verbindung mit einer qualifizierten Bodenverbesserung eingesetzt werden darf, wie gemischtkörniger Boden der Gruppen SU*, ST*, GU*, GT* und feinkörniger Boden der Gruppen TL, TM, UM, UL. Des Weiteren muss das eingesetzte Material verwitterungsbeständig sein.¹⁰⁹ Die Anforderungen entsprechen in etwa denen eines Lärmschutzwalls, allerdings ist die Scherfestigkeit von untergeordneter Bedeutung.

¹⁰⁶ Vgl. Dachroth 2017, S. 395f

¹⁰⁷ A.a.O., S. 320

¹⁰⁸ Vgl. ZTV E-StB 17, Abschnitt 10.3.5

¹⁰⁹ A.a.O., Abschnitt 10.2.5

Leitungsverfüllung

Bei dieser Verwendung gelten die Regelwerke für den Erdbau (E), siehe Tabelle 2. Für den Bereich der Leitung kommen nach ZTV E-StB Kapitel 9.3.1 grobkörnige Böden mit einem Größtkorn von 22 mm zum Schutz des Rohres zum Einsatz. Der erforderliche Verdichtungsgrad beträgt 97 % und gilt für den Einsatz im Bereich des Straßenkörpers sowie außerhalb des Straßenkörpers gleichermaßen.¹¹⁰ Die Anforderungen sind eine geringe Verformbarkeit, damit im Bereich der Leitungszone keine Schäden auftreten, und eine hohe Dauerhaftigkeit. Die Scherfestigkeit ist bei dieser Anwendung eher untergeordnet.

Baustraße

Baustraßen sind provisorische Zufahrtmöglichkeiten auf meist unwegsamem Gelände. Diese werden von zum Teil sehr schweren Maschinen befahren. Die Dauerhaftigkeit spielt hier eine untergeordnete Rolle, da es sich um ein temporäres Bauwerk handelt. Weitere Anforderungen sind eine geringe Verformbarkeit und eine hohe Steifigkeit

Landschaftsbau

Bei Erdbewegungen im Zusammenhang mit Geländemodellierungen, z.B. einer Dammschüttung, wäre auch der Einsatz von RC-Baustoffen möglich. Die Anforderungen gelten dann entsprechend der erdbautechnischen Anwendung „Lärmschutzwall“.

Für Sichtbetonelemente gelten die Anforderungen aus dem Hochbau, siehe Punkt 2.1. D.h. es dürfen nur die rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2 zu einem bestimmten Prozentsatz (bei Typ 2 bis zu 45 Vol.-%) als Zuschlag für die Herstellung von Hochbaubeton verwendet werden. Nach DIN 4226-101 werden rezyklierte Gesteinskörnungen > 2 mm entsprechend ihrer stofflichen Zusammensetzung in 4 Typen eingeteilt. Falls diese außerhalb des Hochbaus eingesetzt werden, können auch die rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 3 und Typ 4 zu einem wesentlich höheren Anteil (bis zu 80 Vol.-%) zur Anwendung kommen.¹¹¹

Für Substrate gibt es von der bautechnischen Seite keine Anforderungswerte.

¹¹⁰ Vgl. ZTV E-StB 17, Abschnitt 9.5.1 und 9.5.2

¹¹¹ Vgl. DIN EN 206-1 und DIN 1045-2

Anschließend werden die Anforderungen qualitativ für bestimmte Anwendungen dargestellt:

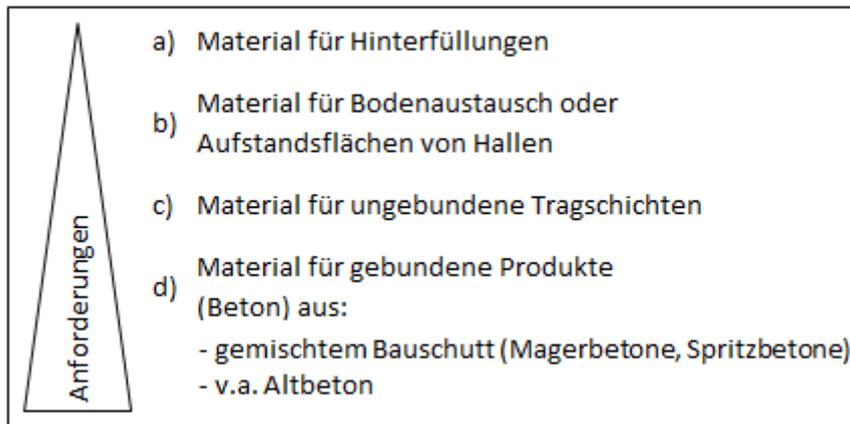


ABBILDUNG 10: STEIGENDE ANFORDERUNGEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN EINSATZMÖGLICHKEITEN¹¹²

6.2 ERDBAUTECHNISCHE EIGENSCHAFTEN

Ziel ist es, die bautechnischen Eigenschaften von den RC-Baustoffen, RC Beton, RC Mix, RC Asphalt und RC Mix zu beschreiben. Im Anschluss daran findet der Abgleich statt, welche Anforderungen erfüllt werden können und für welche Anwendungen die RC-Baustoffe dadurch geeignet sind. Die RC-Baustoffe RC Beton, RC Mix und RC Ziegel bilden mengenmäßig die größten Anteile beim Einsatz von mineralischen Ersatzbaustoffen im Straßenbau.¹¹³ Die Eigenschaften von RC Asphalt werden hierbei beschrieben, da der Einsatz von RC Asphalt theoretisch möglich wäre. Normalerweise wird zurückgewonnener Asphalt für das Asphaltmischgut für neue Straßen verwendet.

Die Eigenschaften in Bezug auf die Tragfähigkeit, die den Widerstand eines Bodens gegen die Verformung bei Belastung beschreibt und durch die Druckfestigkeit des Einzelkorns sowie dem Verbund der Einzelkörner definiert wird, und die Gebrauchstauglichkeit werden beleuchtet. Für die Verwendbarkeit der RC-Baustoffe im Erdbau spielt das Verdichtungsverhalten eine wesentliche Rolle. Damit das Material den Anforderungen im Erdbau genügt, muss es ausreichend verdichtet werden. Für eine ausreichende Verdichtung im Feld wird mittels Proctorversuch, bei dem der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und erreichbarer Trockendichte bei normierter volumenbezogener Verdichtungsarbeit geprüft wird, eine Bezugsdichte im Labor ermittelt. Der Verdichtungsgrad beschreibt dabei die erreichte Verdichtung im Feld in Bezug auf die Referenzwerte im Laborversuch. Darüber hinaus stellt die Scherfestigkeit des verwendeten Materials einen wichtigen Faktor für die Standsicherheit im

¹¹² Eigene Darstellung in Anlehnung an Knappe 2010, S. 20

¹¹³ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 132

Erdbau dar. Diese ist von den zwei Scherparametern, dem Reibungswinkel und der Kohäsion, abhängig. Prinzipiell sind die Eigenschaften der Ersatzbaustoffe hinsichtlich der Scherfestigkeit bei entsprechender Aufbereitung gleichwertig oder besser als typisches Verfüllmaterial zu bewerten.¹¹⁴ Ein Grund dafür ist die eher kantige Kornform der RC-Baustoffe infolge des Aufbereitungsprozesses.

Um die Gebrauchstauglichkeit dauerhaft sicherzustellen, ist das Verformungsverhalten der RC-Baustoffe ausschlaggebend. Von Bedeutung sind weiterhin die Verwitterungsbeständigkeit bzw. die Raumbeständigkeit, die durch Frost-Tau-Wechselversuche und z.B. das Magnesiumsulfat-Verfahren bestimmt werden kann, und die (Zerfalls-)Beständigkeit des RC-Materials gegen mechanischen Abrieb, wechselnden Wassergehalt und wechselnde Temperatur, die im Siebtrommelversuch ermittelt werden können. Dabei können die mechanische Beanspruchung und der Witterungseinfluss zu einer Änderung der Kornverteilung führen. Die Erhöhung des Feinkornanteils wirkt sich auf die bautechnischen Eigenschaften aus, die die Dauerhaftigkeit betreffen. Wiederum sind Wasserlagerungsversuche und Trocknungs-Befeuchtungs-Wechselversuche nach BAUMGÄRTEL nicht zielführend, um Aussagen zur Beständigkeit von RC-Baustoffen zu treffen, da bei diesen Versuchen die Belastungen nicht ausreichen, um ein Zerfallen der einzelnen Bestandteile zu erzeugen.¹¹⁵

RC Beton

Im Wesentlichen werden die Eigenschaften von RC Beton stark durch die Eigenschaften des Ausgangsbetons beeinflusst. Die mechanischen Eigenschaften werden zunehmend besser, je mehr hochwertiger Altbetonanteil im RC Beton enthalten ist.¹¹⁶

RC-Beton ist natürlichen Mineralbaustoffen, bezüglich der Verdichtbarkeit bei höheren Wassergehalten, wegen der Porosität der Einzelkörner überlegen.¹¹⁷ Aufgrund dieser Porosität besitzt RC Beton ein großes Wasseraufnahmepotential und daher ist auch bei schlechtem Wetter bzw. höherem Wassergehalt eine Verarbeitbarkeit gegeben, während konventionelles Material bei diesen Umständen bereits häufiger an seine Grenzen stößt.¹¹⁸ D.h. bei RC Beton kann die Verdichtung weitgehend unabhängig vom Wassergehalt stattfinden.¹¹⁹ Bei CARDOSO et al. liegt der optimale Wassergehalt von RC Beton etwa bei 10,9 %.¹²⁰ Wenn das Recyclingmaterial im Bereich des optimalen Wassergehaltes mit entsprechender Ver-

¹¹⁴ Vgl. Rahman et al. 2014, S. 75

¹¹⁵ Vgl. Baumgärtel 2008, S. 43

¹¹⁶ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 133

¹¹⁷ Vgl. Arulrajah et al. 2012a, S. 744

¹¹⁸ Vgl. Huber 2017, S. 8f

¹¹⁹ Vgl. Aquil et al. 2005, S.53

¹²⁰ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 138

dichtungsenergie verdichtet wird, kann das Material eine Druckfestigkeit erreichen, die im gleichen Bereich anzusiedeln ist, wie die von gut gestuften Kiesböden.¹²¹

Bezüglich der Scherparameter werden bei RC Beton üblicherweise hohe Werte erreicht. Auf Basis von Triaxialversuchen werden bei ARULRAJAH et al. ein Reibungswinkel von 49° und eine Kohäsion von 45 kN/m² erzielt.¹²² Bei RAHMAN et al. konnten infolge von Triaxialversuchen Reibungswinkel von 52° und eine Kohäsion von 64,4 kN/m² und infolge von Rahmenscherversuchen Reibungswinkel von 65° und eine Kohäsion von 95,0 kN/m² ermittelt werden. Der untersuchte RC Beton bestand zu 47,9 % aus Kiesanteil, 42,2 % aus Sandanteil und 9,9 % aus Feinanteilen. Aus den Scherfestigkeitsparametern lässt sich ableiten, dass RC Beton i.d.R. eine vergleichsweise hohe Scherfestigkeit gegenüber den anderen RC-Baustoffen aufweist.¹²³

Auch bei RC Beton sind die Festigkeit und der Steifemodul extrem abhängig von dem Maß des Verdichtens. Diese Werte sind wesentlich niedriger, wenn das Material mit einem Verdichtungsgrad von 90 % verdichtet wird, statt mit einem Verdichtungsgrad von 100 %. Vor allem nimmt dieser Effekt ein größeres Ausmaß an, als der Effekt bei natürlichen Mineralbaustoffen.¹²⁴ Damit bei Erdbauwerken, auch aus RC Beton, ein möglichst hoher Widerstand gegen Verformungen entsteht, sollten diese hochverdichtet werden. Des Weiteren wurde bei RC Beton eine Steigerung des Steifemoduls über die Zeit beobachtet, die in der nachträglichen Abbindung der noch reaktiven Zementanteile begründet ist. Im Gegensatz dazu ist bei natürlichen Mineralbaustoffen mit dieser Eigenschaft nicht zu rechnen.¹²⁵

Hinsichtlich der Beständigkeit gegenüber Einwirkungen wie Frost oder mechanische Einflüssen wurden bei RC Beton nach diversen Versuchen folgende Aussagen getroffen. Nach TOUSSAINT weisen besonders Altbetone bei Frost-Tau-Wechselversuchen unterschiedliche Eigenschaften in Abhängigkeit ihrer Festigkeit auf.¹²⁶ Beim Los Angeles Verfahren, das zur Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß und Krafeinwirkung einer Gesteinskörnung dient und ein Referenzverfahren neben dem Schlagversuch darstellt, kann RC Beton nach ARULRAJAH et al., einen Los-Angeles-Koeffizienten von 28 erreichen und würde damit in Bezug auf den Widerstand gegen Verschleiß über natürlichen Kiesen liegen, die nach ARULRAJAH et al. Werte bis 35 aufweisen.¹²⁷ Bei RAHMAN et al. wurden ähnliche CBR-Werte zwischen 29,9 und 31,7 erzielt.¹²⁸ Material mit einem niedrigen LA hat einen höheren Widerstand gegen Verschleiß als Material mit einem höheren LA. Somit kann RC Beton wider-

¹²¹ Vgl. Aquil et al. 2005, S. 53

¹²² Vgl. Arulrajah et al. 2012b, S. 799

¹²³ Vgl. Rahman et al. 2014, S. 77-80

¹²⁴ Vgl. Aquil et al. 2005, S. 71

¹²⁵ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 139

¹²⁶ Vgl. Toussaint 1997, S. 497ff

¹²⁷ Vgl. Arulrajah et al. 2012b, S. 799

¹²⁸ Vgl. Rahman et al. 2014, S. 78

standsfähiger gegen die schlagende Beanspruchung sein als natürliche Mineralbaustoffe. Hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit kennzeichnen diese Werte, dass RC Beton als dauerhaft bezeichnet werden kann.¹²⁹ Darüber hinaus hängt der Widerstand gegen den Sulfatangriff vor allem von dem Zementanteil im RC Beton und der Hochwertigkeit des Altbetons ab.¹³⁰

Hinsichtlich der Tragfähigkeit einer Schicht gibt u.a. der CBR-Wert Aufschluss. Dieser liegt nach CARDOSO et al. bei bestimmten RC Betonen etwas niedriger als bei natürlichen Mineralbaustoffen, bei 97 bis 138 %, wobei der CBR-Wert von natürlichem Material einen Wert von 152 % annehmen kann.¹³¹ Bei RAHMAN et al. wurde für RC Beton ein CBR-Wert von 172 % und bei ARULRAJAH et al. CBR-Werte in einem Bereich zwischen 118 und 160 % ermittelt.¹³² Daraus lässt sich schließen, dass RC Beton hohe CBR-Werte aufweisen kann und diese mit natürlichen Gesteinskörnungen vergleichbar sind.

RC Mix

Prinzipiell sind die erdbautechnischen Eigenschaften von RC Mix unter denen von RC Beton anzusiedeln. Bei der Verdichtung ist darauf zu achten, dass der Feinkornanteil durch die mechanische Einwirkung nicht zu stark anwächst und negative Auswirkungen bezüglich der hydraulischen Eigenschaften verhindert werden.¹³³ Der durchschnittliche optimale Wassergehalt liegt bei bestimmten RC Betonen nach CARDOSO in etwa bei 12,3 %.¹³⁴ Weiterhin wird bei einem höheren Ziegelbruchanteil der optimale Wassergehalt gesteigert und die Proctordichte vermindert.¹³⁵

Bezüglich der Scherfestigkeit konnten ARULRAJAH et al. bei Gemischen mit verschiedenen Anteilen von Altbeton und Ziegelbruch im Zuge von Triaxialversuchen Reibungswerte zwischen 43° und 50° und Kohäsionswerte im Bereich von 51 bis 80 kN/m² ermitteln.¹³⁶

Bezüglich der Beständigkeit von Fremdbestandteilen gegenüber mechanischer Einwirkung, Wassergehalts- sowie Temperaturänderungen wurde nach BAUMGÄRTEL bei Siebtrommelversuchen mit Ziegelbruch Abplatzungen von größeren Probestücken dokumentiert. Es fand allerdings kein Zerfall einzelner Proben statt und anhaftende Mörtelreste ließen sich gleichzeitig nicht lösen. Wie RC Beton fiel auch Ziegelbruch in dieselbe Veränderlichkeitsgruppe, die eine hohe Zerfallsbeständigkeit im Siebtrommelversuch, kein oder nur geringer Zerfall der Probekörper und geringes Absanden im Versuchsverlauf kennzeichnen. Dagegen zerfielen Proben aus Mörtel und Putz teilweise komplett. Insgesamt wurden die Mörtel- und

¹²⁹ Vgl. Arulrajah et al. 2012a, S. 744ff

¹³⁰ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 141

¹³¹ Vgl. Arulrajah et al. 2012a, S. 747 und Cardoso et al. 2016, S. 136ff

¹³² Vgl. Rahman et al. 2014, S. 79 und Arulrajah et al. 2012b, S. 799

¹³³ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 135

¹³⁴ A.a.O., S. 138

¹³⁵ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 143

¹³⁶ Vgl. Arulrajah et al. 2012b, S. 799

Putzproben der schlechtesten Veränderlichkeitsgruppe zugeordnet. Diese Gruppe wird u.a. durch eine mittlere bis hohe Zerfallsbeständigkeit und ein starkes Absanden beschrieben.¹³⁷ Durch diese Ergebnisse lässt sich schließen, dass der Mörtel- und Putzanteil im Hinblick auf die Beständigkeit begrenzt werden sollte. Daher wird von vielen Aufbereitern versucht, diese Anteile auszusortieren.

Die Tragfähigkeit von Erdbauwerken aus RC Mix hängt auch von der stofflichen Zusammensetzung ab. Da RC Mix meist aus Mischabbruch aufbereitet wird, kann der RC-Baustoff eine hohe stoffliche Variabilität aufweisen. Im Hinblick auf die Tragfähigkeit ist beim RC Mix hauptsächlich der Mauerwerksanteil ausschlaggebend. Wenn der Mauerwerksanteil im RC Mix erhöht wird, nehmen die CBR-Werte und somit die Tragfähigkeit ab. Nach CARDOSO et al. kann der CBR-Wert im Bereich von 62 bis 117 % liegen. Um im selben Bereich wie natürliche Mineralbaustoffe zu liegen, muss der Mauerwerksanteil daher begrenzt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Tragfähigkeit des RC Mix wäre die Erhöhung des Altbetonanteils.¹³⁸ Im Allgemeinen sind die Festigkeitseigenschaften des RC Mix auch vom Anteil des höherwertigen Altbeton abhängig und werden in der Praxis durch gezielte Zugabe von RC Beton positiv beeinflusst.

RC Ziegel

Als Reinstoff findet gebrochener Ziegel in technischen Bauwerken i.d.R. keine Anwendung. Allerdings sind große Anteile an Ziegelbruch im RC Mix vorhanden. Die Relevanz von RC Ziegel begründet sich aufgrund der Anteile im RC Mix und der Vorbehalte gegenüber Ziegelanteilen in Sekundärbaustoffen. Daher sind die Eigenschaften des reinen Ziegelbruchs von Bedeutung.

Auch bei der Verdichtung von RC Ziegel sollte ein schonendes Verdichtungsverfahren verwendet werden, um die Herstellung von Feinanteilen zu minimieren. Das beste Verdichtungsverhalten wird bei Versuchen von ARULRAJAH et al. bei einem optimalen Wassergehalt von etwa 10,7 % beobachtet.¹³⁹

Bei Wassergehalten, die über 65 % des optimalen Wassergehalts liegen, nimmt die Scherfestigkeit von RC Ziegel ab, dann die Reibung zwischen den Einzelkörnern beeinträchtigt wird.¹⁴⁰ Beim Triaxialversuch liegen die Parameter der Scherfestigkeit von RC Ziegel nach ARULRAJAH et al. im Bereich von 48,8° und 49° mit einer Kohäsion von etwa 41 kN/m² und nach RAHMAN et al. bei 51° mit einer Kohäsion von 59,9 kN/m².¹⁴¹ In Folge von Rahmenscherversuchen wurden bei RAHMAN et al. ein Reibungswinkel von 57° und eine Kohäsion von

¹³⁷ Vgl. Baumgärtel 2008, S. 49f

¹³⁸ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 139 und S. 143

¹³⁹ Arulrajah et al. 2011, S. 1448 und Cardoso et al. 2016, S. 138

¹⁴⁰ Vgl. Arulrajah et al. 2011, S. 1451

¹⁴¹ A.a.O., S. 1447, Arulrajah et al. 2012a, S. 744f und Rahman et al. 2014, S. 79f

87,0 kN/m² erzielt. In den Versuchen von Rahmen wurden RC Ziegel mit einer Körnung von 0/30 mit einem Kiesanteil von 52,6 %, einem Sandanteil von 38,4 % und einem Feinanteil von 9,0 % untersucht.¹⁴² Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass die Scherfestigkeit von RC Ziegel der Scherfestigkeit von RC Beton unterliegt.

