

# Eignungsuntersuchung und Ökobilanzierung für Deponieersatzbaustoffe in Vietnam

Der wachsende Materialbedarf im Bausektor auf Grund der zunehmenden Bevölkerungs- und Urbanisierungsentwicklung verursacht in Entwicklungsländern einen hohen Verbrauch endlicher Primärressourcen und erhebliche Umweltauswirkungen. Prinzipiell finden Ersatzbaustoffe außerhalb von Europa bisher untergeordnete Beachtung, allerdings führt die zunehmende Ressourcenknappheit insbesondere in Asien zu einem verstärkten Interesse an Alternativen. Der Untersuchungsschwerpunkt liegt derzeit auf Sandersatzstoffen für die Betonherstellung, weitere Anwendungsfelder wie Straßen- und Deponiebau rücken ebenfalls zunehmend in den Fokus. Um die Umweltauswirkungen der Nutzung von Primärrohstoffen zu reduzieren, wurden im Rahmen des Projektes SAND! Untersuchungen zu Deponieersatzbaustoffen (DEBS) durchgeführt. Im Fokus steht die Eignungsuntersuchung für Reisschalenasche und Ziegelmehl, die weitergehende ökobilanzielle Betrachtung berücksichtigt auch Flugasche als geeigneten DEBS.

Le Hung Anh und Petra Schneider

## Einleitung

In den letzten Jahrzehnten sahen sich Deponieplaner weltweit mit einer zunehmenden Verknappung von Primärrohstoffen für den Deponiebau konfrontiert, insbesondere im Hinblick auf die Dichtungsschicht mit ihren besonderen technischen Anforderungen. Daher werden im internationalen Maßstab in den letzten Jahren mineralische Abfälle als alternative Barrierematerialien für Deponiedichtungsschichten untersucht. Generell geeignete Quellen für mineralische Ersatzbaustoffe können sein: (a) Rückstände landwirtschaftlicher Tätigkeiten, wie z. B. Asche aus Agrarabfällen; (b) metallurgische oder mineralische Abfälle; c) Bau- und Abbruchabfälle, und (d) Bergbauabfälle, wie z. B. Tailings-Sedi-

mente. Darüber hinaus ist es insbesondere für die Dichtungsschicht erforderlich, Abfallströme mit ständiger Verfügbarkeit und homogenen bodenmechanischen Eigenschaften zu nutzen. Zu den Materialien, die im internationalen Maßstab bereits als Deponieersatzbaustoff (DEBS) Anwendung finden, gehören Schlacken, Aschen, Bau- und Abbruchabfälle, Glasabfälle, Bergbauabfälle und Verbrennungsrückstände. Im Gegensatz zu den Industrieländern gibt es in Schwellenländern wie beispielsweise Vietnam bisher nur überschaubare Mengen an Bau- und Abbruchabfällen, da sich diese Länder nach wie vor im Aufbauprozess der Infrastruktur befinden. Wenn sich diese Entwicklung auf einem entsprechenden Niveau stabilisiert hat, sind auch in diesen Ländern substantielle Stoffströme an Bau- und Abbruchabfällen zu erwarten. In Vietnam besagt eine Prognose der Asian Development Bank, dass dieser Zustand etwa ab dem Jahr 2040 der Fall sein wird [1].

Im aktuellen Zustand gibt es etwa 660 offene Hausmülldeponien in Vietnam und es besteht die Notwendigkeit, diese in den kommenden Jahren zu schließen. Die vorliegenden Untersuchungen wurden im Rahmen des Projektes „SAND! Alternative Sandproduktion und Risikoreduzierung des Nassbaggerns in Vietnam“ durchgeführt, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Zeitraum 2019 – 2022 im Rahmen des Client II Programms finanziert wurde. Gegenstand der Untersuchungen war neben der Identifizierung von Sandersatzstoffen in klassischen Baustoffanwendungen die Eignungsuntersuchung für die Nutzung von Sekundärrohstoffen aus industriellen oder anthropogenen Abfällen als alternatives Material für Deponiedichtungsschichten, um die Abhängigkeit von natürlichem Ton und Bentonit zu reduzieren.

Hinsichtlich der gesetzlichen Anforderungen an Deponieabdichtungsschichten erfolgte die Bewertung in Anlehnung an die

### / Kompakt /

- Die Baustoffknappheit in Schwellen- und Entwicklungsländern zwingt zur Suche nach Alternativen. Dies betrifft neben dem Themenfeld Deponieersatzbaustoffe insbesondere die Bereiche Betonzuschlagstoffe und Straßenunterbau.
- Unter den Bedingungen in Vietnam ist die Nutzung regionaler Alternativen zielführend, wie z. B. Reisschalenasche, von der große Volumenströme vorliegen, oder Ziegelrückstände, die zukünftig in großer Menge vorliegen werden.
- Als Mixtur mit Ziegelmehl eignet sich Reisschalenasche mit einem maximalen Anteil von 40 % als Alternative für die Dichtungsschicht von Oberflächendichtungssystemen.



