

3. Primär-/Sekundärrohstoffe

Die Schweiz verfügt über grosse geogene Gipsvorkommen, welche sich vorwiegend in Triasablagerungen des Juragebietes und der Alpen befinden.¹⁷ Der Abbau von Gipsstein erfolgt derzeit in Bex (VD), Granges (VS), Leissigen (BE) und Kerns/Melbach (OW) im Tagebau.²¹ Das abgebaute Gipsstein gelangt nach einer entsprechenden Aufbereitung (Leissigen, Granges) entweder in die Zementwerke oder es wird im Ein-, Zwei- oder Hochbrandverfahren zu Halbhydraten und Anhydriten verarbeitet. Hieraus werden Vollgipsplatten (Leissigen, Granges) oder Gipsputze und -mörtel (Kerns, Melbach, Bex, Granges) hergestellt.

Industriegipse fallen vor allem im Ausland in grossen Mengen aus der Entschwefelung von Rauchgasen in Kohlekraftwerken an (REA-Gips). Alleine in Deutschland sind die Mengen seit Inkraftsetzung einer Verordnung für Grossfeuerungsanlagen stark angestiegen und bewegen sich heute im Bereich von 7–8 Mio. t/a.⁹ Auf europäischer Ebene wurden im Jahr 2003 rund 15 Mio. t produziert.¹²

REA-Gips ist pulverförmig und weist eine Restfeuchte von 10 % auf.^{17,1} Hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung entspricht der REA-Gips bis auf die Spurenelemente (v.a. Hg und Se) dem Naturgips. Da

er aber im Gegensatz zum Naturgips nicht grobkörnig vorliegt, muss der REA-Gips getrocknet und brikketiert werden. Dazu ist ein Energieaufwand von 150 kWh/t für die Trocknung und 10 kWh/t für die Brikketierung erforderlich.¹² In der Schweiz fällt kaum REA-Gips an, er wird aber teilweise aus dem nahen Ausland für die Zementproduktion importiert (Abb. 3).

Gipsabfälle aus dem Rückbau und der Sanierung fallen in grossen Mengen an. Heute dürften in der Schweiz rund 280 000 Tonnen Gipsabfälle pro Jahr anfallen, wobei sich diese Menge bis 2035 beinahe verdoppeln könnte (Abb. 4).¹⁹

Für das Recycling interessant sind vor allem die Vollgips- und die Gipskartonplatten aus dem Trockenbau. Diese Gipsabfälle verursachen etwas mehr als die Hälfte des gesamten Gipsanfalls (Abb. 4). In der Schweiz wird seit einigen Jahren ein Recyclingsystem für Gipsabfälle betrieben.¹⁸ Diese werden dabei in verschiedenen Recyclingzentren zunächst gesammelt und sortiert. Von dort gelangen sie in die Aufbereitungsanlage am Produktionsstandort für Vollgipsplatten. Der aufbereitete Gips wird zusammen mit dem Primärmaterial in den Produktionsprozess eingeschleust. Der Recyclinganteil in der Vollgipsplattenproduktion liegt heute im Bereich von rund 2 %. Dieser Anteil lässt sich

deutlich erhöhen, allerdings ist die Produktionsmenge von Vollgipsplatten in der Schweiz zu gering, um die gut verwertbaren Gipsabfälle von rund 230 000 t (Abb. 3) aufnehmen zu können. Ein vielversprechender Abnehmer von Recyclinggips wäre die Zementindustrie: Einerseits ist der Gipsbedarf der schweizerischen Zementindustrie mit rund 200 000 t/a sehr hoch; andererseits benötigt die Zementindustrie vor allem Calciumsulfat-Dihydrat (Kap. 5, Tab. 1). Der mechanisch aufbereitete Gips könnte somit ohne weitere Verarbeitung eingesetzt werden.