Nur bei einem Verdichtungsgrad von 98 % und einem Wassergehalt von 65 % des optimalen Wassergehalts erreicht das Material nach ARULRAJAH et al. geeignete Werte in Bezug auf die Steifigkeit und die dauerhafte Verformung. Die Verformung liegt dann etwa im gleichen Bereich wie die von hochwertigen natürlichen Mineralbaustoffen, während der Steifemodul diese sogar übertreffen kann.¹⁴³

Nach KRASS UND KOLLAR wurde eine Einteilung zwischen dichten bzw. hartgebrannten Ziegeln, die der Witterung direkt ausgesetzt sind (Vormauerziegel, Dachziegel, Pflasterklinker), weichgebrannten Ziegeln (Hintermauerziegel) sowie Ziegelgemischen (mit Mörtel- und Putzanteilen) vorgenommen. Bei Versuchen zur Beständigkeit gegenüber Frost-Tau-Wechseln wurde festgestellt, dass bei dichten Ziegeln die geringsten Absplitterungen anfielen und bei den Ziegelgemischen die Absplitterungen deutlich anstiegen. Daraus kann gefolgert werden, dass die Frostempfindlichkeit von Ziegeln von der Qualität des Altziegels und den Anteilen an Mörtel und Putz abhängt.¹⁴⁴ Der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel von RC Ziegel ist nach CARDOSO et al. wesentlich höher als der von RC Beton. Dies könnte einerseits in der kleineren Anzahl an verfügbaren Poren der Ziegelpartikel liegen, oder andererseits in dem kleineren Durchmesser der Ziegelporen begründet sein. Da RC Ziegel bei CARDOSO et al. in Versuchen mit dem Mg-SO₄-Verfahren einen geringeren Masseverlust als RC Beton aufweist, kann auf eine höhere Verwitterungsbeständigkeit von RC Ziegel geschlossen werden.¹⁴⁵ Der Widerstand gegen Zertrümmerung, ausgedrückt durch den Los-Angeles-Koeffizient, liegt nach ARULRAJAH et al. mit 36 über dem Wert von RC Beton und von natürlichen Mineralbaustoffen und weist auf eine geringe Widerstandsfähigkeit gegen eine schlagende Beanspruchung hin.¹⁴⁶ Bei RAHMAN et al. wurden ähnliche Werte zwischen 33,0 und 35,1 nachgewiesen.¹⁴⁷ In den Siebtrommelversuchen durch BAUMGÄRTEL wurde Ziegelgranulat in die gleiche Veränderlichkeitsgruppe wie Ziegelbruch und RC Beton eingeteilt. Bei diesen Fremdbestandteilen wurden kein Zerfall und kein erhöhter mechanischer Abrieb festgestellt.¹⁴⁸ Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass RC Ziegel i.d.R. einen hohen Widerstand gegen Frost und mechanischen Abrieb aufweist. Lediglich bei schlagender Beanspruchung weist RC Ziegel üblicherweise einen niedrigen Widerstand auf.

¹⁴² Vgl. Rahman et al. 2014, S. 77-80

¹⁴³ Arulrajah et al. 2011, S. 1450

¹⁴⁴ Krass und Kollar 2004

¹⁴⁵ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 141

¹⁴⁶ Arulrajah et al. 2011, S. 1448

¹⁴⁷ Vgl. Rahman et al. 2014, S. 78

¹⁴⁸ Vgl. Baumgärtel 2008, S. 49-53

Bei CBR-Versuchen nach ARULRAJAH et al. kann RC Ziegel in Einzelfällen Werte zwischen 123 und 138 % besitzen. Dies lässt auf akzeptable Eigenschaften bezüglich der Tragfähigkeit schließen.¹⁴⁹ Ein Vergleichbarer CBR-Wert von 135 % wurde bei RAHMAN et al. ermittelt.¹⁵⁰ Wenn der Ziegelanteil bei RC Ziegel und RC Mix aus einem höheren Anteil von dichten Altziegeln bestehen würde, können diese RC-Baustoffe eine höhere Druckfestigkeit erreichen.¹⁵¹

RC Asphalt

Wie bereits erwähnt, wird dieser RC-Baustoff erdbautechnisch nicht eingesetzt. Er soll dennoch beschrieben werden, da der Einsatz von RC-Asphalt im Erd- und Straßenbau theoretisch möglich wäre und dennoch große Mengen an Asphalt im Zuge des Straßenrückbaus gewonnen werden. Beim Verdichtungsverhalten reagiert RC Asphalt anders als RC Beton und RC Mix. Den optimalen Wassergehalt beim Verdichten betreffend, liegen die Werte bei einzelnen Versuchsergebnissen von RC Asphalt nach CARDOSO et al. niedriger, als bei den anderen RC-Baustoffen, bei durchschnittlich 7,1 %.¹⁵²

Bei Versuchen von RAHMAN et al. lag der Wert für den Reibungswinkel im Triaxialversuch bei 58° und die Kohäsion bei einem Wert von 45,4 kN/m², während der Reibungswinkel beim Rahmenscherversuch einen Wert von 45° annahm und eine Kohäsion von 15,0 kN/m² entstand.¹⁵³ Prinzipiell kann die Scherfestigkeit beim Rahmenscherversuch von RC Asphalt der Scherfestigkeit von RC Beton und RC Ziegel untergeordnet werden.¹⁵⁴

Bei der Erhöhung der Anteile von Altasphalt vergrößert sich der Steifemodul des RC Asphalt. Dabei lässt allerdings der Widerstand gegen dauerhafte Verformungen nach.¹⁵⁵

RC Asphalt weist einen akzeptablen Masseverlust bei dem Frost-Tau-Wechsel-Versuch auf und liegt daher im Hinblick auf die Widerstandsfähigkeit gegen Frost bzw. Tau in demselben Bereich wie natürliche Mineralbaustoffe.¹⁵⁶ Beim Widerstand gegenüber Zertrümmerung kann RC Asphalt nach RAHMAN et al. einen Los-Angeles-Koeffizienten von 38,5 bis 39,8 besitzen. Damit liegt die Beständigkeit gegen Verschleiß unter den Werten von RC Beton und RC Ziegel.¹⁵⁷

Im Allgemeinen erreichen die Werte des CBR-Versuchs von RC Asphalt kleinere Werte als die von natürlichen Mineralbaustoffen. Dies deutet daher auf eine geringere Tragfähigkeit hin. Weiterhin sind die CBR-Werte, die nach RAHMAN et al. bei einem Wert von 39 % liegen,

¹⁴⁹ Vgl. Arulrajah et al. 2011, S. 1448

¹⁵⁰ Vgl. Rahman et al. 2014, S. 79

¹⁵¹ Vgl. Arulrajah et al. 2011, S. 1445

¹⁵² Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 138

¹⁵³ Vgl. Rahman et al. 2014, S. 79

¹⁵⁴ A.a.O., S. 83

¹⁵⁵ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 140

¹⁵⁶ A.a.O., S. 141

¹⁵⁷ Vgl. Rahman et al. 2014, S. 78

von RC Asphalt i.d.R. auch niedriger als die von RC Beton und RC Mix. Trotzdem gibt es auch Ausnahmen, bei denen höhere Werte als bei RC Mix entstehen, und die damit bestätigen, dass auch bei RC Asphalt die mechanischen Eigenschaften besonders von dem Ausgangsmaterial abhängen.¹⁵⁸

6.3 BEWERTUNG DER BAUTECHNISCHEN EIGNUNG

Im Folgenden wird überprüft, ob der Einsatz der genannten RC-Baustoffe für die Anwendungen von Punkt 6.1 möglich ist. Jede Problematik sollte ggf. einer Einzelfallprüfung unterzogen werden. Trotzdem können allgemein gültige Aussagen getroffen werden, da von gütegesichertem RC-Material ausgegangen wird.

RC Beton

Üblicherweise fällt die Wahl beim Einsatz von RC-Baustoffen im Straßenbau bei ungebundenen Tragschichten auf RC-Beton. Das liegt daran, dass die bautechnischen Eigenschaften von RC Beton bei adäquater Herstellung in demselben oder sogar höheren Bereich liegen als die von natürlichen Mineralbaustoffen.¹⁵⁹ Schrumpfungseffekte und Reflexionsrisse bei dem Einsatz von RC Beton in Tragschichten durch das nachträgliche Abbinden des Zementanteils sind vernachlässigbar.¹⁶⁰

Für den Einsatz in einem Lärmschutzwall würde das Material gewöhnlich den Anforderungen entsprechen. Zusätzlich erfüllt es üblicherweise die Anforderungen als Verfüllmaterial.¹⁶¹ Auch den Bedingungen für den Einsatz in einer Baustraße würde es genügen. In der Praxis könnte es auch für die Herstellung von Sichtbetonelementen verwendet werden. Bei den unterschiedlichen Einsatzgebieten ist darauf zu achten, dass diese eine unterschiedliche Aufbereitung und unterschiedlichen Aufbereitungsaufwand in Bezug auf die RC-Baustoffe erfordern.

Um bei den Anwendungsmöglichkeiten von einer möglichst hochwertigen Verwertung zu sprechen, sollte RC Beton für ungebundene Tragschichten oder für Sichtbetonelemente eingesetzt werden, da bei den anderen Anwendungen auch der Einsatz von minderwertigeren Materialien aus erdbaupraktischer Sicht möglich wäre. Überwiegend wird es daher im Straßenunterbau eingesetzt.

¹⁵⁸ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 138 und Rahman et al. 2014, S. 79

¹⁵⁹ A.a.O., S. 143

¹⁶⁰ Vgl. Arulrajah et al. 2012b, S. 807

¹⁶¹ Vgl. O'Mahony 1997, S. 606

RC Mix

Der RC Mix kann im Straßenbau als ungebundene Schicht bei Straßen mit niedrigeren Belastungsklassen eingesetzt werden, da er aus erdbautechnischer Sicht unter RC Beton anzusiedeln ist. Für Schwerverkehr, z.B. auf Autobahnen, ist er, aufgrund seiner stofflichen Anteile an Mörtel und Putzen, nicht geeignet. Seine Eigenschaften genügen für die Anwendung in einem Lärmschutzwall. Weiterhin ist das Material aufgrund der Eigenschaften für die Verwendung als Hinterfüllung bzw. Verfüllung geeignet.¹⁶² Für die Anwendung in einem Leitungsgraben wird üblicherweise RC Sand und RC Mix für die Leitungsbettung und RC Mix für die Verfüllung der Leitungsgräben verwendet. Des Weiteren könnte das Material auch in einer Baustraße eingesetzt werden. Ebenso wäre es für eine Anwendung außerhalb des Erd- und Straßenbaus, im Landschaftsbau, für die Herstellung von Sichtbetonelementen geeignet.

Aufgrund seiner Eigenschaften sollte RC Mix überwiegend als Hinterfüll- bzw. Verfüllmaterial für Baugruben und Leitungsgräben verwendet werden. Üblicherweise wird das Material auch als Unterbau von Gebäuden (z.B. Industriehallen) eingesetzt.

RC Ziegel

Bei RC Ziegel findet normalerweise keine Verwendung als Reinstoff im Erd- und Straßenbau statt. Um allen Anforderungen für den Einsatz im Straßenbau zu genügen, wird der reine Ziegelbruch durch das Mischen mit rezyklierten Gesteinskörnungen aus Beton und deren positiven erdbautechnischen Eigenschaften verbessert.¹⁶³ Für die Anwendung in einem Lärmschutzwall ist das Material danach üblicherweise geeignet. Zugleich kann sich das Baustoffgemisch „in Bezug auf die physikalischen, geotechnischen und (chemischen) Anforderungen für die Verwendung in Leitungsgräben, [...] behaupten“.¹⁶⁴ Damit erfüllt es auch die Bedingungen für die Anwendung in Hinterfüllungen und Baugruben-Verfüllungen. Obendrein könnte es auch für die Herstellung von Baustraßen verwendet werden.

Außerhalb des Erd- und Straßenbaus wäre der Einsatz von RC Ziegel als Zuschlag in Betonsichtelementen bzw. für Anwendungen mit geringeren Anforderungen prinzipiell möglich. Insbesondere RC Ziegel mit einem hohen Anteil an Altziegeln mit einer niedrigen Porosität wären wegen der höheren Druckfestigkeit (s. Punkt 4.2) für diesen Einsatz geeignet.

In der Praxis wird RC Ziegel überwiegend im Landschaftsbau eingesetzt. Sortenrein erfasseter, aufbereiteter Ziegel ohne Mörtel- oder Betonbestandteile findet seine Anwendung in Kultursubstraten.

¹⁶² Vgl. O'Mahony 1997, S. 606

¹⁶³ Arulrajah et al. 2011, S. 1448

¹⁶⁴ Vgl. Rahman et al. 2014, S. 75

RC Asphalt

Hierbei wird erneut darauf hingewiesen, dass zurückgewonnener Asphalt i.d.R. nicht zu RC Asphalt aufbereitet wird, sondern zur Herstellung von Asphaltmischgut dient. Die Bewertung der bautechnischen Eignung ist daher eine rein hypothetische Betrachtung.

Für die Anwendung im Straßenbau als Tragschicht wurden in Einzelfällen für RC Asphalt bei Versuchen zum Teil ungenügende Eigenschaften nachgewiesen, die die Tragfähigkeit betreffen.¹⁶⁵ Der Einsatz in einem Lärmschutzwall wäre prinzipiell möglich. Bei der Verfüllung von Leitungsgräben entspricht der Ersatzbaustoff allen erdbautechnischen Anforderungen.¹⁶⁶ Auch bei den Anwendungen als Baugruben-Verfüllung und für eine Baustraße kann RC Asphalt diese Anforderungen erfüllen. Für Sichtbetonelemente im Landschaftsbau wird das Material nicht eingesetzt.

Allgemein genügt auch RC Asphalt hinsichtlich der erdbautechnischen Anforderungen fast allen Einsatzmöglichkeiten. Für einen Einsatz als Hinterfüllung bzw. Verfüllung sollte es allerdings in der Praxis nicht eingesetzt werden, da es den wasserwirtschaftlichen Bedingungen nicht entspricht.¹⁶⁷

Wie bereits in Punkt 6.3 erwähnt, wird RC Asphalt i.d.R. nicht als Erdbaustoff verwendet. In erster Linie wird zurückgewonnener Asphalt als Zugabe im Asphaltmischwerk eingesetzt.

7. PRODUKTNEUTRALE AUSSCHREIBUNG VON GEWERKEN IM ERD- UND STRAßENBAU

In diesem Kapitel wird die Ausschreibung in Verbindung mit der Verwertung von mineralischen Baurestmassen behandelt, da Ausschreibungen für den Straßenbau, nach Aussagen der Obersten Baubehörde, oft Fehler aufweisen. Einer dieser Verstöße stellt oft die fehlende Produktneutralität dar. Zunächst werden die Regelungen und Gesetze behandelt, aus denen sich bestimmte Pflichten für die Ausschreibung ergeben. Des Weiteren werden Negativbeispiele genannt und zwei Positivbeispiele vorgestellt, wie Leistungsverzeichnisse aussehen sollen, um zukünftige Fehler bezüglich der Ausschreibung zu vermeiden.

Nach den VOB/A sind öffentliche Auftraggeber verpflichtet, produktneutral auszuschreiben: „In technischen Spezifikationen darf nicht auf eine bestimmte Produktion oder Herkunft oder ein besonderes Verfahren, das die von einem bestimmten Unternehmen bereitgestellten Produkte charakterisiert, oder auf Marken, Patente, Typen oder einen bestimmten Ursprung oder eine bestimmte Produktion verwiesen werden, es sei denn [...] dies ist durch den

¹⁶⁵ Vgl. Cardoso et al. 2016, S. 143

¹⁶⁶ Vgl. Rahman et al. 2014, S. 75

¹⁶⁷ A.a.O., S. 84

Auftragsgegenstand gerechtfertigt oder [...] der Auftragsgegenstand kann nicht hinreichend genau und allgemein verständlich beschrieben werden; solche Verweise sind mit dem Zusatz oder gleichwertig zu verstehen.“¹⁶⁸ Damit erfolgt eine neutrale Bewertung zwischen Primär- und Sekundärbaustoffen, die sich auch in der bauvertraglichen Gleichstellung gemäß DIN 18299 wiederfindet (s. Punkt 2.1).

Allgemein haben öffentliche Auftraggeber eine besondere Vorbildfunktion im Hinblick auf Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft. Dies gilt gemäß dem Bayerischen Abfallwirtschaftsgesetz auch in Bayern. „Staat, Gemeinden, Landkreise, Bezirke [...] haben vorbildhaft [zur Ressourcenschonung und zur Kreislaufwirtschaft] beizutragen [...] [und] dazu sind finanzielle Mehrbelastungen und Minderungen der Gebrauchstauglichkeit in angemessenen Umfang hinzunehmen.“¹⁶⁹ Durch die Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen kann es prinzipiell zu Minderungen kommen, wobei diese nicht zwangsläufig dazu führt. Weiterhin sollen nach dem Beschluss des Bayerischen Landtages vom 14.03.2017, „Vermehrter Einsatz von Recyclingbaustoffen bei staatlichen Baumaßnahmen“, Ersatzbaustoffe statt Primärbaustoffe eingesetzt werden, solange keine Mehrkosten entstehen und umwelttechnische Belange dagegen sprechen.¹⁷⁰ Somit müssen öffentliche Auftraggeber bei Bauvorhaben den Produkten, die aus mineralischen Baurestmassen hergestellt sind, den Vorzug geben, wenn diese für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignet und wirtschaftlicher sind. Dementsprechend ergibt sich die Schlussfolgerung, dass Ausschreibungen der öffentlichen Hand gegen die gesetzlichen Vorgaben des Bayerischen Abfallwirtschaftsgesetzes verstoßen, wenn nur Primärbaustoffe ausgeschrieben werden, obwohl aus mineralischen Restmassen hergestellte RC-Baustoffe verwendbar wären.¹⁷¹ Zusätzlich dazu müssen in der Ausschreibung die gleichen Vorgaben, z.B. dieselben Einbaudicken, für natürliche Baustoffe und RC-Baustoffe gelten.¹⁷²

Negative Beispiele für die Ausschreibung von RC-Baustoffen sind Formulierungen wie:

- „ohne RC-Baustoffe und industriell hergestellte Gesteinskörnung“¹⁷³
- „gebrochenes Naturgestein 0/32 mm (Frostschutz)“¹⁷⁴
- „Recyclingbeimengungen sind nicht gestattet“¹⁷⁵

¹⁶⁸ DIN 1960, § 7 Abs. 2

¹⁶⁹ BayAbfG, Art. 2

¹⁷⁰ Bayerischer Landtag, Beschluss vom 14.03.2017

¹⁷¹ Vgl. Benson 2010, S. 34

¹⁷² A.a.O., S. 40

¹⁷³ Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr 2007, S. 910/13

¹⁷⁴ Benson 2010, S. 37

¹⁷⁵ Ebenda

Konkrete Gründe, wieso die RC-Baustoffe ausgeschlossen werden, sind nicht erkennbar. Bedingungen für den Ausschluss wären beispielsweise ein Bauvorhaben in Trinkwasserschutzgebieten, in Gebieten mit häufigen Überschwemmungen sowie in Naturschutzgebieten.

Wenn für den klassifizierten Straßenbau in Bayern ausgeschrieben wird, ist es im Allgemeinen unverzichtbar, sich an der Leistungsbeschreibung für den Straßen- und Brückenbau in Bayern (LB By-StB) zu orientieren. Dabei sollte beachtet werden, dass sich die Kommunen nach Aussagen der Obersten Baubehörde üblicherweise nach der LB By-StB richten. Im Folgenden werden die Ausschreibungen beispielhaft für eine Frostschutzschicht und für einen Lärmschutzwall beleuchtet.

Im staatlichen Tiefbau könnte eine Frostschutzschicht z.B. folgendermaßen produktneutral ausgeschrieben werden, damit auch Sekundärbaustoffe mit einbezogen werden. Ziegelhaltige Ersatzbaustoffe werden im Straßenbau i.d.R. nicht verwendet.

Lfd. Nr.	Artikelbezeichnung	Menge	ME	Einheitspreis in EUR	Gesamtbetrag in EUR
Nr.	Frostschutzschicht (FSS) herstellen				
	Einbaubereich ...				
	Baustoffgemisch <i>Körnung</i> für Frostschutzschicht, maximal RW 1				
	gemäß TL SoB-StB 04, Fassung 2007 und TL Gestein-StB 04, Fassung 2007 und ZTV wwG-StB By 05				
	Feinkornanteil Kategorie UF 5, im eingebauten Zustand höchstens 7 M.-% Feinanteile				
	Einbaudicke cm ...				
	bis cm ...				
	Material: ...				
	Größtkorn:				
	(Verformungsmodul EV₂ min. MPA ...				
	Verdichtungsgrad D_{Pr} min. % ...)				
	Preis frei Verwendungsstelle in Sattel-/Zugfahrten	<i>Menge</i>	t

ABBILDUNG 11: LEISTUNGSVERZEICHNIS FROSTSCHUTZSCHICHT¹⁷⁶

¹⁷⁶ Eigene Darstellung in Anlehnung an Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr 2007, S. 910/13f

Für einen Lärmschutzwall könnte das Leistungsverzeichnis folgendermaßen aussehen:

Lfd. Nr.	Artikelbezeichnung	Menge	ME	Einheitspreis in EUR	Gesamtbetrag in EUR
Nr.	<p>Boden oder Baustoff liefern und nach Unterlagen des AG profilgerecht einbauen und verdichten. Die Abrechnung erfolgt im Auftrag. Die Herstellung von Mulden und Gräben sowie das Herstellen der Ausrundung am Dammfuß wird gesondert vergütet.</p> <p>Boden aus Seitenentnahmen oder Gewinnungs- betrieben, aufbereiteter Boden (BO), Boden mit Fremdbestandteilen (BmF) oder Rezyklierte Baustoffe (RC) gemäß TL BuB E-StB 09 und TL Gestein-StB 04, Fassung 2007</p> <p>Einbauklasse bis Z 1.1 gemäß LAGA M20 1997</p> <p>liefern und nach Unterlagen des AG in Lärmschutzwall, Sichtschutzwall oder dgl. einbauen und verdichten</p> <p>Preis frei Verwendungsstelle in Sattel-/Zugfahrten</p>	<i>Menge</i>	t

ABBILDUNG 12: LEISTUNGSVERZEICHNIS LÄRMSCHUTZWALL¹⁷⁷

In anderen Bundesländern, wie z.B. in Brandenburg, ist es möglich, in einer Leistungsbeschreibung für ein Bauvorhaben die Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen vorzuschreiben.¹⁷⁸ Bei der Fremdüberwachung ist allgemein zu beachten, dass sie in der Praxis i.d.R. nicht einzeln ausgeschrieben wird, vielmehr wird sie im Paket zusammen mit der Herstellung angeboten.

