

Innovative Landfilling and Recycling of Mineral Wool Waste as Backfill Material, in the Cement Industry and in the Mineral Wool Industry

Daniel Vollprecht, Theresa Sattler, Klaus Doschek-Held, Robert Galler, Julia Schimek, Thomas Kasper, Johannes Daul and Roland Pomberger

Synthetic mineral fibres (SMF), which were produced before 1998 in Austria [20] or before 2005 in the EU, may be carcinogenic due to their respirable fibre geometry and their low biosolubility. They accrue from demolition of buildings as wastes. SMF must be packed in bags and landfilled at asbestos compartments of construction and demolition waste landfills. Due to their unfavourable landfill mechanical properties (bad compactability, elastic behaviour) disposal of SMF on landfills constitutes a problem. The project RecyMin follows a multi-step aim:

- 1) further development of existing concepts for conditioning SMF for landfilling by comminution and agglomeration,
- 2) further development of existing concepts to develop a backfill material from SMF for underground mining,
- 3) development of a concept to use SMF as substitute raw material and/or clinker additive in the cement industry, and
- 4) development of a concept to recycle SMF in the stone/glass wool industry.

In this paper we present the first results of our research project which focus on mechanical processing, i.e. comminution by shredders in lab and full scale, and briquetting in lab scale, which represent possible first process steps towards optimised landfilling as well as recycling. These results indicate that briquetting at a pressure of 7,200 bar can increase the density from the common range of 20 to 200 kg/m³ (stone wool) or 13 to 100 kg/m³ (glass wool) to the range of 1,800 to 2,300 kg/m³. Uniaxial compression strength of the briquettes was between 0.2 and 15.8 MPa, depending on the kind of briquetting agent used. Furthermore, the fibrous character of the material is mainly destroyed as fibres are broken into shorter to isometric particles.

Innovative Deponierung sowie Recycling von Mineralwolleabfällen im Bergversatz, in der Zement- und in der Mineralwolleindustrie

Daniel Vollprecht, Theresa Sattler, Klaus Doschek-Held, Robert Galler, Julia Schimek, Thomas Kasper, Johannes Daul und Roland Pomberger

1.	Abfallwirtschaftliche Erhebung.....	484
2.	Aufbereitung von KMF-Abfällen	485
3.	Innovative Deponierung	487
4.	Entwicklung von Versatzprodukten aus Mineralwolleabfällen	488
5.	Einsatz von Mineralwolleabfällen in der Zementindustrie	488
6.	Recycling von Mineralwolleabfällen.....	489
7.	Ökologisch-ökonomische Gesamtbewertung	490
8.	Zusammenfassung und Ausblick.....	490
9.	Quellen	490

Künstlich hergestellte anorganische amorphe (glasige) Fasern [10], kurz *künstliche Mineralfasern* (KMF), werden durch Blas- und Schleuderverfahren aus silikatischen Schmelzen hergestellt [5] und lassen sich in mehrere Untergruppen gliedern, unter denen die Mineralwollen als Dämmstoffe im Bauwesen die größte Verbreitung aufweisen. Mineralwolle wird im Bauwesen als thermische und akustische Isolierung, teilweise auch für Hochtemperaturanwendungen [16], sowie für den Brandschutz eingesetzt [23]. Mineralwolle kann in Form von gepressten Matten oder in loser Form eingesetzt werden [26] und ist auch in Form vorgefertigter Rohre mit KMF-Auskleidung erhältlich [11]. Als Binder wird meist Phenolformaldehyd (< 10 Ma.-%) eingesetzt; hinzu kommen Schmierstoffe (< 1 Ma.-%) und ggf. Metallfolien oder andere Substrate [23].

Der Stand der Technik zur abfallwirtschaftlichen Bedeutung von Mineralwollen einschließlich vorhandener Hindernisse und ökonomischer Betrachtungen werden in einer europäischen Übersichtsstudie zusammengefasst [30]. Die Autoren schätzen, dass in der EU jährlich etwa 2,5 Millionen Tonnen Mineralwolleabfälle anfallen, wobei sie auf das Problem der lückenhaften Datenlage aufmerksam machen. Unter der Annahme, dass 0,2 % aller Baurestmassen Mineralwollen sind [30], ergibt sich für Österreich aus dem Gesamtjahresaufkommen von 10 Millionen Tonnen Baurestmassen ein jährlicher

Anfall von 20.000 Tonnen Mineralwolleabfällen, von denen etwa 70 % als Steinwolle und etwa 30 % als Glaswolle anfallen [12], während Schlackenwolle einen unbedeutenden Anteil darstellt [23].