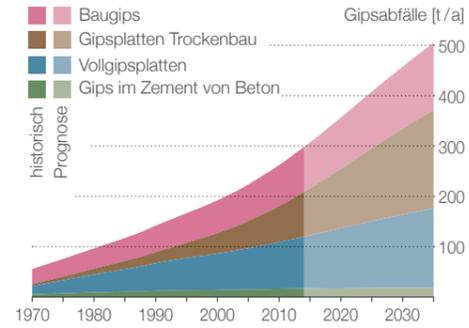


Abb. 4 Entwicklung des Gipsoutputs aus dem Bauwerk Schweiz (gestapelt) (19).

4. Umwelt

Die Deponierung von Gips ist bezüglich seines Umweltbelastungspotenzials problematisch, weil dieser mit Wasser reagiert und das gelöste Sulfat (SO_4^{2-}) ins Sickerwasser gelangt, wodurch eine direkte Einleitung in kleinere Vorfluter problematisch wird.² Das AWEL hat das Qualitätsziel für Oberflächengewässer betreffend Sulfat bei 100 mg/L definiert. Sulfatkonzentrationen über 600 mg/L gelten als sehr stark Betonaggressiv. Schweizweit liegen die Sulfatgehalte im Sickerwasser aus Inertstoffdeponien fast zur Hälfte über 600 mg/L.³

Unter reduzierenden Bedingungen kann Sulfat zu Sulfiden (S^{2-}) reduziert werden kann. Sulfid tritt in wässriger Lösung als Schwefelwasserstoff (H_2S) auf, welches als flüchtige Verbindung ausgasst.¹⁵ Schwefelwasserstoff ist sehr toxisch.

Der ausgegaste Schwefelwasserstoff kann im aeroben Kondenswasser der Kanalwand mikrobiell zu Schwefelsäure umgewandelt werden. Dieser Prozess verursacht Korrosionsschäden in Betonkanälen, Pumpwerken und Installationen.³

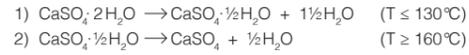
Eine erste Ökobilanzierung zeigt, dass Gips aus sekundären Quellen deutlich umweltfreundlicher produziert werden kann als primärer Gips.²⁴ Während schon REA-Gips nur 11 % der Umweltbelastung der Gips-Primärproduktion ausmacht, ist es in jeder Hinsicht (Energieaufwand, Emissionen, Umweltbelastung) frappant, wie sehr sich das Recycling von Gips aus Bauschutt lohnt. –820 % (!) der Umweltbelastungspunkte der Gips-Primärproduktion könnten so eingespart werden. Dies liegt jedoch nicht an einer bedenklichen Primärproduktion; der deutliche Umweltvorteil des Gips-Recyclings aus Bauschutt ist auf die Vermeidung dessen Deponierung zurückzuführen (s. oben).²⁴

► Abb. 5 Erste Abschätzung der Ökobilanz von primärem (rosa) und sekundärem Gips aus Rückständen der Rauchgasentschwefelung (braun) und aus Bauabbruch (blau) (24) Normiert auf primären Gips (= 100 %). Negative Zahlen entstehen durch die riesigen Vorteile der Vermeidung des Deponierens von gipshaltigem Bauabbruch gegenüber den technischen Aufwendungen.



5. Technologie

Die Herstellung der verschiedenen Gipsprodukte kann als schrittweises Austreiben des im Gipsstein ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) gebundenen Wassers definiert werden.¹⁷ Diese Dehydratisierung erfolgt je nach Produkteigenschaft teilweise oder vollständig gemäss folgender Reaktionen:



Bei der Produktherstellung kann dieser Prozess durch Zugabe von Wasser umgekehrt werden. Für die Gipsproduktion sind vier Phasen des Systems $\text{CaSO}_4 / \text{H}_2\text{O}$ relevant (Tab. 1). Diese unterscheiden sich vor allem im Kristallwassergehalt, in der Stabilität und in der Bildungstemperatur.

