



# R-Beton klimafreundlicher und ressourcenschonender

 Leitfaden für Aufbereiter mineralischer Bauabfälle

**GEMEINSAM  
ANPACKEN.  
KLIMANEUTRAL  
2040**



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Liebe Leserinnen und Leser,

in Baden-Württemberg werden jährlich über 35.000 Wohneinheiten, viele weitere Nichtwohngebäude und wertvolle Infrastruktur errichtet. Diese Bauprojekte erfordern einen enormen Ressourcenverbrauch und wirken sich auf unser Klima aus. Die Bauindustrie verarbeitet in Deutschland über 70 Prozent aller abgebauten nicht-nachwachsenden Rohstoffe und verursacht 10 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen. Für die Transformation in eine nachhaltige und klimafreundliche Kreislaufwirtschaft muss gerade Beton als meistgenutzter Baustoff in Zukunft deutlich ressourcen- und klimaschonender hergestellt werden. R-Beton, der in Anteilen aus aufbereiteter rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt wird, bietet dafür einen vielversprechenden und etablierten Ansatz, der insbesondere unsere Primärrohstoffvorkommen schont. Noch relativ neu ist die Entwicklung, RC-Gesteinskörnung aus Altbeton zusätzlich mit CO<sub>2</sub> zu beaufschlagen und damit R-Beton als CO<sub>2</sub>-Senke zu nutzen.

Für Ihren Baustoffrecycling-Betrieb ergibt sich daraus ein erhebliches Potenzial, einen wichtigen Beitrag zum Ressourcenschutz und letztlich zum Klimaschutz zu leisten. Ihr zusätzliches Angebot an CO<sub>2</sub>-beaufschlagter RC-Gesteinskörnung und nassklassiertem Kies ist ein Grundstein für einen erfolgreichen Wandel der gesamten Bauindustrie. Es bedarf Ihrer Expertise und Ihrem Engagement, um unser gemeinsames Ziel – mehr Umwelt- und Klimaschutz im Bausektor – zu erreichen.

Dieser Leitfaden liefert Ihnen dafür wertvolle Anregungen und praktische Hinweise. Inhaltlich erwarten Sie praktische Hinweise, wie Sie die CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung in Ihren Aufbereitungsprozess integrieren und über Nassklassierung zusätzliche Primärgesteinskörnung erschließen können. Ich bedanke mich bereits jetzt für Ihr Engagement und wünsche Ihnen weiterhin viel Erfolg bei der Herstellung ressourcenschonender und klimafreundlicher Recycling-Baustoffe.

Ihre



Thekla Walker MdL  
Ministerin für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg



*Thekla Walker MdL  
Ministerin für Umwelt, Klima und  
Energiewirtschaft des Landes  
Baden-Württemberg,  
(Quelle: UM-Regenscheit)*

<b>1 HINTERGRUND</b>	<b>1</b>
<b>2 KARBONATISIERUNG VON RC-GESTEINSKÖRNUNG</b>	<b>2</b>
<b>2.1 BESCHREIBUNG DER TECHNISCHEN LÖSUNGEN ZUR CO<sub>2</sub>-BEAUFSCHLAGUNG</b>	<b>2</b>
<b>2.2 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DIE INTEGRATION IN DEN AUFBEREITUNGSPROZESS</b>	<b>4</b>
<b>2.3 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG</b>	<b>8</b>
<b>2.4 ÖKONOMISCHE BEWERTUNG</b>	<b>10</b>
<b>3 NASSKLASSIERUNG VON BODENAUSHUBMASSEN</b>	<b>11</b>
<b>3.1 TECHNISCHE AUSLEGUNG</b>	<b>11</b>
<b>3.2 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG</b>	<b>13</b>
<b>3.3 ÖKONOMISCHE BEWERTUNG</b>	<b>15</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>16</b>

Transportbeton nicht nur ressourcenschonend, sondern auch klimafreundlicher herzustellen, ist eine zentrale Aufgabestellung im nachhaltigen Bauen. Beton ist ein Baustoff, der nicht nur im klassischen Massivbau eingesetzt wird. Auch in anderen Bauweisen kann auf Bauteile aus Beton in der Regel nicht verzichtet werden. Der Rückgriff auf mineralische Ressourcen resultiert vor allem aus der Nachfrage aus dem Bausektor und bei Kies und Sand gerade auch durch den Baustoff Beton.

Der Baustoff Beton hat einen relevanten Anteil an den nationalen Treibhausgasemissionen. Nach Angaben des Umweltministeriums verursachen die Zementwerke im Land rund 3,5 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr und damit 5% der Emissionen. Die Herstellung von Zement ist in Deutschland mit der Freisetzung von 600 kg CO<sub>2</sub>-Äq./t verbunden, wobei ca. zwei Drittel davon auf rohstoffbedingte Prozess-emissionen zurückzuführen sind, ca. ein Drittel auf den Brennstoffeinsatz für das Drehrohr. Hier wird der Kalkstein bei 1.450°C zu Zementklinker gebrannt, wobei durch die Kalzinierung des Kalksteins ebenfalls CO<sub>2</sub> freigesetzt wird [vdz 2020]. Kiese, Sande und gebrochene Natursteine werden zu ca. 95 % in der Bauindustrie verwendet. Im Jahr 2020 lag der Verbrauch bei 262 Mio. t Kiese und Sande sowie 223 Mio. t gebrochener Naturstein [BGR 2021]. In vielen Regionen verschlechtert sich die Verfügbarkeit für diese Baurohstoffe.

Ressourcenschonender kann der Beton dann werden, wenn er in Anteilen auf einen Rohstoff zurückgreift, der aus dem Materialkreislauf gewonnen wurde. Altbeton sowie altes Mauerwerk lassen sich zu einer Gesteinskörnung aufbereiten, die in der Lage ist, Kies und gebrochenen Naturstein zu substituieren. Diese Baustoffinnovation R- Beton ist nicht neu, mittlerweile gibt es gerade in Baden-Württemberg hierzu schon einige Expertise und Erfahrung und dies vor allem auch im Raum Stuttgart. So produziert die Fa. Feefß aus Kirchheim/Teck seit vielen Jahren die RC-Gesteinskörnung für die Betonindustrie und Werke der Fa. Holcim sind hier wichtige Abnehmer. Das Umweltministerium Baden-Württemberg hat vor Jahren zu diesem Baustoff einen immer noch aktuellen Leitfaden veröffentlicht [UM 2017].

Klimaschonender kann der Transportbeton werden, wenn in der Aufbereitung und Produktion der RC-Gesteinskörnung der Altbeton mit CO<sub>2</sub> beaufschlagt wird. Es erfolgt eine Karbonatisierung, auf der Oberfläche und in den Poren bildet sich Kalkstein. Das Kohlendioxid wird dauerhaft gebunden. Hierzu liegen Erfahrungen aus Technikumsanlagen sowie in Grenzen auch aus der Praxis vor. Noch ressourcenschonender kann der Beton zudem dadurch werden, dass die verbleibenden Anteile an klassischem Kies- oder gebrochenem Naturstein nicht aus einer primären Rohstoffquelle gewonnen werden, sondern aus der Aufbereitung von Bodenaushubmassen, die im Rahmen von Baumaßnahmen zur Entsorgung anfallen.