Der geringe mengenmäßige Anteil von Mineralwollen an den Baurestmassen [6] und die Veränderung der Eigenschaften während der Einsatzphase [29] lassen Mineralwolleabfälle zunächst als uninteressant für ein Recycling erscheinen, die geringe Dichte von nur etwa 80 kg/m^3 [7] sowie die deponietechnisch problematischen Eigenschaften (geringe Verdichtbarkeit und Volumenbeständigkeit) verdeutlichen jedoch die abfallwirtschaftliche Notwendigkeit eines Recyclings künstlicher Mineralfasern. Dieses ist jedoch aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit, technischer Probleme wie unzureichender Reinheit der bei Rückbaumaßnahmen von Gebäuden anfallenden Mineralwollen sowie gesundheitlicher Aspekte international stark eingeschränkt [30] und in Österreich praktisch nicht vorhanden. In Deutschland gibt es hingegen bereits ein patentiertes Verfahren zur Erzeugung von Versatzprodukten aus künstlichen Mineralfasern [14].

Künstliche Mineralfasern, die vor 1996 in Österreich oder vor 2005 in der EU hergestellt wurden, können aufgrund ihrer lungengängigen Fasergeometrie und ihrer geringen Biolöslichkeit krebserregend sein [20]. Die Europäische Union unterscheidet in ihrer CLP-Verordnung [13] zwischen *bekanntermaßen karzinogenen* Stoffen (Kategorie 1A), *wahrscheinlich karzinogenen* Stoffen (Kategorie 1B) und *vermutlich karzinogenen* Stoffen (Kategorie 2). Die Zuweisung von KMF in diese Kategorien erfolgt in Österreich über die Fasergeometrie und biologische Tests. Dabei werden solche Mineralfasern als kritisch bewertet, die eine Länge von über $5 \mu\text{m}$, einen Durchmesser kleiner $3 \mu\text{m}$ und ein Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis, welches größer als 3:1 ist, aufweisen [1, 2]. Die Geometrie allein ist ein notwendiger, aber kein hinreichender Faktor zur gesundheitlichen Beurteilung von KMF, da auch die Biolöslichkeit betrachtet werden muss [21]. Da die Löslichkeit durch die chemische Zusammensetzung bestimmt wird, ist interessant, dass diese stark schwankt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Schwankungsbreiten der chemischen Zusammensetzung von Mineralwollen, modifiziert nach Väntsi et al. (2014)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃
Ma.-%											
40–57	3–17	0–3	1–10	0–5	< 1	10–37	1–15	0–2	1–13	0–2	0–6

Quelle: Väntsi, O.; Kärki, T.: Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2014, Bd. 16, S. 62–72, modifiziert

Die Biolöslichkeit kann laut BIA-Report mittels Tierversuchen (In-vivo-Tests) ermittelt oder durch Laugungsversuche in simulierten Lungenfluiden (In-vitro-Tests) abgeschätzt werden [24]. Die deutsche Gefahrstoffverordnung [8] und die Technische Regel für Gefahrstoffe 905 [1] legen fest, dass künstliche Mineralfasern mit einem Gehalt ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO}$) $> 18 \text{ Ma.-%}$ hergestellt und verwendet werden

können, wenn entweder ein Intraperitonealtest keine Anzeichen von übermäßiger Kanzerogenität ergibt oder die Halbwertszeit nach intratrachealer Instillation höchstens 40 Tage beträgt oder der Kanzerogenitätsindex ($KI = Na_2O + K_2O + B_2O_3 + CaO + MgO + BaO - 2 Al_2O_3$) größer als 40 ist. Neben der Fasergeometrie in Verbindung mit unzureichender Biolöslichkeit, stellt der Einsatz von Harnstoff-Phenol-Formaldehyd-basierten Bindemitteln [3] ein gesundheitliches Problem dar, während die Gehalte an pathogenen Keimen in feuchtigkeitsgeschädigten Mineralwollen eher gering sind [18].

Das Wissen, dass neue KMF freigezeichnet wurden, ist abfallwirtschaftlich nur beschränkt hilfreich, da hinsichtlich des Herstellungsjahres der im Rückbau von alten Gebäuden anfallenden KMF häufig keine genaue Zuordnung getroffen werden kann, so dass diese als gefährliche Abfälle einzustufen sind [31].

Bei allen Verwertungspfaden für künstliche Mineralfasern stellen die mangelnde Reinheit und schwankende Verfügbarkeit und Qualität sowie die hohen Transportkosten die wesentlichen Herausforderungen dar. Aus diesen Gründen entspricht die Deponierung der Mineralfasern dem derzeitigen Stand der Technik in Österreich. Dabei müssen diese in Säcke verpackt und auf Asbestkompartimenten von Baurestmassendeponien abgelagert werden. Aufgrund der ungünstigen deponietechnischen Eigenschaften (schlechte Verdichtbarkeit, elastisches Verhalten) ist die Ablagerung von KMF auf Deponien jedoch problematisch. In jüngster Zeit hat hier die Wurzer Umwelt GmbH eine mobile KMF-Ballenpresse entwickelt, mit der das Volumen signifikant reduziert werden kann [32].