Die Phasen sind in unterschiedlicher Zusammensetzung in den verschiedenen Gipsprodukten enthalten (Abb. 6). Gips wird ohne thermische Behandlung als Erstarungsregler in der Zementindustrie und als Sulfatträger in der chemischen Industrie eingesetzt. Die Herstellung von Gipskartonplatten, Vollgipsplatten und Innenputzen bedarf des β -Halbhydrats; Putzgips enthält zusätzlich Anhydrit II. Estriche (Unterlagsböden) werden in Anhydrit- und Gipsestriche unterschieden. Sie enthalten neben weiteren Zusatzstoffen Anhydritbinder, α -Halbhydrat

Tab. 1 Phasen des Systems $\text{CaSO}_4 / \text{H}_2\text{O}$.

	Gips	«Halbhydrat»	Anhydrit III	Anhydrit II
Chemischer Name	Calciumsulfat-Dihydrat	Calciumsulfat-Halbhydrat	Calciumsulfat	Calciumsulfat
Chemische Formel	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	CaSO_4	CaSO_4
Formen		α und β	α und β	
Wassergehalt [M%]	20.92	6.21	0	0
Bildungstemperatur		α : 80–180 °C, β : 120–180 °C	α : 100 °C, β : 290 °C	300–900 °C

oder Gemische. Modell- und Formgipse werden aus α - und β -Halbhydraten hergestellt.¹

Gips ist aufgrund seiner chemischen Eigenschaft grundsätzlich gut wiederverwertbar, weil die hydratisierten Gipsfraktionen unter Zufuhr von Energie dehydratisiert werden können. Allerdings dürfen die Gipsabfälle keine zu hohen Fremdstoffanteile ent-

halten (cf. Beilage). Deshalb ist in erster Linie ein Recycling von Vollgips- und Gipskartonplatten¹³ anzustreben. Der energetische Aufwand für die Aufbereitung ist relativ gering, da das Material wie bei der Primärproduktion nur gebrochen und gemahlen werden muss. Der Karton aus den Gipskartonplatten lässt sich mittels Siebung abscheiden.

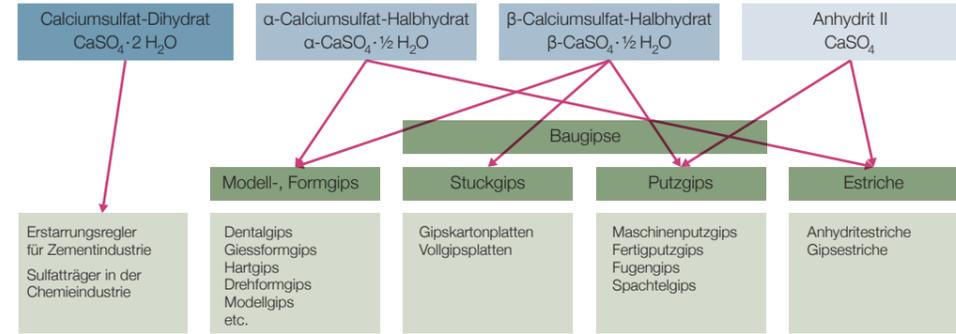


Abb. 6 Stammbaum für Gipsprodukte (1).

6. Ökonomie

Im Jahr 2013 wurden rund 435 000 t Gipsprodukte importiert und nur geringe Mengen exportiert (Abb. 3). Die Gipskartonplatten weisen mit rund 275 000 t den grössten Importanteil auf, gefolgt von den Baugipsen mit 105 000 t und den Roh- (ca. 85 %) und REA-Gipsen (ca. 15 %) für die Zementindustrie mit geschätzten 54 000 t. Der restliche Gipsbedarf von rund 380 000 t wird durch den Abbau und die Produktion in der Schweiz gedeckt. Die Inlandproduktion beschränkt sich auf die Vollgipsplatten, Putze, Estriche und Mörtel sowie Gips für die Zementproduktion.

