



DMT GmbH & Co. KG
Gutachten im Auftrag der Thüringer Landtagsfraktion
BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN

Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 1 von 41
							Stand: 21.01.2021

Gutachten

Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

DMT GmbH & Co. KG

DMT-Bericht-Nr.: lt. U2860-GR-CME-G

Hamburg, 21.01.2021



(Dr. O. Stoschek)



(Dr. J. Feinhals)



Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 2 von 41
							Stand: 21.01.2021

Impressum:

Auftraggeber: BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN
Landtagsfraktion Thüringen
Jürgen-Fuchs-Straße 1
99096 Erfurt

Ersteller: Stefan Coninx
Dr. Jörg Feinhals
Julia Stümpel

DMT GmbH & Co. KG
Internet: www.dmt.de

Dieser Bericht wurde im Auftrag der Landesfraktion Thüringen BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN erstellt.

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 3 von 41
							Stand: 21.01.2021

0 KURZFASSUNG

Autoren: Stefan Coninx, Dr. Jörg Feinhals, Julia Stümpel

Titel: Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Stand: 21.01.2021

Durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung entfallen bis 2038 sukzessiv ca. 6 Mio. Mg/Jahr Gips aus den Rauchgasentschwefelungsanlagen der deutschen Kohlekraftwerke. Der im Kalkwaschverfahren entstehende technische REA-Gips ist chemisch betrachtet identisch mit Naturgips und gleicht sich in den bautechnischen Eigenschaften. REA-Gips wird wie Naturgips in der Baustoffindustrie für Baustoffprodukte verwendet. In dem vorliegenden Gutachten erfolgt die Darstellung der Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips.

Bedingt durch die Aufbereitungsprozesse von Phosphorgips kommt es zu einer Anreicherung natürlicher radioaktiver Isotope, die im bergmännisch gewonnenen Phosphorgestein enthalten sind. Weltweit vorliegende Messwerte für Phosphorgipshalden zeigen, dass Referenzwerte nach § 135 StrlSchG überschritten werden können. Die bisher in Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse zeigen aber auch, dass eine signifikante Senkung auch weit unterhalb bestehender Referenzwerte für eine gesundheitliche Unbedenklichkeit möglich ist. Dies kann einerseits mit Hilfe einer Sortierung des Phosphorgipses (z.B. durch Förderbandfreimessanlage), andererseits aber auch durch Einschränkung auf Produktionsprozesse erfolgen, die eine Vermischung mit anderen Materialien erfordern.

DMT stellt fest, dass Phosphorgips als Ersatzstoff für den Einsatz in deutschen Gipswerken für Bauprodukte dienen und somit einen wertvollen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten kann. Größere Phosphorgipshalden sind vor allem in Polen an der Odermündung, in Serbien an der Donau und in Varna am Schwarzen Meer anzutreffen. Ein Vergleich der Transportkosten wird in Abschnitt 5 aufgezeigt.

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 4 von 41
							Stand: 21.01.2021

INHALTSVERZEICHNIS

0	KURZFASSUNG	3
	INHALTSVERZEICHNIS	4
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5
	TABELLENVERZEICHNIS.....	6
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	7
1	EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	8
2	PHOSPHORGIPS AUS DER PHOSPHORSÄUREHERSTELLUNG	10
2.1	NASSPRODUKTIONSPROZESS	10
2.2	PHOSPHORGIPS ALS TENORM.....	11
2.3	PHOSPHATLAGERSTÄTTEN	14
2.4	STANDORTE DER PHOSPHORSÄURE - PRODUKTIONSSTÄTTEN.....	16
2.5	JAHRESKAPAZITÄTEN - PHOSPHORGIPSNUTZUNG AUS EUROPA	19
3	NUTZUNG VON PHOSPHORGIPS ALS BAUSTOFF UND BAUMATERIAL	23
4	AUFBEREITUNG DES PHOSPHORGIPSES.....	25
4.1	RADIOLOGISCHE AUFBEREITUNG	25
4.2	AKTIVITÄTSINDEX UND NICHT ZU ÜBERSCHREITENDE WERTE NACH § 135 STRLSCHG	28
5	TRANSPORTKOSTEN.....	30
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	31
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	33
	ANHANG	37

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 5 von 41
							Stand: 21.01.2021

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Rauchgasentschwefelungsanlage (Kalkwaschverfahren) [47].....	8
Abbildung 2: Kristallisationsphasen von CaSO ₄ [46]	11
Abbildung 3: Phosphatlagerstätten weltweit [6].....	14
Abbildung 4: Förderbandfreimessanlage.....	26
Abbildung 5: Arbeits- und Messprinzip der Förderbandfreimessanlage	27

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 6 von 41
							Stand: 21.01.2021

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Radioaktivität in Phosphorgips (nach Staaten - Ort der Halden und Ursprungsquelle) [2].....	13
Tabelle 2: Produktion von mineralischen Rohstoffen einzelner Länder: Phosphat (P ₂ O ₅ Gehalt) Quelle: [8]	15
Tabelle 3: Produzenten von Phosphorsäure und Düngemittel in Europa (Datenbasis von [11])	17
Tabelle 4: Produktionsstätten von Phosphorsäure mit fehlender Datenbasis.....	19
Tabelle 5: Phosphorsäurekapazitäten in Marokko (Datenbasis aus [11])	22
Tabelle 6: Aktivitätsindex I für vorgesehene Anwendungen von Phosphorgips (Proben aus Elixir Prahovo)	28
Tabelle 7: Kosten für den Transport von Phosphorgips nach Deutschland in €/Mg	30

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 7 von 41
							Stand: 21.01.2021

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

CaSO ₄ ·XH ₂ O	Calciumsulfat (Phosphorgips) (XH ₂ O steht für die verschiedenen Hydratstufen)
DAP	Diamoniumhydrogenphosphat
DMT	DMT GmbH & Co. KG
ESEE	East & South-East Europe
H ₃ PO ₄	Phosphorsäure
HPGe	Halbleiterdetektor aus hochreinem Germanium (<i>High Purity Germanium</i>) in der Gammastreptomietrie
MAP	Monoammoniumdihydrogenphosphat
Mg	Megagramm (1 Mg ≙ 1 Metrische Tonne)
NORM	Naturally Occuring Radioactive Materials
PG	Phosphorgips
PS	Phosphorsäure
²²⁶ Ra	Radium Isotop ²²⁶ Ra (Ra-226)
raPHOSafe	EU gefördertes Programm raPHOSafe - Classification and Sorting of Radium-rich Phosphogypsum Tailings
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
REE	Rare Earth Elements (seltene Erden)
TENORM	Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material
²³² Th	Thorium Isotop ²³² Th (Th-232)
TSP	Triple-Superphosphat
²³⁸ U	Uran Isotop ²³⁸ U (U-238)

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 8 von 41

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Bei der Verarbeitung von natürlichen Phosphatvorkommen in der Düngemittelproduktion entsteht das Abfallprodukt Phosphorgips (PG), das im Regelfall am Entstehungsort aufgehaldet wird. In Folge der Verarbeitungsprozesse haben sich weltweit enorme Mengen von PG auf Halden gesammelt, die oft Küstenregionen einnehmen und das Landschaftsbild prägen. Problematisch bei den Phosphorgipshalden ist die Radioaktivität der natürlich vorkommenden radioaktiven Materialien (NORM - Naturally Occuring Radioactive Materials), hauptsächlich durch das Radionuklid ^{226}Ra (Radium), welches zumeist inhomogen in den typischen Halden verteilt ist. Das von den Phosphorgipshalden ausgehende Umwelt- und Gesundheitsrisiko kann ermittelt werden, so dass der begrenzte und mittlerweile wertvolle Rohstoff Gips recycelt werden kann, der für verschiedene Anwendungen, vor allem im Bauwesen, einsetzbar ist.

Durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung entfallen sukzessiv bis 2038 ca. 6 Mio. Mg Gips pro Jahr. In den Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) der fossil befeuerten Kraftwerken werden Schwefelverbindungen (SO_2 und SO_3) aus dem Rauchgas entfernt. In dem gängigsten Verfahren, dem Kalkwaschverfahren, werden die Rauchgase durch das in wässriger Lösung enthaltene Absorptionsmittel (Kalk oder Kalksteinsuspension) gereinigt. Das zu reinigende Rauchgas wird in einem Waschturm (Absorberturm) mit einer Waschsuspension aus Wasser und Kalkstein besprüht. Das Schwefeldioxid reagiert dort mit Kalk und unter Zugabe von Sauerstoff entsteht schließlich Calciumsulfat bzw. Gips (siehe Abbildung 1). Der REA-Gips, welches als Nebenprodukt in der Rauchgasreinigung entsteht, ist ein wertvolles Produkt für die Baustoffindustrie. [1]

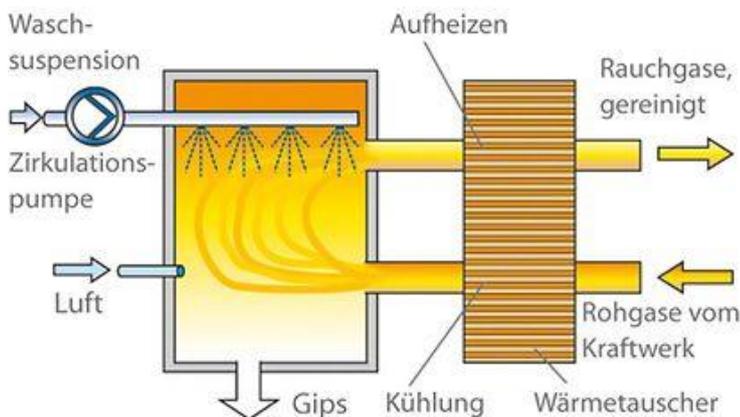


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Rauchgasentschwefelungsanlage (Kalkwaschverfahren) [47]

Mit dem Wegfall des Gipses aus den Rauchgasentschwefelungsanlagen müssen neue Quellen für Gips für die Baustoffindustrie erschlossen werden, z. Bsp. neue und bekannte Quellen aus deutschen Naturgipsvorkommen. Um Ressourcen im Naturgipsvorkommen in Deutschland zu schonen, prüft die DMT, ob Phosphorgips als Ersatzstoff für REA-Gips für den Einsatz in deutschen Gipswerken für Bauprodukte tauglich ist.

Im Rahmen eines Gutachtens werden folgende Punkte untersucht:

- Darstellung von Standorten zur Herstellung von Phosphordünger mit entsprechender Aufhaldung von Phosphorgips in der EU (einschließlich Serbien) (Kapitel 2.3 - 2.5).



Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 9 von 41
							Stand: 21.01.2021

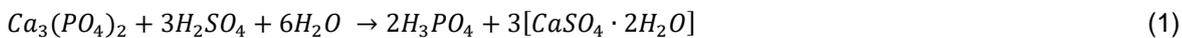
- Hierbei werden auch die Jahreskapazitäten der Anlagen (Kapitel 2.5) sowie eine kostengünstige Transportmöglichkeit nach Deutschland berücksichtigt (Kapitel 5). Von großem Interesse sind Mengen, die den bis 2038 wegfallenden REA-Gips ersetzen können sowie zum Erhalt der Thüringer Naturgipsvorkommen beitragen. Es sollen Gips- und Zementstandorte beliefert werden können, die z.B. in Nordrhein-Westfalen, Berlin, Hamburg und Saarland liegen.
- Darstellung der Aufbereitung des Phosphorgipses, so dass die Grenzwerte für die Strahlenbelastung für das Personal und für die Bevölkerung eingehalten werden können (Kapitel 4).
- Erläuternde Darstellung von ggf. schon existierenden Beispielen der Nutzung von Phosphorgips als Ersatz für Naturgips (Kapitel 3).

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 10 von 41
							Stand: 21.01.2021

2 PHOSPHORGIPS AUS DER PHOSPHORSÄUREHERSTELLUNG

2.1 NASSPRODUKTIONSPROZESS

Die Primärquelle von Phosphorsäure für die Düngemittelproduktion ist Rohphosphat (Engl.: Phosphate rock). Phosphorsäure wird im sogenannten Nassverfahren hergestellt, wobei das gemahlene Rohphosphat mit Schwefelsäure (H_2SO_4) behandelt wird. Bei der Reaktion verbindet sich das Calcium aus dem Phosphatgestein mit dem Sulfat und bildet Calciumsulfat ($CaSO_4$), das gemeinhin als Phosphorgips bezeichnet wird. Die allgemeine Reaktion des Nassverfahrens gemäß [2] lautet:



Phosphatvorkommen enthalten Calcium und Phosphor, im Wesentlichen als Tricalciumphosphat, $Ca_3(PO_4)_2$. Phosphaterze können darüber hinaus ein oder mehrere Phosphatminerale enthalten, die für die kommerzielle Nutzung geeignet sind, wie z. B. Calciumfluorophosphat. Die Mineralogie von phosphorreichen Gesteinen ist komplex und es gibt mehr als 200 bekannte Phosphatminerale. Die Hauptmineralgruppe ist die Apatitgruppe der Calciumphosphate mit der allgemeinen chemischen Formel $Ca_{10}(PO_4,CO_3,OH)_6(OH,F,Cl)_2$. Die genaue chemische Zusammensetzung variiert je nach Herkunft. [3]

Die Bruttoreaktion für den Schwefelsäureaufschluss der Rohphosphate (Flurapatit) im Rahmen des Nassverfahrens lautet:



$$X = 0, \frac{1}{2} \text{ oder } 2 \quad (2)$$

Wie auch in Formel (1) fällt in Formel (2) das im Rohphosphat vorhandene Ca^{2+} als Calciumsulfat $CaSO_4 \cdot XH_2O$ (Phosphorgips) aus. Ob das Calciumsulfat wasserfrei (Anhydrit $X = 0$), oder als Hemi- bzw. Halb- ($X = \frac{1}{2}$) oder Dihydrat ($X = 2$) gebildet wird, hängt von den gewählten Temperatur- und Konzentrationsverhältnissen bei der Aufschlussreaktion ab (siehe Abbildung 2). Die Verfahren zur Nassphosphorsäure-Herstellung werden durch die Form der Ausfällung des Calciumsulfats als Dihydrat, Hemihydrat oder Anhydrit unterschieden. Abhängig von dem gewählten Verfahren können unterschiedliche Phosphatausbeuten erzielt werden.