**Bild 1:** Reisschalenasche



© Petra Schneider

deutsche Deponieverordnung (DepV, 2009/2017) [2], da es in Vietnam bisher keine Deponierichtlinie gibt. Nach dem deutschen Regelwerk werden Deponien nach ihrem Gefährdungspotential in Klassen eingeteilt. Klasse I bezeichnet eine „oberirdische Deponie für mäßig belasteten Erdaushub und Bauschutt und vergleichbare mineralische Gewerbeabfälle“. Bei der Klasse II handelt es sich um Abfälle mit einem höheren Schadstoffgehalt, die auch einen höheren biologischen Gehalt aufweisen können als bei der Deponiekategorie I. Die Deponiekategorie III ist für nicht gefährliche Abfälle und solche gefährlichen Abfälle relevant, die Zuordnungskriterien nach Anhang 3 Nummer 2 für die Deponiekategorie III einhalten. Nach DepV (2009) [2] dürfen DEBS in Oberflächenabdichtungskomponenten und -systemen u. a. nur eingesetzt werden, wenn sie den Anforderungen der bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS) entsprechen. Dies wurde in der DepV (2017) konkretisiert. Im SAND!-Projekt wurden verschiedene Materialmischungen von prinzipiell in Vietnam verfügbaren DEBS wie Reisschalenasche und Ziegelrückstände untersucht. Die ausgewählten DEBS wurden hinsichtlich der Durchlässigkeitsanforderungen der DepV getestet, d. h.  $k \leq 5 \times 10^{-9}$  m/s für die Deponieklassen I und II sowie  $k \leq 5 \times 10^{-10}$  m/s für Klasse III. Darüber hinaus wurden die Alternativen einer Ökobilanzierung unterzogen, wobei als funktionelle Einheit von einem Hektar Deponieoberflächendichtungsschicht ausgegangen und der ökologische Fußabdruck im Vergleich zur Nutzung von Primärrohstoffen ermittelt wurde.

## Methodik

Die allgemeine Vorgehensweise zur DEBS-Eignungsuntersuchung umfasste die folgenden Schritte:

- Auswahl potenzieller Materialien, die in Vietnam in großen Mengen verfügbar sind und aufgrund von Literaturrecherchen als Rückstände gelten (in diesem Fall Ziegelmehl und Reisschalenasche),
- Beschaffung dieser Materialien und Durchführung einer allgemeinen bodenmechanischen Charakterisierung der Materialien,
- Entwicklung von Mischungsszenarien für die Materialien auf Basis ihrer Eigenschaften und vorhandener Erfahrungen,
- Bodenmechanische Untersuchungen für mehrere Mischungsszenarien zur Ermittlung realisierbarer Mischungen, die den Anforderungen der DepV genügen,
- Eignungsbewertung der Materialmischungen und ökobilanzielle Untersuchungen für die betrachteten DEBS.

Unter Berücksichtigung der gesammelten Erfahrungen und der Auswertung der wissenschaftlichen Literatur sowie der Gegebenheiten in Vietnam wurden Ansätze in Anlehnung an Pötzsch & Busch (2001) [3] aufgegriffen und Untersuchungen zur Eignung von Ziegelmehl sowie dem typischen vietnamesischen Agrarreststoff Reisschalenasche durchgeführt. Pötzsch & Busch (2001) [3] nutzten in ihrer Studie ein Gemisch aus Friedländer Blautonmehl, Bentonit (Montigel F), Flugstaub und Ziegelbruch-Brechsand (0 – 4 mm

**Tabelle 1:** DIN-Normen der durchgeführten bodenmechanischen und bodenphysikalischen Laboruntersuchungen

Parameter	Methode	Gemäß Norm
Wassergehalt	Ofentrocknung	DIN EN ISO 17892-1
Korndichte	Heliumpyknometer	DIN 66137-2
Korngrößenverteilung	Kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse mit Siebmaschine (Siebung) und Aräometer (Abschlammung)	DIN 18123
Hydraulische Leitfähigkeit	Fallende Druckhöhe / Triaxialzelle	DIN 18130
Proctordichte	Proctor ohne Kopfplatte	DIN 18127
Lockerste Lagerung	Einfüllen der Probe mit einem Trichter	DIN 18126
Dichteste Lagerung	Schlaggabel Test	DIN 18126
Saugspannungskurve	Kaolin (Feldkapazität) & Druckplattenextraktor (Permanenter Welkepunkt PWP)	DIN EN ISO 11274