Die Situation betreffend Recycling stellt sich somit heute wie folgt dar: In der Schweiz fallen rund 230 000 t gut verwertbare Gipsabfälle an.¹⁹ Diese Menge entspricht etwa 60 % der schweizerischen Produktion von Gipsbaustoffen. Zurzeit wird erst ein geringer Anteil dem Recycling zugeführt.¹⁸ Die relativ tiefe Recyclingquote ist auf die ausreichenden und gut verfügbaren Rohgipsvorkommen in der Schweiz und im nahen Ausland zurückzuführen.

Bei geschätzten Abbaukosten von um die 10–15 CHF/t sind die Bedingungen für ein wirtschaftlich tragfähiges Gipsrecycling nicht einfach. Zudem steht das hiesige Gipsrecycling in Konkurrenz zu REA-Gipslieferungen aus dem Ausland. Allerdings befinden sich die Braunkohlekraftwerke, in denen die grössten Mengen anfallen, im Osten Deutschlands, womit die Transportkosten zu hoch sein dürften, um diesen in die Schweiz zu exportieren. Somit beschränkt sich die Konkurrenz durch den REA-Gips auf Kraftwerke im näheren Ausland.

Tabelle 2: Grobe Abschätzung der Kosten von RC-Gipspro-

Material	Anteil [%]	Zielprozess	Kosten [CHF/t]	Kostenanteil [CHF/t]
Gipsteil	80	Gipsproduktion	-10.00	-8.00
Kartonteil	8	Kehrichtverbrennung (KVA)	120.00	9.60
Fremdstoffteil	12	Gipsproduktion	-10.00	-1.20
Total Kosten RC-Gips				0.40
Kosten Bau, Betrieb, Unterhalt der Anlage				25.00
Total Aufbereitungskosten				25.40

Die Kosten der Deponierung von Gipsabfällen liegen heute im Bereich von rund 50 CHF/t, wobei regional grosse Unterschiede zu verzeichnen sind. Die Kosten für die Aufbereitung von Gipsabfällen aus Vollgips- und Gipskartonplatten liegen im Bereich von rund 25 CHF/t (Tab. 2).

Damit könnten rund 25 CHF/t für die Entsorgungslogistik aufgewendet werden, um konkurrenzfähig zu den Deponien zu sein.

In der Zementproduktion liegen die Kosten für den Gips je nach Standort zwischen 27 und 55 CHF/t, inklusive Transport. Falls nun die Gipsaufbereitungsanlagen in der Nähe dieser Zementwerke betrieben werden könnten, liessen sich die Rohstoffkosten der Zementwerke vermutlich minimieren. Somit ist dem Recycling von Gips auch aus wirtschaftlicher Sicht erhebliches Potenzial zuzuweisen, insbesondere weil künftig mit stark ansteigenden Gipsabfallströmen zu rechnen ist.

7. Gesellschaft

Gips ist eine der wenigen langfristig gut verfügbaren Ressourcen in der Schweiz. Trotzdem werden rund 50 % der Gipsprodukte aus dem Ausland importiert, womit die entsprechende Wertschöpfung dort erfolgt. Der Grund dafür ist, dass Produkte wie beispielsweise Gipskartonplatten in der Masse hergestellt werden. Bei der Massenproduktion sind vor allem die Personalkosten entscheidend, um auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig sein zu können. Diese Voraussetzung ist in der Schweiz nicht erfüllt.