Mit dem vorliegenden Leitfaden werden die Erfahrungen zur Integration der CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung im Aufbereitungsprozess aus einem aktuellen Forschungsprojekt [ifeu/Feefß/Holcim 2023] zusammengestellt und für die Praxis der Aufbereitung von mineralischen Bauabfällen und der Produktion von RC-Gesteinskörnung verfügbar gemacht. Darüber hinaus fließen die Erfahrungen der Fa. Feefß aus Kirchheim/Teck in der Nassklassierung von Bodenaushubmassen ein.

# 2 Karbonatisierung von RC-Gesteinskörnung

## 2.1 BESCHREIBUNG DER TECHNISCHEN LÖSUNGEN ZUR CO<sub>2</sub>-BEAUFSCHLAGUNG

### HINTERGRUND

In einem Forschungsprojekt der Bauhaus-Universität Weimar [Seidemann/Müller, 2010] wurden die theoretischen Bindungsraten zum einen stöchiometrisch und zum anderen über die Steinour-Formel berechnet. Die Ergebnisse aus beiden Rechnungen zeigen, dass theoretisch etwa 50 g CO<sub>2</sub>/100g Portlandzement durch Karbonatisierung dauerhaft gebunden werden kann. Die Bindungsrate an einer RC-Gesteinskörnung aus Altbeton resultiert demnach nicht nur aus dem jeweiligen Zementanteil des Kornes – unabhängig von der Art der mechanischen Zerkleinerung wird bei den derzeitigen Aufbereitungsverfahren das Korn immer in Anteilen aus altem Zementleim sowie dem ursprünglichen Zuschlag, d.h. Naturstein bestehen – sondern auch aus der ursprünglichen Zementart. Die spezifischen Bindungsraten ergeben sich aus dem Portlandzementanteil – bei Kompositzementen, d.h. Zementen mit Anteilen an bspw. Hüttensanden oder Flugaschen, kann der Anteil Portlandzement auch nur 20 % betragen. Geht man von einem durchschnittlichen Klinkeranteil der in der Vergangenheit verbauten Betone von 77 % aus, werden rechnerisch 44,8 kg Kohlendioxid/m<sup>3</sup> Beton für eine vollständige Karbonatisierung benötigt. Im Idealfall wird das Material über die gesamte Zeit der Beaufschlagung von einer kontinuierlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration durchströmt, d.h. die Beaufschlagung erfolgt nicht im Batch-Betrieb mit einer über die Zeit zwangsläufig abnehmenden CO<sub>2</sub>-Konzentration.

Im Rahmen der Versuche wurde auch die relative Massenzunahme in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Es zeigt sich, dass bei größeren Körnungen die Karbonatisierung vor Erreichen der theoretisch möglichen Werte abbricht, was auf das Verschließen der Poren schließen lässt, das die Reaktion im Inneren unterbricht. Die höchsten Bindungsraten sind daher in feinen Körnungen zu erreichen, der gesamte Porenraum kann erfolgreich mit CO<sub>2</sub> beaufschlagt werden.

Beeinflusst werden die Versuchsergebnisse auch von der Frage, inwieweit die Altbetone, aus denen die RC-Gesteinskörnung hergestellt wird, durch das in der Atmosphäre befindliche CO<sub>2</sub> schon vor-karbonatisiert waren. Wie aus den Versuchen ebenfalls deutlich wird: die Beaufschlagung führt nicht nur zu einer CO<sub>2</sub>-Bindung, diese Karbonatisierung verbessert auch die Eigenschaften der RC-Gesteinskörnung. So erhöht sich tendenziell die spezifische Dichte der Gesteinskörnung, die Porosität nimmt ab.

In einem zweiten darauf aufbauenden Forschungsprojekt [Seidemann et al., 2015] wurden diese Erkenntnisse bestätigt, wobei gerade auch Probenfeuchte (Wassergehalt von 9 % - 11 %) und die Temperatur (50 °C) während der Karbonatisierung wohl deutliche Auswirkungen auf das Ergebnis haben.

### DERZEITIGE LÖSUNGSANSÄTZE

Bei der praktischen Umsetzung der Karbonatisierung der RC-Gesteinskörnung in einer Aufbereitungsanlage für mineralische Bauabfälle sind Lösungen gefragt, die sich an einem Optimum zwischen maximaler Bindungsrate und spez. Aufwand und damit Kosten und Zeit orientieren. Auch die CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung selbst bedarf guter technischer Lösungen und damit entsprechender Aggregate. Auch wenn die wissenschaftlichen Erkenntnisse schon länger vorliegen, haben diese erst seit kurzem auch für die konkrete Praxis entsprechend an Bedeutung gewonnen, nachdem klar geworden ist,

dass der Bausektor einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele erzielen muss und hierbei insbesondere der Baustoff Beton im Fokus steht. Die Entwicklung von konkreten anlagentechnischen Lösungen für die Praxis steht demnach sehr wahrscheinlich erst am Anfang und muss weiter beobachtet werden. Nach derzeitigem Kenntnisstand lassen sich folgende Optionen benennen.

Die technische Lösung der Beaufschlagung einer Recyclinggesteinskörnung mit CO<sub>2</sub> ist vergleichsweise einfach. Es bedarf eines Raums, in dem die Gesteinskörnung während der Beaufschlagung gelagert ist und ausreichende Verweil- bzw. Beaufschlagungszeiten eingehalten werden können. Das beaufschlagte CO<sub>2</sub>-Gas muss die Umgebungsluft gut verdrängen können, um ausreichend hohe Konzentrationen an möglichst großen Gesteinskontaktflächen zu erreichen. Es gibt bspw. folgende Verfahrensanbieter, deren Lösungen sich im Detail unterscheiden.

Fa. Eberhard, Oberglatt (CH) <https://zirkulit.ch/co2-speicherung>

Fa. Heidelberg Materials, Heidelberg (D) <https://blog.heidelbergcement.com/de/ccu-betonabfalle-aus-abbruchmaterial-co2-mineralisierung-zement-und-klinkerersatzstoff>

Fa. Neustark, Bern (CH) <https://de.neustark.com/newhome>

Fa. SIKA, Baar (CH) <https://www.sika.com/en/knowledge-hub/reco2ver-concrete-recycling.html>

Der Lösungsansatz von Heidelberg Materials zielt auf die Komponente Zement. Hierfür wird der Altbeton möglichst selektiv in ehemaligen Zementleim und ursprünglichen Zuschlag aufgetrennt. Die Aufbereitungstechnik muss die unterschiedliche Sprödigkeit dieser Bestandteile nutzen. Die Körnung und der Sand aus dem ehemaligen Zuschlag kann als RC-Gestein in die Betonrezeptur zurückgeführt werden. Der alte Zementleim mit dem hohen Bindungspotenzial soll zukünftig als Klinkerersatzstoff verwendet werden können und wird hierfür auf die für Zementbestandteile benötigte Blaine-Werte weiter aufgemahlen und dann in einer feuchten Umgebung mit CO<sub>2</sub> beaufschlagt, bspw. im Zementwerk unter direkter Nutzung des Abgases.

Auf diese selektive Aufbereitung zielt auch das von der Fa. SIKA entwickelte Verfahren reCO<sub>2</sub>ver®, eine chemisch-mechanische Aufbereitung. Der alte Beton wird auch hier möglichst aufgetrennt in Körnung und Sand aus dem ehemaligen Natursteinzuschlag und dem alten Zementleim, der möglichst fein aufgemahlen wird. Dieser Prozess der Zerkleinerung und Auftrennung erfolgt in einer Trommel, in die SIKA Additive hinzugefügt werden und eine Beaufschlagung mit CO<sub>2</sub> erfolgt. Bei der Verweilzeit muss die Abfolge Zerkleinerung und Beaufschlagung beachtet werden. Über die Trommel erfolgt eine kontinuierliche Bewegung des Materials, so dass die gesamten Oberflächen für die Beaufschlagung zur Verfügung stehen.