Ein Großteil der Phosphorsäure wird nach dem Dihydratverfahren hergestellt. Das Anhydrit-Verfahren, welches die stärkste Phosphorsäure liefert, konnte sich wegen der hohen Prozesstemperaturen und der damit verbundenen hohen Korrosion sowie niedriger P_2O_5 -Ausbeuten nicht behaupten. Bis auf eine Ausnahme (Vlaadringen in den Niederlanden) konnte sich auch das Hemihydrat-Verfahren nicht behaupten, obwohl hier die Temperaturen nicht so hoch liegen wie beim Anhydrit-Verfahren. [4] Im Hemihydrat Verfahren werden im Vergleich zum Dihydratverfahren eine höhere P_2O_5 Konzentration erzielt und die Verunreinigungen fallen geringer aus [2]. Da der Gips aus den Rauchgasentschwefelungsanlagen (kurz REA-Gips) ebenfalls als Dihydrat auftritt, liegt der Phosphorgips aus dem Nassverfahren zum größten Teil in derselben Form vor.

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 11 von 41
							Stand: 21.01.2021

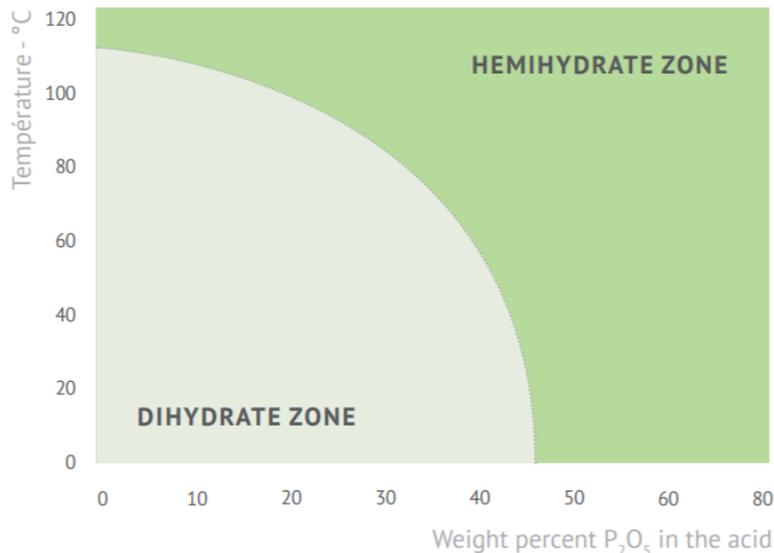


Abbildung 2: Kristallisationsphasen von CaSO_4 [46]

Zu Beginn der technologischen Abläufe steht die Gewinnung der Phosphat-Erze (Engl.: Phosphate ore) im Tage- oder Tiefbau. Die gewonnenen Roherze werden in Aufbereitungsanlagen zu Phosphat-Konzentrat (Rohphosphaten bzw. Phosphatgestein zu engl.: Phosphate rock) angereichert und dann zu den Chemiebetrieben in den verarbeitenden Ländern transportiert oder vor Ort weiterverarbeitet. Ein unmittelbarer Verkauf und Nutzung des Fördererzes kommt selten vor, da mit der Aufbereitung eine Steigerung des P_2O_5 -Gehaltes erreicht wird. [4]

Bei der Produktion von 1 Mg Phosphorsäure entstehen ca. 5 Mg Phosphorgips, sodass geschätzt wird, dass weltweit jährlich ca. 100-280 Mio. Mg Phosphorgips als Nebenprodukt anfallen [5]. Laut [3] und [4] wird die erzeugte Phosphorgipsmenge pro Mg erzeugtes P_2O_5 in Form von Phosphorsäure auch auf 4-6 Mg beziffert. Gemäß [3] wird das weltweit jährlich produzierte PG-Volumen auf ca. 170 Mio. Mg geschätzt.

2.2 PHOSPHORGIPS ALS TENORM

Phosphorgips entsteht bei der Herstellung von mineralischen Phosphatdüngemittel aus dem mineralischen Rohstoff Phosphat. Die Phosphaterze werden in Aufbereitungsprozessen zu Rohphosphat bzw. Phosphatgestein aufbereitet. Phosphaterze haben abhängig von ihrer Entstehungsgeschichte P_2O_5 -Gehalte von 4 bis 37 Prozent. Sie beinhalten neben Phosphat auch Calcium und andere Elemente wie Fluor, Chlor, Thorium, Uran, Vanadium oder Seltene Erden. Diese können sich positiv oder negativ auf den Wert des Gesteins auswirken, je nachdem, ob die Begleitelemente zu erhöhten Kosten in der Aufbereitung führen oder wirtschaftlich als Nebenprodukt gewonnen werden können. [6]

Phosphaterze enthalten von Natur aus radioaktive Stoffe, im Wesentlichen ^{238}U und ^{232}Th sowie deren Zerfallsprodukte. Aufgrund des Gehaltes an Radionukliden des Ausgangsmaterials enthalten auch die Produkte im Nassproduktionsprozess der Düngemittelherstellung radioaktive Stoffe. Während das ^{238}U und ^{232}Th zu 86 % und zu 70 % in die Phosphorsäure übergehen, wird das Tochternuklid von ^{238}U , ^{226}Ra , zu 80 % im Phos-

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 12 von 41
							Stand: 21.01.2021

phorgips konzentriert, da sich Radium chemisch wie das im Gips vorhandene Calcium verhält. Aufgrund seines Radionuklidgehalts wird Phosphorgips als TENORM („Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material“) geführt. [5] [7]

Die Eigenschaften von PG variieren abhängig von der Art des verwendeten Phosphaterzes, der Art des eingesetzten Nassverfahrens, der Effizienz des Anlagenbetriebs, der Entsorgungsmethode sowie dem Alter, der Lage und der Tiefe der Deponie oder Halde, in dem das PG abgelagert wird. Nicht zuletzt spielt auch die Art und Weise der Probenentnahme eine entscheidende Rolle. [5] Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Radionuklidkonzentrationen von Phosphorgipsproben verschiedener Herkunftsländer. Die Tabelle verdeutlicht, dass eine große Schwankungsbreite der ²²⁶Ra Aktivitätskonzentrationen zu verzeichnen ist (0,02 Bq/g in Schweden bis 1,48 Bq/g in den USA). Innerhalb eines Herkunftslandes können die Radiumaktivitätskonzentration ebenfalls stark schwanken (siehe Brasilien <0,004 – 0,67 Bq/g).



Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 13 von 41

Tabelle 1: Radioaktivität in Phosphorgips (nach Staaten - Ort der Halden und Ursprungsquelle) [2]

Ort der Phosphor-gipshalden	Phosphatgesteinsquellen		Konzentration der radioaktiven Aktivität (Bq/g)							
	Original	Typ	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th
Australien		sedimentär	0,5		0,5				0,01	
Belgien					0,44				<0,01	
Brasilien	Brasilien	magmatisch			<0,004–0,67	0,05–0,89	0,05–0,68	0,01–0,18		
Kanada (Alberta)	Idaho	sedimentär			0,9					0,01
Ägypten	Ägypten	sedimentär	0,13		0,41			0,019		
Finnland					0,18			0,012		
Frankreich			0,015		0,44			0,003		
Deutschland		sedimentär			0,6			<0,005		
Ungarn	Syrien	sedimentär			1,1			0,07		
Indien	Marokko	sedimentär	0,17		0,82					
			(0,14–0,21)		(0,45–0,94)					
Italien	Gela ^a	sedimentär			0,41–0,42					
Niederlande		sedimentär	0,05		0,9–1,25					
Nordische Länder		sedimentär			0,15–0,6	<2/2	<2/2	0,06		
Südafrika	Südafrika	magmatisch	0,07 (0,05–0,07)		0,11 (0,09–0,12)	n.N. ^b	n.N. ^b	0,33 (0,13–0,59)	0,41 (0,35–0,5)	0,5 (0,24–0,63)
Südafrika	Togo und Südafrika	25% sedimentär 75% magmatisch	0,01–0,08		0,08–0,33	0,08–0,33	0,08–0,33	0,01–0,17	0,01–0,21	0,01–0,21
Spanien		sedimentär	0,02–0,2		0,17–0,6	0,16–0,8	0,17–0,8	0,01–0,02		
Schweden	Russland (Kola)	magmatisch			0,02			0,06		
Tansania	Tansania	sedimentär	0,09	1,05	3,2			0,1		0,15
Tunesien	Tunesien (Sfax)		0,04–0,07		0,20–0,22			0,01–0,02		
Großbritannien			0,13		0,63–0,78			0,01–0,02		
USA (Florida)	Central Florida	sedimentär	0,08–0,2	0,1–2,9	0,3–2,1	1,3–1,4	1–1,5	0,004–0,05		0,001
USA (Florida)	Nord Florida	sedimentär	0,005		0,50–0,55					
USA			0,2		1,22–1,48			0,01		
Slowenien		sedimentär			0,4					

a Pa-234m: <0.01–0.025; Pb-214: 0.29–0.31; Bi-214: 0.25–0.27; Pb-212, Bi-212: 0.02.

b n.N.: unter der Nachweisgrenze

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 14 von 41
							Stand: 21.01.2021

2.3 PHOSPHATLAGERSTÄTTEN

Phosphatlagerstätten werden allgemein als abbauwürdig angesehen, wenn mit Hilfe von Anreicherungsverfahren ein P_2O_5 -Gehalt von 30 -38 % erzielt werden kann. Dies entspricht ein Roherzgehalt zwischen 4 und 38 %). [4]

Phosphate können marin-sedimentär, magmatisch oder als Guanoablagerung entstanden sein. Weltweit dominierend sind die marin-sedimentär gebildeten Lagerstätten, die rund 90 % aller Vorkommen ausmachen und durch chemisch-biologische Vorgänge im Meer entstanden sind. Sie werden heute vor allem in Küstennähe abgebaut und weisen im Vergleich zu den aus Magma entstandenen Lagerstätten größere Verunreinigungen auf, haben jedoch einen höheren Phosphatanteil. Die als Guano-Lagerstätten bezeichneten Phosphatvorkommen machen nur etwa 0,3 % der weltweiten Vorkommen aus und sind aus Exkrementen und Knochen von Vögeln ozeanischer Inseln entstanden. Sie sind in der Regel klein und zum Großteil bereits erschöpft. 85 % der derzeit geförderten Phosphate stammen aus sedimentären Lagerstätten, knapp 15 % aus magmatischen. Phosphatlagerstätten werden fast ausschließlich im industriellen Tagebau abgebaut. [6]

Abbildung 3 zeigt die größten derzeit bekannten Phosphatlagerstätten der Welt (> 100 Mio. Mg):

Quelle: BGR (2013)

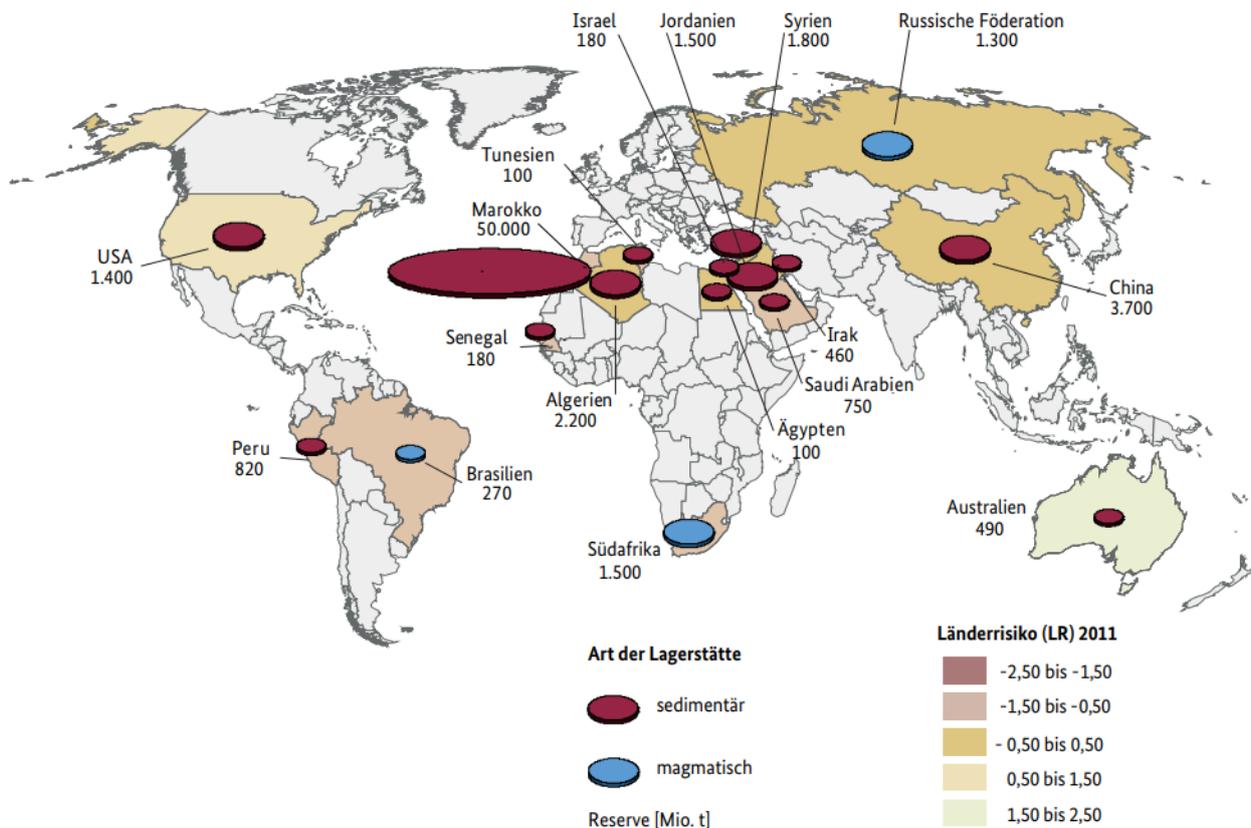


Abbildung 3: Phosphatlagerstätten weltweit [6]

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 15 von 41
							Stand: 21.01.2021

Die Abbildung zeigt, dass sich die größten Phosphatvorkommen in den USA, der ehemaligen UdSSR, China, Nordafrika und dem Nahen Osten erstrecken. Folglich zeigen sich diese Länder auch als die wichtigsten Hersteller von Phosphatgestein und Phosphatdünger. Tabelle 2 zeigt die Produktionszahlen von mineralischem Phosphat einzelner Länder.