Andererseits fallen aufgrund des starken Lagerwachstums immer mehr Gipsabfälle an. Diese gelangen in die Inertstoffdeponien, wo das Sulfat ausgewaschen wird und ins Grundwasser oder ins Deponieabwasser gelangt. Zudem sollte der Deponieraum, wo es möglich ist, geschont werden. Aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften

ten kann Gips grundsätzlich als nachhaltige Ressource bewirtschaftet werden. Gerade heute, wo nachhaltiges Bauen im Trend liegt, sollte die Gipsindustrie die brachliegenden Potenziale besser nutzen und hervorheben. Falls es gelingen sollte, die Gipsplatten und Gipskartonplatten zu hohen Anteilen zu recyceln, wäre dies ein wichtiges Verkaufsargument gegenüber anderen Wandbaustoffen, welche ein deutlich geringeres Recyclingpotenzial aufweisen.

Aufgrund der hohen Importanteile wird es künftig immer schwieriger werden, die in der Schweiz anfallenden Gipsabfälle vollständig zu verwerten. Neben der Vollgipsplattenproduktion sind vor allem die Zementwerke die Zielprozesse für den Recycling-Gips. Hier stünde theoretisch ein Abnahmemarkt von rund 200 000 t/a zur Verfügung. Längerfristig müssen hingegen zusätzliche Abnahmemärkte im Ausland erschlossen werden, oder

die Produktionskapazitäten in der Schweiz entwickelt werden. Dies bedeutet, dass die Gesellschaft die Rahmenbedingungen so gestalten muss, dass beispielsweise die im Ausland produzierenden Unternehmen längerfristig einen gewissen Anteil Recycling-Gips zurücknehmen und in ihrer Produktion einsetzen müssen. Auch andere Massnahmen und Handlungsoptionen, die zu einem nachhaltigeren Umgang mit Gips führen, sind in Zusammenarbeit mit der Gips- und Zementindustrie sowie mit den Importeuren von Gipswaren zu diskutieren und voranzutreiben. Die öffentliche Hand sollte dabei im Sinne eines vorausschauenden Akteurs die Prozessentwicklung zu einem nachhaltigen Ressourcenmanagement in der Gipsindustrie moderierend begleiten.

1. Bedeutung von Gips

Gips ist einer der ältesten bekannten mineralischen Bau- und Werkstoffe. Bereits 7000 v. Chr. wurde Gips als Untergrund von Fresken in der Stadt Catal Huyuk in Kleinasien eingesetzt.¹⁶ Auch in weltbekannten Bauwerken wie den Türmen von Jericho, der Cheops-Pyramide oder im Palast von Knossos wurde Gips als Gipsstein, Gipsputz und im Mörtel eingesetzt.⁸ Die Römer haben die vorteilhaften Eigenschaften des Gipses ebenfalls gekannt und das Wissen zur Verarbeitung in das Gebiet nördlich der Alpen transferiert.⁷ Wie vieles ging das Wissen zur Verarbeitung von Gips während

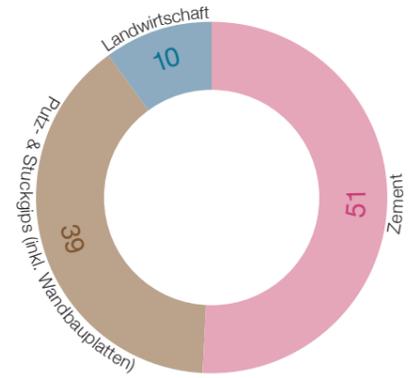


Abb. 1 Globale Verwendung von Gips im Jahr 2004 in Prozent.

der Zeit der Völkerwanderung verloren. Erst mit dem Baustil der Romantik kam der Gips als Baustoff wieder zur Anwendung. Mit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert erfolgte dann die Weiterentwicklung der Gips-technologie. Nun wurde das Dihydrat, das Halbhdydrat sowie der vollständig entwässerte Anhydrit eindeutig unterschieden und die Bedeutung der unterschiedlichen Brenntemperaturen erkannt (Kap 5, Tab. 1).⁷

Die Weltproduktion von Gips liegt im Bereich von 140–160 Mio. Tonnen (Abb. 2).^{5,23} Die Vorkommen von Gips und Anhydrit sind auf der ganzen Welt verteilt und meist relativ einfach auszubeuten. Gips gelangt global

zu rund 50 % in die Zementproduktion, zu 39 % in die Putz- und Stuckgipsproduktion, und zu rund 10 % in die Landwirtschaft (Abb. 1).²² Aufgrund des tiefen Preises (Abb. 2) werden Gips und Gipsprodukte meist nicht über grosse Distanzen transportiert, dies verhinderte in der Vergangenheit das Recycling von Gipsabfällen. Erst in den letzten Jahren sind vermehrt Konzepte zu einem vermehrten Gipsrecycling entwickelt worden.¹¹ In Regionen, wo Kohlekraftwerke betrieben werden, stehen diese Recyclingprodukte in Konkurrenz zum REA-Gips (Kap. 3).

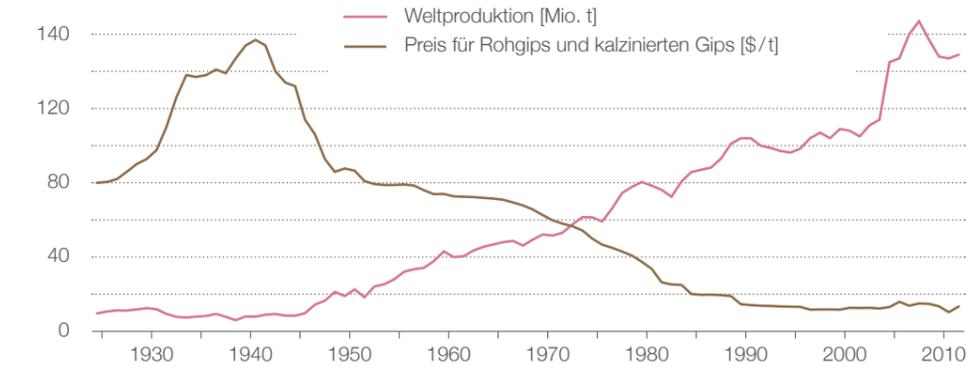


Abb. 2 Weltweite Gipsproduktion und Preisentwicklung von kalzinierem und unkalzinierem Gips (23) Preis US-Markt inflationsbereinigt, Referenzjahr 1998.

8. Ressourcenmanagement: Das Ganze im Überblick

Die Recyclingquote von Gipsabfällen aus dem Bauwerk bewegt sich heute noch im einstelligen Prozentbereich. Gips im Beton und in Putzen sowie Estrichen sind kaum bzw. nur mit grossem Aufwand verwertbar. Anders sieht dies bei den Vollgips- und Gipskartonplatten aus, wo die Fremdstoffanteile und somit der Aufbereitungsaufwand gering sind.

Das Potenzial, die Recyclingquote massiv zu erhöhen, ist vorhanden. Insbesondere die Zementindustrie bietet in Bezug auf Qualitätsanforderungen und Absatzpotenzial (rund 200 000 t/a) enorme Chancen. Die Verwaltung sollte hierzu die erste Phase initiieren und begleiten. Falls notwendig, sind parallel dazu die Rahmenbedingungen in der Art anzupassen, dass die Verwertung von Gipsabfällen stärker gefördert wird. Gelingt dies, kann die Gipsbranche das Image des Gipses als nachhaltigen Baustoff gewinnbringend nutzen.

Weiterer Handlungsbedarf für die öffentliche Hand ergibt sich aus der Möglichkeit, durch die Wiederverwendung von Gips Deponie-

lumen in erheblichem Umfang einzusparen. Ebenso können damit SO_2 -Langzeitemissionen in die Luft vermieden werden. Der Rückgewinnung steht der tiefe Preis von Primär- und REA-Gips im Wege.

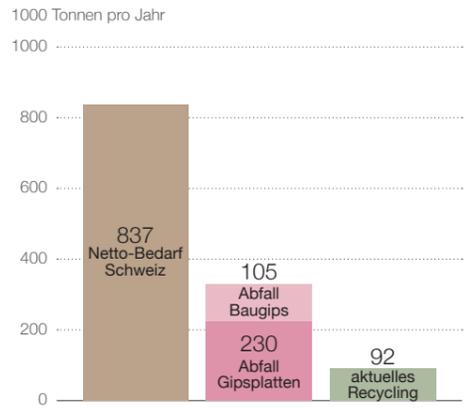
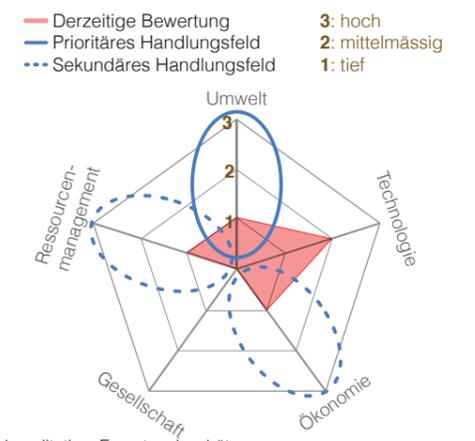


Abb. 7 Gegenüberstellung des jährlichen Gips-Bedarfs und Recycling-Potentials mit dem aktuellen Recycling.

►Abb. 8 Beurteilung des Recyclingpotentials von Gips aufgrund qualitativer Experteneinschätzung. Kriterien: Umwelt: Letzte Senke „Deponie“, Einleitbedingungen problematisch bei Inertstoffdeponien; Technologie: keine Technik zur Rückgewinnung für Baugips, Technik vorhanden für Gipsplatten; Ökonomie: Recyclinggips ist deutlich teurer als Primär- oder REA-Gips; Gesellschaft: nicht relevant; Ressourcenmanagement: Recycling ist derzeit beschränkt aus ökonomischen Gründen, eine Rückgewinnungspflicht wäre dennoch sinnvoll.

Offene Fragen

1. Validierung des Modells zur Beschreibung der Gipsflüsse in der Schweiz
2. Stand der Gipsaufbereitungstechnik bezüglich der Herkunfts- und Zielprozesse
3. Potenziale des Exports von RC-Gips
4. Evaluation von Sammelsystemen und Standorten für RC-Gipsaufbereitung



2. Systemverständnis

Trotz reichen Gipsvorkommen in der Schweiz wird etwas mehr als 50 % des Gipsbedarfs in Form von Fertigprodukten wie Gipskartonplatten und Baugips sowie als Rohgips für die Zementproduktion durch Importe gedeckt (Abb. 3). Der Gipsbedarf der Schweiz liegt bei rund 840 000 t/a, was knapp 100 kg / (Kopf · Jahr) entspricht.¹⁹ Im Nachbarland Deutschland sind es rund 120 kg / (Kopf · Jahr).¹⁵ Der globale Durchschnitt liegt mit ca. 20 kg / (Kopf · Jahr)³ deutlich tiefer. Beinahe aller Gips gelangt ins Bauwerk (Modell- und Düngergips sind mengenmässig vernachlässigbar). Das Bauwerk verlassen jährlich knapp 240 000 t.¹⁷ Dies entspricht knapp 30 % des Gesamtbedarfs. Es findet somit ein Lageraufbau von jährlich rund 600 000 t (~ 73 kg / Kopf) statt.