Quelle: Le Hung Anh und Petra Schneider

**Tabelle 2:** Mischungsverhältnisse für Ziegelmehl (ZM), welche in den Labortests verwendet wurden

Mix	Ziegelmehl (%)	Ton (%)	Feinsand (%)	Bentonit (%)
ZM 1	43 (gemäß [3])	54	1,5	1,5
ZM 2	54	43	1,5	1,5
ZM 3	50	50	–	–
ZM 4	75	22	1,5	1,5
ZM 5	25	72	1,5	1,5
ZM 6	97	0	1,5	1,5

Quelle: Le Hung Anh und Petra Schneider

bzw. 0 – 8 mm), um alternative Deponiedichtungssysteme in Brandenburg zu untersuchen. Für die hier vorliegende Studie wurde Ziegelmehl in der Körnung 0 – 2 mm verwendet.

Reisschalenasche (Rice Husk Ash, RHA) ist das Produkt der Verbrennung von Reisspelzen, die beim Schälen von Reis als Rückstand anfallen. Die meisten verdampfbaren Bestandteile der Reisschale gehen beim Verbrennen langsam verloren und die primären Rückstände sind Silikate. Die Eigenschaften der Asche hängen von (1) der Zusammensetzung der Reisschalen, (2) der Brenntemperatur und (3) der Brenndauer ab. Vietnam ist eines der größten Reisanbauländer der Welt und produzierte im Jahr 2017 42,8 Mio. t Reis. Basierend auf seiner Produktion hatte Vietnam im Jahr 2017 ca. 15 Mio. t Reisspelzen [4], die üblicherweise verbrannt werden. Reisschalenasche ist somit ein relevanter Stoffstrom, für den Verwertungsbedarf besteht. **Bild 1** zeigt die Reisschalenasche, welche bei den Untersuchungen Verwendung fand.

Der entscheidende Parameter zur Beurteilung der Sickerwasserbildung durch ein Dichtungssystem oder Bauteil ist die hydraulische Leitfähigkeit des Dichtungsmaterials. Diese beschreibt die gravitative Fließgeschwindigkeit, mit der Wasser durch miteinander verbundene Materialhohlräume sickert, beschrieben durch die Hydraulische Leitfähigkeit  $k_f$  [5]. Diese kam in der Studie für die Eignungsbeurteilung im ersten Schritt als Hauptbeurteilungskriterium zur Anwendung. Die Laboruntersuchungen wurden nach den in **Tabelle 1** genannten DIN-Normen durchgeführt.

Die Mischungsverhältnisse für die Labor-Eignungsuntersuchung der Materialien der mineralischen Dichtungsschicht sind in den **Tabellen 2** und **3** zusammengestellt. Die alternativen Materi-

alien wurden als teilweiser oder vollständiger Schichtersatz in unterschiedlichen Mischungen berücksichtigt.

Die Studie beinhaltet außerdem eine vergleichende Analyse der Umweltauswirkungen verschiedener mineralischer Deponiedichtungsschichten unter Verwendung von Primär- und Sekundärrohstoffen, die für Vietnam verfügbar sind. Die Ökobilanzierung ist die verbreitetste ganzheitliche Methodik, die gemäß ISO 14040 [6] dazu dient, die potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems über den gesamten Lebensweg zu beurteilen. DEBS könnten verwendet werden, um Primärrohstoffe wie Ton und Bentonit im Deponiebau teilweise oder vollständig zu ersetzen. Mit Hilfe des Ökobilanzansatzes wurden die Umweltfußabdrücke der sekundärrohstoffbasierten Schichten untereinander und mit den konventionellen Schichten verglichen. Die Transportentfernungen wurden nach dem Ansatz „Cradle-to-Gate“ mit 30 km für Primärrohstoffe und 65 km für Sekundärrohstoffe berechnet. Die betrachteten Wirkungskategorien und deren Referenzeinheiten sind: Klimaänderung/Global Warming Potential GWP (kg CO<sub>2</sub> Äq.), Ressourcenverbrauch (kg Cu Äq.), Stratosphärischer Ozonabbau (kg CFC-11 Äq.), Ozonbildungspotenzial (kg NO<sub>x</sub> Äq.), Feinstaubbildung (kg PM<sub>2,5</sub> Äq.), Versauerung (mol SO<sub>2</sub> Äq.), Eutrophierung (Süßwasser) (kg P Äq.), Wasserverbrauch (m<sup>3</sup>) und Kumulierter Energiebedarf (KJ).