Tabelle 2: Produktion von mineralischen Rohstoffen einzelner Länder: Phosphat (P₂O₅ Gehalt)
Quelle: [8]

Phosphates (P₂O₅-Content)

Country	2014 metr. t	2015 metr. t	2016 metr. t	2017 metr. t	2018 metr. t	Rem
Algeria	482 100	438 200	433 200	378 100	409 400	1e
Australia	448 500	236 375	238 494	216 670	195 720	1e
Brazil	2 521 000	2 167 000	2 046 000	1 870 000	1 785 000	1e
Chile	6 400	5 470	1 740	1 190	1 160	1e
China	36 131 400	42 611 700	43 319 400	36 939 600	28 897 800	1e
Christmas Island	154 330	177 100	148 120	147 890	127 730	1e
Colombia	10 420	23 900	21 030	13 850	12 260	1e
Egypt	1 400 970	993 830	741 240	1 276 000	1 300 000	2n
Finland	340 640	344 360	338 230	352 300	356 070	1e
India	363 060	368 350	288 830	386 910	311 420	3e
Iran	36 527	65 342	77 912	88 715	105 840	1a
Iraq	25 000	0	40 000	40 000	377 120	1e
Israel	1 040 700	1 192 900	1 223 600	1 032 900	1 100 500	1n
Jordan	2 285 990	2 667 520	2 557 170	2 780 030	2 567 170	1n
Kazakhstan	349 500	387 100	348 600	368 400	381 200	1e
Korea, North	95 000	95 000	95 000	95 000	95 000	2n
Malawi	1 900	2 110	430	170	270	1e
Mexico	520 040	578 830	988 280	692 150	248 950	1a
Morocco	8 748 400	8 388 700	8 601 000	10 490 100	10 960 200	1e
Nauru	58 000	45 700	39 800	50 900	23 000	1e
Pakistan	18 350	15 230	20 730	11 100	0	1e
Peru	4 136 020	4 241 420	4 013 220	3 211 140	3 917 140	1e
Philippines	4 340	5 930	8 690	8 600	8 600	2n
Russia	4 173 000	4 485 000	4 797 000	5 148 000	5 304 000	1e
Saudi Arabia	382 200	1 530 000	1 620 000	1 701 000	1 827 000	1e
Senegal	309 820	589 110	886 500	841 020	775 410	1e
South Africa	703 900	648 300	593 800	727 800	720 400	1e
Sri Lanka	21 910	18 380	13 600	14 850	16 760	1e
Syria	370 000	179 100	0	38 700	38 700	2n
Tanzania	162 360	49 020	5 200	300	0	1e
Thailand	500	0	0	2 400	0	1e
Togo	394 600	418 100	306 600	266 260	370 810	1e
Tunisia	1 097 400	936 200	1 062 400	1 145 300	812 800	1e
Turkey	181 200	214 000	231 800	0	0	1a
United States	7 110 000	7 710 000	7 615 000	7 840 000	7 250 000	1e
Uzbekistan	136 510	166 800	170 000	170 000	170 000	2n
Venezuela	10 030	7 370	42 900	19 320	16 800	3e
Vietnam	741 270	877 020	942 750	1 376 400	1 627 110	3e
Total	74 973 287	82 880 467	83 878 266	79 743 065	72 111 340	

Der größte - und einzige - europäische Produzent von mineralischen Phosphat ist Finnland mit einer Produktion von 356.070 Mg im Jahr 2016 [8]. Im Vergleich dazu hat Europa im Jahr 2015 mehr als 6,5 Mio. Mg Naturphosphate importiert. Mehr als 2,6 Mio. Mg Phosphatgestein wurden von ost- und südosteuropäischen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 16 von 41
							Stand: 21.01.2021

Ländern importiert. Die meisten Phosphatreserven befinden sich in Nordafrika (ca. 77 %). Die weltweite Produktion wird jedoch von China dominiert, das etwa 52 % der Produktion beisteuert. Die europäische Produktion von Phosphat ist auf Finnland reduziert; sie trägt weniger als 0,5 % zur weltweiten Produktion bei. [7]

Mehr als 40 % des nach Europa importierten Phosphatgesteins wird von nordafrikanischen Ländern exportiert, fast 50 % von afrikanischen Ländern. Der Nahe Osten trägt mit weniger als 15 % des Phosphatgesteins zur europäischen Produktion bei. Ungefähr 30 % des in Europa aufbereiteten Phosphatgesteins stammt aus Russland; Litauen, Rumänien, Weißrussland und Belgien verwenden dieses Produkt. In den Ländern der ESEE (East & South-East Europe) -Region ohne Weißrussland und das Baltikum werden mehr als 70 % des Phosphatgesteins aus Nordafrika importiert; mehr als 80 % aus afrikanischen Ländern und weitere 10 bis 15 % aus dem Nahen Osten. [7]

Nach der Quelle [3] werden bis zu 85 % des im Anreicherungsprozess erzeugten Phosphatgesteins in Zwischen- oder Endprodukte umgewandelt, indem der als Nassverfahren bezeichneter Säureaufschluss durchgeführt wird. Eine relativ geringe Menge wird im sogenannten „thermischen Verfahren“ direkt in elementaren Phosphor umgewandelt. Es wird geschätzt, dass 71 % des gesamten produzierten Phosphatgesteins zu Phosphorsäure verarbeitet werden (wobei in den meisten Fällen große Mengen an Phosphorgips mitproduziert werden), 24 % werden direkt zu Düngemitteln verarbeitet (im Gegensatz zur indirekten Verarbeitung über Phosphorsäure) und die restlichen 5 % werden direkt zu verschiedenen anderen Produkten verarbeitet. Laut [9] beziffert sich die jährliche Produktion von P_2O_5 in Form von Phosphorsäure auf 43 Mio. Mg. Davon werden 17 Mio. Mg in China und 8,4 Mio. Mg in den USA produziert. Der Südosten und Nordosten Asiens kommt auf eine jährliche Produktion von 10 Mio. Mg.

2.4 STANDORTE DER PHOSPHORSÄURE - PRODUKTIONSSTÄTTEN

Traditionell befinden sich die produzierenden Unternehmen zum Abbau von Phosphaterzen in Asien (China), Nordafrika (Marokko, Ägypten), Nordamerika (USA) und Nahost (Jordanien, Saudi-Arabien). Die größten Produzentenländer, China, Marokko und die USA, fördern zusammen zwei Drittel aller Phosphate. [6] Phosphorsäure, die aus Phosphatgestein und Schwefelsäure hergestellt wird, ist der Haupteinsatzstoff in der Produktion von fast allen in der Landwirtschaft verwendeten Phosphatdünger. Etwa 85 % der produzierten Phosphorsäure wird zur Herstellung von Düngemitteln verwendet. [10] Sie wird hauptsächlich in drei Phosphatsalze umgewandelt, die als Düngemittel verwendet werden. Diese sind Triple-Superphosphat (TSP), Diamoniumhydrogenphosphat (DAP) und Monoammoniumdihydrogenphosphat (MAP). [9]

Die meisten Phosphatdüngemittelproduzenten sind selbst im Bergbau von Phosphaterzen tätig und sichern sich somit ihre Rohstoffversorgung. Nur 30 % der Phosphatdüngemittelhersteller sind auf den Kauf von Rohphosphat oder Phosphorsäure angewiesen. Rund 80 % des weltweit geförderten Rohphosphats wird zudem vor Ort zu Phosphorsäure oder fertigen Düngemitteln weiterverarbeitet. In China werden 38 Prozent der weltweit produzierten Phosphatdüngemittel hergestellt, in den Vereinigten Staaten 15 Prozent, in Indien zehn Prozent und in Russland rund sieben Prozent. Insgesamt zeigt sich auch hier eine starke Konzentration unter den Produzenten. Zu den wichtigsten Unternehmen der Phosphatindustrie gehören unter anderem die chinesische Yuantianhua Gruppe, das marokkanische Staatsunternehmen Office Chérifien des Phosphates (OCP), das US-amerikanische Unternehmen Mosaic und der russische Düngemittelhersteller PhosAgro. [6] Die europäischen Hersteller von Phosphorsäure und Phosphatdüngemittel sind dementsprechend begrenzt. Tabelle 3 zeigt die europäischen Phosphorsäureproduktionsstätten in Europa. Nicht zu allen Produktionsstätten wurden Angaben zu der produzierten Phosphorsäure (PS) oder zu dem dabei entstehenden Phosphorgips (PG) gefunden (siehe Tabelle 4).



Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 17 von 41

Tabelle 3: Produzenten von Phosphorsäure und Düngemittel in Europa (Datenbasis von [11])

Land, Ort	Firma	Kapazität Phosphorsäureproduktion (*Angaben von lokalen Experten)	Anfallender Phosphorgips (*Angaben von lokalen Experten)	Quellen / weitere Informationen	Kommentar
Belarus, Gomel	BelFert JSC "Gomel chemical Plant	220.000 Mg/Jahr	1.210.000 Mg/Jahr	[12]	
Belgien, Engis	Prayon	120.000 Mg/Jahr	660.000 Mg/Jahr	[13]	Anfallendes Phosphorgips wird bereits zu 100 % recycelt [14]
Belgien, Puurs	Prayon			[13]	Bereits außer Betrieb
Bulgarien, Varna	Agropolychim	/	1.000.000 Mg/Jahr* PG Halden: 35 Mio. Mg*	[15]	
Finnland, Silinjarvi	Yara	225.000 Mg/Jahr	1.237.500 Mg/Jahr	[16]	
Griechenland	PFIC Ltd.	75.000 Mg/Jahr	412.500 Mg/Jahr	[17]	
Kroatien, Kutina	Petrokemija	160.000 Mg/Jahr	880.000 Mg/Jahr		
Litauen	J/S COMPANY LIFOSA / EuroChem	460.000 Mg/Jahr	2.530.000 Mg/Jahr	[18]	
Niederlande, Vlis-singen	Thermphos	145.000 Mg/Jahr			Bereits außer Betrieb
Polen; Gdansk	GDAŃSKIE ZAKŁADY NAWOZÓW FOSFOROWYCH "FOSFOROY"	110.000 Mg/Jahr	605.000 Mg/Jahr PG Halden: 22 Mio. Mg	[19] [20]	



Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: 18 von 41

Polen, Police	ZAKLADY CHEMICZNE POLICE S.A (Grupa Azoty)	475.000 Mg/Jahr	2.612.500 Mg/Jahr PG Halden: 113 Mio. Mg	[19]	
Polen, Wizow	ZAKLADY CHEMICZNE WIZOW		PG Halden: 5 Mio. Mg	[19]	Bereits außer Betrieb
Serbien, Prahovo	Elixir Prahovo	140.000 Mg/Jahr*	PG: 700.000 Mg/Jahr* PG Halden: 8 Mio. Mg*	[21]	
Serbien, Šabac	Elixir Zorka	165.000 Mg/Jahr	907.500 Mg/Jahr	[21]	
Spanien, Huelva	Fertiberia	420.000 Mg/Jahr	PG Halden: 120 Mio. Mg	[22] [23] [24]	Bereits außer Betrieb
Ukraine, Sumy	JSC SUMYKHIMPROM	125.000 Mg/Jahr	687.500 Mg/Jahr PG Halden: 14 Mio. Mg	[25]	
Ukraine, Rivne	OJSC RIVNEAZOT	120.000 Mg/Jahr	660.000 Mg/Jahr		

Hinweis: Die Daten der Tabelle 3 entstammen zum größten Teil der Quelle [11], dessen Angaben allerdings aus dem Jahr 2017 stammen. Nur in einigen Fällen konnten die Angaben durch Informationen von Herstellerwebsites oder durch Anfragen an lokalen Experten aktualisiert werden. Die Menge des bei der Produktion von Phosphorsäure (PS) anfallenden Phosphorgips (PG) der einzelnen Produktionsstätten wurde nicht angegeben. Die anfallende PG Menge wurde rechnerisch ermittelt (Faktor 5,5 für das Verhältnis PG zu PS).

