

Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.

Aktuelle Forschungsergebnisse der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.

**Eine zusammenfassende Darstellung für die
Projektbegleitenden Ausschüsse der
industriellen Gemeinschaftsforschung**

Berichterstatter:

**Dr.-Ing. Wolfgang Eden
Zakaria Istanbuly, M. Sc.**

Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover

Impressum

Aktuelle Forschungsergebnisse der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. -
Eine zusammenfassende Darstellung für die Projektbegleitenden Ausschüsse
der industriellen Gemeinschaftsforschung

Ausgabe 31. Juli 2025

Herausgeber:
Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover

Berichtersteller:
Dr.-Ing. Wolfgang Eden
Zakaria Istanbuly M. Sc.
Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover

Inhaltsverzeichnis

1. ZUSAMMENFASSUNG	5
2. FORSCHUNGSPROJEKTE	6
2.1. Einsatz von calciniertem Ton zur Nutzung bislang ungeeigneter Sande für die Kalksandsteinproduktion - Alkalifänger	7
2.2. Eignung von Sägeschlämmen aus der Fertigung von Kalksandstein. Planelementsystemen als Optimierungszusatz für die Kalksandsteinproduktion	9
2.3. Produktion von CO ₂ -armen Öko-Mauersteinen durch bindemittelfreie Autoklavierung von RC-Brechsanden aus Beton und Ziegel	11
2.4. Ermittlung von Grundlagen zur Produktion von nachhaltigen Kalksandsteinen mit minimierter CO ₂ -Last – Reduktion der Kalkdosis	13
2.5. Maßnahmen zur Steigerung des Kalksandstein-Recyclinganteils	15
2.6. Einsatz von metallurgischen Schlacken bei der Kalksandsteinproduktion zur Erhöhung des baulichen Schallschutzes	17
2.7. Kosteneinsparung und Steigerung der Ressourceneffizienz von Kalksandsteinen durch Ansatz von Druckhaltestufen bei der Hydrothermalhärtung	19
2.8. Entwicklung eines Schnellprüfverfahrens zur Sicherstellung der Dampfgängigkeit von hochverdichteten Kalksandstein-Rohlinge	21
2.9. Einsatz von Zement als alternatives Bindemittel bei der Kalksandsteinproduktion	26
2.10. Reduzierung treibhausrelevanter Emissionen bei der Kalksandsteinproduktion durch Ersatz von CO ₂ -intensivem Branntkalk durch Calcinierten Ton	28
2.11. Eignungsnachweis von Kalksandsteinen unter Verwendung von RC-Baustoffen Demonstrations-Bauvorhaben ReBAU im Rheinischen Revier / Recyclingfähigkeit von Kalksandstein-Mauerwerk mit sulfatbelasteten Mörteln und Putzen	29
2.12. Einsatz von künstlicher Intelligenz zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO ₂ -Emissionen bei der Autoklavierung von Kalksandsteinen	31
2.13. Multifunktionale Filtersubstrate zur Behandlung von Niederschlagsabflüssen aus recyceltem Kalksandstein-Mauerwerks-Abbruchmaterial	33
2.14. Zusatz von CO ₂ -aufnehmenden Gesteinskörnungen zur Steigerung des Recarbonisierungspotenzials von Kalksandsteinen - Ein neuer Ansatz für Carbon Capture and Storage/Use- CCSU	34
2.15. Beschleunigte Recarbonatisierung von Kalksandsteinen zur Decarbonisierung der Kalksandsteinproduktion	35
2.16. Decarbonisierung der KS-Produktion durch Erzeugung von CSH-Bindemittelphasen mit geringem CO ₂ -Footprint – Absenkung der Härtetemperatur – Einsatz der in-situ-Röntgendiffraktometrie während der Autoklavierung	37
2.17. Schnellrecarbonatisierung von Kalksandstein- und Porenbeton-Recyclingmaterial	38
2.18. Net Zero CO ₂ Kalksandsteingebäude - ein erstmaliger Ansatz für eine ganzheitliche, numerische Methode zur Reduzierung der CO ₂ -Emission über den gesamten Lebenszyklus von Kalksandsteingebäuden	39

2.19	Anwendung der Nanotechnologie bei der Kalksandsteinproduktion - Umsetzung der Kalksandstein-Roadmap	40
2.20	Technologie zur Reduktion der CO ₂ -Emissionen bei der Kalksandsteinproduktion	42
2.21	Decarbonisierung von Kalksandstein – Zementsteingranulat aus Beton-Recycling-Material als CSH-Phasen-Reaktionsbeschleuniger	48
2.22	Abtrennung von Gipsputzmörtel von Kalksandstein-Mauerwerk mittels elektrohydraulischer bzw. elektrodynamischer Fragmentierung	49
2.23	Decarbonisierung von Kalksandstein durch Zugabe von Pflanzenkohle aus der Pyrolyse	50
2.24	KI-gestützte Detektion & hochauflösende Visualisierung von Rissbildungen an Rohlingen	52
3.	LITERATURVERZEICHNIS	53
3.1	Allgemeine Literatur	53
3.2	Forschungsberichte der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.	54

1. ZUSAMMENFASSUNG

Allgemeines

Diese Arbeit enthält die wichtigsten Forschungsergebnisse der im Zeitraum von 2010 bis 2024 bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. (FVKS) erschienenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und weiteren Forschungsergebnissen. Schwerpunkte sind die Zusammenhänge zwischen den Rohstoffeigenschaften, den verfahrenstechnischen Herstellbedingungen und den Eigenschaftswerten von Kalksandsteinen sowie die Technologien zur Erreichung der Klimaneutralität. Insbesondere werden Verfahren zur Reduzierung der CO₂- und anderer umweltrelevanter Emissionen sowie zur Absenkung der Energieverbräuche und der Produktionskosten sowie mit diesem Know-how erzeugten Produkte vorgestellt. Diese Zusammenstellung wird bei Vorliegen weiterer, neuer Forschungsergebnisse aktualisiert und fortgeschrieben.

Anwendungswarnvermerk

Die Übertragung der in den einzelnen Forschungsprojekten vorgestellten Untersuchungsergebnisse auf die Produktionsbedingungen in Kalksandsteinwerken ist in jedem Einzelfall unter Berücksichtigung werkspezifischer Gegebenheiten durch eingehende technische und wirtschaftliche Voruntersuchungen im Kalksandsteinwerk und im Labor zu überprüfen. Dabei sind ökologische und ökonomische Aspekte sowie Fragen der Nachhaltigkeit sowie der Arbeitssicherheit und Hygiene zu berücksichtigen.

Haftungsausschluss

Die vorliegende Studie wurde durch die Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. (FVKS) erstellt. Zur Sicherstellung der Fehlerfreiheit der in dieser Studie dargestellten Informationen wurden angemessene Maßnahmen getroffen. Dennoch gibt die FVKS keine Zusicherungen und Gewährleistungen für die Richtigkeit der getroffenen Aussagen und übernimmt keine Haftung für Ungenauigkeiten und Unvollständigkeiten. Gegenüber Parteien, die diese Studie nutzen, wird weder jetzt noch in Zukunft durch die FVKS, seine Mitarbeiter oder Vertreter eine ausdrückliche oder implizite Zusicherung oder Gewährleistung gegeben oder eine Verantwortung oder Haftung übernommen. Jegliche Haftung ist hiermit ausdrücklich ausgeschlossen.

Dank

Wir danken allen an unseren Projekten beteiligten Forschungspartnern:

- Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen AiF „Otto von Guericke“, Köln
- Bundesamt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
- Bimolab gGmbH, Soest
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Bonn
- FEhS-Institut für Baustoff-Forschung e.V., Duisburg
- Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. Bremen
- Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg
- Hochschule Wismar
- Leibnitz Universität Hannover
- Technische Hochschule Ingolstadt
- Technische Universität Clausthal
- Universität der Bundeswehr München
- Universität Kassel
- Unternehmen der Kalksandsteinindustrie, Mitglieder der FVKS

2. FORSCHUNGSPROJEKTE

2.1 Einsatz von calciniertem Ton zur Nutzung bislang ungeeigneter Sande für die Kalksandsteinproduktion - Alkalifänger (AiF-Nr. 21067-N)

Kalksandsteine sind Mauersteine, die aus Kalk und silikatischen Rohstoffen mittels hydraulischer Pressen geformt und anschließend in einer Atmosphäre von gespanntem Wasserdampf autoklaviert werden. Bislang gilt in der Kalksandsteinindustrie, dass der SiO_2 -Gehalt von Gesteinskörnungen möglichst hoch sein soll, mit der Folge, dass Sande, die diese Anforderung nicht erfüllen, bis heute i.d.R. abgelehnt werden.

Mit diesem Forschungsvorhaben wurde der Ansatz verfolgt, bislang als ungeeignet ausgewiesene Gesteinskörnungen mit höherem Gehalt an kritischen bis alkalihaltigen Nebenmineralen durch Zusatz von calcinierten Tonen in ihrer Funktion als „Alkalifänger“ für die Kalksandsteinindustrie nutzbar zu machen. Im Rahmen der detaillierten röntgendiffraktometrischen und anderen chemisch-mineralogischen sowie physikalischen Untersuchungen zeigt sich, dass es unter Einsatz von Calciniertem Ton möglich ist, den Einfluss von Alkalien zu blockieren.

Durch Zugabe von Calcinierten Tonen kann zudem ein Teil des Branntkalkes substituiert werden. Daraus resultiert die Möglichkeit einer deutlichen Kosten- und Energieeinsparung und somit zu einer Reduzierung von CO_2 -Emissionen. Möglichkeiten der Qualitätssteigerung bei sonst gleichen Herstellbedingungen stehen ebenfalls offen. Die Werksversuche bestätigen die Laborergebnisse. Es konnte im großtechnischen Maßstab in Kalksandsteinwerken nachgewiesen werden, dass es durch den Einsatz von Calciniertem Ton möglich ist, Branntkalk zu substituieren, siehe Forschungsbericht Nr. 138.



Abb. 1: Funktionsmuster aus den Werksversuchen, hergestellt mit Calciniertem Ton (Bildquelle: FVKS)

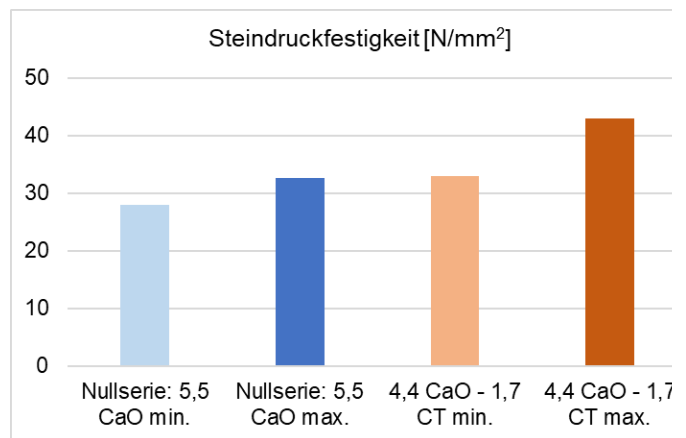


Abb. 2: Zuwachs der Steindruckfestigkeit bei Zugabe von Calciniertem Ton zur Rohmischung (Bildquelle: FVKS)

Im Rahmen von Werksversuchen wurden im Dezember 2022 Werte der Steindruckfestigkeiten von bis zu rd. $\beta_{\text{DSt}} = 43 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Der CO_2 -Ausstoß liegt im Vergleich zu handelsüblichen Kalksandsteinen entsprechend dem geringeren CO_2 -Footprint des Calcinierteren Tones gegenüber Branntkalk - je nach Herstellparametersatz - deutlich geringer, siehe Tabellen 1 bis 3.

Die Reduzierung der CO_2 -Menge konnte von 7,75 t CO_2 /t KS-Material auf 5,78 t CO_2 /t KS-Material, also um rd. 25 % reduziert werden. Entsprechend ähnliche Verhältnisse gelten für die weiteren umweltrelevanten Emissionsparameter, z.B. NO_x , N_2O , SO_2 , CH_4 , etc.

Ansatz	Serie	Kalk-dosis CaO 87,3 M.-%	Calci-nierter Ton	Kalk-stein- brech- sand	Donau- sand	Kiesel- erde	Kalk-stein- splitt	Summe GK	Press- feuchte	Press- druck	Härte- kessel Nr.	Härte- druck	Härte- dauer	Länge	Breite	Höhe	Druck- festigkeit	Rohdichte trocken	DTA Ca(OH) ₂
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	bar	./.	bar	h	mm	mm	mm	N/mm ²	kg/dm ³	M.-%
Werks- versuch 1a 11.08.2022 bis 13.08.2022	1	5,5	0,0	66,7	2,5	14,8	9,9	100,0		210	5	15	1-6,7-1	497,5	174,1	99,3	31,8	2,02	0,0
	2										1			497,6	174,3	99,5	35,5	1,99	./.
	3										6			497,7	173,8	100,0	34,8	1,99	./.
	4										3			497,8	174,0	99,8	31,8	2,01	./.
	5										2			497,9	174,5	100,0	31,6	1,99	./.
	6										4			497,7	174,2	100,0	30,2	2,00	./.
	MW										./.			497,7	174,2	99,8	32,6	2,00	0,0
Werks- versuch 1b 17.08.2022 bis 18.08.2022	1	5,5	0,0	66,7	2,5	14,8	9,9	100,0		215	4	15	1-6,7-1	497,5	174,1	99,3	26,8	2,01	0,0
	2										6			497,6	174,3	99,5	30,2	1,96	./.
	3										2			497,7	173,8	100,0	27,9	1,99	./.
	4										1			497,8	174,0	99,8	28,4	1,99	./.
	5										3			497,9	174,5	100,0	25,9	1,95	./.
	6										5			497,7	174,2	100,0	28,9	2,00	./.
	MW										./.			497,7	174,2	99,8	28,0	1,98	0,0

Ansatz	Serie	Kalk-dosis CaO 87,3 M.-%	Calci-nierter Ton	Kalk-stein- brech- sand	Donau- sand	Kiesel- erde	Kalk-stein- splitt	Summe GK	Press- feuchte	Press- druck	Härte- kessel Nr.	Härte- druck	Härte- dauer	Länge	Breite	Höhe	Druck- festigkeit	Rohdichte trocken	DTA Ca(OH) ₂
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	bar	./.	bar	h	mm	mm	mm	N/mm ²	kg/dm ³	M.-%
Werks- versuch 2 06.09.2022 bis 09.09.2022	Serie 1-1	4,4	1,7	66,7	2,5	14,8	9,9	100,0	4,5	207	./.	15	1-6,7-1	498,2	174,3	98,3	41,8	1,97	0,0
	Serie 1-2													498,2	174,2	98,6	39,2	1,97	./.
	Serie 2-1													498,1	174,2	98,6	40,7	2,00	0,0
	Serie 2-2													498,1	173,6	98,2	38,5	1,96	./.
	Serie 3-1													498,3	174,2	98,8	40,1	1,99	0,0
	Serie 3-2													498,1	173,6	98,4	38,2	1,95	./.
	Serie 4-1													498,1	174,2	98,5	39,1	1,97	0,0
	Serie 4-2													498,1	173,5	98,1	36,5	1,93	./.
	Serie 5-1													498,1	173,8	98,1	40,5	1,95	0,0
	Serie 5-2													498,2	174,2	98,1	42,9	1,97	./.
	Serie 6-1													498,1	173,7	98,4	39,5	1,94	0,0
	Serie 6-2													498,1	174,2	98,6	40,4	1,96	./.
	Serie 7-1													498,1	174,1	98,0	42,0	1,96	0,0
	Serie 7-2													498,2	174,0	98,0	39,8	1,91	./.
	Serie 8-1													498,1	174,2	98,2	37,7	1,96	0,0
	Serie 8-2													498,0	173,6	98,0	33,0	1,95	./.
	MW													498,1	174,0	98,3	39,4	2,0	0

Tabelle 1 und 2: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse zu den Versuchen mit Calcinierterem Ton (Untersuchungsansatz 1 und 2) (Quelle: FVKS)

Neueste Ergebnisse aus April 2024 zeigen, dass die direkte Substitution von Branntkalk (Reduzierung von 5,5 auf 1,5 M.-%) durch Calciniertem Ton bei schrittweiser Zugabe von 2,0 / 3,0 und bis zu 4,0 M.-% hohe Steindruckfestigkeitswerte von $\beta_{D,St} = 17,5$ bis $28,4 \text{ N/mm}^2$ ergeben hat, siehe Tabelle 3.

Serie	Sand 1 a) Werk 1: Sand KBS b) Werk 2: Eigensand M.-%	Sand 2 a) Werk 1: Sand D b) Werk 2: Zukaufsand M.-%	Sand 3 a) Werk 1: KE M.-%	Sand 4 a) Werk 2: KSS M.-%	Zement Sorte CEM-I M.-%	RC- Beton- bruch M.-%	RC- Beton- mehl M.-%	CT Calcini- er Ton M.-%	Kalk- dosis CaO M.-%	Press- feuchte F_p M.-%	Press- druck σ_p N/mm ²	Härte- druck p_e bar	Dauer der Halte- phase h	Stein- roh- dichte ρ_{tr} kg/dm ³	Stein- druck- festig- keit $\beta_{D,St}$ N/mm ²
Werk 1															
CTW-1	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	0,0	5,5	5,0	12	16	1-7-1	1,90	28,4
CTW-2	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	2,0	3,5	5,0	12	16	1-7-1	1,96	20,2
CTW-3	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	3,0	2,5	5,0	12	16	1-7-1	1,97	17,5
CTW-4	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	4,0	1,5	5,0	12	16	1-7-1	1,98	21,7
Werk 2															
CTH-1	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	0,0	7,0	5,0	12	16	1-6-1	1,87	25,9
CTH-2	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	1,0	6,0	5,0	12	16	1-6-1	1,88	26,3
CTH-3	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	2,0	5,0	5,0	12	16	1-6-1	1,89	22,4
CTH-4	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	3,0	4,0	5,0	12	16	1-6-1	1,82	23,9

Tabelle 3: Herstellparameter und Untersuchungsergebnisse zu den Versuchen mit Calciniertem Ton (Untersuchungsansatz 3) (Quelle: FVKS, vgl. Forschungsbericht Nr. 79)

2.2 Eignung von Sägeschlämmen aus der Fertigung von Kalksandstein-Planelementensystemen als Optimierungszusatz für die Kalksandsteinproduktion (AiF-Nr. 21068-N)

Nahezu 98 % der Gesamtproduktionsmenge der Kalksandsteinindustrie entfallen auf Plan- und Blocksteine ($h = 248 \text{ mm}$) sowie KS-XL-Formate ($h \geq 498 \text{ mm}$, $l = 998 \text{ mm}$). Ein großer Teil der KS-XL-Produkte wird zur Erzeugung von vorkonfektionierten KS-Bausätzen mit Verlegeplänen geschnitten, wobei pro Jahr bundesweit in den betreffenden Kalksandsteinwerken eine große Menge an Sägeschlämmen anfallen (Abb. 3), die bislang keiner gezielten Verwendung zugeführt wurden. Bei den anfallenden Sägeschlämmen handelt es sich jedoch um ein hochwertiges und bereits unter Einsatz von CO_2 -intensivem Branntkalk gehärtetes KS-Material, welches als Optimierungszusatz eingesetzt werden kann. Da die Wirkung von Sägeschlämmen auf den Produktionsvorgang und die Steineigenschaften nicht bekannt war, wurde deren Einsatz mit diesem Forschungsvorhaben im Labor erprobt und anschließend in der betrieblichen Produktionspraxis evaluiert.

Dazu wurden zahlreiche Sägeschlammproben beschafft, analysiert, und anschließend Versuche im Labor-, Technikums-, sowie im Werksmaßstab durchgeführt. Das Ergebnis dieser Studie zeigt, dass bis zu 28 M.-% des eingesetzten Branntkalks in Kalksandsteinen durch Sägeschlämme substituiert werden können, ohne die Eigenschaften der Kalksandsteine negativ zu beeinflussen. Dadurch können beispielsweise 22 % der verursachten CO_2 -Emissionen eingespart werden. Dies gilt zudem für alle untersuchten Sägeschlämme. Positiv herauszuheben ist, dass bei einer Reduktion des Branntkalkgehaltes in der Rohstoffmischung - ausgehend von 7 M.-% - um 1,0 bis 1,5 M.-% die Steindruckfestigkeit gegenüber den Referenzserien ohne Sägeschlämme sogar leicht erhöht oder gleich gehalten werden kann, siehe Abb. 4 und 5.

Während der Autoklavierung wurde die Bildung von CSH-Phasen auch bei einem Sägeschlamm-Anteil von bis zu 2 M.-% nicht eingeschränkt. Dabei darf man davon ausgehen, dass es durch die Zugabe der feinen CSH-Phasen-haltigen Sägeschlämme zu einer erwünschten Kristallkeimbildung oder anderweitigen chemisch-mineralogischen Reaktionen kommt, die eine bessere räumliche oder strukturelle Ausbildung der CSH-Phasen zur Gefügeausbildung bewirkt. Somit können die Untersuchungsergebnisse zu Kosteneinsparungen sowie zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs und der damit einher gehenden CO_2 -Emissionen führen. Die Nutzung der Sägeschlämme kann zudem dazu beitragen, Stoffkreisläufe zu schließen und die kostenintensive Entsorgung zu sparen, siehe Forschungsbericht Nr. 137.



Abb. 3: Übersicht der eingesetzten Sägeschlamm-Proben (Bildquelle: FVKS)

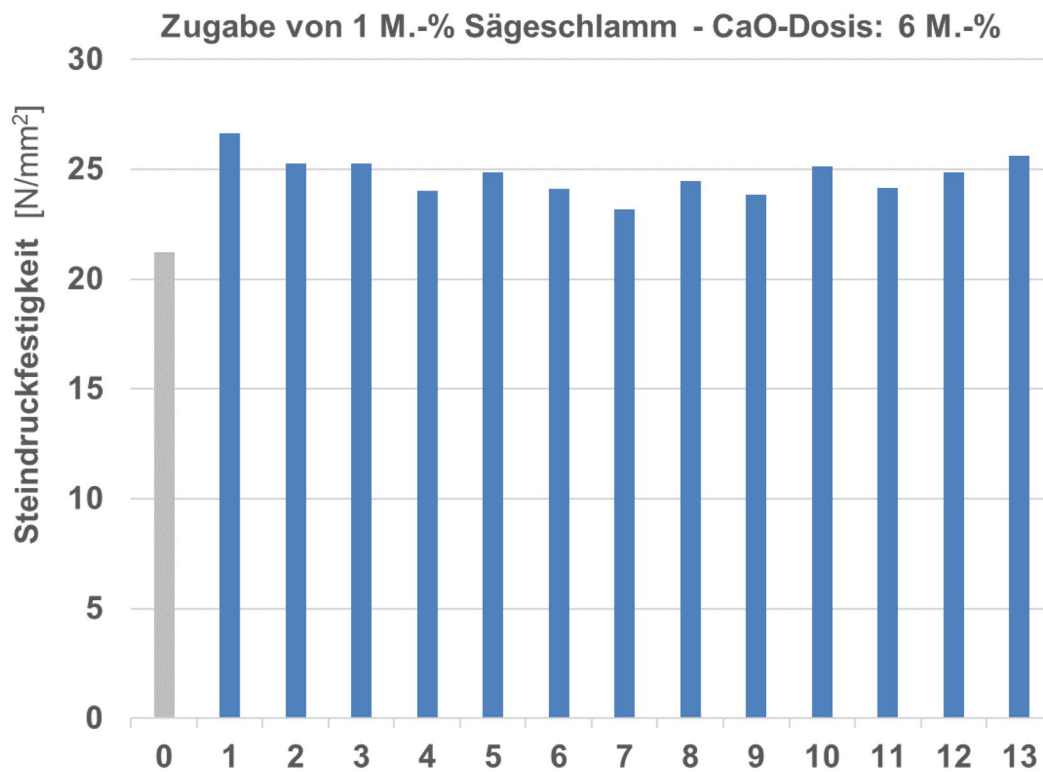


Abb. 4: Steindruckfestigkeiten bei Zugabe von 1 M.-% an Sägeschlamm, Nullserie ohne Sägeschlamm in grau (Bildquelle: FVKS)

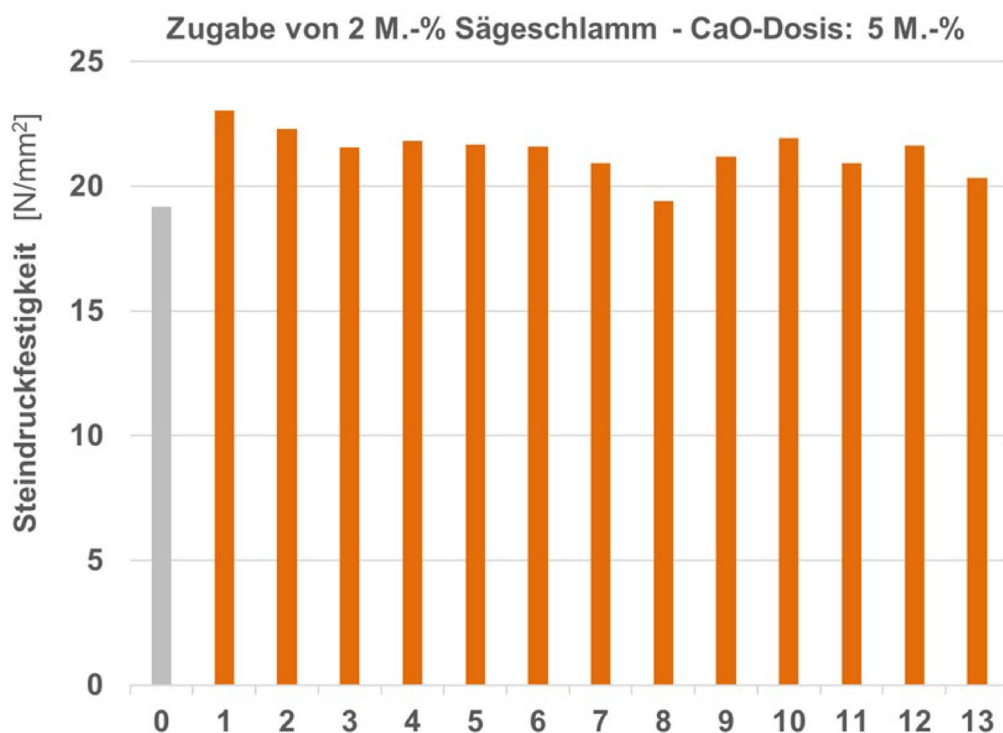


Abb. 5: Steindruckfestigkeiten bei Zugabe von 2 M.-% an Sägeschlamm, Nullserie ohne Sägeschlamm in grau (Bildquelle: FVKS)

2.3 Produktion von CO₂-armen Öko-Mauersteinen durch bindemittelfreie Autoklavierung von RC-Brechsanden aus Beton und Ziegel (AiF-Nr. 21860 N)

Klimaschutz und Green Deal dominieren die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte in Europa. Für eine Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 müssen die Bauwirtschaft und auch die Baustoffproduktion erheblich umgebaut werden. Innovative Ansätze sind gefragt. In Deutschland werden jährlich ca. 55 bis 60 Mio. t Recycling-Gesteinskörnungen aus Bauschutt in unterschiedlicher stofflicher Qualität aufbereitet und bislang größtenteils im Erd- und Straßenbau verwertet (Downcycling). Schätzungen zeigen, dass jeweils die Hälfte davon auf den Bestandteil Beton und gemischtes Mauerwerk entfällt. Während für grobe Recycling-Gesteinskörnungen nahezu kein Absatzproblem besteht, kann feine RC-Gesteinskörnung heute nur zu geringen Erlösen oder gar nicht vermarktet werden (sog. „Recyclingsand-Problem“). Das Ziel des Projekts war die Entwicklung von CO₂-armen Mauersteinen (Öko-Mauersteine) durch eine hydrothermale Autoklavierung von RC-Brechsanden, die möglichst keine Primärbindemittel (Kalk) benötigen. Im Rahmen von Experimenten wurde die grundsätzliche Realisierbarkeit dieses Ansatzes bereits nachgewiesen.

