DOI: 10.15593/2224-9826/2015.2.03

С.-Х. Шлемп, У. Турчински

Университет Магдебург-Штендаль, Магдебург, Германия

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛАКА ОТ СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ОСНОВАНИЙ (СТАТЬЯ НА НЕМЕЦКОМ ЯЗЫКЕ)

В Германии закон кругооборота в экономике устанавливает приоритет предотвращения образования отходов перед его повторным использованием, утилизацией и дальнейшей переработкой. Если невозможно принятие упомянутых мер, то оставлен только один выбор – использование отходов для изменения рельефа.

С 1 июня 2005 г. городские отходы, а также другие виды отходов, содержащие биоразлагаемые части, должны быть биологически, термически или механически обработаны перед захоронением. В течение достаточно долгого времени упор делается на сжигание отходов. Если предположить, что с 1 т отходов образуется 300 кг шлака, то получим что, такого шлака в Германии ежегодно производится 13 000 000 т, что открывает огромный потенциал для строительной отрасли.

В статье рассмотрены возможности применения образующего от сжигания шлака в области геотехники. Для использования шлака в качестве грунтов необходимо определить его физико-механические свойства, для того чтобы сравнить его с обычными геологическими типами грунтов. Кроме того, необходимо учитывать, что шлак не является грунтом как таковым и представляет собой смесь различных веществ.

Все шлаки от сжигания отходов должны быть классифицированы как грунты, получающиеся при переработке материалов, которые не эквивалентны обычным грунтам. На основе установленных характеристик и с учетом требований конкретных зданий отметим, что также существуют задачи в инженерной геологии, где установленные физико-механические свойства шлаков являются абсолютно достаточным. Потенциально шлаки могут найти применение для устройства оснований фундаментом зданий с небольшой нагрузкой или с малой деформацией оснований.

Ключевые слова: отходы, сгорание шлаков, геотехника, искусственный грунт, грунты оснований.

S.-H. Schlömp, U. Turczynski

University of Magdeburg-Stendal, Magdeburg, Germany

GEOTECHNICAL ASPECTS OF WASTE COMBUSTION SLAG IN USE AS SOIL MATERIAL

Within the German law of circular economy it is claimed to give the prevention of waste priority over its reuse, recycling and its further processing. If waste can't be fit into the mentioned measures, the only left choice is its relief.

Since June 1st of 2005, urban waste as well as other types of waste containing biodegradable parts, have to be either bio-thermally or mechanically treated before storage. With a background like this and a for all practical purposes not entirely manageable prevention of waste, the focus of waste management is now on optimizing waste combustion for quite some time. Assuming that, with current scientific knowledge, one ton of waste input can be turned into 300 kilogram combustion slag, the amount of combustion slag Germany is producing, reaches 13.000.000 tons every year, which again opens up an enormous potential for the building sector.

This paper deals with potential applications for combustion slag within the field of geotechnical engineering. Mainly essential for this is the definition of soil mechanical- and hydraulical parameters of the combustion slag, in order to compare its geological behavior with conventional soil types. In addition to that, the usage of long term approved methods for soil parameter determination as well as soil mechanical calculations were tested on the combustion slag, because slag is not considered as true soil by meaning. Moreover combustion slag is an anthropogenic mixture of substances with soil-like characteristics.

All in all, combustion slags have to be classified as soil-like recycling materials that are not equivalent to normal grown soils. Based on the ascertained characteristics and considering the requirements of a specific parameter determination for buildings, there are still tasks within geological engineering where soil mechanical-, hydraulical- and chemical- qualities of combustion slag is absolutely sufficient. Potential applications could be foundations for buildings with a low rate of load entry or small demands on settlement behavior as well as buildings with low demands on deformation.

Keywords: waste, combustion slag, geotechnic, soil, ground base

Mit weltweit steigenden Kapazitäten in der thermischen Verwertung von Haus- und Industrie-müll ist zukünftig mit großen Mengen an Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke) zu rechnen.