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 19 von 41
							Stand: 21.01.2021

Tabelle 4: Produktionsstätten von Phosphorsäure mit fehlender Datenbasis

Land, Ort	Firma
Frankreich, Les Roches	Prayon
Polen, Alwernia	ZAKLADY CHEMICZNE ALWERNIA S.A.
Rumänien, Bacau	AMURCO SRL (SOFERT)
Rumänien, Navodari	FERTILCHEM
Rumänien, Turnu Magurele	S.C. DONAU CHEM S.R.L.
Rumänien, Valea Calugareasca	VALEA CALUGAREASCA
Ukraine, Rozdil	COMPLEXE DE
Ukraine, Vinnitsa	COMPLEXE DE
Ukraine, Krasnoperekopsk	COMPLEXE DE TITAN
Ukraine, Dnieprodzerzhinsk	DNIPROAZOT, JSC

2.5 JAHRESKAPAZITÄTEN - PHOSPHORGIPSNUTZUNG AUS EUROPA

Laut der Food and Agriculture Organization of the United States wurden 2019 ca. 43 Mio. Mg Phosphorsäure für die Düngemittelindustrie bereitgestellt. Es zeigt sich, dass sowohl die Kapazitäten als auch die Nachfrage an Phosphorsäure für die Herstellung von Phosphatdüngemitteln in den vergangenen Jahren angestiegen ist und auch in Zukunft wachsen wird. [10] Das kontinuierliche Wachstum der Weltbevölkerung erhöht die Nachfrage nach Nahrungsmitteln, was eine Steigerung der Phosphatdüngerproduktion erfordert [26]. Dies gilt auch adäquat für das Angebot von Rohphosphat. Die Weltbergbauproduktion wurde ebenfalls um fast ein Drittel gesteigert. Damit ist Phosphat einer der wichtigsten mineralischen Rohstoffe überhaupt [6]. Mit der stetig steigenden Nachfrage an Phosphatdüngemitteln wird auch in Zukunft die Menge an Phosphorgips aus dem Nassverfahren zur Herstellung von Phosphorsäure ansteigen. Im nachfolgenden Kapitel werden die jährlichen Kapazitäten an Phosphorgips ermittelt, die in Europa in der Herstellung von Phosphorsäure anfallen.

[27] hat die künftig für ein Recycling verfügbaren, jährlichen Phosphorgipsmengen zum Beispiel als Sekundärrohstoff für Baumaterialien (Gipsplatten, Gipsblöcke, Gips als Abbinder für die Zementindustrie etc.) abgeschätzt. Der Phosphorgips, der in der Potentialabschätzung berücksichtigt wurde, stammte entweder aus dem laufenden Betrieb der Phosphorsäuregewinnung oder aus der Aufbereitung bestehender alter Phosphorgips-halden. Für die Betrachtung galten folgende Annahmen:

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 20 von 41
							Stand: 21.01.2021

- Beschränkung auf das Territorium von Europa (EU27 und Resteuropa),
- erste Präferenz auf die Länder, in denen aktuell noch Phosphorsäure gewonnen wird (Belgien, Finnland, Litauen und Russland)
- zweite Präferenz auf die Länder, in denen es noch bestehende Phosphorgipshalden gibt (Griechenland, Serbien, Slowenien, Bulgarien, Tschechien, Polen, Rumänien, Spanien, Italien, Frankreich, Ungarn)
- dritte Präferenz auf die Länder mit einem I-Index von max. 1,
- vierte Präferenz auf die Länder mit einem I-Index von max. 2,
- Länder außerhalb Europas oder mit einem I-Index >2 werden gar nicht berücksichtigt.

[27] ermittelt Potenziale für eine künftige Phosphorgipsnutzung zwischen 0,75 Mio. Mg bis etwa 1,25 Mio. Mg pro Jahr, die für deutsche oder internationale Unternehmen der Gipsverarbeitung für Verarbeitungsanlagen in Deutschland mindestens zu gewinnen sind. Das abzuschätzende maximale Potenzial für die künftige Nutzung von Phosphorgips liegt laut [27] bei mindestens 1,0 Mio Mg bis 2,0 Mio. Mg pro Jahr oder noch darüber.

Berechnet man die Jahreskapazitäten der Phosphorgipsnutzung auf Basis der Tabelle 3, so ergibt sich eine Kapazität von ca. 14,102 Mio. Mg/Jahr in Europa. Angenommen wurde, dass bei der Erzeugung von 1 Mg Phosphorsäure (PS) 5,5 Mg Phosphorgips (PG) erzeugt wird. Der Berechnung hinzugezogen wurden alle Phosphorsäureproduktionsstätten in den grau hinterlegten Tabellenzeilen. Nicht zu allen Produktionsstätten konnten Produktionsraten ermittelt werden. Diese Standorte sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Auch wurden einige Standorte nicht miteinbezogen, da dessen Phosphorsäureproduktionsanlagen bereits in der Vergangenheit stillgelegt wurden (weiß hinterlegte Zeilen). Lagen Angaben von lokalen Experten zu der produzierten Phosphorgipsmenge vor, so wurden diese Werte der Berechnung hinzugezogen. Die schon vor Ort vorhandenen PG Halden wurden nicht berücksichtigt. Diese können zu den jährlichen PG Kapazitäten aus der Phosphorsäureherstellung bzw. Düngemittelherstellung addiert werden. Der Ausschluss von Standorten, die eine bestimmte Radionuklidaktivität des produzierten Phosphorgips überschreiten, ist nicht erfolgt. Es wird angenommen, dass das Recyclingprodukt, indem der Phosphorgips Anwendung findet, nicht vollständig aus diesem besteht, sondern lediglich beigemischt wird. Auch erfolgt eine Vorbehandlung sowie eine Klassifizierung und Sortierung des Phosphorgips ehe es seine Anwendung als Recyclingprodukt findet (siehe Kapitel 4). Durch die Einstellung der Werte für die Sortierung bei der Klassifizierung kann gewährleistet werden, dass nur Phosphorgips zur weiteren Verwendung kommt, der ohne weitere Verdünnung für die Verwendung in weiteren Bauprodukten benutzt werden darf. Durch diese Annahme wird weiterhin verhindert, dass ein Standort aufgrund seiner scheinbar hohen Radionuklidaktivitäten vorschnell ausscheidet. Die Tabelle 1 zeigt, dass die Schwankungsbreite der Radionuklidaktivitäten des Phosphorgips sowohl zwischen den verschiedenen Herkunftsländern, als auch in den einzelnen Ländern zwischen den Produktionsstätten stark variieren kann. Auch liegen für die verschiedenen Länder, aus denen der NORM-Phosphorgips stammt, eine unterschiedliche Datenlage für die gemessenen Radionuklidaktivitäten vor (vgl. Tabelle A1 im Anhang). Das PG-Herkunftsland Marokko zeigt auf den ersten Blick eine sehr hohe ²²⁶Ra-Konzentration von 1.420 Bq/kg, während Spanien eine ²²⁶Ra-Konzentration von 491 Bq/kg zeigt. Beide Länder müssten vergleichbare Werte aufweisen, da Europa zu mehr als 70 % des importierten Phosphatgesteins aus Nordafrika bezieht (vgl. Kapitel 2.3). Die Unterschiede können zum einen auf die unterschiedliche Probenanzahl zurückgeführt werden (Marokko: 1, Spanien: 54). Zum anderen können die Abweichungen auch aus unterschiedlichen Herangehensweisen und Durchführungen der Probenentnahmen resultieren. Die Daten zu den Aktivitäten des Phosphorgips sind nur begrenzt repräsentativ und verlässlich.

Für das Recycling der Phosphorgipshalden muss allerdings zu einem späteren Zeitpunkt für jeden einzelnen Standort geprüft werden, ob sich das Material für die Wiederverwendung eignet oder aufgrund eines zu hohen

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 21 von 41
							Stand: 21.01.2021

Radionuklidgehaltes ausscheidet. Ein zu hoher Radionuklidgehalt des Materials würde, um PG für die Weiterverarbeitung nutzen zu können, zu einem hohen Aufwand in der Aufbereitung und Klassifizierung/Sortierung führen. Auch würde in der Sortierung viel nicht weiter zu verwendendes Ausschussmaterial anfallen, welches zusätzlich entsprechend der Radioaktivität entsorgt werden muss. Dieser entsprechend höhere Aufwand würde in steigenden Kosten resultieren.

Zusammenfassend erfolgte die Abschätzung der Jahreskapazitäten der Phosphorgipsnutzung auf Basis der folgenden Annahmen:

- Beschränkung auf das Territorium von Europa (inkl. Serbien),
- Einbezug der Länder in denen aktuell noch Phosphorsäure gewonnen wird,
- Vernachlässigung von bereits vorhandenen Phosphorgipshalden,
- Vernachlässigung von NORM-Radionuklidaktivitäten in Phosphorgips verschiedener Ursprungsländer (siehe Tabelle 1).

In wieweit sich die hinzugezogenen Produktionsstätten für das Phosphorgipsrecycling wirtschaftlich eignen, muss, wie bereits erwähnt, für jeden Standort separat betrachtet werden. Abhängig vom verwendeten Verfahren und den Eigenschaften der Rohstoffe können verschiedene Stoffeigenschaften des Nebenprodukts Phosphorgips entstehen. Folglich schwanken auch die Kosten für die Aufbereitung. Auch können die Transportkosten für den Import von Phosphorgips durch die unterschiedlich ausfallenden Transportstrecken und den erforderlichen Transportmittel unterschiedlich stark variieren (siehe Kapitel 5).

Für die Abschätzung der Jahreskapazitäten Phosphorgipsnutzung können weiterhin auch nordafrikanische Länder (z.B. Marokko, Tunesien) bzw. Länder im Nahen Osten (z.B. Ägypten, Jordanien) berücksichtigt werden. In diesen Ländern wird Phosphat in größeren Mengen produziert und zu Phosphorsäure oder Düngemittel weiterverarbeitet. Durch Einbeziehung dieser Länder können deutlich höhere Potenziale für eine künftige Phosphorgipsnutzung in Deutschland erzielt werden. Nachfolgende Tabelle 5 zeigt beispielhaft die Produktionskapazitäten von Phosphorsäure in Marokko. Allein in Marokko werden jährlich ca. 5 Mio. Mg Phosphorsäure hergestellt. Dies entspricht eine Phosphorgipsmenge von 27,4 Mio. Mg pro Jahr.

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 22 von 41
							Stand: 21.01.2021

Tabelle 5: Phosphorsäurekapazitäten in Marokko (Datenbasis aus [11])

Land, Ort	Firma	Kapazität Phosphorsäureproduktion	Anfallender Phosphorgips <i>(rechnerisch ermittelt: Verhältnis PG/PS = 5,5)</i>	Weitere Informationen
Marokko, Jorf Lasfar	IMACID	430.000 Mg/Jahr	2.365.000 Mg/Jahr	[28] [29]
Marokko, Safi	MAROC CHIMIE 1			
Marokko, Safi	MAROC CHIMIE 2			
Marokko, Safi	MAROC PHOSPHORE 1			
Marokko, Safi	MAROC PHOSPHORE 1/4	165.000 Mg/Jahr	907.500 Mg/Jahr	
Marokko, Safi	MAROC PHOSPHORE 2	495.000 Mg/Jahr	2.722.500 Mg/Jahr	
Marokko, Jorf Lasfar	MAROC PHOSPHORE 3	750.000 Mg/Jahr	4.125.000 Mg/Jahr	[29]
Marokko, Jorf Lasfar	MAROC PHOSPHORE 4	750.000 Mg/Jahr	4.125.000 Mg/Jahr	[29]
Marokko, Jorf Lasfar	PAKISMGAN MAROC PHOSPHORE	375.000 Mg/Jahr	2.062.500 Mg/Jahr	[29]
Marokko, Jorf Lasfar	JPH MP3/4 LIGNE E	450.000 Mg/Jahr	2.475.000 Mg/Jahr	[29]
Marokko, Jorf Lasfar	JFC 1			[29]
Marokko, Jorf Lasfar	JFC 2			[29]
Marokko, Jorf Lasfar	JFC 3	750.000 Mg/Jahr	4.125.000 Mg/Jahr	[29]
Marokko, Jorf Lasfar	JFC 4			[29]
Marokko, Jorf Lasfar	JFC 5 / BUNGE MAROC PHOSPHORE	375.000 Mg/Jahr	2.062.500 Mg/Jahr	[29]
Marokko, Jorf Lasfar	AFRICA FERTILIZER COMPLEX	450.000 Mg/Jahr	2.475.000 Mg/Jahr	[29]
Marokko, Jorf Lasfar	OCP, Budenheim, Prayon (JV Emaphos)			[29]

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 23 von 41
							Stand: 21.01.2021