Die Ökobilanz wurde mit der Datenbank Ecoinvent 3.6 [7] und der Software Simapro 9.2 [8] erstellt. Die Software stellt die Benutzeroberfläche, die Umweltinformationen aus der Ecoinvent-Datenbank und die Methodenauswahl für die Folgenabschätzung bereit. Als Bewertungsmethode kam „ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H“ zur Anwendung. In diesem Zusammenhang wurde

**Tabelle 3:** Mischungsverhältnisse für Reisschalenasche (RHA), die in den Labortests zur Anwendung kamen

Mix	RHA (%)	Ziegelmehl (%)	Ton (%)
RHA 1	20	20	60
RHA 2	40	20	40
RHA 3	40	20	20
RHA 4	20	–	80
RHA 5	40	–	60
RHA 6	60	–	40
RHA 7	80	–	20

Quelle: Le Hung Anh und Petra Schneider

**Tabelle 4:** Mixturen für die in der Ökobilanz-Vergleichsstudie verwendeten Materialien als Ersatz für die mineralische Dichtungsschicht

	Mineralische Dichtungsschicht					
	Ton	Bentonit	Ziegelmehl	Flugasche	Reisschalenasche	Sand
Mix 1	97 %	3 %	–	–	–	–
Mix 2	47 %	3 %	50 %	–	–	–
Mix 3	54 %	1,5 %	43 %	–	–	1,5 %
Mix 4	72 %	1,5 %	25 %	–	–	1,5 %
Mix 5	50 %	–	–	50 %	–	–
Mix 6	–	20 %	–	80 %	–	–
Mix 7	20 %	20 %	–	–	60 %	–
Mix 8	60 %	–	–	–	40 %	–
Mix 9	60 %	–	20 %	–	20 %	–

Quelle: Le Hung Anh und Petra Schneider

auch Flugasche als potenzieller DEBS berücksichtigt, basierend auf Literaturdaten und der bereits bestehenden Verwendung in ähnlichen Bauanwendungen, wo die hydraulische Eignung dieses Materialtyps bereits nachgewiesen wurde. Die Analyse des Energiebedarfsszenarios wurde mit der Methode „Cumulative Energy Demand (CED) V1.11“ in Ecoinvent durchgeführt und repräsentiert den direkten und indirekten Energieverbrauch in der MJ-Einheit über den gesamten Lebenszyklus. **Tabelle 4** zeigt die Mixturen für die in der Ökobilanz-Vergleichsstudie verwendeten Materialien als Ersatz für die mineralische Dichtungsschicht

Funktionelle Einheit war die mineralische Dichtungsschicht im Deponieoberflächenabdichtungssystem mit einer Mächtigkeit von 0,6 m (vor der Einbau-Verdichtung) für eine Fläche von 1 Hektar. Die in der Studie betrachteten Materialien werden überwiegend außerhalb des Deponiegebietes hergestellt. Es wurde davon ausgegangen, dass der Installationsprozess vor Ort, die Geokunststoffschicht, die Drainageschicht, die Rekultivierungsschicht und die Lebensdauer der Deponiedeckschichten in herkömmlichen oder alternativen Oberflächenabdichtungssystemen ähnlich sind, sodass sie in der Ökobilanz nicht gesondert berücksichtigt werden müssen. Die Systemgrenzen sowohl für konventionelle als auch für alternative Materialien umfassen die Rohstoffgewinnung, deren Verarbeitung, die Abfallaufbereitung und den Transport zum Standort.

## Ergebnisse der Eignungsuntersuchungen

Die Laborergebnisse einiger Mischungen zeigten niedrige Durchlässigkeitswerte, die den bodenmechanischen Qualitätsanforderungen entsprechen. Folgende bodenmechanische und bodenphysikalische Parameter wurden ermittelt:

w [–]	Wassergehalt
$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Einbaudichte
$\rho_{Pr}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Proctordichte
w <sub>Pr</sub> [–]	Wassergehalt bei Proctordichte
k <sub>f</sub> [m/s]	hydraulische Leitfähigkeit
n <sub>FK</sub> [%]	nutzbare Festkapazität
LK [%]	Luftkapazität

Die Ergebnisse der Materialmischungen mit Ziegelmehl sind in **Tabelle 5** zusammengestellt.

Die Ergebnisse der Materialmischungen mit Reisschalenasche sind in **Tabelle 6** zusammengestellt.

Die Ergebnisse in **Tabelle 5** zeigen, dass die Mischungen ZM 1 und ZM 5 prinzipiell geeignete Materialmischungen sind, um die Qualitätsanforderungen für mineralische Abdichtungssysteme für Deponien der Klasse III zu erreichen. Die Mischungen ZM 2 und ZM 3 erreichen die Qualitätsanforderungen für die Oberflächendichtungskomponente der Klassen I und II, während die Mischungen ZM 4 und ZM 6 die Qualitätsanforderungen nicht erfüllen und für Dichtungsanwendungen ungeeignet sind. In diesen Mischungen ist der Anteil an DEBS zu hoch, um im Deponiebaumaterial geeignete hydraulische Leitfähigkeiten einzustellen.