Mit den Untersuchungen wurden die Zusammenhänge zwischen den Rohstoffeigenschaften (Brechsande aus Beton, Kalksandstein und Ziegel, natürliche Gesteinskörnungen und Branntkalk), den verfahrenstechnischen Herstellparametern (Rezeptur, Mischvorgang, Verdichtung und Autoklavierung) sowie den qualitätskennzeichnenden Eigenschaftswerten der Öko-Mauersteine ermittelt modelliert. Für Recyclingunternehmen und Kalksandsteinwerke wurde praxisnahes Basiswissen geschaffen, welches ohne größere Investitionen direkt in die Produktionspraxis übertragen werden kann.

Mineralische Brechsande aus der Bauschutt aufbereitung (Abb. 6) weisen ein technisch nutzbares hydrothermales Reaktionspotenzial auf. Betonbrechsande beinhalten beide erforderlichen hydrothermal reaktiven Bindemittelkomponenten: reaktiven Kalk und quarzitisches Gesteinskörnung. Durch den Einsatz von Betonbrechsanden in der Kalksandsteintechnik können seine hydrothermalen Reaktionspotenziale so aktiviert werden, dass für die Herstellung von Werksteinen der erforderliche Kalkgehalt drastisch reduziert und der CO₂-Footprint dieser Produkte deutlich gesenkt werden kann.

Wie beim klassischen Kalksandstein, bilden sich auf den Oberflächen der Betonbrechsandpartikel CSH-Sandwich-Schichten aus, die die Partikel miteinander verzahnen und somit ein festes Gefüge ausbilden. Durch Umwandlungsprozesse im Gefüge der Betonbrechsande besteht hydrothermal gehärteter Betonbrechsand überwiegend aus CSH-Phasen der Tobermorit-Gruppe sowie aus natürlichen Sanden. Presslinge aus Betonbrechsanden erreichen bereits ohne Zugabe von Kalk Druckfestigkeiten von über 18 N/mm² (Abb. 7). Durch Optimierung der Fertigungsprozesse sowie ggf. durch geringfügige Zudosierungen von Kalk erhöht sich das erreichbare Festigkeitspotenzial weiter.

Die Nutzung von Betonbrechsanden in die Produktion von Kalksandsteinen kann einen bedeutenden Beitrag zur Ressourcenschonung durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen sowie zum aktiven Klimaschutz durch die Reduzierung des Kalkgehalts im Vergleich zu herkömmlichen Produkten leisten. So lässt sich der CO₂-Ausstoß durch den Einsatz von Betonbrechsanden und Füllern aus Beton deutlich reduzieren. Aktuelle Werksversuche in 2023/24 in drei Kalksandsteinwerken haben die großtechnische Umsetzbarkeit des hier beschriebenen Verfahrens bestätigt. Im großtechnischen Maßstab konnten mittels der hier beschriebenen Technologie Mauersteine mit Druckfestigkeiten von bis zu 35 N/mm² erzeugt werden, siehe Tabelle 4.

Auch durch Zusatz von Zementen bzw. zusammengesetzten Composit-Bindemitteln können vergleichbare Effekte erzielt werden.

Serie	Sand 1	Sand 2	Sand 3	Sand 4	Zement Sorte CEM-I	RC- Beton- bruch	RC- Beton- mehl	CT Calcinier- ter Ton	Kalk- dosis CaO	Press- feuchte	Press- druck	Härte- druck	Dauer der Halte- phase	Stein- roh- dichte	Stein- druck- festig- keit
	a) Werk 1: Sand KBS b) Werk 2: Eigensand	a) Werk 1: Sand D b) Werk 2: Zukaufsand	a) Werk 1: KE	a) Werk 2: KSS						F_p	σ_p	p_e		ρ_{tr}	$\beta_{D,St}$
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	kg/dm ³	N/mm ²
Werk 1															
BSW-1	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	0,0	0,0	./.	5,5	5,0	12	16	1-7-1	1,94	31,0
BSW-2	56,7	3,0	14,8	10,0	./.	0,0	10,0	./.	5,5	5,0	12	16	1-7-1	1,88	30,6
BSW-3	47,2	3,0	14,8	10,0	./.	0,0	20,0	./.	5,0	5,0	12	16	1-7-1	1,86	34,7
BSW-4	0,0	0,0	0,0	0,0	./.	100,0	0,0	./.	0,0	5,0	12	16	1-7-1	1,73	16,1
Werk 2															
BSH-1	70,0	23,0	./.	./.	./.	0,0	0,0	./.	7,0	5,0	12	16	1-6-1	1,87	25,9
BSH-2	61,0	23,0	./.	./.	./.	0,0	10,0	./.	6,0	5,0	12	16	1-6-1	1,84	23,7
BSH-3	51,0	23,0	./.	./.	./.	0,0	20,0	./.	6,0	5,0	12	16	1-6-1	1,82	21,5
BSH-4	0,0	0,0	./.	./.	./.	100,0	0,0	./.	0,0	5,0	12	16	1-6-1	1,88	23,5
BSH-5	36,0	49,0	./.	./.	./.	0,0	0,0	./.	15,0	5,0	12	16	1-6-1	1,87	23,7

Tabelle 4: Steineigenschaften bei Zugabe von Beton-Recycling-Material (Werksversuche)



Abb. 6: Beton-Recyclingmaterial (Bildquelle: RWB Bremen)



Abb. 7: Mauersteine aus recyceltem Beton, hergestellt mittels Kalksandsteintechnologie, Ergebnis aus einem Werksversuch (Bildquelle: FVKS)

Die CO₂-Einsparungen variieren je nach CO₂-Fußabdruck des Betonbrechsandes oder des jeweiligen Bindemittels. Ein weiteres Beispiel aus Versuchen bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. ist in Tabelle 5 dargestellt.

Herstellparameter - Format: KS-DF									Untersuchungsergebnisse			
Serie	Bindemittel	Anzahl Steine	Art der Härtung	KS-RC-Material 0/8 mm trocken	Binde-mittel	Press-druck	Härte-druck	Härte-dauer	Rohlings-stand-festig-keit	Roh-dichte	Stein-druck-festig-keit 7 Tage	Stein-druck-festig-keit 28 Tage
						σ_p	p_e	t_h	β_{RSF}	ρ_{tr}	$\beta_{D,St}$	$\beta_{D,St}$
				M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
									./. aus DF		3	3
1a	CEM-I	13	Aushärtung in 20/65	85	15	12	16	1-4-1	0,13	1,73	11,6	12,0
1b		3	Aushärtung in 20/65	85	15	14	16	1-4-1	0,17	1,75		12,2
1c		3	Hydrothermalhärtung	85	15	12	16	1-4-1	0,13	1,72		17,8
2a	Bindemittel auf Zement-bais	13	Aushärtung in 20/65	85	15	12	16	1-4-1	0,18	1,68	6,4	6,2
2b		3	Aushärtung in 20/65	85	15	14	16	1-4-1	0,24			7,2
2c		3	Hydrothermalhärtung	85	15	12	16	1-4-1	0,18	1,68		17,7

Tab. 5: Steineigenschaftswerte bei Zusatz von Zementen bzw. zusammengesetzten Composit-Bindemitteln auf Zementbasis (Quelle: FVKS)

2.4 Ermittlung von Grundlagen zur Produktion von nachhaltigen Kalksandsteinen mit minimierter CO₂-Last (AiF-Nr. 22796-N) – Reduktion der Kalkdosis

Das aus dem European Green Deal resultierende Ziel „Klimaneutralität bis 2050“ bedeutet eine enorme Herausforderung für die Kalksandsteinindustrie. So müssen zur Umsetzung weitreichende Entscheidungen getroffen werden. Rund 80 % der CO₂-Emissionen werden durch den Einsatz des Bindemittels Kalk verursacht. 20 % sind dem Kalksandstein-Produktionsprozess direkt zuzuordnen. In der Folge sind zielführende Maßnahmen zur Absenkung der Kalkdosis zu ergreifen.

Ein vielversprechender Ansatz zur raschen Reduzierung der CO₂-Emissionen liegt vor allem in der Entwicklung eines „Öko-Kalksandsteins“ mit stark verringertem Kalkgehalt. Eine Reduzierung des Kalkanteils führt bekanntlich zu niedrigeren Steindruckfestigkeiten, beispielsweise auf ein Festigkeitsniveau von 8 oder 12 N/mm² (anstatt über 30 bis 50 N/mm²), was jedoch in den meisten Fällen für ein- bis dreigeschossige Gebäude ausreichend ist.

Die erforderlichen Herstellparametersätze für derartige Produkte und deren weitere qualitätskennzeichnenden Eigenschaften sind bekannt und wurden experimentell im Labor und in der Praxis in Kalksandsteinwerken weiter vertieft. Dabei wurden das Zusammenspiel zwischen den Herstellparametern (Rezeptur, Verdichtung, Hydrothermalhärtung, etc.) sowie der Rohlingsstandfestigkeit, der Steindruckfestigkeit und der Steinrohddichte im Detail analysiert, siehe Abb. 8. Die Potenziale der CO₂-Absenkung, Kosten- und Energieeinsparung und die damit verbundene Verbesserung der CO₂-Bilanz können in allen Fällen durch begleitende ökobilanzielle Berechnungen quantifiziert werden. Aktuelle Werksversuche im April 2024 in mehreren Kalksandsteinwerken haben die großtechnische Umsetzbarkeit des hier beschriebenen Verfahrens ebenfalls bestätigt.

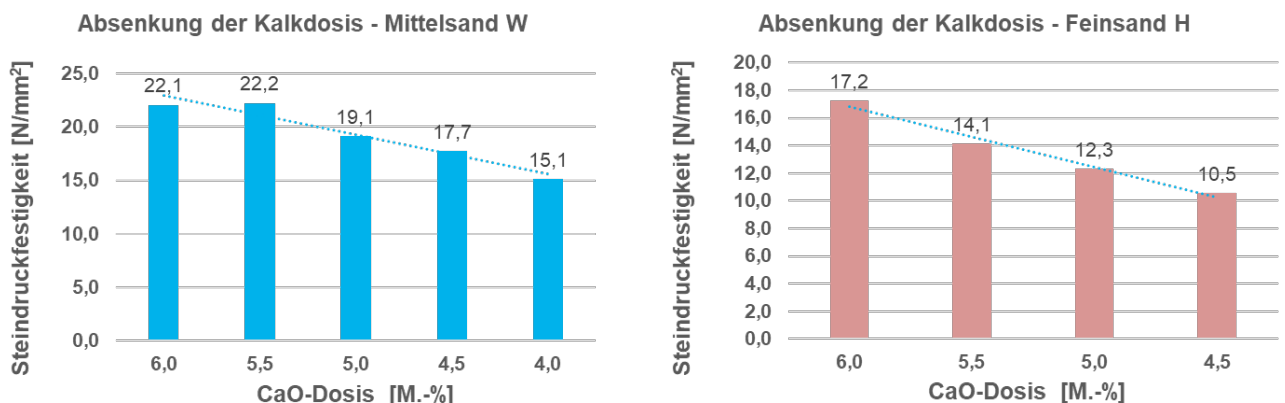


Abb. 8: Steindruckfestigkeit und Kalkdosis (Bildquelle: FVKS – Meisterseminare 2023/24)

Serie	Sand 1 a) Werk 1: Sand KBS b) Werk 2: Eigensand	Sand 2 a) Werk 1: Sand D b) Werk 2: Zukaufsand	Sand 3 a) Werk 1: KE	Sand 4 a) Werk 2: KSS	Zement Sorte CEM-I	RC- Beton- bruch	RC- Beton- mehl	CT Calcinier- ter Ton	Kalk- dosis CaO	Press- feuchte F_p	Press- druck σ_p	Härte- druck p_e	Dauer der Halte- phase	Stein- roh- dichte ρ_{tr}	Stein- druck- festig- keit $\beta_{D,St}$
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	kg/dm ³	N/mm ²
Werk 1															
LDW-1	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	./.	5,5	5,0	12	16	1-7-1	1,95	30,7
LDW-2	67,2	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	./.	5,0	5,0	12	16	1-7-1	1,98	24,4
LDW-3	67,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	./.	4,5	5,0	12	16	1-7-1	1,97	26,7
LDW-4	68,2	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	./.	4,0	5,0	12	16	1-7-1	1,99	26,2
LDW-5	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	./.	5,5	5,0	12	16	1-4-1	1,96	32,6
LDW-6	67,2	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	./.	5,0	5,0	12	16	1-4-1	1,95	27,4
LDW-7	67,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	./.	4,5	5,0	12	16	1-4-1	1,97	33,4
LDW-8	68,2	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	./.	4,0	5,0	12	16	1-4-1	1,97	31,8
Werk 2															
LDH-1	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	7,0	5,0	12	16	1-7-1	1,78	21,5
LDH-2	71,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	6,0	5,0	12	16	1-7-1	1,82	23,3
LDH-3	72,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	5,0	5,0	12	16	1-7-1	1,79	20,3
LDH-4	73,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	4,0	5,0	12	16	1-7-1	1,82	22,2
LDH-5	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	7,0	5,0	12	16	1-8-1	1,81	23,0
LDH-6	71,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	6,0	5,0	12	16	1-8-1	1,79	22,7
LDH-7	72,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	5,0	5,0	12	16	1-8-1	1,83	23,2
LDH-8	73,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	./.	4,0	5,0	12	16	1-8-1	1,81	22,3

Abb. 9: Steindruckfestigkeit bei Absenkung der Kalkdosis (Werksversuche April 2024)

Praxishinweis für die Rezepturauslegung: Eine CaO-Dosis von beispielsweise 5 M.-% entspricht unter Berücksichtigung des Wasseranteils in der Mischung rd. 4,76 M.-%. Somit ergeben sich folgenden Werte für die tatsächliche CaO-Dosis in der Kalk-Sand-Rohmischung, siehe Tabelle 6:

CaO-Gehalt bezogen auf die Gesamtmasse aller trockenen Rohstoffe [M.-%]	9,0	8,0	7,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0
Tatsächlicher CaO-Gehalt mit Berücksichtigung des Wasseranteils in der KS-Rohmischung [M.-%]	8,57	7,62	6,67	5,71	5,24	4,76	4,29	3,81	3,33	2,86
Steindruckfestigkeit Werksversuch April 2024 Steindruckfestigkeit β_{DSt} [N/mm ²]						32,6	27,4	33,4	31,8	

Tab. 6: Tatsächlicher CaO-Gehalt in der KS-Rohmischung und die entsprechende Steindruckfestigkeit am Beispiel der Versuchsserien LDW-5 bis LDW-8 (Quelle: FVKS)

2.5 Maßnahmen zur Steigerung des Kalksandstein-Recyclinganteils

Im Rahmen der Forschung zum Recycling von Kalksandsteinen und Kalksandstein-Mauerwerk wurde von der FVKS bereits umfangreiches und detailliertes Praxiswissen erarbeitet, siehe Abb. 9. Im Rahmen der Recyclingforschung wurden inzwischen 12 umfangreiche AiF- und BBSR-Projekte durchgeführt und veröffentlicht, mit denen die Recyclingfähigkeit von Kalksandsteinen in folgenden Recyclingpfaden nachgewiesen wurde (Forschungsberichte 80, 86, 97, 103, 115, 116, 118, 127 und 132):

- Erneute Kalksandstein-Produktion, sofern sortenrein
- Betonbau, bereits genormt in DIN EN 1045, EN 206, DIN EN 12620, DIN 1045-2, DIN 4226-100 und -101
- Erd-, Straßen- und Wegebau, Tragschichten ohne Bindemittel. Laut TL Gestein-StB 04/23 darf ein Anteil von max. 30 M.-% an Kalksandstein-Bruchmaterial Bestandteil von ToB-Schichten sein.
- Vegetationssubstrate für Bäume, Sträucher und Dachbegrünungen
- Deponiebau: Einsatz von Methan abbauendes RC-Granulat, versetzt mit Mikroorganismen, die Methan zu CO₂ umwandeln
- Herstellung von Recycling-Mauersteinen aus anderen RC-Materialien (Naturstein, Beton, Ziegel, etc.)
- Füller aus Kalksandstein-Recycling-Material zur CO₂-Absenkung
- Recarbonatisierung von Kalksandstein-Recyclingmaterial während der Erzeugung von RC-Gesteinskörnungen und deren Einsatz bei der Kalksandsteinproduktion

Somit existiert ein umfangreiches Forschungs- und Praxiswissen zur Recyclingfähigkeit von Kalksandsteinen. Eine weitere Erhöhung der Recyclingquote von Mauerwerk und die weitere Schließung des Stoffkreislaufs (Cradle to Cradle) können erreicht werden, indem rückgebautes oder abgerissenes Mauerwerk, rezykliert und einer hochwertigeren Verwertung zugeführt wird.

Dies erfordert einen ganzheitlichen Einsatz verfügbarer und innovativer Technologien. Zur Förderung des Einsatzes dieser Technologien und zur Steigerung des hochwertigen Recyclings von Mauerwerk müssen auch die ökonomischen Aspekte sowie insbesondere logistische Aspekte der Verwertung berücksichtigt werden. Dabei ist auch die regionale Verteilung des anfallenden Mauerwerksbauschutts und des Bedarfs an Recyclingprodukten zu beachten. Letzterer spiegelt die Akzeptanz der Recycling-Baustoffe seitens des Marktes und der Gesellschaft wider, die berücksichtigt werden muss.

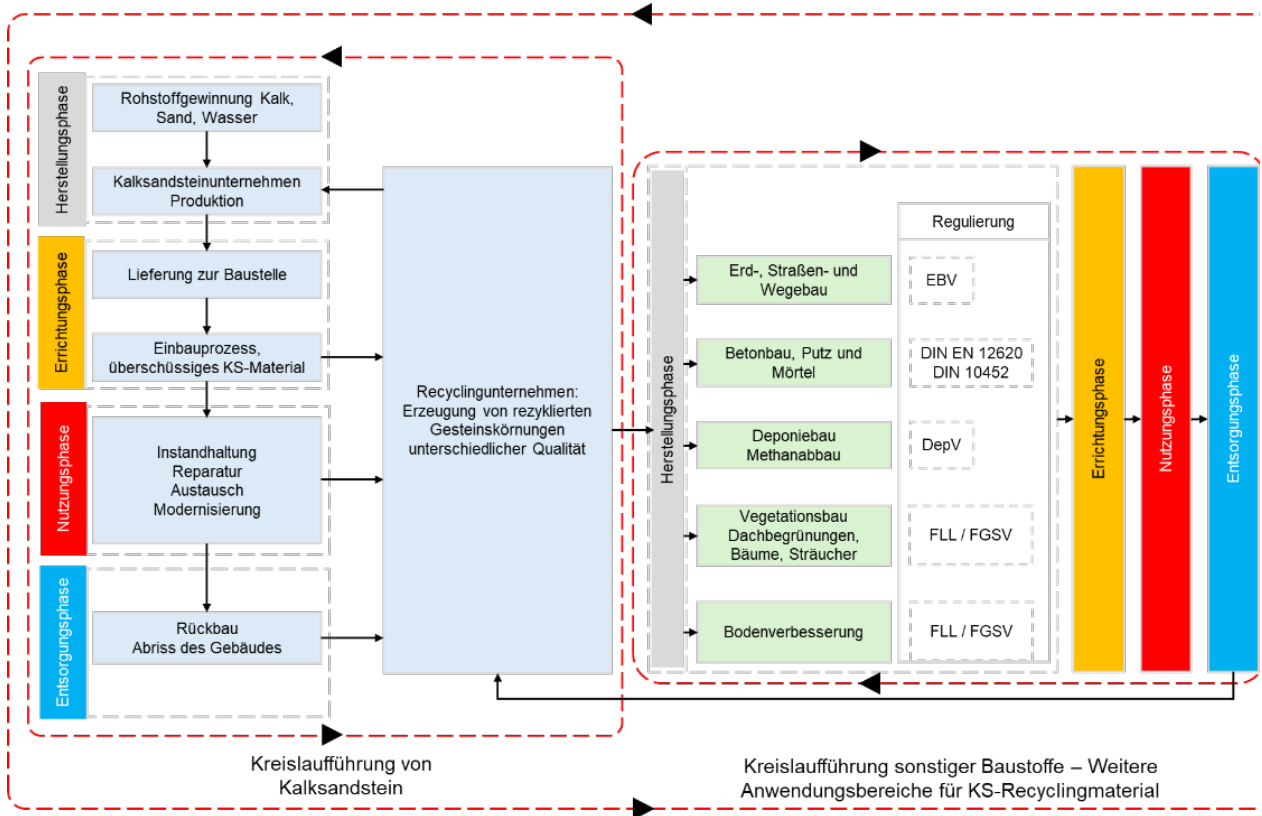


Abb. 9: Recyclingpfade von Kalksandstein (Bildquelle: FVKS, BVKSI, DIN SPEC 19458)

2.6 Einsatz von metallurgischen Schlacken bei der Kalksandsteinproduktion zur Erhöhung des baulichen Schallschutzes (AiF-Nr. 20268-N) und Erhöhung des Wärmespeichervermögens für den sommerlichen Wärmeschutz (AiF-Nr. 23061-N)

Mit dieser Forschungsarbeit wurde nachgewiesen, unter welchen Bedingungen bestimmte metallurgische Schlacken als Gesteinskörnung für die Herstellung von Mauersteinen geeignet sind, die unter Anwendung der Kalksandsteintechnologie erzeugt wurden. Das Forschungsziel bestand darin, durch den Einsatz der Schlacken mit höherer Rohdichte die Schalldämmung von Kalksandsteinwänden deutlich zu erhöhen, gleichzeitig die Produktionskosten durch die Substitution von natürlichen Gesteinskörnungen mit hoher Reindichte (Basalt, Diabas, Magnetit, Hämatit) zu senken und natürliche Ressourcen zu schonen, siehe Forschungsbericht Nr. 134.