3 NUTZUNG VON PHOSPHORGIPS ALS BAUSTOFF UND BAUMATERIAL

Ungefähr 85 % des weltweiten Phosphorgipses wird immer noch ohne Aufbereitung ins Meer oder in Flüsse entsorgt oder in Phosphorgips-Halden oder Teichen abgelagert. Die Entsorgung verursacht eine ernsthafte Verschmutzung und Kontamination, da der Phosphorgips neben Radionukliden auch Schwermetalle enthält (siehe Tabelle A1 und A2 im Anhang). Folglich geht von den PG-Halden ein potentielles Umwelt- und Gesundheitsrisiko aus. [3] geht ausführlich auf die enormen Umwelteinflüsse von in Halden und Teichen abgelagerten Phosphorgips ein. Die Rückgewinnung des Nebenprodukts hat viele wirtschaftliche und ökologische Vorteile. Dies wurde unter anderem in dem EU geförderten Projekt „raPHOSafe - Classification and Sorting of Radium-rich Phosphogypsum Tailings“ gezeigt [30]. Bis zum jetzigen Zeitpunkt erfährt lediglich 15 % des globalen Phosphorgips eine weitere Nutzung zum Beispiel als Bodenstabilisator, Dünger in der Landwirtschaft oder der Gebrauch in der Zementindustrie. [26]

Es wurden in der Literatur umfangreiche Untersuchungen zur Wiederverwendung von PG in verschiedenen Bereichen durchgeführt. Unter anderem sind hier die Quellen [5], [26], [31], [32], [33], [34], [35] und [36] zu nennen. Da in diesem Gutachten Phosphorgips als Ersatz für REA-Gips und Naturgips dienen soll und dieser vorzugsmäßig in der Bauindustrie eingesetzt wird, erfolgt eine Betrachtung, inwieweit PG sich als Rohmaterial für Verwendungszwecke im Bauwesen (z.B. als Rohmaterial für Zement, Gipsplatten –und putzen) eignet. In [3] wurde bereits aufgeführt, dass sich PG mit gewissen Einschränkungen für Bauzwecke verwenden lassen (z.B. Belgien, Brasilien, China und Indien). In Südafrika, wo der Bau kostengünstiger Wohnungen gefördert wird, wird Phosphorgips als potenzieller Baustoff angesehen. Bisher wurde, bis auf wenige regionale Ausnahmen (so z.B. Belgien, s.o.) der Phosphorgips in Europa nicht weiterverwendet, da Unsicherheiten mit dessen radioaktive Belastung einhergingen und auch die jeweilige radiochemische Sanierung des gesamten Haldenmaterials an Phosphorgips i.d.R. als zu teuer erschien, wo Gips aus natürlichen Quellen und aus der Rauchgasentschwefelung noch ausreichend zur Verfügung stehen. [27] In den USA war der Gebrauch von PG in Baumaterialien zwischenzeitlich verboten worden [37] und auch in der europäischen Union war der Gebrauch in 1992 eingestellt worden. Es wird deutlich, dass das Recycling von Phosphorgips nicht nur technische, sondern auch gesellschaftliche und wirtschaftliche Herausforderungen beinhaltet.

Nachfolgend werden die Möglichkeiten aufgezeigt, aufbereiteten Phosphorgips in der Bauindustrie zu verwenden. Auch werden die Vor- und Nachteile in der Verwendung von Phosphorgips dargestellt.

Es besteht ein großes Interesse an der Verwendung von PG als alternativem Rohstoff für viele Anwendungen aufgrund seiner chemischen Eigenschaften: Phosphorgips besteht zu mehr als 95 % aus $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. PG wurde anfangs in der Zementbau- und Bauindustrie als Abbinderegler anstelle von Naturgips verwendet. In der Gipsindustrie fand Phosphorgips seine Anwendung in der Herstellung von Mörteln auf PG-Basis und von Gipsputz (α , β und Anhydrit). Weiterhin hat sich gezeigt, dass PG für die Herstellung von Gipsprodukten wie Gipsplatten oder -putz, Bauziegeln und –blöcken eignet. Auch wurde PG als Zusatzstoff anstelle von Naturgips bei der Herstellung von Portlandzement und Portlandschlackenzement verwendet. Zuletzt kann PG für die Herstellung von wasserfestem Gipsbindemittel und dessen Verwendung in Mauerwerk und Bauprodukten genutzt werden. [5] [31] [38]

Die genannten Verwendungszwecke sind derzeit in einigen Teilen der Welt wirtschaftlich tragfähig und an vielen anderen Orten mit etwas Industrieinitiative und staatlicher Unterstützung machbar. [38]

Die Einführung von PG in verschiedenen Anwendungen zeigten einige Vorteile, indem Eigenschaften des Bauprodukts verbessert werden konnten. Allerdings kann die Einbindung von Phosphorgips auch einige Nachteile für das Produkt mit sich bringen. Die Vorteile sind, dass Phosphorgips eine Verringerung der Dichte, die

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 24 von 41
							Stand: 21.01.2021

Erhöhung der chemischen Beständigkeit, die Erhöhung der Gefrier-/Tau-Beständigkeit und die Erhöhung der Feuerbeständigkeit (für 10 % PG) mit sich bringt. Auf der anderen Seite führt Phosphorgips dazu, dass die Verarbeitbarkeit sowie die mechanische Festigkeit des Produkts verringert wird. Auch die Abriebfestigkeit verschlechtert sich. Eine Erhöhung der Trocknungsschwindigkeit und der Wärmeleitfähigkeit sowie eine Verschlechterung der Raumbeständigkeit sind weitere Nachteile bei der Verwendung von Phosphorgips in Bauprodukten. Die Erhöhung der Abbindezeit kann als Vorteil oder als Nachteil angesehen werden, je nachdem, für welche Anwendung das PG verwendet wird. Einige der genannten Nachteile der Verwendung von PG können durch die Anwendung verschiedener Additive oder Methoden gemildert werden. Es ist erwähnenswert, dass ungeachtet der negativen Auswirkungen von PG auf einige Eigenschaften, die Wiederverwendung von PG in Baumaterialien einen großen positiven Effekt auf Umwelteinflüsse hat, die die Entsorgung von PG verursacht. [26]

Einige der oben genannten Nachteile sind auf das Vorhandensein von Verunreinigungen im Gips wie Phosphate und Fluoride zurückzuführen. [38] Das Phosphorgips kann allerdings durch verschiedene Methoden gereinigt werden, z. B. durch Waschen mit Leitungswasser, Kalkmilch oder Schwefelsäure. Auch eine Kalzinierung und eine Kalzinierung nach geeigneter Behandlung mit Schwefelsäure reinigt das Phosphorgips auf [26]. Im Kapitel 4 werden verschiedene Methoden zur Entfernung von Verunreinigungen und Schadstoffkonzentrationen und zur stofflichen Aufbereitung von PG-Halden vorgestellt. Des Weiteren wird eine Technologie dargestellt, die es ermöglicht die Radionuklidkonzentration des Phosphorgipses nach europäischen radiologischen Grenzwerten zu reduzieren.

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 25 von 41
							Stand: 21.01.2021

4 AUFBEREITUNG DES PHOSPHORGIPSES

Phosphorgips liegt je nach Aufschlussverfahren als Dihydrat oder Hemihydrat vor. Da er nicht nur mit Phosphat/ Phosphorsäure, sondern auch mit Verunreinigungen aus dem verwendeten Phosphatgestein kontaminiert ist, ist seine Verwendung dadurch eingeschränkt. Die Behandlungsmöglichkeiten zur Entfernung (und Neutralisation) von PG-Verunreinigungen werden in physikalische, chemische, biologische und thermische Behandlungsmethoden unterschieden. Die meisten dieser Methoden basieren auf Waschen, Nasssieben, Neutralisation mit Kalk, biologischer Auslaugung und Behandlung mit einer Mischung aus Schwefelsäure und Kieselsäure oder mit heißen wässrigen Ammoniumsulfat-Lösungen. Die thermische Behandlung von PG führt ebenfalls zu weniger Verunreinigungen als bei unbehandeltem PG-Material. Das wärmebehandelte Material eignet sich anschließend ideal für Anwendungen in der Bau-, Gebäude- und Zementindustrie. Weiterhin zeigt sich auch, dass die Wärmebehandlung von PG eine Inertisierung von Verunreinigungen und die Produktion von Anhydrit ermöglicht, das eine breite Anwendung bei der Herstellung von Baumaterialien und in der Zementindustrie findet. [38] Verschiedene Aufbereitungsverfahren entsprechend den verschiedenen Anwendungen werden in Quelle [5] beschrieben.

Das belgische Chemieunternehmen Prayon Technologies bietet neben fünf verschiedenen Verfahren und Anlagen zur Herstellung von Phosphorsäure (Nassverfahren) auch technische Lösungen für die Reinigung und Aufbereitung von Phosphorgips an, die den Dihydrat-Anlagen nachgeschaltet sind. Der Prozess beinhaltet folgende Schritte:

- Klassifizierung des Gipses durch Entfernen der feinen und groben Partikel,
- Waschen des Gipses zur Entfernung der löslichen Bestandteile (hauptsächlich Restphosphat, Fluor und Natrium),
- Filtrieren und Trocknen des aufbereiteten Dihydrats. [39]

Auch in [31] wird für eine effektive Verwertung des Phosphorgips in kalzinierten Produkten zwei Reinigungsverfahren (Nasssiebung über ein 300 µm-Sieb, Hydrozyklonierung) untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass Phosphorgips durch Nasssiebung gereinigt werden kann, wobei die gröbere Fraktion (10-15 %), die reich an Verunreinigungen ist, aussortiert wird. Die Laboruntersuchungen zur Reinigung von Phosphorgips mittels Hydrozyklon zeigten, dass die wasserlöslichen Verunreinigungen, P_2O_5 , F, organische Stoffe, Alkalien etc. durch dieses Verfahren zusätzlich erheblich reduziert werden können. [31] Inwiefern diese Verfahren bereits die Aktivität des Phosphorgips reduzieren, ist in der Literatur nicht beschrieben. In der Machbarkeitsstudie raPHOSafe [30], in der die DMT mitgewirkt hat, wurden Phosphorgipsproben von Elixir Prahovo und Agropolychim in die verschiedenen Korngrößenfraktionen unterteilt und anschließend mittels Gammaskopie im Labor untersucht. Es zeigte sich, dass ^{226}Ra vor allem im Korngrößenbereich 0,02 – 0,038 mm und 0,150 – 0,212 mm konzentriert ist. Diese Beobachtung wurde damit erklärt, dass Baryt, welches normalerweise das Mineral ist, in dem sich Radium anlagert, überwiegend in der Feinstkornfraktion anzutreffen ist, aber auch in Agglomeraten in der Grobkornfraktion zu finden ist. Diese Erkenntnis stützt die Vermutung, dass physikalische Siebtrennverfahren die Konzentration von ^{226}Ra verringern kann. Im nachfolgenden Kapitel 4.1 wird eine andere mögliche Technik für die radiologische Aufbereitung vorgestellt.

4.1 RADIOLOGISCHE AUFBEREITUNG

Um eine sichere Verwendung von Phosphorgips (PG) zu gewährleisten, entwickelte die DMT GmbH & Co KG im Rahmen des EU geförderten Programms „raPHOSafe - Classification and Sorting of Radium-rich Phosphogypsum Tailings“ in den letzten Jahren ein patentiertes Förderbandfreimesssystem, das durch Klassifizierung,

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 26 von 41
							Stand: 21.01.2021

Sortierung und Trennung radiologisch unbedenkliches PG-Material von PG-Material oberhalb eines festgesetzten Strahlungsgrenzwertes trennt.



Abbildung 4: Förderbandfreimessanlage

Die Förderbandfreimessanlage basiert auf dem Messprinzip der In-situ-Gammaspektrometrie mittels Germanium Detektoren (HPGe). Das Schüttgut wird der Freimessanlage zum Beispiel über einen Lader zugeführt, eventuell störende Fremdkörper (Steine, Holz, metallischen oder organischen Materialien) werden durch ein Sieb entfernt. Das Material wird anschließend über geeignete Maßnahmen (z.B. Höhenbegrenzer) in einen kontinuierlichen Materialstrom mit einer festgelegten Höhe und Breite gebracht. Das Material kann daraufhin in einer definierten Geschwindigkeit unter mehreren Messmodulen entlanggeführt werden. Weiterhin wird das Gewicht des Materials auf dem Förderband und die Geschwindigkeit des Förderbandes erfasst und zur Steuerung der Anlage verwendet. Das untersuchte Material wird weiter auf dem Messband geführt, bis die Klassifizierung des Materials abgeschlossen und die Zuweisung zu einem nachfolgenden Container erfolgt ist. Das Material wird am Ende an einen Segregator übergeben, der den Transport des Materials entsprechend der Klassifizierung ausführt. Die Anlage kann Phosphorgips entsprechend den vorab eingestellten Grenzwerten radiologisch charakterisieren und nach dem Kontaminationsgrad in z.B. drei Stoffströme aufteilen. Abbildung 5 stellt die allgemeine Prozessbeschreibung der Förderbandfreimessanlage graphisch dar.

Als wesentliches Ziel des *raPHOSafe* Projektes galt die Optimierung der In-situ-Gammaspektrometrie der Förderbandfreimessanlage. Die gammaspektrometrische Messung mit Germanium Detektoren (HPGe) sollte hinsichtlich geometrischer Bedingungen (z.B. Form und Dicke des Materials am Band, Anzahl der Detektoren, Abstand des Detektors, Form des Kollimators), relevanter Gamma-Energien und der Messzeit optimiert werden. Optimierungskriterium war ein hoher Massendurchsatz bei einer möglichst geringen Nachweisgrenze. Der Fokus lag dabei auf die Optimierung der Messung des Radionuklids ^{226}Ra , da die zwei weiteren gesetzlich relevanten Nuklide ^{232}Th und ^{40}K nur in vereinzelt Proben oberhalb der Nachweisgrenzen lagen.

				Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips			
							Stand: 21.01.2021

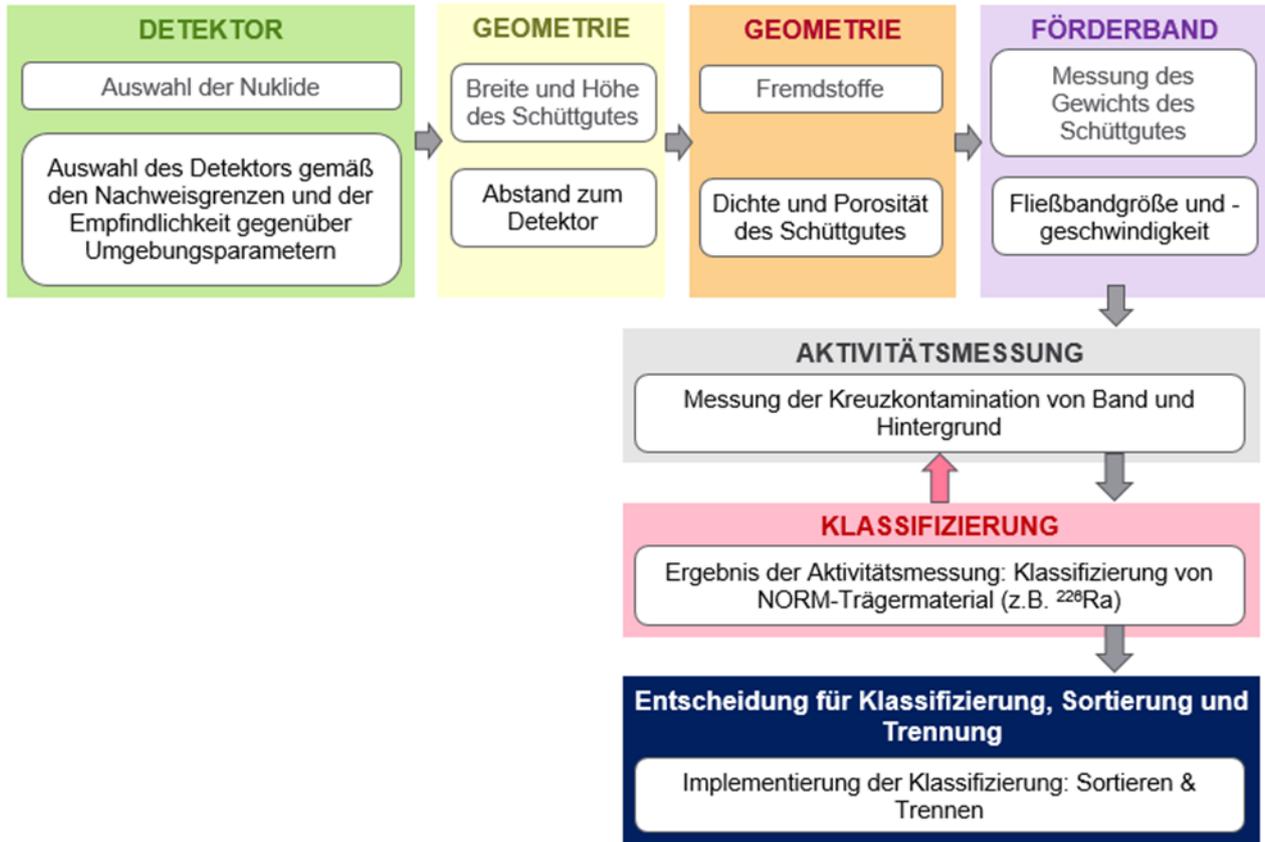


Abbildung 5: Arbeits- und Messprinzip der Förderbandfreimessanlage

Als feste und vorgegebene Parameter für die Berechnungen der Nachweisgrenzen und der Detektoreffizienzen zur Optimierung des Messsystems wurde unter anderem die Dicke des PG-Materials auf dem Förderband, die Materialdichte und der quadratische Messbereich definiert. Die relevanten Parameter, die durch Variation eine Modifikation und Optimierung des Messsystems ermöglichen sollten, waren die Messzeit, die potentielle Messung der Tochternuklide, die zur Bestimmung des eigentlichen Nuklids dienen können, die Seitenlänge des quadratischen Messbereiches und der Abstand des Detektors zur Oberfläche des Materials. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass bei der Messung des Tochternuklids ^{214}Bi in den meisten Fällen niedrigere Nachweisgrenzen vorliegen als beim Tochternuklid ^{214}Pb . Insgesamt zeigte sich, dass die Nachweisgrenzen weniger mit der Dimension der Seitenlänge des Messbereichs verbessert werden konnten, sondern vielmehr mit den verlängerten Messzeiten sanken. Bis zu einer Messzeit von ca. 180 s konnten die Nachweisgrenzen stark reduziert werden. Darüber hinaus konnten diese noch weiter reduziert werden, allerdings wirkte sich eine Verlängerung der Messzeit ab dieser Dauer weniger stark auf das Ergebnis aus.

Insgesamt konnten durch die Konfigurationen an dem Messsystem der Förderbandfreimessanlage gezeigt werden, dass bei einer Förderbandbreite von 140 cm und einer Messzeit von 60 s ein Durchsatz von 12 Mg/h pro Detektor erzielt werden kann. Der Durchsatz eines Detektors kann entsprechend der Anzahl der in Reihe geschalteten Detektoren nochmals gesteigert werden. Sollte bei Verlangen die Nachweisgrenzen soweit reduziert werden, sodass eine Messzeit von 180 s in Anspruch genommen werden muss, so kann bei gleicher Förderbandbreite von 140 cm ein Durchsatz von 4 Mg/h erzielt werden.

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 28 von 41
							Stand: 21.01.2021

Die für eine spätere großtechnische Anwendung notwendige Investition in eine Klassifikations- und Sortiertechnologie ist relativ gering und würde die Sortierung des Phosphorgipses nach europäischen radiologischen Grenzwerten ermöglichen. Vorläufige Einzelmessungen an europäischen Phosphorgipshalden (Elixir Prahovo in Serbien; Agropolychim in Bulgarien und PFIC Ltd in Griechenland) haben gezeigt, dass große Haldenanteile deutlich unter den zulässigen Grenzwerten liegen und so ein rückstandsfreies Recycling ermöglichen können [40].

4.2 AKTIVITÄTSINDEX UND NICHT ZU ÜBERSCHREITENDE WERTE NACH § 135 STRLSCHG

Bei der Verwendung von Baustoffen zu Bauzwecken können in diesen Materialien enthaltene oder aus ihnen freigesetzte Radionuklide zu einer Strahlenexposition der Bevölkerung führen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Radionuklide aus den radioaktiven Zerfallsreihen von Uran-238, Thorium-232 sowie Kalium-40. Zum Schutz der Bevölkerung vor Radioaktivität in Bauprodukten sind die entsprechenden Gesetze und Verordnungen (§§ 133, 134, 135 StrlSchG und §159 StrlSchV) zu beachten.

Bauprodukte dürfen gemäß § 135 StrlSchG nur uneingeschränkt in den Verkehr gebracht werden, wenn der Verpflichtete nachweist, dass die voraussichtliche Exposition durch die von dem Bauprodukt ausgehende Strahlung den Referenzwert von 1 Millisievert im Kalenderjahr nicht überschreitet. Der Referenzwert gilt als eingehalten, wenn der gemäß §159 StrlSchV sowie der Anlage 17 ermittelte Aktivitätsindex I den festgelegten Wert von 1 nicht überschreitet.

Der Aktivitätsindex I berechnet sich nach Formel (3) unter Berücksichtigung der Baustoffflächendichte $\rho \cdot d$ mit der Baustoffdichte ρ (kg/m³) und der Baustoffdicke im Bauwerk d (m) und unter der Berücksichtigung der spezifischen Aktivitäten der Radionuklide Radium-226 C_{Ra226} , Thorium-232 (oder seines Zerfallsprodukts Radium-228) C_{Th232} und Kalium-40 C_{K40} im Baustoff:

$$I = \left[\begin{array}{l} [281 + 16,3\rho \cdot d - 0,0161(\rho \cdot d)^2] \cdot C_{Ra226} \\ + [319 + 18,5\rho \cdot d - 0,0178(\rho \cdot d)^2] \cdot C_{Th232} \\ + [22,3 + 1,28\rho \cdot d - 0,00114(\rho \cdot d)^2] \cdot C_{K40} \end{array} \right] \cdot 10^{-6} - 0,29 \quad (3)$$

Die Einheit des Aktivitätsindex wird in Becquerel pro Kilogramm (Bq/kg) angegeben.

Im Rahmen der radiologischen Risikobewertung wurde im raPHOSafe Projekt beispielhaft der Aktivitätsindex I für PG Proben aus Elixir Prahovo bestimmt ($C_{Ra226} = 670$ Bq/kg, $C_{Th232} = <3$ Bq/kg, $C_{K40} = <13$ Bq/kg). Tabelle 6 fasst den Aktivitätsindex für den in Gipskarton und Gipswandbauplatten verwendeten Phosphorgips zusammen. Die Tabelle verdeutlicht, dass erst bei Gipswandbauplatten mit einer Materialdicke von 20 cm der zulässige Aktivitätsindex von 1 überschritten wird.

Tabelle 6: Aktivitätsindex I für vorgesehene Anwendungen von Phosphorgips (Proben aus Elixir Prahovo)

	ρ (kg/m ³)	d (m)	I (-)
Gipskarton/Rigips	700	0,05	0,27
Gipswandbauplatten	700	0,10	0,62
Gipswandbauplatten	700	0,20	1,23



Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 29 von 41
							Stand: 21.01.2021

Um die voraussichtliche Strahlenexposition durch den verwendeten Phosphorgips im Bauprodukt zu reduzieren und den Referenzwert von 1 Millisievert im Kalenderjahr für die Bevölkerung einzuhalten, kann die Verwendung des kontaminierten PG an die Materialdicke der Gipskarton- oder Gipswandbauplatten angepasst werden. Hierzu besteht die Möglichkeit, durch die Klassifizierung und Sortierung der Phosphorgipsalden mittels einer Förderbandfreimessanlage (siehe Kapitel 4.1) die Chargen an Phosphorgips auszusortieren, die einen bestimmten Grenzwert der spezifischen Aktivität überschreiten. Der Radionuklidgehalt des Phosphorgips kann weiterhin auch durch Aufbereitungstechniken z.B. physikalische Siebtrennverfahren weiter minimiert werden, sodass der Radionuklidgehalt im Bauprodukt weiter reduziert wird.

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 30 von 41
							Stand: 21.01.2021

5 TRANSPORTKOSTEN

Neben den Kosten für die Vorbehandlung und Aufbereitung des Phosphorgips sind die Transportkosten ein weiterer wesentlicher Faktor für eine wirtschaftliche Nutzung von PG. Die Kosten für den Transport des Phosphorgipses sind im Wesentlichen abhängig von der Transportstrecke nach Deutschland und dem gewählten Transportweg (Binnenschiff, Hochseeschiff, Schiene).

Für den Transport von Phosphorgips aus Serbien und Bulgarien wird ein Binnenschifftransport über die Donau nach Deutschland unterstellt. Für die Standorte in Spanien, Griechenland und Marokko wird ein Hochseetransport angenommen. Die Distribution innerhalb Deutschlands erfolgt mit dem Zug. Für den Transport aus Polen wird aufgrund der kurzen Entfernung ein direkter Zugtransport angesetzt.

Aufgrund der großen Transportmengen wurden aus den in den Quellen angegebenen Wertebereichen jeweils die niedrigsten Kosten pro Mg und Kilometer angenommen (Ausnutzung von Skaleneffekten). Da die Transportschiffe und Züge Phosphorgips direkt transportieren werden, ist anzunehmen, dass diese Skaleneffekte noch größer ausfallen können und die Kosten sich reduzieren. Diese Effekte können anhand der vorliegenden Zahlen jedoch nicht beziffert werden. Für die hier vorliegende Abschätzung werden folgende Kosten pro Mg und Kilometer angesetzt:

- Schiene: 3,4 Cent/Mg/Km
- Binnenschiff: 2,3 Cent/Mg/Km
- Hochseeschiff: 1,5 Cent/Mg/Km

Die Kosten pro Mg und Kilometer wurden aus den Quellen [41], [42] entnommen und anhand der VR Index (Verkehrs-Rundschau-Index: Preisindex für Transportkosten) auf das Jahr 2020 hochgerechnet. Die Entfernungen wurden anhand von Karten und Flusskilometerangaben abgeleitet. Die genaue Herleitung der Kosten pro Mg und Kilometer sowie der Transportstrecken können dem Anhang 3 entnommen werden. Die Ergebnisse der Abschätzung sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Standorte	Strecke Schiff in km	Strecke Schiene in km	Einzelkosten in €/Mg		Gesamt- kosten in €/Mg
			Schiff	Schiene	
Agropolychim (Bulgarien)	2652	330	61	11	72
Prahovo (Serbien)	1860	330	43	11	54
Nea Karvali (Griechenland)	6300	270	95	9	104
Huelva (Spanien)	2900	270	44	9	53
Jorf-Lasfar (Marokko)	3150	270	48	9	57
Police (Polen)	0	500	0	17	17

Tabelle 7: Kosten für den Transport von Phosphorgips nach Deutschland in €/Mg

Die Ergebnisse der Tabelle 5 zeigen eine große Schwankungsbreite in den Transportkosten, die im Wesentlichen durch die Transportstrecke bedingt ist. Da diese Zahlen nur eine Abschätzung darstellen, lässt sich aus diesen die direkte wirtschaftliche Rentabilität der Standorte nicht ableiten. Eine abschließende wirtschaftliche Betrachtung kann daher nur unter Einbeziehung aller Kosten (Rohstoff, Aufbereitung, Transport, ggf. Zoll/Steuern) für jeden Standort erfolgen.