Das Projekt RecyMin verfolgt daher folgende Ziele:

- 1) Grundlagenorientierte Entwicklung eines Konzepts zur Konditionierung von KMF für die Deponierung durch nass- sowie trockenmechanische Aufbereitung,
- 2) grundlagenorientierte Untersuchungen zur Entwicklung eines Versatzproduktes aus KMF für den untertägigen Bergbau,
- 3) grundlagenorientierte Entwicklung eines Konzepts zum Einsatz von KMF als Ersatzrohstoff in der Zementindustrie und
- 4) grundlagenorientierte Entwicklung eines Konzepts zur Rückführung von KMF in die Mineralwolleindustrie.

Das Projekt RecyMin verfolgt einen grundlagenorientierten Forschungsansatz, bei dem aufbauend auf dem Projektmanagement (AP 1) und einer abfallwirtschaftlichen Erhebung (AP 2) durch eine Kombination abfallwirtschaftlicher, verfahrenstechnischer und materialwissenschaftlicher Methoden ein Gesamtkonzept zur überwiegenden Verwertung künstlicher Mineralfasern entwickelt wird, welches nach einer entsprechenden Aufbereitung (AP 3) in Abhängigkeit von den logistischen, wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen eine innovative Deponierung (AP 4), eine Verwertung im Bergversatz (AP 5), in der Zementindustrie (AP 6) und eine Kreislaufführung in die Mineralwolleindustrie (AP 7) vorsieht und diese unter ökologischen, gesundheitlichen und ökonomischen Gesichtspunkten zusammenfassend bewertet (AP 8) (Bild 1)

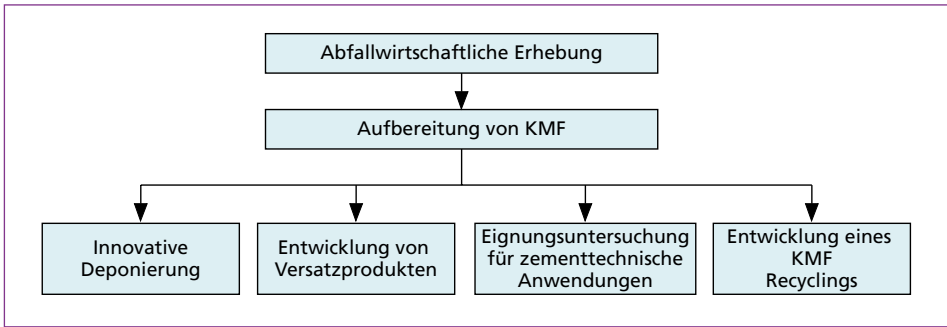


Bild 1: Schema des Projekts RecyMin

1. Abfallwirtschaftliche Erhebung

Im Bereich der abfallwirtschaftlichen Erhebung (AP 2) soll die Herausforderung des schwankenden und unbekanntenen Recycling- und Gefährdungspotentials von Mineralwolleabfällen durch eine Verfahrenskombination von abfallwirtschaftlicher Stoffflussanalyse, abfallchemischer, abfallmineralogischer und morphologischer Materialcharakterisierung im Labor und grundlagenorientierter Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung des Kanzerogenitätsindex mittels Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) für Anwendungen auf der Baustelle gelöst werden.

In einer ersten Versuchsreihe wurden sowohl KMF-Abfälle unbekannter Herkunft aus dem Baubereich als auch ein neues Steinwoll-Produkt untersucht. Bei ersterem handelte es sich um lagige Matten von Mineralwolleabfällen mit geringer Dichte, hoher Kompressibilität, signifikanter Feuchtigkeit und unregelmäßig verteilten Verunreinigungen (Bild 2), bei letzterem um ein handelsübliches Material aus einem österreichischen Baumarkt.



Bild 2:

KMF-Abfälle unbekannter Herkunft im Projekt RecyMin

Zunächst wurden rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (ZEISS EVO 10, BRUKER EDX Detektor, 15,01 kV, Arbeitsabstand 7,5 bis 9,5 mm) am Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre der Montanuniversität Leoben durchgeführt. Dabei wurden an 22 Messpunkten des alten und an fünf Messpunkten des neuen Produkts die Gehalte an Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO und K_2O bestimmt und auf 100 Ma.-% normiert.

Die KMF-Abfälle unbekannter Herkunft enthalten Fasern mit Durchmessern von etwa 1 bis 10 μm und Längen von mehreren mm. Somit handelt es sich bei einigen, aber nicht bei allen Fasern um WHO-Fasern mit einem Durchmesser von unter 3 μm . Die untersuchten KMF-Abfälle weisen 16 ± 3 Ma.-% Na_2O , $9,0 \pm 2,4$ Ma.-% CaO , $2,9 \pm 1,2$ Ma.-% MgO und weniger als 1 % K_2O auf, so dass die Summe aller Alkali- und Erdalkalimetalle deutlich über 18 Ma.-% liegt (Einstufung als *Verdacht auf karzinogene Wirkung*, Kategorie 2, aber nicht als *wahrscheinlich karzinogen*, Kategorie 1) und damit die Grundvoraussetzung für eine Freizeichnung über Tierversuche gegeben wäre. Der Kanzerogenitätsindex der untersuchten KMF-Abfälle liegt mit 24 ± 4 deutlich unter dem Schwellenwert von 40, das heißt, er ermöglicht keine Freizeichnung gemäß der Gefahrstoffverordnung [8], welche aber über In-vivo-Tests dennoch möglich wäre.

Das neue Produkt weist ähnliche Fasergeometrien wie die KMF-Abfälle auf. Jedoch war es bei ähnlichen K_2O -Gehalten mit $1,8 \pm 0,4$ Masse% deutlich Na_2O -ärmer, dafür mit $8,6 \pm 0,5$ Ma.-% MgO und 21 ± 1 Ma.-% CaO reicher an diesen Oxiden, wobei die Summe der Erdalkali- und Alkalioxide und damit die Einstufung nach CLP-Verordnung in einem ähnlichen Bereich liegt wie im Fall der alten KMF. Aufgrund der hohen Al-Gehalte ist der Kanzerogenitätsindex des neuen KMF-Produkts mit -8 ± 2 sogar negativ, so dass auch hier die Freizeichnung wohl über In-vivo-Tests erfolgt ist.

2. Aufbereitung von KMF-Abfällen

Ziel der Aufbereitung der KMF-Abfälle (AP 3) ist es, die ungünstigen deponie- und recyclingtechnischen sowie gesundheitsrelevanten Eigenschaften der KMF-Abfälle zu verbessern. Hierzu muss zuerst der Faserverbund gelöst werden, wozu schneidende und reißende Zerkleinerungsaggregate eingesetzt werden. Um den Zerkleinerungsaufwand zu minimieren, wird zunächst eine Grobzerkleinerung erprobt, an die direkt ein Agglomerationsprozess (Brikkettierung) anschließt. Dadurch kann zum einen eine bessere Verdichtbarkeit für die Deponierung, aber auch eine höhere Druckfestigkeit für die Zuführung in Aggregate zur Zement- oder Mineralwolleerzeugung erzielt werden.

In einer ersten Versuchsreihe wurden die KMF-Abfälle sowie das neue Produkt (Steinwolle) zerkleinert, wobei zunächst ein handelsüblicher Papierschredder modifiziert wurde, um die Funktion eines Doppelwellenzerkleinerers nachzuahmen. Vor der Zerkleinerung wurden die KMF-Abfälle händisch in rechteckige Stücke von in etwa einer Größe von $10 \times 5 \times 3$ cm (L \times B \times H) zerpfückt. Die Zerkleinerung erfolgte in Form von Streifen, wobei durch Wiederholung des Prozesses drei Zerkleinerungsgrade erzeugt wurden. Anschließend wurde die Schüttgutdichte der unterschiedlichen Zerkleinerungsgrade der Mineralwolle bestimmt.

Durch das mehrmalige Zerkleinern konnte eine signifikante Erhöhung der Schüttgutedichte festgestellt werden. Diese wurde von 22 kg/m^3 bei einfacher Zerkleinerung auf 40 kg/m^3 bei dreifacher Zerkleinerung erhöht. Zudem war mit fortschreitender Zerkleinerung eine Agglomeration beobachtbar. Je mehr Zerkleinerungsschritte durchgeführt wurden, desto kleiner wurden die Agglomerate. Diese kleineren Agglomerate wiesen jedoch eine höhere Dichte auf. Anschließend erfolgten Zerkleinerungsversuche im Technikumsmaßstab mit einem Doppelwellenzerkleinerer bei der Firma ATM Recyclingsystems. Die zerkleinerten Materialien, die zudem mit unterschiedlichen Anteilen (5 bis 25 %) Bindemitteln (Carboxymethylcellulose, Melasse, Maisstärke, Calciumaluminatzement) versetzt wurden, sowie unbehandeltes Referenzmaterial wurden bei einem Pressdruck von 3.500 sowie 7.200 bar zu Briketts mit einem Durchmesser von 50 und 70 mm und variabler Höhe verarbeitet.

Durch das Verdichten im Zuge des Brikettiervorgangs wurde ein überaus großer Teil der Restfeuchte des Mineralwolleabfalls ausgepresst, es ergab sich ein Masseverlust von bis zu 30 %. Die Dichte der Briketts der alten KMF konnte bei einer Presskraft von 7.200 bar auf etwa 1.800 bis 2.100 kg/m^3 erhöht werden, jene der neuen KMF sogar auf etwa 1.900 bis 2.300 kg/m^3 . Die Homogenität der Briketts schwankte in Abhängigkeit vom Bindemittel (Bild 3). Die Brikettierung ist zudem mit einem



Bild 3: Briketts (erzeugt bei 7.200 bar) eines neuen Steinwolle-Produkts mit Carboxymethylcellulose (links) und Melasse (rechts)

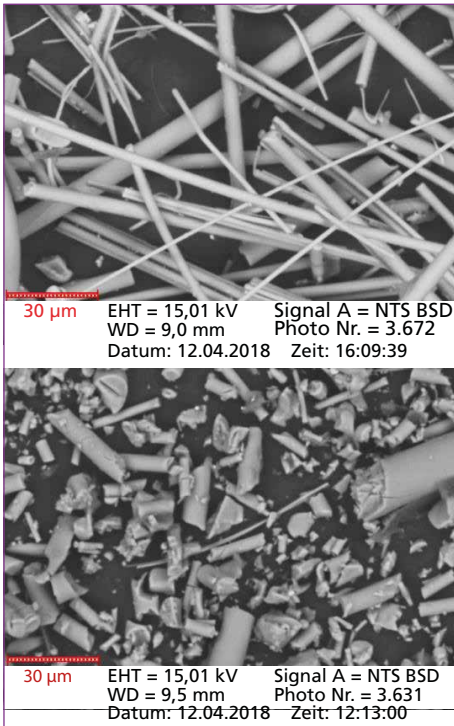


Bild 4: Dreifach zerkleinerte (oben) und brikettierte (unten) Mineralwolleabfälle (Sekundärelektronenbilder des Rasterelektronenmikroskops)

Bruch der Fasern in kürzere, zum Teil isometrische Partikel verbunden (Bild 4).

Aufbauend auf diesen Labor- und Technikkumsversuchen wurden durch die PORR Umwelttechnik GmbH großtechnische Versuche zur Zerkleinerung von Mineralwolleabfällen aus dem Abbruch sowie von reinen Produktionsabfällen mit einem langsam laufenden sowie einem schnell laufenden Schredder durchgeführt. Die Versuche mit dem Langsamläufer zeigten, dass eine dreimalige Wiederholung des Zerkleinerungsprozesses nötig ist, um eine Korngröße von 5 bis 10 cm zu erreichen. Dieses vorzerkleinerte Material konnte dann mit dem Schnellläufer mit einem einzigen Durchgang auf eine Korngröße von 1,5 bis 2 cm zerkleinert werden. Die Staubemission beim Versuch mit dem Schnellläufer war zudem geringer als beim Langsamläufer. Aufgrund dieser guten Erfahrungen mit dem Schnellläufer wurden die Mineralwolleabfälle aus dem Abbruch einstufig mit diesem Aggregat auf eine Korngröße von 5 bis 10 cm zerkleinert.

3. Innovative Deponierung

Nicht kanzerogene KMF ermöglichen eine sichere Deponierung (AP 4) oder Verwertung (AP 5) in Form monolithischer Körper, wobei die hohe Festigkeit und Elastizität der KMF positive mechanische Eigenschaften darstellen. Die geringe Dichte und Verdichtbarkeit wird durch die in AP 3 entwickelten Aufbereitungsverfahren verbessert, wobei dem Arbeitsschutz stets höchste Beachtung zukommt, weshalb die Österreichische Staub- (Silikose-) Bekämpfungsstelle (ÖSBS) in das Projekt eingebunden ist. Im Hinblick auf die Deponierbarkeit werden die erzeugten Briketts aufbauend auf der in AP 3 durchgeführten grundlegenden Charakterisierung speziellen deponietechnischen Tests unterzogen, welche das Verhalten während und nach der Ablagerung vorhersagen können. In ersten Untersuchungen im Projekt RecyMin wurde die einaxiale Druckfestigkeit (UCS) der zuvor erzeugten Briketts des neuen KMF-Produkts überprüft. Die Druckfestigkeit der Melasse-gebundenen Briketts lag je nach Bindemittelanteil (5 bis 10 %) im Bereich von 0,2 bis 0,4 MPa, bei Carboxymethylcellulose (5 bis 10 %) zwischen 0,4 und 1,5 MPa und bei Calciumaluminatzement (3 bis 25 %) zwischen 1 und 16 MPa, wobei auch für gleiche Rezepturen erhebliche Schwankungen auftraten.

4. Entwicklung von Versatzprodukten aus Mineralwolleabfällen

Eine weitere alternative Einsatzmöglichkeit bietet sich bei der Verwendung als Bergversatz [17]. In Deutschland gibt es hier bereits ein patentiertes Verfahren [14], während in Österreich noch keine Versatzprodukte aus KMF-Abfällen erzeugt werden. Die Entwicklung von Versatzprodukten für den untertägigen Bergbau (AP 5) im Projekt RecyMin erfolgt grundlagenorientiert unter Wahrung allfälliger Schutzrechte Dritter. Dabei werden im Labor Versuche zur einaxialen und triaxialen Druckfestigkeit, auch im zeitlichen Versuch als Funktion der aufbereitungstechnischen Parameter (Zerkleinerungszeit und -art, Brikettierdruck und -zeit) sowie der Art und Menge der zugesetzten Bindemittel, durchgeführt. Es wird geprüft, ob bestehende Verfahren [14] zur Erzeugung von Produkten für den Pumpversatz auch in Österreich angewandt werden könnten und unter welchen rechtlichen Rahmenbedingungen.

5. Einsatz von Mineralwolleabfällen in der Zementindustrie

Neben der Rückführung in die Mineralwollerzeugung existieren alternative Verwertungsmöglichkeiten für Mineralwollen, z.B. in Kombination mit illitischen Tönen für die Herstellung von Keramiken [27], zusammen mit Holz in Spanplatten [22] oder anstelle frischer Mineralfasern über eine Dispergierung in kaltem Wasser unter Zugabe von Füllstoffen und Bindemitteln in der Produktion von Deckenfliesen [11]. Ein zentrales Feld stellt dabei die Verwertung als grobe oder feine Gesteinskörnung, hydraulisch wirksames Material oder ultrafeiner Füllstoff in der Betonindustrie dar, wobei der Einsatz als grobe Gesteinskörnung zu einer verbesserten Druck- und Zugfestigkeit, Absorptionsfähigkeit, Widerstandsfähigkeit und Chloridbeständigkeit führt und die Rissausbreitung hemmt [9] sowie die Härte von derartigen Verbunden erhöht [28]. Zum Erreichen einer puzzolanischen Aktivität ist eine Aufmahlung auf $< 75 \mu\text{m}$ erforderlich [9].

Im Projekt RecyMin wird als alternatives Einsatzfeld die Verwertung in der Zementindustrie untersucht. Dort besteht grundsätzlich die Möglichkeit zum Einsatz als Ersatzrohstoff in der Klinkerherstellung (Fall A) oder als sog. Zumahlstoff in der Vermahlung des Klinkers zu Zement (Fall B). Im Fall A könnte Mineralwolle aus chemisch-mineralogischer Sicht natürliche Rohstoffe wie Kalkstein ersetzen und dabei zur Reduktion von CO_2 -Emissionen beitragen. Andere chemische Komponenten wie Silizium oder Eisen werden als Korrekturstoffe zur Einstellung der Qualitätskriterien dem Rohmehl beigemischt. Aus mechanischer und prozesstechnischer Sicht stellt Mineralwolle eine Herausforderung an die Mahl- und Homogenisierungsprozesse dar. Aufgrund der Prozessführung im System Rohmühle – Wärmetauscher – Drehrohr-ofen ist auf die Gleichmäßigkeit der Materialien, geringe Belastung durch Organik und Stimmigkeit in den Chemismus der sonstigen Rohmaterialien zu achten. Im Fall B gelten ähnliche Anforderungen, jedoch findet hier kein Hochtemperaturprozess statt, stattdessen werden die Komponenten im Mahlprozess sehr fein vermahlen und gemischt, wobei mit den Komponenten die Abbindeigenschaften des Zementes (Zeitverlauf, Früh- und Endfestigkeit) eingestellt werden können.

Ziel des Projekts RecyMin ist hier die Verbesserung der mechanischen Handhabbarkeit des Materials. Dabei gilt es, die geringe Dichte und die Kompressibilität so zu beherrschen, dass das Material weitestgehend automatisch und emissionsfrei kontrolliert eingebracht werden kann.

6. Recycling von Mineralwolleabfällen

Theoretisch stellt die Rückführung in die Mineralwolleindustrie im Sinne der Kreislaufwirtschaft die perfekte Lösung dar, da die gefährdungsrelevante Morphologie und Chemie im Schmelz- und Erstarrungsprozess modifiziert werden können. Ein Problem dabei ist jedoch, dass der unmittelbare Einsatz von KMF-Abfällen aufgrund des hohen Feinanteils zu einer Verstopfung der Zufuhr von Luft und Sauerstoff führen können [4], dem durch eine Brikettierung unter Einsatz eines Bindemittels vorgebeugt werden kann. Obwohl mehrere Studien diese Verfahrensrouten untersucht haben [4, 15, 25], werden ausschließlich Produktionsabfälle verwertet [31], da die chemische Zusammensetzung hierfür bekannt sein muss [23], was sie bei Baurestmassen nicht ist. Bei einem der vorgeschlagenen Brikettierungsverfahren [25], bei dem hydraulische Bindemittel wie Portlandzement, Ton und Wasserglas eingesetzt wurden, nahm die Druckfestigkeit der Briketts beim Erhitzen auf 500 °C ab, so dass die entstehenden Bruchstücke die Zufuhr von Luft und Gasen verstopfte, was zu einem ungleichmäßigen Aufschmelzen des Materials führte. Die Erhöhung des SiO₂-Gehalts des Bindemittels auf > 75 % und Aufmahlung des Bindemittels auf eine Korngröße von < 100 µm lieferte Briketts mit einer Festigkeit von 5,9 N/mm² [15]. Ein interessanter Ansatz zur Verbesserung der Energieeffizienz des Recyclingprozesses ist die Absenkung des Schmelzpunktes durch Verwendung von Bindemitteln mit geringen Schmelztemperaturen wie einem Gemisch aus Illit, Dolomit und Zement [4]. Im Rahmen des EU-Forschungsprogramms LIFE wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem ohne Brikettierung KMF-Abfälle mit einer Korngröße zwischen 0 und 6 mm direkt in den Kuppelofen injiziert werden und eine Substitutionsrate von 10 % erreicht werden konnte, wobei bei einer Substitutionsrate von 5 % eine Kokseinsparung von mehr als 10 % erzielt wurde [19]. Trotz dieser Verfahrensmöglichkeiten erfolgt in Österreich kein Recycling von künstlichen Mineralfasern, da die Hersteller nur eigene Produkte zurücknehmen und diese Information beim Abbruch von Gebäuden meist nicht bekannt ist.

Im Projekt RecyMin werden im Fall der Rückführung in die Mineralwolleindustrie (AP 7) die Auswirkungen auf die verfahrenstechnisch relevanten Eigenschaften der Schmelze sowie auf die Qualität der Produkte im Hinblick auf die thermischen und akustischen Eigenschaften untersucht. Die in der Literatur beschriebene Herausforderung der inhomogenen Temperaturverteilung beim Einsatz unbehandelter KMF-Abfälle wird durch ein speziell entwickeltes Brikettierverfahren für das Rohgut gelöst, in dem die zur Kompensation des Chemismus angewandten Additive als Bindemittel eingesetzt werden.

7. Ökologisch-ökonomische Gesamtbewertung

Abschließend werden die Auswirkungen der vorgeschlagenen Prozesse auf abfallwirtschaftliche Systeme mittels einer ökologisch-ökonomischen Gesamtbewertung untersucht und im abfallwirtschaftlichen Kontext zusammengefasst (AP 8). Dieser Ansatz liefert die Projektergebnisse in Form einer Bewertung einer optimierten Entsorgungsrouten (Deponierung) und drei Verwertungsrouten (Bergversatz, Zement, KMF-Produktion).

8. Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt RecyMin ist ein von der FFG gefördertes, grundlagenorientiertes Forschungsprojekt zur innovativen Deponierung sowie zum Recycling von Mineralwolleabfällen als Versatzprodukt sowie in der Zement- und Mineralwolleindustrie.

Erste Ergebnisse zeigen, dass eine Zerkleinerung und Brikettierung von Mineralwolleabfällen mit Bindemitteln eine sinnvolle Vorbehandlung für die weitere Behandlung sein können. Bei der weiteren Arbeit im Projekt müssen neben technischen, wirtschaftlichen und arbeitsmedizinischen Aspekten auch die in Deutschland bereits am Markt verfügbaren Technologien [14, 32] berücksichtigt werden.

Danksagung

Die Autoren und ihre Institutionen danken der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), die das Projekt RecyMin im Rahmen des Programms *Bridge* unter der Fördernummer 868064 fördert, der Firma ATM Recyclingsystems für die Unterstützung bei der Brikettierung, dem Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre für die Unterstützung bei der Rasterelektronenmikroskopie und der Österreichischen Staub- und Silikosebekämpfungsstelle für die Beratung im Bereich des Arbeitsschutzes.

9. Quellen

- [1] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Abbruch- Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle, Technische Regeln für Gefahrstoffe, 2008, Bd. 521, S. 1-14
- [2] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 905, Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe. GMBI 2016, S. 378-390 [Nr. 19] (v. 3.5.2016), zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2018, S. 259 [Nr. 15] (v. 2.5.2018)
- [3] Balcerowiak, W.; Gryta, M.; Kaledkowski, B.: Thermal stability of binder for mineral wool insulations. *Journal of Thermal Analyses*, 1995, Bd. 43, S. 299-303
- [4] Balkevicius, V.; Christauskas, J.; Gailius, A.; Spokauskas, A.; Siaurys, V.: Analysis of some properties of model system from low-melting illite clay and fibrous mineral wool waste. *Materials Science-Poland*, Vol. 25, No 1, 2007, S. 209-217
- [5] Bayerisches Landesamt für Umwelt: Künstliche Mineralfasern, In: https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_32_kuenstliche_mineralfasern.pdf, abgerufen am 05.02.2018
- [6] Blengini, G.: Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin, Italy. *Building and Environment*, 2009, Bd. 44, S. 319-330

- [7] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Künstliche Mineralfaserdämmstoffe. BBSR-Berichte KOMPAKT, 2011, Bd. 1
- [8] Bundesrepublik Deutschland: Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung), 2010
- [9] Cheng, A.; Lin, W.-T.; Huang, R.: Application of rock wool waste in cement-based composites. *Materials and Design*, 2011, Bd. 32, S. 636-642
- [10] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV): Verfahren zur getrennten Bestimmung der Konzentrationen von lungengängigen anorganischen Fasern in Arbeitsbereichen – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren, 2014
- [11] Dunster, A.: Characterisation of Mineral Wastes, Resources and Processing technologies – Integrated waste management for the production of construction material, 2007, http://www.smartwaste.co.uk/filelibrary/Mineralwool_sectorstudy.pdf, abgerufen am 25. 03 2018].
- [12] Ecofys; Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research; Öko-Institut: Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012, Sector report for the mineral wool industry, https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/allowances/docs/bm_study-mineral_wool_en.pdf, abgerufen am 25.03.2018
- [13] Europäische Union: Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (CLP-Verordnung), 2008
- [14] Gröper, J.; Lack, D.: Verfahren zur Verwertung von Dämmmaterialien aus Mineralwolle in Spezialbaustoffen. *Recy&DepoTech*, 2016, Bd. 13, S. 161-166
- [15] Holbek, K.: Process for the production of mineral wool products. Patent US4287142A, 1987
- [16] Höllen, D.: Identification and Quantification of Crystalline Phases in Thermally Treated Stone Wool. Diplomarbeit. TU Bergakademie Freiberg & Universität Aalborg, 2008
- [17] Höllen, D.; Galler, R.; Pomberger, R.: Möglichkeit des Schlackeeinsatzes als Untertageversatz. In: *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*, 2015, Bd. 2, S. 519-530
- [18] Hyvärinen, A.; Meklin, T.; Vepsäläinen, A.; Nevalainen, A.: Fungi and actinobacteria in moisture-damaged building materials – concentrations and diversity. *Biodeterioration and Biodegradation*, 2002, Bd. 49, S. 27-37
- [19] Karppinen, K.: Paroc-WIM – Waste injection into the stone wool melting furnace – LIFE02 ENV/FIN/000328, 2002, http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=2126&docType=pdf, abgerufen am 25. 3 2018
- [20] Kropiunik, H.: Künstliche Mineralfasern. *Umweltschutz*, 2004, Bde. 1-2, S. 32-33
- [21] Magistrat der Stadt Wien MA 22 – Umweltschutz; aetas Ziviltechniker GmbH: Projekt *Künstliche Mineralfasern*. Endbericht. Wien, 2012
- [22] Mamiński, M.; Król, M.; Jaskółowski, W.; Borysiuk, P.: Wood-mineral wool hybrid particle-boards. *European Journal of Wood and Wood Production*, 2011, Bd. 69, S. 337-339
- [23] Müller, A.; Leydoph, B.; Stanelle, K.: Recycling mineral wool waste – Technologies for the conversion of the fibre structure, Part 1. *Interceram*. 2009, Bd. 58, S. 378-381
- [24] Muhle, H.; Bellmann, B.; Sebastian, K.; Böhm, T.; Nies, E.; Barig, A.: BIA-Report 2/98. Fasern – Tests zur Abschätzung der Biobeständigkeit und zum Verstaubungsverhalten
- [25] Öhberg, T.: Schwedisches Patent Nr. 205247, 1966
- [26] Papadopoulos, A.M.: State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 2005, Bd. 37, S. 77-86

- [27] Pranckevičėine, J.; Balkevičius, V.; Špokauskas, A.: Investigation on properties of sintered ceramics out of low-melting illite clay and additive of fine-dispersed nepheline syenite. *Medziagotyra*, 2010, Bd. 16, S. 231-235
- [28] Romaniega Pineiro, S.; del Río Merino, M.; Pérez García, C.: New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, Bd. 2015, S. 1-9
- [29] Sal'nikov, V.: Properties of mineral wool after long operation in walls of buildings in Middle Ural region, (auf Russisch). *Building Materials (Stroitel'nye Materialy)*, 2003, Bd. 3, S. 42-43
- [30] Väntsi, O.; Kärki, T.: Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2014, Bd. 16, S. 62-72
- [31] Wirtschaftskammer Österreich: Kurzanleitung für den Umgang mit künstlichen Mineralfasern (KMF) im Bauwesen. Glaswollen und Steinwollen. <https://www.wko.at/branchen/gewerbe-handwerk/bauhilfsgewerbe/kmf-leitfaden.pdf>, abgerufen am 22.01.2019
- [32] Wurzer Umwelt GmbH: Website. <https://www.wurzer-umwelt.de/mobile-kmf-ballenpresse>, abgerufen am 24.01.2019

Ansprechpartner



Dr. Daniel Vollprecht

Montanuniversität Leoben
Assistenzprofessor
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Franz-Josef-Straße 18
8700 Leoben, Österreich
+43 3842 402-5110
daniel.vollprecht@unileoben.ac.at



Theresa Sattler, M.Sc.

Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Franz-Josef-Straße 18
8700 Leoben, Österreich
+43 3842 402-5138
theresa.sattler@unileoben.ac.at

Weitere beteiligte Institutionen

Lafarge Zementwerke GmbH
Porr Umwelttechnik GmbH

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,
Thomas Pretz, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-47-3 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

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

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2019
Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.
Erfassung und Layout: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Claudia Naumann-Deppe, Sarah Pietsch,
Janin Burbott-Seidel, 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.