¹⁷⁷ Eigene Darstellung in Anlehnung an Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr 2007, S. 904/7f

¹⁷⁸ Vgl. Dageförde et al. 2017, S. 44

8. RECYCLING- UND WERTWERTUNGSKONZEPT FÜR DIE EHEMALIGE BAYERNKASERNE

Im Folgenden wird das Verwertungskonzept für die BYK vorgestellt. Dieses stellt eine Variante dar, wie die Stadt München mit der Themenstellung umgehen kann. Dabei werden die vorgenannten Ausführungen exemplarisch am Beispiel der Bayernkaserne aufgezeigt.

8.1 GRUNDSTÜCKSGEGEBENHEITEN

Zunächst werden die für die Verwertung relevanten Besonderheiten des Geländes der ehemaligen Bayernkaserne aufgezeigt. Dazu gehören die bestehende Bebauung, die Untersuchungen der Substanz in Hinsicht auf Altlasten und die Baugrundverhältnisse, damit im Anschluss Aussagen über den erwarteten Anfall von mineralischen Baurestmassen getroffen werden können.

8.1.1 ALTBEBAUUNG

Die in den 30er Jahren entstandenen Bauten bestehen hauptsächlich aus Ziegelmauerwerk, während die Decken aus Stahlbeton hergestellt wurden. In den 80er Jahren wurden zusätzlich drei Gebäude (G) G36, G12 und G44, in Stahlbetonbauweise errichtet. Außerdem wurden die Gebäude G8, G12 und G39 zwischen 2013 und 2015 saniert. Da sich die Straßenführung und der Straßenoberbau seit der Entstehung nicht wesentlich verändert haben, wird die Tragschicht an vielen Stellen, wegen der Belastung durch Panzer, aus einer Kalksteinschicht gebildet, während der Pflasterbelag im Bereich der Innenhöfe der Werkstätten auf einer ca. 25 cm starken Betonschicht hergestellt wurde.¹⁷⁹

Die Gebäude der Bayernkaserne schließen eine Fläche von ca. 70.000 m² ein, bzw. ergeben einen Bruttorauminhalt von ca. 560.000 m³, während die Verkehrsflächen ca. 180.000 m² umfassen.¹⁸⁰

Daraus lässt sich schließen, dass mit einer großen Menge an mineralischer Baurestmasse einerseits durch den Abbruch der Gebäude und andererseits durch den Rückbau der Verkehrsflächen, gerechnet werden kann. Zusätzlich werden aufgrund der verschiedenen Bauweisen und unterschiedlichen Vornutzungen die diversesten Materialströme entstehen.

¹⁷⁹ Vgl. Möbius 2017, S. 4

¹⁸⁰ A.a.O., S. 3

8.1.2 ALTLASTENUNTERSUCHUNG

Auch für das Ermitteln der Menge von mineralischen Baurestmassen, die bei entsprechendem Grenzwert in Gruben verwertet oder in Deponien entsorgt werden müssen, ist die Einschätzung der möglichen Schadstoffbelastungen, beispielsweise in Bauteilen, durch Untersuchungen notwendig. Für die Beprobung und Untersuchung von Abfällen sei hierbei die LAGA – Mitteilung 32 – PN 98 erwähnt.

Altlasten sind gemäß § 2 Abs. 5 des Bundes-Bodenschutzgesetzes:

1. „stillgelegte Abfallbeseitigungsanlagen sowie sonstige Grundstücke, auf denen Abfälle behandelt, gelagert oder abgelagert worden sind (Altablagerungen), und
2. [...] Grundstücke stillgelegter Anlagen und sonstige Grundstücke, auf denen mit umweltgefährdenden Stoffen umgegangen worden ist [...] (Altstandorte)“¹⁸¹

Im Gegensatz dazu unterliegt das „Aufsuchen, Bergen und Vernichten von Kampfmitteln [...] nicht bodenschutzrechtlichen, sondern den sicherheitsrechtlichen Bestimmungen.“¹⁸² Wie bei allen Bauvorhaben muss die Kampfmittelfreiheit durch den Kampfmittelbeseitigungsdienst sichergestellt werden.

Da die Vermutung von Altlasten, insbesondere militärischer Altlasten, auf dem Gelände durch die langjährige militärische Vorgeschichte nahelag, wurden über die Jahre folgende Recherchen bzw. Untersuchungen durchgeführt und Gutachten erstellt:

- Historische Recherche (2007)
- Altlastenuntersuchungen (2008, 2010 und 2015)
- Kostenschätzungen für den Rückbau (2009 und 2010)
- Untersuchung Kalkschroppen (2015)
- weitere Untersuchungen (Schadstofftechnische Untersuchungen, DDT Untersuchungen)

Ziel dieser Sondierungen war die Lokalisierung und Einstufung altlastenverdächtiger Flächen und die Einstufung des Geländes wegen Belangen umweltrelevanter und geologischer Natur. Einerseits resultierte der Verdacht aus nutzungsbezogenen Vorgängen (Reparatur, Lagerung wassergefährdender Stoffe) und andererseits aus standortbezogenen Vorgängen (Werk- und Waschhallen, Tankstellen).¹⁸³

¹⁸¹ BBodSchG, § 2 Abs. 5

¹⁸² A.a.O., § 3 Abs. 2, zitiert nach Bayerisches Landesamt für Umwelt

¹⁸³ Vgl. Urban und Blazevic 2007, S. 5

Im Zuge der orientierenden Altlastenuntersuchungen wurden zwischen 2008 und 2017 rund 150 Rammbohrungen bzw. Rammkernsondierungen (RKS) und 50 Schürfe durchgeführt. Grabungen fanden während der ersten Abbruchmaßnahmen in 2014 statt. Darunter fielen die Gebäude G3, G4, G5, G15 und G38, die teilweise unterkellert waren und somit Gruben bis zu einer Tiefe von ca. 3 m entstanden. Durch die Grabungen wurden die Böschungsschnitte freigelegt, die gewachsenen Kies in unauffälliger Prägung zeigten. Zur besseren geotechnischen Beurteilung des Tertiärsandes wurde ausgehend von der Baugrubensohle, in dem Bereich von G5 eine Rammsondierung durchgeführt.¹⁸⁴

Zusätzlich wurde das Gelände ab 2017 mit weiteren 200 Rammsondierungen und RKS erkundet. Die Lagepunkte dieser Untersuchungen sind in Anlage 3.1 dargestellt. Bis zum Ende des Jahres wird die rasterförmige Erkundung mit wenigen Aufschlussbohrungen abgeschlossen sein.¹⁸⁵

Auch der Asbest-Problematik wurde durch Untersuchungen Rechnung getragen. Auf dem Gelände der Bayernkaserne befindet sich Asbest u.a. in Lüftungsanlagenteilen, in Verbindungen bzw. Dichtungen von Blechkanälen, im Asbestzement von Abluftrohren, in Brandschutzklappen und in Brandschutztüren als Füllung. Die Asbesthaltigen Bauteile wurden an allen zugänglichen und bekannten Standorten durch Spezialfirmen entfernt.

Aus den Altlastenuntersuchungen geht hervor, dass die Schadstoffbelastung sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. Und zwar beispielsweise zum einen für die einzelnen Gebäude, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstanden sind (verschiedene Bauprodukte), und zum anderen innerhalb der Gebäude, da die Geschosse für verschiedene Nutzungen dienten. Für das Verwertungskonzept, in Bezug auf die Materialströme, bedeutet die unterschiedliche Schadstoffbelastung eine Trennung der entstanden Mengen durch den Rückbau in mehrere Materialströme, die dann für die geplante Verwertung in technischen Bauwerken mittels Aufbereitung, für die Verwertung in Gruben, Brüche und Tagebaue sowie für die Entsorgung aufgetrennt werden. Gleichzeitig müssen bereits für den Abbruch entsprechende Maßnahmen geplant werden (s. Punkt 5.1), damit die mineralischen Baurestmassen auch den Schadstoffgehalten nach getrennt werden können und eine Aufbereitung möglich ist.

¹⁸⁴ Vgl. Michel und Stöger 2017, S. 7f

¹⁸⁵ Vgl. Möbius 2017, S. 5

8.1.3 BAUGRUNDVERHÄLTNISSE

Als nächstes werden die geologischen Merkmale auf dem Grundstück dargestellt. Dies betreffend werden die Bodenschichten und die Grundwasserverhältnisse charakterisiert. Die Baugrundverhältnisse sind für die Ausarbeitung des Verwertungskonzeptes im Hinblick auf den Einbau von mineralischen Baurestmassen wichtig, da beispielsweise direkt im Grundwasser gemäß RC-Leitfaden Abschnitt 4.1 ein Verwertungsverbot gilt.

8.1.3.1 ALLGEMEINE GEOLOGISCHE EINORDNUNG

Das Areal liegt im Bereich der Münchner Schotterebene auf einer Höhe von ca. 500 m ü. NN im Süden und flacht leicht auf 499 m ü. NN im Norden ab. Die Schotterebene besteht aus quartären, glazialen (spätwürmeiszeitlichen) Kalkschottern mit einer Mächtigkeit von ca. 3 m bis 5 m. Diese wird aus stark durchlässigen bis durchlässigen sandigen Kiesen mit geringen Feinkornanteilen gebildet. Unter dem quartären Schotter folgen feinkörnige, tertiäre Schichten der oberen Süßwassermolasse, die aus sandigen, schluffigen und tonigen Lagen bestehen. Die Oberfläche der tertiären Bodenschichten besitzt eine charakteristische Struktur aus Rinnensystemen und stellenweisen Hochlagen.¹⁸⁶ Wegen der Vornutzung sind anthropogene Auffüllungen und Anschüttungen auf dem Gelände vorhanden (Anlage 3.2).¹⁸⁷

8.1.3.2 BODENSCHICHTEN

Der idealisierte Schichtenaufbau gestaltet sich auf Basis der Erkundungsergebnisse folgendermaßen:¹⁸⁸

- Auffüllungen
- Quartärer Kies
- Tertiärsand

Den Aufschlüssen nach zu urteilen, beginnen ab Geländeoberkante (GOK) stark heterogene Auffüllungen. Diese bestehen aus gemischtkörnigen, schwach schluffigen Sanden und Kiesen und besitzen, bedingt durch den Straßen- und Leitungsbau, eine Mächtigkeit von ca. 1 m, während sie in eingeschossig unterkellerten Bereichen tiefer (bis 5 m) sein können.

¹⁸⁶ Vgl. Urban und Blazevic 2007, S. 8

¹⁸⁷ Vgl. Michel und Stöger 2017, S. 7

¹⁸⁸ Vgl. Möbius 2017, S. 4

Sie enthalten folgende Fremdstoffe:¹⁸⁹

- Wurzel- und Holzreste
- Ziegel- und Betonreste mit einem Durchmesser von über 1 m
- Betonplatten in Tiefen bis 3 m
- Schlacke- und Asphaltreste
- Glas, Metall, Kunststoff und Folien
- Brandschichten

Im Süden des Geländes ist eine Auffüllung mit einer Tiefe von 3 m vorhanden. Bestehend seit der Anfangszeit der Kaserne, enthält sie ein homogenes Gemisch aus Kies und Bauschutt und müsste aufgrund der geringen Schadstoffbelastung nicht ausgebaut werden. Da jedoch die Vorgeschichte eine Kampfmittelfreiheit bis zu einer bestimmten Tiefe erfordert, wird das metallhaltige Material bis dorthin ausgehoben und soll dann anschließend, nach entsprechender Aufbereitung, einer Verwertung auf dem Gelände zugeführt werden.¹⁹⁰

Unter den Auffüllungen befinden sich sandige, schwach schluffige quartäre Kiese. Die Kiesschicht kann zum Teil Steine enthalten, variiert in der Mächtigkeit, wobei diese von den Auffüllungen und den Rinnenstrukturen abhängt, und kann deshalb an einzelnen Stellen komplett fehlen. Die quartäre Schichtdicke beträgt überwiegend 1 m bis 5,40 m. In den ungestörten Bereichen befindet sich eine in den obersten Dezimetern verwitterte, braune Kiesschicht. Diese sog. Rotlage kann einen hohen Schluffgehalt aufweisen. Die stark variierende Grenze zwischen der quartären und tertiären Schicht erstreckt sich zwischen einer Höhe von 492,3 m ü. NN nordöstlich und 498,6 m ü. NN südwestlich. Unter dem quartären Kies ist zu Beginn schwach schluffiger bis schluffiger Sand vorhanden, der aufgrund der variierenden Mächtigkeit, an wenigen Stellen bereits ab einer Höhe von 498 m ü. NN aufgeschlossen werden kann.¹⁹¹ Die geplanten Gebäude werden im Tertiär unterhalb des Grundwasserspiegels liegen, da sie mit zweistöckigen Untergeschossen ausgeführt werden.¹⁹² Die Tiefe des Tertiärs über das Gelände der BYK ist in Anlage 3.3 dargestellt.

¹⁸⁹ Vgl. Michel und Stöger 2017, S. 10

¹⁹⁰ Vgl. Möbius 2017, S. 5

¹⁹¹ Vgl. Michel und Stöger 2017, S. 10f

¹⁹² Vgl. Möbius 2017, S. 6

Die Ergebnisse der Rammsondierungen und die daraus abgeleitete Zustandsgrößen der unterschiedlichen Lagen gliedern sich wie folgt:

TABELLE 5: ERGEBNISSE DER RAMMSONDIERUNGEN UND ABGELEITETE ZUSTANDSGRÖßEN DER BODENSCHICHTEN¹⁹³

Schicht	Sondierungs-schlagzahl	Lagerungsdichte	Konsistenz
Auffüllung	$N_{10} = 0-4$	locker	
Quartärer Kies	$N_{10} = 5-100$	mitteldicht-sehr dicht	
Tertiärsand	$N_{10} = 5-30$	dicht	steif-fest

Anschließend sind die charakteristischen bodenmechanischen Kennwerte dargestellt, die im Geotechnischen Untersuchungsbericht angesetzt wurden:

TABELLE 6: CHARAKTERISTISCHE BODENMECHANISCHE KENNWERTE¹⁹⁴

Schicht	Bodenart	Wichte γ/γ' [kN/m ³]	Reibungswinkel φ [°]	Steifemodul E_s [MN/m ²]	Wasserdurchlässigkeit k_f [m/s]	Bodenklasse (DIN 18196)	Frostempfindlichkeit (ZTV E-StB)
Quartärkies	G, s, u' – u*	19 – 22/11 – 14	35 – 37,5	100 – 200	$1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-4}$	GW, GU, GU*	F1 – F3
Tertiärsand (und Schluffe)	f – mS, u – U, fs, t'	17 – 22 / 9 – 12	22 – 37,5	70 – 120	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-8}$	SU, SU*, UL	F3

Beim Aushub ist davon auszugehen, dass vor allem kiesiges Material mit einem hohen Anteil an Störstoffen und mineralischen Fremdbestandteilen im Bereich der Auffüllungen zu erwarten ist. Ohne einem Sieb- und Sortierprozess im Rahmen der Aufbereitung wird eine Verwertung in technischen Bauwerken nicht möglich sein.

¹⁹³ Eigene Darstellung, vgl. Michel und Stöger 2017, S. 9f

¹⁹⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung an Michel und Stöger 2017, S. 12

8.1.3.3 GRUNDWASSERVERHÄLTNISSE

Für die Verwertung von aufbereiteten mineralischen Restmassen in technischen Bauwerken ist für die verschiedenen Einbauarten ein bestimmter Grundwasserabstand gemäß RC-Leitfaden zwingend (s. Anhang V). Für die Verwertung von RW 1-Material ist beim offenen Einbau der mittlere höchste Grundwasserstand (MHGW) und beim eingeschränkt offenen Einbau ist der höchste Grundwasserstand maßgebend (HGW). Dabei gelten ein Grundwasserabstand von 1 m für den offenen Einbau und ein Grundwasserabstand von 2 m für den eingeschränkt offenen Einbau. Beim Einbau von RW 2-Material mit technischen Sicherungsmaßnahmen wäre der HGW entscheidend, mit einem Abstand von 2 m zum RC-Baustoff. Für den Einbau von RW 1-Material mit technischen Sicherungsmaßnahmen zählt der MHGW. Dabei muss ein Abstand von 1 m eingehalten werden.

Die Höchstgrundwasserstände von 1940 ergeben sich in der Mittelachse laut dem Referat für Gesundheit und Umwelt zu folgenden Werten:

TABELLE 7: HÖCHSTGRUNDWASSERSTÄNDE¹⁹⁵

Höchstgrundwasserstand	Grundstücksrand Süd	497,4 m ü. NN
	Grundstücksmitte	496,3 m ü. NN
	Grundstücksrand Nord	495,2 m ü. NN

Die Grundwasserfließrichtung ist großräumig nach Nordosten gerichtet, dabei bilden die gut durchlässigen quartären Schotter den obersten Grundwasserleiter. Folgende Werte wurden angesetzt:

TABELLE 8: GRUNDWASSEREIGENSCHAFTEN¹⁹⁶

Schicht	Durchlässigkeitsbeiwert k_f	Hydraulischer Gradient	Abstandsgeschwindigkeit v_a
Quartärkies	$1 \cdot 10^{-2}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ m/s	0,004	1,7 m/d
Tertiärsand	$1 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-8}$ m/s	0,004	0,2 m/d

¹⁹⁵ Eigene Darstellung in Anlehnung an Möbius 2017, S. 5f

¹⁹⁶ Eigene Darstellung, vgl. Felber 2008, S. 17 und vgl. Michel und Stöger 2017, S. 14

Die Tertiärschicht unter der quartären Lage ist meist als Grundwasserstauer ausgebildet. In ca. 3 km östlicher Entfernung liegen die nächsten Oberflächengewässer, der Garching Mühlenbach und der Schwabinger Bach, parallel zur Isar.¹⁹⁷

Aus diesen Informationen lässt sich folgern, dass nur ein Abstand von wenigen Metern zum MHGW bzw. HGW auf dem Gelände der BYK vorherrscht. Das bedeutet, dass mengenmäßig weniger RC-Baustoffe verwertet werden können, da das Einbauvolumen durch die untere Kote, die den entsprechenden Abstand zum maßgebenden GW darstellt, begrenzt wird, als wenn ein größerer GW-Abstand zur GOK (z.B. 10 m) bestehen würde.

8.2 RÜCKBAU, AUFBEREITUNG UND VERWERTUNG

Im Folgenden wird das eigentliche Verwertungskonzept aufgebaut. Es beginnt mit dem Abbruch, der teilweise schon 2014 begonnen hat. Im Zuge der Baufeldfreimachung der Bayernkaserne wurde ein phasenweises Abbruchkonzept erarbeitet (s. Punkt 3.2.1). Der Abbruch wird in die folgenden fünf Phasen eingeteilt:

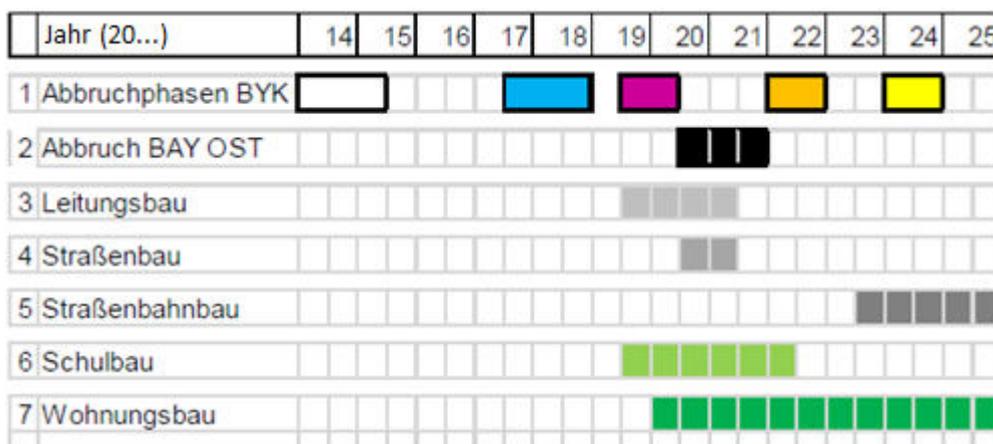


Abbildung 13: Abbruchphasen¹⁹⁸

8.2.1 BISHER DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN

Die erste Abbruchphase, die bereits in den Jahren 2014 und 2015 durchgeführt wurde, wird als „Phase Weiß“ bezeichnet. Sie ist in drei Abbruchlose aufgeteilt. Für alle Abbrucharbeiten wurde die Firma Ettengruber aus dem Münchner Umland beauftragt. In Phase Weiß fanden beispielsweise folgende Rückbaumaßnahmen statt:

Die Unterkünfte G2, G3, G4, G5, G15, G42, G63 und die Werkstätten G7, G46, G47, G48, G49, G50, G51, G52, G53, G54, G55 wurden abgerissen. Beim kontrollierten Rückbau der

¹⁹⁷ Vgl. Michel und Stöger 2017, S. 7ff

¹⁹⁸ Möbius 2017, S. 7

Unterkünfte wurde zunächst das asbesthaltige Material von Spezialfirmen ausgebaut (z.B. Dichtungen und Brandschutzklappen). Des Weiteren musste DDT-haltiges Material im Rahmen des Abbruchprozesses entfernt werden. DDT wurde als Insektizid in US-Liegenschaften eingesetzt bzw. versprüht.¹⁹⁹ Der Vorgang wurde wegen der ungleichmäßig starken DDT-Beaufschlagung und des unterschiedlichen Innenausbaus auf die drei folgenden Weisen realisiert. Vorweg wurde der gering belastete Putz in den oberen Geschossen (Erdgeschoss und 1. Obergeschoss) händisch abgeschlagen, da der Einsatz einer Fräse aufgrund der Beanspruchung der Decken durch das Baggergewicht nicht möglich war. Überdies war das Entfernen des oberflächennahen Belags in den Dachgeschossen wegen der hohen Konzentration an DDT, das durch die poröse Oberfläche, die nur im obersten Geschoss verbaut wurde, sehr gut absorbiert wurde, nicht sinnvoll. Daher wurde das gesamte Material des oberen Stockwerks separiert rückgebaut. Als genug Freiraum für den Einsatz von Baggern in den Kellerräumen zur Verfügung stand, konnte das hoch mit DDT beaufschlagte Material schichtenweise mit der Fräse abgetragen werden. Das gesamte belastete Material wurde dann getrennt und deponiert. Die gängigen Arbeitsschutzmaßnahmen mussten beim Rückbau beachtet werden.