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 31 von 41
							Stand: 21.01.2021

6 ZUSAMMENFASSUNG

In dem Nassverfahren der Düngemittelherstellung wird natürlich vorkommendes Phosphatgestein mit Hilfe von Schwefelsäure zu Phosphorsäure extrahiert. In dem Verfahren, welches seit vielen Jahrzehnten weltweit zum Einsatz kommt, fallen enorme Mengen des Abfallproduktes Phosphorgips an. Für die Produktion von einem Megagramm Phosphorsäure werden rund 4 bis 5 Mg Phosphorgips erzeugt. Weltweit werden so jährlich schätzungsweise 100 bis 280 Mio. Mg PG produziert. Phosphorgips wird meist unbehandelt durch die Deponierung in großen Lagerhalden entsorgt, die sich in der Regel in Küstengebieten in der Nähe der Produktionsanlagen für Phosphatdünger befinden.

Ost- und südosteuropäische Staaten wie Griechenland, Bulgarien und Serbien, aber auch andere europäische Länder wie Spanien, Niederlande, Belgien, Deutschland, Portugal und Finnland haben in der Vergangenheit PG-Material (oft mit Ursprung in Nordafrika) verarbeitet und zu enormen Mengen an PG-Rückstandsmaterial beigetragen. Aufgrund des zu erwartenden Wachstums der Weltbevölkerung und der damit verbundenen zunehmenden Nachfrage nach Nahrungsmitteln wird eine steigende Nachfrage nach (phosphatbasierten) Düngemitteln und damit ein sukzessives Wachstum des PG-Rückstandsvolumens erwartet [7]. Die jährlichen Kapazitäten von Phosphorgips, die für eine Wiederverwendung und zum Ersatz des REA-Gips und des Naturgips zur Verfügung stehen, wurde mit 14,1 Mio. Mg/Jahr in Europa bestimmt. Werden die Kapazitäten von Marokko miteinbezogen erhöht sich das Potential um 27,4 Mio. Mg pro Jahr auf insgesamt 41,5 Mio. Mg. Die verfügbaren Kapazitäten in Europa und Marokko können folglich die Mengen des entfallenden REA-Gips ersetzen.

Um zu beurteilen, ob sich Phosphorgips als Ersatz für den wegfallenden REA-Gips eignet, muss neben den verfügbaren Kapazitäten des produzierten PGs allerdings auch die Wirtschaftlichkeit des Phosphorgipsrecyclings geprüft werden. Die Wirtschaftlichkeit des Phosphorgipsrecyclings ist maßgeblich abhängig von den verschiedenen Stoffeigenschaften des PG und folglich von den notwendigen Verfahren zur Aufbereitung. Da die PG-Eigenschaften zwischen den verschiedenen Standorten und Produktionsstätten stark schwanken können, ist es ohne Kenntnis der radiologischen Daten und der Stoffeigenschaften nicht möglich, die Kosten für die Vor- und Aufbereitung exakt zu beziffern. Für die weitere Beurteilung der Wirtschaftlichkeit müssen auch die Transportkosten zu den Gips- und Zementstandorten in Deutschland betrachtet werden. Auch hier variieren die Kosten aufgrund der unterschiedlich ausfallenden Transportstrecken und den erforderlichen Transportmitteln stark (17 – 104 €/Mg). Bei Annahme gleicher Kosten für Vorbehandlung und Aufbereitung des Phosphorgips stellen allerdings die Transportkosten ein wesentlicher Faktor für eine wirtschaftliche Nutzung von PG dar. Standorte mit einer günstigen Anbindung und einer geringen Entfernung nach Deutschland haben wirtschaftliche Vorteile. Aus diesem Grund ist das PG am Standort Police in Polen von besonderer Bedeutung. Hier fallen für einen Import nach Deutschland Gesamtkosten für den Transport von 17 €/Mg an. Ob sich der Phosphorgips aus Police in Polen insgesamt wirtschaftlich für ein Recycling eignet, ist abschließend durch eine radiologische und stoffliche Bewertung zu klären. Hierfür fehlen leider Daten von dem Haldenmaterial. Weiterhin müsste final geprüft werden, ob der Phosphorgips aus Police bereits vertraglich gebunden und anderweitig genutzt werden soll.

PG besteht hauptsächlich aus Gips, kann aber auch einen Anteil an Verunreinigungen wie Phosphate, Fluoride und Sulfate, natürlich vorkommende Radionuklide, Schwermetalle und andere Spurenelemente enthalten. Besondere Beachtung findet dabei der Radionuklidgehalt (fast ausschließlich ²²⁶Ra) der PG-Halden. All dies führt zu negativen Umweltauswirkungen und vielen Einschränkungen bei PG-Anwendungen. Als gängige Anwendungsgebiete wäre exemplarisch die Verwendung als Bodenstabilisator, Dünger in der Landwirtschaft oder der Gebrauch im Straßenbau zu nennen. Auch findet PG Anwendung in der Gipsindustrie zur Herstellung von Gipsprodukten sowie in weiteren Bereichen der Zement- und Bauindustrie.

Einige der weltweit vorliegenden Messwerte für Phosphorgipshalden überschreiten die Referenzwerte nach § 135 StrlSchG. Die bisher in Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse zeigen aber auch, dass eine



Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 32 von 41
							Stand: 21.01.2021

signifikante Senkung auch weit unterhalb bestehender Referenzwerte für eine gesundheitliche Unbedenklichkeit möglich ist. Dies kann einerseits mit Hilfe einer Sortierung des Phosphorgipses (z.B. durch Förderbandfreimessanlage), andererseits aber auch durch Einschränkung auf Produktionsprozesse erfolgen, die eine Vermischung mit anderen Materialien erfordern.

Ein Recycling des radionuklidführenden Phosphorgips würde es ermöglichen, das für die Sanierung vorgesehene PG-Volumen zu reduzieren und die aus dem Kohleausstieg entfallenden Mengen an REA-Gips zu ersetzen. Durch verschiedene Methoden kann das Phosphorgips gereinigt und aufbereitet werden. Die meisten dieser Methoden basieren auf Waschen, Nasssieben, Neutralisierung mit Kalk, biologischer Auslaugung und Behandlung mit einer Mischung aus Schwefelsäure und Kieselsäure oder heißen wässrigen Ammoniumsulfatlösungen sowie durch thermische Verfahren wie Erhitzen. Mithilfe einer Förderbandfreimessanlage kann das NORM-haltige Haldenmaterial klassifiziert und sortiert werden, sodass eine Trennung von radiologisch zu hoch belastetem PG und NORM-freien (unterhalb der Grenzwerte) PG-Material realisiert werden kann.

Die im vorliegenden Gutachten dargestellte Detaillierungstiefe ist für endgültige Entscheidungen noch nicht ausreichend. Vergleichbar mit der Einführung der Verwendung von REA-Gipsen in den 80er Jahren sind auch für die Nutzung des Nachfolgers Phosphorgips noch weitere Untersuchungen notwendig. Es fehlen sowohl praxisorientierte Untersuchungen für konkrete Phosphorgipsstandorte als auch eine konkrete Versuchsanlage, die im industriellen Maßstab eine Verwertung von Phosphorgips aufzeigt. Auf diesem Wege können insbesondere die Erkenntnisse im Bereich Radiologie/Strahlenschutz und ökonomischer Nutzen erweitert werden.

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 33 von 41
							Stand: 21.01.2021

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1 KSB, „Rauchgasentschwefelungsanlage,“ KSB SE & Co. KGaA, [Online]. Available:] <https://www.ksb.com/kreiselpumpenlexikon/rauchgasentschwefelungsanlage/187530/>. [Zugriff am 06 01 2021].
- [2 United States Environmental Protection Agency, „Air Emissions Factors and Quantification - AP42 Chapter] 8: Inorganic Chemical Industry,“ 19 11 2018. [Online]. Available: <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch08/index.html>. [Zugriff am 09 12 2020].
- [3 International Atomic Energy Agency, „Radiation Protection and Management of NORM Residues in the] Phosphate Industry,“ Vienna, 2013.
- [4 TÜV Süddeutschland Bau und Betrieb GmbH, „Erfassung und radiologische Bewertung von] Hinterlassenschaften mit Norm - Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände,“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, München, 2007.
- [5 H. Tayibi, M. Choura, F. A. López, F. J. Alguacil und A. López-Delgado, „Environmental impact and] management of phosphogypsum,“ *Journal of Environmental Management*, Bd. 90, Nr. 8, pp. 2377-2386, 2009.
- [6 F. Killiches, H.-P. Gebauer, G. Franken, S. Röhling , P. Schulz und H. W. Müller, „Phosphat - Mineralischer] Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit,“ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2013.
- [7 K. Layr und P. Hartlieb, „Market Analysis for Urban Mining of Phosphogypsum,“ 2019.]
- [8 C. Reichl und M. Schatz, „World Mining Data 2020,“ Federal Ministry Republic of Austria Agriculture,] Regions and Tourism, Vienna, 2020.
- [9 The Essential Chemical Industry - online, „Phosphoric acid,“ 5 Januar 2017. [Online]. Available:] [https://essentialchemicalindustry.org/chemicals/phosphoric-acid.html#:~:text=About%2090%25%20of%20the%20phosphoric,and%20monoammonium%20dihydrogenphosphate%20\(MAP\)..](https://essentialchemicalindustry.org/chemicals/phosphoric-acid.html#:~:text=About%2090%25%20of%20the%20phosphoric,and%20monoammonium%20dihydrogenphosphate%20(MAP)..) [Zugriff am 16 12 2020].
- [1 Food and Agriculture Organization of the United States, „World fertilizer trends and outlook to 2022,“ 2019.] 0] [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/ca6746en/CA6746EN.pdf?eloutlink=imf2fao>. [Zugriff am 16 12 2020].
- [1 ML2R consultancy, „Phosphoric Acid, Phosphates & Fertilizers Experts,“ ML2R consultancy, 2017.] 1] [Online]. Available: <http://ml2rconsultancy.com/phosacid-plant-db/>. [Zugriff am 16 12 2020].
- [1 Belfert, „JSC "Gomel Chemical Plant",“ JSC "Gomel Chemical Plant", 2016. [Online]. Available:] 2] <http://belfert.by/en>. [Zugriff am 16 12 2020].

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 34 von 41
							Stand: 21.01.2021

[1 Prayon, „A worldwide leader in phosphate chemistry,“ 2020. [Online]. Available: 3] <https://www.prayon.com/publications/brochure-corporate-en-2020/>. [Zugriff am 16 12 2020].

[1 International Fertilizer Association (ifa), „Phosphogypsum,“ ifa, 2020. [Online]. Available: 4] https://www.fertilizer.org/Public/Fertilizers_Topics/Phosphogypsum/Public/Fertilizer_Topics/Phosphogypsum.aspx?hkey=885cd107-106a-4d71-8bcd-ba8549cd33e7. [Zugriff am 16 12 2020].

[1 Agropolychim, „Triple Superphosphate (TSP),“ Agropolychim, 2018. [Online]. Available: 5] <https://agropolychim.bg/en/products/phosphorus-fertilizers/triple-superphosphate/>. [Zugriff am 16 12 2020].

[1 Kaivosvastuu, „Yara Suomi Oy,“ Kaivosvastuu, 2020. [Online]. Available: 6] <https://www.kaivosvastuu.fi/en/yrittyskortti/yara-suomi-oy/>. [Zugriff am 16 12 2020].

[1 PFIC Ltd. , „What We Do,“ PFIC , 2017. [Online]. Available: <http://www.pfic.eu/what-we-do>. [Zugriff am 16 7] 12 2020].

[1 EuroChem Lifosa, „Extractive Phosphoric acid,“ JSC Lifosa, 2020. [Online]. Available: 8] <https://www.lifosa.com/en/products-services/products/extractive-phosphoric-acid/64>. [Zugriff am 16 12 2020].

[1 Mineral and Energy Economy Research Institute, „Phosphogypsum - is it raw material or waste in Polish 9] conditions,“ [Online]. Available: http://scale-project.eu/wp-content/uploads/2018/12/3-A-Jarosinski_-Phosphogypsum-raw-material-or-waste.pdf. [Zugriff am 16 12 2020].

[2 Grupa Azoty, „About THE Grupa Azoty,“ Grupa Azoty, [Online]. Available: 0] <https://grupaazoty.com/en/about-the-company>. [Zugriff am 16 12 2020].

[2 Elixir Group, „Mineral fertilizer production – Factories in Prahovo and Šabac,“ Elixir Group, 2020. [Online]. 1] Available: <https://www.elixirgroup.rs/en/activities/>. [Zugriff am 16 12 2020].

[2 Fertiberia, „Fabrica de Huelva,“ [Online]. Available: 2] https://www.grupofertiberia.com/media/605357/huelva_esp.pdf. [Zugriff am 16 12 2020].