Bereits heute befinden sich rund 27 Mio. t Gips im Bauwerk Schweiz, was etwas mehr als 3 t Gips pro Kopf entspricht. Der Gipskonsum ist im Zeitraum zwischen 2000 bis 2012 um knapp 50 % gestiegen.¹⁹ Diese Entwicklung dürfte aufgrund des verstärkten Einsatzes im Trockenbau künftig weiter zunehmen. So liegt der Bedarf in der Schweiz an Gipswandbaustoffen heute erst im Bereich von 1,7 m² / (Kopf · Jahr), während es in Deutschland rund 2,8 m² / (Kopf · Jahr) und in Frankreich 3,5 m² / (Kopf · Jahr)

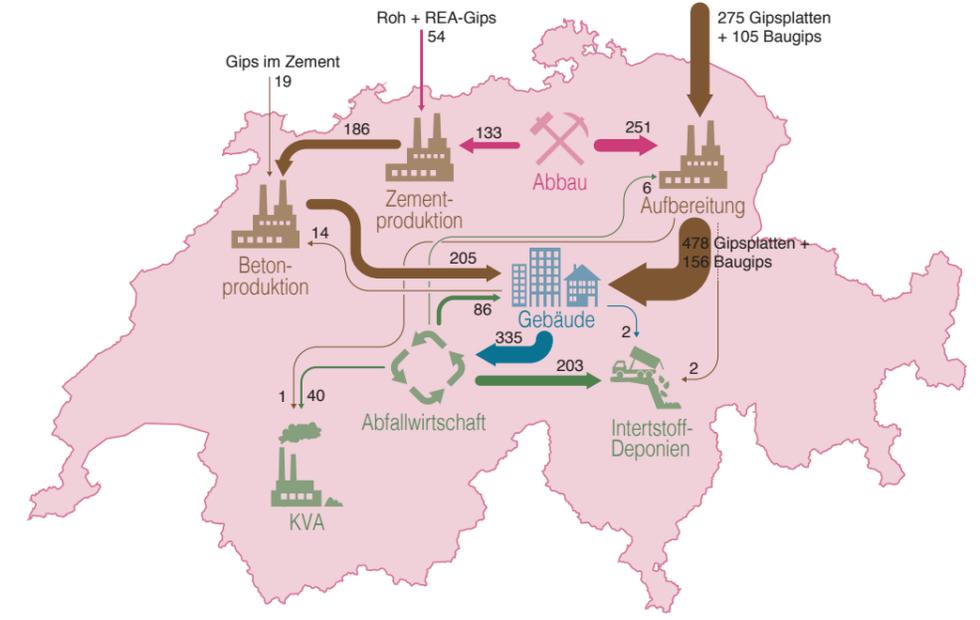


Abb. 3 Gipsflüsse in der Schweiz im Jahr 2013 (19). In 1000 Tonnen.

sind.⁴ Unter dieser Voraussetzung könnte das Gipslager Schweiz bis zum Jahr 2035 auf über 45 Mio. t anwachsen.¹⁹

Die Rückgewinnung von Gips in der Schweiz bewegt sich heute mit rund 4000 t/Jahr noch auf bescheidenem Niveau. Deshalb gelangen jährlich über 250 000 t

Gipsabfälle in die Deponien. Durch das starke Lagerwachstum und ohne Gegenmassnahmen wird dieser Materialfluss künftig stark ansteigen. Aufgrund von Problemen bei der Deponierung bestehen europaweit Bestrebungen, das Gipsrecycling stärker zu fördern.^{6,10}



Literatur
Aus Platzgründen sind die Literaturnachweise in einem separaten Dokument zusammengefasst.
http://daten.sgtk.ch/rohstoff-monitoring/AWEL_Gips_Literatur.pdf

Dieses Stoffdossier wurde von Stefan Rubli (Kapitel 4 ergänzt durch Elmar Kuhn) in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Geotechnischen Kommission SGTK und der GEO Partner AG für das AWEL erstellt.
Rückmeldungen sind herzlich willkommen:
sgtk@erdw.ethz.ch, +41 (0) 44 632 37 28

Schweizerische Geotechnische Kommission SGTK c/o ETH Zürich
Sonneggstrasse 5
CH-8092 Zürich
www.sgtk.ch
Baudirektion Kanton Zürich
AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Abfallwirtschaft und Betriebe