Bei den übrigen Ansätzen erfolgt die eher klassische Aufbereitung des Altbetons und die Beaufschlagung der RC-Gesteinskörnung getrennt voneinander. Im ersten Schritt wird eine RC-Gesteinskörnung gemäß DIN EN 12620 hergestellt, die anschließend gesamt oder für einzelne Korngruppen mit CO<sub>2</sub> beaufschlagt wird. Die Fa. Eberhard integriert die Beaufschlagung über eine hierfür entwi-



Beschickung eines Reihendoseurs mit den Komponenten der RC-GK Typ 2, Altbeton und Mauerwerk



Innenansicht des Containers der Fa. Neustark AK zur Karbonatisierung der RC-GK

ckelte Speicheranlage direkt in die Silos eines Betonwerkes, was ausreichende Verweilzeiten ermöglicht und die Produktion des Transportbetons Zirkulit® ermöglicht. Die Fa. Neustark hat zusammen mit der Fa. KIBAG für die Beaufschlagung die Nutzung eines umgebauten Doseurs entwickelt, was die Produktion des Transportbetons KIBECO® erlaubt.

Altbetone stellen wichtige Rohstoffe nicht nur für die Produktion von RC-Gesteinskörnungen für den Transportbeton dar. Bis dato wird dieser vor allem zu Frost- oder auch Schottertragschichten für bspw. den Oberbau von Straßen verarbeitet. Hierfür werden Gemische bspw. in der Kornabstufung 0/45 hergestellt, idealerweise über den Einsatz von Doseuren. Werden diese zur CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung eingesetzt und verbleibt die Beaufschlagung beim Aufbereiter, lassen sich grundsätzlich auch diese Produktionslinien entsprechend umstellen.

Die Fa. Neustark verfügt auch über eine mobile Anlage, die im Moment zu Feldversuchen – wie auch hier im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgt – eingesetzt wird. Es handelt sich um einen Abroll-Container, mit Deckel und gasdicht ausgeführt. Ein Vakuumbrecher regelt den Unterdruck im Behälter. Über ein Injektionssystem im Inneren wird sichergestellt, dass die gesamte Masse der Gesteinskörnung durchflutet wird.

## 2.2 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DIE INTEGRATION IN DEN AUFBEREITUNGSPROZESS

### ERKENNTNISSE AUS EINEM FELDVERSUCH

Wie ausgeführt, ergeben sich die Behandlungserfolge aus der Wahl eines geeigneten RC-Materials, der Korngröße und damit spezifischen Oberfläche sowie der Verweilzeit in der CO<sub>2</sub>-Atmosphäre. Die Schwierigkeit ist zunächst unabhängig von der Technik gleich – es müssen ausreichende Verweilzeiten sichergestellt werden bei möglichst gutem Erfolg pro Zeiteinheit und zielgerichtet auf das ausgewählte Kornspektrum hin.

Auch der Feldversuch im Rahmen des Projektes zeigte deutliche Unterschiede in den dokumentierten Bindungserfolgen auf. Die Beaufschlagung von RC-Gesteinskörnung aus klassischem Bauschutt weist im Vergleich die geringsten Bindungsraten auf und dies in Abhängigkeit von den jeweiligen Altbeton- bzw. vor allem Altzementanteilen. Selbst Altbetonanteile von 30-50 % ergeben geringe Bindungserfolge und machen dies unwirtschaftlich.

Wird eine karbonatisierte RC-Gesteinskörnung Typ 2 für Transportbetonwerke hergestellt, kann sich die Beaufschlagung daher auf die Altbetonkomponenten (analog Typ 1) beschränken. Die Teilkomponente „Mauerwerk“ sollte eher nicht zusätzlich beaufschlagt werden.

Ebenfalls augenfällig sind die großen Unterschiede in den Bindungsraten in Abhängigkeit der Beaufschlagungszeiten. Diese liegen bei >2,5h Verweilzeit deutlich höher als bei Zeiten von etwas über 1h. Die Abhängigkeit ist nicht linear, d.h. die spez. Bindungsraten werden über die Zeit immer geringer. Trotzdem sind die Unterschiede so relevant, dass empfohlen werden kann, die Verweilzeiten der

RC-GK in den CO<sub>2</sub>-Atmosphären nicht zu kurz ausfallen zu lassen. Es bedarf damit ausreichend großer Lager-Kapazitäten und Verweilzeiten, um eine ausreichende Beaufschlagung erzielen zu können.

Auch die erwartete Abhängigkeit der Bindungserfolge von der spezifischen Oberfläche der RC-Gesteinskörnung konnte in dem Feldversuch bestätigt werden. Die Bindungsraten sind für Brechsand 0/2 deutlich günstiger als für die gröbere Gesteinskörnung. Auch für diese werden jedoch signifikante Bindungserfolge erzielt.

Die Beaufschlagung mit CO<sub>2</sub> sollte sich daher nicht allein auf den Brechsand konzentrieren, sondern auch die Körnung 2/16 aus Altbeton umfassen. Werden die Körnungen 2/8 und 8/16 getrennt an die Betonindustrie vermarktet, sollte geprüft werden, inwieweit die Beaufschlagung auf die Korngröße 2/8 begrenzt werden kann.

### ERGEBNISSE AUS DER EIGNUNGSPRÜFUNG NACH DIN EN 12620

Die Fa. Feefß aus Kirchheim/Teck verfügt über eine Zulassung zur Produktion einer RC-Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 und damit zur Belieferung von Transportbetonwerken. Mit der Beaufschlagung der RC-Gesteinskörnung mit CO<sub>2</sub> stand die Frage im Raum, inwieweit sich die damit verbundene Kalksteinbildung auf die geforderten Eigenschaften auswirken kann. Entsprechend erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes eine Prüfung dieser RC-Gesteinskörnung in den Korngruppen 0/2 und 2/16. Die Untersuchung (Typprüfung) erfolgte durch das Institut Dr. Haag, einer hierfür anerkannten Prüfstelle, und umfasste auch Parameter wie bspw. die Korngrößenverteilung oder die Kornform, die nicht durch die Karbonatisierung beeinflusst wurden. Beeinflusst werden vor allem folgende in der Tabelle benannten Parameter.

In allen Fällen werden diese Sollwerte deutlich eingehalten. Wie aus dem Vergleich der Körnungen 2/16 und 2/16 karbonisiert erkennbar wird, hat diese keinen negativen Einfluss auf deren Eigenschaften. Eine positive Beeinflussung lässt sich daraus jedoch ebenfalls nicht ableiten. Bei der Gegenüberstellung ist zu beachten, dass die Werte zur klassischen RC-Gesteinskörnung zu einem anderen Zeitpunkt im Rahmen einer Güteüberwachung ermittelt wurden.