[2 Grupo Fertiberia, „Production as the basis of leadership,“ Grupo Fertiberia, 2020. [Online]. Available: 3] <https://www.grupofertiberia.com/en/structure/production-centres/>. [Zugriff am 16 12 2020].

[2 Europäische Parlament, „Parlamentarische Anfragen: Betrifft: Phosphorgips in Huelva,“ Europäische 4] Parlament, 06 Juni 2007. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+WQ+E-2007-3253+0+DOC+XML+V0//DE>. [Zugriff am 16 12 2020].

[2 Y. Chernysh, M. Balintova, L. Plyatsuk, M. Holub und S. Demcak, „The Influence of Phosphogypsum 5] Addition on Phosphorus Release in Biochemical Treatment of Sewage Sludge,“ 15 Juni 2018. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6025267/#:~:text=Currently%2C%20over%2050%20million%20tons,accumulated%20in%20the%20Sumy%20region..> [Zugriff am 16 12 2020].

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 35 von 41
							Stand: 21.01.2021

[2 A. M. Rashad, „Phosphogypsum as a construction material,“ *Journal of Cleaner Production* , pp. 732-743, 6] 2017.

[2 H. Alwast, „Gutachten: Umweltverträgliche Alternativen zum Abbau von Naturgips,“ Alwast Consulting , 7] Berlin, 2020.

[2 IndustryAbout: Worldwide Industrial Information, „Imacid - Jorf Lasfar Phosphoric Acid Plant,“ 8] IndustryAbout, 2019. [Online]. Available: <https://www.industryabout.com/country-territories-3/1209-morocco/phosphate-mining/16475-imacid-jorf-lasfar-phosphoric-acid-plant>. [Zugriff am 17 12 2020].

[2 OCP, „Industrial operations,“ OCP, 2020. [Online]. Available: [https://www.ocpgroup.ma/industrial-9\] operations](https://www.ocpgroup.ma/industrial-9] operations). [Zugriff am 17 12 2020].

[3 eit RawMaterials, „Projekts: raPHOSafe,“ eit RawMaterials, 2020. [Online]. Available: 0] <https://eitrawmaterials.eu/project/raphosafe/>. [Zugriff am 17 12 2020].

[3 M. Singh, M. Garg, C. L. Verma, S. K. Handa und R. Kumar, „An improved process for the purification of 1] phosphogypsum,“ *Construction and Building Materials*, Nr. Vol. 10, No. 8, 1997.

[3 N. Degirmenci, „Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building 2] products,“ in *Construction and Building Materials*, 2008, pp. 1857 - 1862.

[3 M. Campos, L. Costa, M. Nisti und B. Mazzilli, „Phosphogypsum recycling in the building materials 3] industry,“ in *Journal of Environmental Radioactivity*, Sao Paulo, 2017 , pp. 232 - 236.

[3 Q. Chen, Q. Zhang, A. Fourie und C. Xin, „Utilization of phosphogypsum and phosphate tailings for 4] cemented,“ in *Journal of Environmental Management*, 2017, pp. 19 - 27.

[3 J. Zhou, D. Yu, Z. Shu, T. Li, Y. Chen und Y. Wang, „A novel Two-step Hydration Process of preparing 5] cement-free non-fired,“ in *Construction and Building Materials*, 2014 , pp. 222 - 228.

[3 Y. Shen, J. Qian, J. Chai und Y. Fan, „Calcium sulphoaluminate cements made with phosphogypsum,“ in 6] *Cement & Concrete Composites*, Chongqing, 2014, pp. 67 - 74.

[3 *Federal Reigster 13480*, 10 April 1990. 7]

[3 M. Haschke, B. Friedrich, S. Stopic, D. Panias, P. Schneider und C. Dittrich, „Extraction of critical 8] technology elements and radionuclides from phosphogypsum tailings,“ in *Conference paper: Opportunities in Processing of Metal Resources 2016*, Budapest, 2017.

[3 Prayon Technologies , „Purification of gypsum,“ Prayon, 2020. [Online]. Available: 9] <https://www.prayon.com/en/our-activities/technologies/purification-gypsum.php>. [Zugriff am 18 12 2020].

[4 M. D. Haschke, *DMT enthält EU-Fördermittel für Digitalisierungsprojekte*, Essen, 2017. 0]

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 36 von 41
							Stand: 21.01.2021

[4 PLANCO Consulting GmbH in Zusammenarbeit mit Bundesanstalt für Gewässerkunde ,
1] „Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Verkehrsträger Straße, Bahn und Wasserstraße
- Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse,“ Essen , 2007.

[4 H. Valentine, „Comparing maritime versus railway transportation costs (2017),“ 25 12 2017. [Online].
2] Available: <https://www.maritime-executive.com/editorials/comparing-maritime-versus-railway-transportation-costs> (2017). [Zugriff am 17 12 2020].

[4 Fraunhofer-Arbeitsgruppe fürSupplyChain Services SCS, „Der Transportmarkt in Deutschland,“ 17 10
3] 2012. [Online]. Available: <https://docplayer.org/8490048-Der-transportmarkt-in-deutschland-fraunhofer-arbeitsgruppe-fuer-supply-chain-services.html>. [Zugriff am 17 12 2020].

[4 Verkehrsrundschau, „VR-INDEX: FRACHTRATEN SINKEN LEICHT IM ZWEITEN QUARTAL 2017,“ 05
4] 07 2017. [Online]. Available: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/vr-index-frachtraten-sinken-leicht-im-zweiten-quartal-2017-1966561.html>. [Zugriff am 17 12 2020].

[4 Verkehrsrundschau, „VR-INDEX: FRACHTRATEN UM 2,77 PROZENT GESUNKEN,“ 15 07 2020.
5] [Online]. Available: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/vr-index-frachtraten-um-2-77-prozent-gesunken-2641714.html>. [Zugriff am 17 12 2020].

[4 N. Degirmenci, „Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building
6] products,“ in *Construction and Building Materials*, Balikesir, Construction and Building Materials, 2008, pp.
1857 - 1862.

[4 Prayon Technologies , „Prayon Processes for Phosphoric Acid Production,“ [Online]. Available:
7] <https://www.prayon.com/publications/prayon-process/files/assets/common/downloads/publication.pdf>.
[Zugriff am 06 01 2021].



Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 37 von 41
							Stand: 21.01.2021

ANHANG

- Anhang 1: Tabelle A1: NORM-Radionuklidaktivitäten in Phosphorgips verschiedener Herkunftsländer [27]
- Anhang 2: Tabelle A2: Schwermetalle und REE-Metalle in Phosphorgips [27]
- Anhang 3: Abschätzung der Transportkosten

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 38 von 41
							Stand: 21.01.2021

Anhang 1

Tabelle A1: NORM-Radionuklidaktivitäten in Phosphorgips verschiedener Herkunftsländer [27]

Land / Staat	Konzentration der Radionuklide (Bq/kg)			I-index	Anzahl Proben
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K		
Australien	246	50	340	1,2	28
Bangladesch	234	21	108	0,9	1
Belgien	431	11	–	–	30
Brasilien	410	182	33,5	1,6	268
Bulgarien	209	17	3	0,8	2
Tschechien	115	31	95	0,6	22
Ägypten	322	18,8	116	0,8	27
Finnland	306	23	17	1,2	17
Deutschland	305	20	110	1,2	2
Griechenland	440	12,4	235	1,5	31
Indien	233	30,3	323	0,4	24
Iran	250	–	–	–	1
Israel	747	14	63	2,6	1
Jordanien	378	4	40	1,3	16
Südkorea	618	9	24	1,1	1
Marokko	1.420	–	–	–	1
Nigeria	340	4	200	1,2	3
Norwegen	104	62	1.060	1	6
Polen	390	17	90,5	1	29
Portugal	–	–	–	–	1
Rumänien	496	42,1	95,1	1,9	75
Serbien	439	8,7	8,7	1,5	1
Slowenien	500	10	41	1,7	1
Spanien	491	31,1	68,4	1,5	54
Sri Lanka	35	72	585	0,7	25
Syrien	320	2,1	–	–	12
Tansania	–	140	–	–	1
Tunesien	210	150	–	–	1
Niederlande	131	32,5	305	0,7	34
Türkei	375	13,1	10,3	1,3	22
Großbritannien	1.020	33	130	3,6	91
USA	750	1	14	–	95

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 39 von 41
							Stand: 21.01.2021

Anhang 2

Tabelle A2: Schwermetalle und REE-Metalle in Phosphorgips [27]

Element	Konzentration (ppm)		Maximum 2 ^a
	Minimum	Maximum	
Ti	26	470	k.A.
V	2	40	190
Cr	1,6	75	594
Mn	3,5	20	k.A.
Co	0,05	2,3	k.A.
Ni	1,7	250	k.A.
Cu	2	195	508
Zn	4	315	351
As	1	42	k.A.
Se	0,5	75	249
Sr	10	1.118	1.606
Y	2	156	k.A.
Zr	10	110 ^b	398
Mo	1	16	k.A.
Ag	0,4	5	73
Cd	0,8 ^c	40	k.A.
Ba	20	236	810
Hg	0,005	10	k.A.
Pb	0,5	16	73
Th	0,4	4	75
U	0,5	13,8	19
La	42	90	419
Ce	21	143	425
Nd	30	67	352
Sm	5	13	60
Eu	1,1	3	15
Yb	2,1	3,2	21
Lu	0,3	0,4	2

a Values in Maximum 2 are values reported for the fine fraction (<20 µm) [138, 139]

b A value of 700 ppm was reported for phosphogypsum of igneous origin [48]

c It is reported that, by adapting the parameters of the sulphuric acid digestion process, the cadmium concentration in the phosphogypsum can be reduced to less than 0.5 ppm, although this is offset by a higher cadmium concentration in the phosphoric acid [85]

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 40 von 41
							Stand: 21.01.2021

Anhang 3

Abschätzung Preissteigerung bis 2020 anhand des VR Index

Quartal/Jahr	Wert	Faktor zu 2020	Quelle
Q2 2007	110	1,15	[43]
Q2 2017	122	1,03	[44]
Q2 2020	126	1,00	[45]

Abschätzung Kosten/Mg und Kilometer

Transportkosten je Mg und Kilometer	Euro/Mg/Kilometer (2007)	Quelle	Euro/Mg/Kilometer (2020)
LKW	0,060 €	[41] Abb. 9-2	0,069 €
Schiene	0,030 €	[41] Abb. 9-5	0,034 €
Binnenschiff	0,020 €	[41] Abb. 9,6	0,023 €
Hochseeschiff		siehe NR	0,015 €

Nebenrechnung Abschätzung Kosten/Mg/Kilometer Hochseetransport

	Wert	Quelle
Preis in \$ pro Container/nm	0,65	[42]
Nautische Meile (nm) in km	1,85	
Euro/Dollar am 09.12.2020	0,83	
Fracht pro Container in Mg	20	
Kostensteigerung gemäß VR-Index	1,03	
Kosten Hochseetransport je Mg und Kilometer	0,015 €	



Gutachten zur Anwendung von Phosphorgips als Ersatz für den zukünftigen Entfall von REA-Gips und Naturgips

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.		Seite: 41 von 41
							Stand: 21.01.2021

Verwendete Strecken für die Kostenabschätzung

Bahnstrecken	Strecke in Kilometer	Bemerkungen
Hamburg - Göttingen	270	(Abdeckende Annahmen für den Harz)
Würzburg - Hannover	330	
Police - Göttingen	500	

Flüsse/Kanäle	Strecke in Flusskilometern	Bemerkungen
Main (Würzburg-Bamberg)	132	Mainkilometer: W: 253, B: 385
Main-Donau-Kanal	171	Bamberg - Kelheim
Donau (Kelheim-Prahovo)	1557	Donaukilometer: K: 2414, P: 857
Donau (Kelheim-DS-Kanal)	2114	Donaukilometer: K: 2414, DS-K: 300
Donau-Schwarzmeer-Kanal (DS-Kanal)	65	Donau - Konstanza (DS-Kanal)
Schwarzes Meer	170	Konstanza - Agropolychim

Hochsee	Strecke in Hochseekilometern (ca.)	Bemerkungen
Huelva - Hamburg	2900	abgeschätzt, direkter Transport
Nea Karvali - Hamburg	6300	
Jorf-Lasfar - Hamburg	3150	

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN



Babett Pfefferlein

Sprecherin für Infrastruktur
und Ländlicher Raum

Tel. 0361 3772681
E-Mail:
babett.pfefferlein@gruene-
thl.de



Matthias Schlegel

Referent für Infrastruktur
und Ländlicher Raum

Tel. 0361/3772691
E-Mail:
matthias.schlegel@gruene-
thl.de



Laura Wahl

Sprecherin für Natur- und
Umweltschutz

Tel. 0361 3772672
E-Mail:
laura.wahl@gruene-thl.de



Ralf Martin

Referent für Natur- und
Umweltschutz

Tel. 0361 3772679
E-Mail:
ralf.martin@gruene-thl.de

IMPRESSUM

Eine Publikation von
BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN Landtagsfraktion Thüringen
Jürgen-Fuchs-Straße 1, 99096 Erfurt

Telefon 0361 3772670

E-Mail: info@gruene-thl.de
Internet: www.gruene-thl.de

Stand: Februar 2021
Dieses Material darf nicht zu Wahlkampfzwecken
verwendet werden.

Foto: BUND Thüringen