Unter breiter Variierung der verfahrenstechnischen Herstellparameter und Einsatz der statistischen Versuchsplanung (DoE) wurden verschiedene metallurgische Schlacken und ein Schwermineral-sand hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit getestet (zwei Elektroofenschlacken, zwei Linz-Donawitz-Schlacken, zwei Kupferschlacken, eine Fe-Ni-Schlacke und ein Rutilsand). Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Herstellung von stabilen Mauersteinen unter Einsatz von bestimmten metallurgischen Schlacken sowohl im Technikum als auch unter großtechnischen Bedingungen erfolgreich möglich ist. Auf diese Weise können auf relativ einfache Weise Mauersteine mit hohen Rohdichten bis zur Rohdichteklasse 2,4 hergestellt werden, so dass daraus ein Mauerwerk erstellt werden kann, welches entsprechend dem Massekurvenansatz zu einem deutlich höheren Schalldämmwert führt, siehe Abb. 11. Beispielsweise ergibt sich bei einer Steigerung der flächenbezogenen Masse von 400 kg/m^2 auf 590 kg/m^2 eine Zunahme der Direktschalldämm-Maße (ohne Flankenwege) von $R_w = 58,2 \text{ dB}$ um $5,2 \text{ dB}$ auf $R_w = 63,4 \text{ dB}$.

Der Nachweis der Umweltverträglichkeit der mit metallurgischen Schlacken hergestellten Steine fokussierte sich auf deren Auslaugverhalten. Legt man die Grenzwerte zugrunde, die für wasserberührte Betone, die Stahlwerks- oder Kupferschlacken als Gesteinskörnung beinhalten, definiert wurden, so ergaben sich keine kritischen Ergebnisse.

In der Zusammenfassung lässt sich festhalten, dass alternative Rohstoffe für die Herstellung von Kalksandsteinen mit verbesserten Schalldämmungseigenschaften erforscht wurden und grundsätzlich alternative Verwendungsmöglichkeiten für verschiedene metallurgische Schlacken erschlossen werden konnten, siehe Abbildungen 10 und 11.

Die Ergebnisse eröffnen gleichzeitig die Möglichkeit, weitere technische Eigenschaften der metallurgischen Schlacken zu nutzen, wie beispielsweise ihre hohe Wärmekapazität und thermische Leitfähigkeit, für Kalksandsteine mit besonderen Eigenschaften. Ein weiteres Beispiel ist die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Umgebungsluft unter Verwendung von metallurgischen Schlacken. Dadurch kann die erforderliche Zeit, bis die Kalksandsteine ihre maximale Aufnahmekapazität von CO_2 erreichen und somit als dauerhafte CO_2 -Speichermedien genutzt werden können, reduziert werden.



Abb. 10: Kalksandstein, hergestellt aus Kalk, Sand, Wasser und metallurgischer Schlacke (Bildquelle: FVKS, Forschungsbericht Nr. 134)

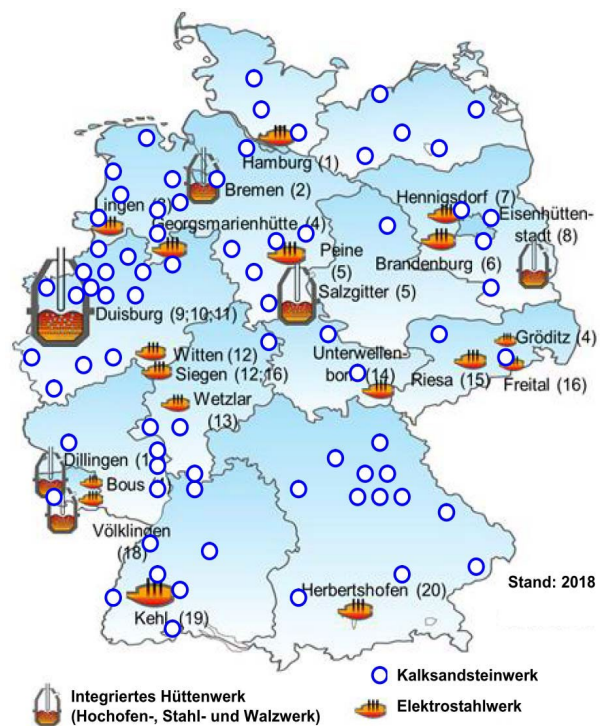


Abb. 11: Standorte der Stahl- und Kalksandstein-Industrien in Deutschland (Bildquelle: FEhS, FVKS, Forschungsbericht Nr. 134)

2.7 Kosteneinsparung und Steigerung der Ressourceneffizienz von Kalksandsteinen durch Ansatz von Druckhaltestufen bei der Hydrothermalhärtung – sogenannte „Treppenkurven“ (AiF-Nr. 20307-N)

Mit diesem Forschungsprojekt wurde die Anwendung einer stufenweisen (statt kontinuierlichen) Aufheizung von Härtekesseln mit Zwischenhaltezeiten untersucht (sog. "Treppenkurven"). Diese Fahrweise kann zu einer Verbesserung der Steinqualität führen, siehe Forschungsberichte Nr. 90 und 136, siehe Abb. 12 und 13. Als Ursache dürfte die während der Haltephase beim Aufheizen auftretende reaktionsbeschleunigende CSH-Keimbildung verantwortlich sein, die zu einem dichteren und räumlich besser vernetzten Gefüge der Feststoffmatrix führt. Die Untersuchungen haben im Einzelnen zu folgenden Ergebnissen geführt:

- Bei Ansatz einer Zwischenhaltephase mit einer Dauer von 1,0 h bzw. 1,5 h nach Erreichen der Druckstufen (beispielsweise bei $p_e = 12$ bzw. 14 bar) wurde gegenüber der Nullserie (ohne Druckhaltestufe) eine Steigerung der Druckfestigkeiten erreicht. Dieses Ergebnis konnte in einem Kalksandsteinwerk durch einen Großversuch verifiziert werden. Hier liegt ein Verbesserungspotenzial zu den Herstellbedingungen vor, die im Rahmen der Umsetzung der Untersuchungsergebnisse in der betrieblichen Produktionspraxis für die Absenkung der Kalkdosis und der damit verbundenen CO₂-Emissionen genutzt werden kann.
- Alle anderen relevanten qualitätskennzeichnenden Eigenschaftskennwerte der im Technikum und der im Rahmen der Werksversuche erzeugten Kalksandstein-Funktionsmuster (z.B.: Steinrohddichte, Frostwiderstandsfähigkeit, Schwinddehnung, Wasseraufnahme, etc.) liegen innerhalb der für handelsübliche Kalksandsteine bekannten Bandbreite.
- Die mineralogische Analyse der erzeugten Funktionsmuster zeigt, dass deren Phasenbestand, bei deren Autoklavierung eine Zwischenhaltezeit während der Aufheizphase angesetzt wurde, im Vergleich zu den Serien mit einer üblichen kontinuierlichen Härtung keine nachteilige Veränderung erfährt.

Bei der Umsetzung dieses neuen Verfahrens in der Kalksandsteinindustrie ist durch folgende Faktoren eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und der Ressourceneffizienz zu erwarten:

- Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen
- Reduzierung der Herstellungskosten bei gleichbleibender Produktqualität
- Steigerung der Produktqualität.

Der Nutzerkreis der erhofften Forschungsergebnisse sind die Produktionsbetriebe der Kalksandsteinindustrie. Eine industrielle Umsetzung ist einfach und zeitnah möglich, weil keine größeren Investitionen erforderlich werden. Es ist in den meisten Fällen lediglich ein Umprogrammieren der bestehenden automatischen Dampfsteuerungsanlagen notwendig.

AiF-Forschungsvorhaben „Treppenkurve“

Neuere Erkenntnisse zur Dampfhärtung:

- Durch Ansatz einer gezielten Unterbrechung der Aufheizphase im Druckbereich bei $p_e = 12$ bis 14 bar für einen Zeitraum von 1 bis 2 Stunden kann eine Steigerung der Druckfestigkeit erreicht werden.
- Ursache: Während der Haltephase „wird den sich bildenden CSH-Phasen zusätzliche Zeit für eine günstigere Phasenausbildung gegeben“ (Kristallisationskeimphase).
- Es sind Festigkeitszuwächse von bis zu 15 % unter sonst gleichen Bedingungen möglich.

Serie	Art der Kurve	Sandsorte	Intensität der Dampfhärtung gesamte Fläche	Pressdruck	Druckfestig- keit EW	Druckfestig- keit MW pro Kurve	Druckfestig- keit MW pro Sand	
			bar x h	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	
136	kontinu- ierlich	Feinsand	84,0 	10	14,2	18,4	16,0	
136a		15		16,0				
136b		20		17,9				
137		Mittelsand		10	19,4		21,4	
137a				15	21,8			
137b				20	23,1			
138	kontinu- ierlich	Feinsand	92,0 	10	16,0	18,7	17,9	
138a		15		18,1				
138b		20		19,5				
133		Mittelsand		10	14,5		15,9	
133a				15	15,8			
133b				20	17,3			
134	kontinu- ierlich	Feinsand	80,0 	10	19,6	18,8	21,4	
134a		15		21,5				
134b		20		23,2				
135		Mittelsand		10	16,9		18,9	
135a				15	19,3			
135b				20	20,6			
145	kontinu- ierlich	Feinsand	80,0 	10	14,6	18,8	16,2	
145a		15		15,9				
145b		20		18,1				
146		Mittelsand		10	19,9		22,8	
146a				15	22,4			
146b				20	26,0			
147	Treppen- kurve	Feinsand	77,3 	10	16,0	16,9	17,4	
147a		15		17,3				
147b		20		18,9				
142		Mittelsand		10	14,2		15,5	
142a				15	15,5			
142b				20	16,9			
143	Treppen- kurve	Feinsand	77,3 	10	18,3	16,9	20,0	
143a		15		20,1				
143b		20		21,6				
144		Mittelsand		10	13,1		15,1	
144a				15	15,1			
144b				20	17,2			

Abb. 12: Druckhaltestufen bei der Hydrothermalhärtung – sogenannte „Treppenkurven“ (Bildquelle: FVKS, Auszug Forschungsbericht Nr. 90)

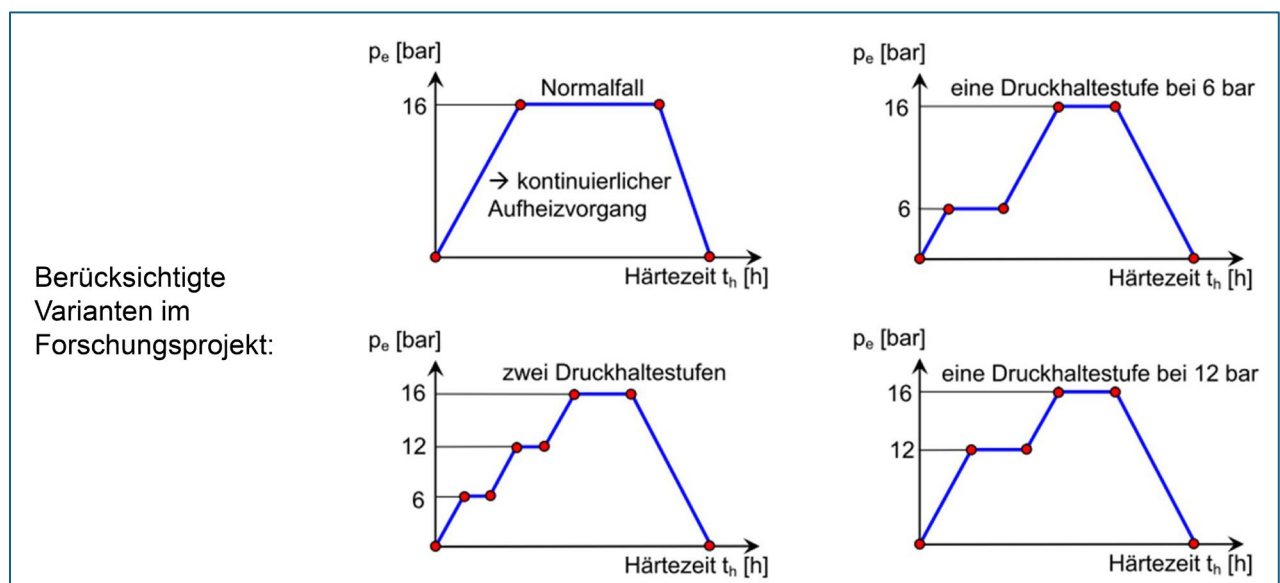


Abb. 13: Druckhaltestufen bei der Hydrothermalhärtung – Beispiele (Bildquelle: FVKS, Auszug Forschungsbericht Nr. 136)

2.8 Entwicklung eines Schnellprüfverfahrens zur Sicherstellung der Dampfgängigkeit von hochverdichteten Kalksandstein-Rohlinge (AiF-Nr. 21107-N)

Kalksandsteine sind Mauersteine, die aus Branntkalk und silikatischen Rohstoffen mittels hydraulischer Pressen geformt und anschließend in einer Atmosphäre von gespanntem Wasserdampf autoklaviert werden. Angesichts der weiter steigenden Nachfrage im Markt werden heute vorzugsweise großformatige Kalksandsteinprodukte mit höheren Steinrohdichten für bessere Schallschutzwerte und höheren Festigkeiten für schlanke Mauerwerkkonstruktionen erzeugt.

Als produktionstechnische Maßnahmen zur Rohdichtesteigerung werden ein hoher Pressdruck und eine hohe Packungsdichte angesetzt, siehe Forschungsberichte Nrn. 99 und 107. Dies kann jedoch zu einem zu dichten Rohlingsgefüge führen, so dass die Dampfhärtung zeitlich stark verzögert wird bzw. nicht ausreichend erfolgt. Die Porositätskennwerte für die Erzeugung ausreichend dampfdurchlässiger Kalksandsteinrohlinge (Mindestporosität und durchlässige Porenradienverteilung) und die dazu anzusetzenden Herstellparametersätze sind nunmehr genauer bekannt.

Deshalb wurden die Dampfgängigkeit von Kalksandstein-Rohlingen mit diesem Forschungsvorhaben systematisch erkundet, siehe Forschungsbericht Nr. 139. Zur Umsetzung wurde für die werkseigene Produktionskontrolle ein einfaches, robustes und aussagekräftiges Prüfverfahren entwickelt, mit dem die Dampfgängigkeit von KS-Rohlingen schnell und sicher festgestellt werden kann. Mit der Etablierung des Prüfverfahrens in der Kalksandsteinindustrie sollen auf diese Weise hohe Kosten aus einer unnötig langen Dampfhärtung vermieden werden. Im Fall zu geringer Porosität der Rohlinge ist zudem der Energieverbrauch bei der Dampfhärtung erhöht.

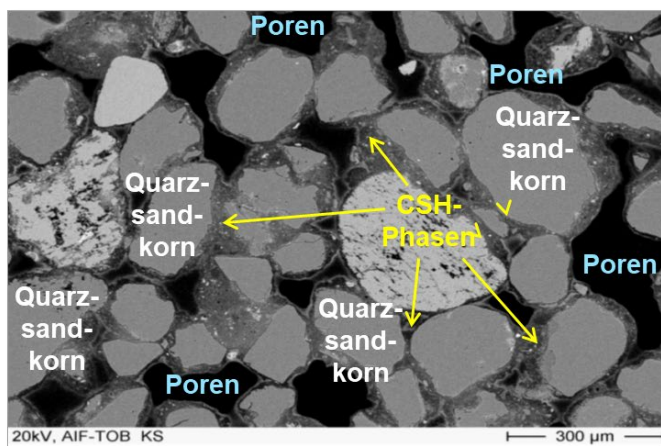
In der Bodenkunde und Vegetationstechnik gilt das sogenannte Saugspannungsverfahren als angewendete Messmethode für die Beurteilung der Porosität von Böden und Substraten als etabliert, siehe Abb. 14. Mit Hilfe unterschiedlicher Saugspannungsbereiche kann die Größe der luft- und wassergefüllten Bodenporen einem sog. Äquivalentdurchmesser zugeordnet werden und auch Porengrößenverteilungen abgeleitet werden.

In diesem Forschungsvorhaben wurde diese Messmethode genutzt, um eine Prüfmethode zu entwickeln, die im Bereich der Kalksandsteinproduktion Aussagen zu einer ausreichenden Dampfdurchlässigkeit von KS-Rohlingen ermöglicht. Da nicht bekannt war, welche Prüfmethode hierfür geeignet war, wurden im Forschungsvorhaben drei unterschiedliche Prüfmethoden auf ihre Aussagekraft getestet: die Druckmethode, die Unterdruckmethode und das Tensiometer-Verfahren. Im Verlauf des Projektes wurden unterschiedliche Prüfkörperformen und -größen mit diesen drei Verfahren geprüft und auf ihre Eignung zur Ermittlung von sog. Saugspannungskurven bewertet. Die Untersuchungen erfolgten im Wesentlichen an Kalksandstein-Rohlingen und im begrenzten Umfang auch an gehärteten Kalksandsteinen. Dabei wurden folgende wesentliche Ergebnisse erzielt:

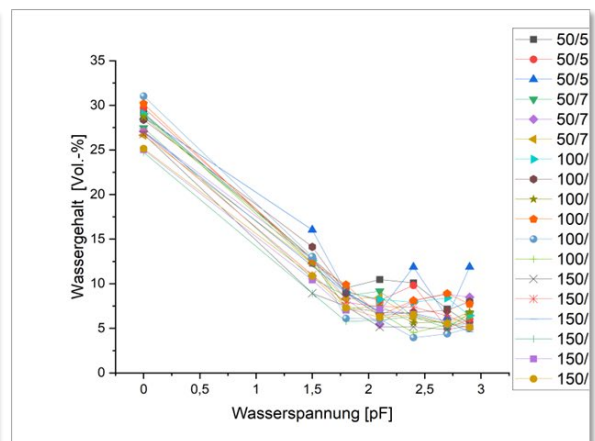
- Es zeigte sich, dass die Unterdruckmethode mit einer Prüfung auf einer speziellen Kunststoffmembran sich am besten eignet, um an KS-Rohlingen oder auch analog an gehärteten Kalksandsteinen Saugspannungskurven oder auch einzelne pF-Werte zu ermitteln.
- Bei den weiteren Prüfmethoden, der Druckmethode und dem Tensiometerverfahren zeigte sich, dass sich die verwendeten keramischen Saugplatten oder keramischen Tensiometer bei der Prüfung mit gelöstem Kalk oftmals zusetzten. Durch Reinigung mit Zitronensäure konnten die Prüfeinrichtungen wieder genutzt werden. Die Ausfallrate auswertbarer Ergebnisse war dennoch gering, so dass diese Prüfmethoden nur begrenzt untersucht wurden und derzeit für die Lösung der Aufgabenstellung nicht empfohlen werden können.

- Die Anwendung der Unterdruckmethode war hier deutlich robuster ausführbar. Hieraus konnte ein anwendbares Prüfverfahren für die Lösung der Aufgabenstellung abgeleitet werden.
- Die so entwickelte Prüfmethode kann für die Prüfung von KS-Rohlingen oder auch gehärteten Kalksandsteinen von der KS-Industrie direkt angewendet werden.
- Derzeit wird empfohlen, als Grenzwert für die Beurteilung eines zu dichten KS-Rohlingsgefüges mindestens den pF-Wert bei 1,8 (wie in der Vegetationstechnik üblich) zu prüfen.
- Als Mindesporosität kann derzeit ein Wert von ≥ 10 .-Vol.-% bei pF 1,8 angesetzt werden. Ist der Wert geringer, kann von einem zu dichten Gefüge für die Dampfdurchgängigkeit ausgegangen werden.

Die Anwendung des praxisnahen Prüfverfahrens stellt Kosteneinsparungen durch Vermeidung von Fehlchargen oder durch unnötig langes und kostenintensives, Energie verbrauchendes Härten in Aussicht. Gleichzeitig wird der Produktionsprozess im Sinne der Steigerung der Produktqualität und Schadenfreiheit, der Energieeffizienz sowie des Umweltschutzes weiter verbessert.



Intaktes Kalksandsteingefüge mit einem ausreichend großen Porenvolumen



Saugspannungskurven

Abb. 14: Schnellprüfverfahrens zur Sicherstellung der Dampfgängigkeit für hochverdichtete Kalksandstein-Rohlinge mittels Saugspannungskurven (Bildquelle: RWB Bremen, Bimolab gGmbH, FVKS)

Ergänzung: Die nachfolgende Übersicht (Abb. 15 bis 19) enthält eine Zusammenstellung der im Rahmen verschiedener AiF-Forschungsvorhaben ermittelten Maßnahmen zur Steigerung der Rohlingsstandfestigkeit von Kalksandsteinen. Diese wurden im Rahmen der Meisterseminare Kalksandstein-Porenbeton in 2021 bis 2024 vorgestellt. Siehe Forschungsberichte 88 sowie 114 und 124.

Kalksandstein - Maßnahmen zur Steigerung der Rohlingsstandfestigkeit

→ Zusammenfassung der Ergebnisse aus den relevanten Forschungsprojekten

Zahlreiche Forschungsberichte der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. beinhalten detaillierte Hinweise zur Optimierung der Rohlingsstandfestigkeit. Die Rohlingsstandfestigkeit hängt grundsätzlich von folgenden Einflussgrößen ab. **Alle haben einen spezifischen Einfluss auf die CO₂-Emissionen.**

- Format, Lochbild und Gestalt
- Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen (Steuerung über Packungsdichte)
- Kalkdosis, alternative Bindemittel: → je höher, desto höher (bis zu einem spez. Maximum)
- Verdichtungsvorgang: → je höher, desto höher (bis zu einem Maximum, dann Kornzertrümmerung)

Folgende Maßnahmen können ergriffen werden, um die Rohlingsstandfestigkeit zu erhöhen:

Abb. 15: Maßnahmen zur Steigerung der Rohlingsstandfestigkeit – 1 (Bildquelle: FVKS)

Maßnahme	Einfluss auf die Rohlingsstandfestigkeit	Anmerkungen
Format, Lochbild und Gestalt		
Anteil der Lochung an der Lagerfläche zunehmend	Einbußen ↓	
Verbesserung der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen		
Steigerung der Anteile an reaktiven Feinkomponenten, generell	Anstieg ↑	• Feinsande: ○ Quarzmehl, kostenintensiv ○ Sandschlamm, aber Wasserüberschuss
Zugabe von Füllern (Mehle), Beispiele: ○ Kalksteinmehl ○ Gabbrofüller ○ Dolomitfüller ○ Grauwackefüller ○ Ton- und Lehmanteile ○ Tonmehle (trocken) ○ Mehl aus Kalksandstein-Recycling-Material ○ Sägeschlämme aus der KS-Produktion	Anstieg ↑	• Ansatz ist die Packungsdichtesteigerung und die Erhöhung der Oberflächenkräfte • In der Regel technisch sehr wirkungsvoll und kostengünstig, da eine deutliche Absenkung der Kalkdosis in Aussicht steht. • Die optimale Dosis ist durch Versuchsversuche zu testen. • Die maximale Zugabemenge liegt bei 10 M.-% • Achtung! Störstoffe vermeiden (Alkalien, Sulfatverbindungen)

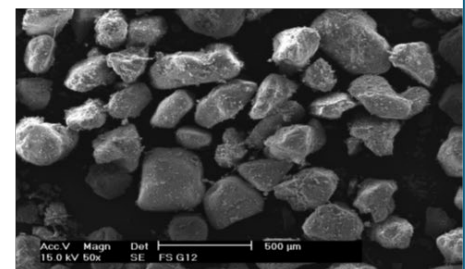


Abb. 16: Maßnahmen zur Steigerung der Rohlingsstandfestigkeit – 2 (Bildquelle: FVKS)

Bindemittel		
Erhöhung der Kalkdosis	Zunächst Zunahme der Rohlingsstandfestigkeit, dann nach Durchschreiten des sandspezifischen Maximums stellen sich Einbußen ein.	- Das Klimaneutralitätsziel der Kalksandsteinindustrie fordert eine deutliche Reduktion der Kalkdosis. - Sehr große Kostensteigerung! - Fuktion durchläuft Maximum. - Die optimale Dosis ist durch Werksversuche zu bestimmen. - Bei zu höher Kalkdosis nimmt die erreichbare Steindruckfestigkeit ab.
Calcinierter Ton		Alternatives Bindemittel für die Kalksandsteinproduktion, derzeit lediglich lokal erhältlich

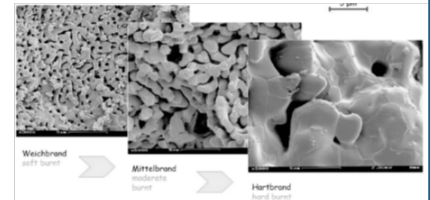


Abb. 17: Maßnahmen zur Steigerung der Rohlingsstandfestigkeit – 3 (Bildquelle: FVKS)

Verdichtungsvorgang		
Zunehmende Menge an KS-Rohmischung pro Pressenhub	Anstieg ↑	- Anstieg des erforderlichen Pressdrucks - Füllmenge beachten
Erhöhung des Pressdrucks	Anstieg ↑	- Technisch sehr wirkungsvolle Maßnahme - Achtung! Bei zu hohem Pressdruck treten verstärkt Kornzertrümmerungseffekte auf - Anstieg Verschleiß Formwerkzeuge - Anstieg Stromkosten
Erhöhung der Pressfeuchte	Zunächst Zunahme der Rohlingsstandfestigkeit, dann nach Durchschreiten des sandspezifischen Maximums stellen sich Einbußen ein.	