### VERGLEICH DER RC-GESTEINSKÖRNUNG

		2/16	2/16 carb	0/ 2 carb	Sollwert
<b>Kornrohddichte ofentrocken</b>	Mg/m <sup>3</sup>	2,36	2,32	2,08	≥ 2,00
<b>Wasseraufnahme nach 10 Min.</b>	%	3,4	3,9	6,5	≤ 10
<b>Frost-Tau-Widerstand</b>	M %	3,5	3,6		≤ 4



gemischter Bauschutt



Container zur Karbonatisierung wird beschickt

In einer umfangreichen wissenschaftlichen Untersuchungsreihe an der Bauhaus Universität Weimar [Seidemann/Ludwig 2014] konnte jedoch der Nachweis geführt werden, dass mit der Karbonatisierung eine signifikante Verbesserung der physikalischen Eigenschaften verbunden ist. Es kommt zu einer Zunahme der Dichtigkeit der sekundären Gesteinskörnung und gleichzeitig zu einer Abnahme des Gesamtporenvolumens.

Wie man an den Daten zur Umweltverträglichkeit erkennen kann, liegen auch hier die ermittelten Werte deutlich unter den nach der DIN 4226-101 erlaubten Grenzwerten. Die Werte werden häufig um ein bis zwei Größenordnungen (Faktor 10 bis 100) unterschritten. Den Gesetzmäßigkeiten folgend, liegen die Werte für den Brechsand, und damit Material mit einer großen spezifischen Oberfläche, etwas höher als für gröbere Gesteinskörnung. Die Karbonatisierung der RC-Gesteinskörnung hat keinen negativen Einfluss. Im Gegenteil zeichnen sich bei der Gegenüberstellung mit Werten für unbehandeltes Material tendenziell Verbesserungen in den Freisetzungsraten ab.

#### UMWELTVERTRÄGLICHKEIT

Eluat		2/16	2/16 carb	0/2 carb	Sollwert
<b>pH-Wert*</b>		11,6	10,81	11,5	12,5
<b>el. Leitfähigkeit*</b>	µS/cm	966	298	765	3.000
<b>Chlorid</b>	mg/l	42	1,1	16	150
<b>Sulfat</b>	mg/l	<0,5	44	30	600
<b>Arsen</b>	µg/l	<1	<1	<1	50
<b>Blei</b>	µg/l	7	<1	<1	100
<b>Cadmium</b>	µg/l	<0,1	<0,1	<0,1	5
<b>Chrom ges.</b>	µg/l	9	2	25	100
<b>Kupfer</b>	µg/l	3	<1	8	200
<b>Nickel</b>	µg/l	<1	<1	1	100
<b>Quecksilber</b>	µg/l	<0,1	<0,1	<0,1	2
<b>Zink</b>	µg/l	16	7	9	400
<b>Phenolindex</b>	µg/l	<10	<10	<10	100

#### INTEGRATION IN DEN AUFBEREITUNGSPROZESS

Die Karbonatisierung der RC-Gesteinskörnung sollte möglichst beim Recycler und nicht im Transportbetonwerk erfolgen. Dies ermöglicht an dieser Stelle nicht nur eine entsprechende Wertschöpfung. Nur so ist es auch möglich, diesen Optimierungsansatz für weitere RC-Bauprodukte und Absatzwege zu öffnen. Werden die ungebundenen Gemische für den Straßenbau (Frostschutzschichten) oder für andere Maßnahmen im Tiefbau vor allem auf Basis von Altbetonen hergestellt, lassen sich auch diese Produktmassenströme entsprechend karbonatisiert vermarkten.

Grundsätzlich lassen sich zwei Lösungsansätze erkennen:

Die Beaufschlagungsbox fungiert als klassische Lagerbox, was eine geringe Lagerkapazität zur Folge hat und bedingt, dass während der Beaufschlagung kein Warenabruf erfolgen kann. Erfolgt die Lagerung nicht in Boxen sondern in Silos, lassen sich beide Aufgabenstellungen besser verbinden. Werden für die Beaufschlagung und die Lagerung separate Boxen vorgesehen, ist damit ein zusätzlicher Arbeitsschritt mit Radladern notwendig, verbunden mit zusätzlichen ökologischen und ökonomischen Kosten.

In allen Fällen ergibt sich aus der Integration dieser Aufgabenstellung in die Aufbereitung ein Bedarf an zusätzlicher Betriebsfläche für die Boxen und das Handling, aber auch für die Anlagentechnik, den Verdampfer sowie den CO<sub>2</sub>-Tank.

Die Integration in den Aufbereitungsprozess wird folgendermaßen vorgeschlagen. Sowohl bei der Produktion einer RC-GK Typ 1 als auch einer RC-GK Typ 2 sind für die Aufbereitung zwei Boxen vorzusehen, in denen der reine in einer separaten Aufbereitung gewonnene Brechsand 0/2 und die Körnung 2/16 mit CO<sub>2</sub> beaufschlagt werden kann. Besteht das Betonwerk auf eine getrennte Belieferung mit den Korngrößen 2/8 und 8/16, so liegt es nahe, in diesem Falle auf die Beaufschlagung der Korngruppe 8/16 zu verzichten.

Für die Produktion von Baustoffen für den ungebundenen Einsatzbereich – insbesondere Frostschutzschichten für den Straßen- und Wegebau – ist zu prüfen, inwieweit auch in diesem Fall diese Korngruppen als Komponenten genommen werden können. Die Herstellung der Gemische könnte dann bspw. über einen Doseur erfolgen. Sollten diese Produkte ebenfalls aus nahezu ausschließlich Altbeton hergestellt werden, wird die separate Aufstellung einer dritten Box für diesen Produktmassenstrom jedoch wirtschaftlicher sein. Mit der Kornabstufung 0/32 oder 0/45 weisen diese Produkte hohe Anteile an Brechsanden auf, die entsprechend hohe Bindungserfolge versprechen.

Die Boxen müssen gasdicht gestaltet sein und dies vor allem in den unteren Bereichen. Nach dem Ansatz der Fa. Neustark werden die Boxen von unten mit CO<sub>2</sub> beaufschlagt, es bildet sich wie in einer Wanne ein Gasgemisch mit höheren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Um CO<sub>2</sub>-Verluste zu vermeiden, müssen die Boxen mit einem Deckel versehen werden. Die Alternative dazu besteht darin, die Seitenwände der Box deutlich zu überhöhen. Sind die Boxen dann nur zur Hälfte mit Material befüllt, lässt sich der CO<sub>2</sub>-Verlust deutlich begrenzen. Die exakte Einstellung der CO<sub>2</sub>-Menge kann durch an den Seiteninnenwänden angebrachte Fühler verbessert werden, da sich so der „Füllstand“ anzeigen lässt.

Das Handling erfolgt am einfachsten über einen Radlader. Die Integration dieser Boxen in den Arbeitsablauf bedeutet einen zusätzlichen Radladereinsatz in der Produktionskette: Entnahme aus dem Schüttkegel des Brechers/Beschickung der Box – Entnahme aus der Box/Beschickung der Produkthalde – Verladung oder Beschickung eines Doseurs. Die Integration in den Betriebsablauf sollte so erfolgen, dass für die Beaufschlagung Verweilzeiten von mindestens 2 Stunden sichergestellt werden können. Auf Luftfeuchte und vor allem auch Temperaturniveau ist zu achten.



Komponente Mauerwerk für RC-GK Typ 2

Dieses Tor zur Box muss auf der einen Seite einen gasdichten Verschluss sicherstellen. Zum anderen muss dies Ausführung robust sein und der starken Beanspruchung durch den Radladerinsatz widerstehen. Derartige Aufgabenstellungen gibt es auch in anderen Bereichen, bspw. bei der Behandlung von Bioabfällen. Auch hier gibt es anlagentechnische Lösungen (bspw. Fa. Bekon), die eine Vergärung dieser Abfallmassen gewährleisten. Auch hier erfolgt das Handling über Radlader, auch hier müssen die Tore gasdicht schließen. Die Radlader dürften allerdings kleiner und leichter sein, als der in Aufbereitungsanlagen für mineralische Bauabfälle übliche Fahrzeugausstattung. Die sinnvolle Bemessung der Größe dieser Boxen ergibt sich auch aus der Gewährleistung einer ausreichend guten Durchströmung des Haufwerkes mit dem CO<sub>2</sub> und dies in angemessener Zeit.