Teilweise fand ein selektiver Rückbau der Kellergeschosse statt, um den Beton möglichst sortenrein zu gewinnen. Dabei fiel Bodenmaterial nach innen. Im Siebschritt der Aufbereitung wurde das Bodenmaterial wieder entfernt.

Insgesamt wurden Gebäude mit einem Brutto-Rauminhalt (BRI) nach DIN 277 von knapp 190.000 m³ abgebrochen, wovon 99.978 m³ zu Unterkünften und 85.912 m³ zu Werkstätten zählen.²⁰⁰ Die Aufbereitung von RC-Material (55.000 t) wurde erst nachträglich geplant und daher als Nachtragsleistung in Auftrag gegeben, nachdem bereits zur Aufbereitung geeignetes Material (30.000 t) in Abbaustätten verfüllt worden war.²⁰¹ Das Material wurde zum Teil zur Verfüllung der in Phase Weiß entstanden Baugruben auf dem Gelände der Bayernkaserne verwendet.

8.2.2 ANFALLENDE MATERIALMENGEN UND DARAUSS ABGELEITETE MATERIALSTRÖME

Der zum jetzigen Zeitpunkt geplante Rückbau endet voraussichtlich im Jahr 2025. Es werden in den restlichen vier Phasen u.a. etwa 40 Gebäude abgebrochen. Die Gebäude bestehen aus Unterkünften, die überwiegend mit Kellern ausgestattet sind, und aus Werkstätten, die kein Kellergeschoss besitzen.

¹⁹⁹ Vgl. Urban und Blazevic 2010, S. 3

²⁰⁰ DIN 277-1

²⁰¹ Vgl. Möbius 2017, S. 7

Die Abbruchmaßnahmen enthalten weiterhin den Rückbau von etwa:

- 180.000 m² Verkehrsfläche
- 45.000 m³ Auffüllungen
- 60 km Leitungen der Sparten

Daraus lässt sich bereits schließen, dass eine Vielzahl an unterschiedlichen mineralischen Baurestmassen entstehen wird.

8.2.2.1 MENGENERMITTLUNG FÜR DEN ABBRUCH

Bei der Mengenermittlung über die einzelnen Abbruchphasen werden die relevanten Materialströme betrachtet, die durch den Rückbau entstehen. Diese sind:

- Bauschutt von Gebäudeabbruch
- Beton von Kellerabbruch
- Hinterfüllungen
- Asphalt von Verkehrsflächen
- Beton von Verkehrsflächen
- Restliches Material von Verkehrsflächen
- Kalkschrotten
- Verfüllungen der Leitungsgräben
- Auffüllungen

Zunächst findet die Mengenermittlung der mineralischen Restmassen statt, die beim Abbruch der Gebäude inklusive der Keller entstehen. Diese wird anhand von Kennwerten durchgeführt, die mit dem BRI zusammenhängen. Daher handelt es sich mehr um eine Mengeneinschätzung.²⁰²

Die BRI der Gebäude liegen bereits vor (s. Anlage 4.1). Nun werden die Gebäude und die BRI ermittelt, die in den bestimmten Phasen zurückgebaut werden.

In der „Phase Blau“ sollen die Unterkünfte G40, G44, G45, G58 und die Werkstätten G14, G29, G30, G31 abgebrochen werden. Das ergibt einen BRI von 82.615 m³ für die Unterkünfte und 20.895 m³ für die Werkstätten.

In „Phase Lila“ werden die Unterkünfte G39, G62 mit einem BRI von 25.188 m³ und die Werkstätten G33, G34, G35, G36, G38, G62, G65 mit einem BRI von 62.225 m³ abgerissen.

„Phase Orange“ bezeichnet den Abbruch der Unterkünfte G17, G18, G19, G43 und der Werkstätten G8, G16, G20, G21, G22, G23, G24, G25, G26, G27, G28, G32, G41. Der BRI

²⁰² Vgl. Deutscher Abbruchverband 2015, S. 156

der Unterkünfte beträgt dabei 43.292 m³, während der BRI der Werkstätten sich auf 42.408 m³ beläuft.

Der Abbruch in „Phase Gelb“ umfasst die restlichen Unterkünfte G1, G9, G10, G11, G12 und ergibt somit einen BRI von 67.052 m³.

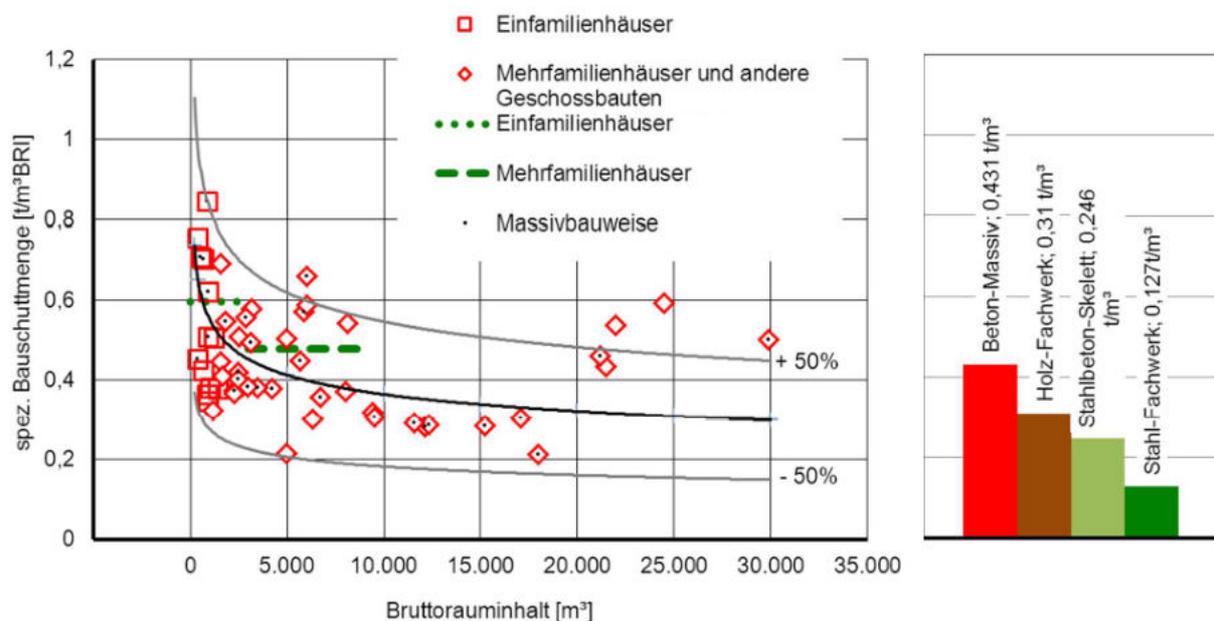
Der BRI über die vier Abbruchphasen berechnet sich zu 343.675 m³. Die Unterkünfte nehmen davon einen Wert von 218.147 m³ und die Werkstätten einen Wert von 125.528 m³ ein. Zusammen mit der Phase Weiß beträgt der BRI insgesamt für alle Abbruchphasen 529.565 m³, wovon 318.125 m³ auf die Unterkünfte und 211.440 m³ auf die Werkstätten entfallen.

Bauschutt

Als nächstes werden die bauwerksspezifischen Kennzahlen für den Bauschutt festgelegt. Wegen des Bezugs auf den BRI bei umschlossenen Räumen werden diese Werte für Gebäude in t/m³ BRI angegeben.²⁰³

Mithilfe der folgenden Tabellen werden die Kennwerte für die Unterkünfte und die Werkstätten ermittelt:

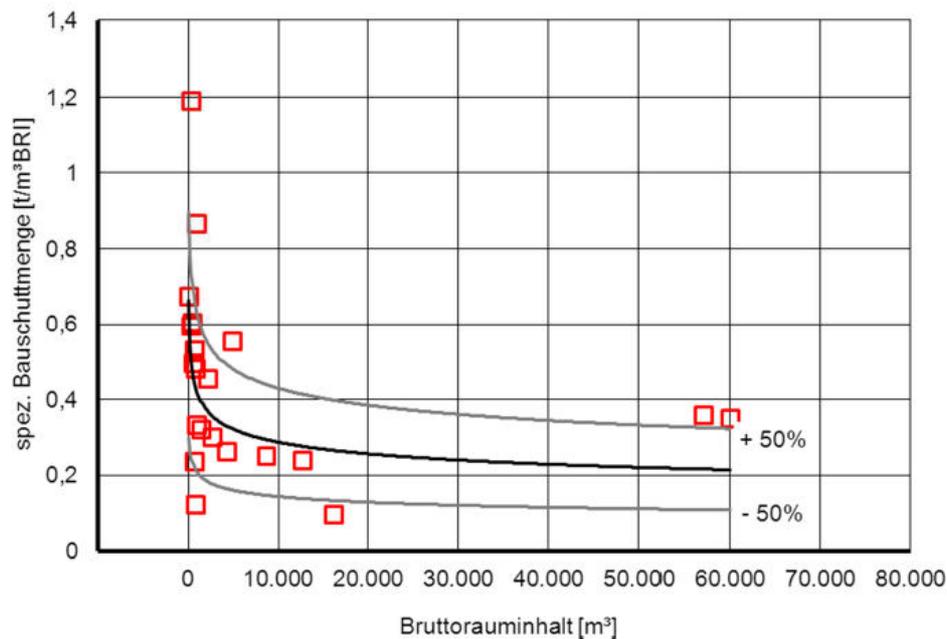
TABELLE 9: ABHÄNGIGKEIT DER SPEZIFISCHEN BAUSCHUTTMENGE VON DER BAUWERKSGRÖÖE UND DER BAUKONSTRUKTION FÜR WOHN- UND NICHTWOHNBAUTEN²⁰⁴



²⁰³ Vgl. Müller 2013, S. 20f

²⁰⁴ Müller 2013, S. 22

TABELLE 10: ABHÄNGIGKEIT DER SPEZIFISCHEN BAUSTOFFMENGE VON DER BAUWERKSGRÖÖE FÜR INDUSTRIEGEBÄUDE²⁰⁵



Die Ermittlung befindet sich in Anlage 4.2. Den unterschiedlichen BRI wird dabei jeweils ein Kennwert zugewiesen, der dann mit den BRI multipliziert wird, um eine Masse zu erhalten. Dies wird für jede Phase einzeln durchgeführt. Bei den Unterkünften, die zu den Wohn- und Nichtwohngebäuden zählen, werden die zwei nachfolgenden Bereiche vereinfachend unterschieden. Einerseits wird die spezifische Bauschuttmenge bis 6000 m³ BRI in Abhängigkeit der Bauwerksgröße, insbesondere bei Gebäude in Massivbauweise, ermittelt und andererseits wird ab dem genannten BRI ein mittlerer und unabhängiger Kennwert von 0,4 t/m³ BRI angesetzt.²⁰⁶ Damit ergibt sich für die 22 Unterkünfte ein Kennwert zwischen 0,4 und 0,55 t/m³ BRI und eine daraus resultierende Bauschuttmenge von 127.722 t.

Die Werkstätten werden bei den Industriebauten eingeordnet und verfügen über eine geringere Bauschuttmenge als Massivbauten, bezogen auf den BRI. Für die Werkstätten beläuft sich die spezifische Bauschuttmenge auf Werte zwischen 0,24 und 0,37 t/m³ BRI. Zusammen mit einer Bauschuttmenge von 59.499 t, resultierend aus dem Abbruch der Werkstätten, ergibt sich infolgedessen insgesamt eine Bauschuttmenge (Mischabbruch) von ca. 187.000 t.

²⁰⁵ Müller 2013, S. 22

²⁰⁶ A.a.O., S. 21

In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse für jede Abbruchphase dargestellt:

TABELLE 11: MENGE BAUSCHUTT

Phase	Masse (t)
Weiß	64.000
Blau	39.000
Lila	28.000
Orange	30.000
Gelb	27.000
Gesamt	188.000

Für die Berechnung der erforderlichen Containeranzahl bzw. LKW wird ein Wert für die Schüttdichte von 1,142 t/m³ veranschlagt,²⁰⁷ womit sich das Gesamtvolumen zu 240.000 m³ Bauschutt berechnet.

Keller-Beton

Um für den geplanten Einsatz von RC Beton eine Abschätzung hinsichtlich der Menge an sortenrein gewonnenem Beton zu erhalten, wird zunächst, analog zum Bauschutt, der BRI kalkuliert. Die Berechnung findet sich in Anlage 4.3.

Der sortenreine Beton wird hauptsächlich durch den selektiven Kellerabbruch der Unterkünfte erhalten, die im Durchschnitt eine Kellerwandhöhe von 3 m aufweisen. Somit ergibt sich insgesamt ein BRI von 84.111 m³ für die 19 Unterkünfte, die über ein Kellergeschoss verfügen. Mit dem Basiswert von 0,116 t/m³ BRI für die Mengeneinschätzung von Beton für den Gebäudetyp „Massivbau 1918 bis 1948“ entsteht eine Masse von 9.000 m³.²⁰⁸

Für die einzelnen Phasen entstehen:

TABELLE 12: MENGE KELLER-BETON

Phase	Masse (t)
Weiß	3.000
Blau	2.000
Lila	1.000
Orange	1.000
Gelb	2.000
Gesamt	9.000

²⁰⁷ Vgl. Müller 2013, S. 26

²⁰⁸ Deutscher Abbruchverband 2015, Tabelle 2.4

Wenn eine mittlere Schüttdichte von 2,24 t/m³ veranschlagt wird,²⁰⁹ beläuft sich das gesamte Volumen des abgebrochenen Betons auf einen Wert von 22.000 m³.

Bauschutt abzüglich Keller-Beton

Nach Abzug des Betons aus dem Kellerabbruch entsteht eine Menge von 177.000 t Bauschutt (s. Anlage 4.1). Das Gesamtvolumen in Containern beläuft sich auf 203.000 m³.

Bei den einzelnen Phasen ergibt sich folgende Menge:

TABELLE 13: MENGE BAUSCHUTT ABZÜGLICH KELLER-BETON

Phase	Masse (t)
Weiß	61.000
Blau	37.000
Lila	27.000
Orange	29.000
Gelb	25.000
Gesamt	179.000

Für die Aufbereitung sollte beachtet werden, dass das Material, ggf. durch den Kellerabbruch von der Kellerinnenseite, leicht mit Bodenmaterial vermischt ist. Durch den nachgeschalteten Siebprozess bei der Aufbereitung stellt dies kein Problem dar.

Befestigte Flächen

Im Folgenden werden die Mengen ermittelt, die durch den Rückbau der Verkehrsflächen entstehen. Zu den Verkehrsflächen zählen die Straßenflächen, die Parkplätze, die Vorplätze, Hubschrauberlandeplätze und sonstige befestigte Flächen, z.B. Eingangsbereiche. Die befestigten Flächen beanspruchen insgesamt ein Areal von 176.847 m², wovon 135.428 m² auf befestigte Flächen mit Asphalt und 41.419 m² auf Flächen mit Pflastersteinen entfallen. Diese Flächen wurden über ein CAD-Programm ermittelt. Da die Querschnitte zum Teil sehr stark variieren, wurden erfahrungsbedingte Annahmen getroffen, die sich durch die verschiedenen Maßnahmen ergaben, u.a. provisorischer Leitungsbau, bei denen Aufgrabungen getätigt wurden. Die Berechnung befindet sich in Anlage 4.4.

²⁰⁹ BEWO Engineering GmbH

Die Querschnitte für die befestigten Flächen mit Asphalt und mit Pflastersteinen sind anschließend dargestellt:

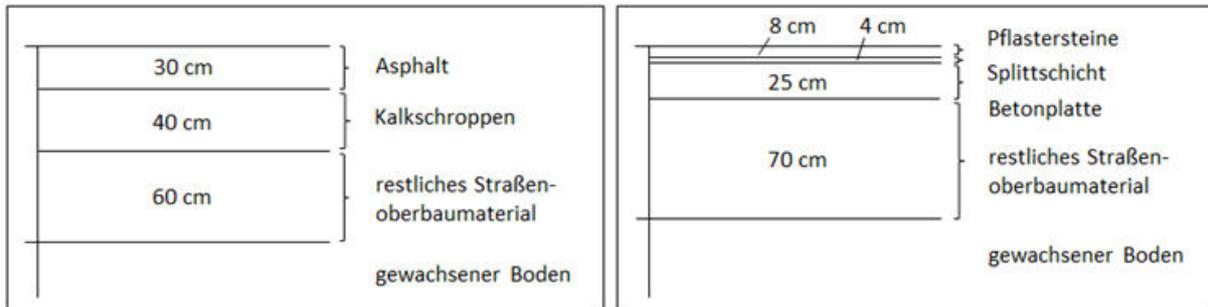


ABBILDUNG 14: QUERSCHNITT DER ASPHALTFLÄCHEN (LINKS) UND DER PFLASTERFLÄCHEN (RECHTS)

Als Kalkschroppen werden hierbei Kalksteine bezeichnet, die ein sehr großes Kleinstkorn aufweisen, z.B. 60 mm bei einem Material mit der Körnung 60/120. Diese können u.a. zur Bodenstabilisation bzw. Untergrundverbesserung eingesetzt werden. Der Asphaltaufbau weist eine Mächtigkeit von 1,30 m auf, während die Mächtigkeit des Pflasteraufbaus mit etwa 1,10 m beziffert wird. In Summe beläuft sich die Masse der Asphaltbefestigung auf 100.000 t und die Masse des Betons der Pflasterbefestigung auf 23.000 t. Insgesamt ergibt sich somit für die Verkehrsflächen ein Wert von 123.000 t.

Die phasenweisen Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

TABELLE 14: MENGE ASPHALT UND BETON DER BEFESTIGTEN FLÄCHEN

Phase	Masse Asphalt (t)	Masse Beton (t)
Weiß	4.000	1.000
Blau	51.000	14.000
Lila	14.000	3.000
Orange	25.000	5.000
Gelb	6.000	0
Gesamt	100.000	23.000

Für das restliche Material des Straßenoberbaus entstehen folgende Mengen:

TABELLE 15: MENGE KALKSCHROPPEN UND DES RESTLICHEN STRAßEN-
OBERBAUMATERIALS

Phase	Masse Kalkschroppen (t)	Masse restl. Straßen- oberbaumaterial (t)
Weiß	4.000	9.000
Blau	49.000	121.000
Lila	13.000	32.000
Orange	24.000	53.000
Gelb	6.000	11.000
Gesamt	96.000	226.000

Damit ergibt sich insgesamt eine Masse von 322.000 t.

Verfüllungen

Als Verfüllung wird das Material bezeichnet, das im Zuge der Abbruchmaßnahmen, überwiegend aufgrund des Gebäuderückbaus, der Kampfmittelfreigabe und der Schadstoffbelastung ausgehoben werden muss. Es wird eine Aufteilung zwischen den Hinterfüllungen von Gebäuden, den alten Auffüllungen auf dem Gelände und dem Material in den Leitungszonen der Sparten vorgenommen. Die Länge der Sparten, das Volumen der Auffüllungen und die Fläche der Hinterfüllungen wurden mittels CAD-Programm ermittelt. Die Berechnung der Mengen ist in Anlage 4.5 dargestellt.

Der Volumenberechnung des Materials in der Leitungszone der Sparten wurden die Annahmen einer Tiefe von 1,5 m und einer Breite von 1,0 m zu Grunde gelegt (Mittelwerte aus der DIN EN 1610 „Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen“ und DIN 4142 „Baugruben und Gräben - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten“). Um das Volumen der Hinterfüllungen zu ermitteln, wurde ein 6 m Abstand angenommen. Davon werden 1,5 m vom Arbeitsraum und 4,5 m von der Böschung (1:1,5) in Anspruch genommen. Die neu berechnete Tiefe von 1,875 m kommt durch den Abzug des unteren Böschungsteils zustande.

Damit ergeben sich folgende Mengen in jeder Phase:

TABELLE 16: MENGE DER VERFÜLLUNGEN

Phase	Masse Hinterfüllungen (t)	Masse Sparten (t)	Masse Auffüllungen (alt) (t)
Weiß	7.000	7.000	3.000
Blau	69.000	88.000	44.000
Lila	30.000	21.000	32.000
Orange	69.000	50.000	11.000
Gelb	24.000	13.000	0
Gesamt	199.000	179.000	90.000

Zusammen entsteht damit eine Menge von 468.000 t für die Verfüllungen über alle Abbruchphasen.

Gesamtmenge aller relevanten Materialströme

Bei der Mengenermittlung bilden die Materialströme eine insgesamt anfallende Menge mineralischer Baurestmassen von 1.101.000 t. Eine zusammenfassende Übersicht befindet sich in Anlage 4.6.