Im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz [1] wird gefordert, der Vermeidung von Abfällen den Vorrang vor ihrer Wiederverwendung, ihrem Recycling und ihrer Verwertung zu geben. Können die Abfälle keiner der genannten Maßnahmen zugeführt werden, bleibt als letztes ihre Beseitigung. Vor ihrer Ablagerung müssen seit dem 1. Juni 2005 in Deutschland Siedlungsabfälle und andere Abfälle mit biologisch abbaubaren Bestandteilen thermisch oder mechanisch-biologisch behandelt werden. Mit derartigem Hintergrund und einer in der Praxis nicht vollends zu realisierenden Abfallvermeidung ist der abfallwirtschaftliche Fokus seit geraumer Zeit verstärkt auf den Ausbau und die Optimierung der Müllverbrennung gerichtet. Wird nach derzeitigem Kenntnisstand davon ausgegangen, dass aus einer Tonne Abfallinput annähernd 300 Kilogramm Verbrennungsschlacke entstehen, so ist deutschlandweit jährlich mit ca. 13.000.000 Tonnen MV-Schlacke zu rechnen, aus denen sich ein enormes potentielles Baustoffpotenzial eröffnet.

Mit dem Rückgang der derzeitigen Hauptverwertungsrichtung von MV-Schlacke, dem Deponie- und Langzeitlagerbau und einem steigenden Schlackeaufkommen aus der Müllverbrennung erhöht sich der zukünftige Bedarf an neuen Verwertungsmöglichkeiten.

Die entstehenden Schlacken können auf den ersten Blick als anthropogenes bodenähnliches Material eingestuft werden, dass ein Potential als Erdbaustoff besitzt. Hier liegt es nahe, Bereiche der Geotechnik auf einen möglichen Schlackeeinsatz zu prüfen. Dafür sind zum einen Umweltaspekte zu betrachten und zum anderen ihre geotechnischen Eigenschaften zu analysieren. Folglich ist es unumgänglich, für die MV-Schlacke, genau wie für einen natürlichen Boden, hydraulische und bodenmechanische Kenngrößen zu ermitteln. In Ermangelung von Alternativen kommen dafür die standardisierten geotechnischen Versuche in Betracht.

Da es sich bei MV-Schlacke nicht um Boden im Sinne deutscher geotechnischer Richtlinien handelt und die Schlacke als anthropogenes Stoffgemisch anzusehen ist (Abb. 1), das lediglich einen bodenähnlichen Charakter aufweist, sind schlackespezifische Anpassungen in der Versuchsdurchführung und unkonventionelle Ergebnisinterpretationen erforderlich.

Abb. 1 MV-Schlacke mit unverbrannten Anteilen
(Waste combustion slag with unburned components)

Besonderen Einfluss auf die Versuchsergebnisse nehmen dabei die heterogene Zusammensetzung der MV-Schlacke, ihr altersabhängiges Reaktionsverhalten mit Wasser und damit einhergehende Volumenänderungen sowie ihre Tendenz zur Kornzertrümmerung bei Verdichtungsprozessen.

So wirken sich diese Einflüsse im Proctorversuch [2] [3] unabhängig voneinander auf die ermittelten Lagerungsdichten und die dazugehörigen Wassergehalte aus. Der direkte Ergebnisvergleich zwischen MV-Schlacke und Kiessand, beide besitzen die gleiche Kornverteilung, lässt erkennen, dass Kiessande grundsätzlich eine höhere Proctordichte bei signifikant niedrigerem optimalen Wassergehalt erreichen. Ein ausschlaggebender Grund dafür sind die niedrigeren Korndichten der MV-Schlacke, die sie aufgrund ihrer inhomogenen Stoffzusammensetzung und durch einen höheren Anteil an geschlossenen Poren besitzt. Zusätzlich entstehen bei der Verdichtung erhöhte Reibungskräfte zwischen den rauen Schlackekörnern, die den verdichtenden Kräften entgegenwirken.

Der größer ausfallende, zur jeweiligen Proctordichte zugehörige optimale Wassergehalt von MV-Schlacke ist abhängig von Inhaltsstoffen mit starkem Wasseraufnahmevermögen. Hier kommt hinzu, dass in der MV-Schlacke durch die Zugabe von Wasser chemische Reaktionen ablaufen, bei denen ein Teil des Wassers umgewandelt wird. Eine Gegenüberstellung von fünf Wochen alter und mehrere Jahre alter MV-Schlacke zeigt, dass sich der optimale Wassergehalt mit zunehmendem Schlackealter deutlich erhöht, was auf die Abnahme der chemischen Reaktivität mit der Zeit zurückzuführen ist (Abb. 2).