Eine Alternative hierzu wären in Anlehnung an die Ausstattung der Anlage für die Feldversuche separate Behälter, die mittels Radlader beschickt werden können, jedoch nicht von diesen befahren werden müssen. Da die Entladung dann ebenfalls nicht per Radlader erfolgen kann, müssen sich diese Behälter anderweitig entladen lassen. Dies kann in Anlehnung an die Selbstentladewagen des Bahnverkehrs erfolgen oder einen Umbau von einzelnen Reihendoseuren bedeuten. Diese lassen sich gut von oben mittels Radlader beschicken. Über eine Öffnung am Boden bilden sich dann Haufwerke/Schüttkegel des beaufschlagten Materials, die dann wieder mittels Radlader bewegt werden können.

Auch hier müssen Zwischenlager für das beaufschlagte Material im Ausgang errichtet werden. Wird eine RC-Gesteinskörnung Typ 2 für die Betonindustrie produziert, kann auf eine Karbonatisierung der „Mauerwerkskomponente“ verzichtet werden.

### 2.3 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

Ausgehend von den Daten und Informationen, die zu den CO<sub>2</sub>-Bindungsraten an den unterschiedlichen Materialien und Gesteinskörnungen gewonnen werden konnten, lassen sich die positiven Beiträge zum Klimaschutz bilanzieren und bewerten. Die Bereitstellung des CO<sub>2</sub> sowie der eigentliche Prozess der Beaufschlagung der Gesteinskörnung ist mit einem Aufwand verbunden, der bei der ökologischen Bewertung zu berücksichtigen und dem quantifizierbaren Nutzen gegenüber zu stellen ist. Das CO<sub>2</sub> muss möglichst aus Prozessen entstammen, in denen dieses als Nebenbestandteil abgeschieden werden muss.

Die eigentliche Herstellung der RC-Gesteinskörnung erfolgt unabhängig von ihrer Beaufschlagung mit CO<sub>2</sub>. Der damit verbundene Aufwand geht damit nicht in eine Bilanzierung und Bewertung ein. Wie man den Ergebnissen entnehmen kann, ist vor allem die CO<sub>2</sub>-Bereitstellung mit einem höheren ökologischen Aufwand verbunden. Das CO<sub>2</sub> muss für Transport und Bereitstellung verflüssigt werden, was einen entsprechenden Energieeinsatz bedeutet. Die eigentliche Bereitstellung des CO<sub>2</sub> wird dabei nicht in die Bilanz einbezogen. Es handelt sich um ein Nebenprodukt aus der entsprechenden Abreinigung von Abgasen. Im vorliegenden Fall wird eine Aufbereitung von Biogas zu Bioerdgasqualitäten vorausgesetzt, was eine entsprechende Aufkonzentration des Methans bedeutet bzw. die Abscheidung des CO<sub>2</sub> aus dem Biogas voraussetzt. Eine weitere Aufbereitung im Sinne der

Abtrennung von Nebenbestandteilen oder Schadstoffen ist für die weitere Verwendung (Beaufschlagung einer RC-Gesteinskörnung) nicht erforderlich.

Der Aufwand der Beaufschlagung der Gesteinskörnung (inkl. Handhabung mittels Radlader) selbst ist aus ökologischer Sicht eher weniger bedeutend, der Antransport eher zu vernachlässigen.

Die aufgezeigten Bindungsraten sind eine erste Abschätzung und – wie ausgeführt – deutlich abhängig von der Zusammensetzung des Altbetons (Klinkeranteil, Karbonatisierungsgrad) und bspw. den Kontaktzeiten und -flächen.

### Treibhauseffekt

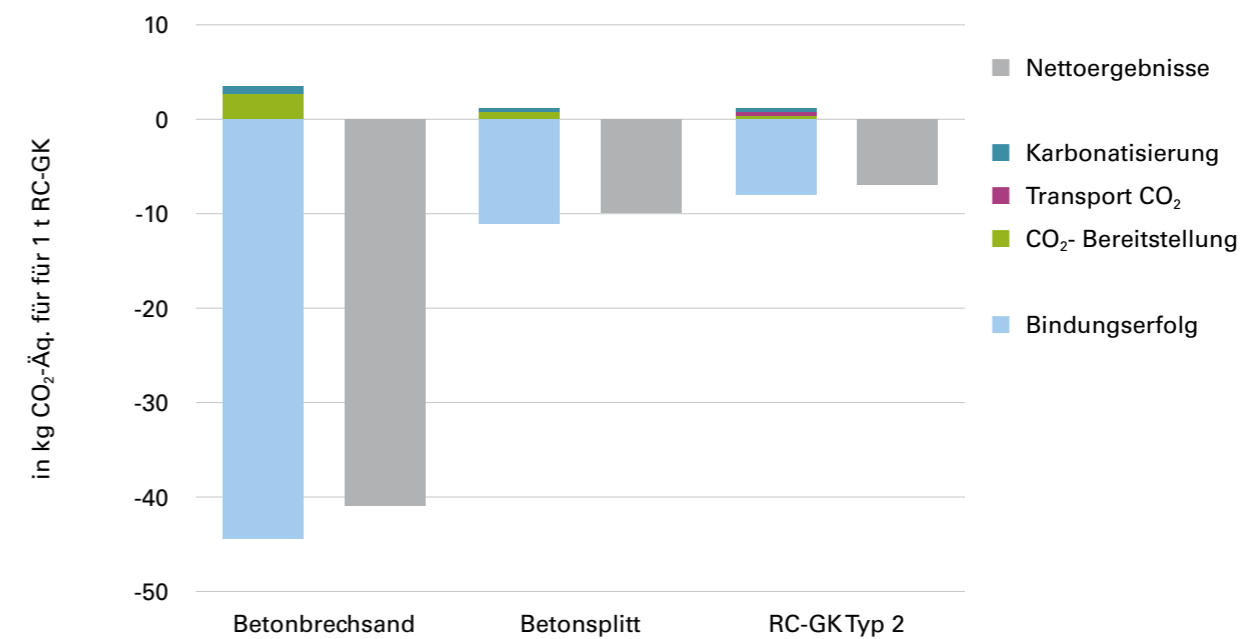


Abbildung 1: Karbonatisierung aus ökologischer Sicht (Treibhauseffekt)

# 3 Nassklassierung von Bodenaushubmassen

## 2.4 ÖKONOMISCHE BEWERTUNG

Die Beaufschlagung einer RC-Gesteinskörnungen oder entsprechender Gemische ist mit Mehrkosten verbunden. Diese ergeben sich aus den notwendigen Investitionen in die Anlagentechnik (Verdampfer, Steuerungs- und Messtechnik) und die Boxen sowie dem daraus resultierenden Flächenbedarf. Erfolgt die Lagerung bereits in offenen Boxen, ist eine Anpassung zur CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung vergleichsweise einfach möglich. Die Betriebskosten resultieren vor allem aus dem Handling (Radladereinsatz), sowie den Bezugskosten für das CO<sub>2</sub> und den für die Verdampfung benötigten Strom. Darüber hinaus sind in geringem Umfang auch Kosten für den Unterhalt zu berücksichtigen.