Die Ergebnisse in **Tabelle 6** zeigen, dass die Mischungen RHA 1 und RHA 2 prinzipiell geeignete Materialmischungen sind, um die Qualitätsanforderungen für die Dichtungskomponente in Deponieoberflächenabdichtungssystemen der Klassen I und II zu erreichen. RHA 3 und RHA 4 sind geeignete Materialmischungen, um die Qualitätsanforderungen für die Oberflächendichtungskomponente der Klasse III zu erreichen. Die Mischungen RHA 5, RHA 6 und RHA 7 entsprechen nicht den Qualitätsanforderungen. Als Mischung mit Ziegelmehl eignet sich Reisschalenasche mit einem maximalen Anteil von 40 % als Alternative für die Dichtungsschicht von Oberflächendichtungssystemen. Die Eignung von Ziegelmehl als Dichtungsmaterial ist entsprechend den Ergebnissen bis zu einem maximalen Anteil von 54 % gegeben.

## Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtungen

Als Normalszenarium werden die konventionelle mineralische Dichtungsschichtmischung Mix 1 und alternative Materialschichten ohne Berücksichtigung der Vermeidung des Einsatzes alternativer Materialien verglichen. Die Ergebnisse der GWP-Belastung zeigen, dass alle alternativen Mischungen mit Ausnahme der Mischungen 6 und 7 eine geringere GWP-Belastung aufweisen als die konventionelle Primärrohstoffmischung 1 (**Bild 2**). Die höheren GWP-Auswirkungen von Mix 7 sind hauptsächlich auf den Bento-

**Tabelle 5:** Bodenmechanische und bodenphysikalische Eigenschaften der Materialmischungen mit Ziegelmehl

Mix	w [-]	ps [g/cm <sup>3</sup> ]	ρPr [g/cm <sup>3</sup> ]	wPr [-]	kf [m/s]	nFK [%]	LK [%]	Eignung
ZM 1	0,0072	2,709	1,826	0,1415	1,79 · 10 <sup>-10</sup>	22,61	4,93	DK III
ZM 2	0,0072	2,709	1,791	0,1378	2,66 · 10 <sup>-9</sup>	28,74	5,64	DK I/II
ZM 3	0,0065	2,718	1,799	0,1393	1,14 · 10 <sup>-9</sup>	26,30	5,77	DK I/II
ZM 4	0,0058	2,711	1,744	0,1650	1,06 · 10 <sup>-8</sup>	38,09	5,32	ungeeignet
ZM 5	0,0078	2,715	1,791	0,1422	1,71 · 10 <sup>-10</sup>	34,88	5,42	DK III
ZM 6	0,0054	2,700	1,555	0,1891	3,69 · 10 <sup>-7</sup>	34,95	7,28	ungeeignet

Quelle: Le Hung Anh und Petra Schneider

nit-Materialanteil zurückzuführen, da der Mix 20 % Bentonit enthält und der Transport der Asche 65 km beträgt. Das Gemisch 5 (50 % Bentonit, 50 % Flugasche) hat die geringsten GWP-Auswirkungen (107.984 kg CO<sub>2</sub> Äq.), da die Flugasche keine Auswirkung aus ihrer Herstellung und nur Auswirkungen durch den 65 km langen Transport hat. Die Auswirkungen stammen aus der Tongewinnung (50 %), dem Ton selbst und seinem Transport.

Auch die Mischungen Mix 2, Mix 3 (anteilige Zumischung Ziegelmehl) und Mix 9 (anteilige Zumischung Ziegelmehl und Reisschalenasche) haben geringere Auswirkungen als die anderen Alternativen und die konventionelle Mischung Mix 1. Die Analyse zeigte, dass die Mischungen mit Asche (Transportdistanz bis 65 km) einen Beitrag zu den Transportauswirkungen von 50 bis 65 % leisten, während die Mischungen mit Primärrohstoffen mit 30 km Transport zu 37 - 46 % zu den Transportauswirkungen beitragen. Die Mischungen Mix 2 und Mix 3, die Ziegelmehl verwenden, haben ca. 10 % geringere GWP-Auswirkungen als die konventionelle Mischung Mix 1.

Die Wirkungen in den Kategorien Ressourcenverknappung, Landnutzung und Eutrophierung sind bei den alternativen Schichtmischungen niedriger als bei der konventionellen Mischung Mix 1. Insgesamt haben die Mischungen Mix 8 und Mix 9, die 40 % bzw. 20 % Reisschalenasche enthalten, einen um ca. 40 % geringeren Fußabdruck als die konventionelle mineralische Dichtungsschicht (Mischung Mix 1), während die Mischung Mix 2 eine 50 %ige Reduzierung aufweist. In der Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch weist die Mischung Mix 6 mit 80 % Flugasche den geringsten Fußabdruck auf, der um 81,9 % niedriger war als bei Mischung Mix 1.