8.2.2.2 MENGENERMITTLUNG FÜR DIE AUFBEREITUNG

Nach dem Rückbau sollen die mineralischen Restmassen einer Aufbereitung zugeführt werden. Um mögliche Entsorgungskosten zu minimieren, wurde für die Verwertungskonzeption auf dem Gelände der BYK der Ansatz verfolgt, die größtmögliche Menge an geeigneter mineralischer Baurestmasse einer Aufbereitung zuzuführen. Im Folgenden werden die Materialströme ermittelt, die sich durch die Aufbereitung aus den vorgenannten mineralischen Baurestmassen (Punkt 8.2.2.1) ergeben.

Von den entstandenen Mengen ausgehend, fallen, je nach Produktgruppe, bestimmte Anteile weg. Diese setzen sich aus belastetem Material, aus aussortierten Störstoffen und Material zusammen, das bautechnisch nicht geeignet ist.

Beim RC Mix, beim RC Beton und beim kiesigen Material wird angenommen, dass 80 % des Materials eine Belastung bis RW 1 aufweisen. Die anderen 20 % besitzen eine höhere Schadstoffbelastung. Beim gewonnen Asphalt wird ein Anteil von zwei Dritteln für das teerfreie Material angesetzt. Dieses Material wird für die Herstellung von neuen Asphaltdeckschichten eingesetzt. Das andere Drittel ist mit Teer belastet und wird i.d.R. entsorgt.

Beim Sieben und Brechen werden zusätzlich Feinanteile erzeugt, die, je nach Produktgruppe, unterschiedlich groß sind, teilweise recycelt und teilweise in Gruben verwertet bzw. entsorgt werden. Nach Aussagen der Firma Ettengruber werden beim RC Beton und beim RC Mix in der Praxis die Körnungen 0/45 priorisiert. Für das kiesige Material wird üblicherweise eine Körnung 0/32 bevorzugt. Die entstehenden Feinanteile durchlaufen bei der Aufbereitung von RC Beton und RC Mix üblicherweise auch eine Zertifizierung, wie das Material mit dem größeren Größtkorn-Durchmesser. Die Mengen, die durch den Aufbereitungsprozess entstehen, sind in Anlage 4.7 dargestellt. Im Folgenden werden weitere Annahmen für die Aufbereitung der einzelnen Sekundärbaustoffe aufgezeigt.

RC Beton

Der RC Beton setzt sich aus dem Altbeton des Gebäudeabbruchs und des Straßenrückbaus zusammen. Wenn Altbeton zu RC Beton aufbereitet wird, bilden i.d.R. ca. 2,5 % die Störstoffe. Dieser Ausschuss besteht überwiegend aus der Bewehrung. Bei der Aufbereitung von RC Beton mit der Körnung 0/45 entsteht ca. 5 % Feinanteil. Dieser weist eine Körnung von 0/8 auf und kann aufgrund der positiven bautechnischen Eigenschaften verwendet werden.

RC Mix

Wird RC Mix mit einer Körnung 0/45 aufbereitet, kann man von einem Feinanteil von 25 % mit einer Körnung 0/8 ausgehen. Dieser setzt sich aus einem Anteil von ca. 10 % zusammen, der wegen seiner bautechnischen Eigenschaften nicht verwendet wird. Dieser wird folglich in Gruben verwertet. Der restliche bautechnisch verwendbare Anteil von 15 % mit einer Körnung von 0/8 kann z.B. für die Leitungsbettung eingesetzt werden.

RC Asphalt

Wie unter Punkt 6.1 bereits erläutert, wird auf dem Gelände der Bayernkaserne kein RC Asphalt hergestellt, da der zurückgewonnene Asphalt für Asphaltmischgut eingesetzt wird.

Kiesiges Material

Bei dem anfallenden Material durch Rückbau und Aushub werden folgende Annahmen getroffen. Da eine Ableitung über die Bodenklassen in den RKS-Profilen nicht möglich ist und die Vorgeschichte mit den unterschiedlichen Nutzungen vermutlich dazu beigetragen hat, dass sehr viele Störstoffe (ca. 10 %, vor allem Metall) anzutreffen sind, werden zusätzliche Annahmen getroffen. Durch die Aufbereitung entstehen ca. 80 % an kiesigem Material mit der Körnung 0/32, das bezüglich seiner Eigenschaften für bautechnische Anwendungen geeignet ist und 20 % an Material, das nicht verwendet werden kann. Das bautechnisch nicht geeignete Material wird in Gruben verfüllt.

8.2.2.3 WASSERRECHTLICHE UND PLANUNGSTECHNISCHE VORGABEN

Hierbei werden die Bedingungen behandelt, die sich u.a. durch die Gespräche mit den zuständigen Behörden und durch Planungsunterlagen ergaben.

Die Verwertung auf dem Gelände der Bayernkaserne soll grundsätzlich im Sinne des RC-Leitfadens vollzogen werden. Damit „ist in der Regel keine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit zu erwarten. Deshalb ist in diesen Fällen grundsätzlich kein wasserrechtliches Verfahren erforderlich. [...] [Bei Abweichung von den Vorgaben des RC-Leitfadens, z.B. bei Überschreitung der Mengengrenzwerte, ist eine] wasserrechtliche Zulassung [...] vor dem Einbau der Recyclingbaustoffe einzuholen.“²¹⁰

Die Aufbereitung soll ausschließlich zur Herstellung von RW 1-Material dienen. Ein Nutzen dabei ist der Produktstatus (s. Punkt 2.2.2). Außerdem kann RW 2-Material nur mit technischen Sicherungsmaßnahmen in Bauwerken mit einem Abstand zum HGW von 2 m verwertet werden (s. Punkt 8.1.3.3).

Damit möglichst viel RC-Material eingebaut bzw. recycelt wird, liegt die Überschreitung des Mengengrenzwertes für den offenen Einbau von RW 1-Material (s. Anhang V) nahe. Die Möglichkeit des eingeschränkt offenen Einbaus ist für das Projekt aufgrund der Randbedingungen, u.a. der hohen Grundwasserstände, nicht zielführend bzw. praxistauglich. Zum jetzigen Planungszeitpunkt kann daher davon ausgegangen werden, dass das Anfertigen der wasserrechtlichen Zulassung notwendig werden wird. Sobald das Volumen von 10.000 m³ für den offenen Einbau von RW 1-Material nach RC-Leitfaden bei der Verwertung überschritten wird, ist folglich die Abstimmung mit den zuständigen Behörden nötig. Dazu benötigt man nach Aussagen des zuständigen Wasserwirtschaftsamts einen Erläuterungsbericht, der folgenden Angaben enthält:

- Allgemeine Angaben zum Projekt (u.a. Vorhabenträger, Zeitraum, Ort)
- Motivation
- Allgemeine Angaben zu Hydrogeologie (u.a. Grundwassermessstellen, Grundwasserstände HGW, mittlerer Hochwasserstand, MHGW)
- Spezielle Angaben zum Vorhaben (u.a. Materialart und -güte, Beprobung, Beprobungsfirmen, Einbaufirmen, Beweissicherung, Einbaumengen, GOK)
- Übersichtslageplan, Lageplan
- Schnitte, Detailschnitte

²¹⁰ StMUG UMS vom 13.03.2013, S. 2

Grundwasserabstand

Beim Grundwasserabstand wird zunächst der höchste Grundwasserstand vom Referat für Gesundheit und Umwelt angesetzt. Dieser nimmt folgende Werte an (in m ü. NN):

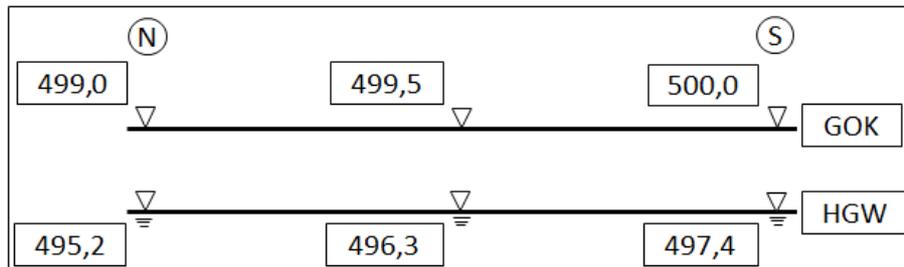


ABBILDUNG 15: HÖCHSTGRUNDWASSERSTÄNDE UND GOK IM NORDEN, GEMITTELT UND IM SÜDEN²¹¹

Damit ergeben sich die nachfolgenden Werte für den Abstand zum HGW:

TABELLE 17: ABSTÄNDE VON HÖCHSTGRUNDWASSERSTAND ZU GOK [M]

Nord	Mitte	Süd
3,8	3,2	2,6

Für die Abschätzungen wird der Wert für die Mitte von 3,2 m herangezogen. Um den mittleren höchsten Grundwasserstand zu ermitteln, müssten aus wasserwirtschaftlicher Sicht die Schwankungen der GW-Messstellen (s. Anlage 3.4) in der Nähe des Bauvorhabens betrachtet werden, die im selben GW-Leiter stehen. Danach könnten die Werte durch eine Parallelverschiebung auf die Baustelle übertragen werden. Der MHGW liegt, laut zuständigen Behörden, zwischen dem mittleren Grundwasserstand und dem höher liegenden Hochwasserstand von 1940. Für die Berechnungen wird angenommen, dass der MHGW ca. 1 m unter dem höchsten GW-Stand (von 1940) liegt.

Der MHGW wird für den uneingeschränkt offenen Einbau von RW 1-Material und den Einbau von RW 1-Material mit technischen Sicherungsmaßnahmen verwendet, während der HGW beim eingeschränkt offenen Einbau von RW 1-Material nach RC-Leitfaden herangezogen wird (s. Punkt 8.1.3.3).

²¹¹ Vgl. Möbius 2017, S. 5f

Folgende Abstände der GOK zum GW müssten somit für die späteren Planungen einkalkuliert werden:

TABELLE 18: GRUNDWASSERSTÄNDE, -ABSTÄNDE ZUR GOK UND -KOTEN

Art des GW-Standes	Angesetzter Abstand von GW-Stand zu GOK [m]	Kote des GW-Standes [m ü. NN]
MHGW	4,2 (= 3,2 + 1,0)	495,3
HGW	3,2	496,3

Für die weitere Vorgehensweise wird ein Abstand von 1,0 m zwischen RC-Baustoff und MHGW für den offenen Einbau nach RC-Leitfaden angesetzt. Dieser hat sich aus Gesprächen mit den zuständigen Behörden ergeben. Gemäß RC-Leitfaden wird jedoch kein bestimmter Abstand gefordert.²¹²

B-Plan

Es wird angenommen, dass die Straßen-, Grundstücks- und Freiflächen in etwa auf derselben Kote liegen werden wie die GOK. Daher wird eine mittlere GOK von 499,5 m u. NN für diese Flächen angesetzt.

Für den Landschaftsbau wird eine bestimmte Mächtigkeit der durchwurzelbaren Bodenschicht in Abhängigkeit von der (Folge-) Nutzung festgelegt, die das Anlegen von Grünflächen bzw. Freiflächen darstellt. Diese Mächtigkeit beträgt laut der „Vollzugshilfe zu den Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden (§ 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung)“ der Bund-Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) für Stauden und Gehölze bis zu 1,0 m und für Rasen bis zu 0,5 m.²¹³ In diese Schicht darf u.a. RC-Material mit der Umweltverträglichkeitsklasse RW 1 nicht eingebaut werden.

²¹² Vgl. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2005b, Abschnitt 4.1

²¹³ LABO 2002, Tabelle II-1

8.2.2.4 MENGENERMITTLUNG FÜR DIE ANGESTREBTE VERWERTUNG

Das zertifizierte RC-Material soll in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden. Für jede Anwendung wird im Folgenden die Menge ermittelt, die dort verwendet werden könnte. Diese wird für technische Bauwerke, die unter der GOK liegen, i.d.R. durch die GOK als obere Grenze und der Kote als untere Grenze gebildet, die durch den Abstand zum jeweiligen GW-Stand entsteht. Wenn das RC-Material in einem Bereich eingesetzt werden soll, in dem eine Frei- bzw. Grünfläche geplant ist, wird die Menge an der oberen Grenze zusätzlich durch die Mächtigkeit der durchwurzelbaren Bodenschicht beschnitten. Die Ermittlungen zu den einzelnen Anwendungen befinden sich in Anlage 4.8 und Anlage 4.9.

Baustraßen

Aufgrund des großen Geländes und der schweren Maschinen, die vermutlich beim Abbruch über die Baustraßen fahren werden, wird mit einer Menge von 24.000 t mit einem Volumen von 12.000 m³ für diese Einsatzmöglichkeit gerechnet. Dieser Wert ergibt sich aus folgenden Annahmen:

- Frostsicherer Aufbau bei ca. 0,5 bis 0,7 m Oberboden (Mittelwert 0,6 m)
- Baustraßenbreite von ca. 8,0 m für zwei Spuren
- Baustraßenlänge von 2,5 km
- Dichte 2,0 t/m³ für das Material

Diese Anwendung weist einen ausreichenden GW-Abstand zum HGW bzw. MHGW auf. Bezüglich der Einbauweise nach RC-Leitfaden kann zum jetzigen Planungszeitpunkt noch keine Aussage getroffen werden. Ein Grund dafür ist etwa die Herstellung der Baustraße, die noch nicht festgelegt ist. Diese könnte beispielsweise mit einer Asphaltüberdeckung (mit technischer Sicherungsmaßnahme) oder mit einer ungebundenen Deckschicht (offener Einbau) ausgeführt werden. Daher wird die Annahme getroffen, dass jeweils die Hälfte auf die zwei Einbauweisen entfällt.

Ungebundene Tragschicht

Der Straßenquerschnitt für die geplanten Verkehrswege ergibt sich aus den „ZTV für die Ausführung von Straßenbauarbeiten in München“ (ZTV Stra Mü), Ausgabe 2015. Für die erforderliche Menge an RC-Material sind folgende Annahmen zu treffen:

- 0,5 m FSS, da nach ZTV Stra Mü die Mächtigkeit der Frostschutzschicht bei Bauklasse 10 (mit Busverkehr) zwischen 0,39 und 0,65 m beträgt²¹⁴
- 90.000 m² geschätzte Fläche für Verkehrsflächen im B-Plan
- Dichte von 2,0 t/m³ für das Material

²¹⁴ Vgl. ZTV Stra Mü, Tabelle C.7

Dadurch würde diese Einsatzmöglichkeit eine Materialmenge von 90.000 t fordern. Das Volumen dabei wären 45.000 m³. Der Straßenoberbau wurde für Belastungsklasse 10 insgesamt eine Mächtigkeit von ca. 0,75 m aufweisen. Die untere Kote des Straßenoberbaus würde somit bei 498,75 m liegen. Der notwendige Abstand von 1,0 m zum entsprechenden GW-Stand (495,3 m ü. NN) für den Einbau von RW 1-Material mit technischen Sicherungsmaßnahmen würde hierbei eingehalten werden.

Hinterfüllung für neue Gebäude

Während des Neubaus werden die Baugruben vermutlich mit Spundwänden als Verbau gesichert. Durch die Einhaltung einer angesetzten Arbeitsraumbreite von ca. 0,6 m zwischen Verbau und Gebäude, entsteht ein Hohlraum, der nachträglich wieder verfüllt wird. Weitere Annahmen sind folgende:

- Mächtigkeit von 2,7 m
- Breite von 0,6 m
- 7.800 m Länge des Spundverbaus
- Dichte von 2,0 t/m³ für das Material

Die Mächtigkeit ergibt sich aus dem Rest, der nach Abzug der durchwurzelbare Bodenschicht von 0,5 m für Rasen im Landschaftsbau²¹⁵ (da im Nahbereich der Bebauung) und dem Abstand von 1,0 m vom MHGW übrig bleibt. Die Länge des Spundverbaus wurde anhand der ca. 30 Gebäude im B-Plan abgeschätzt, wobei durchschnittlich mit je einem Umfang von 260 m gerechnet wurde (Verbau). Daraus ergibt sich eine Masse von 26.000 t mit einem Volumen von 13.000 m³. Für diese Anwendung würde der offene Einbau gelten.

Baugruben-Verfüllung

Die Menge, die in Baugruben, die durch den Rückbau der Gebäude mit Kellergeschoss entstehen und in Freiflächen liegen, benötigt wird, beläuft sich auf eine Masse von 54.000 t mit einem Volumen von 27.000 m³. Für die Baugruben, die in Bereichen späterer Bebauung liegen, wird eine Menge von 100.000 t mit einem Volumen von 50.000 m³ veranschlagt.

Ob die Gebäude in späteren Freiflächen oder in späterer Bebauung liegen wurde anhand Anlage 1.3 ermittelt. Auf der Fläche von G1, G9, G10, G11, G12 und G15 sollen Freiflächen entstehen. Die Gebäude G3, G4, G5 und G45 liegen teilweise in Freiflächen und teilweise in der späteren Bebauung. Die Gebäude G44, G62 und G63 besitzen kein Kellergeschoss und wurden daher in der Berechnung nicht berücksichtigt. Die restlichen Gebäude, G2, G17, G18, G19, G39, G40, G42, G43 und G58 befinden sich auf dem Areal von späterer Bebauung.

²¹⁵ Vgl. LABO 2002, Tabelle II-1

Das Volumen der Baugruben für spätere Freiflächen wurde reduziert, da von der oberen Kote ausgehend, 1,0 m für die durchwurzelbare Bodenschicht reserviert sind (s. Punkt 8.2.2.2). Für beide Einbauvarianten wurde der MHGW angesetzt. Damit hat sich für den Einbau in spätere Freiflächen eine Mächtigkeit von 2,2 m und für den Einbau in Flächen mit Bebauung eine Mächtigkeit von 3,2 m ergeben. Bei der Menge für die Freiflächen würde der Mengengrenzwert von 10.000 m³ für den offenen Einbau greifen, wobei 27.000 m³ verfüllt werden müssten. Die Menge, die in Bereichen von späterer Bebauung (gleichbedeutend mit Einbau von RW 1-Material mit technischen Sicherungsmaßnahmen) verwendet werden würde, ist laut RC-Leitfaden nicht begrenzt.

Leitungsbettung

Die Menge, die für die Leitungsbettung eingesetzt werden könnte, beträgt 12.000 t mit einem Volumen von 6.000 m³. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Geplante Länge von 15,0 km (bei der alten Messe wurden bei kleinerer Fläche ca. 10,0 km eingebaut²¹⁶)
- Mächtigkeit von ca. 0,4 m (z.B. Abstand nach oben und unten bei Rohr mit 125 mm Außendurchmesser jeweils auch 125 mm, ergibt 0,375 m)
- Breite von 1,0 m
- Dichte von 2,0 t/m³ für das Material

Zu welchem Einbau diese Anwendung gerechnet wird, ist schwer zu sagen, da die Leitungen üblicherweise größtenteils unter Gehsteigen im Bereich von Straßen verlaufen. Daher wird diese Einbaumöglichkeit als Einbau mit technischen Sicherungsmaßnahmen gehandelt. Der Einbau würde bis ca. 1,5 m u. GOK (498,0 m ü. NN) stattfinden. Dadurch beträgt der Abstand zum MHGW etwa 2,7 m.

Lärmschutzwall

Ein Lärmschutzwall von ca. 21.000 m³ mit einer Masse von 42.000 t steht noch zur Diskussion. Diese Einsatzmöglichkeit würde zum offenen Einbau gerechnet werden. Das Volumen von 10.000 m³ würde hierbei überschritten werden. Allerdings könnte auch eine technische Sicherungsmaßnahme mittels wasserundurchlässiger Deckschicht realisiert werden. Diese werden im „Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau“ (M TS E), Ausgabe 2009, beschrieben. Mittels Sicherungsmaßnahme würde keine Mengenbegrenzung nach RC-Leitfaden gelten. Den GW-Abstand betreffend, bereitet diese Anwendung keine Schwierigkeiten.

²¹⁶ Vgl. Möbius 2006, S. 22

8.2.2.5 ABGELEITETE MATERIALSTRÖME

Aus den verschiedenen Materialströmen lässt sich nun ein Konzept ableiten, das aus drei Ebenen besteht. Die erste Ebene stellt die Abbruchstufe dar. Hierbei wird eine Einteilung der mineralischen Restmassen in Material, das durch den Abbruch der Gebäude entsteht, und Material vorgenommen, das durch den Rückbau der Verkehrsflächen, der Leitungsanlagen und den Ausbau der Auffüllungen entsteht. Die zweite Ebene kann als Aufbereitungsstufe bezeichnet werden. Bei der Aufbereitung findet die Unterteilung in die RC-Baustoffe statt, die hergestellt werden. Die letzte Ebene charakterisiert die Materialströme bezüglich des Recyclings auf dem Gelände, der Verwertung in Gruben und die Entsorgung in einer Deponie.

Das Konzept, bestehend aus den drei Ebenen mit den jeweiligen Materialströmen, ist in Anlage 4.10 dargestellt. Das Konzept, ausgedrückt in Zahlen, befindet sich in Anlage 4.11. Dabei sind auch die Einbauweisen gemäß RC-Leitfaden abgebildet. Insgesamt ergeben sich 67.000 m³, die im offenen Einbau ausgeführt werden könnten, und 107.000 m³, die mit technischen Sicherungsmaßnahmen ausgestattet wären. Somit würde der offene Einbau nach RC-Leitfaden bei größtmöglicher Verwertung auf dem Grundstück mengenmäßig um 57.000 m³ überschritten werden.

Bezüglich der Verwertung auf dem Gelände wäre die Verfüllung der Baugruben mit güteüberwachten RC-Baustoffen die Maßnahme im Zuge der Baufeldfreimachung, die priorisiert werden sollte, da sie mengenmäßig die größte Verwertung von RC-Baustoffen auf dem Gelände bewirken könnte.

8.2.2.6 WEITERE ÜBERLEGUNGEN

Da die Materialströme, vor allem während der Abbruchphase in der Phase Blau, große Dimensionen annehmen, ist das Recycling gerade in dieser Etappe von Vorteil. In Phase Gelb ist die Aufbereitung, angesichts der geringen Materialströme, weniger interessant. In den frühen Phasen sollte darauf abgezielt werden, möglichst viel RC-Material aufzubereiten, da auch ein Einsatz auf anderen Baustellen in München denkbar wäre. Zu beachten wäre außerdem, dass die Ausgangsstoffe für den RC Mix nicht immer die gewünschten bautechnischen Eigenschaften haben. Dann würde Altbeton bei der Aufbereitung zugegeben werden, um die erforderlichen Eigenschaften zu erreichen. Dieser könnte aufgrund des geringen RC Beton-Aufkommens auch extern beschafft werden.

Für das Konzept wurde auch die Annahme getroffen, dass die vorhandenen Schadstoffbelastungen i.d.R. überwiegend im Rahmen des RW 1 nach RC-Leitfaden liegen. Sofern aufgrund der Vornutzung mehr Material abgebrochen werden sollte, das eine Belastung über

RW 1 aufweist, würden sich folglich die Materialströme mehr in Richtung der Verwertung (in einer Grube) bzw. Entsorgung (in einer Deponie) entwickeln.

Falls die wasserrechtliche Zulassung wegen der Mengenüberschreitung beim offenen Einbau nach RC-Leitfaden nicht erteilt werden würde, müsste der Teil, der für die Überschreitung sorgt, entweder in Gruben verwertet oder in einer Deponie entsorgt werden. Die Möglichkeit des eingeschränkt offenen Einbaus soll bei diesem Projekt wegen der Praxisferne ausgeschlossen werden.

Da sich das Projekt über mehrere Jahre erstreckt, sollte gleichzeitig die geplante Ersatzbaustoffverordnung (s. Punkt 4.1) nicht unbeachtet bleiben. Beim Referentenentwurf der Ersatzbaustoffverordnung, wird, im Hinblick auf den Grundwasserabstand, bei den Einbauweisen der höchste zu erwartende Grundwasserstand maßgebend.²¹⁷ Danach würden sich die mögliche Verwertungsmenge nach Punkt 8.2.2.4 etwas verringern, da die untere Einbaugrenze dann höher liegen würde. Bei der Sulfatproblematik (s. Punkt 5.3) ergibt sich aus Tabelle 1 Anlage 1 ein Wert von 600 mg/l für Material der Umweltverträglichkeitsklasse RC 1. Gemäß Anlage 1 des RC-Leitfadens liegt der Wert für die vergleichbare Umweltverträglichkeitsklasse RW 1 bei 250 mg/l.²¹⁸ Daraus lässt sich schließen, dass zu einem späteren Projektzeitpunkt mit der Einführung der Ersatzbaustoffverordnung eine höhere Schadstoffbelastung eingebaut werden dürfte.

Zusätzliche Ideen für eine Verwertung der mineralischen Baurestmassen sind folgende:

Eine Möglichkeit wäre die Herstellung von RC Ziegel. Dieser müsste allerdings zunächst durch den Rückbauprozess sortenrein gewonnen werden und könnte dann einer externen Verwertung (z.B. Gartenbau) zugeführt werden. Eine andere Herangehensweise wäre die Herstellung von Sichtbetonelementen für den Landschafts- und Gartenbau, die dann entweder auf dem Gelände eingesetzt werden oder extern eine Verwendung finden könnten. Dabei könnten auch Mengen recycelt werden, die bei Ablehnung der wasserwirtschaftlichen Zulassung ansonsten in Gruben verwertet oder deponiert werden müssten. Auch eine RC Beton-Anlage wäre denkbar, die auf dem Gelände stationiert wird. Damit könnten die Sichtbetonelemente durch eine eigene Produktion hergestellt werden. Weitere Möglichkeiten wären L-Betonbausteine, Randsteine oder Betonschutzwände für Baustellen.

Flächenbedarf für eine mobile Recyclinganlage

Für die Aufbereitung in den nächsten vier Phasen wäre es sinnvoll, die Aufbereitung mittels einer mobilen Anlage direkt auf dem Gelände der BYK durchzuführen, um Transportkosten so gering wie möglich zu halten.

²¹⁷ Vgl. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Art 1 § 22 Abs. 7

²¹⁸ A.a.O., Tabelle 1 Anlage 1

Dabei müssten eine Menge an Aspekten berücksichtigt werden:

- Variablen bezüglich der Größe der Anlage (Brecher, Siebanlage, zwei Bagger, zwei Lader, Haufwerke, Boxen, Rangierplatz, Ein- und Ausgangswaage, Mischplatz, Dauer der Brecharbeiten, Dauer der Siebarbeiten)
- Fünf Boxen für die hergestellten RC-Baustoffe (RC Beton 0/45 und 0/8, RC Mix 0/45 und 0/8, Kies 0/32)
- Haufwerke für Rohmaterial (u.a. Bauschutt, Beton, Kalksteine)
- Brecher wird mobil an die Stellen im Gelände bewegt, wo gerade Material anfällt (Haufwerke)
- Standort mit befestigter Fläche (Beton oder Asphaltfläche)

Nach Angaben der Firma Ettengruber könnte die Recyclinganlage mit ca. 2.500 m² für die großen Mengen, die bei den Rückbaumaßnahmen entstehen, eingeplant werden. Trotzdem sollte noch zusätzlicher Platz mit maximal 500 m² für Haufwerke eingeplant werden. Insgesamt ergibt sich daraus eine Flächenbeanspruchung von 3.000 m². Die Standorte, die dafür in Frage kommen, wären der Hubschrauberlandeplatz im Osten von G14, die Fläche im Westen neben G3 und G4 oder die Fläche im Südosten zwischen G45 und G62. Für den Hubschrauberlandeplatz spricht, dass er mittig gelegen ist. Alle Möglichkeiten sind mit der zukünftigen Neubebauung abzustimmen.

8.3 HEMMNISSE BEIM RECYCLING VON RC-BAUSTOFFEN

Grundsätzlich gibt es viele Schwierigkeiten bei der Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen, die den hochwertigen Einsatz dieser Materialien behindern und die sich folgendermaßen darstellen. Probleme sind die mangelnde Akzeptanz gegenüber den RC-Baustoffen und deren negatives Image. Vor allem gibt es Vorbehalte gegenüber der Beständigkeit von aufbereiteten mineralischen Baurestmassen. Darüber hinaus gibt es Widerstände wegen fehlender Kenntnisse und Erfahrungen bei der Verwendung von RC-Materialien. Diese sind im privaten Sektor bei den Bauherren, den Bauunternehmern und den Aufbereitern anzutreffen und gleichzeitig im öffentlichen Bereich bei den Behörden bzw. den öffentlichen Bauherren. Selbst die Nachfrage bei den zuständigen Behörden, oder selbst einen Ansprechpartner zu finden, gestaltet sich als kompliziert. Kenntnisse über die Vorgehensweise bei der RC-Problematik sind größtenteils mangelhaft und auch die Herausgabe von Informationen findet nur widerstrebend statt. Es herrscht Desinteresse bezüglich der Verwertung von aufbereiteten mineralischen Baurestmassen bei einzelnen Mitarbeitern der zuständigen Behörden. Weitere Probleme sind die Vielfalt der Regelungen, die zu Unklarheiten beitragen und bei den Anwendern zur Überforderung und Irritation führen, sowie der finanzi-

elle und zeitliche Mehraufwand bei der Bewertung der Eignung der RC-Baustoffe. Zudem gibt es einerseits hohe Ansprüche und Anforderungen an die Qualität der mineralischen Ersatzbaustoffe inklusiv der sich daraus ergebenden Prüfung der Parameter, andererseits wird die Gewinnung der verschiedenen Baustofffraktionen oft nicht sortenrein durchgeführt.²¹⁹ Dazu kommen Hemmnisse wie wirtschaftliche Überlegungen und Unklarheiten über das Ende der Abfalleigenschaft eines Materials. Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die Ausschreibungen, bei denen z.T. die Primärbaustoffe bevorzugt werden und die damit wegen der fehlenden Produktneutralität nicht rechtskonform sind.²²⁰

Außerdem bestehen, aufgrund der großen Kiesvorkommen, regionale Hemmnisse in der Region München. Für die Kiesgrubenbetreiber in München bedeutet der Einsatz von RC-Baustoffen den doppelten Verlust bezüglich ihrer Materialströme, da ihre Primärbaustoffe weniger Verwendung finden und anschließend weniger Material für die Verfüllung bereitgestellt werden kann. Dies spricht für eine ablehnende Haltung gegenüber dem Einsatz von Sekundärbaustoffen in München. Zudem ist wegen der geringen Transportentfernungen in der Region von sehr niedrigen Preisen für die Primärbaustoffe auszugehen.

In der Praxis gibt es, im Gegensatz zum staatlichen Straßenbau, im kommunalen Straßenbau zusätzliche Widerstände gegenüber der Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen. Ein Grund dafür ist die hohe Festigkeit der ungebundenen Tragschicht beim Einsatz von RC Beton, wodurch Schwierigkeiten beim Kanalbau entstehen, die verstärkt im Kommunalbereich auftreten, da es hier zu einer Verdichtung der Kanalanlagen und deren nachträglichen Veränderung kommt.

8.4 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG

Im Anschluss werden die Kosten ermittelt, die bei einer maximalen Aufbereitung entstehen (Variante 1). Danach werden die Kosten berechnet, die sich für den Zukauf von Primärmaterial und die dadurch notwendige Verwertung (in Gruben) bzw. Entsorgung des ansonsten aufbereiteten Materials ergeben (Variante 2). Danach werden beide Kostenvarianten verglichen, um eine potentielle Kosteneinsparung aufzuzeigen. Das angefallene Material, das eine Schadstoffklasse über RW 1 besitzt, wird bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da es bei beiden Varianten verfüllt oder entsorgt werden muss.

²¹⁹ Vgl. Dechantsreiter et al. 2015, S. 131f

²²⁰ A.a.O., S. 131f

Das Material, das einer Aufbereitung zugeführt werden soll, ist in der anschließenden Tabelle dargestellt. Bei der Aufbereitung sollen die Kalksteine, die massenmäßig ca. 10 % des ausgebauten Verfüllmaterials ausmachen (96.000 t / 790.000 t), wie der Altbeton und der Bauschutt gebrochen werden. Von den knapp 570.000 t an Verfüllkies aus Anlage 4.7, ergibt sich daher eine Masse von 57.000 t für die Kalkschroppen.

TABELLE 19: MATERIAL FÜR DIE AUFBEREITUNG

Angefallenes Material (RW 1)	Menge [t]
Beton	17.900
Bauschutt	136.000
Kalkschroppen	57.000
kiesiges Material	513.000
Gesamt	723.900

8.4.1 KOSTEN FÜR DIE AUFBEREITUNG

Die Kosten, die die Aufbereitung der mineralischen Restmassen zu RC-Baustoffen über alle Abbruchphasen zur Folge hätte (Variante 1), werden auf der Grundlage eines Angebotes von der Firma Ettengruber erstellt. Das Angebot befindet sich in Anlage 6.1. Das Angebot enthält allerdings nur eine Preisliste für die Brecharbeiten. Zusätzlich zum Brechen des Altbetons, des angefallenen Bauschutts und der Kalksteine würde bei der Aufbereitung zumindest noch ein Siebschritt für die ausgehobene mineralische Restmasse aus Verfüllungen kommen. Die Ermittlung der Kosten für die Aufbereitung ist in Anlage 6.2 zu finden.

Die Kosten für die Brecharbeiten ergeben sich nach dem Angebot aus den Gesamtkosten für die folgenden Positionsnummern:

- a. Baustelleneinrichtung (pauschal)
- b. Mineralgemisch aufnehmen und beschicken (je Tonne)
- c. Aufhalden (je Tonne)
- d. Nutzung Hydraulikbagger (je Stunde)
- e. Evtl. zusätzliche Baustelleneinrichtung (pauschal)

Da nur die Baustelleneinrichtung pauschal berechnet wird, müssen zunächst die Kosten ermittelt werden, die durch b, c und d entstehen. Für die Positionen b und c sind die Kosten abhängig von der Masse, die aufbereitet wird. Die Massen werden von Punkt 8.4 herangezogen.

Für die Position d muss die erforderliche Stundenanzahl abgeschätzt werden. Diese lässt sich nur über die Stundenleistung des Brechers ermitteln. Die Leistung eines Brechers hängt von folgenden Variablen ab:

- Güte bzw. Art der mineralischen Baurestmasse
- Gewünschtes Endprodukt

Die Stundenleistung eines mittelgroßen mobilen Brechers liegt nach Aussagen der Firma Ettengruber etwa bei 150 bis 200 t/h. Bei der Materialgüte bestimmt beim Brechen von Altbeton der Anteil an Bewehrung die Leistung des Brechers. Zusätzlich können auch bei der Aufbereitung von Bauschutt und Altbeton große Brocken die Leistung des Brechers verringern. Darüber hinaus kann die gewünschte Körnung des Endprodukts die Leistung des Brechers minimieren. Umso kleiner das Größtkorn sein soll, desto schlechter ist die Brecherleistung. Um einen möglichst realistischen Wert anzunehmen, wird daher die untere Grenze der Brecherleistung (150 t/h) angesetzt. Dadurch ergibt sich zusammen mit der Materialmenge, die gebrochen werden soll, eine Stundenanzahl von knapp über 1.400 h. Bei so einer großen mineralischen Baurestmasse, die gebrochen werden muss, ist die Mindestbesetzung für die Brecharbeiten ein Bagger, der den Prallbrecher beschickt, und ein Lader, der das gebrochene Material aufhaldet. Für beide wird jeweils ein Preis von 80,00 €/h angesetzt. Mit den Positionen a, b, c und e entstehen insgesamt Kosten für die Brecharbeiten von knapp 960.000,00 €.

Die Kosten für die Siebarbeiten werden analog ermittelt. Gemäß Angaben der Firma Ettengruber liegt dagegen der Preis für Position b bei 1,50 €/t und die Leistung der Siebanlage beträgt ca. 100 t/h. Dadurch beläuft sich die Dauer der Siebarbeiten auf etwa 5.000 h. Insgesamt ergeben sich für die Brech- und Siebarbeiten im Zuge der Aufbereitung Kosten von knapp über 3 Mio. €.

8.4.2 KOSTEN FÜR KONVENTIONELLES MATERIAL UND DIE ENTSORGUNG VON MINERALISCHEN BAURESTMASSEN

Im Folgenden werden die Kosten ermittelt, die entstehen würden, wenn, anstatt der aufbereiteten mineralischen Baurestmassen, Primärmaterial eingesetzt werden würde. Dazu müsste das angefallene RW 1-Material einer Verwertung bzw. Verfüllung in Gruben, Brüchen oder Tagebauen zugeführt werden, wodurch zusätzliche Kosten entstehen. Die Kosten, die sich hierbei insgesamt ergeben, stellen Variante 2 dar. Die Berechnung befindet sich in der Anlage 6.3.

Als Erstes werden die Kosten für das Primärmaterial ermittelt. Diese sind vom Preis für die Materialart und vom Preis für den Transport abhängig. Da der RC Beton und die aufbereiteten Kalksteine üblicherweise höherwertige Materialien als der RC Mix und das aufbereitete kiesige Material sind, wird von zwei unterschiedlichen Primärmaterialien ausgegangen, die zugekauft werden müssen:²²¹

- Mischkies Körnung 0/32 für 12,00 €/t (statt RC Beton/aufbereitete Kalksteine)
- Auffüllkies Körnung 0/32 für 5,90 €/t (statt RC Mix/aufbereiteter Verfüllkies)

Für die Lieferkosten wird nach Angaben der Firma Ettengruber ein Preis von 5 €/t angesetzt. Insgesamt entstehen dadurch für das Primärmaterial Kosten in Höhe von ca. 8,4 Mio. €.

Die Kosten, die sich durch die Verwertung bzw. Entsorgung ergeben, bilden sich aus den Kosten für die Verwertung in Gruben bzw. Entsorgung in Deponien und den Transportkosten. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Die angefallenen mineralischen Restmassen, die nicht aufbereitet werden sollen, werden in einer Grube für RW 1-Material verwertet bzw. verfüllt
- Der Preis für die Verfüllung von RW 1-Material in der Grube beträgt 15,00 €/t²²²
- Gemäß Aussagen der Firma Ettengruber beträgt der Preis für den Transport 9,00 €/t

Dadurch entstehen Kosten für die Verwertung in einer Grube mit einem Betrag von etwa 17,4 Mio. €. Insgesamt belaufen sich die Kosten dann auf 22,1 Mio. €.

8.4.3 KOSTENVERGLEICH

Der Vergleich der beiden Varianten gestaltet sich mit den unterschiedlichen Ergebnissen für Variante 1 (3,0 Mio. €) und Variante 2 (22,1 Mio. €) als relativ unkompliziert. Prozentual gesehen würden bei Variante 2 etwa 86 % höhere Kosten entstehen. Als nächstes werden weitere Überlegungen zu den beiden Varianten dargestellt.

Für Variante 1 könnte es in der Praxis sinnvoll sein, z.B. noch einen Arbeiter für Aussortierarbeiten einzusetzen. Aus nachfolgend genanntem Grund werden die Kosten für diese Möglichkeit jedoch nicht berücksichtigt. Die Variante der Aufbereitung stellt bereits eine teure Variante 1 dar, da i.d.R. die Aufbereitung nach Angaben der Firma Ettengruber zusammen mit dem Rückbau angeboten wird. Dadurch werden die Kosten für die Aufbereitung verringert.

²²¹ Vgl. Ebenhöf GmbH & Co. Kies- und Sandwerke KG

²²² Vgl. Ettengruber GmbH Grubenbetrieb 2017

Für Variante 2 sollten folgende Aspekte beachtet werden. Die Ermittlung fand über sog. Listenpreise statt. Diese Preise sind nach Aussagen der Firma Ettengruber für eine solch große Menge an Material üblicherweise nicht zu erwarten (Mengenrabatt). Da sich das Projekt dennoch über einen großen Zeitraum erstreckt und die Verwertung (Grube) bzw. die Entsorgung in Zukunft nicht günstiger werden wird, bewegen sich die Kosten für Variante 2 in einem realistischen Rahmen. Obendrein könnte der Fall eintreten, dass die Verfüllung von RW 1-Material in Gruben in Zukunft ausgeschöpft ist und damit eine teure Entsorgung in Deponien nötig wäre.²²³

Insgesamt lässt sich aus der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit ableiten, dass, selbst wenn die aufbereiteten mineralischen Baurestmassen nicht auf dem Gelände der BYK eingesetzt werden, eine Aufbereitung aufgrund des extremen Kostenunterschiedes sinnvoll ist. Es ist anzunehmen, dass das Material auch ohne eine Verwertung auf dem Gelände für andere Baumaßnahmen in Frage kommen würde. Dafür spricht der Produktstatus des RW 1-Materials und die potentielle Aufbereitung durch ein etabliertes Aufbereitungsunternehmen. Diese beiden Bedingungen sorgen für eine hohe Akzeptanz für das aufbereitete Material bei den Anwendern.

9. FAZIT

In Deutschland stellen die mineralischen Restmassen den größten Abfallstrom dar. Gemäß der Pflicht „Vermeidung, Verwertung, Entsorgung“ laut KrWG wird ein Großteil davon bereits mittels Verfüllung in Abbaustätten verwertet. Diese Methode zählt aber als nachrangigste Verwertung. Um das Recycling zu fördern, das als vorrangigste Verwertung gilt, müsste vor allem die Akzeptanz bei den verantwortlichen Stellen gegenüber RC-Baustoffen gesteigert werden. Grundsätzlich sind Bedenken bei der Verwertung von güteüberwachten und zertifizierten RC-Baustoffen jedoch nicht gerechtfertigt, da auch die umwelttechnischen Bedingungen durch das System der Gütesicherung sichergestellt werden. Auf dem Gelände der ehemaligen BYK hätte die Stadt München im Rahmen der Baufeldfreimachung die Möglichkeit, das Recycling von mineralischen Baurestmassen als vorrangigster Verwertungsmethode zu fördern.

Im Hinblick auf die bautechnische Eignung ergeben sich vor allem für RC Beton hochwertige Verwertungsmöglichkeiten auf dem Gelände der BYK. RC Mix könnte für Verfüllungen eingesetzt werden. Zurückgewonnener Asphalt wird i.d.R. erdbautechnisch nicht eingesetzt. Er wird im Asphaltmischwerk zugegeben, um neuen Asphalt herzustellen. RC Ziegel wird als

²²³ Wörrle 2017

Reinstoff im Erd- und Straßenbau nicht verwendet. Normalerweise werden die Eigenschaften dieses RC-Baustoffs entweder durch die Zugabe von RC Beton bautechnisch positiv verbessert, damit das RC-Gemisch dann den Anforderungen für erdbautechnische Anwendungen entspricht oder RC Ziegel dient als Reinstoff für der Herstellung von Kultursubstraten im Gartenbau.

Insgesamt ergaben sich bei der Erstellung des Verwertungskonzeptes einige Schwierigkeiten. Zum einen handelt es sich bei dem Gelände um ein 48 ha großes Areal, bei dem sich aufgrund der Vorgeschichte durch unterschiedliche Nutzungen sehr viele Problematiken ergeben, u.a. die der Altlasten. D.h., dass es trotz der großen Zahl an Untersuchungen, die zum Teil rasterförmig durchgeführt wurden, sehr viele Unbekannte gibt. So sind die unterschiedlichen Schadstoffbelastungen in den Gebäuden und im Boden sowie die Folgen für die abgeleiteten Massenströme hinsichtlich der nachrangigsten Verwertung und der Entsorgung schwer einzuschätzen. Zum anderen beruht die Konzeption auf zahlreichen Annahmen, die darin begründet sind, dass die Planungen für das neue Stadtviertel auf dem Gelände der ehemaligen BYK, auf dem einmal 15.000 Menschen leben sollen, noch nicht abgeschlossen sind. Änderungen sind daher möglich.

Aufgrund des Mengengrenzwertes ist die Verwertung gemäß dem RC-Leitfaden bezüglich der Einbauvariante „offener Einbau von RW 1-Material“ fast nicht durchführbar. Dies liegt zum einen an den großen Mengen, die sich aus dem Abbruch ergeben, und zum anderen an der praxisfernen Umsetzung des uneingeschränkt offenen Einbaus. Kritisch gesehen, scheint der RC-Leitfaden nur für kleinere einzelne voneinander unabhängige Baumaßnahmen geeignet, da ansonsten bei der Anwendung des eingeschränkt offenen Einbaus sofort durch das Einhalten des Abstandes vom höchsten Grundwasserstand mehr als ein Meter verloren geht. Bei derart großen Maßnahmen sollten daher höhere Volumengrenzwerte für den offenen Einbau erlaubt sein, da der Einsatz von RC-Baustoffen für den offenen Einbau ansonsten eher gering ausfällt. Zumindest kann davon ausgegangen werden, dass bei Projekten in diesem Ausmaß eine wasserrechtliche Zulassung notwendig wird.

Die Aufbereitung der mineralischen Restmassen sollte auf dem Gelände der Bayernkaserne unbedingt durchgeführt werden, da ansonsten eine zusätzliche extreme Kostenbelastung entstehen kann. Mit der garantierten Aussicht auf Entsorgungsengpässe in den nächsten Jahren wird durch die hohe Verwertung von RC-Baustoffen in technischen Bauwerken auf dem Gelände der BYK das Kostenrisiko für die Stadt München für das Projekt erheblich verringert.

ANHANG

- I. Feststoffwerte für Böden (Umweltverträglichkeit)
- II. Eluatwerte für Böden (Umweltverträglichkeit)
- III. Einbaukriterien für Böden nach LAGA M20
- IV. Feststoff- und Eluatwerte für RC-Baustoffe (Umweltverträglichkeit)
- V. Einbaukriterien für RC-Baustoffe nach RC-Leitfaden
- VI. Unterscheidung Backen- und Prallbrecher
- VII. Art und Häufigkeit der durchzuführenden Prüfungen der wasserwirtschaftlichen Gütemerkmale
- VIII. Einsatzmöglichkeiten von RC-Baustoffen
- IX. Größenordnung der Kohäsion und Reibung von verschiedenen Lockergesteinen und Böden
- X. Inhaltsverzeichnis Anlage

I. Feststoffwerte für Böden (Umweltverträglichkeit)²²⁴

Parameter	Dimension	Zuordnungswert (Z)			
		Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
pH-Wert ¹⁾		5,5-8	5,5-8	5-8	-
EOX	mg/kg	1	3	10	15
Kohlenwasserstoffe		100	300	500	1000
∑ BTEX		<1	1	3	5
∑ LHKW		<1	1	3	5
∑ PAK n. EPA		1	5 ²⁾	15 ³⁾	20
∑ PCB (Congenere nach DIN 51527)		0,02	0,1	0,5	1
Arsen		20	30	50	150
Blei		100	200	300	1000
Cadmium		0,6	1	3	10
Chrom (ges.)		50	100	200	600
Kupfer		40	100	200	600
Nickel		40	100	200	600
Quecksilber		0,3	1	3	10
Thallium		0,5	1	3	10
Zink	120	300	500	1500	
Cyanide (ges.)	1	10	30	100	

- 1) Niedrigere pH-Werte stellen allein kein Ausschlusskriterium dar. Bei Überschreitungen ist die Ursache zu prüfen
- 2) Einzelwerte für Naphthalin und Benzo-[a]-Pyren jeweils kleiner als 0,5.
- 3) Einzelwerte für Naphthalin und Benzo-[a]-Pyren jeweils kleiner als 1,0.

²²⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung an Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen 1998, S. 25

II. Eluatwerte für Böden (Umweltverträglichkeit)²²⁵

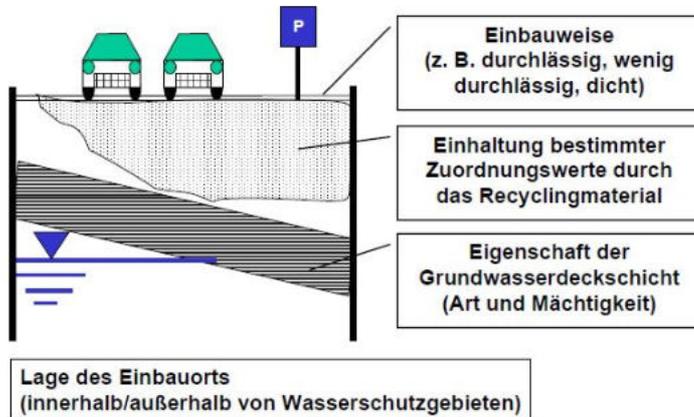
Parameter	Dimension	Zuordnungswert (Z)			
		Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
pH-Wert ¹⁾		6,5-9	6,5-9	6-12	5,5-12
El. Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	500	500	1000	1500
Chlorid	mg/l	10	10	20	30
Sulfat	mg/l	50	50	100	150
Cyanid	$\mu\text{g/l}$	<10	10	50	100 ³⁾
Phenolindex ²⁾		<10	10	50	100
Arsen		10	10	40	60
Blei		20	40	100	200
Cadmium		2	2	5	10
Chrom (ges.)		15	30	150	300
Kupfer		50	50	150	300
Nickel		40	50	150	200
Quecksilber		0,2	0,2	1	2
Thallium		<1	1	3	5
Zink		100	100	300	600

- 1) Niedrigere pH-Werte stellen allein kein Ausschlusskriterium dar. Bei Überschreitungen ist die Ursache zu prüfen.
- 2) Bei Überschreitungen ist die Ursache zu prüfen. Höhere Gehalte, die auf Huminstoffe zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.
- 3) Verwertung für Z 2 > 100 $\mu\text{g/l}$ ist zulässig, wenn Z 2 Cyanid (leicht freisetzbar) < 50 $\mu\text{g/l}$.

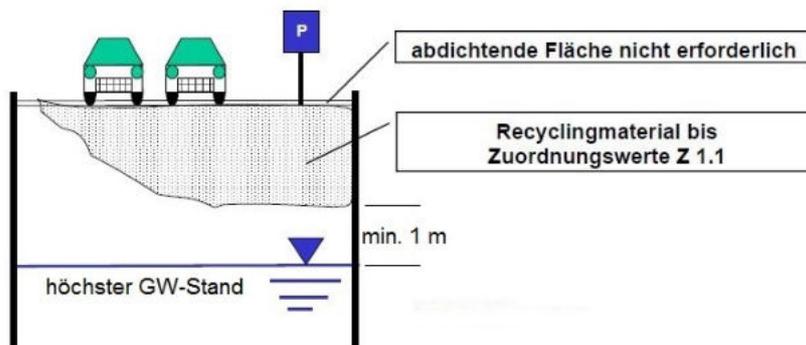
²²⁵ Eigene Darstellung in Anlehnung an Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen 1998, S. 26

III. Einbaukriterien für Böden nach LAGA M20²²⁶

Einbaukriterien

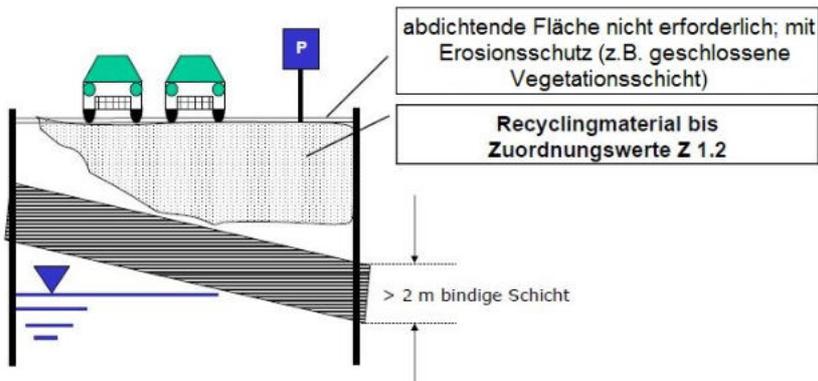


Einbauklasse Z 1.1: Eingeschränkter offener Einbau



Ausnahme: u.a. nicht in Trinkwasserschutzgebieten (I - III A), Heilquellenschutzgebieten (I - III), Überschwemmungsgebieten, Naturschutzgebieten

Einbauklasse Z 1.2: Eingeschränkter offener Einbau unter günstigen hydrogeologischen Voraussetzungen

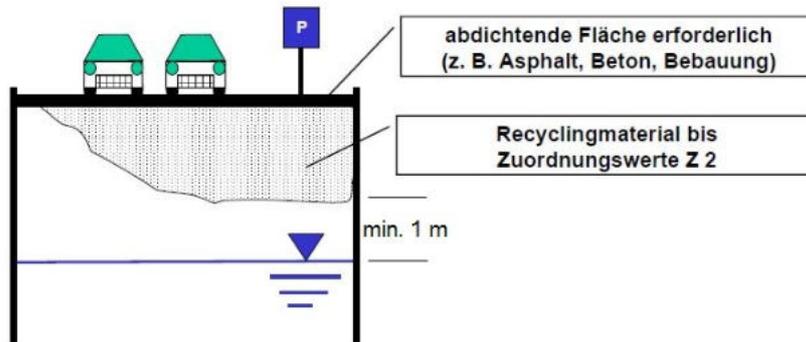


Ausnahme: u.a. nicht in Trinkwasserschutzgebieten (I - III A), Heilquellenschutzgebieten (I - III), Überschwemmungsgebieten, Naturschutzgebieten

²²⁶ Vgl. Benson 2010, S. 25-29; gilt auch für die nächste Seite

Einbauklasse Z 2: Eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen

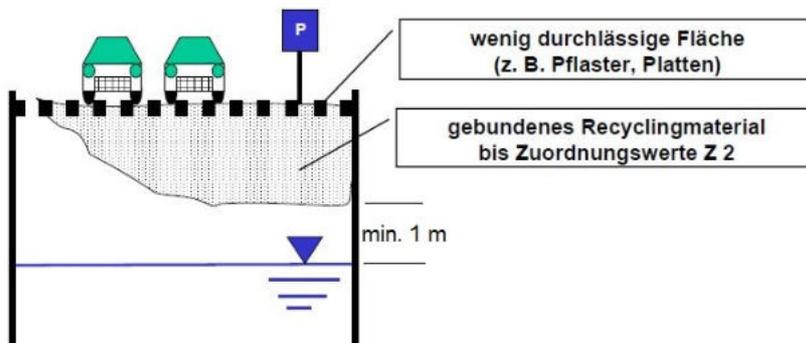
(Version 1: ungebundene Schicht unter wasserundurchlässiger Deckschicht)



Ausnahme: u.a. nicht in Trinkwasserschutzgebieten (I - III B), Heilquellenschutzgebieten (I - IV), Wasservorranggebieten, Überschwemmungsgebieten

Einbauklasse Z 2: Eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen

(Version 2: gebundene Schicht unter wenig durchlässiger Deckschicht)



Ausnahme: u.a. nicht in Trinkwasserschutzgebieten (I - III B), Heilquellenschutzgebieten (I - IV), Wasservorranggebieten, Überschwemmungsgebieten

IV. Feststoff- und Eluatwerte für RC-Baustoffe (Umweltverträglichkeit)²²⁷

	Parameter	Einheit	Richtwert 1 (RW 1)	Richtwert 2 (RW 2)	Toleranz ⁰⁾ (%)
1	2	3	4	5	6
Feststoff	Äußere Beschaffenheit		ist anzugeben		
	EOX	mg/kg	3	15	20
	MKW ¹⁾	mg/kg	300	1.000	20
	PAK EPA ²⁾	mg/kg	5	20	
Eluat	Färbung, Trübung, Geruch		ist anzugeben		
	pH-Wert ³⁾		ist anzugeben		
	El. Leitfähigkeit	mS/m	200	800	5
	Sulfat ⁴⁾	mg/l	250	1.000	10
	Chlorid	mg/l	125	300	10
	Arsen	µg/l	10	60	20
	Cadmium	µg/l	2	10	20
	Chrom (ges.)	µg/l	50	150	10
	Kupfer	µg/l	50	300	10
	Nickel	µg/l	50	200	10
	Blei	µg/l	40	200	10
	Zink	µg/l	100	600	10
	Quecksilber	µg/l	0,5	2	20
	Phenolindex ⁵⁾	µg/l	20	100	20
	MKW ⁶⁾	µg/l	100	600	20

- 0) Toleranzangaben beziehen sich ausdrücklich auf die Messungenauigkeiten der Analysemethoden
- 1) Bei bitumenhaltigen RC-Baustoffen kann die Bestimmung der Mineralölkohlenwasserstoffe im Feststoff entfallen, maßgebend ist hier der Eluatgehalt der Mineralölkohlenwasserstoffe.
- 2) Bei bitumenhaltigen RC-Baustoffen ist eine uneingeschränkte Verwertung bis zu einem Wert von 10 mg/kg zulässig.
- 3) Für RC-Baustoffe typischer Bereich: 7,0 – 12,5 (kein Richtwert); bei Abweichungen im Rahmen von Eigenüberwachungsprüfungen ist der Fremdüberwacher einzuschalten.
- 4) Bei Bauschutt für gipshaltiges Material ist eine uneingeschränkte Verwertung bis zum Richtwert 2 zulässig, unter der Bedingung, dass die Ca-Konzentration im Eluat mindestens die 0,43-fache Sulfat-Konzentration erreicht.
- 5) Bei bitumenhaltigen RC-Baustoffen ist eine uneingeschränkte Verwertung bis zum Richtwert 2 zulässig.
- 6) Nur zu bestimmen bei bitumenhaltigen RC-Baustoffen oder wenn die Feststoffanalyse mehr als 300 mg/kg ergibt.

²²⁷ ZTV wwG-StB By 05, Anhang 1

V. Einbaukriterien für RC-Baustoffe nach RC-Leitfaden²²⁸

RW 1 → Offener Einbau

RC-Leitfaden (2005) Nr. 4.2/ ZTV wwG By (2005) Nr. 7.2

Uneingeschränkt offener Einbau

Menge	≤ 5.000 m ³	≤ 10.000 m ³
	pro Baumaßnahme	bei mehrfachen Einbau (z.B. im gleichen Baugebiet)
→ außerhalb des mittleren höchsten Grundwasserstands (MHGW)		



Eingeschränkt offener Einbau



Menge	> 5.000 m ³	> 10.000 m ³
	pro Baumaßnahme	bei mehrfachen Einbau (z.B. im gleichen Baugebiet)

- 2 m über den höchsten Grundwasserstand
- mit mind. 1 m Grundwasser schützender Deckschicht (ggf. techn. Sorptionsschicht)
- außerhalb von Überschwemmungsgebieten

RW 2 → Einbau mit technischen Sicherungsmaßnahmen

RC-Leitfaden (2005) Nr. 4.3/ ZTV wwG By (2005) Nr. 7.3

→ im Straßen-, Wege- und Verkehrsflächenbau

Einbau in gebundenen Deckschichten, als gebundene Tragschichten unter wenig durchlässigen Deckschichten (Pflaster, Platten), als ungebundene Tragschicht unter wasserundurchlässigen Deckschichten im Erdbau

mit technischen Sicherungsmaßnahmen in Lärm- und Sichtschutzwällen, Straßendämmen sowie als Unterbau

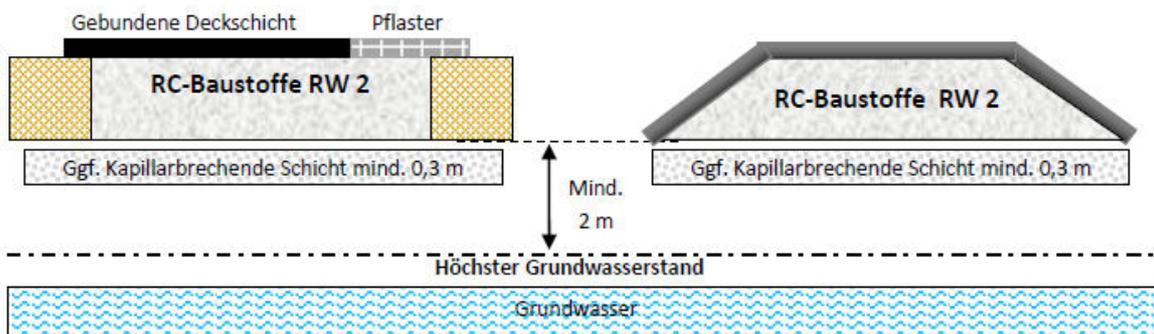
→ Abstand von Unterkante RC-Schüttung bis zum höchsten Grundwasserstand mind. 2 m

→ bei Abstand < 3 m: zusätzlich mind. 0,3 m kapillARBrechende Schicht

→ außerhalb von Überschwemmungsgebieten

→ Nachweis und Eignungsprüfung der technischen Sicherungsmaßnahme

→ in Rücksprache mit dem zuständigen Wasserwirtschaftsamt



Verwertungsverbot

RC-Leitfaden (2005) Nr. 4.1/ ZTV wwG By (2005) Nr. 7.1

- in festgesetzten oder geplanten Trinkwasserschutzgebieten und Heilquellenschutzgebieten, soweit sie bereits wasserwirtschaftlich positiv beurteilt sind
- direkt im Grundwasser
- in Karstgebieten ohne ausreichende Deckschichten
- RC-Baustoffe > RW 2

²²⁸ Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2005b, Darstellung nach Baustoff Recycling Bayern e.V. 2012

VI. Unterscheidung Backen- und Prallbrecher²²⁹

Art	Prinzip	Vorteile	Nachteile	Einsatz	Durchsatz	Ergebnis
Backenbrecher	Druck- und Zwangsbeanspruchungen	<ul style="list-style-type: none"> - robust - große Masse mit Störstoffen - geringer Brechsandanfall - geringe Verschleißanfälligkeit - Entstaubung nicht erforderlich - Keine Belastungen infolge Staub- und Lärmemission 	<ul style="list-style-type: none"> - Geringer Zerkleinerungsgrad bzw. Verhältnis - schlechte Zerkleinerung von flachen Bestandteilen - schlechter Aufschluss von Bewehrungsstahl - unwirtschaftlicher 	<ul style="list-style-type: none"> - Als Vorbrecher (2-stufige Anlage) - Als Produktbrecher (1-stufige Anlage) 	- 200 m³/h	<ul style="list-style-type: none"> - Korngröße: 0-150 mm - Kornform: plattig bis splittig
Prallbrecher	Prallbeanspruchung durch hohe kinetische Energie	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Zerkleinerungsgrad - hoher Anteil von Körnern mit kubischer Form - bessere Aufschlussfähigkeit - Erzeugung direkt einsetzbarer Körnung 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Brechsandanfall - hoher Feinkornanteil - störanfällig - Begrenzung Störstoffe nötig - Entstaubung nötig - hohe Lärmemission 	<ul style="list-style-type: none"> - In mobilen Anlagen - Als Nachbrecher (in 2-stufiger, stationärer Anlage) 	- 200 m³/h	<ul style="list-style-type: none"> - Korngröße: 0-80 mm - Kornform: größtenteils kubisch

²²⁹ Eigene Darstellung, vgl. Weimann et al. 2013, S. 69f

VII. Art und Häufigkeit der durchzuführenden Prüfungen der wasserwirtschaftlichen Gütemerkmale²³⁰

	Parameter	Erstprüfung	Eigenüberwachungsprüfung	Fremdüberwachungsprüfung ¹⁾
1	2	3	4	5
Feststoff	Herkunft	X	T	4
	Äußere Beschaffenheit	X	T	4
	EOX	X		4
	MKW	X		4
	PAK EPA	X		4
Eluat	Färbung, Trübung, Geruch	X	W	4
	pH-Wert	X	W	4
	El. Leitfähigkeit	X	W	4
	Sulfat	X		4
	Chlorid	X		4
	Arsen	X		4
	Cadmium	X		4
	Chrom (ges.)	X		4
	Kupfer	X		4
	Nickel	X		4
	Blei	X		4
	Zink	X		4
	Quecksilber	X		4
	Phenolindex	X		4
	MKW	X		4

- X Ist durchzuführen
T täglich
W wöchentlich
4 viermal jährlich

- 1) Erfolgt die Produktion diskontinuierlich, kann abweichend je angefangene 13 Produktionswochen eine Fremdüberwachungsprüfung durchgeführt werden, bei Produktion auf Halde jedoch mindestens alle 10.000 Tonnen.

²³⁰ ZTV wwG-StB By 05, Anhang 2

VIII. Einsatzmöglichkeiten von RC-Baustoffen²³¹

Straßenoberbau	Ungebundene Tragschichten
	Frostschuttschichten
	Asphalttrag-, Binder- und Deckschichten
	Betontragschichten
Erdbau und Straßenunterbau	Hinterfüllungen, Überschüttungen
	Baugruben-Verfüllungen
	Bettungen für Energie-, Fernmeldekabel sowie Leitungsrohre
	Lärmschutzwälle, Dämme
	Vegetationsschichten und Wegebau
	Unterbau (unter Asphalt und Beton)
	Unterbau mit Anteil Hochofenschlacke
	Baugrund/Baustraßen/Bodenverfestigungen
	Untergrundverbesserung
Verkehrswegebau, Sportplatzbau und Landschaftsbau	Sichtbetonelemente (RC Beton für Wege-, Garten- und Landschaftsbau)
	Rückenstützbeton (Bordsteine)
	Ungebundene Deckschichten
	Pflasterbettungen
	Fugenfüllungen
	Ungebundene Tragschichten
	Sportplatztragschichten, Sportplatzbau-Drainage
	Gasdrainage
Sonstiges	RC-Blähgranulat
	Zierkiese (RC Ziegel)
	Baum-/Dachgartensubstrate (RC Ziegel)
	Mineralisierungsbeigaben für Kompostzuschläge
	Schotterrasen

²³¹ Eigene Darstellung in Anlehnung an BMUB und BMVg 2016, S. 101

IX. Größenordnung der Kohäsion und Reibung von verschiedenen Lockergesteinen und Böden²³²

Art des Lockergesteins oder Bodens	Gruppe nach DIN 18196	Reibungs-winkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]
[...]		[...]	
Schotter und Splitt, gut abgestuft, dicht	GW, GI	40-42,5	
Schotter und Splitt, gut abgestuft, locker	GW, GI	37,5-40	
Kies und Sand, gut abgestuft, dicht	GW, GI	40-42,5	
Kies und Sand, gut abgestuft, locker	GW, GI	32,5-35	
Kies, gleichförmig, enggestuft, dicht	GE	37,5-40	
Kies, gleichförmig, enggestuft, locker	GE	32,5-35	
Sand, rau, gut abgestuft, dicht	SW, SI	37,5-40	
Sand, rau, gut abgestuft, locker	SW, SI	32,5-35	
Sand, rundkörnig, gut abgestuft, dicht	SW, SI	32,5-37,5	
Sand, rundkörnig, gut abgestuft, locker	SW, SI	30-32,5	
Sand, rundkörnig, enggestuft, dicht	SE	30-35	
Sand, rundkörnig, enggestuft, locker	SE	30-32,5	
Feinsand, dicht	SF	32,5-37,5	
Feinsand, locker	SF	30-32,5	
Kies-Sand mit Feinkorn (Lehm), dicht	GU, GT	27,5-37,5	0-15
Kies-Sand mit Feinkorn (Lehm), locker	GU, GT	22,5-35	0-15
Sand mit Feinkorn (Lehm), dicht	SU, ST	25-32,5	0-20
Sand mit Feinkorn (Lehm), locker	SU, ST	22,5-30	0-20
Schluff, leicht plastisch (Löss), dicht	UL	27,5-30	5-10
Schluff, leicht plastisch (Löss), locker	UL	25-27,5	5-10
Schluff, mittelplastisch, halbfest	UM	25-30	5-20
Schluff, mittelplastisch, steif	UM	22,5-27,5	5-20
Ton, leicht plastisch, halbfest	TL	22,5-27,5	10-30
Ton, leicht plastisch, steif	TL	20-25	10-30

²³² Eigene Darstellung in Anlehnung an Dachroth 2017, Tab. 1.36

Ton, mittelplastisch, halbfest	TM	20-25	15-40
Ton, mittelplastisch, steif	TM	10-20	15-40
Ton, ausgeprägt plastisch, halbfest	TA	15-25	20-50
Ton, ausgeprägt plastisch, steif	TA	7-15	20-50
Organische Böden, vorbelastet	F, H, OT	15-25	5-20
Organische Böden, nicht vorbelastet	F, H, OT	5-17,5	2-10
Hausmüll, dicht eingebaut		28-31	10-20
Hausmüll, locker abgelagert		15-17,5	5-10

X. Inhaltsverzeichnis Anlage²³³

1. Übersichtspläne
 - 1.1 Ausschnitt des Bebauungsplans
 - 1.2 Grundriss BYK mit Gebäudenummern
 - 1.3 Masterplan der Baufeldfreimachung
2. Gütesicherung²³⁴
 - 2.1 Beispiel für ein Zertifikat
 - 2.2 Verzeichnis der Ausgangsstoffe
 - 2.3 Sortenverzeichnis
 - 2.4 Aufnahmebericht/Eignungsnachweis
 - 2.5 Beispiel für ein Prüfzeugnis
 - 2.6 Prüfauftrag
 - 2.7 Überwachungsbericht
 - 2.8 Lieferschein²³⁵
 - 2.9 Merkblätter zu den folgenden Produktgruppen
 - 2.9.1 RC FSS-StB
 - 2.9.2 RC Erd-StB
 - 2.9.3 BM Erd-StB
 - 2.9.4 RC Beton
 - 2.9.5 RC Mix
 - 2.9.6 RC Asphalt
 - 2.9.7 GS Gleisschotter
 - 2.9.8 BM Bodenmaterial
 - 2.9.9 RC Ziegel
3. Untersuchungen auf dem Gelände der BYK
 - 3.1 Lagepunkte der Rammsondierungen & der Rammkernsondierungen
 - 3.2 Auffüllungen
 - 3.3 Tiefe des Tertiärs
 - 3.4 Grundwasser-Messstellen
4. Mengenermittlungen für das Verwertungskonzept
 - 4.1 Gebäude-BRI
 - 4.2 Bauschutt
 - 4.3 Beton (Keller)

²³³ Die Anlage befindet sich im Ordner

²³⁴ Bei Dokumenten des BRB vgl. Baustoff Recycling Bayern e.V. 2011, Anlage 1f

²³⁵ ZTV wwG-StB By 05, Anhang 3

- 4.4 Asphalt- & Pflasterbefestigung
- 4.5 Verfüllungen
- 4.6 Zusammenfassung des angefallenen Materials nach Abbruch
- 4.7 Aufbereitete Menge, Verwertung & Entsorgung
- 4.8 Angestrebte Verwertung (Teil 1)
- 4.9 Angestrebte Verwertung (Teil 2)
- 5. Konzept
- 5.1 Darstellung des Verwertungskonzeptes
- 5.2 Verwertungskonzept in Zahlen
- 6. Wirtschaftlichkeit
- 6.1 Angebot Firma Ettengruber
- 6.2 Kosten für die Aufbereitung
- 6.3 Kosten für das Primärmaterial und die Verwertung bzw. Entsorgung

LITERATURVERZEICHNIS

Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen. Technische Regeln (1998). 4., erw. Aufl., Stand: 6. November 1997. Berlin: E. Schmidt (Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), 20,4).

Aquil, U.; Tatsuoaka, F.; Ushimura, T.; Lohani, T. N.; Tomita, Y.; Matsushima, K. (2005): Strength and Deformation Characteristics of Recycled Concrete Aggregate as Backfill Material. In: *Soils and Foundations*.

Arulrajah, A.; Piratheepan, J.; Aatheesan, T.; Bo, M. W.; M. ASCE (2011): Geotechnical Properties of Recycled Crushed Brick in Pavement Applications. In: *Journal of Materials in Civil Engineering* (23), S. 1444–1452.

Arulrajah, A.; Piratheepan, J.; Ali, M. M. Y.; Bo, M. W. (2012a): Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregate in Pavement Sub-Base Applications. In: *Geotechnical Testing Journal*.

Arulrajah, A.; Piratheepan, J.; Bo, M. W.; Sivakugan, N. (2012b): Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications. In: *Canadian Geotechnical Journal* (49), S. 796–811.

Battermann, Arne (2000): Eine Einführung in die Bauschutt-Problematik. Online verfügbar unter <http://bauingenieurseite.de/abfallwirtschaft/bauschutt.html#SECTION00043000000000000000>, zuletzt geprüft am 04.08.2017.

Baumgärtel, Tobias (2008): Erdbautechnische Eignung und klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt. Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE-Nr. 05.145/2006/CGB. Technische Universität München.

Baustoff Recycling Bayern e.V. (Hg.) (2011): Richtlinien für die Anwendung und Güteüberwachung von mineralischen Ersatzbaustoffen in Bayern.

Baustoff Recycling Bayern e.V. (2012): Einbaukriterien für Recyclingbaustoffe. Online verfügbar unter www.baustoffrecycling-bayern.de/system/files/oeffentlich/Einbaukriterien_fuer_Recyclingbaustoffe.pdf, zuletzt geprüft am 16.08.2017.

Bayerischer Landtag, Beschluss vom 14.03.2017, Aktenzeichen Drs. 17/14614, 17/15572.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hg.): Rüstungsaltpasten in Bayern. Online verfügbar unter <https://www.lfu.bayern.de/altlasten/ruestungsaltpasten/index.htm>, zuletzt geprüft am 17.10.2017.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2003): Kontaminierte Bausubstanz. Erkundung, Bewertung, Entsorgung. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Arbeitshilfe Kontrollierter Rückbau).

Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (Hg.) (2007): Leistungsbeschreibung für den Straßen- und Brückenbau in Bayern. LB StB-By.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit: Vollzug KrWG und GewAbfV; Leitfaden "Anforderung an die Verwertung von Recycling-Baustoffen".

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (2005a): Anforderung an die Verwertung von Recycling-Baustoffen in technischen Bauwerken.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (2005b): „Anforderungen an die Verwertung von Bauschutt in technischen Bauwerken“. RC-Leitfaden.

Benson, Ludger (2010): Anforderungen an die Eigenschaften von RC-Baustoffen und deren Überwachung; Angepasste Leistungsverzeichnisse. (Teil 1 und 2). Fachgespräche zum Einsatz von RC-Baustoffen im Straßenbau, 17.05.2010. Online verfügbar unter

https://lfu.rlp.de/fileadmin/lfu/Stoffstrommanagement/5_Benson.pdf, zuletzt geprüft am 05.10.2017.

Bertram, Heinz-Ulrich (2015): Dunkle Wolken oder Silberstreif am Horizont? Hg. v. altlasten spektrum. Online verfügbar unter https://www.altlastendigital.de/download/_sid/WGSX-672547-axsN/124033/alts_20150401.pdf, zuletzt geprüft am 27.07.2017.

DIN EN 206-1, 2017: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.

BEWO Engineering GmbH: Schüttguttabelle. Online verfügbar unter <http://www.bewo-engineering.de/schuettguttabelle/>, zuletzt geprüft am 22.09.2017.

BMUB; BMVg (2016): Arbeitshilfen Recycling. Arbeitshilfen zum Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie zum Einsatz von Recycling-Baustoffen auf Liegenschaften des Bundes. Online verfügbar unter <http://www.arbeitshilfen-recycling.de/AH-Recycling.pdf>, zuletzt geprüft am 01.08.2017.

Brandl, Heinz (1977): Ungebundene Tragschichten im Straßenbau. (Verdichtung, Kornverfeinerung, Frostbeständigkeit, Tragverhalten, Dimensionierung, Qualitätsanforderungen, Prüfung). In: *Straßenforschung* (67).

BBodSchV: Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbodschv/gesamt.pdf>.

Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung (Referentenentwurf).

Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. (Hg.) (2017): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014. Kreislaufwirtschaft Bau.

Bundesverwaltungsgericht, Urteil vom 15.10.2014, Aktenzeichen 7 C 1.13.

Bund-Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (2002): Vollzugshilfe zu § 12 BBodSchV. Vollzugshilfe zu den Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden (§ 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung).

Cardoso, Rafaela; Silva, Rui Vasco; Brito, Jorge de; Dhir, Ravindra (2016): Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. In: *Waste Management* (49), S. 131–145.

Dachroth, Wolfgang R. (2017): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. 4., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Germany: Springer Spektrum.

Dageförde, Angela; Meetz, Michael; Mettke, Angelika; Jacob, Steffen (2017): Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen. Leitfaden Ausschreibungen. Hg. v. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL).

Dechantsreiter, Ute; Horst, Peter; Mettke, Angelika; Asmus, Stefan; Schmidt, Stephanie; Knappe, Florian et al. (2015): Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Hg. v. Umweltbundesamt.

Deutscher Abbruchverband (2015): Abbrucharbeiten. Grundlagen, Planung, Durchführung. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Köln: R. Müller (Bauen im Bestand).

Ebenhöh GmbH & Co. Kies- und Sandwerke KG: Preisliste/Bedarfsrechner Kieswerke Ebenhö. Online verfügbar unter <http://www.kieswerke-ebenhoe.de/preisliste-bedarfsrechner.html>, zuletzt geprüft am 23.11.2017.

Ettengruber GmbH Grubenbetrieb (2017): Preisliste Gruben Ettengruber. Online verfügbar unter http://www.ettengruber.de/fileadmin/uploads/ettengruber/Preislisten/PL_Schiltberg_August17_ohne_RC-Baustoffe.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2017.

- Felber, Jörg (2008): Altlastenuntersuchung Phase IIa (Vorabzug). Bayern-Kaserne, Heide-
mannstraße 50, 80939 München. Hg. v. Staatliche Bauamt München 1. mplan eG.
- BBodSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung
von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz). Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/BBodSchG.pdf>.
- BImSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunrei-
nungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-
Immissionsschutzgesetz), zuletzt geprüft am 26.07.2017.
- KrWG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen
Bewirtschaftung von Abfällen. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf>, zuletzt geprüft am 03.07.2017.
- BayAbfG: Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Bewirtschaftung von Abfällen
in Bayern.
- DIN 277-1, 2016: Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen - Teil 1: Hochbau.
- Gutachterbüro Dipl.-Geol. Gernot Stracke: Ersatzbaustoffverordnung. Einleitung. Online
verfügbar unter <http://www.ebv-portal.de/index.php/tagungsinformationen.html>, zuletzt
geprüft am 27.07.2017.
- Habermann, Ulrich (2009): Neues Regelwerk Asphalt im Verkehrswegebau. TL Asphalt-StB
07, ZTV Asphalt-StB 07, TP Asphalt-StB 07. 4. Südhessisches Asphaltseminar. Kloster
Eberbach, 2009.
- Huber, Stefan (2017): 1. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt AZ-1135-14 "Substitution
von natürlichen mineralischen Baustoffen durch Ersatzbaustoffe im Erd- und Tiefbau".
Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau.
- ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (Hg.): Bauen mit RC-
Beton. Online verfügbar unter <http://www.rc-beton.de>, zuletzt geprüft am 28.07.2017.
- Knappe, Florian (2010): Der Einsatz von RC-Baustoffen aus Sicht des Ressourcenschutzes.
Fachgespräche zum Einsatz von RC-Baustoffen im Straßenbau, 17.05.2010. Online verfü-
bar unter https://lfu.rlp.de/fileadmin/lfu/Stoffstrommanagement/presentation_ifeu2.pdf,
zuletzt geprüft am 24.10.2017.
- Krass, Klaus; Brüggemann, Michael; Heyer, Dirk; Widlarz, Birgit (Hg.) (2006): Erfahrungen
mit Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Erdbauwerken. [Bericht zu
den Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 05.131 und 05.133/2002/MGB des Bundesmi-
nisteriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Beurteilung des Einsatzes ... mittels
Auswertung von Erfahrungen mit ausgeführten Bauprojekten]. Deutschland. Bremerhaven:
Wirtschaftsverl. NW Verl. für Neue Wiss (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstech-
nik, 932).
- Krass, Klaus; Kollar, Jan (Hg.) (2004): Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für
Tragschichten ohne Bindemittel. [Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
06.073/2000/FGB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen].
Deutschland. Bonn: DMB-Bundesdr (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik,
884).
- Verfüll-Leitfaden: Leitfaden "Verfüllung von Gruben, Brüchen und Tagebauen" zum Eck-
punkte-Papier "Anforderungen an die Verfüllung von Gruben und Brüchen".
- Martens, Hans (2011): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg:
Spektrum Akademischer Verlag.
- Martin Kölling (2017): Die Baustelle wird smart. In: *Handelsblatt*, 28.03.2017. Online verfü-
bar unter <http://www.handelsblatt.com/my/technik/it-internet/cebit2017/daten-drohnen-software-die-baustelle-wird-smart/19579782.html?ticket=ST-499385-JuCzCKtP1YuBuAiBqVHv-ap3>, zuletzt geprüft am 18.09.2017.

- Michel, Jürgen; Stöger, Regina (2017): Geotechnischer Untersuchungsbericht. (Voruntersuchung). Hg. v. Kommunalreferat Landeshauptstadt München. Mull & Partner Ingenieurgesellschaft mbH.
- Möbius, Hans-Ulrich (2006): Baufeldfreimachung und alles, was dazugehört. Von der Alten Messe München zum neuen Stadtviertel auf der Theresienhöhe. Hg. v. Diederichs + Möbius Umweltplanung GmbH VBI.
- Möbius, Hans-Ulrich (2017): Recyclingkonzeption für Mineralstoffe (Entwurf).
- Möbius, Hans-Ulrich; Dormuth, Gabriele (1997): Abfallkonzeption Neue Messe München. Vom Flughafengelände zum Messestandort. Unter Mitarbeit von Dormuth G. Hg. v. StMLU.
- Müller, Anette: Aufbereitung von Bauabfällen. Online verfügbar unter http://www.abw-recycling.de/Lehre/Skripte/Ausruestungen_4.pdf, zuletzt geprüft am 04.08.2017.
- Müller, Anette (2012): Das Sulfatproblem. RECYCLING magazin (22). Online verfügbar unter http://www.abw-recycling.de/art/publik/Veroeffentlichungen_2012/Das%20Sulfatproblem.pdf, zuletzt geprüft am 21.11.2017.
- Müller, Anette (2013): Das Rohstoffpotenzial von Bauabfällen. Construction and Demolition Waste – its potential as raw material.
- O'Mahony, Margaret M. (1997): An analysis of the shear strength of recycled aggregates. In: *Scientific Reports* (30), S. 599–606.
- Rahman, A.; Imteaz, M.; Arulrajah, A.; Disfani, M. M. (2014): Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials. In: *Journal of Cleaner Production* (66), S. 75–84.
- Schmidmeyer, Stefan (2017): Verbandsrichtlinien zur Anwendung und Güteüberwachung von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken in Bayern (und BW). Hg. v. Baustoff Recycling Bayern e.V.
- Süddeutsche Zeitung (26.04.2017): Osterweiterung. Online verfügbar unter www.sueddeutsche.de/muenchen/freimann-osterweiterung-1.3480008, zuletzt geprüft am 05.07.2017.
- TL Asphalt-StB 07/13: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen.
- TL Beton StB 07: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007, Änderung/Ergänzung 2014.
- TL SoB-StB 04/07: Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau.
- TL BuB E-StB 09: Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus, zuletzt geprüft am 26.07.2017.
- TL Gestein-StB 04/07: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, zuletzt geprüft am 27.07.2017.
- Toussaint, A. (1997): Zur Verwitterungsbeständigkeit von RC-Baustoffen. In: *Straße und Autobahn* (9), S. 497–501.
- DIN 1045-2, 2014: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206.
- DIN 18200, 2000: Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte – Werkseigene Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung von Produkten, zuletzt geprüft am 16.08.2017.
- Urban, F.; Blazevic, S. (2007): Bayern-Kaserne, Stab WBK VI/StKP VBK 65 Altlastenuntersuchung Phase I, Historische Recherche. Hg. v. Staatliches Bauamt München 1. mplan eG.

Urban, F.; Blazevic, S. (2010): Erweiterte Gebäudeschadstoffuntersuchung auf Organochlorpestizide (DDT). Bayernkaserne München. Hg. v. Staatliches Bauamt München 1. mplan eG.

4. BImSchV (2013): Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen.

DIN 1960, 2016: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil A: Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen.

DIN 18299, 2016: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art, zuletzt geprüft am 04.07.2017.

DIN 18300, 2016: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Erdarbeiten, zuletzt geprüft am 26.07.2017.

Weimann, Karin; Matyschik, Jan; Adam, Christian; Schulz, Tabea; Linß, Elske; Müller, Anette (2013): Optimierung des Rückbaus / Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials. sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4430.pdf>, zuletzt geprüft am 02.08.2017.

Wörrle, Jana Tashina (2017): Bauschutt: Deponien am Limit. So geht es mit der Mantelverordnung weiter. In: *Deutsche Handwerkszeitung*, 17.10.2017. Online verfügbar unter <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/bauschutt-zu-viel-landet-auf-den-deponien/150/3095/333528>, zuletzt geprüft am 23.11.2017.

ZTV SoB-StB 04: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau.

ZTV Beton-StB 07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton.

ZTV Asphalt-StB 07/13: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt.

ZTV E-StB 17: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau.

ZTV Stra Mü: Zusätzliche technische Vorschriften und Richtlinien für die Ausführung von Straßenbauarbeiten in München.

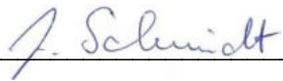
ZTV wwG-StB By 05: Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die einzuhaltenden wasserwirtschaftlichen Gütemerkmale bei der Verwendung von Recycling-Baustoffen im Straßenbau 2005, zuletzt geprüft am 28.07.2017.

ERKLÄRUNG ZUR MASTERARBEIT

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben sowie wörtliche und sinngemäße Zitate gekennzeichnet habe.

München, 01.12.2017

Ort, Datum



Julian Schmidt

Die

Landeshauptstadt
München

verleiht

Herrn

Julian Schmidt

den Preis für eine

herausragende universitäre
Abschlussarbeit

an der

Technischen Universität
München



Masterarbeit

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

„Recycling- und Verwertungskonzept für
mineralische Restmassen auf dem Gelände
der ehemaligen Bayernkaserne“

München, 3. Juli 2018

Dieter Reiter
Oberbürgermeister

INNOVATIV WISSENSCHAFTLICH PRAXISNAH

DA-INNOVATIONSPREIS 2019
FÜR STUDENTEN



URKUNDE

Herr Julian Schmidt

wird für seine Arbeit zum Thema

*Recycling- und Verwendungskonzept für mineralische
Restmassen auf dem Gelände der ehemaligen Bayernkaserne*

im Rahmen des DA-Innovationspreises vom Deutschen Abbruchverband mit

Platz 2

ausgezeichnet.

Köln, 25. Januar 2019


RA Andreas Pocha, Geschäftsführer