Diesen Kosten müssen entsprechende Erlöse gegenüberstehen. Diese können sich aus höheren Preisen für die beaufschlagten RC-Körnungen und RC-Gemische ergeben, oder aus CO<sub>2</sub>-Zertifikaten. Stand heute ist eher davon auszugehen, dass die Kunden tendenziell keine Mehrkosten für die karbonatisierten Baustoffe akzeptieren werden. Der Karbonatisierungsprozess muss sich daher möglichst vollständig über CO<sub>2</sub>-Zertifikate finanzieren. Zur Kostendeckung werden etwa 150€/t CO<sub>2</sub> benötigt. Die Schwelle der Wirtschaftlichkeit dürfte bei einer Durchsatzleistung von etwa 150.000 t/a erreicht sein.



gemischter Bauschutt

Die Steigerung der Ressourceneffizienz und die Entkopplung der Wirtschaftsentwicklung von der Rohstoffnachfrage ist eine zentrale Aufgabenstellung, die gerade auch den Bausektor vor neue Herausforderungen stellt. Materialkreisläufe schließen, Baustoffe und damit auch Bauwerke ressourcenschonender zu machen und der Rückgriff auf sekundäre Rohstoffquellen in der Baustoffproduktion sind die Stellschrauben, über die sich hier der Erfolg bestimmen lässt.

Die Frage, inwieweit sich auch Böden als Rohstoffquelle nutzen lassen, hat in jüngster Zeit deutlich an Aufmerksamkeit gewonnen. Alle Bodenaushubmassen bestehen aus Kies/Fels, Sand und schluffigen, lehmigen oder tonigen Bestandteilen, dies jedoch in unterschiedlicher Zusammensetzung. Werden Bodenmassen bspw. über Kiesgruben gezielt als Rohstoff gewonnen, ist der Anteil an Kieskorn möglichst hoch, im Gegenzug der Anteil an Feinkorn möglichst gering. Böden sind dann als Rohstoff für die Ziegelindustrie besonders geeignet, wenn sie möglichst vollständig aus Feinkorn und hier v.a. Ton bestehen, während bestenfalls Sande in nur sehr geringem Umfang und keine gröberen Körnungen enthalten sein dürfen.

Die technische Lösung, Bodenaushubmassen in die verschiedenen Bodenarten aufzutrennen, ist mit der Nassklassierung gegeben, eine für Kieswerke bekannte Aufbereitungstechnologie. Dies dient hier zur Auftrennung in einzelne Korngruppen, aber auch der verlässlichen Abtrennung von Feinkornanteilen sowie Fremdstoffen wie insbesondere Holz. Kiese und Sande werden vor allem in Richtung Betonindustrie vermarktet, schluffige oder tonige Bestandteile (sowie Holz) dürfen in diesen Rohstoffen nicht enthalten sein.

Natursteinbetriebe, und hier insbesondere Kieswerke, können daher in der Nutzung von Bodenaushubmassen als Fremdböden eine wichtige Rolle spielen, da hier Aufbereitungstechnik und geschultes Personal vorhanden sind. Es gibt bereits erste Ansätze hierzu, erste Betriebe [Haas, 2022] setzen tlw. in größerem Umfang derartige Böden in ihren Anlagen durch und schonen damit die Rohstofflagerstätten vor Ort. Die abgeschiedenen Feinanteile lassen sich insbesondere als Filterkuchen grundsätzlich als Rohstoffe in der Ziegelindustrie, aber auch für den Lehm- oder als Rohstoff für die Zementindustrie nutzen. Länger bekannt und in der Praxis bewährt ist die Aufbereitung und Nassklassierung von Bodenaushubmassen als separate Linie bei Aufbereitern mineralischer Bauabfälle. In Baden-Württemberg erfolgt dies aktuell bei der Fa. Max Wild [Silvers, 2023] sowie schon seit geraumer Zeit bei der Fa. Feeß in Kirchheim/Teck [ifeu 2019], die auch in diesem Aufgabenfeld nicht nur für Baden-Württemberg Vorreiter war und wesentlich zur Entwicklung und Verbreitung dieser Lösungsstrategie beigetragen hat.

## 3.1 TECHNISCHE AUSLEGUNG

Die Aufgabenstellung der Aufbereitung besteht darin, die Bodenmassen so aufzubereiten, dass sie in ihren Eigenschaften den Spezifikationen der Baustoffindustrie und hier vor allem der Betonindustrie entsprechen. Damit verbunden ist eine exakte Klassierung in einzelne Korngruppen und eine verlässliche Abscheidung von Fremd- und Störbestandteilen. Dies ist zum einen die Abtrennung von Leichtstoffen wie insbesondere Holz, zum anderen eine exakte Auftrennung in Größenklassen und



Sand aus der Nassklassierung von Bodenaushubmassen



hier vor allem auch eine verlässliche Grenze zwischen Sand/Körnung und den Feinbestandteilen. Abschlämbare Anteile in den groben Körnungen beeinträchtigen deren Eignung für die Betonindustrie deutlich. Dies gilt umgekehrt auch für körnige Bestandteile in den schluffig/tonigen Materialien, die perspektivisch in Richtung Lehm- oder Ziegelwerke vermarktet werden sollen.

Entsprechend erfolgt die Aufbereitung in der Regel über eine nasse Klassierung, die auch eine verlässliche Abtrennung von Leichtstoffen sicherstellt, verbunden mit einem Waschprozess zur Abtrennung von abschlämbaren Anteilen an der Körnung. Die trockene Klassierung ist hierfür in der Regel nicht ausreichend geeignet. Insbesondere abschlämbare Anteile lassen sich nicht verlässlich abscheiden.

Diese Nassklassierung ist grundsätzlich auch für die Aufbereitung von Bodenaushubmassen geeignet. Die Feinanteile sind hier tendenziell höher, als es bei Rohstoffgewinnungsstätten üblich ist. Dies dürfte möglicherweise auch für den Anteil an Leichtstoffen zutreffen. Dies muss bei der genauen Konzeption der Aufbereitungsanlagen berücksichtigt werden, die einzelnen technischen Module dürften sich aber wenig von den Anlagen der Rohstoffgewinnung/Kieswerken unterscheiden. Die Systembausteine, die der Abtrennung der abschlämbaren Anteile dienen, müssen auf deren höheren Anteil im Input ausgelegt werden.

Zentral ist die Aufgabenstellung, den „Lehm“, der das Korn umhüllt, verlässlich abzutrennen. Hierfür ist ein einfaches Wasserbett nicht ausreichend, der Lehmanteil löst sich nicht schnell genug in Wasser auf. Es bedarf daher mechanischer Energie, mit der die „Lehmklumpen“ aufgelöst werden bzw. auch der Lehmanteil an den Körnungen abgerieben wird. Die technische Lösung hierfür ist bekannt, der Einsatz einer Schwertwäsche ist üblich und unstrittig. Entscheidend ist die Frage ihrer genauen Konfiguration, hier gibt es unterschiedliche Technikanbieter und unterschiedliche Lösungen. Die genaue Konfiguration der Anlagen erfolgt auf die Inputqualität, die Zusammensetzung der Fremdböden, hin und muss bspw. eine ausreichende Verweilzeit in den Schwertwäschen sicherstellen.