Im Allgemeinen weisen alle DEBS-Mischungen eine geringere Umweltauswirkung bzgl. des abiotischen Ressourcenverbrauchs auf als die Schicht aus Primärrohstoffen (**Bild 2**).

Mit Ausnahme von Mix 4 und Mix 7 unter den vorgeschlagenen alternativen Mixturen haben die anderen Mischungen im Durchschnitt 40 % geringere Auswirkungen auf die Landnutzung als Mix 1. Die Mischung Mix 7 hat in allen Kategorien – Treibhauspotenzial, Abbau der Ozonschicht, Verknappung fossiler Ressourcen und Wasserverbrauch – höhere Auswirkungen als die anderen vorgeschlagenen Alternativen. Die Unterschiede zwischen den Mischungen Mix 6 und Mix 7 sind hauptsächlich auf den Bentonitanteil von 20 % und den 65 km langen Aschetransport in der Mischungsrezeptur zurückzuführen. Der Wasserverbrauch blieb in den Mischungen Mix 6 und Mix 7 im Vergleich zu allen anderen Mischungen aufgrund des höheren Bentonitanteils hoch.

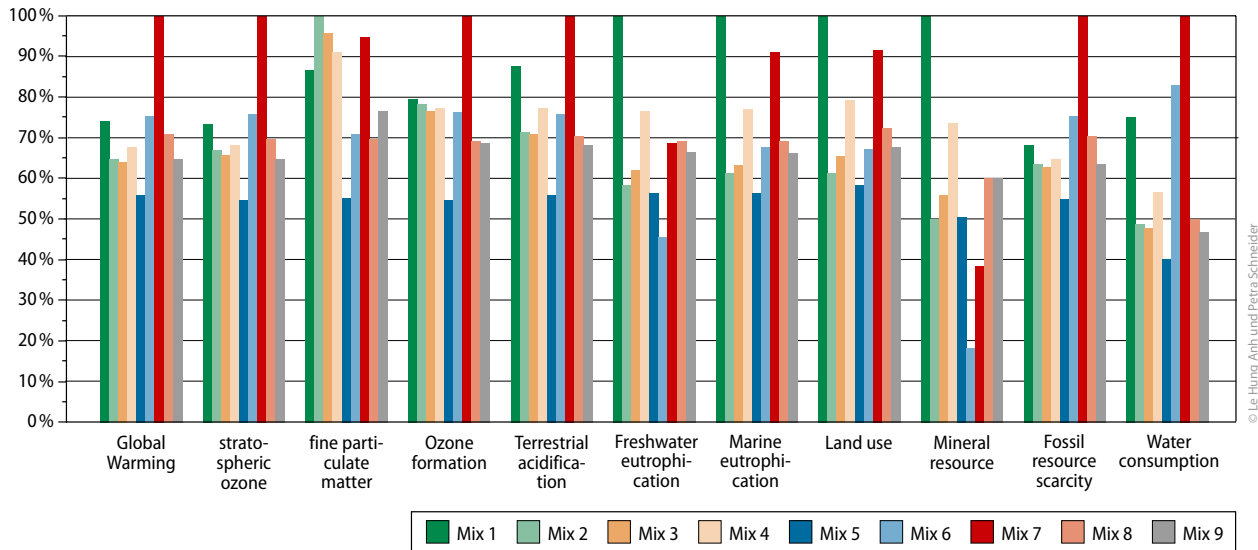
Bzgl. des Energiebedarfs und der potenziellen Energiequellen wiesen Mix 8 und Mix 9 einen geringeren Bedarf an nicht erneuerbaren Energiequellen auf, was dem aktuellen Setting Vietnams entspricht. Beide Mischungen haben im Lebenszyklus einen geringeren Energiebedarf von ca. 30 %. Mix 6 und Mix 7 hatten einen höheren Energieverbrauch bei den nicht erneuerbaren Energieträgern als die anderen Mischungen. Alle alternativen Energieträgermische verbrauchen weniger Energie aus erneuerbaren Quellen als der konventionelle Mix 1, was zeigt, dass die Vorteile bei einer vollständigen Umstellung auf erneuerbare Energiequellen sogar noch größer sein könnten (**Bild 3**).

Prinzipiell zeigte sich in der ökonomischen Betrachtung für DEBS in Dichtungsschichten von Oberflächendichtungssystemen,

**Tabelle 6:** Bodenmechanische und bodenphysikalische Eigenschaften der Materialmischungen mit Reisschalenasche

Mix	w [-]	ps [g/cm <sup>3</sup> ]	ρPr [g/cm <sup>3</sup> ]	wPr [-]	kf [m/s]	nFK [%]	LK [%]	Eignung
RHA 0	0,1848	1,655	0,184	0	n.m.	7,64	60,50	ungeeignet
RHA 1	0,0081	2,598	1,500	0,2155	5,05 · 10 <sup>-10</sup>	22,70	9,35	DK I/II
RHA 2	0,0064	2,407	1,233	0,3125	3,43 · 10 <sup>-9</sup>	20,87	17,16	DK I/II
RHA 3	0,0067	2,576	1,530	0,2065	3,56 · 10 <sup>-10</sup>	25,07	11,22	DK III
RHA 4	0,1043	2,187	1,076	0,3405	4,47 · 10 <sup>-10</sup>	20,10	3,75	DK III
RHA 5	0,0824	2,179	0,864	0,5148	7,39 · 10 <sup>-9</sup>	26,97	10,61	ungeeignet
RHA 6	0,0968	2,175	0,998	0,4030	2,04 · 10 <sup>-8</sup>	29,11	16,67	ungeeignet
RHA 7	0,1756	1,764	n.b.	n.b.	1,22 · 10 <sup>-4</sup>	18,88	44,64	ungeeignet

Quelle: Le Hung Anh und Petra Schneider



**Bild 2:** Analyse der Auswirkungen auf den Lebenszyklus für verschiedene Mischungen von mineralischen Dichtungsschichten

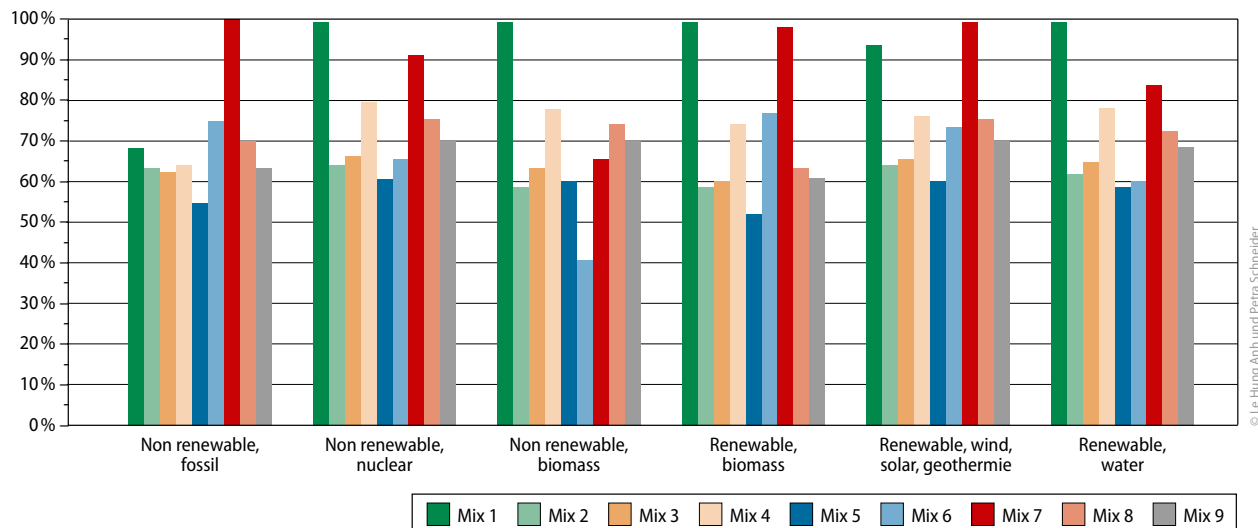
dass unter Berücksichtigung des Lebensweges der Baumaterialien, der Einsatz von Primärrohstoffen prinzipiell mit einem höheren Umweltfußabdruck verbunden ist, was aus der Flächeninanspruchnahme und dem hohen Treibhausgaspotenzial bei der Produktion der Primärrohstoffe resultiert. Eine maßgebliche Rolle spielen bei der Bewertung auch die mit dem Transport verbundenen Treiber Treibhausgaspotenzial und Energieverbrauch. Dies sind Stellschrauben, die die Umweltbilanz von Baustoffen wesentlich bestimmen.

### Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Mischungen, die nicht mehr als 50 % Ziegelmehl bzw. nicht mehr als 40 % Reisschalenasche enthielten, für die anteilige Zumischung zum Bau von Deponiedichtungsschichten geeignet sind. Im Rahmen der

ökobilanziellen Bewertung traten die entsprechenden Mischungen Mix 2 und Mix 3 (mit max. 50 % Ziegelmehl) und Mix 9 (mit max. 20 % Ziegelmehl und 20 % Reisschalenasche) als die günstigsten Mischungen im Hinblick auf das Treibhausgaspotenzial hervor. Auch der Mix 5 mit 50 % Flugasche reduziert das Treibhausgaspotenzial enorm. Allerdings ist hier darauf hinzuweisen, dass auch Vietnam langfristig aus fossilen Energieträgern aussteigen möchte, so dass diese Lösung nur eine Temporäre darstellen kann. Auch in den Wirkungskategorien Ressourcenverknappung, Landnutzung und Eutrophierung erbrachten die Mischungen Mix 2 und Mix 9 die Ergebnisse mit der nachhaltigsten Umweltschonung.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen kann festgehalten werden, dass die Materialmischung mit 43 % Ziegelmehl, 54 % Ton und je 1,5 % Feinsand und Bentonit eine umweltfreundliche Materialmischung darstellt, die für DEBS-Dich-



**Bild 3:** Energiebedarfsanalyse für verschiedene mineralische Abdichtungsmaterialien

tungsschichten der Deponieklasse 3 geeignet ist. Auch die Materialmischung mit 50 % Ziegelmehl und 50 % Ton hat einen substanziiell positiven Umweltfußabdruck und ist bis Deponieklasse II als Dichtungskomponente geeignet. Eine Mischung aus 20 % Ziegelmehl, 20 % Reisschalenasche und 60 % Ton ermöglicht die Nutzung bis Deponieklasse II. Ein bis zu 80 % höherer Anteil an Ton schafft zwar ein Dichtungsmaterial, welches sogar für Deponien der Klasse III Anwendung finden kann, allerdings mit deutlich erhöhtem Umweltfußabdruck.

Der Einsatz von Sekundärrohstoffen als alternative Baustoffe bietet einen erheblichen Umweltvorteil, da die Menge an benötigten Primärrohstoffen reduziert wird. Auch aus wirtschaftlicher Sicht würden die Kosten für die Deponieentsorgung oder den Transport von Primärmaterialien aus großen Entfernungen durch den Einsatz alternativer Materialien gesenkt.

## Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des SAND! Projektes im Rahmen des CLIENT II-Programms, Förderkennzeichen 033R212C.

## Literatur

- [1] Asian Development Bank (2014). Metabolism of Six Asian Cities; Asian Development Bank: Manila, Philippines, verfügbar online: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/59693/urban-metabolism-six-asian-cities.pdf>, abgerufen 29.12.2023
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung-DepV). v. 27.4.2009 I 900, 2009, p. 30.
- [3] Pötzsch, G.; Busch, G. (2001): Ziegelbruch – ein alternatives Dichtungsmaterial für Deponien, [http://www.deponie-stief.de/pdf/abdichtung\\_pdf/minab\\_cb.pdf](http://www.deponie-stief.de/pdf/abdichtung_pdf/minab_cb.pdf)
- [4] FAO. Rice Market Monitor; FAO: Roma, Italy, 2018.
- [5] Elhakim, A. F. (2016). "Estimation of soil permeability," Alexandria Eng. J., vol. 55, no. 3, pp. 2631–2638, Sep. 2016.
- [6] DIN EN ISO 14040:2021-02 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020

- [7] ecoinvent, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.6 (2019)
- [8] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, [online] 21(9), pp.1218–1230. Online verfügbar: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>
- [9] PRé Sustainability (2022). SimaPro Model, <https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>

## Autoren

### Ass.-Prof. Dr.-Ing. Le Hung Anh

Projektleiter des SAND! Projektes auf vietnamesischer Seite  
Industrial University of Ho-Chi-Minh City  
Institute for Environmental Science, Engineering & Management  
Ho Chi Minh City, Vietnam  
[lehunganh@iuh.edu.vn](mailto:lehunganh@iuh.edu.vn)

### Prof. Dr. Petra Schneider

Projektleiterin des SAND! Projektes auf deutscher Seite  
Hochschule Magdeburg-Stendal  
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit  
39114 Magdeburg  
[petra.schneider@h2.de](mailto:petra.schneider@h2.de)



## Deponiebau



Müller, M.; Hagen, F. et al.: Qualitätsmanagement im Deponiebau. In: WASSER UND ABFALL, Ausgabe 9/2023. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2023. <https://sn.pub/DIZOYU>

Dachroth, W.: Deponietechnik. In: Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2017. <https://sn.pub/RquUMj>



Mehr erfahren durch aktuelle Berichterstattung branchenübergreifend zu den Themen **Wasser, Abfall, Energie, Umwelt und Recht**. Informieren Sie sich zehn Mal im Jahr mit den aktuellen Ausgaben zum Vorteilspreis sowie exklusiv für alle Abonnenten kostenlos das digitale und interaktive E-Magazin und das PDF-Archiv mit allen Fachbeiträgen seit 1999.



[www.wasserundabfall.de](http://www.wasserundabfall.de)