Abb. 18: Maßnahmen zur Steigerung der Rohlingsstandfestigkeit – 4 (Bildquelle: FVKS)

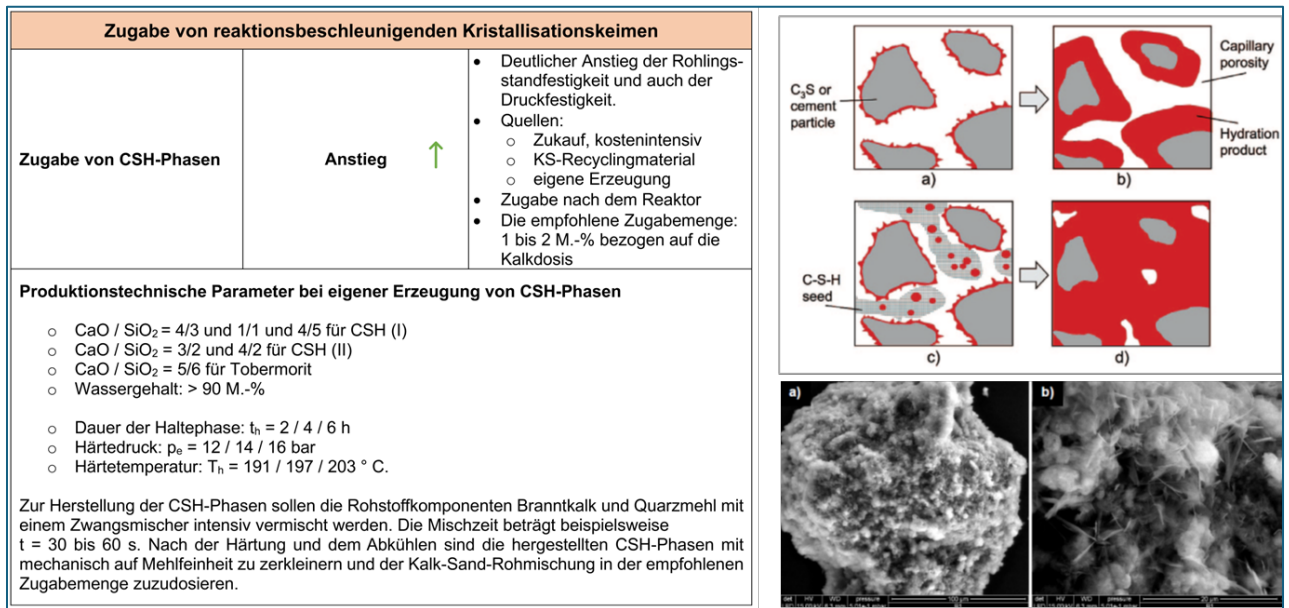


Abb. 19: Maßnahmen zur Steigerung der Rohlingsstandfestigkeit – 5 (Bildquelle: FVKS)

2.9 Einsatz von Zement als alternatives Bindemittel bei der Kalksandsteinproduktion (AiF-Nr. 21155 N)

In den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits mehrfach betont, wie wichtig es ist, die Kalkdosis bei der Produktion von Kalksandsteinen zu reduzieren, um die Klimaneutralitätsziele bis 2045 für die Kalksandsteinindustrie erreichen zu können [ROAD 21].

Das Ziel dieser Forschungsarbeit bestand darin nachzuweisen, dass CO₂-intensiver Kalk durch weniger CO₂-intensive Zemente ausgetauscht werden kann, wobei die Qualität der Steine erhalten bleibt. Mit den vorgesehenen Untersuchungen wurde Basiswissen für den Einsatz von Zementen bei der Kalksandsteinproduktion erarbeitet, siehe Forschungsberichte Nrn. 79, 142 und [GUN73].

Bei der Produktion einer Tonne Branntkalk werden rd. 1,2 t CO₂ emittiert. Bei Zementen sind es rd. 0,7 t CO₂ pro Tonne, so dass bereits ein teilweiser Austausch von Branntkalk durch Zement den CO₂-Fußabdruck von Kalksandsteinen bereits deutlich verbessern kann. Untersuchungen bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. mit verschiedenen Zementen unterschiedlicher Zusammensetzung und unterschiedlich hohem CO₂-Footprint haben ergeben, dass es technisch prinzipiell möglich ist, Branntkalk teilweise durch Zemente zu substituieren. Dabei wurden folgende Zemente bzw. Zusatzstoffe verwendet:

- CEM I 42,5 N
- CEM I 52,5 R (nur für Laborversuche)
- CEM IV 32,5 N B/P
- Trassmehl (nur für Laborversuche)
- Calciniertes Ton (nur für Laborversuche)
- 85% zu 15% Mischung CEM I 42,5 N zu Trassmehl
- 70% zu 30% Mischung CEM I 42,5 N zu Trassmehl
- 85% zu 15% Mischung CEM I 42,5 N zu Calciniertes Ton
- 70% zu 30% Mischung CEM I 42,5 N zu Calciniertes Ton

Die aktuellen Werksversuche in den Jahren 2023/24, durchgeführt in mehreren Kalksandsteinwerken, haben die großtechnische Umsetzbarkeit des hier beschriebenen Verfahrens bestätigt. Dabei erfolgte ein stufenweiser Austausch des Kalks durch Zement. Unter Verwendung eines Verhältnisses von 1,5 M.-% CaO aus Branntkalk und bis 4,0 M.-% CaO aus dem Zement wurden hohe Steindruckfestigkeiten mit einem Maximum von $\beta_{\text{DSt}} = 33,9 \text{ N/mm}^2$ erreicht, siehe Bild 20.

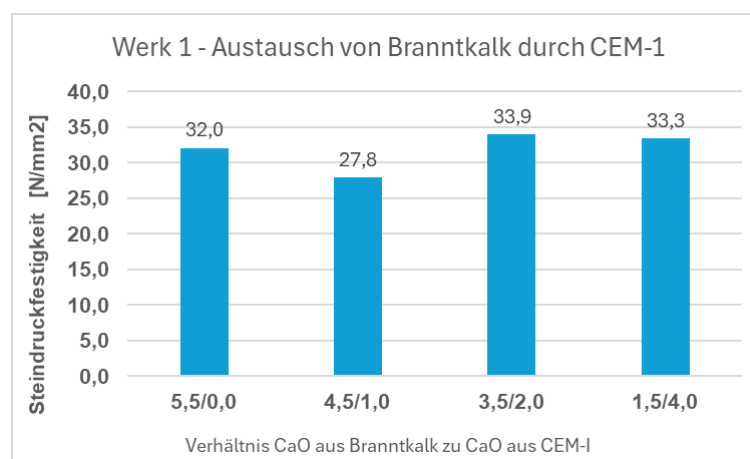


Abb. 20: Ergebnisse zur Substitution von Branntkalk durch Zement bei der Kalksandsteinproduktion (Bildquelle: FVKS)

Serie	Sand 1	Sand 2	Sand 3	Sand 4	Zement Sorte CEM-I	RC- Beton- bruch	RC- Beton- mehl	CT Calcinier- ter Ton	Kalk- dosis CaO	Press- feuchte	Press- druck	Härte- druck	Dauer der Halte- phase	Stein- roh- dichte	Stein- druck- festig- keit
	a) Werk 1: Sand KBS b) Werk 2: Eigensand	a) Werk 1: Sand D b) Werk 2: Zukaufsand	a) Werk 1: KE	a) Werk 2: KSS						F _p	σ _p	ρ _o		ρ _{tr}	β _{p,st}
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	N/mm²	bar	h	kg/dm³	N/mm²
Werk 1															
ZW-1	66,7	3,0	14,8	10,0	0,0	./.	./.	./.	5,5	5,0	12	16	1-7-1	1,93	32,0
ZW-2	66,7	3,0	14,8	10,0	1,0	./.	./.	./.	4,5	5,0	12	16	1-7-1	1,97	27,8
ZW-3	66,7	3,0	14,8	10,0	2,0	./.	./.	./.	3,5	5,0	12	16	1-7-1	1,95	33,9
ZW-4	66,7	3,0	14,8	10,0	4,0	./.	./.	./.	1,5	5,0	12	16	1-7-1	1,91	33,3
Werk 2															
ZH-1	70,0	23,0	./.	./.	0,0	./.	./.	./.	7,0	5,0	12	16	1-6-1	1,87	25,9
ZH-2	70,0	23,0	./.	./.	1,0	./.	./.	./.	6,0	5,0	12	16	1-6-1	1,83	25,9
ZH-3	70,0	23,0	./.	./.	2,0	./.	./.	./.	5,0	5,0	12	16	1-6-1	1,86	27,5
ZH-4	70,0	23,0	./.	./.	4,0	./.	./.	./.	3,0	5,0	12	16	1-6-1	1,87	27,5

2.10 Reduzierung treibhausrelevanter Emissionen bei der Kalksandsteinproduktion durch Ersatz von CO₂-intensivem Branntkalk durch Calcinierten Ton (AiF-Nr. 22795)

Derzeit wird verstärkt nach ökologischen Baumaterialien geforscht, die im Vergleich zu konventionellen Produkten geringere Umweltauswirkungen haben. Dies ist insbesondere im Rahmen der Bemühungen zur Erreichung der Klimaziele bis 2045 und im Kontext der EU-Taxonomie-Verordnung von großer Bedeutung. Im Bereich der mineralischen Baustoffe wird daher kontinuierlich nach geeigneten Bindemitteln mit einem reduzierten CO₂-Fußabdruck gesucht.

Bei der Herstellung einer Tonne Branntkalk werden etwa 1,2 Tonnen CO₂ emittiert. Im Vergleich dazu entstehen bei der Produktion von Calciniertem Ton (CT) lediglich etwa 0,3 Tonnen CO₂ pro Tonne. Ein teilweiser Ersatz von Branntkalk durch CT wird folglich den CO₂-Fußabdruck von Kalksandsteinen erheblich reduzieren.

Werksversuche bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. mit verschiedenen CT-Sorten haben aufgezeigt, dass es technisch prinzipiell möglich ist, Branntkalk teilweise durch CT bei Erhaltung der Steinqualität zu substituieren, siehe Forschungsbericht Nr. 143.

Aktuelle Werksversuche in 2023/24 in mehreren Kalksandsteinwerken haben die großtechnische Umsetzbarkeit des hier beschriebenen Verfahrens bestätigt, siehe Bild 21. Beispielsweise wurden mit einer Kalkdosis von 1,5 M.-% und einer Zugabemenge von 4,5 M.-% Calciniertem Ton Stein-
druckfestigkeiten von bis zu 20 N/mm² erreicht.

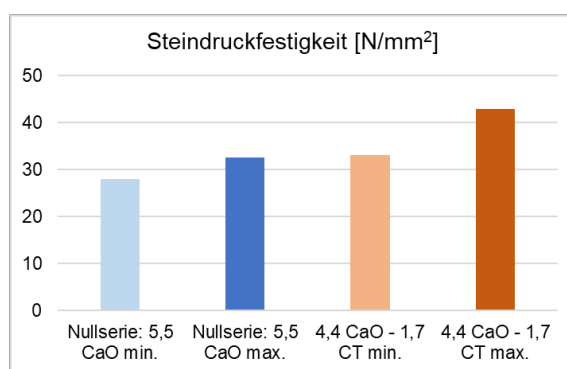


Abb. 21: Herstellung von Kalksandstein-Rohlingen unter Einsatz von Calciniertem Ton (Bildquelle: FVKS, Kalksandsteinwerk 1 von 2)

Serie	Sand 1 a) Werk 1: Sand KBS b) Werk 2: Eigensand	Sand 2 a) Werk 1: Sand D b) Werk 2: Zukaufsand	Sand 3 a) Werk 1: KE	Sand 4 a) Werk 2: KSS	Zement Sorte CEM-I	RC- Beton- bruch	RC- Beton- mehl	CT Calciniert- ter Ton	Kalk- dosis CaO	Press- feuchte F_p	Press- druck σ_p	Härte- druck p_0	Dauer der Halte- phase	Stein- roh- dichte ρ_{tr}	Stein- druck- festig- keit $\beta_{D,St}$
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	N/mm ²	bar	h	kg/dm ³	N/mm ²
Werk 1															
CTW-1	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	0,0	5,5	5,0	12	16	1-7-1	1,90	28,4
CTW-2	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	2,0	3,5	5,0	12	16	1-7-1	1,96	20,2
CTW-3	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	3,0	2,5	5,0	12	16	1-7-1	1,97	17,5
CTW-4	66,7	3,0	14,8	10,0	./.	./.	./.	4,0	1,5	5,0	12	16	1-7-1	1,98	21,7
Werk 2															
CTH-1	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	0,0	7,0	5,0	12	16	1-6-1	1,87	25,9
CTH-2	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	1,0	6,0	5,0	12	16	1-6-1	1,88	26,3
CTH-3	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	2,0	5,0	5,0	12	16	1-6-1	1,89	22,4
CTH-4	70,0	23,0	./.	./.	./.	./.	./.	3,0	4,0	5,0	12	16	1-6-1	1,82	23,9

Tab. 8: Einfluss von Calciniertem Ton auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (Werksversuche, April 2024)

2.11 Eignungsnachweis von Kalksandsteinen unter Verwendung von RC-Baustoffen Demonstrations-Bauvorhaben ReBAU im Rheinischen Revier und DLR-Nr. 12764

Unter Einsatz von Kalksandstein-Recyclingmaterial und bei Ansatz der variierten Herstellparameter wurden im Technikum der FVKS Kalksandstein-Funktionsmuster hergestellt. Dabei konnten folgende Hauptergebnisse festgehalten werden:

Die Einflussgrößen der Rohlingsstandfestigkeit sind in erster Linie die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen, insbesondere bei Anstieg des Feinstkorngehalts, der Kalkdosis, der Pressfeuchte (bis zu einem spezifischen Maximum) und des Pressdrucks. Die Rohlingsstandfestigkeiten liegen mit Messwerten von $\beta_{RSF} = 0,12$ bis $0,38 \text{ N/mm}^2$ insgesamt auf einem relativ hohen Niveau, so dass eine Herstellung von soliden, für den innerbetrieblichen Transport im Kalksandsteinwerk geeigneten Rohlingen zu erwarten ist.

Die wichtigsten Qualitätsparameter - da kostenrelevanten Normkenngrößen - sind die Steindruckfestigkeit und die Steinrohddichte. Die primäre Einflussgröße der Steindruckfestigkeit ist die Scherbenrohddichte. Diese steigt vor allem bei einer Verbreiterung der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen, in den meisten Fällen bei ansteigender Zugabe von Füllern, bei zunehmender CaO-Dosis, bei ansteigendem Pressdruck - also indirekt über die Reduzierung der Porosität oder die Steigerung der Packungsdichte sowie durch die Intensität der Autoklavierung (Härtetemperatur und Härtedauer) an.

Durch die Zugabe von Kalksandstein-Recycling-Material – beispielsweise der Fraktion 0/5 mm oder 2/5 mm – wird in vielen Fällen eine Verbreiterung der Korngrößenverteilung erreicht. Dadurch wird bekanntermaßen der Kalkbedarf der Mischung reduziert, so dass der CO₂-Footprint der auf diese Weise erzeugten Kalksandsteine reduziert wird, beispielsweise von 7 bis 9 M.-% auf 4 bis 6 M.-%. Die qualitätskennzeichnenden Eigenschaftswerte der Kalksandsteine verbleiben dabei auf demselben Wertenniveau.

Folgende Modellvorstellung kann zugrunde gelegt werden: Das Grobkorngerüst in der Kalk-Sand-Rohmasse besteht aus natürlichen SiO₂-haltigen Gesteinskörnungen oder auch Kalksandstein-Recyclingmaterial und wird von der Feinstoffmatrix, dem Kalk und dem Wasser, aufgefüllt. Mit zunehmender Menge an Füllern und Wasser nehmen die Scherbenrohddichte und die Steindruckfestigkeit aufgrund der ansteigenden Packungsdichte kontinuierlich zu, durchlaufen bei Erreichen der Sättigungspackungsdichte ein stoffspezifisches Maximum und nehmen bei weiterer Steigerung schließlich aufgrund des dann auftretenden Auseinanderdrängungseffektes wieder ab. Des Weiteren kann die Entwicklung der Steindruckfestigkeit durch Fremdstoffe, wie z.B. Gips/Sulfat gestört werden. Derartige Stoffe sind auszuschließen oder deren Wirkung durch geeignete Gegenmaßnahmen zu kompensieren. Hauptergebnisse, siehe Abb. 22:

- Die Herstellung von Mauersteinen unter Einsatz von originalem Kalksandstein-Recyclingmaterial aus dem Abbruch von Bauwerken ist mittels Kalksandstein-Technologie prinzipiell möglich.
- Gips-/Sulfatanteile im Recyclingmaterial führen zu Qualitätsverlusten bei den Mauersteinen. Insbesondere werden erhebliche Einbußen bei der Steindruckfestigkeit verzeichnet.
- Die durch das Sulfat verursachten reaktionsbehindernden Effekte können durch das hochreaktive Quarzmehl kompensiert werden, so dass die Einbußen bei der Steindruckfestigkeit ausbleiben oder niedriger ausfallen.

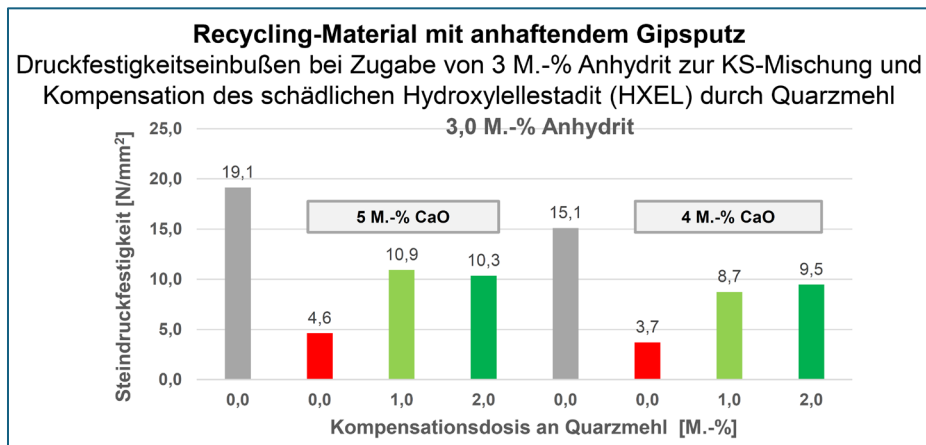


Abb. 22: Kompensation von Gipsputz aus RC-Material durch Quarzmehl (Bildquelle: FVKS)

Hinsichtlich der Recyclingfähigkeit von Kalksandstein-Mauerwerk mit sulfatbelasteten Mörteln und Putzen wird das Ziel verfolgt, den Kreislauf des Kalksandsteins zu schließen. Dazu wurden Kenntnisse über die Reaktionsbeeinflussung des hydrothermalen Prozesses durch Sulfatanteile aus Kalksandsteinabbruchmaterial sowie Kenntnisse über die relevanten Reaktionsabläufe bei definierter Zugabe von Sulfaten zum Kalk-Sand-Rohgemisch gewonnen. Ein Ansatz liegt dabei unter anderem auf der Reduzierung der Kalkdosis durch Zugabe von Kalksandstein-Recyclingmaterial mit anhaftendem Gipsputzmörtel unter Beibehaltung der KS-Steinqualität, so dass möglichst kein zusätzlicher technischer und finanzieller Aufwand bei der Herstellung von Recyclingmaterial erforderlich ist. Die festigkeitsmindernde Wirkung von sulfathaltigen Bestandteilen kann dabei durch die Zugabe von Quarzmehlen kompensiert werden, siehe Abb. 23.

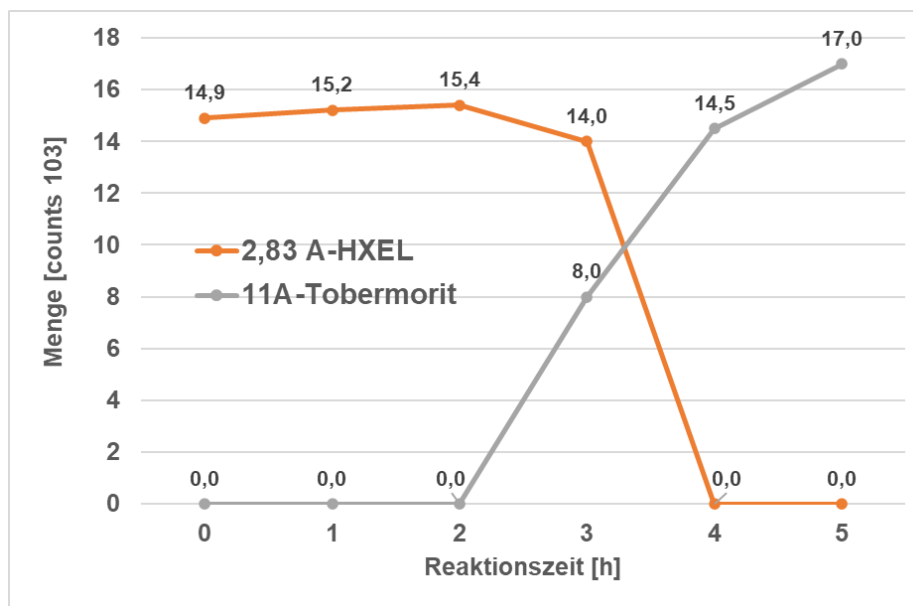


Abb. 23: Entstehung und Existenz der Hydroxylellestadit-Phasen und von 11Å-Tobermorit in Abhängigkeit von der Reaktionszeit mit Quarzmehl zum Abbau des HXEL (Bildquelle: FVKS, Saumann 1978)

2.12 Einsatz von künstlicher Intelligenz zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen bei der Autoklavierung von Kalksandsteinen (DLR-Nr. 01IF23210N)

Durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) erfolgt eine Simulation der Informationsverarbeitung des menschlichen Gehirns. Dabei werden die zugrunde liegenden Algorithmen mit präzisen Produktionsdaten von Kalksandsteinen versorgt. Speziell angepasste Algorithmen für die Kalksandsteinindustrie verarbeiten diese Daten und erzeugen darauf basierend eine virtuelle Produktionsumgebung, die in der Lage ist, Outputs auszugeben.

Die Umsetzung der Kalksandstein-Roadmap erfordert u.a. Maßnahmen im Bereich der Digitalisierung. Insbesondere ist eine Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen durch optimalen Betrieb von Autoklavensystemen möglich. Aufgrund der hohen Prozesskomplexität und Systemdynamik – insbesondere bei Überleitvorgängen des Dampfes – ist eine vollständig algorithmische Modellierung nur mit hohem experimentellem Aufwand erreichbar. In der Konsequenz können die korrekten Betriebsparameter für die jeweiligen spezifischen Produktionsanlagen nur mit Hilfe von Erfahrungswerten und unter sehr großem Aufwand bestimmt werden. Mit Hilfe der künstlichen Intelligenz kann jedoch eine aufwandsärmere Methodik angewandt werden, so dass eine Energieeinsparung erzielt werden kann. Dazu kann mithilfe einer KI-Software aus historischen Produktionsdaten das Verhalten von Dampfsysteme schrittweise erlernt werden. Aus diesem Datenpool wird eine Softwareroutine trainiert, die dann im nächsten Schritt in der betrieblichen Produktionspraxis in sog. Echtzeit maßgeschneiderte Empfehlungen zur energieärmeren und prozesssicheren Autoklavierung anbietet. Resultierend aus der Energieeinsparung kann CO₂ eingespart werden, siehe Abb. 24 bis 26.

Die Anwendung der künstlichen Intelligenz ist in der Kalksandsteinindustrie ist für die Steuerung folgende Prozesse und die Optimierung folgender Eigenschaftswerte von Kalksandsteinprodukten einsetzbar:

- **Prozesse**
 - Rezepturauslegung (mengenmäßiges Verhältnis zwischen Gesteinskörnungen unterschiedlicher Feinheit, Bindemitteln und Wasser sowie Zusatzstoffe und Zusatzmittel)
 - Mischvorgang (Vor- und Nachmischzeit)
 - Verdichtung (Pressdruck, Pressfeuchte, Pressdauer, Taktzeit)
 - Autoklavierung (Härtedruck und Härtetemperatur, Verlauf der Härtung, Überlassregime)
 - Optimierte Sägen von Kalksandsteinen
 - Optimierte Verpacken von Kalksandsteinprodukten
 - Lagerhaltung von Kalksandsteinprodukten
- **Eigenschaftswerte**
 - Druckfestigkeit
 - Biegezugfestigkeit
 - Packungsdichte und Rohdichte
 - Porosität und Porenradienverteilung
 - Frostwiderstandsfähigkeit
 - Wärmeleitfähigkeit
 - Sorptionsfeuchte
 - Wasseraufnahme
 - Wasseraufnahmekoeffizient
 - Verformungseigenschaften
 - Thermischer Ausdehnungskoeffizient
 - Schwinddehnung
 - Kriechverformung

Mit dem Einsatz von KI bei der Produktion von Kalksandstein wird ermöglicht:

- Reduzierung des Energieverbrauchs
- Reduzierung der CO₂-Emissionen
- Senkung der Produktionskosten

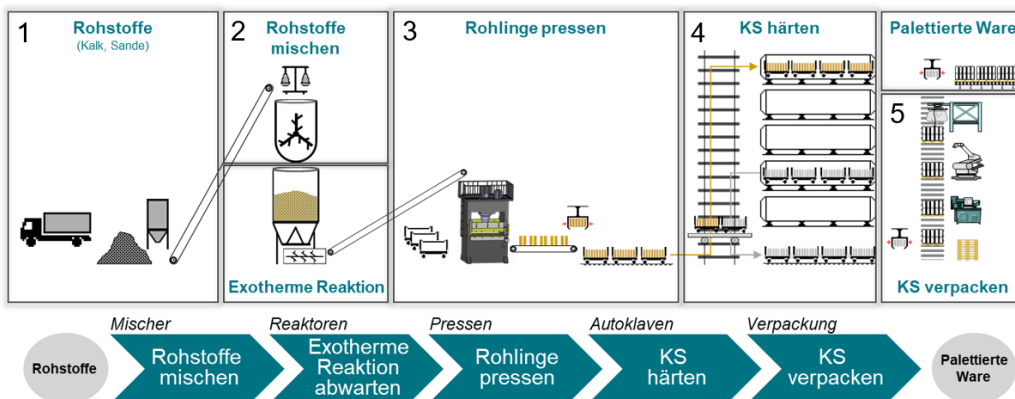


Abb. 24: Allgemeiner Herstellungsprozess für Kalksandsteine (Bildquelle: TH Ingolstadt, FAPS)

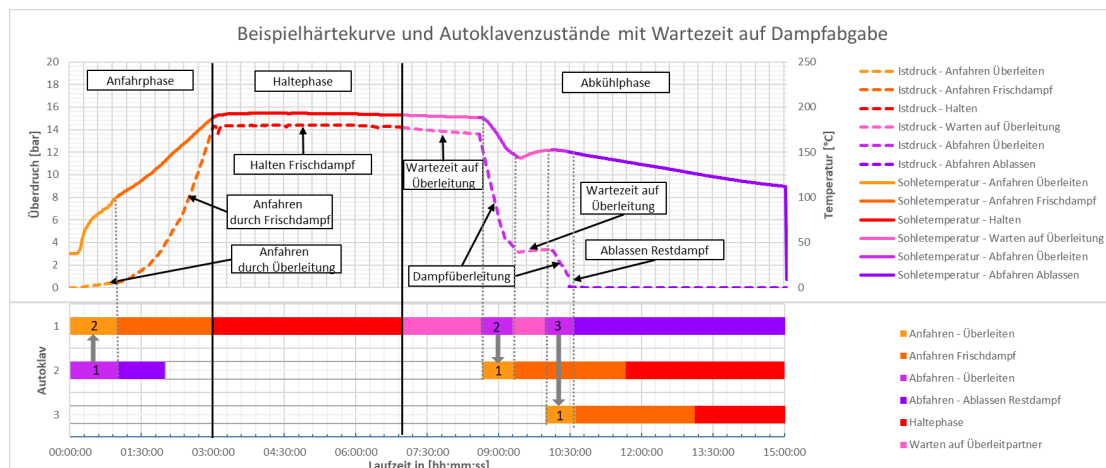


Abb. 25: Beispielhärtekurve (Druckverlauf auf der Primärachse, Temperaturverlauf an der Autoklavensohle auf der Sekundärachse | Autoklavenzustände bei Dampfüberleitung) (Bildquelle: TH Ingolstadt, FAPS)

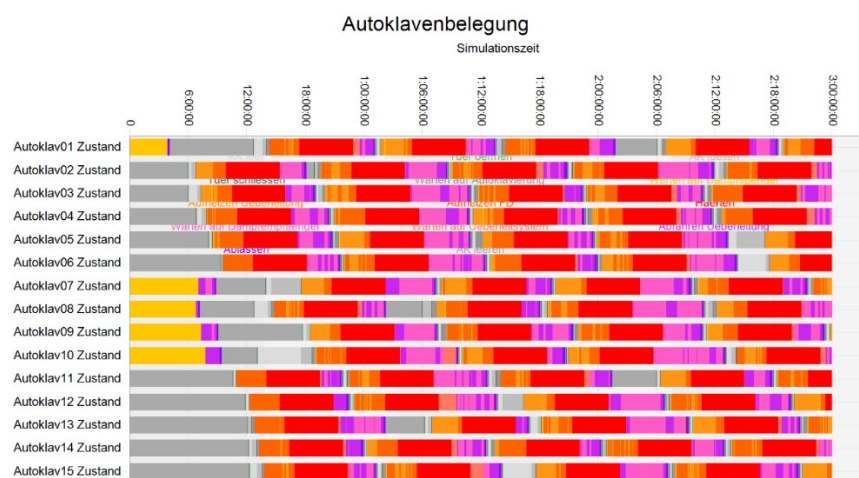


Abb. 26: Exemplarische Belegung in einem System mit 15 Autoklaven über 3 Tage. (Bildquelle: TH Ingolstadt, FAPS)

2.13 Multifunktionale Filtersubstrate zur Behandlung von Niederschlagsabflüssen aus recyceltem Kalksandstein-Mauerwerks-Abbruchmaterial (AiF-/DLR-Nr. 05344/23)

Mit diesem Verfahren können aufbereitete Recycling-Gesteinskörnungen aus Kalksandstein- oder Porenbetonmauerwerk als stoffliche Komponente oder als daraus hergestelltes Hydrothermalgranulat erzeugt werden, die für die Herstellung von Filterbaustoffen geeignet sind. Insbesondere mit Sulfat-reduzierenden Bakterien konnte der Nachweis geführt werden, dass auch Sulfat in den vorgenannten Komponenten enthalten sein darf, ohne dass es zu Beeinträchtigungen des Reinigungsprozesses kommt.

Filterbaustoffe aus RC-Körnungen können einzeln oder in Kombination angewandt werden und so auf die jeweilige Aufgabenstellung - Nährstoff- und/oder Schadstoffentfernung - für ländliche und urbane Anwendungen spezifisch einsetzbar sein. Dabei können RC-Körnungen natürliche Gesteinskörnungen ersetzen, Ressourcen einsparen und sowohl in Retentions- als auch in Kleinstfilteranlagen einsetzbar sein, siehe Abb. 27.

Folgende kleine und mittlere Branchen können von den Untersuchungsergebnissen wirtschaftlich profitieren: Kalksandstein- und Porenbetonunternehmen, Hersteller von Filterbehältern, Filtersubstraten und funktionellen Mikroorganismen, Recyclingunternehmen und Planungsbüros.

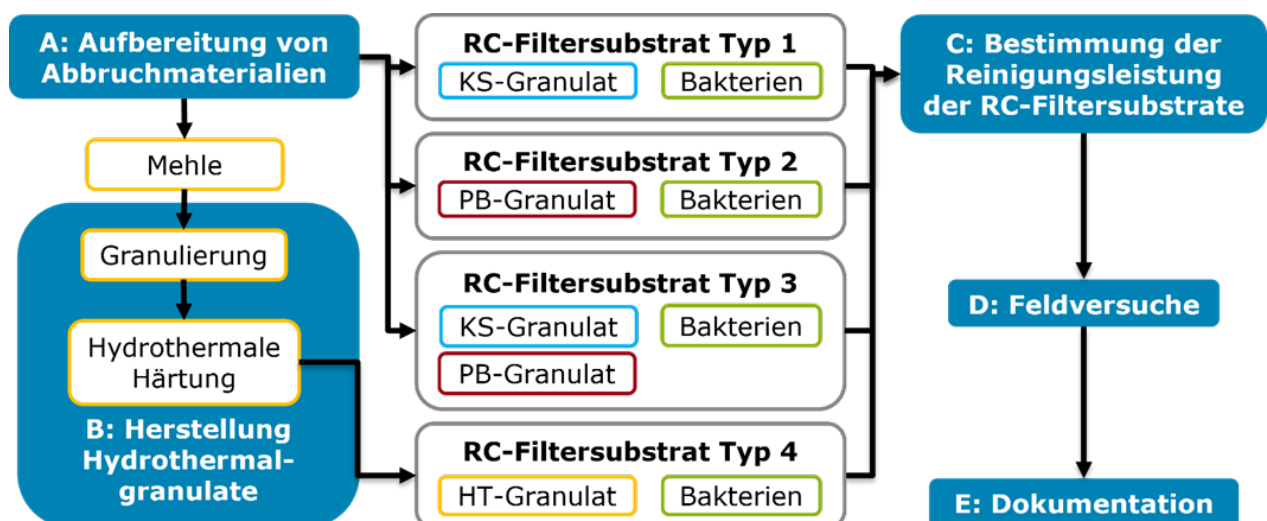


Abb. 27: Schema des Projektverlaufs (Bildquelle: RWB Bremen)

2.14 Zusatz von CO₂-aufnehmenden Gesteinskörnungen zur Steigerung des Recarbonisierungspotenzials von Kalksandsteinen - Ein neuer Ansatz für Carbon Capture and Storage/Use- CCSU

Zur Dekarbonisierung von Kalksandsteinen und deren Herstellprozess ist der Einsatz von Gesteinskörnungen möglich, die CO₂ aus der Umgebungsluft aufnehmen. Bekannt sind beispielsweise folgende Gesteinskörnungen: Olivin, Basalt, Serpentin und/oder verschiedene metallurgische Schlacken. Durch Zugabe dieser Gesteinskörnungen zur Kalksandstein-Rohmischung wird der Atmosphäre zum einen CO₂ dauerhaft entzogen und in das Kalksandsteingefüge fest eingebaut. Bekanntermaßen erhöht des CO₂ über eine zusätzliche carbonatische Bildung die Steinfestigkeit. Hieraus ergibt sich folgender CCUS-Ansatz:

- Verbesserung der CO₂-Bilanz durch CO₂-aufnehmende Gesteinskörnungen
- Identifikation geeigneter Herstellparametersätze für eine ausreichend hohe KS-Steinqualität
- Kenntnis der Energieverbräuche, der CO₂-Emissionen und der Produktionskosten
- Nachweis der Machbarkeit im Technikum und in großtechnischem Maßstab in Kalksandsteinwerken
- Die vergleichsweise einfache und robuste Kalksandsteintechnologie ist für diesen Ansatz geeignet. Es ist eine sichere Produktion von verwendungstauglichen Kalksandsteinen mit reduziertem CO₂-Ausstoß möglich.
- Es steht ein relativ großes Gesamtpotenzial zur Absenkung der Energieverbräuche und der CO₂-Emissionen für die Kalksandsteinindustrie in Aussicht.
- Die Energiepreise und Kosten für die CO₂-Zertifikate steigen weiterhin enorm an. Somit steht ein relevantes Potenzial zur Kostensenkung in Aussicht.
- Hygiene-Gesundheit-Arbeitssicherheit: Es entstehen keine Emissionen, weder toxischer noch umweltschädlicher Stoffe.
- Akzeptanz in den Kalksandsteinunternehmen: Da sämtliche produktions- und bautechnischen Anforderungen an Kalksandsteine mit minimierter CO₂-Last erfüllt werden können, liegen in den KS-Unternehmen keinerlei Akzeptanzprobleme vor.
- Akzeptanz im Mauersteinmarkt: Da sich die Baustoffindustrie vor dem Hintergrund der gesetzlichen Forderungen zur Erreichung der Klimaneutralität in vielen zentralen Punkten neu ausrichten muss, werden normkonforme Kalksandsteine mit einer verbesserten CO₂-Bilanz vom Mauersteinmarkt und vom Endkunden bereitwillig akzeptiert.

2.15 Beschleunigte Recarbonatisierung von Kalksandsteinen zur schnellstmöglichen Decarbonisierung Kalksandsteinproduktion (AiF-/DLR-Nr. 12059-N)

Alle Industriezweige müssen erhebliche Anpassungen ihrer Prozesse vornehmen, um die Klimaneutralitätsziele bis 2045 zu erreichen. Obwohl die Kalksandsteinindustrie im Vergleich zu anderen Sektoren weniger energieintensiv ist, strebt auch sie Klimaneutralität an. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist die Recarbonatisierung von Kalksandsteinen, wodurch etwa 50 % der bei der Herstellung freigesetzten CO₂-Emissionen wieder aufgenommen werden.

Nach aktuellem Kenntnisstand dauert der Recarbonatisierungsprozess unter Berücksichtigung darauf aufgetragener Beschichtungen, wie beispielsweise Wärmedämmverbundsysteme (WDVS), maximal 50 Jahre (Stand 2021, konservativ geschätzt). Neuere Untersuchungen der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. aus dem Jahr 2022 haben jedoch gezeigt, dass die Recarbonatisierung von Kalksandsteinen in einer deutlich kürzeren Zeitspanne erfolgt.

Die Recarbonatisierung kann zum einen durch Ansatz zielführender Herstellparameter (reduzierter Pressdruck und längere Hydrothermalhärtung bei geringeren Härtetemperaturen) deutlich beschleunigt werden. Hier spielt das Zusammenwirken von Steindruckfestigkeit, Rohlingsstandfestigkeit, Kalkdosis, Verdichtungsvorgang und Härteparameter die zentrale Rolle. Die Potenziale der CO₂-Absenkung, Kosten- und Energieeinsparung und die damit verbundene Verbesserung der CO₂-Bilanz wurden durch begleitende ökobilanzielle Berechnungen belastbar quantifiziert, siehe Abb. 28 und 29.

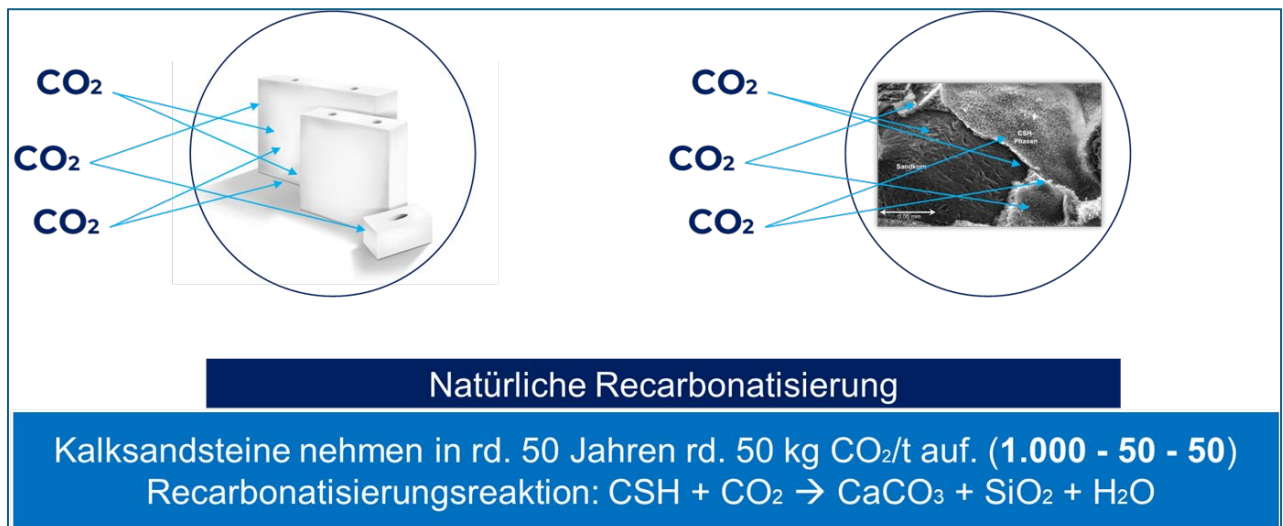


Abb. 28: Recarbonatisierung von Kalksandsteinen (Bildquelle: FVKS 2021)

Kalk-Kreislauf für Kalksandstein und Porenbeton

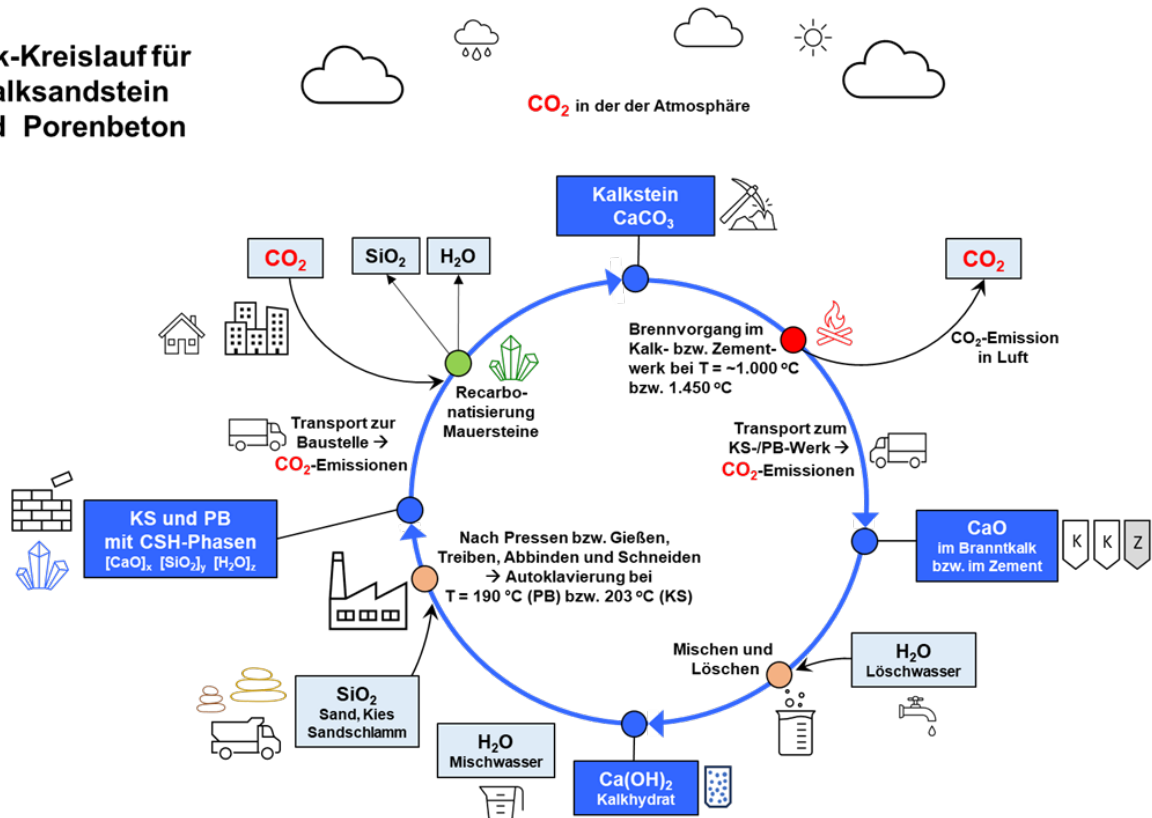


Abb. 29: Geschlossener CO₂-Kreislauf von Kalksandstein und Porenbeton (Bildquelle: FVKS 2021)

Der nachfolgende Überblick benennt die bisher untersuchten Verfahren zur Decarbonisierung:

- Decarbonisierung Kalkproduktion (80 % des CO₂-Ausstoßes)
- Decarbonisierung Kalksandsteinproduktion (20 % des CO₂-Ausstoßes)
 - Reduktion der Kalkdosis
 - Alternative Bindemittel (Zement, Calciniertes Ton, Celitement, Papierasche, Compounds auf Kalk- bzw. Zementbasis, etc.)
 - Rezepturanpassung → Absenkung der CaO-Dosis in der Mischung
 - Reduktion Energieverbrauch bei der Dampferzeugung
 - Effizientere Dampferzeugung mittels künstlicher Intelligenz
 - Elektrokessel, Wasserstoff, Synthetische (grüne) Brennstoffe
 - Digitalisierung des Produktionsprozesses / Künstliche Intelligenz
 - Beaufschlagung der Rohstoffe, Teil- und Endprodukte der Kalksandsteinproduktion – jeweils in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche, mit CO₂ bei unterschiedlichen Temperaturen, Drücken, CO₂-Konzentrationen und Einwirkdauern
 - Einleitung von CO₂ in den Mischprozess, insbesondere bei unterschiedlichen Temperaturen (z.B. Trockeneis)
 - Beaufschlagung von Rohlingen mit CO₂
 - Beaufschlagung von gehärteten Kalksandsteinen mit CO₂
 - Beaufschlagung von Kalksandstein-Recyclingmaterial mit CO₂
 - Steuerung mittels künstlicher Intelligenz

2.16 Decarbonisierung der KS-Produktion durch Erzeugung von CSH-Bindemittelphasen mit geringerem CO₂-footprint – Absenkung der Härtetemperatur (AiF-/DLR-Nr. 07513/23)

Ein wesentlicher Indikator zur Bewertung der Nachhaltigkeit eines Prozesses oder Produkts ist der Verbrauch an nicht erneuerbare Energien (Heizöl EL, Erdgas und Diesel) sowie die damit verbundenen CO₂-Emissionen.

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten erwähnt, besteht eine Möglichkeit zur schnellen Reduzierung der CO₂-Emissionen insbesondere in der Entwicklung von Mauersteinen mit stark reduziertem Kalkgehalt. Eine Verringerung des Kalkanteils führt bekanntermaßen grundsätzlich zu niedrigeren Steindruckfestigkeiten, beispielsweise auf ein Niveau von 8 bis 10 N/mm² (anstatt beispielsweise 20 bis z.B. über 40 N/mm²), was jedoch in den meisten Fällen für ein- bis dreigeschossige Bauwerke ausreichend ist.

Die erforderlichen Herstellparametersätze für derartige Produkte und deren weitere qualitätskennzeichnenden Eigenschaften waren jedoch nicht ausreichend genau bekannt und wurden experimentell im Labor und in mehreren Kalksandsteinwerken erkundet. Die Potenziale der CO₂-Absenkung, Kosten- und Energieeinsparung und die damit verbundene Verbesserung der CO₂-Bilanz konnten durch begleitende ökobilanzielle Berechnungen quantifiziert werden, siehe Forschungsberichte Nrn. 46, 50, 90 und 136. In der betrieblichen Produktionspraxis wird empirisch das Produkt aus Härtezeit und Härtetemperatur ($p_e \times t_h = \text{const.}$, typisches Beispiel: 87 barh) herangezogen. Diese weit verbreitete Abschätzungsmethode ist eine grobe Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse und dient in der Praxis für eine pauschale Festlegung der Härteparameter. In Wirklichkeit sind die Prozesse aufgrund der unterschiedlichen Porosität der Rohlinge, des Gefüges und der instationären Strömungsvorgänge nicht linear und komplex.

Hauptziel ist es, den Energieverbrauch und die damit einhergehenden CO₂-Emissionen abzusenken, was aus dem nachfolgenden Beispiel deutlich wird. Es zeigt exemplarisch, wie eine Reduktion der Härtetemperatur mit „energetisch optimierten“ CSH-Phasen zu gleich hohen Druckfestigkeiten führt. So kann in vielen Fällen vereinfachend die Härtetemperatur beispielsweise von den üblichen $T = 203^\circ\text{C}$ (bei $p_e = 16$ bar) um $\Delta T_h = 13^\circ\text{C}$ auf $T = 190^\circ\text{C}$ und $T = 180^\circ\text{C}$ (bei $p_e = 14$ oder 12 bar) abgesenkt werden, siehe Abb. 30. Dabei liegt die Steindruckfestigkeit aufgrund der optimaleren Bindemittelausbildung auf demselben Wertenniveau. Die Entwicklung und der Gütenachweis der CSH-Phasen erfolgt dabei mittels in-situ-XRD und IR-Spektroskopie.

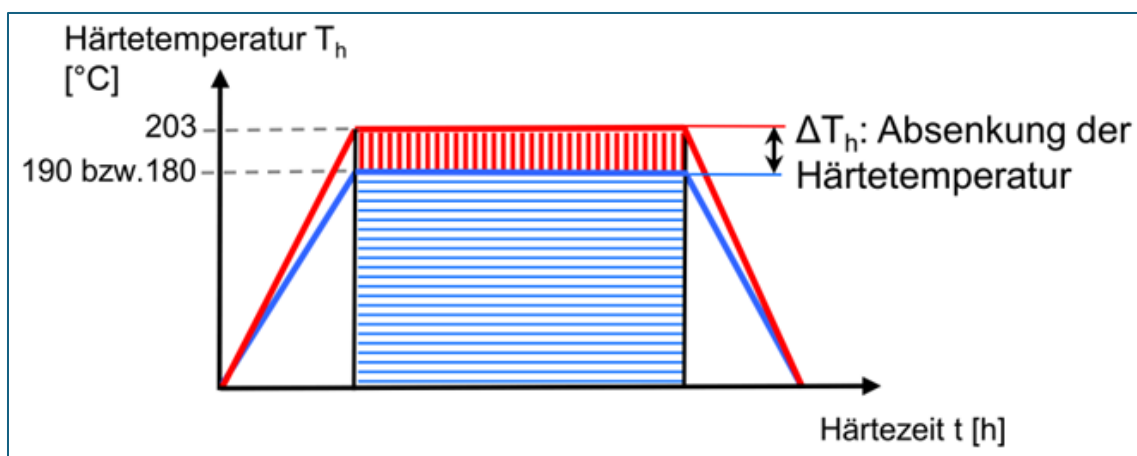


Abb. 30: Eine Reduktion der Härtetemperatur führt zu energetisch optimierten CSH-Phasen bei gleich hohen Festigkeiten der Kalksandsteine (Bildquelle: FVKS)

2.17 Schnellrecarbonatisierung von Kalksandstein- und Porenbeton-Recyclingmaterial

Das Baustoffrecycling ist ein Kernelement des European Green Deal. Über das Konzept des Circular Economy Action Plans werden derzeit Anforderungen an das Baustoffrecycling entwickelt. Für Kalksandstein und Porenbeton sind Rücknahmequoten zu erwarten (laut geplanter EU-Taxonomie-Verordnung zukünftig bis zu 30 %). Das Ziel der Klimaneutralität in der Kalksandstein- und Porenbetonindustrie bis zum Jahr 2045 zu erreichen, bedeutet eine enorme Herausforderung. Die zügige Etablierung der Recarbonatisierung von Kalksandstein- und Porenbetonmaterial in der Umweltnormung und Gesetzgebung ist daher eine der wichtigsten Aufgaben. Die Recarbonatisierung ist ein natürlicher Vorgang, bei dem der Stein CO_2 aufnimmt und dauerhaft in das Gefüge einbindet (CO_2 -Senke). Die Steineigenschaften werden hierdurch in vielen Fällen sogar verbessert.

Es ist möglich, vergleichsweise jüngerer Kalksandstein- bzw. Porenbeton-Abbruchmaterial (unterschiedlicher Korngrößen) nach einer Gebäudenutzungsdauer von beispielsweise 10 bis 20 Jahren nach der Errichtung, welches noch nicht vollständig recarbonatisiert ist und dem Recycling zugeführt wird, in der Recyclinganlage einer Schnellrecarbonatisierung zu unterziehen. Beispielsweise kann dazu ein Prallbrecher mit Siebanlage und einer zugeschalteten CO_2 -Begasungsanlage eingesetzt werden. Dazu werden festgelegte Temperaturen, Drücke, CO_2 -Konzentrationen und Einwirkdauern angesetzt und steuerungstechnisch eingehalten.

Selbsterklärend wird das Recarbonisierungspotenzial von Kalksandsteinmaterial damit nicht erhöht, sondern das betreffende CO_2 wird der Atmosphäre schneller entzogen, was dazu beiträgt, die Umweltbelastung zu verringern (CCSU-Ansatz: Carbon Capture, Storage and Use). Siehe Abb. 31.

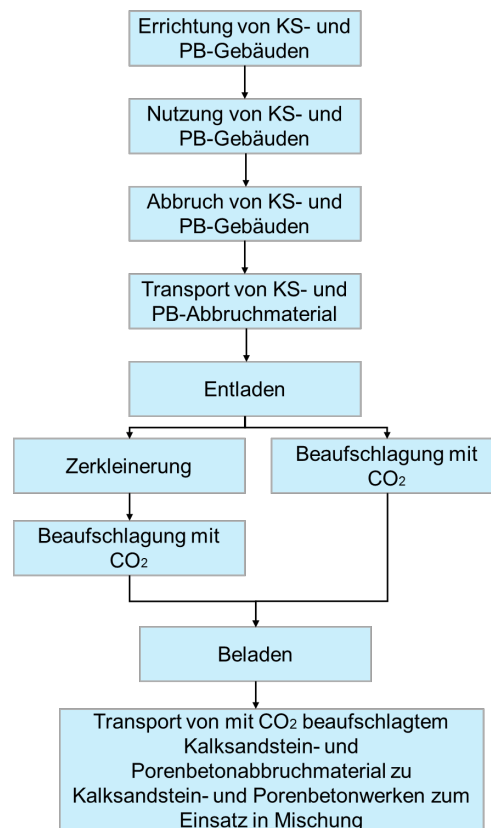


Abb. 31: System zur Herstellung von mit CO_2 beaufschlagtem Recyclingmaterial (Bildquelle: FVKS)

2.18 Net Zero CO₂ Kalksandsteingebäude - ein erstmaliger Ansatz für eine ganzheitliche, numerische Methode zur Reduzierung der CO₂-Emission über den gesamten Lebenszyklus von Kalksandsteingebäuden

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Zielsetzung verfolgt, den Energieverbrauch und die damit verbundenen CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von Kalksandstein signifikant zu reduzieren. Zu diesem Zweck wurden neue, praxisorientierte und umsetzbare spezifische Ökobilanz-Modelle gemäß den geltenden Normen entwickelt. Darauf aufbauend wird ein neuartiges numerisches Tool (Algorithmen) zur Erstellung von Ökobilanzen für Kalksandsteinprodukte und -gebäude entwickelt, mit dessen Hilfe die Umweltwirkungen auf Produkt- und Gebäudeebene ermittelt und optimiert werden können.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung von Lösungsansätzen zur bestmöglichen ökologischen Optimierung von Kalksandsteingebäuden unter Verwendung beliebiger Bauteile und Bauprodukte. Darüber hinaus kann der technische und zeitliche Aufwand für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden in der frühen Planungsphase durch die Anwendung des numerischen Tools deutlich reduziert werden [Ist22, BPK24].

Des Weiteren wurde eine neue Berechnungsmethode entwickelt, die auf den Ergebnissen von Ökobilanzen einer Reihe von Referenz-Wohngebäuden aus Kalksandstein basiert und den Zusammenhang zwischen dem Ressourcenverbrauch bei der Herstellung von Bauprodukten, dem Ressourcenverbrauch während des Gebäudebetriebs und den Umweltwirkungen eines Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus quantifiziert.

Auf Basis dieser Ergebnisse können im Rahmen eines Konzepts der Kalksandsteinindustrie und für Planungsbüros praxisnahe Handlungsempfehlungen für die Anwendung der Software abgeleitet werden, siehe Abb. 32. Die Anwendung auf andere Baustoffe wie Porenbeton, Ziegel und Leichtbeton ist ebenfalls möglich.



Abb. 32: Phasen des Forschungsprojekts: Net Zero CO₂ Kalksandsteingebäude. (Bildquelle: FVKS)

2.19 Anwendung der Nanotechnologie bei der Kalksandsteinproduktion

Unter Nanotechnik wird die Erforschung, Entwicklung, Herstellung und Verarbeitung von Strukturen und Materialien im Nanometermaßstab verstanden. Die Nanotechnologie bezieht sich auf eine breite Palette von Querschnittstechnologien mit Werkstoffen, Bauteilen und Systemen, deren Funktion und Anwendung auf den besonderen Eigenschaften nanoskaliger (≤ 100 nm) Größenordnung beruhen. Unternehmen können durch die Kontrolle von Atomen und Molekülen Nanomaterialien entwickeln, die höchstens 100 Nanometer dick sind und diese Materialien auf alle Branchen anwenden [Fraunhofer-Netzwerk Nanotechnologie FNT].

In der Kalksandsteinindustrie trifft die Nanotechnologie auf vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Die gezielte Beeinflussung des CSH-Phasen-Bindemittelbestands kann bereits als Eingriff auf der Nanoskala verstanden werden.

Die Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. hat im Zeitraum von 2000 bis 2024 verschiedenste Anwendungen für die Nutzung von Nanotechnologie/Nanoteilchen zur Herstellung langlebiger Kalksandsteine, zur Optimierung von Kalksandsteinrezepturen, zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Emissionen während der Kalksandsteinproduktion sowie zur Steuerung und Verbesserung chemischer und physikalischer Eigenschaften von Kalksandsteinen identifiziert und untersucht. Diese werden nachfolgend aufgeführt:

- **Oberflächenhärtung und Korrosionsschutz** von Formwerkzeugen und sonstigen metallischen Bauteilen durch Beschichtung mit bzw. Hartstoffen, z.B. für Formwerkzeuge oder sonstige Schleißteile. Unter anderem kommen folgende Materialien in Betracht:
 - Diamant
 - Nitride
 - Bornitrid
 - Titannitrid
 - Siliciumnitrid
 - Titanaluminiumnitrid
 - Carbide
 - Siliciumcarbid
 - Borcarbid
 - Wolframcarbid
 - Vanadiumcarbid
 - Titancarbid
 - Tantalcarbid
 - Oxide
 - Aluminiumoxid
 - Zirkoniumdioxid
- **Saubere Oberflächen von Kalksandsteinen bzw. Kalksandstein-Mauerwerk**, z.B. Lötuseffekt zur Reinhaltung der Oberflächen von Kalksandsteinen, wie
 - Innensichtsteine
 - Vormauersteine
 - Verblender
- **Baustoff-Verstärkung**, z.B. Einsatz von nanoskaligen Bindemitteln, Zusatzstoffe, Zusatzmitteln (wie z.B. feine und ultrafeine SiO_2 -haltige Stoffe) und/oder Gesteinskörnungen zur Erzeugung von Kalksandsteinprodukten mit einer optimierten Gefügestruktur mit erhöhter Packungsdichte zur Rohdichteerhöhung und/oder Festigkeitssteigerung

- **Wärme und Schalldämmung**, z.B. unter Einsatz von nanoskaligen Stoffen bei deren Herstellung und/oder als deren Bestandteil, die in der Kombination mit Kalksandstein besondere Dämmeigenschaften mit niedrigen bzw. besonders niedrigen Wärmeleitfähigkeiten und/oder hoher Schallisolation aufweist.
- **Wasseraufbereitung**, z.B.
 - Entsalzung (z.B. Alkali- und Erdalkalisalze, Eisen- und Mangan-Salze, Silicate / Kieselsäure)
 - Entgasung (z.B. Sauerstoff, CO₂, Kohlensäure)
 - Ungelöste Stoffe und Kolloide (Trübstoffe)
 - Organische Stoffe (z. B. Huminstoffe, Öle, Fette)
- **Abwasserreinigung**
 - Ermöglichung oder Optimierung von bestehenden Verfahren zur Wasser- und Abwasseraufbereitung durch geeignete nanotechnische Anwendungen, die zu einer gezielteren Entfernung von Kontaminationen, besseren Energieeffizienz, Reduktion von CO₂-Emissionen und geringeren Kosten führen können.
- **Weitere bekannte Anwendungsfelder, z.B. für Querschnittstechnologien oder zur Decarbonisierung der Kalksandsteinindustrie**
 - Wertstoffabtrennung
 - Photokatalyse
 - Pyrolyse
 - Luftreinhaltung
 - Umweltüberwachung
 - Batterien
 - Superkondensatoren
 - Brennstoff- und Solarzellen
 - Thermische Kraftwerke
 - IR-Reflexion/Verschiebung
 - Wirkstoffsuche
 - Synthese/Katalyse
 - Sensoren
 - Prozessüberwachung
 - Displays (OLED, FED)
 - Polymerelektronik
 - Prozessoren, Speicher
 - Sensoren
 - Biochips
 - Passivierung

2.20 Technologie zur Reduktion der CO₂-Emissionen bei der Kalksandsteinproduktion – Umsetzung der Kalksandstein-Roadmap

Die Themen Klimaschutz und Green Deal bestimmen die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte. Für das Ziel Klimaneutralität muss sich auch die Kalksandsteinindustrie erheblich anpassen, damit von 2045 an keine neuen Treibhausgase durch die Kalksandstein-Produktion in die Atmosphäre gelangen. Deshalb ist eine fortlaufend transparente Darstellung ihrer Umweltsituation für die Bauwelt von großer Bedeutung. Die Kalksandsteinindustrie setzt dabei nach wie vor auf eine nachhaltige Entwicklung – angefangen von der Rohstoffgewinnung über die Produktions- und Nutzungsphase bis hin zu Recyclinglösungen für Kalksandsteinmauerwerk [ROAD21].

Die Kalksandsteinwerke gewinnen den Hauptrohstoff Sand meist aus eigenen Sandvorkommen in nächster Nähe zum Werk. Auch der benötigte Kalk kommt aus heimischer Produktion. Von den CO₂-Emissionen, die der Kalksandsteinindustrie zugerechnet werden, sind dabei heute gerade einmal 20 Prozent im Produktionsprozess begründet. Die restlichen knapp 80 Prozent kommen durch die Verwendung des Rohstoffs Kalk hinzu. Entsprechende Veränderungen in der Kalkproduktion sowie die fortlaufende Suche nach alternativen, CO₂-ärmeren Bindemitteln sind damit ein wesentlicher Hebel, um Emissionen zu senken.

Ein anderer Hebel ist die Intensivierung der eigenen Forschung, um den Kalkanteil in der Produktion und damit den CO₂-Ausstoß weiter zu reduzieren. Die Kalksandsteinindustrie steht in den nächsten Jahrzehnten vor erheblichen Herausforderungen, um ihren Teil zum Erreichen der Klimaziele beizutragen. Der Einsatz umweltfreundlicher, ressourceneffizienter und innovativer Technologien, aber auch die Wiederverwertbarkeit der Produkte müssen fortlaufend weiter ausgebaut und vorangetrieben werden.

Die weitere Digitalisierung und Automatisierung der Prozessketten sowie der verstärkte Einsatz erneuerbarer, also „grüner“ Energie sowie neuer Energieträger, zum Beispiel in Form von Wasserstoff, sind hier die wichtigsten Schlagworte zu den anstehenden Veränderungen. Dies muss durch eigene, praxisnahe Forschungsaktivitäten fortlaufend unterstützt werden. Welche Schritte hierfür notwendig sind und unter welchen Rahmenbedingungen dies erfolgen kann, wurden in den letzten Jahren im Detail analysiert und in der „Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland“ zusammengefasst [ROAD21].

Die Kalksandsteinindustrie kann unter geeigneten Voraussetzungen interne Lösungen zur Klimaneutralität vorantreiben und diese auch erreichen. Für das Produkt als Ganzes ist die Vorkette Kalk weiterhin von erheblicher Bedeutung. Gelingen dort die angestrebten Reduktionen, wird die Branche sogar klimapositiv. Die Ergebnisse der Roadmap zeigen, dass die Kalksandsteinindustrie bis 2045 klimaneutral werden und bereits bis 2030 mit erheblichen Emissionsreduktionen zu europäischen und nationalen Klimaschutzzielen beitragen kann.

MAßNAHMEN

Folgende technische und organisatorische Maßnahmen und Ansatzpunkte in den Produktionsprozessen der Kalksandsteinindustrie können konkret benannt werden:

- Effizienzeffekte aus der Digitalisierung
- Optimierte Wärmemanagement
- Umstellungen im Fuhrpark auf Elektromobilität oder anderweitige Energieträger
- Umstellungen der Stapler auf Elektromobilität oder anderweitige Energieträger
- Brennstoffwechsel für die Dampferzeugung, Einsatz von Elektro- und Wasserstoff-Dampferzeugern
- Reduktion des Kalkanteils in den Produkten

- Umstellung auf alternative Bindemittel, z.B. Calcinierter Ton, Zement, Papierasche, Bindemittelcompounds auf Kalk- und/oder Zementbasis
- Reduktion Emissionsfaktoren Strom und Erdgas (externer Einflussfaktor)
- Ersatz von Wärmespeichern
- Umstellung Werksverkehr auf E-Mobilität
- Vorwärmtunnel
- Verschlussmechanismen an Behältern gegen Auskühlung

Des Weiteren müssen zur Erreichung der Klimaneutralität neue Technologien zum Einsatz kommen. Dies kann z. B. auch einen Brennstoffwechsel bei bereits etablierten Prozessen bedeuten.

- Wasserstoff
- Synthetische Kraftstoffe
- Synthesegas
- Elektrische Energie
- Altholz und andere Brennstoffe auf Holzbasis

Maßnahmen zur Wärmeenergieeinsparung

Neben der Erzeugung der Wärme bietet auch ihre Nutzung selbst weitere Einsparpotenziale. Dabei sind verschiedene Ansatzpunkte denkbar, die sich in der Realität je nach Werk stark unterscheiden können. Je nach Anlagensituation können Einsparungen und Kosten der genannten Alternativen abweichen. Möglichkeiten zur Wärmeenergieeinsparung sind unter anderem:

- Wärmespeicher zur besseren Nutzung bereits vorhandener Wärme etwa zur Abfederung des Spitzenbedarfs nach dem Wochenende
- Schutz der Rohlinge vor Auskühlung (Vorwärmung oder Dämmung vor den Autoklaven)
- Optimierte Wärmemanagement (z.B. mehrstufige Wärmerückgewinnung, Erhöhung der Speisewassertemperatur, Anpassung Betriebsweise, etc.)
- Optimierte Nutzung der Autoklaven (z. B. durch kontinuierliche Beschickung, volle Ausnutzung des Raumangebots, häufiges Überlassen, etc.)

Technologien zur CO₂-Aufnahme (Decarbonisierung während des Produktionsprozesses)

Grundsätzlich bestehen verschiedene technische Möglichkeiten zur CO₂-Aufnahme durch Kalksandsteine, die durch theoretische Kalkulationen und/oder experimentelle Analysen belegt sind. Dabei können die Reaktionstemperatur und der Druck innerhalb einer Bandbreite von $T_h = 0$ bis 300 °C bzw. $p_e = 0$ bis 50 bar bzw. einer Reaktionszeit von $t_h = 0$ bis 1.000 Minuten. Durch die Beaufschlagung der Rohstoffe, der Rohlinge, der Kalksandsteine bzw. des Recyclingmaterials erfolgt eine carbonatische Bindung, die zu einer Festigkeitsentwicklung führt, siehe Abb. 33 bis 41.

- Beaufschlagung der Kalk-Sand-Rohmischung (mit und ohne Zusatzstoffe) mit CO_2 zur Erzeugung einer teilweise oder vollständigen carbonatischen Härtung
- Beaufschlagung der Kalk-Sand-Rohmischung (mit und ohne Zusatzstoffe) mit CO_2 zur Bildung von CaCO_3 für eine industrieübergreifende Nutzung
- Beaufschlagung von Kalksandstein-Rohlingen mit CO_2 , und anschließende Hydrothermalhärtung, ggfs. verbunden mit einer carbonatischen Härtung [GOR69]
- Beaufschlagung von gehärteten Kalksandsteinen mit CO_2 in einem Druckbehälter, ggfs. verbunden mit einer carbonatischen Härtung [GOR69]
 - Variante a: Beaufschlagung mit CO_2 im Härtekessel
 - Variante b: Beaufschlagung mit CO_2 in nachgeschalteten Druckbehälter
- Beaufschlagung von gehärteten Kalksandsteinen mit CO_2 in einer offenen Anlage
- Beaufschlagung von gehärteten Kalksandsteinen mit CO_2 an Luft [ROAD21]
- Beaufschlagung von Kalksandstein-Recyclingmaterial bzw. anderem Recyclingmaterial vor, während oder nach dem Recycling-Brechvorgang mit CO_2 [GOR69]
- Erhöhung der Porosität der Kalksandstein-Rohlinge bzw. der gehärteten Kalksandsteine zur Beschleunigung der Recarbonatisierung [Ed-ZI, 2022].

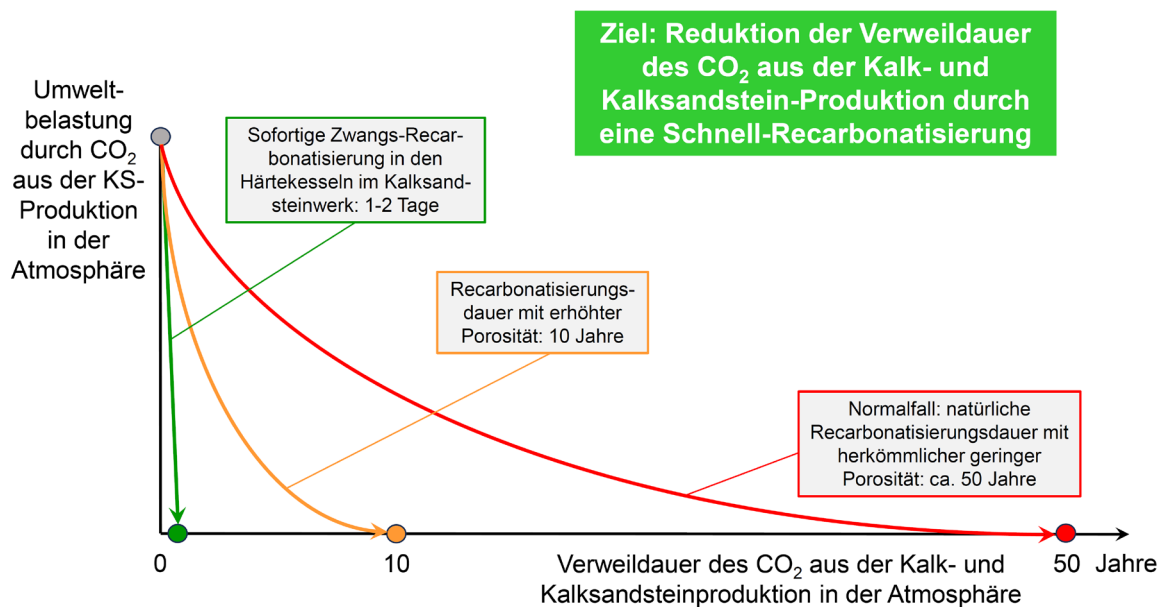
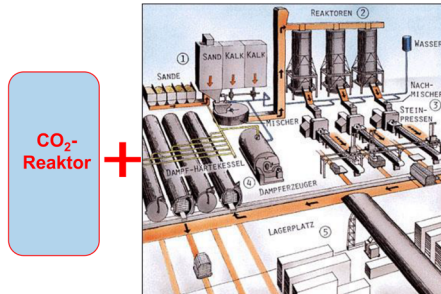


Abb. 33: Drei mögliche Pfade zur Reduzierung der Umweltbelastung durch Einpressen von CO_2 in die Rohlinge/Kalksandsteine (**grüner** Pfad) bzw. durch Aufnahme aus der Atmosphäre (**orangefarbener** bzw. **roter** Pfad) (Bildquelle: BVKSI 2021)

Möglichkeiten der Optimierung der CO₂-Bilanz bei der Kalksandstein-Herstellung

III Rückführung des CO₂ in den Kalksandsteinherstellungsprozess

IIIb Mineralische Bindung des CO₂ während der Autoklavierung



Quelle: Dr. Eden

Nachschtaltung eines CO₂-Reaktors im Herstellungsprozess

→ ermöglicht optimale und definierte Carbonatisierung der CSH-Phasen
→ Umsetzungsrate von ca. 90 %

Carbonatisierung durch mineralische Bindung ist nicht abhängig vom Einsatzgebiet des KS und dessen Exposition

Möglichkeiten der Optimierung der CO₂-Bilanz bei der Kalksandstein-Herstellung

III Rückführung des CO₂ in den Kalksandsteinherstellungsprozess

IIIa Mineralische Bindung des CO₂ während der Autoklavierung

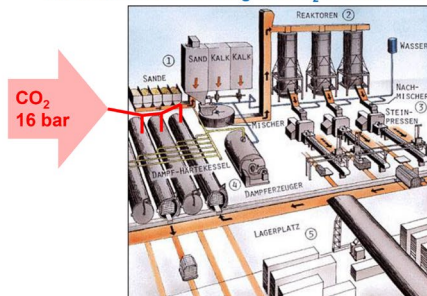
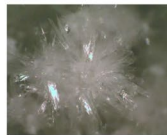


Bild: Dr. Eden

CO₂ kann sich hydrothermal mineralisch binden

→ Scawtit ($\text{Ca}_7(\text{Si}_3\text{O}_9)_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

tritt anstelle des Tobermorits als festigkeitsbildende Phase auf

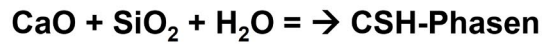


Quelle:
<https://www.mineralienatlas.de/view/mauf/ULL.php?param/1412703178-Scawtit-xx-Scawtit.jpg>

Abb. 34 und 35: Möglichkeiten der Optimierung der CO₂-Bilanz bei der Kalksandstein-Herstellung (Bildquelle: Middendorf 2021, BVKSI)

Recarbonatisierung nach der Autoklavierung

Heute:



BVKSI 14.11.2021

Bundesverband
KALKSANDSTEIN
Industrie e.V.

Recarbonatisierung nach der Autoklavierung

Zukunft:

→ aus Erdgasfeuerung KS-Werk
bzw. Kalkwerk: 50 kg CO₂/tKS



BVKSI 14.11.2021

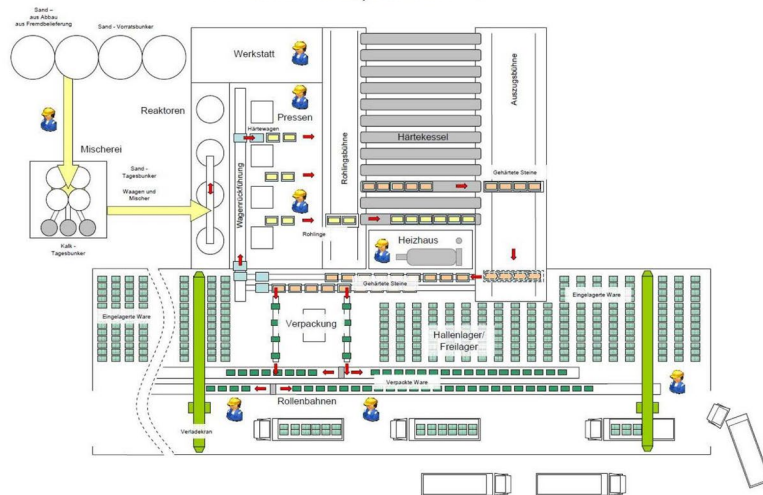
Bundesverband
KALKSANDSTEIN
Industrie e.V.

Abb. 36 und 37: Möglichkeiten der Optimierung der CO₂-Bilanz bei der Kalksandstein-Herstellung (Bildquelle: BVKSI 2022)

Recarbonatisierung nach der Autoklavierung

Heute:

KS – Werk - Prinzipieller Prozess



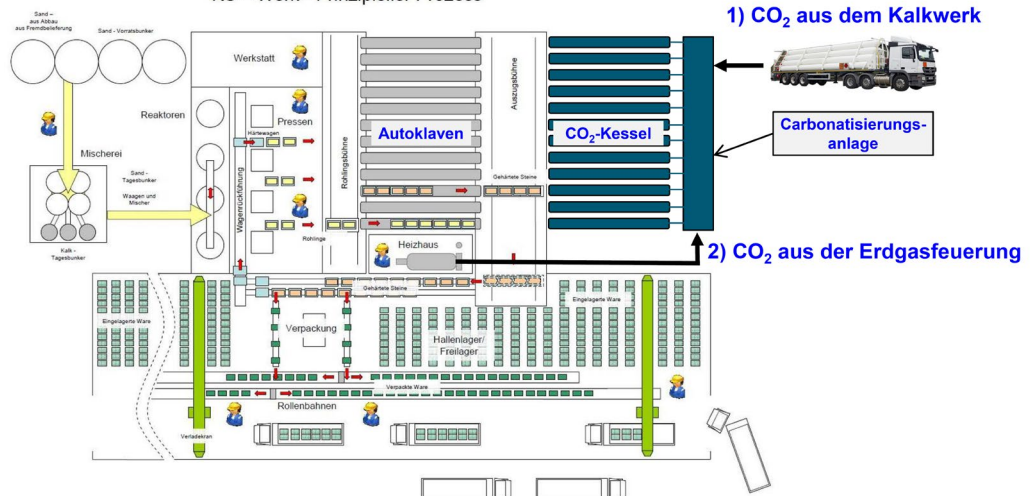
BVKSI 14.11.2021

Bundesverband
KALKSANDSTEIN
Industrie e.V.

Recarbonatisierung nach der Autoklavierung

Zukunft:

KS – Werk - Prinzipieller Prozess



BVKSI 14.11.2021

Bundesverband
KALKSANDSTEIN
Industrie e.V.

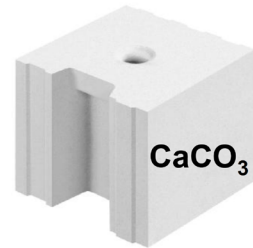
Abb. 38 und 39: Möglichkeiten der Optimierung der CO₂-Bilanz bei der Kalksandstein-Herstellung (Bildquelle: BVKSI 2022)

Recarbonatisierung nach der Autoklavierung

Zukunft:

Beispielrechnung:

- Härtekesselfahrten pro Tag: 15
- Tonnage pro Härtekessel: 50 t
- Tonnage pro Tag: $15 \times 50 \text{ t} = 750 \text{ t}$
- CO_2 -Aufnahme Kalksandstein: maximal 50 kg/tKS [EDEN/MIDDENDORF]
- CO_2 -Aufnahme pro Tag: $50 \times 750 = 37.500 \text{ kg} = 37,5 \text{ t}$
- CO_2 -Aufnahme pro Jahr: $37,5 \times 200 \text{ Arbeitstage pro Jahr} = 7.500 \text{ t}$



BVKSI 14.11.2021

Bundesverband
KALKSANDSTEIN
Industrie e.V.

Recarbonatisierung nach der Autoklavierung

Zukunft:

Voraussetzungen:

- Es bildet sich Calcit (stabil) und nicht Aragonit bzw. Vaterit (instabil)
- Die Porosität des Kalksandsteins lässt eine ausreichend schnelle Carbonatisierung zu. Die Kalksandsteine müssen dazu eine ausreichend große Porosität haben. Der dafür erforderliche CO_2 -Druck und die Behandlungsdauer sind nicht bekannt.
- Sicherheitsausrüstung CO_2 -Handling – Überwachung durch TÜV, GA, BG
- Investitionskosten: CO_2 -Kessel (10 x 200 T€) + CO_2 -Anlage incl. Steuerung (500 T€) = 2,5 Mio. €
- Betriebskosten: CO_2 -Transport (25 T€/a) + Strom Pumpen (?? T€/a) + Sonder-Überwachung (??T€/a)

BVKSI 14.11.2021

Bundesverband
KALKSANDSTEIN
Industrie e.V.

Abb. 40 und 41: Möglichkeiten der Optimierung der CO_2 -Bilanz bei der Kalksandstein-Herstellung (Bildquelle: BVKSI 2022)

2.21 Decarbonisierung von Kalksandsteinen – Einsatz von Zementstein aus Beton-Recycling-Material als CSH-Phasen-Reaktionsbeschleuniger

Das Baustoffrecycling ist ein Kernelement des European Green Deal. Über das Konzept des Circular Economy Action Plans werden derzeit Anforderungen an das Baustoffrecycling entwickelt. Für die Kalksandsteinproduktion sind Rücknahmequoten zu erwarten. Laut geplanter EU-Taxonomie-Verordnung kann sich die Rücknahmequote auf bis zu 30 % belaufen. Die Wiederverwertung von Baumaterialien ist deshalb ein Eckpfeiler der Nachhaltigkeit im Bauwesen. Recycelte Materialien entstehen auf vielfältige Weise und weisen unterschiedliche Qualitäten und Eigenschaften auf. Diese können gezielt für verschiedene Branchen genutzt werden. Rezyklierter Zementstein, der beim Betonrecycling anfällt und bisher keiner breiten Verwendung zugeführt wurde, bietet sich als Reaktionsbeschleuniger bei der Autoklavierung von Kalksandsteinen an. In diesem Projekt sind das Recycling von Kalksandsteinmaterial und innovative Aufschlussverfahren der Decarbonisierung verknüpft.

Im Rahmen von Labor-, Technikum und Werksversuche in drei Kalksandsteinwerken konnte gezeigt werden, dass der beim Betonrecycling anfallende Zementstein als Reaktionsbeschleuniger für die Kalksandsteinherstellung fungiert, siehe (AiF-Nr. 21860-N). Dadurch kann die bei der Kalksandsteinproduktion übliche Kalkdosis erheblich abgesenkt und dadurch die CO₂-Bilanz des Kalksandsteins deutlich verbessert werden. Die Recarbonatisierungsfähigkeit bleibt vollständig erhalten. Die sortenreine Separierung des Kalksandstein-Bruchmaterials erfolgt zum einen auf konventionelle Weise und kann alternativ bzw. in Kombination mittels elektrodynamischer und/oder elektrohydraulische Fragmentierung durchgeführt werden.

2.22 Abtrennung von Gipsputzmörtel mittels Elektrohydraulischer und/oder elektrodynamischer Fragmentierung (Hochspannungsimpulse)

Das Baustoffrecycling ist ein Kernelement des European Green Deal. Über das Konzept des Circular Economy Action Plans werden derzeit Anforderungen an das Baustoffrecycling entwickelt. Für Kalksandstein sind Rücknahmequoten zu erwarten. Sofern Bauwerke nicht selektiv zurückgebaut werden, enthält das Abbruchmaterial in der Regel anhaftende Reste verschiedenster anderer Baustoffe. Kalksandstein-Abbruchmaterial mit anhaftendem Gipsputz kann aufgrund der Quellwirkung von Sulfatverbindungen bislang nicht als RC-Gesteinskörnung für die erneute Kalksandsteinproduktion verwendet werden. Hinzu kommt, dass sulfathaltige Recyclingmaterialien mittlerweile sehr strengen Umweltauflagen unterliegen. In der Folge wehren Bauschuttdeponien die Annahme von Gipsprodukten durch überhöhte Preise ab. Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Abtrennung von Gipsputz von KS-Mauerwerk erforscht (händische Abtrennung, Attritionsrad, elektrodynamische Fragmentierung, elektrohydraulische Fragmentierung).

Die letztgenannten beiden Trennverfahren basiert auf elektrischen Schockwellen, die durch gepulste Funkenentladungen entstehen und z.B. über ein flüssiges Trägermedium auf das Material übertragen werden. Durch diese kurzen, aber heftigen mechanischen Stöße werden gezielt Schwachstellen im Material angegriffen, so dass eine Trennung von Kalksandstein und Gipsputz technisch und auch wirtschaftlich möglich ist.

2.23 Decarbonisierung von Kalksandstein durch Zugabe von Pflanzenkohle aus der Pyrolyse

Der Einsatz von elementarem Kohlenstoff zur Kalk-Sand-Rohmischung ist aus der Vergangenheit bei der Pigmentierung von farbigen Kalksandsteinen seit langem bekannt. Die Nutzung von Pflanzenkohle oder anderweitigen Rohstoffen, wie z.B. Schäben oder Schalen aus Pflanzen, wie z.B. Sisal, Haft, Flachs, Jute etc. zur Herstellung von Baustoffen und die damit verbundene CO₂ Einlagerung kann einen weiteren Weg zur Decarbonisierung darstellen. Pflanzenkohle besteht zu einem überwiegenden Teil aus reinem Kohlenstoff. Kohlenstoffquellen sind beispielsweise: Pflanzenmaterial aus der Landschaftspflege, Herbstlaub, Holz, Zellulose etc. Je nach Verfahren liegt ein Kohlenstoffgehalt von bis zu 100 % vor. Durch den Einsatz von Pflanzenkohle aus Pyrolyse oder anderen Verfahren bei der Kalksandsteinproduktion wird die Bindung des Kohlenstoffs mit Sauerstoff verhindert, wodurch die Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre vermieden wird, so dass der Carbon Footprint der auf diese Weise erzeugten Kalksandsteine deutlich abgesenkt werden kann. Kalksandsteine fungieren dabei als dauerhafte CO₂-Senke.

Im Rahmen eines mit Beginn am 17.07.2019 im Technikum der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. durchgeführten Forschungsprojektes wurde untersucht, inwieweit es möglich ist, Pflanzenkohle aus der Pyrolyse bei der Herstellung von Kalksandsteinen einzusetzen. Dazu wurden mittels Kalksandsteintechnologie Mauersteine erzeugt und anschließend baustofftechnisch untersucht. Dabei wurden der Kalk-Sand-Rohmischung unterschiedliche Mengen an Kohlenstoff in Höhe von 5 / 7 / 9 M.-% zugegeben. Die Mischungen wurden in einer Hydraulikpresse verdichtet und anschließend einer hydrothermalen Härtung unter Variation der Härteparameter unterzogen.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich stabile Rohlinge (siehe Abb. 42) und daraus auch feste, solide Mauersteine (siehe Abb. 43) erzeugen lassen. Die Rohlingsstandfestigkeiten liegen zwischen 0,05 und 0,15 N/mm². Die Steindruckfestigkeiten liegen zwischen 10 und 20 N/mm² und die Rohdichte zwischen 1,7 und 2,2 kg/dm³. Die Prüfkörper überstanden 50 Frost-Tau-Wechsel schadenfrei. Bedingt durch den Kohlenstoff weisen die Steine eine Graufärbung auf.

Hierzu wurden bei den Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. bereits erfolgreiche Versuche im Technikum durchgeführt. Für eine Anwendung dieses Verfahrens in der betrieblichen Produktion sind noch Fragen der Wirtschaftlichkeit (Preis, Verfügbarkeit) und der Umweltverträglichkeit zu beantworten.

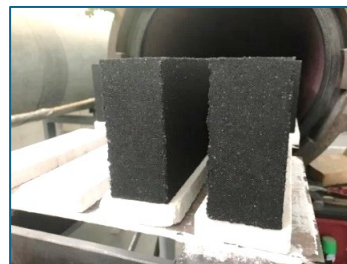


Abb. 42: Mauersteinrohlinge aus Kalk, Sand, Wasser und pyrolisierter Pflanzenkohle (Bildquelle: FVKS)

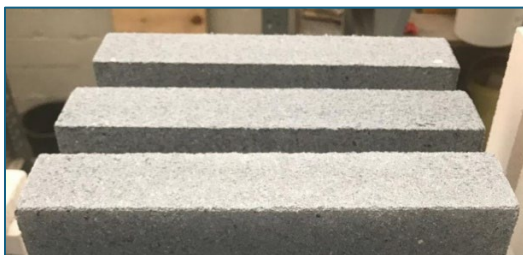


Abb. 43: Mauersteine aus Kalk, Sand, Wasser und pyrolisierter Pflanzenkohle (Bildquelle: FVKS)

2.24 KI-gestützte Detektion & hochauflösende Visualisierung von Rissbildungen an Rohlingen und gehärteten Mauersteinen

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde die automatisierte Detektion von Produktionsdefekten in der Kalksandstein- und Porenbeton-Herstellung untersucht, mit dem Ziel, Ausschussraten zu senken, Ressourcen zu schonen und die Energieeffizienz zu steigern. In den Werken stellen bislang Defekte und andere Fehler, die erst nach der energieintensiven Autoklavierung sichtbar werden, eine erhebliche Herausforderung dar. Die derzeit eingesetzten Sichtkontrollen sind in der Regel stichprobenbasiert und erkennen insbesondere subkutane Defekte nur differenziell.

Die Untersuchung zielte daher auf die Erprobung moderner bildgebender Verfahren (u.a. RGB- und Thermokameras) sowie KI-gestützter Analysemodelle zur frühzeitigen Identifikation von Fehlstellen vor der Autoklavierung. Mithilfe verschiedener Kamerasysteme (eine oder mehrere gekoppelte Kameras an verschiedenen Positionen in der Produktion) wurden Bilddaten von kalksandsteinbasierten Probekörpern aufgenommen und manuell sowie mittels Software, insbesondere KI-Algorithmen annotiert. Der Datensatz diente anschließend insbesondere als Grundlage für das Training verschiedener KI-Modelle (z. B. Convolutional Neural Networks und Vision Transformer und andere), die durch Methoden der Sensorfusion zu höherer Genauigkeit und Granularität befähigt wurden.

Im Forschungsverlauf wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Systematische Erfassung typischer Defekte und deren minimaler Detektionsgröße.
- Erzeugung provokativ defektreicher Proben im Technikum der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.
- Bildaufnahmen vor und nach Autoklavierung mit verschiedenen Sensorsystemen.
- Entwicklung und Vergleich verschiedener Modellarchitekturen und Sensorfusionsstrategien (Early, Mid, Late Fusion).
- Leistungsevaluation hinsichtlich Genauigkeit, Inferenzzeit und wirtschaftlichem Potenzial.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine numerische als auch eine KI-basierte Online-Erkennung oberflächlicher und suboberflächlicher Defekte technisch realisierbar ist. Besonders die Kombination mehrerer Sensordaten verbesserte die Detektionsgenauigkeit signifikant. Das Potenzial zur Reduktion von Materialausschuss, Energieeinsatz und CO₂-Emissionen konnte im Rahmen der Studie quantifiziert werden.

Der innovative Charakter dieses Projekts liegt unter anderem in der erstmaligen Erprobung einer echtzeitfähigen, KI-gestützten Defekterkennung im laufenden Produktionsprozess – ein wesentlicher Schritt in Richtung Digitalisierung und Nachhaltigkeit in der Kalksandsteinindustrie.

3. LITERATURVERZEICHNIS

3.1 Allgemeine Literatur

- [EPD21] INSTITUT FÜR BAUEN UND UMWELT E.V. (IBU): **Umweltproduktdeklaration** für den Baustoff Kalksandstein nach ISO 14025 und EN 15804+A2, Deklarationsnummer: EPD-BKS-20210205-IBE1-DE, Berlin 2021
- [FVKS1] EDEN, W.: **Handbuch zur Herstellung von Kalksandsteinen**, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. 3. Auflage, Hannover 2003
- [FVKS2] EDEN, W.: **Sand-Workshop**, Tagungsband Meisterseminare, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover 2008
- [FVKS3] EDEN, W.: **Kalk-Workshop**, Tagungsband Meisterseminare, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 2010
- [FVKS4] EDEN, W.: **Produktionstechnik-Workshop**, Tagungsband Meisterseminare, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover 2012
- [FVKS5] EDEN, W.: **Messtechnik-Workshop**, Tagungsband Meisterseminare, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover 2014
- [FVKS6] EDEN, W.: **Energie-Workshop**, Tagungsband Meisterseminare, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover 2017
- [FVKS7] EDEN, W.: **Wasser-Workshop**, Tagungsband Meisterseminare, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover 2019
- [FVKS8] EDEN, W.; LIEBACK, P.: **Einsteiger-Workshop**, Tagungsband Meisterseminare, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. Hannover 2021
- [FVKS9] EDEN, W.; ISTANBULY, Z.; LIEBACK, P.: **Klimaneutralität-Workshop**, Tagungsband Meisterseminare, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover 2023
- [GOR69] GORMANN, W.: Der Einfluss **karbonatischer Härtung** auf die Eigenschaften hydrothermal erhärteter Kalk-Kieselsäure-Massen in System $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ (vgl. Forschungsbericht Nr. 12)
- [GUN73] GUNDLACH, H.: **Dampfgehärtete Baustoffe**, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1973
- [ROAD21] FUTURECAMP CLIMATE GMBH, GERES, R.; LAUSEN, J; WEIGERT, S.: **Roadmap** für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland, Eine Studie für den Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., München, 2021
- [IST22] ISTANBULY, Z.: **Ökobilanzielle Lebenszyklusbetrachtung** von Gebäuden – eine numerische Methode zur Optimierung der Gebäudeplanung, Masterarbeit Leibniz Universität Hannover, 2022
- [BPK24] ISTANBULY, Z.; RCIHTER, T.; SCHÄFERS, M.; EDEN, W.; FOUAD, N.: **Ökobilanzielle Lebenszyklusbetrachtung** von Gebäuden – eine numerische Methode zur Optimierung der Gebäudeplanung, in Bauphysik Kalender 2024 – Klimagerechtes Bauen, Brandschutz, Verlag Ernst & Sohn, 2024

3.2 Liste der Forschungsberichte der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.

Untersuchung über den Einfluss von zwei verschiedenen Nachmischern auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen <i>Dr. R. Hochstetter</i>	1	Sept. 1967
Der Einfluss der Oberpressung auf die wichtigsten Eigenschaften industriell gefertigter Kalksandsteine <i>Dr. H.-U. Oppermann</i>	2	Sept. 1967
Untersuchung über die Abschirmwirkung von Kalksandprodukten, Ziegeln und Betonsteinen gegen Gammastrahlung und Neutronenstrahlung (I) <i>Dr. R. Hochstetter</i>	3	Sept. 1967
Untersuchungen über Ausblühungen und Verfärbungen von Kalksandsteinen <i>Dr. R. Hochstetter</i>	4	Sept. 1967
Eine Untersuchung über den Einfluss des Körnungsaufbaus von Sanden auf die Schwindung von Kalksandsteinen <i>J. M. Coldrey</i>	5	Nov. 1967
Eine Untersuchung über die Entstehung von Kalkschleiern auf Kalksandsteinen während der Herstellung <i>J. M. Coldrey</i>	6	Nov. 1967
Der Einfluss von Huminstoffen auf die Druckfestigkeit von Kalksandsteinen <i>W. Ziechmann, W. Rochus, Dr. H.-U. Oppermann</i>	7	Jan. 1968
Das Bindemittelskelett hydrothermal gebundener Kalk-Kieselsäure-Massen (I) <i>Dr. R. Hochstetter</i>	8	März 1968
Anleitung zur Messung der Rohlingsstandfestigkeit im Betrieb <i>Dr. H.-U. Oppermann</i>	9	Mai 1968
Untersuchung über die Abschirmwirkung von Kalksand-spezialprodukten gegen Gammastrahlung und Neutronenstrahlung (II) <i>Dr. R. Hochstetter</i>	10	Nov. 1968
Ein Beitrag zur Bestimmung und Beeinflussung der Haftfestigkeit von Kalksandsteinen und Mörtel <i>P. Thormann</i>	11	Nov. 1968
Der Einfluss karbonatischer Bindung auf die Eigenschaften hydrothermal erhärteter Kalk-Kieselsäure-Massen im System $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ <i>Dr. W. Gormann</i>	12	März 1969
Der Wasserdampfdiffusionswiderstand von Kalksandsteinen <i>Dr. R. Hochstetter</i>	13	März 1969
Kleiner Atlas der Sandeigenschaften der westdeutschen Kalksandsteinindustrie <i>Dr. H.-U. Oppermann</i>	14	Juni 1969

Die Beziehung zwischen einigen Gefügeeigenschaften von Kalksandsteinen und der Schwindung Dr. R. Hochstetter	15	Aug. 1969
Die laufende Qualitätskontrolle von Kalken mit Hilfe der Nasslöschkurve Dr. H.-U. Oppermann	16	Sept. 1969
Die Verwendung von Industrieabfallprodukten. Ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (I) Dr. R. Hochstetter	17	April 1970
Die Verwendung von Industrieabfallprodukten. Ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (II) Über den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kalksandsteinen Untersuchungen über physikalische Eigenschaften von Kalksandsteinen. Dr. R. Hochstetter	18	Mai 1970
Untersuchungen über die Frostwiderstandsfähigkeit von Kalksandsteinen H. Lehmann, E. Rauschenfels	19	Juni 1970
Fachwörter-ABC und Veröffentlichungen 1956 - 1970 der Kalksandsteinforschung Dr. H.-U. Oppermann	20	Aug. 1970
Die Verwendung von Industrieabfallprodukten. Ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (III) Dr. R. Hochstetter	21	Aug. 1970
Klebemörtel für Kalksandsteine Dr. H.-U. Oppermann	22	Sept. 1970
Außenanstriche auf Kalksandstein (I) Dr. H.-U. Oppermann	23	März 1971
Über die Bildung und Eigenschaften von Huminstoffen. Die analytische Charakterisierung von Sandvorkommen unter besonderer Berücksichtigung der Bestimmung postmortaler organischer Stoffe (Huminstoffe) W. Ziechmann, W. Rochus	24	März 1971
Die Wassergehaltsmessung von Sanden und Kalksandmischungen W. Lück	25	April 1972
Außenanstriche auf Kalksandstein (II) Dr. H.-U. Oppermann	26	April 1972
Löslichkeit von Quarz (I) Dr. R. Hochstetter	27	Mai 1972
Gezielte Produktion von hochwertigen Kalksandsteinen aus fraktionierten Rohstoffen Dr. H.-U. Oppermann	28	April 1973
Sandbevorratung und Sandhomogenisierung in der Kalksandsteinindustrie Dr. H.-U. Oppermann, H.-J. Weddig	29	Juni 1973

Das Austrocknungsverhalten von Gasbeton bei unterschiedlicher Lagerungsart Dr. H.-U. Oppermann, Dr. R. Hochstetter	30	Jan. 1974
Die Löslichkeit von Quarz (II) Dr. R. Hochstetter	31	Febr. 1974
Außenanstriche auf Kalksandstein (III) Dr. H.-U. Oppermann	32	März 1974
Die Löslichkeit von Quarz III Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. R. Hochstetter, Dr. W. Thomas	33	Nov. 1974
Beitrag zur Eigenschaftsuntersuchung von Kalksand- systemen, hergestellt bei hohen Temperaturen u. Drücken Dr. A. Hakim	34	Jan. 1975
Die heterogenen Eigenschaften großformatiger Kalksandblöcke Dr. F. Kendel	35	April 1975
Einfluss der Kornzusammensetzung des Sandes auf das Verformungsverhalten von Kalksandsteinen Dr. W. Thomas	36	Mai 1975
Der Einfluss von anorganischen Schadstoffen auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. F. Kendel	37	Dez. 1975
Gefügeveränderungen von Kalksandsteinen durch Frost-Tau-Beanspruchungen Dr. A. Hakim	38	Dez. 1975
Gemeinschaftsforschung der Kalksandsteinindustrie 1966 - 1975 Dr.-Ing. W. Gormann	39	Febr. 1976
Zugfestigkeit von Kalksandsteinen Teil I: Betriebsgefertigte Steine Dr. W. Thomas	40	Juli 1976
Zugfestigkeit von Kalksandsteinen Teil II: Einfluss ausgewählter Herstellungsparameter, Untersuchungen an Prismen Dr. F. Kendel	41	Nov. 1976
Hochfestes KS-Mauerwerk Trag- und Verformungsverhalten Dr. W. Thomas	42	Nov. 1976
Der Einfluss verschiedener Kalke auf die Eigenschaften von Kalksandprodukten Dr. F. Kendel, Dr.-Ing. B. Oppermann, Dr.-Ing. U. Wittneben	43	Dez. 1976
Der Einfluss der Rauigkeit von Kalksandsteinen auf den Haftverbund Stein/Mörtel Dr. J. E. Quincke	44	April 1977

Modell für die Beziehungen zwischen Bindemittelaufbau und technischen Eigenschaften von KS-Produkten Dr.-Ing. W. Gormann	45	Dez. 1977
Dampfhärtung von Kalksandstein bei verlängerter Härtezeit und niedrigeren Temperaturen - Einfluss auf die Steineigenschaften Dr. F. Kendel	46	Febr. 1978
Der Einfluss des Brenngrades des Kalkes auf das Schwindverhalten von Kalksandsteinen Dr. F. Kendel	47	Juni 1978
Gutachtliche Stellungnahme zur Frage des Deponieverhaltens von Fabrikationsabfällen der Kalksandsteinindustrie	48	Okt. 1978
Zur Einführung von Formfaktoren bei der Druckfestigkeitsprüfung von Kalksandsteinen Prof. Dr. K. Kirtschig, Dipl.-Ing. D. Kasten, Dr. Ing. R. Cordes, Dr. J. E. Quincke	49	Juni 1979
Optimierung von Zugfestigkeit, Schwindung und Frostbeständigkeit von Kalksandsteinen bei Härtetemperaturen von 175 °C bis 250 °C Dr. F. Kendel	50	Jan. 1980
Das Dampfdiffusionsverhalten von Kalksandstein-Außenwandkonstruktionen Dipl.-Ing. M. Prepens, Dr.-Ing. R. Cordes, unter beratender Mitwirkung von Prof. W.-H. Pohl	51	Mai 1980
Gutachtliche Stellungnahme zur Abwassersituation in der Kalksandsteinindustrie	52	Sept. 1980
Einfluss von Nebenmineralen des Sandes auf die mechanischen Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. F. Kendel	53	Sept. 1981
Stromverbrauch in der Kalksandsteinindustrie K. F. Ebersbach, A. Fischer, W. Steinberger	54	März 1982
Betriebstechnische Hinweise zum Einfluss von Änderungen der Rohstoffe und der Betriebsbedingungen auf die Steineigenschaften. Untersuchung zur Bestimmung der Wasseraufnahme von Mauersteinen durch Saugen am Beispiel von Kalksand-Lochsteinen und Loch-Ziegeln. Herstellung von Kalksandsteinen der Rohdichteklasse 2,0 und größer. Untersuchung über die Dampfkondensation in Rohlingen während der Härtekesselfahrt. Dr. J. E. Quincke	55	März 1982
Wirtschaftlichkeit des Dampfenergiebedarfs bei der Herstellung von Kalksandsteinen K. F. Ebersbach	56	April 1982
Eignung von verzögerten Werk-Frischmörteln für Mauerwerk Dr.-Ing. R. Cordes, Dipl.-Ing. W. Krohn, Dr. J. E. Quincke	57	April 1983

Gutachtliche Stellungnahme zur Frage der Wassersituation in der Kalksandsteinindustrie aus technischer und rechtlicher Sicht	58	Mai 1983
Substitution üblicher Quarzsande bei der Kalksandsteinherstellung Dr.-Ing. U. Wittneben	59	Juli 1984
Thermische Spannungen in Wärmedämmverbundsystemen Dipl.-Ing. D. Nannen, Prof. Dr.-Ing. habil. K. Gertis	60	Aug. 1984
Zur Belastung, Beanspruchung und Arbeitsgestaltung beim Vermauern großformatiger Kalksandsteine Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau	61	Aug. 1984
Verblendschalen aus Kalksandsteinen - Beanspruchung, rissfreie Wandlänge, Hinweise zur Ausführung Dr.-Ing. D. Gasten, Dr.-Ing. P. Schubert	62	März 1985
Dampfkondensation und Rückverdampfung während des Kalksandstein-Härtungsprozesses im Autoklaven Dr.-Ing. U. Wittneben	63	März 1985
Anfall und Verbleib von technischem Abwasser der Kalksandsteinfertigung - Gutachtliche Stellungnahme zur Direkt- und Indirekteinleitung	64	Mai 1985
Verbesserung der Stein- und Rohlingseigenschaften durch geringe Mineralzusätze Dr.-Ing. U. Wittneben	65	Juni 1985
Produktionstechnische Maßnahmen zur Optimierung der Mörtelhaftung auf Kalksandsteinen Dr.-Ing. U. Wittneben	66	März 1986
Zur Verbesserung des Schwindverhaltens von Kalksandsteinen durch Ausfallkörnungen Dr.-Ing. U. Wittneben	67	Sept. 1986
Möglichkeiten zur Reduzierung des Kalk- und Energiebedarfes bei der Kalksandsteinherstellung durch Zusatz von Flugasche Dr.-Ing. U. Wittneben	68	Febr. 1988
Einfluss der Vermauerungsart und der Knotenpunkt-ausbildung auf die Längsschalldämmung von Kalksandsteinwänden Dr.-Ing. E. Veres	69	Juni 1988
Untersuchungen zu Raumbeständigkeitsprüfungen als Beurteilungskriterium von Kalken für die Kalksandsteinherstellung Dr.-Ing. U. Wittneben	70	Okt. 1988
Verwertung technischer Nebenprodukte bei der Herstellung von Kalksandsteinen - Sande aus Kraftwerken und Gießereien - Dr.-Ing. U. Wittneben	71	April 1989

Feuchtigkeitsabhängige Sperrwirkung von Kunstharzputzen H. Böhm, H. Künzel	72	Sept. 1989
Frost- und Witterungsbeständigkeit von Anstrichen und Imprägnierungen auf Kalksandstein-Sichtmauerwerk Prof. Dr.-Ing. M. Prepens	73	Jan. 1990
Kostenoptimierung der Kalksandstein- Technologie unter Berücksichtigung notwendiger Produkteigenschaften - Flugaschen Prof. Dr.-Ing. U. Ludwig, Dipl.-Ing. H. Nelskamp, Dr.-Ing. P. Schubert	74	März 1991
Verbesserung der Frostwiderstandsfähigkeit, der Tausalzbeständigkeit und der Duktilität von Kalksandsteinen für hochbeanspruchte Bauteile Prof. Dr.-Ing. M. Prepens	75	Dez. 1991
Nutzung der KS-Technologie für die Verarbeitung von Abfallstoffen Dipl.-Ing. H. Nelskamp	76	März 1992
Frostbeurteilung von Kalksandsteinen Grundlagen des DIN 106-Prüfverfahrens Dipl.-Ing. W. Eden, Drs. P.D. Rademaker	77	Mai 1993
Ermittlung der Druckfestigkeit von Kalksandstein-Mauerwerk unter Berücksichtigung der Beeinflussung der Mörtel­eigenschaften in der Fuge durch den Wasserhaushalt des Verbundsystems Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. G. Meyer	78	Sept. 1993
Maßnahmen und Zusatzmittel zur gezielten Ver- besserung verschiedener Eigenschaften von Kalksandsteinen für hochbeanspruchte Bauteile Dipl.-Ing. W. Eden	79	Juni 1994
Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozess, KS-Recycling Teil I Dipl.-Ing. W. Eden	80	Aug. 1994
Biegezug- und Zugtragfähigkeit von unbewehrtem und bewehrtem Kalksandsteinmauerwerk Dr.-Ing. P. Schubert, Dipl.-Ing. U. Meyer	81	Aug. 1995
Ökobilanz für den Baustoff Kalksandstein und Kalksand- stein-Wandkonstruktionen Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ök. T. Kaczmarek, Dipl.-Ing. G. Meyer, Dr. rer. pol. H. Zapf, Dipl.-Wirtsch.-Ing. G. Waltermann, AGIMUS Umweltberatungsgesellschaft, Braunschweig	82	Nov. 1995
Untersuchung der Materialeigenschaften von Kalksand- steinen in Verbindung mit Mörtel nach DIN 1053 unter Hochtemperaturbeanspruchung als Grundlage für brand- schutztechnische Nachweise Dipl.-Ing. Ch. Hahn	83	Dez. 1995

Mineralische Zusammensetzung von Sanden für die Kalksandstein-Herstellung Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. E. Eberhard	84	Jan. 1996
Einsatz von Fasern bei der Herstellung von Kalksandsteinen Dipl.-Ing. B. Mankowski, Dr. H. Mörtel	85	März 1996
Herstellung von Kalksandsteinen aus Bruchmaterial von Kalksandsteinmauerwerk mit anhaftenden Resten von Dämmstoffen sowie weiterer Baureststoffe, KS-Recycling Teil II Dipl.-Ing. W. Eden	86	Juni 1997
Einfluss der Fugendicke und der Verbandsregeln auf die Druckfestigkeit von Kalksandsteinmauerwerk, Mittelbettmörtel Dipl.-Ing. S. Brinkmann, Dipl.-Ing. W. Eden,	87	Juli 1997
Reduzierung der Produktionskosten und des Primärenergieverbrauchs durch Optimierung der Rezeptur der KS-Rohmischung und der Rohlingsstandfestigkeit Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. B. Mankowski, Dipl.-Wirtsch.-Ing. G. Waltermann	88	Nov. 1998
Einfluss von schweren Zuschlägen auf die Eigenschaftswerte von Kalksandsteinen, sehr hohe Rohdichten Dipl.-Ing. W. Eden, Chem.-Ing. E. Hörster	89	Juli 1999
Einfluss der Unterbrechung des hydrothermalen Härteprozesses auf die Qualitätseigenschaften, optimale Härtung von Kalksandsteinen Dipl.-Ing. W. Eden	90	Juli 2000
Hinweise zur Kosten- und Energieeinsparung bei der Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. W. Eden, Mitglieder des Technischen Ausschusses	91	Mai 2001
Herstellparameter von Kalksand-Spezialbaustoffen für die Abschwächung von Wärmebrücken im Mauerwerksbau, KS-ISO-Kimmstein Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	92	Feb. 2002
Ermittlung der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge von Kalksand-Plansteinmauerwerk - insbesondere Kellermauerwerk Dipl.-Ing. S. Brinkmann, Dipl.-Ing. W. Eden Dipl.-Ing. T. Hanold, Dipl.-Ing. G. Meyer	93	Mai 2002
Erhöhung der Schubtragfähigkeit von KS-Wänden unter Erdbebenlasten durch schlaff bewehrte Betonstützen in Formsteinen bzw. durch Vorspannung der Wand Prof. Dr. A. Ötes, Dipl.-Ing. S. Löring Dipl.-Ing. B. Elsche	94	Mai 2002
Ermittlung und Verifizierung schalltechnischer Grundlagendaten für Wandkonstruktionen aus Kalksandstein-Mauerwerk auf der Grundlage neuer europäischer Normen des baulichen Schallschutzes Prof. Dr.-Ing. H. M. Fischer, Dipl.-Ing. S. Blessing M.Sc. Dipl.-Ing. M. Schneider, Dipl.-Ing. M. Späh	95	Mai 2002

Ermittlung der Einflussparameter des Verformungsverhaltens von Kalksandsteinen, Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. G. Meyer, Dr. rer nat H. Mörtel, Dr.-Ing P. Schubert	96	Mai 2002
Eignung von Kalksandstein-Bruchmaterial zum Recycling in der Baustoffindustrie, Recycling Teil III Dipl.-Ing. W. Eden; Dipl.-Ing. H. Kurkowski Dipl.-Ing. L. Friedl; Prof. Dr.-Ing. P. Schießl Prof. Dr.-Ing. K. Krass, Dr.-Ing. K. Mesters	97	August 2003
Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Anmachwässern auf die Herstellung und Eigenschaften von Kalksandsteinen, Kondensatverwertung bei der KS-Produktion Dipl.-Ing. W. Eden; Dipl.-Ing. C. Gundlach, Dipl.-Geol. S. Hogewoning, Dr. rer nat O. Schmidt, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	98	Dez. 2003
Optimierung der Verdichtung des Kalksandstein-Gefüges unter Berücksichtigung der Rohstoffeigenschaften und des Herstellprozesses des KS-Scherbens Dipl.-Ing. W. Eden, Dr. rer nat Bernhard Middendorf Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil M. Schmidt, Dipl.-Ing. Viola Tesch	99	Nov. 2004
Reduzierung der CO ₂ -Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch Verwendung von Tonmineralen als Optimierungs-Zuschlag Dipl.-Ing. W. Eden, ir. M. H. M. Coppens, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	100	März 2005
Wirklichkeitsnahe Bestimmung der Knicksicherheit von Wänden aus Kalksand-Plansteinmauerwerk in Dünnbettmörtel Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner, Dr.-Ing. Christian Glock	101	März 2005
Eignung von Kalksandstein-Material für witterungsbeansprucht Gebäude-Außenfassaden – „Kalksand-Werksteine“ Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	102	Januar 2006
Entwicklung von zerstörungsfreien Ersatzprüfverfahren zur Bestimmung der Druckfestigkeit großformatiger Kalksandstein-Produkte Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. E. Dückmann Dipl.-Ing. H. Naumann, Prof. Dr.-Ing W.-R. Metje	103	Juni 2006
Maßnahmen zur Energieeinsparung bei der Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. A.van Briel, Dipl.-Ing. W. Eden Dr. rer nat H. Müller, Dipl.-Ing. S. Wolfram	104	Juni 2007
Entwicklung eines Schnell-Prüfverfahrens auf der Basis der Röntgen-Diffraktometrie zur Eignungsbeurteilung von Zuschlägen für die Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. rer nat. J.-Ch. Buhl	105	Juni 2007
Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie Dipl.-Ing. W. Eden, Univ.-Prof. Dr. rer nat. B. Middendorf	106	März 2008
Optimierung des Kalksandstein-Gefüges - Teil 2 - Entwicklung von Grundlagen für ein Expertensystem zur Rezepturauslegung von Kalk-Sand-Rohmassen - Maximale Packungsdichte Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. C. Geisenhanslüke, Dipl.-Ing. A. Glaubitt, Univ.-Prof. Dr. rer nat B. Middendorf, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil M. Schmidt	107	März 2008

Entwicklung eines Schnellprüfverfahrens zur Bestimmung der Trockenrohdichte von Kalksandstein-Produkten unter Anwendung von Mikrowellen-Strahlung Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. Eduard Dückmann, Prof. Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Metje, Dipl.-Ing. Holger Naumann	108	August 2008
Nutzbarmachung von huminstoffbelasteten Sanden für die Kalksandsteinindustrie Dipl.-Ing. W. Eden, Dr.-Ing. A. Glaubitt, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. B. Middendorf	109	Okt. 2009
Einsatz der Differenzial-Thermoanalyse als Prüfverfahren für die Qualitätsbewertung bei der Kalksandstein-Produktion Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dr.-Ing. Armin Just, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf,	110	Januar 2010
Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dipl.-Ing. Nina Flottmann, Dr.-Ing. Guntram Kohler, Dipl.-Ing. Jan Kollar, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski, Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg, Dr. rer. nat. Frank Schlütter	111	April 2010
Reduzierung des Energieverbrauchs und der produktionstechnisch bedingten CO ₂ -Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch energietechnische Optimierungsmaßnahmen Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dr.-Ing. Wolf Steinmann	112	Dezember 2010
Optimierung zerstörungsfreier Ultraschall-Messtechnik zum Praxiseinsatz als Ersatzprüfverfahren zur Qualitätsüberwachung der Kalksandstein-Produktion Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf, Dr.-Ing. André Glaubitt	113	August 2011
Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO ₂ -Emissionen durch anorganische Zusätze bei der Kalksandsteinherstellung – Reaktions- und Kristallisationsbeschleuniger Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dipl.-Ing. Stefan Otten, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf,	114	September 2012
Verwertungsoptionen für rezyklierte Gesteinskörnungen aus Mauerwerk in der Steine- und Erden-Industrie Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf	115	November 2013
Vegetationssubstrate aus rezyklierten Gesteinskörnungen aus Mauerwerk Prof. Dipl.-Ing. Gert Bischoff, Dipl.-Ing. Robert Gräfenstein Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dr. rer. hort. Clemens Heidger Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Harald Kurkowski Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf	116	Februar 2014
Entwicklung eines praxistauglichen Schnellprüfverfahrens zur Bewertung von Huminstoffen in Sanden für die Kalksandsteinproduktion - Teil 2 Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Univ.-Prof. Dr. rer. agr. habil Peter Leinweber, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf, Dipl.-Ing. Stefan Otten, Dr. rer. agr. Dana Zimmer	117	April 2014

Bioaktivierung von Porenbeton- und Kalksandstein-Recyclinggranulaten mit Methan oxidierenden Bakterien zur Reduktion von Methanabgasungen aus Hausmülldeponien - ein Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dr. rer. nat. Jan Küver, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Harald Kurkowski, Dipl.-Chem. Jens-Jürgen Lau, Dipl.-Biol. Markko Remesch	118	Januar 2015
Entwicklung einer Methodik zur ressourcenorientierten Steuerung der Werks-Prozesse in der Kalksandstein-Industrie – Ablaufsimulation Kalksandsteinwerk Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr. rer. pol. Peter Schuderer M. Sc. Toni Donhauser, Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Dr.-Ing. Tobias Jung	119	Mai 2015
Optimierung des rheologischen Verhaltens von Kalk-Sand-Rohmischungen zur Steigerung der Scherbenrohdichte und der Festigkeit von Kalksandsteinen Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dipl. Nano sc. Christoph Glotzbach, Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf, Dipl.-Ing. Stefan Otten	120	Juni 2015
Einsatz von natürlichen Schwermineralsanden zur Steigerung der Rohdichte von Kalksandsteinen Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dipl.-Ing. Thomas Bohne Dr.-Ing. Claudia Eichhorn, Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter	121	Februar 2016
Ressourceneffizienz in der Kalksandsteinindustrie Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr.-Ing. Peter Lieblang Dr.-Ing. Daniela Konrad, Dr.-Ing. Martin Schäfers Prof. Dr.-Ing. Frank Ulrich Vogdt	122	April 2016
Optimierung von Kalk-Sand-Mischungen und Entwicklung eines Praxis-Prüfverfahrens zur Bewertung der Mischungsqualität Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf Dipl.-Ing. Stefan Otten	123	Juni 2016
Einsatz von CSH-Phasen als Reaktionsbeschleuniger bei der Herstellung von Kalksandsteinen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und klimaschädlicher Emissionen - Teil 2 Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf Dipl.-Ing. Stefan Otten	124	Mai 2017
Steigerung der Beschusssicherheit von Kalksandstein-Mauerwerk durch Optimierung der Gefügebrauchung Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel M. Sc. Simon Rimplmayr, Wolfgang Burtscher	125	Juni 2017
Optimierung des Autoklavierungsprozesses zur Reduzierung der Produktionskosten und Qualitätssteigerung von Kalksandsteinen mittels statistischer Versuchsplanung - SPOAK Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf M. Sc. Tim Schade, Prof. Dr. rer. nat. habil Sonja Kuhnt M. Sc. Eva-Christina Becker-Emden	126	September 2018
Eignungsnachweis von Tragschichten ohne Bindemittel mit erhöhten Anteilen an rezykliertem KS-Mauerwerk – Erprobungsstrecke in praxi Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg Dipl.-Ing. Nina Nytus, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski	127	März 2019

Steigerung der Produktqualität und Reduktion der Produktionskosten bei der Kalksandsteinfertigung durch Einsatz unestetiger Gesteinskörnungen - sog. „Ausfallkörnungen“ Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter Dr.-Ing. Claudia Eichhorn	128	Mai 2019
Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO ₂ -Emissionen sowie Steigerung der Ressourceneffizienz durch eine zustandsorientierte Steuerung der Produktionsabläufe in Kalksandsteinwerken – Betriebsbegleitende Simulation unter Einbindung von Echtzeitdaten Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr. rer. pol. Peter Schuderer Dr.-Ing. Toni Donhauser, Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke	129	März 2020
Einsatz natürlicher mineralischer Füller für die Optimierung der Eigenschaften von Kalksandsteinen – Reduzierung der Produktionskosten des Energieverbrauchs und der CO ₂ -Emissionen Dr.-Ing. Wolfgang Eden, M. Sc Richard Kolbe Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf, Dr.-Ing. Tim Schade	130	März 2021
Einsatz von Füllern aus Kalksandstein-Recycling-Material als Upcycling für Kalksandstein-, Beton-, und Asphaltprodukte Dr.-Ing. Wolfgang Eden, M. Sc. Richard Kolbe, Dipl.-Ing. Harald Kurkowski, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf Dr.-Ing. Konrad Mollenhauer, Dr.-Ing. Tim Schade, M. Sc. Jens Wetekam	131	März 2021
Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Kalksandstein für vegetations-Technische Bodenverbesserungsmaßnahmen im Erd- und Straßenbau Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski	132	Mai 2021
Verbesserte Schalldämmung von Kalksandstein-Mauerwerk durch Optimierung der produktionstechnischen Herstellparameter – Erhöhung des dynamischen E-Moduls des KS-Materials Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dr.-Ing. Martin Schäfers, Dipl.-Ing. M. Sc. Martin Schneider, Prof. Dr.-Ing. Berndt Zeitler	133	Juni 2021
Einsatz von metallurgischen Schlacken bei der Kalksandsteinproduktion zur Erhöhung des baulichen Schallschutzes Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dr.-Ing Andreas Ehrenberg	134	August 2021
Entwicklung von Seilrobotern für die Erstellung von Kalksandstein-Mauerwerk auf der Baustelle Dr.-Ing. Wolfgang Eden, M. Sc. Anita Khezri, Dr.-Ing Martin Schäfers, Prof. Dr.-Ing Alexander Malkwitz, M. Sc. Aileen Pfeil, Dipl.-Ing. Arnim Spengler, Prof. Dr.-Ing Tobias Bruckmann M. Sc. Roland Boumann, M. Sc. Robin Heidel, M. Sc. Patrik Lemmen Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm, Dr.-Ing. Justus Lipowsky	135	Dezember 2021
Kosteneinsparung und Steigerung der Ressourceneffizienz von - Kalksandsteinen durch Ansatz von Druckhaltestufen bei der Hydrothermalhärtung – sog. „Treppenkurven“ Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dr.-Ing. Claudia Eichhorn, Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter	136	Januar 2022
Eignung von Sägeschlämmen aus der Fertigung von Kalksandstein-Planelement-Bausätzen als Optimierungszusatz für die Kalksandsteinproduktion Dr.-Ing. Wolfgang Eden, M. Sc. Zakaria Istanbuly, M Sc. Marcel Laabs, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf,	137	März 2023

Einsatz von Calciniertem Ton zur Nutzung bislang ungeeigneter Sande für die Kalksandsteinproduktion – „Alkalifänger“ Wolfgang Burtscher, M.Sc. Johannes Berger, M.Sc. Carola Chucholowski, Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Christian Thienel	138	März 2023
Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Sicherstellung der Dampf-Gängigkeit von hochverdichteten Kalksandstein-Rohlingen für die Werkseigene Produktionskontrolle, Dr.-Ing. Wolfgang Eden, M.Sc. Zakaria Istanbuly, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski	139	August 2023
Reduzierung treibhausrelevanter Emissionen bei der Kalksandsteinproduktion 140 Durch Ersatz von CO ₂ -intensivem Branntkalk durch Zemente Dr.-Ing. Wolfgang Eden, M.Sc. Zakaria Istanbuly, M.Sc. Marcel Laabs, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf		Mai 2024
Produktion von CO ₂ -armen Mauersteinen durch bindemittelfreie Autoklavierung von RC-Brech-sanden Dipl.-Ing. Frank Hlawatsch, Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dr.-Ing. Harald Kurkowski, Zakaria Istanbuly, M.Sc.	141	Februar 2025
Ermittlung von Grundlagen zur Produktion von nachhaltigen Kalksandsteinen mit minimierter CO ₂ -Last Dr.-Ing. Wolfgang Eden, M.Sc. Marcel Laabs, Prod. Dr. Bernhard Middendorf, Zakaria Istanbuly, M.Sc.	142	Juni 2025
Reduzierung treibhausrelevanter Emissionen bei der Kalksandstein Produktion durch Ersatz von CO ₂ -intensivem Branntkalk durch Calcinierten Ton Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Dr.-Ing. Sebastian Scherb, Prof. Dr. Karl-Christian Thienel, Zakaria Istanbuly, M.Sc.	143	Juni 2025