Liegt der Feinanteil höher, ist ggf. auch eine Konditionierung des Inputmaterials notwendig, d.h. eine Zudosierung von skelettreicheren Bestandteilen. Möglicherweise ist über das zuführende Förderband auch eine „Vereinzelung“ oder auch mechanische Auflösung von Lehmbrocken notwendig, sowie eine Abtrennung eines Überkorns durch ein Vorsieb. Die Zudosierung skelettreicher Bestandteile kann über den Radlader erfolgen, der auch für die Beschickung der Anlage eingesetzt wird.

Die Abscheidung von Holz erfolgt über eine Leichtstoffabtrennung, die über das Wasserbad in der Schwertwäsche gut zu erreichen ist. Das dort aufschwimmende Material wird abgeschieden. Bei Fremdböden sind – gerade bei Stadtböden - anthropogene Bestandteile nicht ganz auszuschließen, die ebenfalls vergleichsweise leicht sind und nach dem gleichen Vorgang abgeschieden werden. Die meisten Anlagen, die zur Aufbereitung von Fremdböden geeignet wären, sind auf einen Feinkornanteil von maximal ca. 30 % ausgelegt; limitierend sind hier die Wirtschaftlichkeit und die Kapazität der Kammerfilterpresse. Höhere Feinanteile reduzieren die Durchsatzleistung der Gesamt-

anlage, einmal wegen der höheren Verweilzeit in der Schwertwäsche, vor allem jedoch durch die Limitierungen in der Abwasserreinigung. Kammerfilterpressen sind teuer in der Anschaffung und im Betrieb (Stromverbrauch, Fällungsmittelbedarf).

Technisch sind aber auch Feinkornanteile von 50 % möglich. Erreicht wird dies durch eine Erweiterung der Aufbereitungsmodule „Schwertwäsche“ in Richtung „Turbowasher“, ergänzt um bspw. Attritionszylinder. Diese sind – ähnlich der Attritionstrommeln – darauf ausgelegt, die Zielkörnung mechanisch durch Reibung von anhaftenden Materialien zu befreien.

### 3.2 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

Die Nassklassierung von Bodenaushubmassen wurde im Rahmen eines kleinen Forschungsprojektes für die LUBW [ifeu 2022] aufgearbeitet, hier allerdings im Schwerpunkt auf die Möglichkeiten zur Aufbereitung in Kieswerken. Die Aufbereitungstechnik mit Schwertwäsche und Nassklassierung ist hier bereits für die klassischen Rohstoffe etabliert, es bedarf Anpassungen an die leicht abweichenden Zusammensetzungen und Eigenschaften dieser als Rohstoffquelle genutzten Bodenaushubmassen. In einem von der DBU geförderten Forschungsprojekt [ifeu 2019] wurden die Optionen im Umgang mit Bodenaushubmassen bilanziert und aus ökologischer Sicht bewertet und dies am Beispiel der bei der Fa. Feeß in Kirchheim/Teck betriebenen Anlage.

Die Aufbereitung erfolgt mit dem Ziel, Körnung und Sand in Richtung Betonwerke vermarkten und hier massengleich entsprechende primäre Rohstoffe einsparen zu können. Für den Schluffanteil wird eine Vermarktung als Rohstoff für die Ziegelindustrie oder für die Herstellung von Blähton angenommen.

Im Ergebnis lässt sich erkennen, dass für die Aufbereitung vor allem der Strombedarf der Aggregate zubezogen schlägt. Die Summe aller Lasten aus der Aufbereitung wiegen im Treibhauseffekt die damit erzielbaren Substitutionspotenziale nicht ganz auf.

Wenn die Produkte aus der Bodenwäsche jedoch entsprechend 12 km näher am Absatzort liegen als die Primärmaterialien aus weiter entfernten Kies-, Sand- und Tongruben, kehrt sich bereits die Nettolast in eine Nettoentlastung um. Wenn der Boden wie im Status Quo deponiert werden muss, kann dies je nach spez. Situation vor Ort mit höheren Netto-Lasten verbunden sein und übersteigen ggf. die Netto-Lasten aus der Bodenwäsche. Die Aufbereitung über Klassieranlagen ist dann aus ökologischer Sicht grundsätzlich vorteilhaft..

Mit dem Bilanzierungsergebnis nach KRA (kumulierter Rohstoffaufwand) wird der ökologische Vorteil deutlich. Die Nutzung der Bodenaushubmassen als Rohstoffquelle hilft primäre Rohstoffe zu schonen und mindert damit zudem den Eingriff in Natur und Landschaft.



Nassklassieranlage



Körnung aus der Nassklassierung

## Treibhauseffekt

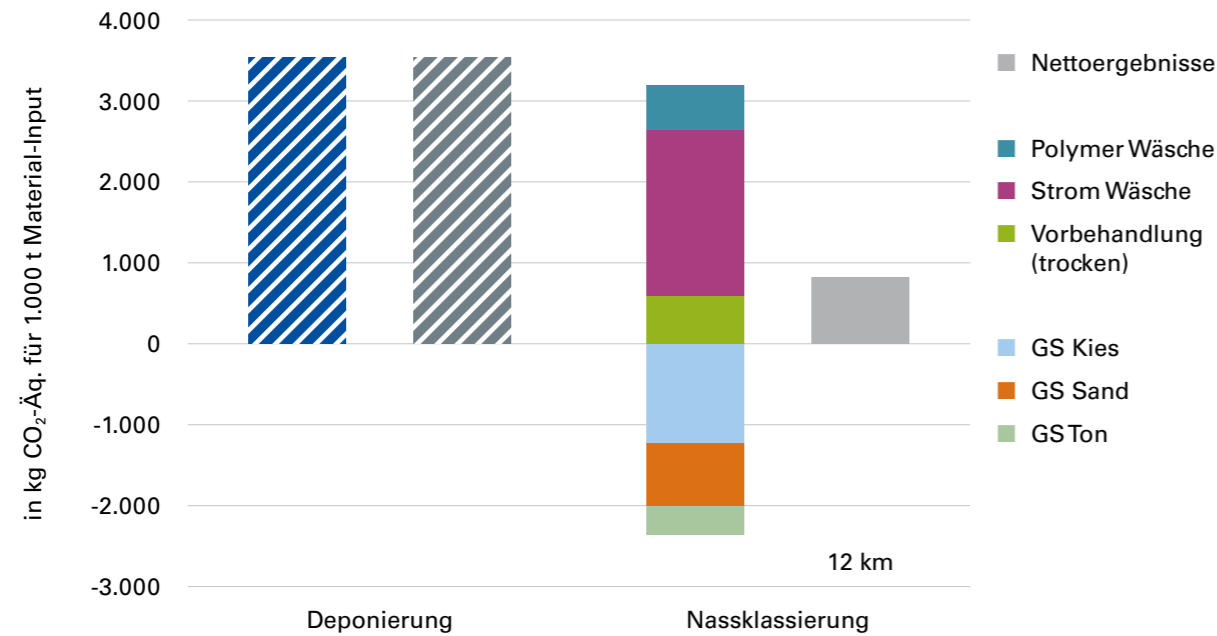


Abbildung 2: Nassklassierung aus ökologischer Sicht (Treibhauseffekt) [ifeu Heidelberg, 2019]