		MV-Schlacke		Kiessand
		fünf Wochen	mehrere Jahre	
Proctordichte ρ_{Pr}	[g/cm ³]	1,716	1,610	2,016
Optimaler Wassergehalt w_{Pr}	[%]	15,2	18,6	5,8
Korndichte [4] ρ_s	[g/cm ³]	2,55	2,55	2,63
Porenanteil $n = 1 - \frac{\rho_{Pr}}{\rho_s}$	[-]	0,327	0,369	0,233

Abb. 2. Geotechnische Kenngrößen von junger und alter MV-Schlacke bzw. von Kiessand mit gleicher Kornverteilung (Geotechnical characteristics of young and old waste combustion slag respectively gravel sand with the same grading curve)

Junge MV-Schlacke ist demnach eher in der Lage, Wasser dauerhaft im Gefüge zu binden, das so bei der Wassergehaltsbestimmung nicht mehr miterfasst werden kann. Bekräftigt wird diese These auch durch geringer ermittelte Wassergehalte des verdichteten Schlackematerials, als jene die vor der Verdichtung in den Schlackeproben definiert eingestellt wurden (Abb. 3).

Abb. 3. Wassergehalte von MV-Schlacke vor und nach dem Proctorversuch
(Water contents of waste combustion slag before and after the Proctor test)

Weiterhin hat sich bei der Ermittlung von Proctordichten der MV-Schlacke die Zertrümmerung ihrer Partikel im Verdichtungsprozess als problematisch herausgestellt. Selbst die Verwendung einer auf die Probe aufgelegten kraftverteilenden Stahlplatte konnte die Kornzerstörung nicht gänzlich verhindern. Die Sieblinien [5] vor und nach dem Proctorversuch einer MV-Schlacke zeigen die Umverlagerung aus dem Kies- in den Sandkornbereich (Abb. 4).

Mit dieser Veränderung der Sieblinie geht auch ein geändertes Verdichtungsverhalten einher. Die erreichten Dichten sind nur noch eingeschränkt repräsentativ für das Ausgangsmaterial.

Werden weiterführend relevante Bodeneigenschaften näher beleuchtet, ist zu erkennen, dass die MV-Schlacke zwar größere innere Reibungswinkel und eine höhere Kohäsion [6] als ein Kiessand mit gleicher Kornverteilung besitzt, im Gegensatz dazu sich aber auch unter statischen Belastungen stärker verformt. Auch wurden in den Schlacken vergleichsweise geringere Durchlässigkeiten [7] als im genannten Kiessand gemessen.

Eine Angleichung von geotechnischen MV-Schlacke-Kennwerten an Böden lässt sich mit einem Austausch von Schlackekornfraktionen durch entsprechende Bodenkörnungen erzielen. Als besonders effektiv zeigte sich dahingehend das Ersetzen feiner Fraktionen bis 4,0 mm.

Abb. 4. Kornverteilung von MV-Schlacke vor und nach dem Proctorversuch
(Grading curve of waste combustion slag before and after the Proctor test)

Auch im Langzeitverhalten sind die MV-Schlacken differenziert zu Böden einzustufen. Ihre Raumbeständigkeit ändert sich je nach stofflicher Zusammensetzung und Aufbereitungsmethoden, wobei in ihrer chemischen Reaktionen mit Volumenzunahme bis zu mehreren Jahren anhalten können (Abb. 5). Zusätzlich sind über einen gesamten Bauwerksnutzungszeitraum erhebliche Veränderungen durch Frost-Tau-Einflüsse [8] zu erwarten.

Ähnlich wie bei der Verbesserung der geotechnischen Eigenschaften von MV-Schlacke sind auch ihr Langzeitverhalten und ihre Frost-Tau-Eigenschaften durch Zumischen von Boden oder einem partiellen Kornersatz durch Bodenkörnungen aufzuwerten.

Wie in den wenigen Beispielen gezeigt wurde, weisen MV-Schlacke gegenüber natürlichen Böden deutliche Unterschiede auf, die sowohl in Versuchsdurchführung und – interpretation aber vor allem in einer geotechnischen Anwendung beachtet werden müssen und Grenzen aufzeigen. Die Müllverbrennungsschlacken sind als ein bodenähnliches Recyclingmaterial einzustufen, dass einem natürlichen gewachsenen Boden nicht gleichwertig ist.

Abb. 5. Volumenänderungen junger und alter MV-Schlacke
(Volume changes of young and old waste combustion slag)

Dennoch lassen sich auf der Grundlage der ermittelten Schlackeeigenschaften und unter der Voraussetzung einer gezielten bauwerksspezifischen Kennwertermittlung Anwendungen in Bereichen der Geotechnik finden, denen die bodenmechanische, hydraulische und chemische Qualität von MV-Schlacke genügt. Als potentielle Anwendungen sind beispielsweise Gründungen von Bauwerken mit niedrigem Lasteintrag oder geringem Anspruch an das Setzungsverhalten beziehungsweise Erdbauwerke, bei denen Verformungen weniger relevant sind, zu nennen.

	Gewachsener Boden	MV-Schlacke
Inhaltsstoffe	annähernd homogene mineralische Zusammensetzung – teilweise mit organischen Beimengungen	heterogene Zusammensetzung deren or-ganische, anorganische, und mineralische Anteile abhängig vom Müllinput sowie vom Verbrennungs- bzw. Aufbereitungs-regime sind
Korngerüst	konstante chargenunabhängige Fraktionierung	chargenabhängige Korngrößenverteilung
Dauerhaftigkeit	bei konstanten Umweltbedingungen langfristig annähernd gleichbleibende Bodenkenngrößen	alterungsabhängige bis zu mehreren Jahren anhaltende Veränderung geotechnischer Kenngrößen

Abb. 6. Unterschiede zwischen Boden- und Schlackekonglomeraten
(Differences between soil and slag conglomerates)

Zukünftige geotechnische Analysen von MV-Schlacke sind dahingehend auszurichten, die standardisierten bodenmechanischen Laborversuche sowie dafür verwendete Apparaturen an die speziellen MV-Schlacke-Anforderungen anzupassen. Die Größe der Versuchsreihen ist dabei so zu wählen, dass schlackespezifische Sicherheitsfaktoren für die entsprechenden Kennwerte aus den Versuchsergebnissen abzuleiten sind.

Andere zukünftige Betrachtungen ergeben hinsichtlich einer Optimierung der geotechnischen MV-Schlacke-Qualität, wobei in diesem Zusammenhang speziell der Einfluss der Korngrößenverteilung auf das geotechnische Verhalten von MV-Schlacken zu untersuchen ist.

References

1. BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ [Hrsg.]: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Februar 2012 (Law to promote recycling and environmentally compatible management of waste – published on 24 February 2012) (BGBl. I S. 212). Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2012.

2. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.]: DIN 18127: 2012-09, Soil, investigation and testing – Proctor-test. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011.

3. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.]: DIN 18121-1: 1998-04, Soil, investigation and testing – Watercontent – Part 1: Determination by oven drying. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1998.

4. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.]: DIN 18124: 2011-04, Soil, investigation and testing – Determination of density of solid particles – Capillary pycnometer, wide mouth pycnometer, gas pycnometer. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.

5. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.]: DIN 18123: 2011-04, Soil, investigation and testing – Determination of grain-size distribution. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.

6. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.]: DIN 18137-3: 2002-09, Soil, investigation and testing – Determination of shear strength – Part 3: Direct shear test. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002.

7. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.]: DIN 18130-1: 1998-05, Soil – investigation and testing; Determination of the coefficient of water permeability – Part 1: Laboratory tests. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1998.

8. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.]: DIN EN 1367-1: 2007-06, Tests for thermal and weathering properties of aggregates – Part 1: Determination of resistance to freezing and thawing. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.

9. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau“ [Hrsg.]: Merkblatt über die Verwendung von Hausmüllverbrennungsasche im Straßenbau (M HMVA) (Instruction sheet of the use of waste combustion slag in road construction). Köln: FGSV Verlag, 2005.

10. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) unter Vorsitz des Ministeriums für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz [Hrsg.]: Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 19, Merkblatt der Landesarbeitsgemeinschaft Abfall für die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle (Instruction sheet of the national working group „waste“ for disposal of waste from waste incineration facilities). Mainz, 1994.

11. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) unter Vorsitz des Ministeriums für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz [Hrsg.]: Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln – Allgemeiner Teil (Requirements for the recycling of mineral wastes – Technical Regulations – General Part). Mainz, 2003.

Получено 06.03.2015

Сведения об авторах

Свен-Хеннинг Шлемп (Магдебург, Германия) – инженер лаборатории геотехники строительного факультета Университета Магдебург-Штендаль (e-mail: Sven-Henning.Schloemp@HS-Magdeburg.de).

Ульрих Турчински (Магдебург, Германия) – доктор технических наук, профессор строительного факультета Университета Магдебург-Штендаль (e-mail: ulrich.turczynski@hs-magdeburg.d).

About the authors

Sven-Henning Schlömp (Magdeburg, Germany) – Engineer of Laboratory of Geotechnics, Civil Engineering Faculty, University of Magdeburg-Stendal (e-mail: Sven-Henning.Schloemp@HS-Magdeburg.de).

Ulrich Turczynski (Magdeburg, Germany) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Civil Engineering Faculty, University of Magdeburg-Stendal (e-mail: ulrich.turczynski@hs-magdeburg.de).