

Subway Infrastructure: Recycle and Reuse Flows in Refurbishment

Andreas Gassner, Jakob Lederer and Johann Fellner

The main objective of the paper at hand is to investigate material flows and stock changes of a subway infrastructure associated with its refurbishment. Specific attention is given to the relation between recycling, reuse, and primary raw material flows. Furthermore, the extent to which policy targets are achieved in a specific refurbishment process is investigated. Thereto the refurbishment of a subsection of Vienna's subway network was chosen as a case study. To fulfil the objective, a bottom up material flow analysis (MFA) of the refurbishment process on the subsection was performed. On the one hand, it is investigated which materials (in terms of mass and composition) were extracted from the network and on the other hand what kind of new materials were built-in. For the system boundary the refurbished subsection of the line U4 and the year 2016 were chosen. The materials were assigned to the three main categories mineral (e.g. gravel, stones, concrete, soil), organic (e.g. wood, plastics) and metals (e.g. iron and steel, aluminum, copper). For the investigation real inventory data from the public transport provider was used. Furthermore, the study calculated which amount of greenhouse gases were avoided by the use of recycling material and the reuse of building components. Results show that the overall material stock of the respective subsection (length of 3 500 m) is 360,000 tonnes. Since the amount of built-in material (155,000 tonnes) was considerably larger than the material removed (144,000 tonnes), the overall material stock increased by around 11,000 tonnes. The share of recycling material was significantly higher than the use of primary raw material. In total 39 percent virgin construction material, 15 percent recycling construction material, 41 percent on site-recycling construction material and 5 percent reuse construction components were utilized. The reuse of components and the recycling of construction materials saved a total of about 94,000 tonnes of primary raw materials, which finally resulted in the saving of greenhouse gas emissions of around 4,200 tonnes of CO₂-e.

Recycling und Wiederverwendung bei der Sanierung von Infrastruktureinrichtungen am Beispiel der U-Bahnlinie U4 in Wien

Andreas Gassner, Jakob Lederer und Johann Fellner

1.	Hintergrund.....	393
2.	Methode	394
2.1.	Beschreibung der Fallstudie.....	395
2.2.	Ökologische Bewertung des Einsatzes von Reuse und Recycling-Materialien	396
3.	Datenerhebung.....	397
3.1.	Materiallager.....	397
3.2.	Materialflüsse.....	399
4.	Ergebnisse	400
5.	Schlussfolgerungen	404
6.	Literatur.....	405

1. Hintergrund

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) hat in Wien eine Geschichte, die bis ins 19. Jahrhundert zurückreicht. Auch wenn sich das System grundlegend verändert hat, so erfüllen damals errichtete Trassen in adaptierter Form immer noch einen wichtigen Beitrag für das Verkehrsnetz von heute. Wichtige Streckenabschnitte der beiden U-Bahn Linien U4 und U6 basieren auf der von Otto Wagner geplant und erbauten Stadtbahn. Darunter fällt auch jener Teilabschnitt der Linie U4 welcher im Jahr 2016 umfangreich saniert und am Stand der Technik gebracht wurde. Die Sanierung trägt den Namen *NEU4* und stellt das Untersuchungsobjekt der vorliegenden Arbeit dar. Aufgrund der Tatsache, dass ressourcen- und umwelttechnische Fragestellungen auch bei Verkehrsnetzwerken zunehmend an Bedeutung gewinnen, nehmen sich verschiedene Autoren den Umweltauswirkungen von U-Bahn Netzwerken an (vergl. [6, 8, 12, 17, 18]). Die Primärdatenerhebung beschränkt sich in den meisten Arbeiten auf die

Bauphase und inkludiert nicht Sanierungs- und Wartungsarbeiten. Für diese Bereiche wird oft auf Datenbanken zurückgegriffen. Augiseau and Barles zeigen in ihrem Review Artikel über Lager und Materialflüsse von Baumaterialien auf, dass der Abriss und die Erneuerung von Netzwerken oftmals nicht detailliert behördlich überwacht werden und sich deshalb nicht in entsprechender Genauigkeit innerhalb öffentlicher Statistiken und Datenbanken widerspiegeln [2]. Jene Studien wiederum, welche explizit Sanierungstätigkeiten analysieren, haben meist ihren Fokus auf technische Herausforderungen (vergl. [19-20]); Materialflüsse und Lagerveränderungen werden dabei nicht berücksichtigt. Letztere sind allerdings aus Sicht der Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft, die sowohl auf Europäischer, Nationaler sowie Regionaler Ebene gefordert werden (vergl. [3, 7, 11]) von zentraler Bedeutung, da das Materiallager in Gebäuden- und Infrastruktur die massenmäßig wichtigste Quelle an Sekundärressourcen darstellt.

Ziel der Arbeit ist die Erhebung aller wesentlichen Materialströme und Lagerveränderungen welche sich durch die Sanierung eines Teilabschnittes der U4 ergeben (Abschnittslänge: 3,5 km). Besonderes Augenmerk wird dabei auf Reuse von Bauteilen und Recycling von Baumaterialien gelegt, da diese Aspekte im Bausektor durch politische Zielvorgaben (z.B. STEP 2025) und rechtliche Rahmenbedingungen (z.B. Recycling-Baustoff Verordnung 2016) stetig an Bedeutung gewinnen. Zusätzlich sollte ausgewertet werden, inwiefern sich Reuse von Bauteilen und der Einsatz von Recycling Materialien (RC-Baumaterial) auf Treibhausgasemissionen auswirken. Mit der Arbeit werden auch Fragestellungen in Bezug auf Materialzusammensetzung und Materialintensität von historischen Infrastrukturbauwerken des ÖPNVs adressiert. Im Konkreten wird dabei auf folgende Fragestellungen näher eingegangen: Welche Mengen an Baumaterialien werden im Zug der Sanierung neu im Abschnitt eingebaut und wie verändert sich damit das Lager und dessen Zusammensetzung? Welche Materialien werden eingebaut und inwiefern werden diese Materialien intern (auf der Baustelle) recycelt oder wiederverwendet oder andernfalls extern recycelt, verwertet bzw. entsorgt. Wie ist das Verhältnis zwischen eingebauten Primär- und Sekundärmaterialien?

2. Methode

Als Methode zu Beantwortung der gestellten Forschungsfragen wird eine bottom-up Materialflussanalyse (MFA) gewählt. Es handelt sich um eine analytische Methode welche breite Anwendung findet um Materialflüsse mit und innerhalb eines definierten Systems verstehen und beschreiben zu können. MFAs inkludieren Prozesse und Materialflüsse zwischen den Prozessen. Jeder Prozess welcher Materialien lagert, beinhaltet ein sogenanntes Materiallager. Das Lager verändert sich in Abhängigkeit von Zu- und Abflüssen aus dem Prozess [5]. In der vorliegenden Studie, ist der sanierte Teilabschnitt der U4 als System definiert. Alle Materialflüsse werden in Tonnen angegeben und die Daten beziehen sich auf ein Jahr (2016). Die Materialien werden in folgende drei Kategorien unterschieden: Mineralische Baustoffe, Organik und Metalle. Für die Analyse werden Unternehmensdaten des Betreibers (Wiener Linien GmbH & Co KG) verwendet.

In einem ersten Schritt wird das Materiallager der Infrastruktur vor der Sanierung berechnet. Dabei wird auf Literatur zurückgegriffen, speziell jene welche sich auf die Stadtbahn und dessen Umbau auf das U-Bahn System konzentrieren [17], [9, 13, 14, 21]. Ergänzt wird die Information mit Daten vom Betreiber (z.B. Bestandspläne, Regelquerschnitte). In einem zweiten Schritt wurden die Materialflüsse, welche im Zuge der Sanierung auftraten, analysiert. Die wesentlichen Datenquellen für die Berechnung der Materiallager und Materialflüsse sind Ausschreibungsunterlagen welche unter anderem folgende Unterlagen enthalten: Bestandspläne, Konstruktionspläne, technische Beschreibungen des Vorhabens, normierte Leistungsbeschreibungen und diverse Gutachten (wie Bodenchemische Gutachten und die grundlegende Charakterisierung). Die bei der Sanierung anfallenden Abfallströme werden dem Endbericht der abfallwirtschaftlichen Bauaufsicht entnommen. Durch Experteninterviews werden Daten ergänzt und verfeinert.

2.1. Beschreibung der Fallstudie

Insgesamt hat das U-Bahn Netz der Stadt Wien eine Länge von etwa 87 km inklusive Verschublinien. Im Jahr 2016 wurde ein Teilstück der Linie U4 saniert. Für die Sanierung wurde der Betrieb im Teilstück eingestellt. Das Teilstück hat eine Länge von 3.500 m und basiert auf die frühere *Stadtbahn* welche von Otto Wagner am Ende des

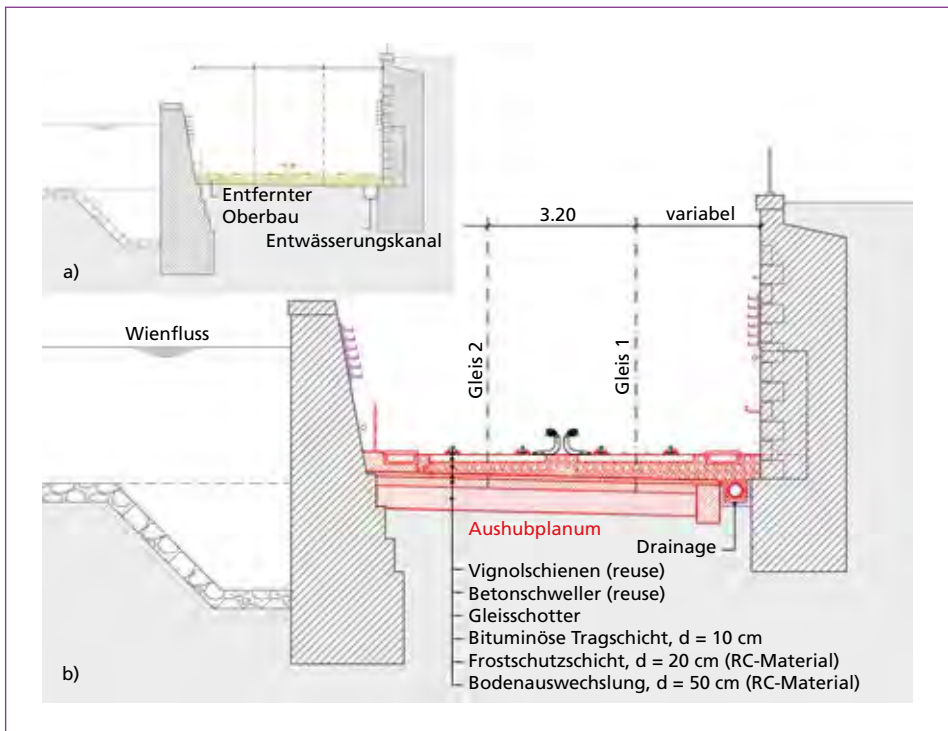


Bild 1: Regelquerschnitt freie Strecke vor (a) und nach (b) der Sanierung

19. Jahrhunderts geplant und gebaut wurde. Diese Infrastruktur wurde stetig gewartet und modifiziert, wobei im zweiten Weltkrieg Streckenabschnitte und Stationen erheblich beschädigt wurden. In den 1970er Jahren wurde dieser Abschnitt auf das U-Bahn System umgebaut [21]. Aufgrund von Mängel in der Feuchtigkeitsabdichtung und zur Erhöhung der Betriebssicherheit erfolgte im Jahr 2016 (rund vierzig Jahre nach dem Umbau der Stadtbahn auf die U-Bahnlinie U4) die Sanierung des genannten U-Bahn Abschnittes. Erhalten blieben bei der Sanierung konstruktive Bauelemente welche auf die Konstruktionen der Stadtbahn zurückreichen. Die wesentlichen Neuerungen auf freier Strecke sind in Bild 1 zusammengefasst. Hauptziele der Sanierung sind die Erhöhung der Zuverlässigkeit und der Betriebssicherheit. Folgende Maßnahmen werden durchgeführt: Sanierung des Unterbaues, Sanierung des Oberbaues, Einbau zusätzlicher Gleisverbindungen für den Gleiswechselbetrieb im 7,5 min-Intervall; Gewölbensanierung der Rampe Hütteldorf, Sanierung von Bahnsteigkanten, Sanierung von Stiegen Anlagen, Sanierung bestehender und Errichtung neuer Betriebsräume, Adaptierung der Wendeanlage Hietzing, Modernisierung der Zugsicherungsanlage, Modernisierung der Traktionsanlagen.

2.2. Ökologische Bewertung des Einsatzes von Reuse und Recycling Materialien

Der Ressourceneinsatz und die Lagerveränderungen sind der Hauptfokus dieser Arbeit, darüber hinaus soll ein Überblick gegeben werden welche Treibhausgasemissionseinsparungen sich durch den Einsatz von RC-Material und dem Reuse von Bauteilen ergeben. Für die Bewertung wird das Treibhausgaspotential (GWP) der durch den Einsatz von Sekundärmaterial vermiedenen Primärressourcen sowie der vermieteten Abfallbehandlung berechnet. Als Maß für die Treibhausgaswirkung pro Tonne vermiedenes Primärmaterial wird das Treibhausgaspotential (GWP) in CO₂-Äquivalenten (kg CO₂-e) angewendet. In diesem Bewertungsindikator werden treibhauswirksame Emissionen in CO₂-Äquivalenten umgerechnet, sprich deren Treibhauspotential und Verweildauer wird auf jene von CO₂ normiert [15].

Es wird angenommen, dass die äquivalente Menge an Primärressourcen notwendig wäre, würden nicht Sekundärmaterialien zum Einsatz kommen, daher werden die GWP-Emissionen der vermiedenen Primärressourcen berechnet und als *Vermeidung* gewertet. Zusätzlich wird für jene Materialkategorien welche deponiert oder aufbereitet werden müssten wenn diese nicht an der Baustelle wiedereingesetzt werden würden, die GWP-Emissionen der Abfallbehandlung errechnet und hinzugezählt. Die spezifischen Emissionswerte werden von der Datenbank Ökobaudat entnommen und sind in Tabelle 1 angeführt. Nicht berücksichtigt werden potentiell vermiedene Emissionen durch kürzere Transportwege, da auch auf der Baustelle Transportvorgänge notwendig sind und keine gesicherten Daten über eingesparte Transportleistungen zur Verfügung stehen.

Tabelle 1: Spezifische Emissionen je Materialkategorie in CO₂-Äquivalente (CO₂-e)

Reuse und Recycling Materialien	Herangezogene Materialkategorie der Ökobaudat Datenbank	Emissionswerte
		kg CO ₂ -e je Tonne Material
Reuse Betonschweller	Beton C50/60	139,5
Reuse Stahl	Stahlprofil	1.039,0
Reuse Steinzeug	Steinzeug Fliesen glasiert	318,7
Reuse Naturstein	Natursteinplatte, hart, Außenbereich	27,9
RC-Material (intern, Gleisschotter)	Schotter 16/32	15,8
RC-Material (extern, Asphaltbruch)	Splitt 2/15 abzüglich Bauschuttzubereitung (brechen)	13,0
Abfallvermeidung Betonschweller	Bauschuttzubereitung	2,7
Abfallvermeidung RC-Material (intern, Gleisschotter); Steinzeug; Naturstein	Inertstoffdeponierung	16,1

Quelle: <http://www.oekobaudat.de/>

3. Datenerhebung

3.1. Materiallager

Als Ausgangsbasis für den Vergleich des Materiallagers vor und nach der Sanierung wird das ursprüngliche Materiallager des Systems erhoben. Das Materiallager kann in folgende Teilbereiche eingeteilt werden: Freie Strecke, Stationen sowie dem Gewölbe. Die verwendeten Datenquellen und Berechnungsmethoden der jeweiligen Teilbereiche werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Freie Strecke

Die baulichen Konstruktionen des untersuchten Streckenabschnittes auf freier Strecke wurden in ihren Grundzügen bereits in den 1890iger Jahren errichtet. Der Hauptbestandteil der Konstruktion umfasst eine nördliche und eine südliche Natursteinmauer (Bild 1). Die nördliche Mauer grenzt den Gleiskörper vom Flussbett des Wienflusses ab. Durch Abflussklappen mit Rückstausicherung wird der Gleiskörper durch Durchlässe in dieser Mauer entwässert. Die südliche Natursteinmauer dient als Abgrenzung zur parallel verlaufenden Straße Hietzinger Kai. Das Flussbett liegt über weite Strecken unterhalb des Gleiskörpers sowie an manchen Stellen auf annähernd gleicher Höhe. Das Straßenniveau liegt zwischen 5 m und 8 m über dem des Gleiskörpers. Im Zuge der Sanierung wurden beide Abgrenzungswände in Form und Funktion erhalten. Für die Berechnung des Materiallagers vor der Sanierung, werden die unterschiedlichen Regelquerschnitte des Streckenabschnittes berücksichtigt. Für die vorherrschenden Regelquerschnitte werden die verbauten Volumina errechnet und mit den spezifischen Materialintensitäten multipliziert. Somit kann das Materiallager je angewendetem

Regelquerschnitt errechnet werden und unter Berücksichtigung der Länge der jeweiligen Streckenabschnitte werden die verbauten Gesamtmassen ermittelt. Die Auswertung dazu ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Der spezifische Aufbau des Oberbaus wird nicht berücksichtigt, da dieser vollkommen ausgetauscht wurde und deshalb im Detail in den Materialfüßen abgebildet wird (siehe Kapitel 3.2.). Für die Berechnung des gesamten Materiallagers werden die ausgebauten Materialien hinzugezählt. Aus diesem Grund sind in der Darstellung in Tabelle 1 nur mineralische Materialien inkludiert. Metalle und Organik sind in den Mauern nicht in signifikanten Mengen verbaut.

Tabelle 2: Spezifische Materialmenge je Regelquerschnitt – eigene Berechnungen anhand von Bestandsplänen

Regelquerschnitt je Streckenabschnitt	Nordwand	Südwand	Spezifische Materialmenge	Gesamt- länge	Lager
	m ² /m	m ² /m	t/m	m	t
Freie Strecke 1 (km 10,7 – km 11,1)	15	7	55	419	22.800
Freie Strecke 2 (km 11,1 – km 14,2)	14	14	71	1.682	119.000
Freie Strecke inkl. Rettungsnische (km 11,1 – km 14,2)	14	12	64	368	23.600
Stationsbereich	12	11	98	770	75.100
Umkehranlage	14	14	71	261	18.500

Stationen

Um das Materiallager der Stationen im untersuchten Bereich zu erheben, wird zuerst der Bruttorauminhalt (BRI) von allen Gebäuden mithilfe der Konstruktionspläne errechnet. Der errechnete BRI je Gebäude wird anschließend mit der spezifischen Materialzusammensetzung (in t/m³), welche die unterschiedlichen Baujahre der Gebäude berücksichtigt, multipliziert. Die spezifischen Materialzusammensetzung wird von [16] übernommen. Es wird die Gebäudekategorie *industrial* herangezogen, da diese am besten mit der verbauten Gebäudestruktur übereinstimmt. Die berechneten BRI je Gebäude sowie die angenommenen spezifischen Materialzusammensetzungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Bruttorauminhalt (BRI) je Gebäude (eigene Kalkulation) sowie spezifische Materialzusammensetzung

Gebäude	Bauperiode	BRI	Mineralik	Organik	Metalle	Lager
		m ³	t/m ³	t/m ³	t/m ³	t
Ober St. Veit – Umspannwerk (Gebäude)	1977-1996	4.222	170	1	15	760
Ober St. Veit (Westen)	-1918	2.761	280	5,8	8,8	800
Ober St. Veit (Osten)	1977-1996	1.624	170	1	15	290
Unter St. Veit	1977-1996	3.372	170	1	15	610
Braunschweigasse (Westen)	1977-1996	3.175	170	1	15	570
Braunschweigasse (Osten)	1977-1996	3.528	170	1	15	640
Hietzing Stationsgebäude	1946-1976	9.131	340	7,6	13	3.170

adaptiert nach: Kleemann, F.; Lederer, J.; Rechberger, H.; Fellner, J.: GIS-based Analysis of Vienna's Material Stock in Buildings. J. Ind. Ecol., Vol. 0, No. 0, S. 1-13, 2016

Neben dem Materiallager der Bauwerke werden auch die verbauten Materialien für die Überdachungen der Bahnsteige errechnet und zu dieser Kategorie hinzugezählt. Das standardmäßig an diesen Bahnsteigen verwendete Dach hat ein spezifisches Gewicht von etwa 7,8 kg Metall pro m² Dachfläche. Insgesamt beträgt die Gesamtdachfläche 4.165 m². Für ein Vordach bei der Station Hietzing wurden etwa 1.400 Tonnen an Beton verbaut.

Gewölbe

Über eine Länge von etwa 100 m wird die Strecke über ein Gewölbe geführt, welches bereits in den 1890iger Jahren errichtet wurde. Es handelt sich insgesamt um zehn Bögen. Diese sind seitlich geschlossen und werden von Mietern für unterschiedliche Zwecke (z.B. Lagerräume und Werkstätten) genutzt. Durch die mehr als 100-jährige Belastung wurde die Feuchtigkeitsabdeckung beschädigt, weshalb eine umfangreiche Sanierung inkl. neuer Feuchtigkeitsabdeckung notwendig wurde. Das Gewölbe verläuft ansteigend, es startet unterhalb des Straßenniveaus und überragt dieses am höchsten Punkt um etwa 3 m. Der Bruttorauminhalt des Bauwerks errechnet sich auf etwa 6.100 m³. Als spezifische Materialzusammensetzung werden Werte von [16] herangezogen, der Anteil an Mineralik wurde nach oben adaptiert, da das Bauwerk sehr massiv ausgeführt ist. Es wird pro BRI 530 kg Mineralik, 3,7 kg Organik und 4,3 kg Metalle angenommen. Für eine Stahlbrücke mit einer Länge von insgesamt 17,6 m, welche das Bauwerk unterbricht wurden etwa 100 Tonnen Metall errechnet.

3.2. Materialflüsse

Um die Materialflüsse welche im Zuge der Sanierungsmaßnahmen auftreten erheben und evaluieren zu können ist eine Wissens- und Datenbasis über die geplanten Sanierungsmaßnahmen erforderlich. Die notwendigen Daten finden sich weitgehend in den Ausschreibungsunterlagen. Diese enthalten neben einer detaillierten Beschreibung des jeweiligen Bauvorhabens auch die entsprechenden Konstruktionspläne. Folgende Daten sind in den Ausschreibungsunterlagen unter anderem enthalten: detaillierte Konstruktionspläne, Übersichtspläne, Bestandspläne, Materialspezifikationen, grundlegende Charakterisierung und technische Beschreibungen. Basierend auf dieser Datengrundlage wurden Experten befragt sowie Datenlücke durch Literaturdaten ergänzt. Da die Ausschreibungsunterlagen vor dem Baubeginn erstellt werden, sind speziell Daten hinsichtlich des Abfallaufkommens mit Unsicherheiten behaftet. Die Abfallflüsse werden deshalb anhand des extern überprüften Abfallkonzeptes der Baustelle ausgewertet, womit es sich um tatsächlich angefallene Mengen handelt.

Die Materialflüsse wurden in folgende konstruktive Elemente aufgeteilt: Unterbau, Oberbau und Bauwerke. Mit der Prozessbezeichnung *Bauwerke* werden alle Renovierungen und Erweiterungen von Hochbauten sowie die Sanierung des Gewölbes zusammengefasst. Der Prozess *Lagerplatz* umfasst die Lagerung und Aufbereitung von Bauteilen und Baumaterialien, welche am selben Streckenabschnitt wiedereingesetzt werden.

Die Materialflüsse der eingebauten Materialien wurden anhand der Leistungsbeschreibung der Ausschreibungsunterlagen errechnet. Dabei wurden nur jene Positionen berücksichtigt, welche zu einem signifikanten Materialinput führen. Nicht berücksichtigt, wurden Dienstleistungen, wie beispielsweise die Endreinigung der Baustelle welche ebenfalls in den Leistungsbeschreibungen inkludiert sind. Für viele Baumaterialien sind in der normierten Leistungsbeschreibung die Materialmengen bereits in Materialmassen (z.B. m^3 Beton, oder kg Stahlbewehrung) angegeben. Für andere Positionen wiederum sind keine Massen, sondern beispielsweise Stückzahlen (z.B. Bahnschweller) oder Leistungseinheiten (z.B. m^2 Bodenbelag) angegeben. In diesen Fällen wird die verbaute Materialmasse anhand von technischen Datenblättern der Produkte sowie anhand von Literaturangaben berechnet.

Die Output Flüsse werden anhand der von der Baustelle gemeldeten Abfalldaten erhoben. Seit 2011 besteht für größere Bauvorhaben eine Verpflichtung zur Erstellung eines Abfallkonzeptes [22]. Dieses wird im Zuge der Bauphase durch eine externe Stelle überprüft und die gemeldeten Abfallmengen dokumentiert. Diese Daten werden verwendet um die Abfallmengen zu bestimmen. Weiteres gibt es eine Dokumentation zum Einsatz von Recyclingbaumaterial. Dieses Recyclingmaterial kommt einerseits von externen Baustellen (z.B. Asphaltbruch) und andererseits von an der Baustelle aufbereitetem Material (z.B. Gleisschotter). Jene Bauteile welche ausgebaut, gelagert und in der gleichen Funktion wiederverwendet werden sollten, sind bereits in der den Leistungsbeschreibungen dementsprechend angeführt und werden in der Materialbilanz berücksichtigt.

4. Ergebnisse

Die Materialflüsse und Lagerveränderungen sind in Bild 2 aggregiert dargestellt. Das System ist in drei Prozesse unterteilt. Der *Bauabschnitt* umfasst das gesamte Linienbauwerk inklusive Stationen und dem Gewölbe. Im Prozess *Lagerplatz* werden die Aufbereitung von Abbruchmaterial zu Recyclingbaumaterial und die Lagerung von Bauteilen für den späteren Wiedereinbau erfasst. Im Prozess *Abfallwirtschaft* wird die Sammlung und Trennung der anfallenden Abfälle zusammengefasst. Das Materiallager des Teilabschnittes beträgt insgesamt ~ 360.000 Tonnen wovon etwa dreiviertel unverändert im System verbleiben. Der Anteil an mineralischen Baumaterialien ist am höchsten (97 Prozent), gefolgt von etwa 3 Prozent Metallen und < 1 Prozent Organik. Insgesamt wurden etwa 83.000 Tonnen Baumaterial von außen in das System eingebracht und etwa 145.000 Tonnen Material wurden abgebrochen und einer Verwertung oder Entsorgung zugeführt, von diesen wurden rund 70.000 Tonnen wieder im sanierten Streckenabschnitt eingebaut. Das Materiallager hat sich dadurch um ~ 11.000 Tonnen erhöht. Dies entspricht einem Anstieg von rund 3 t/m. Der massenmäßige Anteil an Sekundärmaterial ist höher als jener von Primärmaterial. Anteilsmäßig verteilen sich die eingebauten Materialien auf 39 Prozent Primärmaterialien, 15 Prozent Sekundärbaumaterialien aus externen Quellen und 41 Prozent Recyclingmaterialien von der Baustelle. Hinzu kommen, auf die Gesamtmasse bezogen, 5 Prozent an wiederverwendeten Bauteilen (z.B. Schwellen, Schienen, Geländer und historische Bauteile wie Fliesen).

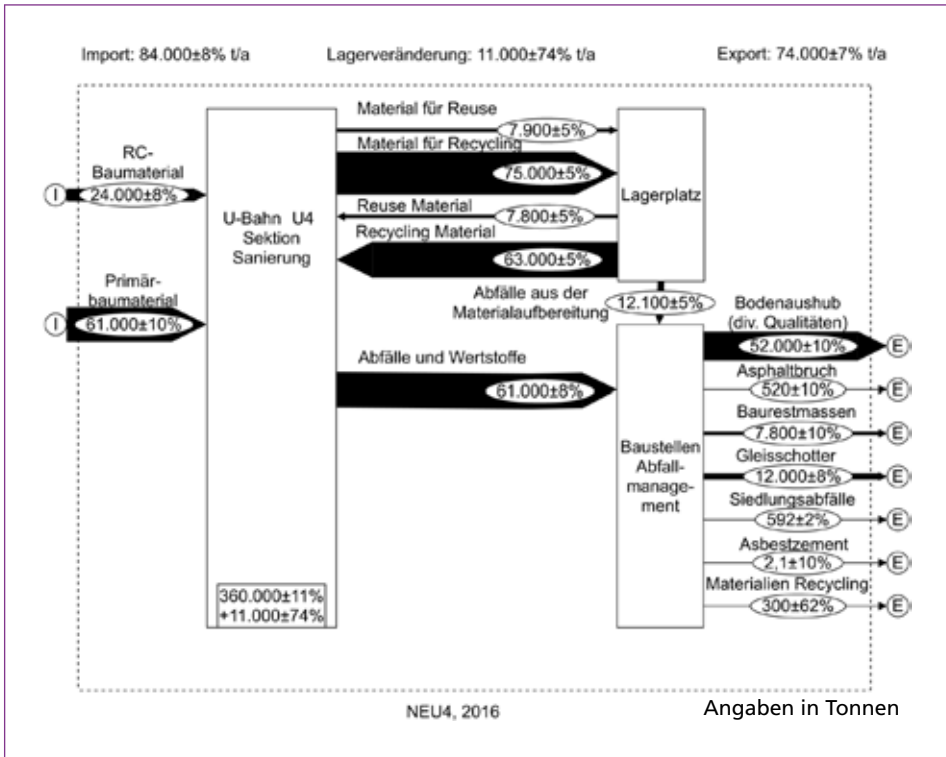


Bild 2: Aggregierte Materialflüsse und Lagerveränderungen des Sanierungsprojektes NEU4

Bei der Untersuchung der Inputflüsse wurden insgesamt 22 Materialkategorien erfasst, welche in signifikanter Menge in das Sanierungsobjekt ein- bzw. ausgebaut wurden. Die verbauten Materialien und deren Einbauort sind in Bild 3 ersichtlich. Hinsichtlich der Materialmasse entfällt der Hauptteil des eingebauten Materials auf Schotter (57 Prozent), Beton (30 Prozent) und auf Asphalt mit einem Anteil von etwa 11 Prozent. Alle drei Materialien sind der Kategorie Mineralik zuzuordnen. Im gesamten Abschnitt wurden etwa 400 Tonnen Metalle neu verbaut, welche sich zu 73 Prozent auf Eisen/Stahl, 16 Prozent auf Kupfer, 10 Prozent auf Aluminium und < 1 Prozent auf andere Metalle aufteilen. Hinsichtlich Masse sind Metalle im Allgemeinen mit einem Anteil von weniger als 1 Prozent jedoch vernachlässigbar, nicht jedoch für den Materialwert.

Der größte Anteil an Primärmaterial wurde im Bereich Unterbau (53 Prozent), gefolgt vom Oberbau (36 Prozent) und in Hochbauten (11 Prozent) eingesetzt. Werden auch jene Materialien berücksichtigt welche an der Baustelle recycelt werden konnten, sowie jene Bauteile welche wieder für dieselbe Funktion wiederverwendet wurden, so verschieben sich die Anteile der verbauten Primärmaterialien folgendermaßen: 69 Prozent Unterbau, 24 Prozent Oberbau und 7 Prozent Hochbauten.

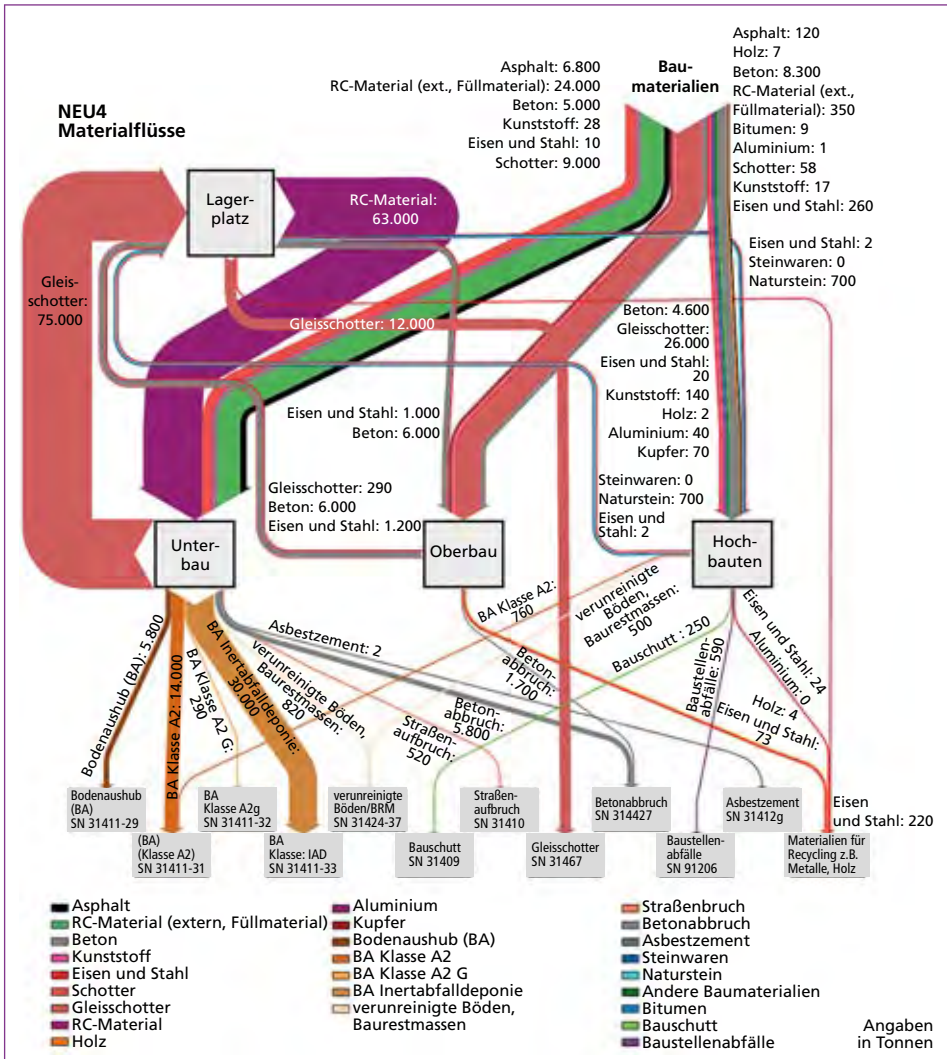


Bild 3: Aggregierte Materialflüsse der Sanierung des Teilabschnittes der U-Bahnlinie U4, System NEU4, 2016

Vermiedene Treibhausgasemissionen (GWP) durch den Einsatz von Reuse und RC-Materialien

Im Zuge der Sanierung wurden Materialien mit einer Gesamtmasse von etwa 155.000 Tonnen verbaut, dies entspricht etwa 44 t/m Gleiskörper. Der Anteil an Recyclingmaterial war dabei signifikant höher als jener von Primärmaterialien. 63.000 Tonnen des auszubauenden Gleiskörpermaterials (hauptsächlich Gleisschotter) wurden mit Asphaltbruch (von einem externen Straßensanierungsprojekt) vermengt und für den Aufbau des Unterbaus als Füllmaterial und Frostschuttschicht verdichtet eingebaut. Diese beiden Materialkategorien entsprechen etwa 55 Prozent des gesamten Materialeinsatzes.

Neben dem Recycling von Baumaterialien wurden auch Bauteile wiederverwendet. Diese Bauteile wurden zerstörungsfrei ausgebaut, am Lagerplatz gelagert und anschließend wieder in das Linienbauwerk in derselben Funktion eingebaut. Dies ist besonders hervorzuheben, da dies nach der Abfallhierarchie der am höchsten anzustrebenden Stufe, der Abfallvermeidung, entspricht [11]. Insgesamt wurden Bauteile in einem Ausmaß von etwa 7.600 Tonnen wiederverwendet. Der größte Anteil entfiel dabei auf die Wiederverwendung von Betonbahnschwellen inklusive der Bahngleise. In Summe wurden dadurch rund 6.000 Tonnen von Betonfertigteilen und 700 Tonnen an Stahl wiederverwendet. Weitere Bauteile wie beispielsweise Stromschienen und Geländer konnten ebenfalls wiedereingesetzt werden, wodurch insgesamt 954 Tonnen Stahl wiederverwendet wurden. Da die Stationen teilweise unter Denkmalschutz stehen, wurden auch historische Bauteile wie Fliesen (0,3 Tonnen; < 1 Prozent) vorsichtig ausgebaut und nach der Sanierung wieder eingebaut. Auch im Bereich des Gewölbes wurden aus diesem Grund Bauteile aus Naturstein im Ausmaß von etwa 700 Tonnen (9 Prozent) wiederverwendet.

Durch die Wiederverwendung von Bauteilen und dem Recycling von Baumaterialien konnten insgesamt etwa 94.000 Tonnen Primärrohstoffe eingespart werden, wodurch rund 3.100 Tonnen CO₂-e vermieden wurden. Durch den Wiedereinsatz von Baumaterialien konnte der Anfall von Baurestmassen deutlich reduziert werden. Dadurch wird einerseits Deponievolumen eingespart und andererseits Treibhausgasemissionen im Ausmaß von etwa 1.100 Tonnen CO₂-e vermieden. Somit konnten durch Reuse von Bauteilen und RC-Baumaterialien insgesamt ein Emissionsausstoß von etwa 4.200 Tonnen CO₂-e vermieden werden. In Bild 4 werden die vermiedenen Emissionen in Abhängigkeit der Materialkategorie getrennt ausgewiesen. Da potentiell kürzere Transportwege durch die Verwendung von an der Baustelle anfallenden Recyclingmaterialien nicht berücksichtigt wurden, kann jedenfalls davon ausgegangen werden, dass die berechneten Einsparungen am unteren Ende der Spanne angesiedelt sind und die tatsächlich vermiedenen Treibhausgasemissionen höher sind.

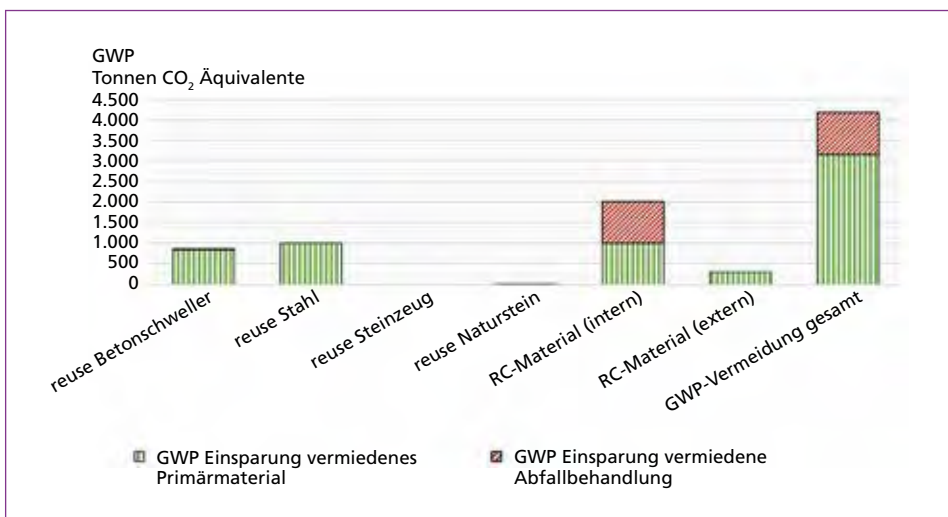


Bild 4: Vermiedene Treibhausgasemissionen (GWP) je Materialkategorie

5. Schlussfolgerungen

In der untersuchten Fallstudie werden politische Vorgaben wie jene aus dem STEP 2025 *Ressourcenschonung werden zum zentralen Kriterium für Bauvorhaben und Projekte* [7, S. 24] aufgegriffen. Mit einem Anteil von 15 Prozent externem Sekundärbaumaterial, 41 Prozent Recyclingbaumaterial von der Baustelle sowie einem massenmäßigen Anteil von 5 Prozent an wiederverwendeten Bauteilen, wird dem Aktionsplan für Circular Economy [10] entsprochen. Durch den Einbau von Sekundärmaterialien kann der im internationalen Vergleich hohe Verbrauch an mineralischen Rohstoffen in Österreich (Ö: 22 Tonnen per Capita – Welt: 10 Tonnen per Capita) langfristig reduziert werden [4]. Die Studie hat auch gezeigt, dass dadurch nicht nur Primärressourcen eingespart werden können, sondern darüber hinaus auch Treibhausgasemissionen und Deponievolumen eingespart werden.

Wenngleich es sich bei der U4 um einen Einzelfall mit einer besonderen historischen Bausubstanz handelt, wirft die Fallstudie jedenfalls Fragen bezüglich üblicherweise angenommener Nutzungsdauern in ökologischen Bewertungen von Schieneninfrastrukturbauwerken auf. So wird in [6] eine Nutzungsdauer von 80 Jahren für Stationen und 50 Jahren für Betonteile angenommen; in [1] sind 100 Jahre für Tunnelwände und 60 für die Tunnelbasis angegeben; wohingegen in [18] von einer Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgegangen wird. Die Streuung innerhalb der Annahmen ist groß. Im Fall des untersuchten Abschnittes der U4 haben wesentliche konstruktive Bauelemente, wie beispielsweise die Stützmauern und das Gewölbe bereits eine Nutzung von etwa 120 Jahren hinter sich und werden auch zukünftig in Verwendung bleiben. Mehr als 75 Prozent der verbauten Baumaterialien behalten auch nach der Renovierung dieselbe Funktion. Dies bedeutet, dass bisherige Studien die Umweltauswirkungen der schieneengebundenen Infrastruktur tendenziell überbewerten, da zu kurze Lebensdauern angenommen wurden.

Durch die detaillierte Untersuchung der Input- und Output-Flüsse konnte gezeigt werden, dass sich das Materiallager vergrößert und an Komplexität zugenommen hat. Die Output-Flüsse bestehen zum Großteil aus historischem Schüttmaterial und somit aus Bodenaushub unterschiedlicher Qualitätsklassen. Beim Bau dieses Abschnittes vor mehr als 100 Jahren, wurden jene Materialien als Schüttungen verwendet, welche in unmittelbarer Nähe zur Verfügung standen. Die Schichtung ist dadurch nicht einheitlich und konnte im Vorfeld nur teilweise und unter großem Prüfaufwand vorhergesagt werden. Solche historischen Aufbauten sind immer mit einem gewissen Risiko behaftet Kontaminationen zu enthalten, welche entweder von Anfang an mit eingebaut oder in der Nutzungsphase eingebracht worden sind. Im untersuchten Abschnitt traten keine maßgeblichen Verunreinigungen (Ausnahmen: 2 Tonnen Asbestzement) auf, welche nicht bereits bei der grundlegenden Charakterisierung identifiziert werden konnten. Nichtsdestotrotz sind der Aufbau des Gleiskörpers nach der Sanierung einheitlich in der Schichtung und somit die Datenlage für zukünftige Wartungs- und Sanierungstätigkeiten vollständig. Die Materialintensität und Komplexität hat im untersuchten Streckenabschnitt zugenommen, dies trifft vor allem auf die freie Strecke und hier im Speziellen auf den Unterbau zu. Der Oberbau wurde im Zuge des Umbaus von

der Stadtbahn auf die U-Bahn in den 1970er Jahren erneuert und laufend gewartet, damals wurde der Unterbau jedoch nicht ausgetauscht. Der Unterbau hat somit eine mehr als 100-jährige Geschichte und entsprach speziell hinsichtlich Feuchtigkeits- und Frostschutzschicht nicht dem heutigen Stand der Technik (Bild 1). Wohingegen im Bereich der Hochbauten die Materialkomplexität vorwiegend unverändert blieb, da mehrheitlich Bauteile aus denselben Materialien verbaut wurden.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist Teil einer groß angelegten Forschungsinitiative zu anthropogenen Ressourcen (Christian-Doppler-Labor für Anthropogene Ressourcen). Für die finanzielle Unterstützung dieser Forschungsinitiative wird dem österreichischen Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung und der Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie den Wiener Linien GmbH & Co KG gedankt.

6. Literatur

- [1] Anderson, J. E.; Wulforst, G.; Lang, W.: Expanding the use of life-cycle assessment to capture induced impacts in the built environment. *Build. Environ.*, Vol. 94, 2015, S. 403-416
- [2] Augiseau, V.; Barles, S.: Studying construction materials flows and stock. A review. In: *Resour. Conserv. Recycl.*, Vol. 123, Aug. 2017, S. 153-164
- [3] BMLFUW: Recycling-Baustoffverordnung – RBV. Vienna, 2016, p. BGBl. II Nr. 290/2016
- [4] BMLFUW und BMWFV: Ressourcennutzung in Österreich (Engl.: The use of resources in Austria) Vienna, 2015
- [5] Brunner, P. H.; Rechberger, H.: Handbook of material flow analysis: for environmental, resource, and waste engineer. London, New York: Boca Raton, Taylor & Francis, CRC Press, 2016
- [6] Chester, M. V.; Horvath, A.: Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. In: *Environ. Res. Lett.*, Vol. 4, no. 2, 2009, S. 24008
- [7] City of Vienna, STEP 2025: urban development plan Vienna. In: *true urban spirit*. Vienna, 2014
- [8] de Andrade, C. E. S.; D'Agosto, M. de A.: Energy use and carbon dioxide emissions assessment in the lifecycle of passenger rail systems: the case of the Rio de Janeiro Metro. *J. Clean. Prod.*, Vol. 126, 2016, S. 526-536
- [9] Duniecki; Gantar; Geiger; Holzbauer; Ladstätter; Koči; Machatschek; Marschalek; Schermann; Schlaw; Wehdorn; Schlöss: Die Wiener Stadtbahn und ihr Umbau zur U- und S-Bahn (Eng. Vienna's Stadtbahn and it's conversion to Subway and light rail). Vienna: Ingenieurkammer für Wien, Niederösterreich u. Burgenland, 1991
- [10] European Commission: Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. 2015
- [11] European Parliament and of the Council, Directive 2008/98/EC. 2008
- [12] Gassner, A.; Lederer, J.; Kanitschar, G.; Ossberger, M.; Fellner, J.: Extended ecological footprint for different modes of urban public transport: The case of Vienna, Austria. *Land use policy*, Vol. 72, no. December 2017, 2018, S. 85-99
- [13] Gerlich, R.; Wiener U-Bahn: ein Jahrhundertprojekt (Engl. Vienna's subway: a century project). Vienna: GEWISTA-Werbeges. In Zusammenarbeit mit dem Magistrat d. Stadt Wien u. dem Verlag f. Jugend und Volk, 1980

- [14] Hinkel, W.: Die 1. Ausbaustufe der Wiener U-Bahn (Engl.: The 1st expansion stage of Vienna's Subway Network). Vienna: Jugend und Volk Verlagsgesellschaft m.b.H., 1982
- [15] IPCC: Climate Change 2001: The Scientific Basis. New York, 2001
- [16] Kleemann, F.; Lederer, J.; Rechberger, H.; Fellner, J.: GIS-based Analysis of Vienna's Material Stock in Buildings. J. Ind. Ecol., Vol. 0, No. 0, 2016, S. 1-13
- [17] Lederer, J.; Kleemann, F.; Ossberger, M.; Rechberger, H.; Fellner, J.: Prospecting and Exploring Anthropogenic Resource Deposits: The Case Study of Vienna's Subway Network. J. Ind. Ecol., Vol. 0, No. 0, 2016
- [18] Li, Y.; He, Q.; Luo, X.; Zhang, Z.; Dong, L.: Calculation of life-cycle greenhouse gas emissions of urban rail transit systems: A case study of Shanghai Metro. Resour. Conserv. Recycl., Vol. 128, 2016, S. 451-457
- [19] Petr, V.; Jaroslav, Š.: Prague subway – Refurbishment and maintenance of older lines. Tunn. Undergr. Sp. Technol., Vol. 21, No. 3-4, May 2006, S. 327
- [20] Posgay, G. J.: Renaissance of the oldest underground line on the European continent. Tunn. Undergr. Sp. Technol., Vol. 11, No. 3, Jul. 1996, S. 271-278
- [21] Schöss, E.: Die Wiener Stadtbahn (Engl.: Vienna's Stadbahn). Vienna: Magistrat der Stadt Wien, MA 19 – Stadtgestaltung, 1987
- [22] Wiener Landtag, Wiener Abfallwirtschaftsgesetz – Wr. AWG. Wien, 2010, S. 1-26

Ansprechpartner



Dipl.-Ing. Andreas Gassner

Technische Universität Wien

Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement

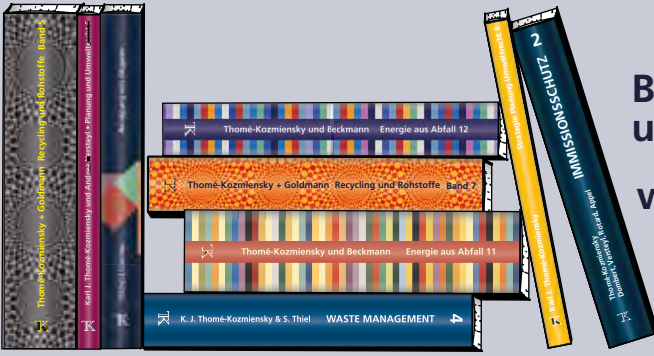
Christian Doppler Labor für Anthropogene Ressourcen

Karlsplatz 13/226

1040 Wien (A)

Telefon: 0043-1-5880122662

E-Mail: andreas.gassner@tuwien.ac.at



Besuchen Sie uns unter

www.

vivis.de

Wir widmen uns aktuellen verfahrens- und anlagentechnischen sowie politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Themen, soweit sie die Abfall- und Kreislaufwirtschaft und die Energie- und Rohstoffwirtschaft betreffen. Unsere Aufgabe sehen wir in der Kommunikation zwischen Politik, Verwaltung, Wirtschaft, Technik und Wissenschaft.

Zu wichtigen Themen veranstalten wir Konferenzen und Congresses – dazu geben wir Bücher heraus.

Stets sind wir auf der Suche nach interessanten Referenten, aktuellen Themen und spannenden Projekten um unser Angebot weiterzuentwickeln. Gern lassen wir uns von neuen Ideen inspirieren und diskutieren deren Realisierbarkeit.



Wir geben seit vierzig Jahren Fachbücher zu zahlreichen Themen des technischen Umweltschutzes heraus:

- Thermische Abfallbehandlung & energetische Verwertung
- Dokumentation von Abfallverbrennungsanlagen
- MBA & Ersatzbrennstoffe
- Recycling & Rohstoffe
- Mineralische Nebenprodukte & Abfälle
- Strategie & Umweltrecht
- Immissionsschutz
- Biologische Abfallbehandlung...

Unsere Konferenzen im Überblick:

- Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz
- Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz
- Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle
- IRRC – Waste-to-Energy
- NEU: Berliner Klärschlammkonferenz (ab 2018)



Insgesamt sind bislang bei uns etwa zweitausend Fachbeiträge erschienen, die in ihrer Gesamtheit einen guten Überblick über technische, wirtschaftliche, rechtliche und politische Entwicklungen geben. Seit Kurzem stellen wir Ihnen einen großen Teil der Fachbeiträge kostenlos auf unserer Internetseite zur Verfügung.

TK Verlag GmbH
vivis

Dorfstraße 51
D-16816 Nietwerder-Neuruppin
Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10
E-Mail: tkverlag@vivis.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,
Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-41-1 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Sandra Peters,
Ginette Teske, Roland Richter, Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.