## Kumulierter mineralischer Rohstoffaufwand

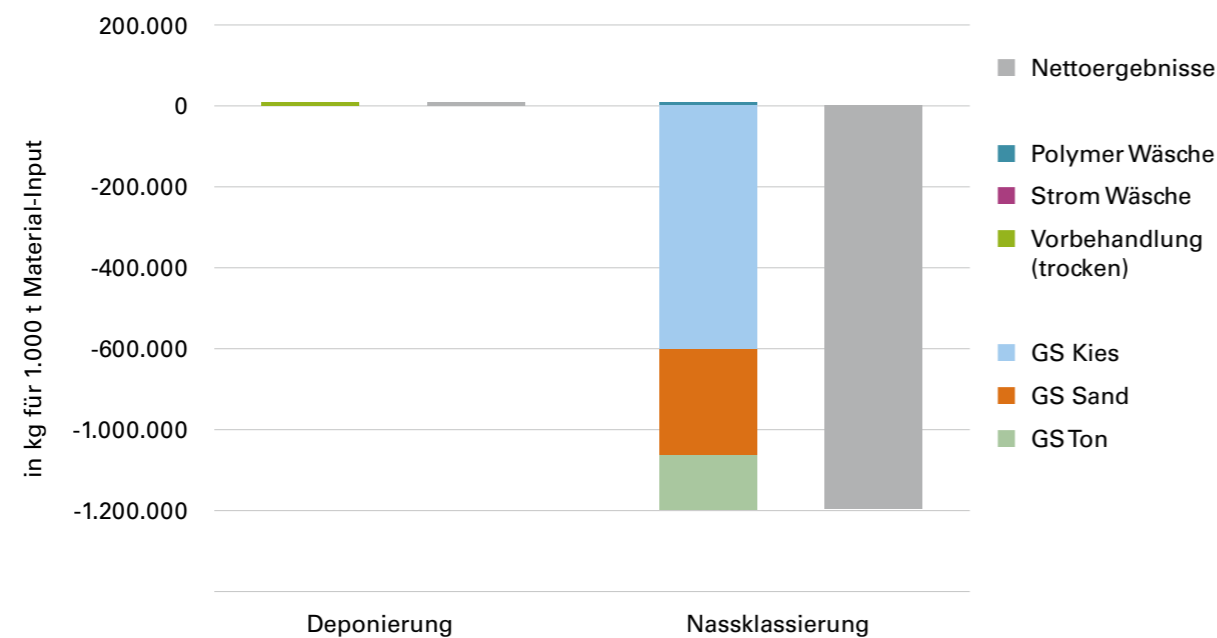


Abbildung 3: Nassklassierung aus ökologischer Sicht (KRA) [ifeu Heidelberg, 2019]

## 3.3 ÖKONOMISCHE BEWERTUNG

Die Nassklassierung von Bodenaushubmassen und die Herstellung von Rohstoffen für die Baustoffindustrie ist auch aus ökonomischer Sicht insbesondere dann vorteilhaft, wenn folgende Rahmenbedingungen gegeben sind:

- Die Erlöse, die aus der Annahme der Bodenmassen erzielt werden können, stellen einen zentralen Deckungsbeitrag dar. Für den Abfallerzeuger oder -besitzer muss die Anlieferung an der Aufbereitungsanlage wirtschaftlich vorteilhaft gegenüber den in der jeweiligen Region existierenden Entsorgungsalternativen sein. Die Ablagerung auf Deponien darf nicht in Konkurrenz zu Verwertungsoptionen treten.
- Der Feinkornanteil bestimmt zum einen den Aufbereitungsaufwand. Für die daraus resultierende Masse an Lehm/Schluff/Ton müssen zudem günstige Absatzwege bspw. über die Baustoffproduktion gefunden werden. Ihre Entsorgungskosten bestimmen deutlich die Wirtschaftlichkeit dieser Aufbereitungsstrategie.
- Die aus der Aufbereitung gewonnenen Rohstoffe Sand und Kies entsprechen primären Rohstoffen und finden ihre Abnehmer und Erlöse.
- Der Standort der Aufbereitung ist möglichst so gewählt, dass sich sowohl für die Anlieferung der Bodenmassen als auch für den Absatz der produzierten Rohstoffe Transportkostenvorteile ergeben.



Nassklassieranlage der Fa. Feels

# Literaturverzeichnis

[Bekon o.J.], Das Bekon®-Verfahren. Innovative Biogasanlagen für die energetische Nutzung von Bioabfall und anderen organischen Reststoffen, Unterföhring o.J.

[BGR 2021], Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland – Rohstoffsituation 2020, Hannover 2021

[Haas 2022], Marco Haas (Fa. Zwisler), Bodenaushubmassen als Rohstoffquelle, Vortrag auf dem Fachsymposium „Bausteine zum zirkulären Bauen“, Stuttgart 09.03.2022

[ifeu 2019], ifeu Heidelberg, Vollständige Aufbereitung und Verwertung von Boden- und Bauschuttmaterial - Teilvorhaben: Erschließung neuer innovativer Absatzwege für RC-Baustoffe, im Rahmen des DBU geförderten Forschungsprojektes AZ 32046, Heidelberg 2019

[ifeu 2022], ifeu Heidelberg, Bodenaushub als Rohstoffquelle, Teil 1: Aufbereitung über Kieswerke, im Auftrag der LUBW Karlsruhe, Heidelberg 2022

[ifeu/Feefß/Holcim 2023], ifeu Heidelberg/Feefß Kirchheim/Teck/Holcim Stuttgart, R-Beton klimafreundlich und noch ressourcenschonender, Forschungsprojekt gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2023

[Seidemann et al. 2015] IAB Weimar, Weiterentwicklung der Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton (2. Phase: Prozessoptimierung im Labormaßstab und Technologieentwurf), gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Az: 23689/02), Weimar 2015

[Seidemann/Müller 2010], Bauhaus-Universität Weimar, Gezielte Karbonatisierung rezyklierter Gesteinszuschläge zur simultanen Nutzung von Betonbruch und Verbesserung der Materialeigenschaften als Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Az: 23689), Weimar 2010

[Seidemann/Ludwig 2014], Bauhaus-Universität Weimar, Einfluss von carbonatisierten sekundären Gesteinskörnungen auf die Eigenschaften von Recyclingbeton, in: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –, S. 639 – 651

[Silvers 2023] Dr. Gregor Silvers (Fa. Max Wild), Die umfassende Nutzung von Aushubmassen ist bereits auf dem Weg – ein Erfahrungsbericht, Vortrag auf dem Fachsymposium „Bauwende – Aufbruch in das zirkuläre Bauen“, Stuttgart 14.03.2023

[UM 2017], Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Leitfaden zum Einsatz von R-Beton, Stuttgart 2017

[vdz 2020], Verband der Deutschen Zementindustrie, Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien, Düsseldorf 2020

## IMPRESSUM

### HERAUSGEBER

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft  
Kernerplatz 9  
70182 Stuttgart  
Telefon 0711 126-0  
Fax 0711 126-2881

### REDAKTION:

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft  
Baden-Württemberg  
Referat 26 – Kreislaufwirtschaft: Infrastruktur, biogene Wertstoffe,  
Baustoff-Recycling

LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg  
Referat 35 – Kreislaufwirtschaft, Chemikaliensicherheit

### BEARBEITER

Florian Knappe (ifeu), Sebastian Rauscher (Feefß)

### PROJEKTBETEILIGTE

Fa. Neustark AG Bern, Fa. Holcim Stuttgart

### GESTALTUNG

ID-Kommunikation, Heidelberg

### BILDNACHWEISE

Titelbild: © R. Koch  
Seite 2-15: © Heinrich Feefß GmbH & Co. KG



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT