

BMUB-Umweltinnovationsprogramm

Abschlussbericht

November 2023

zum Vorhaben

„Neubau einer intelligenten Kalksandsteinfabrik mit minimalem Energie- und Flächenverbrauch“

Zuwendungsempfänger/-in

Cirkel GmbH & Co. KG

Laufzeit des Vorhabens

16.03.2017 bis 31.03.2023

Autor/-en

Herr Julian Cirkel

Herr Dr. Holger Müller

Herr Peter Bähr

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und
Reaktorsicherheit**

Umweltbereich

Ressourceneffizienz, Klimaschutz

Inhalt

Abkürzungen/Begriffe:	2
1. Einleitung	3
1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner	3
1.2 Ausgangssituation	3
2. Vorhabenumsetzung	5
2.1 Ziel des Vorhabens	5
2.2 Technische Lösung - Auslegung Kalksandsteinwerk	7
2.3 Umsetzung des Vorhabens	9
2.3.1 Kontinuierliche Sieblinienmessung und Packungsdichterechner	9
2.3.2 Multifunktions-Pressanlagen mit Werkzeugwechselwagen	15
2.3.3 Wärmetunnel	20
2.3.4 Härteprozess inkl. neuartiger Rückverdampfer	22
2.3.5 Werksteuerung und Werksimulation	27
2.4 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	29
2.5 Konzeption und Durchführung des Messprogramms	29
3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung	31
3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung	31
3.2 Stoff- und Energiebilanz	31
3.3 Umweltbilanz	32
3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse	34
4. Übertragbarkeit	35
4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung	35
4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit	36
5. Zusammenfassung/ Summary	37
6. Literatur	38

Abkürzungen/Begriffe:

Kalk:	Branntkalk
KS:	Klein- und mittelformatige Kalksandsteine
KS-XL:	Großformatige Kalksandsteine
EPD:	Environmental Product Declarations; Umweltproduktdeklaration
M2M-Kommunikation:	Machine-to Machine; Kommunikation zwischen zwei Endgeräten

1. Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner

Antragsteller:

Cirkel GmbH & Co. KG
Flaesheimer Straße 605
45721 Haltern am See

Die Firma Cirkel GmbH & Co. KG verfügt aktuell über 6 Werke an den 5 Standorten: Haltern am See, Emsdetten, Bad Salzdetfurth, Wickede und Neuenkirchen-Vörden. Mit ca. 190 Mitarbeitern werden hochwertige Baustoffe (PORIT-Porenbeton, CIRCOSICHT®-Verblender, KS-PLUS- oder KS* Kalksandsteine) für den Baustoffmarkt produziert und Lösungen, die als Granulate (CIRCOLIT®, CIRCOSIL®) in den verschiedensten Industriezweigen eingesetzt werden.

Dazu kommen einige Beteiligungen:

- Dörentrup Quarz GmbH & Co. KG
- SAERTEX GmbH & Co. KG
- Hosko GmbH

Es handelt sich um ein inhabergeführtes mittelständisches Unternehmen.

1.2 Ausgangssituation

Bei bestehenden Kalksandsteinwerken handelt es sich im Wesentlichen um Unternehmen mit älteren Produktionsanlagen. Werksneubauten wurden in den vergangenen Jahren nicht realisiert. Diese älteren Produktionsanlagen waren hinsichtlich ihres damaligen Marktes mit großen Produktionsmengen und wenigen Produktvarianten ausgelegt. Dieser Markt hat sich in den letzten Jahren komplett verändert. So ist ein stetiger Anstieg bei den Produktvarianten mit anderen Rohstoffen festzustellen, was zu einem massiven Anstieg der Bestände und dem damit verbundenem Bedarf an Lagerplatz geführt hat. Dies wiederum bedeutet eine deutliche Steigerung der Rüstkosten bei einer zu geringen Auslastung der Anlagen. Die bestehenden Werke sind für die heutigen Anforderungen nicht optimal ausgelegt. Ziel ist es, mit dem Werksneubau eine Effizienzsteigerung im Hinblick auf die Einsparung von Ressourcen zu erzielen. Durch eine Vernetzung und Erfassung aller Betriebs-, Produktions- und Maschinendaten analog einer „intelligenten Fabrik“ (Smart Factory) sollen die Prozessabläufe vollständig automatisiert werden. Im Vordergrund steht hier eine maximale Auslastung der Maschinenressourcen (Mischen, Pressen, Verpacken) bei optimiertem Härten (reduziertem Primärenergieeinsatz und maximaler Wärmerückgewinnung) sowie minimaler Lagerhaltung.

Cirkel produziert in NRW an den Standorten Haltern am See und Wickede (Ruhr) Kalksandsteine.

Angedacht ist der Bau eines neuen Produktionsstandortes in unmittelbarer Markt- und Rohstoffnähe. Hierzu sollte ein hocheffizientes Werk in Bezug auf den Energieverbrauch und die benötigte Anlagentechnik gebaut werden. Dafür ist der Einsatz neuer Fertigungsverfahren mit innovativem Anlagenlayout unumgänglich.

Vorhandene Umweltbelastungen beim Antragsteller kommen bei der Herstellung von Kalksandsteinen KS i. w. aus dem Energieverbrauch in Form von Erdgas zur Erzeugung von Wasserdampf, der zur Härtung der Kalksandsteine in den Härtekesseln (Autoklaven) benötigt wird. Nach den eigenen Erfahrungen beträgt der Energieverbrauch für klein- und mittelformatige KS ca. 166 kWh/m³ und für die großformatigen KS-XL ca. 195 kWh/m³. Für einen Produktmix von 40.000 m³ KS und 20.000 m³ KS-XL werden insgesamt rund 10.527 MWh/a benötigt. Dies entspricht in etwa den durchschnittlichen Energieverbräuchen aus den mengenmäßigen Betriebsvergleichen des Bundesverband Kalksandsteinindustrie der Jahr 2019 [1] und 2021 [2]. Im weiteren Verlauf des Berichtes wird daher der oben genannte Produktionsmix als Referenzwerk für die Herstellung von Kalksandsteinen in Deutschland definiert.

Außer für die Dampferzeugung wird die meiste Primärenergie für die Kalkherstellung aufgewandt. Neben den CO₂ Emissionen, die beim Brennen des Kalkes entstehen, wird zusätzliches Prozess-CO₂ emittiert, welches sich aus dem Entsäuerungsprozess des Kalksteines (CaCO₃) ergibt. Die Abbildung 1 stammt aus dem Forschungsbericht Nr. 82 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV aus dem Jahr 1995 [3].

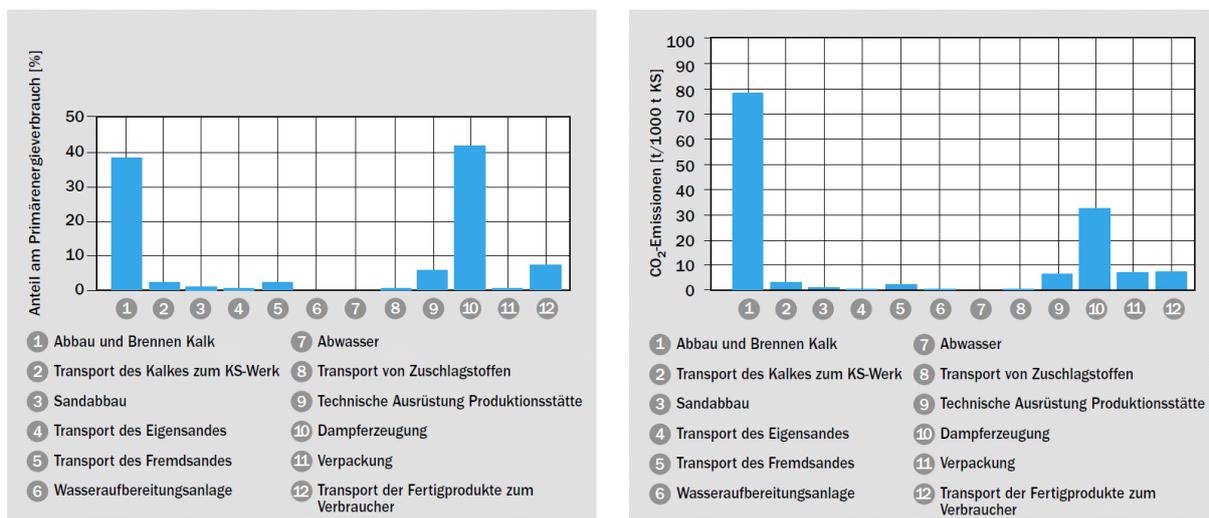


Abbildung 1: Anteil der einzelnen Produktionsschritte am Primärenergieverbrauch (links) und Verteilung der CO₂-Emission auf die einzelnen Produktionsschritte (rechts) [3].

In Abbildung 1 wird die Verteilung des Verbrauches an Primärenergie der einzelnen Produktionsschritte sowie die dabei freiwerdenden CO₂-Emissionen zur Herstellung der Kalksandsteine gezeigt. Die in der Abbildung dargestellten Daten werden durch neuere Studien aus den Jahren 2021, wie die aktuelle EPD [4] und die Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland des Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV [5] bestätigt. Deswegen ist es in der Kalksandsteinindustrie ein stetiges Bestreben den Erdgasverbrauch sowie den Kalkanteil möglichst zu minimieren.

Hinzu kommt der Energiebedarf für die Aufbereitung des in den Autoklaven anfallenden Kondensates durch Destillation. Entsprechende Destillationsanlage für die Kalksandsteinindustrie existieren und sind im Einsatz. Erfahrungsgemäß wird mit einer derartigen Destillationsanlage bei einer Produktionsmenge von rund 200.000 m³ Baustoffe rund 20.000 t Kondensat (20 Mio. Liter Wasser) wiederaufbereitet. Wird dieser Kondensatanteil auf das bereits oben erwähnte Referenzwerk angewendet, müssen ca. 7.115 t Kondensat mit einer Ausgangstemperatur von ca. 60°C destilliert werden. Hierzu ist eine Energiemenge von 4.795 MWh erforderlich. Das Destillat kann dann dem Dampfkessel direkt wieder zugeführt werden, nur 5 % gehen ins Abwasser.

In Kalksandsteinwerken mit älteren Betriebsgenehmigungen kann das Kondensat zum nahegelegenen Klärwerk geleitet oder in der eigenen Sandabbaustätte abgeleitet werden. Man spart dadurch die Destillation, muss aber beträchtliche Mengen an Frischwasser für die Nutzung im Dampfkessel aufbereiten. Die aus Erdgas resultierenden CO₂-Emissionen betragen für das konventionelle Referenzkalksandsteinwerk ca. 3.100 t/a. Dazu kommt ein Verbrauch an Stahl für Ausrüstung in Form von Pressen und Härte-kesseln sowie Presswerkzeugen und an Flächenverbrauch.

Aufgrund umfangreicher Vorarbeiten war es möglich, ein Konzept für das neue innovative Werk zu entwickeln, das die Steigerung von Ressourceneffizienz und Produktivität verbindet und nun erstmalig realisiert wurde. Dabei wurden Erkenntnisse aus mehreren langjährigen FuE-Projekten des Bundesverbandes Kalksandstein eV, an denen Cirkel unterstützend mitgewirkt hat, zur weiteren Verbesserung der Umweltbilanz in die Realität umgesetzt und weiterentwickelt. Auf die einzelnen Projekte zur Verbesserung der Umweltbilanz wird in Kapitel 2 näher eingegangen.

2. Vorhabenumsetzung

2.1 Ziel des Vorhabens

Ziel des Vorhabens war es, in einem mustergültigen Werksneubau folgende Innovationen in einem Kalksandsteinwerk erstmalig anzuwenden:

- kontinuierliche Sieblinienermittlung mit nachgeschalteter Packungsdichtebe-rechnung

- massereduzierte und energieeffiziente Multifunktions-Pressanlagen mit Werkzeugwechselwagen.
- Industrie 4.0 Werkssteuerung mit Werkssimulation
- Energieeffizienzmaßnahme mit Hilfe einer neuartigen Rückverdampferanlage
- Wärmetunnel zum Vorheizen der KS-Rohlinge

Aus dem Zusammenwirken verschiedener Innovationen wurden gegenüber einer neuen Anlage nach Stand der Technik, in den Antragsunterlagen folgende Umweltvorteile vorhergesagt:

- Reduktion Stahlverbrauch für die Anlagenherstellung um 292 t (-35 %): Dampfhärtekessel, Reaktoren, Nachmischer, Steinpressen, Presswerkzeuge und Härtewagen.
- Reduktion Erdgasverbrauch um 9.357 MWh (Vorhersage)
Ausgehend von dem definierten Referenzkalksandsteinwerk mit einer Gesamtleistung von 60.000m³ Kalksandsteinen (40.000 m³ KS* und 20.000 m³ KS-XL; Energiebedarf 10.540 MWh/a) zzgl. Energiebedarf für die Kondensataufbereitung durch Destillation (4.795 MWh/a), ergibt sich ein Energiebedarf von 15.335 MWh/a.
Branchenspezifische Verbrauchsdaten für die Aufbereitung von Kondensat durch Destillation liegen nicht vor. Sie können lediglich berechnet werden. Auch wenn zur Destillation überwiegend Abdampf verwendet wird, steht dieser dem Autoklavierprozess nicht mehr zur Verfügung.

Durch die in den folgenden Kapiteln aufgeführten Energieeinsparungen, wurde für dieses Referenzwerk mit innovativem Charakter in den Antragsunterlagen ein Energiebedarf von 5.965 MWh/a vorhergesagt.

- Erhöhung der Materialeffizienz; 5 % weniger Kalk und 3 % weniger Sand.

Die CO₂ -Einsparungen an Energieträgern im Betrieb sind damit 1.967 t/a (49 %), unter Berücksichtigung vorgelagerter Emissionen an Materialien 2.366 t/a (57 %).

2.2 Technische Lösung - Auslegung Kalksandsteinwerk

So wurde ein kompletter Werksneubau geplant. Dabei sollten alle an der Wertschöpfungskette beteiligten Prozesse vom Auftragseingang, über die Rohstoffanlieferung, von der Rezepturberechnung, dem Mischprozess, dem Verdichtungsprozess, dem Härteprozess, der Verpackung, der Lagerung bis hin zur Auslieferung an den Kunden miteinander verknüpft werden. Dadurch sollten individuelle, leistungsfähige Kalksandsteine bei optimalen Energie- und Ressourceneinsatz auf höchstem Produktions- und Qualitätsniveau hergestellt werden.

Die Eckpunkte des Neubaus sind in Tab. 1 und Abb. 2 dargestellt:

Tabelle 1: Eckpunkte des neuen innovativem Kalksandsteinwerk

Investor und Betreiber	Cirkel GmbH & Co. KG
Standort	Neuenkirchen-Vörden (Industriegrundstück Hörster Heide)
Produkte	Klein- und Mittelformate (KMF) KS und großformatige KS XL inkl. Pass- oder Ergänzungssteine
Grundstücksfläche	30.000 m ²

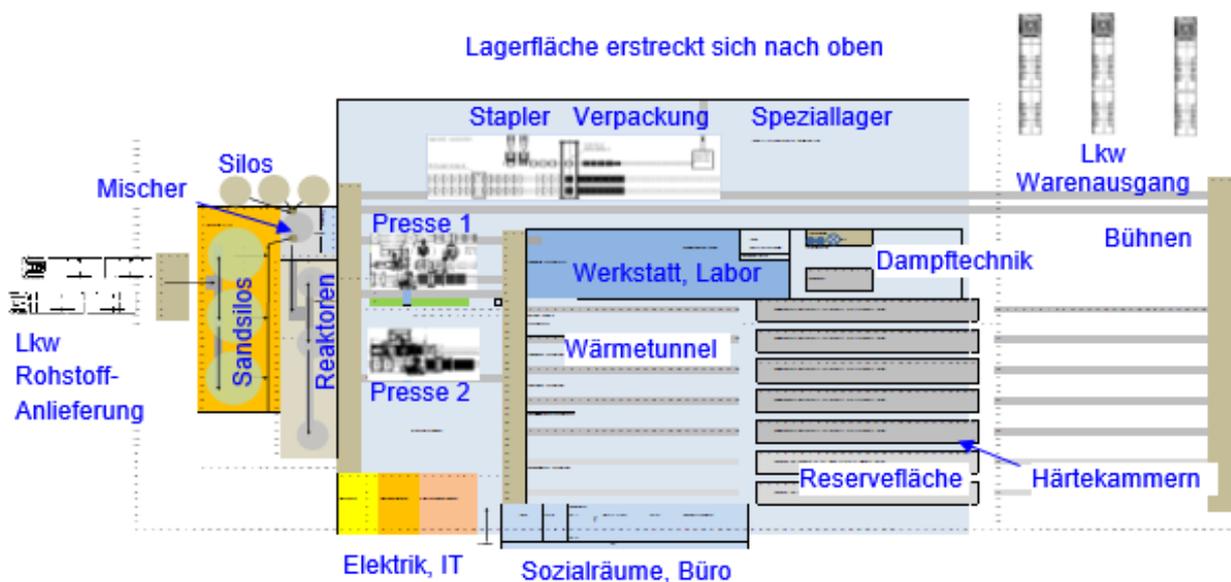


Abbildung 2: Layout neues Werk mit Reserveflächen

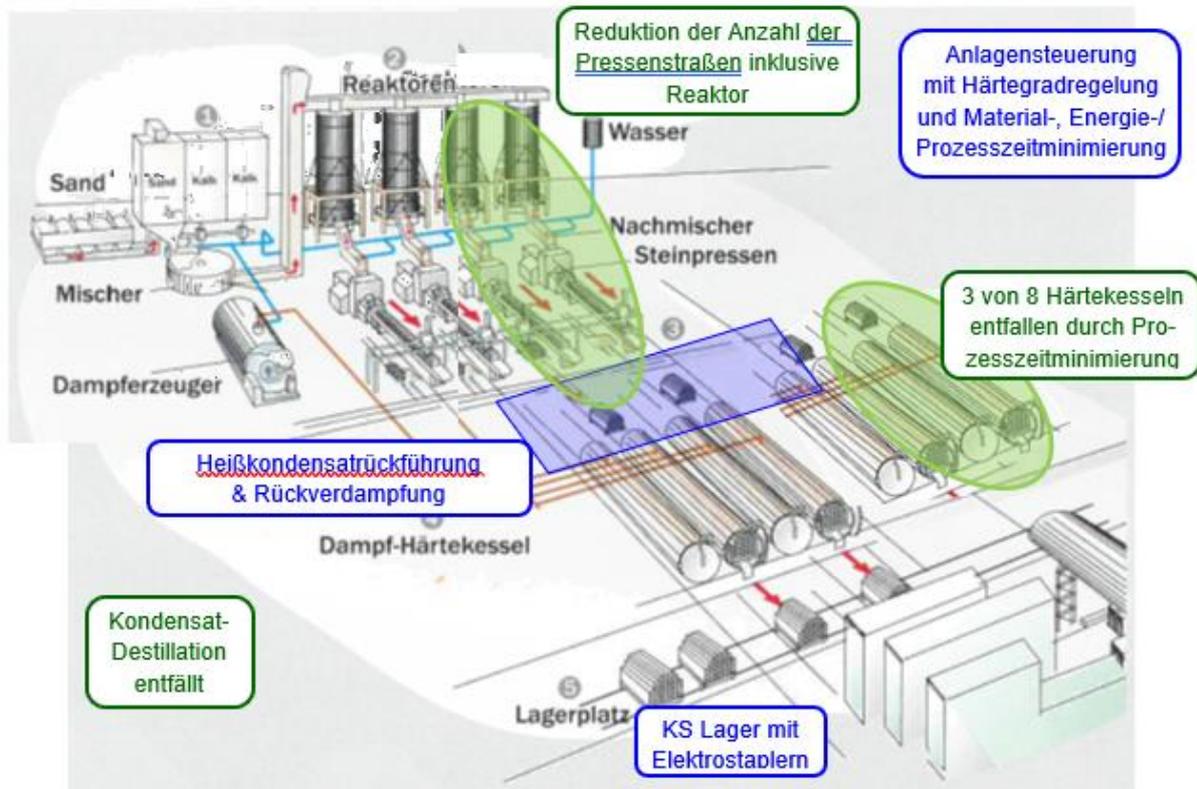


Abbildung 3: Zeichnung einer Realisierung des neuen Werkes, wobei im Vergleich mit einem konventionellen Werk die im „Oval“ markierten Teile entfallen und die die im „Rechteck“ markierten kommen hinzu (schematisch) (Quelle für Basiszeichnung: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV)

Kalksandsteine werden in zwei verschiedene Produktgruppen eingeordnet. Klein- und Mittelformatige Kalksandsteine (KS) sind Kalksandsteine, die der Verarbeiter noch traditionell von Hand vermauern kann. KS-XL sind Blöcke von bis zu einem Meter Länge und einer Höhe von bis zu 648 mm, die nur noch mit einem Baustellenkran versetzt werden können. Um ein aufwendiges Schneiden von KS-XL an der Baustelle zu vermeiden, werden die Steine schon im Werk in die richtigen Sonderformen gepresst und soweit nötig gesägt.

2.3 Umsetzung des Vorhabens

Nach einer Bauzeit von rund 2 Jahren wurde das neue innovative Kalksandsteinwerk in Neuenkirchen-Vörden errichtet und in Betrieb genommen Abbildung 4.



Abbildung 4: Werksansicht neues Kalksandsteinwerk

In den folgenden Unterkapitel werden die geförderten und umgesetzten Maßnahmen näher beschrieben und erläutert.

2.3.1 Kontinuierliche Sieblinienmessung und Packungsdichterechner

Nach dem derzeitigem Stand der Technik gibt es in der Kalksandsteinindustrie keine kontinuierliche Sieblinienmessung.

Von dem Hauptrohstoff Quarzsand (Anlieferung von ca. 500 t pro Tag) werden stichprobenartig Sandproben (ca. 2.000g) entnommen, an denen im Labor durch Siebung über einen Siebturm mittels Vibrationssiebmaschine die Korngrößenverteilung ermittelt wird.

Anhand der graphischen Darstellung und dem Vergleich mit Spezifikationen kann festgestellt werden, ob sich die Sieblinien der verwendeten Quarzsande verändert haben. Auch kann über ein externes Exceltool die Packungsdichte der Sandmischung ermittelt werden. Da dies aber stichprobenartig erfolgt (in der Regel einmal pro Woche), handelt es sich hier nicht um einen Parameter zur kontinuierlichen Produktionsüberwachung. Dies gilt umso mehr da es sich bei den Quarzsanden um natürliche Rohstoffe mit natürlichen Schwankungen handelt.

Ziel der Entwicklung ist eine kontinuierlichen Rohstoffüberwachung von Quarzsanden in einer Massenproduktion.

Die kontinuierliche Sieblinienmessung mittels akustischem Korngrößenanalysator (Geoscanner) in Verbindung mit einem Packungsdichterechner ist daher neuartig in der Kalksandsteinindustrie. Vor der Verwendung im Mischer werden die Quarzsande hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung mit dem akustischen Korngrößenanalysator analysiert und zwar von jeder Mischcharge.

Hierzu wurde auf dem Steigeband vor der Kontrollwaage ein akustischer Korngrößenanalysator (Geoscanner) installiert, der die Korngrößenverteilung der verschiedenen Sande mittels Ultraschall bei der Übergabe in die Waage bestimmt. In Abbildung 5 wird der akustischer Korngrößenanalysator (Geoscanner) dargestellt.



Abbildung 5: Akustischer Korngrößenanalysator Fa. TIPCO GmbH

Das Ergebnis der Sieblinienmessung wird über eine UPC UA- Schnittstelle direkt an den Packungsdichterechner übergeben. Aus den gemessenen Sandsieblinien errechnet sich für die jeweilige Sandmischung die Packungsdichte. Die Ergebnisdarstellung einer Packungsdichteberechnung ist exemplarisch in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt.

The screenshot shows the 'CIRKEL' software interface for calculating packing density. The main window title is 'Cirkel GmbH & Co KG - Berechnungsprogramm: BdPv.3.05'. The interface is divided into several sections:

- Header:** Logo 'CIRKEL', navigation links (Programminformationen, Support / Kontakt, Nutzungsbedingungen), and copyright information (© Fa. AFH J. Döring e. Kfm & Dipl.-Ing. René Bäß).
- Navigation:** Tabs for 'Siebsätze', 'Stoffkombinationen', 'Mischungen', and 'Datenbanken'. A sub-menu shows 'Erstellen aus: 2 Stoffen 3 Stoffen 4 Stoffen 5 Stoffen'.
- Form Section:**
 - Erstellen aus: 3 Stoffen** (Berechnungszeit: ca. 2 sec)
 - Hohlraumanteil der Einkornschüttung:** $k_0 = 0,82$ (ändern)
 - Reichweite der Teilchenbehinderung:** $w_0 = 2$ (ändern)
 - Berechnungsgenauigkeit:** Das Mischverhältnis entspricht Ihren folgenden Eingaben der %-Anteile der Stoffe.
- Material Selection (3 Stoffe):**
 - Stoff 1:** Kalksandstein-Standardsiebsatz, 06-2022Wiebold, 28 %-Anteil, Reindichte: 2,50 kg/cbm, Rohdichte: 58,23 kg/cbm, Packungsdichte: 58,23 %.
 - Stoff 2:** Kalksandstein-Standardsiebsatz, 02-2022Lewe0-2, 30 %-Anteil, Reindichte: 2,50 kg/cbm, Rohdichte: 59,46 kg/cbm, Packungsdichte: 59,46 %.
 - Stoff 3:** Kalksandstein-Standardsiebsatz, 02-2022Lewe0-1, 42 %-Anteil, Reindichte: 2,50 kg/cbm, Rohdichte: 58,47 kg/cbm, Packungsdichte: 58,47 %.
- Name für %-Stoffkombination:** KSVollsteinNKV
- Beschreibung der Stoffkombination:** 06-2022Wiebold_28P-02-2022Lewe0-2_30P-02-2022Lewe0-1_42P
- Summary Table:**

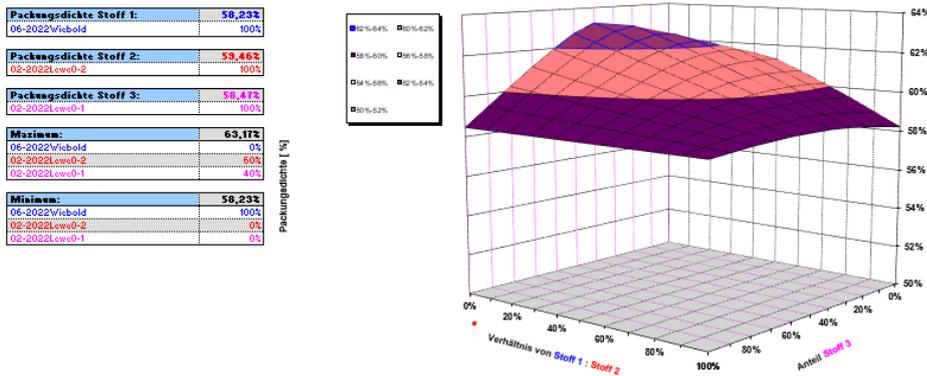
gewählte Stoffkombination	Summe %-Anteile	Erstellungsdatum	Packungsdichte	gew. Reindichte	gew. Eigenrohddichte	Kosten
3-Stoffkombination	100 [%]	06.09.2022	61,02 [%]	[kg/cbm]	[kg/cbm]	[EUR]
Die gewichteten Mittel der Dichten und die ideellen Dichten dienen nur als Richtwert und entsprechen nicht den tatsächlichen Dichten einer Stoffkombination!				ideelle Reindichte	ideelle Eigenrohddichte	
				0,00 [kg/cbm]	0,00 [kg/cbm]	
- Buttons:** Berechnung speichern, Berechnung starten, Vol-Kombination / Kumulativer Anteil, Eingaben zurücksetzen

Abbildung 6: Ergebnis Packungsdichteberechnung eines 3-Stoffsystems mit vorgegebener Mischung

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisdarstellung einer KS-Rezeptur für einen KS-Vollstein bestehend aus drei verschiedenen Sanden. Die Mischungsanteile können in der Eingabeliste frei gewählt werden und für diese Mischung errechnet sich eine Packungsdichte, hier 61,02 Vol.-%.

Abbildung 7 zeigt für einen KS-Vollstein das Gesamtergebnis der Packungsdichteberechnung eines Dreistoffsystems (drei verschiedene Sande). Die Ergebnisse werden in einer Matrix in 10 % Vol-% Schritten aufgeführt und graphisch dargestellt.

Packungsdichte eines 3-Stoffsystems in Abhängigkeit der Zuebenmenge von
 06-2022Wiebold : 02-2022Lewo-2 : 02-2022Lewo-1



Packungsdichte in [Z] : 3-Stoffsystem		Minimum:	58,23%	Maximum:	63,17%	Stoff 3	Tatsächlicher Anteil von Stoff 1 und Stoff 2 in Abhängigkeit des Verhältnisses zueinander Bitte das Verhältnis in [%] zur gewünschten Anzeige wählen!	
Stoff 1:	Fehl!	Stoff 2:	Fehl!	← Eigendichte [kg / cbm] →		DB-Eintrag fehl!	Stoff 1 =	20
Stoff 1:	Fehl!	Stoff 2:	Fehl!	← Kosten pro Tonne [EUR] →		DB-Eintrag fehl!	Stoff 1 =	20
Verhältnis in [%]:		Stoff 1 : 06-2022Wiebold		Stoff 2 : 02-2022Lewo-2		Anteil	Anteil	Anteil
100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%
0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
58,2%	58,3%	58,5%	60,1%	60,7%	61,2%	61,5%	61,7%	60,6%
58,4%	59,0%	59,6%	60,2%	60,8%	61,3%	61,6%	62,0%	61,6%
58,6%	59,1%	59,7%	60,2%	60,8%	61,3%	61,6%	62,3%	62,3%
58,7%	59,2%	59,7%	60,2%	60,7%	61,2%	61,7%	62,2%	62,6%
58,8%	59,2%	59,6%	60,1%	60,5%	61,0%	61,4%	61,9%	62,3%
58,8%	59,1%	59,5%	59,9%	60,3%	60,7%	61,1%	61,5%	61,9%
58,8%	59,1%	59,4%	59,7%	60,0%	60,3%	60,6%	61,0%	61,3%
58,7%	59,0%	59,2%	59,4%	59,7%	59,9%	60,1%	60,4%	60,6%
58,7%	58,8%	59,0%	59,1%	59,3%	59,4%	59,6%	59,8%	59,9%
58,6%	58,6%	58,7%	58,8%	58,9%	59,0%	59,0%	59,1%	59,2%
58,5%	58,5%	58,5%	58,5%	58,5%	58,5%	58,5%	58,5%	58,5%

Abbildung 7: Ergebnis Packungsdichteberechnung eines 3-Stoffsystems

Beim Vergleich der Packungsdichte aus Abbildung 6 mit einer zuvor für die Rezeptur festgelegten Packungsdichte, ergibt sich eine Abweichung aufgrund von natürlichen Schwankungen innerhalb der Korngrößenverteilung der verwendeten Sande. Ist die Abweichung zu groß, erfolgt eine Anpassung der Rezeptur mit Hilfe der Daten aus der Matrix aus Abbildung 7, bezogen auf das Mischungsverhältnis der Sande in der Mischersteuerung.

Optimierungskriterien sind neben der üblichen produktspezifischen Rohdichte zusätzlich die Porenradienverteilung/Porosität für minimale Prozesszeiten der Rohlinge in den Autoklaven und minimalem CaO-Anteil in der Rezeptur.

Bislang wurde die Mischung für die jeweilige Rohdichteklasse nach Spezifikation der Anlieferungen und stichprobenartigen Messungen der Sieblinie festgelegt und mit dem Produktionsergebnis der Rohdichte- und Druckfestigkeitsmessungen manuell abgeglichen. Eine Auswertung der werkseigenen Produktionskontrolle im Cirkel KS-Werk in Haltern am See zeigt, dass über alle Produkte mit verschiedenen Geometrien, Festigkeitsklassen und Rohdichten der Mittelwert der Rohdichte pro Produkt um 0,05 - 0,08 kg/dm³ über dem in der Fertigung zugelassenem Minimum liegen. Dieses Minimum hat einen Sicherheitsabstand von 0,01 kg/dm³ der durch DIN 2000-402 vorgegebene Untergrenze. 5 % der Messwerte dürfen darunter liegen.

Die Schwankungen der Rohdichte kommen durch Schwankungen in den Korngrößenverteilungen der Sande und Gesteinskörnungen, da es sich um natürliche Produkte handelt. Dazu kommen weniger bedeutsame Schwankungen von Mischer, Feuchte und Prozessbedingungen.

Der Vorteil besteht nun darin, dass wir jetzt erstmalig eine kontinuierliche Prozesskontrolle der Korngrößenverteilung der Quarzsande haben, die in den KS-Rezepturen mit einem Anteil von >93 % den Hauptrohstoff in den Rezepturen darstellt. Dadurch konnte die Bandbreite der erreichten Rohdichte wie geplant auf ein Minimum reduziert werden.

Nach ersten Erfahrungswerten zur Einengung der Schwankungsbreite im innovativen Werk konnte eine Einsparung über alle Rohstoffe von 3 % ermittelt werden. Die prozentuell größte Einsparung konnte beim Kalk von 15 % und beim Sand von 2 % erzielt werden.

Direkte Umwelteffekte:

Bezogen auf das Musterkalksandsteinwerk (Referenzwerk) konnten durch die kontinuierliche Sieblinienmessung in Verbindung mit dem Packungsdichterechner folgende Materialeinsparungen Kalk und Sand sowie die Einsparung an vorgelagerten CO₂-Emissionen ermittelt werden:

1.056 t Kalk/a und 1.826 t Sand/a sowie 932 t CO₂/a aufgrund der eingesparten Kalkmenge.

Beim Erdgaseinsatz für die Erwärmung und Härten der rohstoffreduzierten Steinrohlinge in den Autoklaven konnten **308 MWh/a** eingespart werden.

Die Ergebnisse der Einsparungen werden in Tabelle 2 zusammengefasst.

Ein weiterer Vorteil der Sieblinienbestimmung mit anschließender Packungsdichtebeurteilung besteht darin, dass der Wassergehalt der KS-Mischung von 6 % auf 4,5 % reduziert werden konnte. Bislang wurde Wasser bei schlechten Pressergebnissen (geringe Rohlingsstandfestigkeit oder schlechte Kantenschärfe) nach Erfahrungswerten (nach Gefühl) nachdosiert und/oder es wird zusätzlich Kalk zugegeben.

Diese reduzierte Wassermenge muss dann in den Härtekesseln nicht mit erhitzt werden und führte zu einer **Energieeinsparung** von rund **347 MWh/a**, errechnet aus der spezifischen Wärmekapazität H₂O, der Differenz der Wassertemperatur (20°C → 200°C) und der Wirkungsgrad Dampfkessel von 85 %. Auch hier werden die Ergebnisse in Tabelle 2 zusammengefasst.

Ein wichtiger indirekter Vorteil der kontinuierlichen Sieblinienmessung und der anschließenden Packungsdichtekontrolle und -optimierung war die Verkürzung der Prozesszeit für großformatige KS-XL Steine in den Autoklaven.

Die Rezepturen werden so eingestellt, dass alle großformatigen Steine bis zu einer Wandstärke von 24 cm mit der Härtekurve von mittelformatigen Kalksandsteinen gemischt, in einem Autoklav mit einer verkürzten Härtekurve geheizt werden können.

Bislang waren die Prozesszeiten bei gleicher Beladung der Härtewagen und gleicher Rohdichte für KS-XL länger als für klein- und mittelformatige KS, bedingt durch längere Auf- bzw. Abheizzeiten. Bei zu schneller Erwärmung bzw. Abkühlung bildeten sich oft Spannungsrisse aufgrund von Temperaturunterschieden im äußeren und inneren Bereich der Steine, da der Dampf nicht schnell genug in das Innere vordringt bzw. nicht schnell genug entweicht. Bei kleineren Steinen war das akzeptabel. Bei KS-XL betragen bei Cirkel die Aufheiz- und Ab-/Überlasszeiten je 4h anstatt 2h bei KS. Die Härtezeiten waren mit 4,5h gleich. Durch die 2h längere Prozesszeiten erhöhten sich die Wärmeverluste durch Abstrahlung, Wärmeleitung und Leckagen um ca. 5 %, das sind für 20.000 m³ KS-XL **195 MWh Dampf / a**, siehe Tabelle 2.

Die Verkürzung der Prozesszeit ermöglicht eine gemischte Beladung der Autoklaven mit KS- und KS-XL-Steinen und die Angleichung der Überlasszeiten von Dampf zwischen Kesseln mit KS und KS-XL. Gleichzeitig führt das zu einer deutlichen Erhöhung der Produktivität und einer **Verminderung der Anzahl an benötigten Härtekessel von 8 auf 5** in einem Werk mit kontinuierlichen Sieblinienmessung mit automatischer Packungsdichteberechnung und reduzierter Prozesszeit, verglichen mit einem neuen konventionellen Werk ohne dieses Systems im Zweischichtbetrieb. Das sind **156 t Stahl weniger**, da auf die 3 Härtekessel verzichtet werden konnte.

Die geringere Anzahl an Härtekesseln bei gleicher Produktionsmenge und Kesselgröße führt zu weniger Energiebedarf beim Aufheizen der Kessel nach den Wochenenden und Betriebspausen. Das betrifft 48 Tage im Jahr und machte bei Erwärmung von 20°C auf 200°C für 5 statt 8 Autoklaven à 52 t Stahl, Wirkungsgrad Dampfkessel 85 % einen Unterschied von **207 MWh Dampf/a**. Das innovative Werk mit kontinuierlichen Sieblinienmessung mit automatischer Packungsdichteberechnung lastet die 5 Kessel besser aus und der Druck kann schneller abgelassen werden. Es resultierten im Mittel 2 Fahrten pro Arbeitstag statt im Mittel 1,25 Fahrten pro Arbeitstag, sodass die Kessel über Nacht nur auf 115°C statt 67°C abkühlen. Das macht im Jahr eine Einsparung von zusätzlich **638 MWh/a**, zusammen mit dem Wochenendeffekt **845 MWh/a**. Diese Einsparung wurde in den Antragsunterlagen prognostiziert und nach der Umsetzung des Vorhabens auch so bestätigt (siehe Tabelle 2).

Das Risiko lag im Vorfeld in der fehlenden Erfahrung mit der kontinuierlichen Sieblinienbestimmung mit anschließender Berechnung der Packungsdichte in der Produktion.

Die gesetzten Ziele wurden nach Inbetriebnahme erreicht und können in jedem bestehenden Kalksandsteinwerk nachgerüstet werden. Die Schwierigkeit während der Inbetriebnahme bestand darin, die Schnittstellen der entsprechenden Softwares aufeinander abzustimmen. Ferner musste die Software für die Packungsdichteberechnung, gegenüber dem bestehenden Exceltool komplett neu programmiert und angepasst werden. Microsoftprogramme sind mit Maschinen-Steuerungssoftwares nicht kompatibel.

2.3.2 Multifunktions-Pressanlagen mit Werkzeugwechselwagen

Ziel dieser neuartigen Multifunktionsanlage mit Werkzeugwechselwagen ist die Minimierung der Rüstzeiten bei gleichzeitig hoher Produktivität.

Die Rohstoffe Kalk, Quarzsand, Gesteinskörnung und Wasser werden nach der Vermischung wie üblich in einem Reaktor untergebracht. Hier verbleibt das Gemisch, bis der Kalk vollständig abgelöscht ist. Vom Reaktor gelangt die Rohmischung direkt über einen Nachmischer zur Steinpresse. Für die KS wurde eine Presse konventioneller Bauart vorgesehen. Für KS-XL wurde eine nach Vorstellungen der Fa. Cirkel gebaute multifunktionale Pressen- mit eingebundener Sägeanlage erstmalig zum Einsatz gebracht, die die Vorteile einer hohen Produktivität einer Standard-Pressen mit der hohen Flexibilität einer Passstein-Pressen verbindet. Sie ermöglichte erstmalig einen schnellen und unkomplizierten Umbau der Pressen auf die verschiedenen Steinformate.

Zwischen den beiden spiegelbildlich angeordneten Pressen wurde ein neuartiger Werkzeugwechselwagen installiert. Mit diesem Wagen können sowohl die in der Presse eingebauten als auch die neu einzubauenden Werkzeuge bewegt werden (vgl. Abbildung 8).



Abbildung 8: Neuartiger Werkzeugwechselwagen

Zur Durchführung eines Werkzeugwechsels an der Presse befindet sich auf der ersten Position des Wagens das einzubauende Werkzeug. Der Wagen fährt mit der leeren Position zwischen die Presse, um das auszubauende Werkzeug auf dieser Position abzustellen. Danach fährt der Wagen mit dem einzubauenden Werkzeug eine Position weiter, das Werkzeug wird in die Presse eingebracht und verschraubt. Die Umrüstzeit kann durch diesen innovative Werkzeugwechselwagen um bis zu 50 % reduziert werden.

Ein Werkzeugwechsel dauert somit noch lediglich 1,5 h.

In Abbildung 9 ist die Multifunktionsanlage, bestehend aus einer Pressen- und einer Sägeanlage zu sehen.



Abbildung 9: Multifunktionsanlage bestehend aus Presse und Säge

Im KS-Raster-System werden 7 verschiedene Wandstärken in 4 verschiedenen Steinlängen gefertigt (1/1-, 3/4-, 1/2- und 1/4-Steine). Traditionelle Anlagen benötigen für jede Wandstärke und Länge ein eigenes Pressenwerkzeug. Dies bedeutet viele Rüstzeiten für die Produktion dieses Steinsystems. Alternativ gibt es Anlagen, die zwar mit weniger Werkzeugen auskommen, allerdings eine sehr geringe Produktivität (ein Stein pro Hub) aufweisen.

Durch unserer neue, innovative Multifunktionsanlage wird der Zielkonflikt zwischen Produktivität und Rüstzeiten aufgelöst. Die Multifunktionsanlage produzierte pro Hub mehrere Rasterelemente. Diese werden zum Weitertransport direkt auf einen bereitgestellten Härtewagen gestapelt oder – als Novum- der komplette Pressenhub wird auf einen Übergabetisch zwischengelagert. Ein Roboter übernimmt einen Rohling von diesem Übergabetisch und übergibt ihn an eine Sägeanlage auf der die erforderlichen Pässsteine $\frac{3}{4}$; $\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{4}$ -Steine gesägt werden. Anschließend werden die gesägten Pässsteine auf einen separaten bereitstehenden Härtewagen gestapelt.

Während des gesamten Säge- und Stapelvorgangs für die Pässsteine fertigt die Presse mit hoher Produktivität 1/1 Standardsteine weiter. Im Gegensatz zu einer Pässsteinpresse kommt es zu keinen Verzögerungen durch den Sägevorgang, da die Standardsteine und die Pässsteine unabhängig voneinander auf verschiedene Härtewagen gestapelt werden.

Mit einem Werkzeug können somit für eine Wandstärke alle vier Steinlängen gefertigt werden. Hierzu ist kein Werkzeugumbau erforderlich.

Abbildung 10 zeigt noch einmal den Roboter, der die bereitgestellten Standardsteine vom Übergabetisch der Presse zur Sägeanlage bringt und nach dem Sägen den Passstein vom Sägertisch auf den Härtewagen stapelt. Der nicht benötigte Abschnitt des Kalksandsteinrohlings wird als sogenanntes Streugut der Kalksandsteinmischung über die Rezeptur wieder zugeführt und muss nicht als Abfall ausgeschleust werden.



Abbildung 10: Roboter der Sägeanlage

Vorteile: Mit der neuartigen Multifunktionsanlage werden die Rüstzeiten auf maximal 2 Stunden minimiert. Die Produktion kann daher in kleineren Losgrößen erfolgen bei gleichzeitig höherer Produktivität. Hierdurch wird ein hohes Maß an Flexibilität zur Produktion der unterschiedlichen Steinformate erreicht. Auf individuelle Kundenwünsche kann kurzfristig reagiert werden.

Im Gegensatz zu einer Flachpresse (Dorsa) wie im Werk Haltern oder einer Passstein-Presse PSP mit Verschiebewerkzeug im Werk Wickede – mit diesen Maschinen kann lediglich ein Stein pro Hub produziert werden - errichteten wir eine Multifunktionsanlage, die im Gegensatz dazu mehrere Steine pro Hub produziert.

Die Pressenleistung entspricht der Leistung einer KSP-Presse kombiniert mit der Flexibilität einer Dorsa- oder PSP-Presse.

Durch die hohe Produktivität der Pressen wurde bei gleicher Ausbringungsmenge die Anzahl der benötigten Fertigungsstraßen deutlich reduziert. Im Vergleich mit dem Kalksandsteinwerk Wickede ergab sich, dass das neue Werk mit 2 statt im mit 3 Fertigungsstraßen auskommt, so dass 1 komplette Fertigungslinie bestehend aus Reaktor, Nachmischer und KS-XL Steinpresse und Werkzeugsatz entfällt (Abbildung 3). Der Verbrauch an Stahl-Ressourcen für die Realisierung dieser Anlagentechnik ging entsprechend zurück. Die Reaktoren sind pro Linie in altem und neuem Werk gleich, begrenzt durch den gleichen maximalen Massendurchsatz. Durch die geringen Stillstandzeiten beim Werkzeugwechsel und der Vernetzung aller Anlagenkomponenten ist der mittlere Durchsatz nahe dem maximalen Durchsatz. Der Wegfall von 1 Reaktor wurde dadurch möglich. Die Pressenwerkzeuge der innovativen multifunktionalen Presse haben ebenfalls weniger Masse als die von zwei alternativen KS-XL-Pressen, die in einem neuen konventionellen Werk zum Einsatz kommen (PSP 460 M von Lasco). Als Umweltvorteil der Multifunktionspresse mit Werkzeugen ist insgesamt einen Minderverbrauch von 92 t Stahl mit vorgelagerten Emissionen von **265 t CO₂**, die in Tabelle 2 auf 30 Jahre verteilt wurden: **8,8 t CO₂/a**.

Es ergaben sich auch direkte Vorteile durch die Reduktion im Stromverbrauch der Pressen für dieselbe Menge an 20.000 m³ KS-XL-Steinen. Bei der besten konventionellen Presse in Wickede PSP460 wird mit einem Vakuum-Saugarm des Roboters gearbeitet, der alle Steine bewegt, sodass die Vakuumpumpe ständig arbeitet. Bei der innovativen Presse werden nur die zu schneidenden und geschnittenen Steine angesaugt. Die anderen Transportvorgänge werden an der Presse mit einem energieeffizienteren Greifer erledigt. Daraus resultiert ein Minderverbrauch an Strom von **28MWh/a** siehe Tabelle 2.

Ein zusätzlicher Vorteil erwuchs aus der geringeren Masse der Werkzeuge: zwei à 19,5 t bei einer Passsteinpresse PSP 460 M, eines zu 6t bei der innovativen Presse. Die Werkzeuge sind aus Stahl und werden im Betrieb ständig elektrisch geheizt, um sie auf Betriebstemperatur zu halten. Von der konventionellen Presse werden 2 gebraucht, um die gleiche Menge zu produzieren wie bei einer innovativen Presse. Der Temperaturhub gegenüber der mittleren Außentemperatur ergab sich zu 30°C. Die Energieeinsparung beläuft sich hier auf 31,8 MWh/a siehe Tabelle 2.

Ob eine derartige Multifunktionsanlage in anderen Kalksandsteinwerken nachrüstbar ist muss im Einzelfall aus Platz- und Materialflussgründen vor Ort geprüft werden.

2.3.3 Wärmetunnel

Ziel des Wärmetunnels ist es die Kalksandsteinrohlinge vor dem Autoklavieren vor einem Abkühlen zu schützen. Die Rohlinge sollen nach Möglichkeiten mit nicht verwendbarem Abdampf aufgeheizt werden. Unserem Kenntnisstand nach kommen Wärmetunnel in unserer Industrie bisher nicht zur Anwendung.

Die Härtewagen werden nach dem Beladen an den Pressen mit Hilfe einer Schiebepiste zu dem durch die Werksteuerung bestimmten Warteplatz vor den Autoklaven transportiert und dort nacheinander aufgereiht.

Dort warten die Härtewagen mit den KS-Rohlingen solange bis ein kompletter Härtekesselzug mit 24 Härtewagen aufgereiht, der Autoklavendeckel geöffnet und der Autoklav wieder mit KS-Material befüllt werden kann. Nach dem Pressen besitzen die Rohlinge eine Temperatur von ca. 40°C. Bis zum Einfahren in den Autoklaven sind sie ohne einen Wärmetunnel auf eine Temperatur von ca. 20°C wieder abgekühlt. Die Taktzeit einer Autoklavenfahrt beträgt 550 min inkl. Bestückung und Entleerung (je 20 min). Bei angestrebter maximaler Belegung sind 24 Härtewagen in einem Autoklav. Dort werden sie mit Hilfe von gesättigtem Wasserdampf langsam von den 20°C auf ca. 200 °C aufgeheizt.

Im neuen innovativen Werk wurde der Warteplatz für die Härtewagen vor einem jeden Autoklaven komplett eingehaust (Wärmetunnel). Um eine Kaminwirkung der „Wartetunnel“ zu vermeiden, wurde deren Öffnungen mit Schnelllauftoren versehen, die nur kurzzeitig zum Befüllen und Entleeren geöffnet werden. In Abbildung 11 sind drei Wärmetunnel mit den Schnelllauftoren abgebildet.



Abbildung 11: Wärmetunnel mit automatischen Schnelllauftoren

Abbildung 12 zeigt einen Blick in einen Wärmetunnel, der soeben mit KS-Rohlingen auf den Härtewagen befüllt wird.



Abbildung 12: Blick in einen Wärmetunnel

Bei dem Wärmetunnel handelt es sich um ein statisch hochbemessenes Betonbauwerk. Dieser wird mit Hilfe des Abdampfs über ein Sprührohr beheizt. In einem konventionellen Werk wird dieser Abdampf an die Atmosphäre abgelassen und die Energie geht dabei verloren. Es handelt sich hier um einen Niederdruckdampf <3 bar, der nach Überleitung von einem fertig gehärteten Autoklav in einen aufzuheizenden Autoklav wegen des Druckausgleichs nicht zu 100 % genutzt werden kann. Wie geplant werden die Wärmetunnel mit diesem Abdampf beheizt und somit die KS-Rohlinge und die Härtewagen auf eine Temperatur von derzeit 45°C vorgewärmt. Diese Wärme muss dann nicht durch Überlass- oder Frischdampf während des Autoklavierens wieder aufgebracht werden.

In Summe ergibt sich aus dem Einsatz der Wärmetunnel eine Reduzierung des Energieeinsatzes von 122 MWh/a (Kalksandsteinmasse: 80 MWh/a; reduzierter Wassergehalt der Rohlinge auf 4,5%: 15 MWh/a; reduziertes Gewicht der Härtewagen: 27 MWh/a) bzw. eine errechnete CO₂-Einsparung von 24 t CO₂/a.

Vorhergesagt wurde eine Energieeinsparung in Summe von 1.691 MWh/a.

Die große Abweichung lässt sich aktuell dadurch erklären, dass mit dem derzeitigen System die Wärmetunnel lediglich auf eine Temperatur von rund 45°C gebracht werden anstelle der geplanten 60°C. Hier gibt es noch Verbesserungspotential, indem z. B. mit einem höheren Druck der Abdampf in die Wärmetunnel eingeleitet wird. Aus zeitlichen Gründen war dies im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht mehr möglich.

Ob in die Wärmetunnel in bestehende Kalksandsteinwerken nachgerüstet werden kann, ist aufgrund von Platzgründen individuell zu prüfen.

2.3.4 Härteprozess inkl. neuartiger Rückverdampfer

In den bestehenden Kalksandsteinwerken Haltern am See und Wickede werden die die Autoklaven eher diskontinuierlich betrieben. Mit dem Start des Beheizens wird i. d. R. gewartet, bis Dampf aus einem anderen abzuheizenden Autoklav zur Verfügung steht und gleichzeitig ein neuer Autoklav komplett mit Wagen gefüllt ist, die mit KS oder KS-XL beladen sind. Die Prozesszeit hängt ab von der Porosität (je geringer die Porosität desto größer die Packungsdichte desto länger benötigt der Dampf/Kondensat, um in die Steinrohlinge einzudringen) und der Größe der größten Steine. Je größer die Steine, desto länger die Prozesszeit; derzeit beträgt die gesamte Härtezeit im optimalen Fall 460 min bei KS und 640 min bei KS-XL. Aufgrund dieser unterschiedlichen Prozesszeiten ist es in der Industrie nicht unüblich, dass die KS und KS-XL nicht gleichzeitig in einem Härtekessel zusammen gehärtet werden. In Abbildung 13 werden die Härtekurven für KS und KS-XL einmal dargestellt.

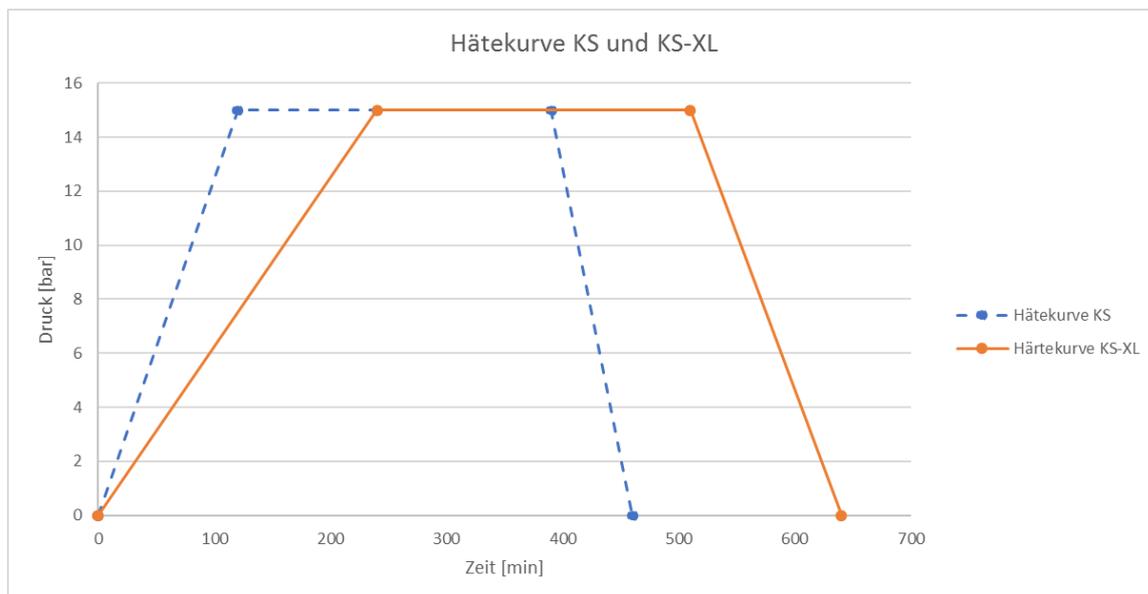


Abbildung 13: Graphische Darstellung der Härtekurven für KS und KS-XL

Beim Aufheizen der Autoklaven mit Wasserdampf fällt kontinuierlich Kondensat an. Aus sicherheitstechnischen Gründen muss dieses Kondensat über Kondensatabscheider aus den Autoklaven ausgeschleust werden. Bisher wurde hierzu das unter Druck anstehende Wasser über ein kurzzeitiges Öffnen des Kondensatventils aus dem Kessel in einen drucklosen Behälter gebracht. Die durch die Entspannung des Kondensates freiwerdende Energie wird dabei an die Umgebung abgegeben und geht verloren.

Ziel dieses Vorhabens besteht nun darin, diese Energie aus der Rückverdampfung zum Aufheizen der Autoklaven wieder zu nutzen. Hierzu wird das aus den Autoklaven anfallende Hochdruckkondensat mit Hilfe von Frischdampf in die Rückverdampfer gebracht. Mit Hilfe eines Wärmetauschers, der mit Frischdampf/Abdampf gespeist werden kann, wird dieses Kondensat auf einen Druck von ca. 5 bar gebracht. Der unter Wasserdampfdruck stehende Rückverdampfer wirkt dabei wie ein weiterer Dampfkessel und dient zum Aufheizen der Autoklaven. Insgesamt wurden in dem Werk zwei Rückverdampfer parallel zu einer Anlage installiert.

Darüber hinaus war Ziel des Projektes die KS und KS-XL Steine mit ihren unterschiedlichen Härtekurven gemischt in einem Autoklaven mit verkürzter Härtezeit zu autoklavieren.

Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben werden die gepressten und auf den Härtewagen gestapelten Steinrohlinge über eine Transportbühne, durch die Wärmetunnel, in die Autoklaven gefahren. Dort werden die Steinrohlinge unter einer gesättigter Wasserdampfatmosfera bei einem Druck von ca. 15 bar und einer Temperatur von ca. 200°C bzw. 15 bar ca. 270 min lang gehärtet. Für KS und KS-XL. Während dieser Zeit findet die unter natürlichen, atmosphärischen Bedingungen nicht stattfindende Reaktion von CaO , SiO_2 und H_2O zu den sogenannten Calcium-Silikat-Hydratphasen (CSH) statt.

Das Aufheizen erfolgt sanft, damit Beschädigungen an den KS-Rohlingen vermieden werden und dauert derzeit ca. 120 min für KS und 240 min für KS-XL. Der Dampf wird zunächst aus einem abzufahrenden Autoklav auf den aufzuheizenden Autoklaven übergelassen. Dies erfolgt im neuen Werk über eine individuell auf das Werk angepasst Dampfmanagementsteuerung, inkl. Autoklaven, Wärmerückgewinnung und Rückverdampfersystem.

Durch die kontinuierliche Sieblinienmessung und Packungsdichteberechnung im neuen innovativen KS-Werk wurden die Rezepturen so aufgestellt, dass die KS und KS-XL Steine gemischt in einem Autoklav, bei niedrigen Härtezeiten gehärtet werden können. Gleichzeitig können so, die Sieblinien der verschiedenen Sande mit Hilfe des akustischen Korngrößenanalysators (Geoscanner) kontinuierlich für jede Charge überwacht und die Packungsdichte automatisch ermittelt werden. Damit wurde ein neuer Prozessparameter geschaffen, der für die Qualitätsüberwachung kontinuierlich genutzt und gemessen werden kann.

Die Überwachung des Parameters der Packungsdichte erfolgt für das Personal anhand von individuell festgelegten Grenzwerten. Bei Nichteinhaltung dieser Grenzwerte müssen die Rezepturen hinsichtlich ihrer Feinheit angepasst werden. Dies erfolgt entweder durch Zugabe von einem gröberen oder feineren Quarzsand. Dies ist individuell vor Ort festzulegen.

Das Ziel einer gemeinsamen Härtung von klein-/mittelformatigen Kalksandsteinen mit den großformatigen Kalksandsteinen mit niedrigen Härtezeiten wurde durch die kontinuierliche Sieblinienmessung mit nachgeschalteter Packungsdichteberechnung erreicht.

Der gesamte Prozess der Rückverdampferanlage ist in Abbildung 14 schematisch dargestellt.

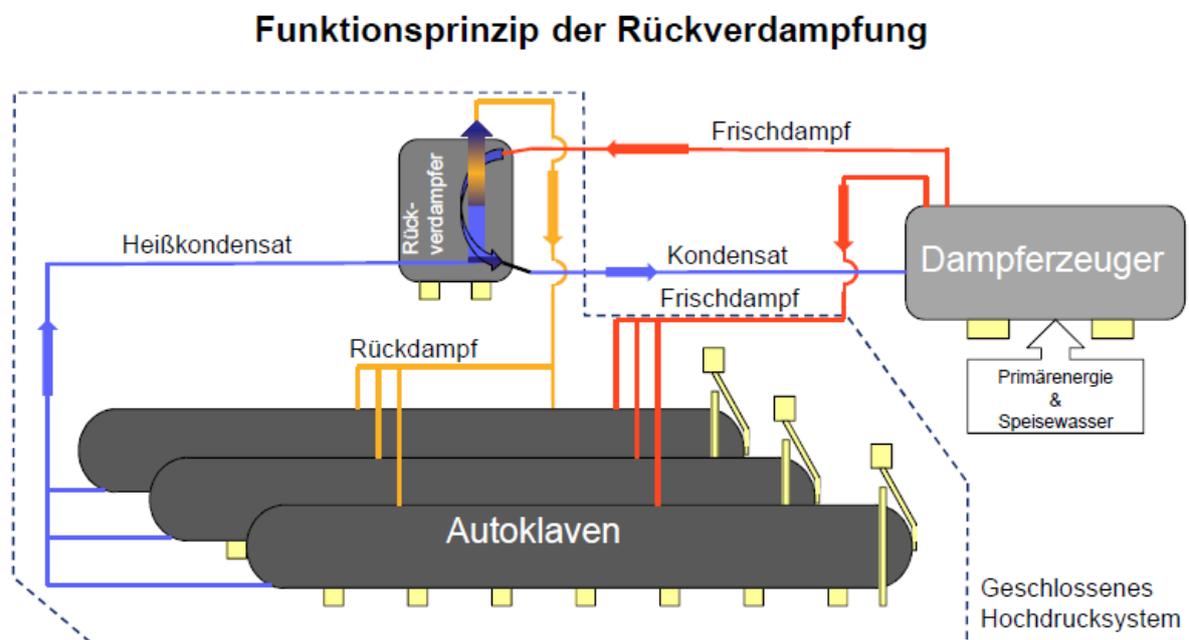


Abbildung 14: Schema der Rückverdampfung (Quelle: HoKa)

Der Vorteil besteht darin, dass die ansonsten bei der Rückverdampfung freiwerdende Energie zum Aufheizen der Autoklaven genutzt wird und nicht wie bisher an die Umgebung verloren geht. Die Fa. HoKa gab hier einen Wert von 25 % des in den Autoklaven eingesetzten Energieeinsparpotential an. In [8] werden 15 % Einsparung in Porenbetonwerken abgeschätzt. In den Antragsunterlagen wurde eine Energieeinsparung von 20 % der für das innovative KS-Werk prognostiziert, was einer Einsparung von 1.914 MWh Erdgas und 383 t CO₂/a entspricht. In der Praxis wurde eine Einsparung von 22% erreicht, auf die etwas später noch einmal genauer eingegangen werden soll.

Abbildung 15 zeigt noch einmal ein Foto der neu errichteten Rückverdampferanlage, bestehend aus zwei Rückverdampfern.



Abbildung 15: Rückverdampferanlage bestehend aus zwei Rückverdampfern

Beim Aufheizen einer neu zu härtenden Autoklavenfüllung wird zunächst der Überlassdampf aus einem fertig gehärteten Autoklav genutzt. Dies kann aus technischer Sicht lediglich bis zum nahen Druckausgleich von rund 2 bar erfolgen. Danach wird der Autoklav aus dem Rückverdampfersystem weiter gespeist (5 bar). Die am maximalen Härtedruck fehlende Energie wird als Frischdampf aus dem Dampferzeuger entnommen (18 bar).

Der aus dem Überlassvorgang verbleibende restliche Abdampf (2 bar) wird zum Aufheizen der Rohlinge der nächsten Kesselreise in den Wärmetunneln (siehe Kapitel 2.3.3) genutzt. In diesem relativ niedrigen Druckbereich von 3 bar befinden sich bis zu 50 % der gesamten Energie, die für eine Autoklavenreise benötigt wird (Forschungsbericht Nr. 112; Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.). Bisher wurde auch diese Energie nicht genutzt und ging verloren.

Ein weiterer Vorteil - neben der Nutzung der Energie durch die Rückverdampfung aus dem Hochdruckkondensat der Autoklaven - besteht darin, dass gleichzeitig das anfallende Kondensat aus der Beheizung des Rückverdampfers als Kesselspeisewasser direkt wieder genutzt werden kann. Anfallendes Kaltkondensat gelangt über einen Überheber ebenfalls in die Rückverdampfer und wird dort wiederverwertet. Das Dampfmanagement inkl. Wärmerückgewinnung ist so aufgebaut, dass die Dampfkesselanlage inkl. Autoklaven mit Zuschaltung und Abschaltung des Rückverdampfersystems gefahren werden kann. So ist es möglich das Rückverdampfersystem energetisch und abwassertechnisch zu bilanzieren und am Ende zu bewerten.

Bei der Fahrweise ohne Rückverdampfersystem benötigen wir pro t KS-Material eine Energiemenge von rund 90 kWh/t (gemischt über groß- und mittelformatige Kalksandsteine). Schalten wir das Rückverdampfersystem hinzu, reduziert sich der Energieverbrauch auf unter 70 kWh/t, was eine Reduzierung von rund 22 % entspricht. Für das innovative Werk wurde eine Einsparung von 20 % angenommen. Das Ziel wurde damit erreicht.

Bezüglich der Wasserbilanz beträgt der Abwasseranteil aus der Dampferzeugung ohne die Fahrweise mit der Rückverdampferanlage rund 63 % und mit der Rückverdampferanlage bei 10 %. Hier konnte der Abwasseranteil von 5 % nicht ganz erreicht werden, jedoch beträgt hier das Reduzierungspotential bei immerhin über 90 %.

Das über die Rückverdampferanlage wieder aufbereitete Kondensat geht zu 100 % zurück in die Dampfkesselanlage.

Das Risiko bei dieser Innovation war in der erstmaligen Realisierung in einem KS-Werk zu sehen. Bislang existierte nur eine Pilotanlage in einem Porenbetonwerk, ging aber unseres Kenntnisstandes dort nicht in den Regelbetrieb. Dies lag nach unserer Einschätzung in den Fremdstoffen aus Kieselsäure, chlorid- und sulfathaltigen Salzen, die bei KS-Werken nicht vorkommen. Erfahrung lagen bei Cirkel in Haltern durch das drucklose Destillieren von entspannten Kondensat und die Verwendung des destillierten Wassers im Dampferzeuger. Die bei der Entspannung freiwerdende Energie geht in Haltern allerdings verloren.

Die größte Herausforderung bei der Inbetriebnahme der Rückverdampferanlage besteht und bestand darin diese in die Taktung der Autoklavfahrweise einzubinden. In vielen Fällen blockiert die Rückverdampferanlage das Überlassen von Dampf von einem abzuheizenden Autoklav in einen aufzuheizenden Autoklav, insbesondere im niedrigen Dampfdruckbereich.

Ob dieses Rückverdampfersystem in bestehende Kalksandsteinwerke nachgerüstet werden kann, ist individuell zu prüfen. Die Schwierigkeiten bestehen darin die Rückverdampfer über weitere Rohrleitungssysteme und in das Wärmerückgewinnungssystem des jeweiligen KS-Werkes einzubinden. Ggf. müssen umfangreiche werksinterne Anpassungen erfolgen.

2.3.5 Werksteuerung und Werksimulation

Ziel dieser Innovation ist es alle am Herstellungsprozess beteiligten Anlagenkomponenten zu einer Werkssteuerung miteinander zu verbinden. Darüber hinaus soll das gesamte Kalksandsteinwerk als „digitaler Zwilling“ virtuell dargestellt und simuliert werden.

Der Produktionsprozess kann über den digitalen Zwilling, der Anbindung an die Werkssteuerung mit Echtzeitdaten simuliert werden. Dadurch sollen folgende Prozesse optimiert und verbessert werden:

- Optimierung der Produktion und Steigerung der Produktivität
- Vorhersage der Auswirkung zukünftiger Investitionen
- Optimierung des Härteprozess und damit Energieeinsparung
- Maximale Flexibilität

In den bestehenden Cirkel-Werken besitzen die einzelnen Maschinen/Anlagen zwar hochmoderne Steuerungen, diese sind aber nicht mit- und untereinander verknüpft.

Nach unseren Erkenntnissen wurden in der Kalksandsteinindustrie zwar einzelne, wenige Werke virtuell simuliert, jedoch müssen die einzelnen Prozessparameter händisch in das Modell eingegeben werden.

Alle an der Wertschöpfungskette beteiligten Prozesse vom Auftragseingang, über die Rohstoffbestellung und -anlieferung, von der Rezepturberechnung, dem Mischprozess, dem Verdichtungsvorgang an den Pressen, dem Härteprozess, der Verpackung, der Lagerung bis hin zur Auslieferung an den Kunden wurden miteinander verknüpft. Durch diese Verknüpfung ist jederzeit ein Zugriff auf die Realdaten der einzelnen Anlagenteile gewährleistet.

Die Verknüpfung aller Anlagenkomponenten mit Zugriff auf die Realdaten wird dazu genutzt, das komplette Werk analog eines digitalen Zwillings zu simulieren. In Abbildung 16 ist das Ergebnis der Werksimulation einmal dargestellt.

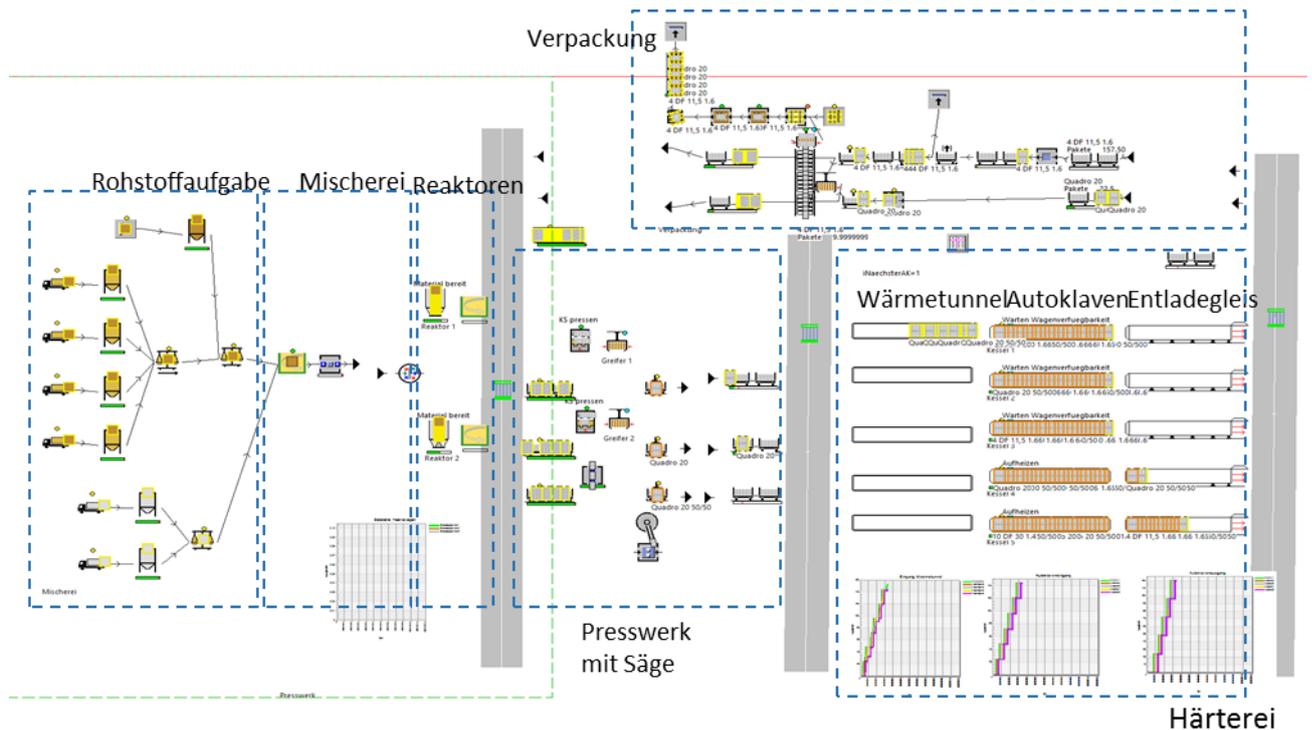


Abbildung 16: Werkssimulation

Mit Hilfe der Simulation wurde ein Modell aufgestellt, indem alle Prozesse abgebildet werden. Hierzu ist der Zugriff auf Realdaten der jeweiligen Anlagenteile zwingend erforderlich. Durch die Modellierung und Verknüpfung der einzelnen Arbeitsschritte können die innovativen Aspekte des neuen Werkes verifiziert und validiert werden. Die Simulation dient jetzt zu laufender Kontrolle von Produktivität und Umwelteffekten.

- So ist es möglich die jeweiligen Rezepturen über den Packungsdichterechner direkt mit den einzelnen Produktformaten zu verknüpfen, um Maschinenrüst- und Ausfallzeiten optimal vorherzusagen. Daraus ergeben sich eine optimale Pressenleistung und die hierzu benötigte Anzahl an Autoklaven. Engpässe können im Vorfeld erkannt und korrigiert werden. Dies bedeutet eine bessere Produktionsauslastung bei minimalem Energieeinsatz.
- Optimierung der einzelnen Prozessschritte wie Fahrweise der Rohlingsbühne, Zuordnung der Autoklaven zu den verschiedenen Steinformaten und der Verpackungsanlage.
- Zur Verifizierung der Rohstoff- und Energieverbräuche werden alle relevanten Verbräuche in Abhängigkeit der produzierten Steinformate dokumentiert und ausgewertet.
- Implementierung der Fahrweise des Rückverdampfers in Verbindung mit dem eigentlichen Dampferzeuger und den Autoklaven.

Die Validierung erfolgt anhand von Ergebnissen realer Produktionstage und Produktionswochen. Dabei erfolgte die Datenaufbereitung und -auswertung durch die Projektleitung mit Unterstützung des Baustoffprüfers. Die Modellierung erfolgte um das Team von Herrn Prof. Schuderer, Technische Hochschule Ingolstadt, der in der Fertigungsmodellierung erfahren ist.

Erste Erfahrungen mit dieser Werkssimulation haben gezeigt, dass einzelne Produktionsschritte zu einem gleichmäßigeren Produktionsfluss angepasst werden konnten, da Engpässe während einer Produktionswoche frühzeitig erkannt und angepasst werden konnten. Eine Quantifizierung dieser Anpassungen ist derzeit aufgrund der wenigen Erfahrungen noch nicht möglich.

Vielversprechend ist aber sicherlich die Anbindung des Modells an die Autoklavensteuerung, so dass hier entsprechend der Verfügbarkeit der Härtekessel, jede Härtekurve individuell in Bezug auf Druck, Temperatur und Haltezeit angepasst werden kann. Mit dieser Maßnahme kann sicherlich Energie eingespart werden, die ebenfalls zum jetzigen Zeitpunkt nicht quantifiziert werden kann.

2.4 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Der Nachweis der Produktivität und Energieeinsparungen erfolgte durch die Messungen beim Einfahren der Anlagen und im Probetrieb. Die spezifische Zuordnung zu den Einzelmaßnahmen erfolgt im Rahmen des Sondermessprogramms, das im Rahmen der üblichen Qualitätskontrolle nicht durchgeführt werden würde. In Kapitel 2.5 wird auf diese zusätzlichen Arbeiten kurz eingegangen.

2.5 Konzeption und Durchführung des Messprogramms

Die Methode der kontinuierlichen Sieblinienmessung mit einem Geoscanner wurde in Forschungsarbeiten mit Prof. Tudeshki der TU Clausthal und der Firma TIPCO GmbH entwickelt. Um mit Hilfe des Geoscanners die Sieblinien für die unterschiedlichen Quarzsande zu erhalten, musste der Scanner im Vorfeld für jeden Quarzsand kalibriert werden. Zur Kalibrierung wurden die vier unterschiedlichen Sande über mehrere Wochen hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung durch einen Baustoffprüfer vermessen. Hierzu wurden die Sande getrocknet und anschließend über einen Siebturm abgeseibt.

Die Programmierung der Software zur kontinuierlichen Packungsdichteberechnung erfolgte durch die Firma pdv-software GmbH. Zu jeder Rezeptur wurde die Packungsdichte anhand der Sieblinien durch die Projektleitung händisch mit dem bestehenden Exceltool berechnet und anschließend festgelegt. Die mit diesen Rezepturen hergestellten Kalksandsteine musste hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, wie Druckfestigkeit, Trockenrohdichte, Maßhaltigkeit verifiziert und validiert werden. Bei Abweichungen wurden Anpassungen in der Rezeptur vorgenommen und der Verifizierungs- und Validierungsprozess von neuem gestartet werden. Dieses erfolgte durch die Projektleitung und dem Baustoffprüfer.

Die Multifunktionsanlage wurde von Cirkel konzipiert und mit 2 möglichen Lieferanten durchgeplant. Angebote mit Garantieleistungen zur gewünschten Funktionalität wurden Vorfeld erarbeitet. Umgesetzt wurde das Vorhaben mit der Fa. LASCO Umformtechnik GmbH, einem Maschinenbauspezialist zum Bau von Pressenanlagen. Bei der Pressenanlage inkl. Säge handelt es sich um einen Prototyp. Die Inbetriebnahme war nicht ganz problemlos, verbunden mit einer zeitlichen Verzögerung. Auch hier wurden Anpassungen gemacht, die anhand der mechanischen Eigenschaften durch den Baustoffprüfer verifiziert werden mussten.

Die Werksautomatisierung wurde in Zusammenarbeit mit Prof. Schuderer mit simulationsbasierten Optimierungen während des laufenden Betriebs vorkonzipiert. Dadurch wurden eine hohe Auslastung der Anlagen und eine Reduktion der Anzahl der Pressen und Autoklaven mit einer Einsparung von Kosten, Flächen, Massen und Energie möglich.

Die Rückverdampfung für Porenbetonprodukte geht zurück auf ein Forschungsprojekt von HoKa Gesellschaft für Entwicklung und Vertrieb elektronischer Schaltungen mbH mit der RWTH Aachen [8]. Die Einsetzbarkeit zur Produktion von Porenbetonsteinen wurde dort grundsätzlich untersucht und es wird in eine Pilotanlage in einem Porenbetonwerk seit einiger Zeit in Fertigungsversuchen erprobt. Die erreichte Energieeinsparung liegt bei bis zu 20% [9]. Die Übertragung der Anwendung auf Kalksandsteinwerke wurde gemeinsam mit HoKa erarbeitet. Da es sich auch hier um einen Prototyp in der Kalksandsteinindustrie handelte musste der Rückverdampfer zunächst von Hand gefahren werden, um anschließend die Fahrweise zu programmieren. Bis zur automatischen Fahrweise musste das System mehrmals angepasst werden. Dies erfolgte anhand für dieses Projekt installierten Sensoren und der gemessenen Wasser bzw. Energiemengen. Neben den Kosten für die Sensorik vielen Personalaufwendungen für die Programmierung und Überwachung der Ergebnisse durch die Projektleitung sowie Baustoffprüfer an. Trotz der längeren Einführungsphase wurden die wirtschaftlichen Erwartungen erfüllt.

Wärmetunnel: Die Energieeinsparung wurde errechnet aus der Wärmekapazität und einer Erwärmung von 30°C auf 60°C, die jetzt nicht mehr mit Frischdampf erfolgen muss. Anhand von Echtzeitdaten wurde festgestellt, dass die Erwärmung über den Wärmetunnel lediglich von 40°C auf 45°C erfolgt. Wie bereits oben beschrieben gibt es hier noch reichlich Verbesserungspotential, indem z.B. der Abdampf mit einem höheren Druck in die Wärmetunnel eingeleitet wird. Hierzu sind mechanische Anpassungen erforderlich. Aus zeitlichen Gründen war dies im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht mehr möglich.

3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung

Trotz der Probleme Prototypen, zeitlichen Verzögerung beim Aufbau des Werkes, verlängerte Hochlaufphasen der einzelnen Anlagen, Mehrinvestition der innovativen Komponenten, führte das Vorhaben zum geplanten Ergebnis und die Erwartungen wurden erfüllt.

3.2 Stoff- und Energiebilanz

Erste Umweltschutzwirkung ist der Klimaschutz durch die angestrebten Reduktionen der direkten und indirekten CO₂-Emissionen.

Diese Umweltschutzwirkungen wurden erstmalig demonstriert und in der Folge bei Nachrüstungen oder Ersatzinvestitionen in existierenden Werken sowie bei Neubauten anderer Werke ein Vielfaches an Umweltschutzeffekten bewirken.

Durch Effizienzmaßnahmen wurden die Verbrennung von Erdgas zur Dampferzeugung und damit deren CO₂-Emissionen um 44 % gegenüber einem konventionellen Werk mit Kondensataufbereitung durch Destillation reduziert, das sind 1.707 t CO₂ / Jahr.

Beim Vergleich des innovativen Werkes mit einem konventionellen Referenzwerk ohne Kondensataufbereitung konnten 25% CO₂-Emissionen bzw. 748 t CO₂ / Jahr eingespart werden.

Vorgelagerte Emissionen von CO₂ aus der Kalkherstellung wurden durch Minimierung des Kalkanteils im Kalksandstein um 1.267 t CO₂ / Jahr reduziert.

Vorgelagerte Emissionen bei der Stahlherstellung trugen durch Minimierung des Anlagenparks eine CO₂-Reduktion von 28 t/ Jahr bei.

Zweite Umweltschutzwirkung ist die Reduktion des Ressourcenverbrauchs:

Durch Maßnahmen, die auch dem Klimaschutz und der Produktivität zugutekommen, wurden außerdem pro Jahr 1.056 t Kalk und 1.879 t an feinem Quarzsand eingespart. Durch das Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen wurde der Stahlverbrauch für die Anlagentechnik um 291,5 t reduziert. Die Zahlenwerte sind der Tabelle 2 zu entnehmen, in der das Referenzwerk dem innovativen neuen Werk gegenübergestellt ist.

Durch die Effizienz und reduzierte Anlagentechnik ergab sich zudem ein um 1.300 m² reduzierter Flächenbedarf im Vergleich zum Referenzwerk.

3.3 Umweltbilanz

In Tabelle 2 werden die erzielten Umwelteffekte des Referenzwerk gegen das neue innovative Kalksandsteinwerk gegenübergestellt. Bei den in der Tabelle aufgeführten Angaben-Werte handelt es sich bei dem innovativen Werk um extrapolierte Werte, die auf die Produktionsmengen des Referenzwerkes errechnet wurden.

Tabelle 2: Erzielte Umwelteffekte durch das innovative Werk. Angabe Zielerreichung in „%“

Vergleich der prognostizierten mit den erzielten Umwelteffekte	Referenzwerk	Innovativ	Umweltentlastung
			Innovatives Werk
Materialeinsparung durch Packungsdichtekontrolle PDK			
Kalkeinsatz (t / Jahr) (Mischung mit 90% CaO-Anteil)	6.816	5.760	1.056
Sandeinsatz (t / Jahr)	86.780	84.901	1.879
Splitteinsatz (t / Jahr)	3.519	3.519	0
Materialeinsatz Trockenmaterial (t/Jahr)	97.115	94.180	2.935
Stahl			
Stahl für Pressen (t) mit innovative Passteinpresse für KS-XL	48 + 2x56	48 + 56	56
Stahl für XL-Pressenwerkzeuge	2x(2x19,5)	1x(7x6)	36
Stahl für Reaktor (t) 2 statt 3 durch innovative Passteinpresse	3x34	2x34	34
Stahl für Autoklaven à 52,1 t (t) 5 statt 8 durch Sieblinienmessung/PDK	8x52	5x52	156
Stahl für Härtewagen 213 statt 268 und 350 statt 400kg (in t)	107,2	74,55	32,7
Stahl gesamt (in t)	832,0	540,55	291,5
Flächen			
Flächen Reaktor, Nachmischer, Pressen (m²)	960	640	320
Fläche Autoklaven (m²)	2.592	1.620	972
Fläche Gesamt	31.292	30.000	1.292
Erdgaseinsatz für Dampf (in MWh Erdgas, 85% Nutzungsgrad)			
Energiebedarf Dampf (kWh Erdgas /m³ KS) bei 100% Befüllung bisher und zukünftig, 40.000 m³	166	166	
Energiebedarf Dampf (kWh Erdgas /m³ KS-XL) Kürzere Zykluszeit 19.000m³	195	195	
Energiebedarf Dampf (MWh Erdgas / Jahr), durch PDK Weniger Verluste durch kürzere Zykluszeit KS-XL 20.000m³	3.900	3.705	195
Energiebedarf Dampf (MWh Erdgas / Jahr), ohne weitere Effekte bei 100% Befüllung bisher und zukünftig, 40.000 m³ KS	6.640	6.640	
Energiebedarf Autoklavierung ohne Kondensataufbereitung (MWh/a)	10.540	10.345	195
Kondensataufbereitung durch Überdestillation: Dampf MWh Erdgas/a	4.795	0	
Erdgaseinsatz für Dampferzeugung gesamt (MWh/a)	15.335	10.345	
Weniger Energieverluste durch kürzere Zykluszeiten bei 20.000 m³ KS-XL	0	195	
Wassergehalt 4,5% statt 6% bei neuer Presse und PDC, 20°C → 200°C	0	347	347
Härtekessel , Aufheizen nach Abkühlen, Anzahl nur 5 statt 8 (in MWh/a) durch Simulation Gesamtanlage, Industrie 4.0 und PDK	0	845	845
Wärmetunnel : Dampfeinsatz (MWh Erdgas/a), Vorwärmung abgezogen	0	122	122
Rückverdampfung : zusätzlich Rückverdampfung MWh/a	0	2.040	2.040
Erdgaseinsatz für Dampferzeugung gesamt, bei Referenzwerk ohne Kondensataufbereitung (MWh/a)	10.540	6.796	3.744
Erdgaseinsatz für Dampferzeugung gesamt, bei Referenzwerk mit Kondensataufbereitung (MWh/a)	15.335	6.796	8.539
Dieseleinsatz			
Diesel in Liter / Jahr (derzeit 0,5l/m³ KS Haltern)	30.000	0	30.000
Lagerstapler in MW/a (9,89kWh/l Diesel, 0,5l/m³ KS in Haltern)	297	0	297
Stromeinsatz			
Strom Elektrostapler in MWh/a (17kWh el / 8 l Diesel lt. Hersteller)	wurde nicht gefördert		
Stromeinsatz Mischer, Effekt der Packungsdichtekontrolle PDK (MWh/a)	206	267	-61,0
Stromeinsatz Multifunktionsanlage mit Werkzeugen			
Strom Vakuumpumpen + Greifer + SägeKS-XL Steine (MWh/a)	39,5	11,6	27,9
Strombedarf Werkzeugaufheizen für KS-XL Steine (MWh/a)	34,4	2,6	31,8
Stromverbrauch KS-XL-Pressen (MWh/a)	420,2	360,5	59,7
Sonstiges: Pumpen, Bühnen, Krane, Beleuchtung, Kompressor etc.	431,8	431,8	0,0
Strom Pressen Klein- & Mittelformate (MWh/a) 40.000m³, 9,9 kWh/m³	396	396	0,0
Strom Pressen (MWh/a) 60.000m³ Produktmix neues Werk	816,2	756,5	59,7
Strombedarf Anlagentechnik	1.454	1.455	118
Strombedarf gesamt (MWh/a)	1.454	1.455	-1
CO2-Emissionen			
CO2-Emissionen aus Kalk-Herstellung 1,2 t CO2/ t Kalk (in t CO2)	8.179	6.912	1.267
CO2-Fußabdruck Stahl 2,88t CO2/t in t CO2/ a (über 30 Jahre)	79,9	51,9	28,0
CO2-Emissionen vorgelagert in t CO2 / a	8.307	7.010	1.295
CO2-Emissionen aus Erdgas (0,200t/MWh) in t CO2/ a	3.067	1.359	1.708
CO2-Emiss. Netzstrom (0,584t CO2/MWh) in t CO2/ a	849	850	-1
CO2-Emissionen im Betrieb in t CO2 / a.	3.916	2.209	1.707
CO2-Emissionsreduktion inkl. vorgelagerte Emissionen in t CO2 / a	12.223	9.220	3.002

3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Aufgrund der erst kurzen Laufzeit des Werkes ist eine vollständige Wirtschaftlichkeitsanalyse zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich. Grundsätzlich kann zwischen den Mehrinvestitionen für die innovativen Anlagen und den reduzierten Betriebskosten bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse des Projektes unterschieden werden.

Die Mehrinvestitionen für innovative Anlagenteile summieren sich auf 5,8 Mio. €, wobei die Multifunktionslage samt dazugehöriger Werkzeuge die größten Positionen ausmachen. In Summe sind im Bereich der Verdampfung sowie des Wärmetunnels Investitionskosten von über 1 Mio. € angefallen. Diese beziehen sich neben den Anlagen und dem Bauwerk der Wärmetunnel selbst auch auf Rohrleitungen, Ventile sowie die erforderliche Steuerung. Nicht mitgerechnet sind interne Inbetriebnahmekosten.

Weitere innovative Anlagen, die unmittelbar mit hohen Energiestoffeinsparungen zusammenhängen (Füllstandsmessung, Packungsdichte-/Sieblinie und Werkssimulation) haben weitere Investitionen in Höhe von ca. 150.000,00 € ausgelöst. Da es sich bei den Anlagen um Prototypen handelt, hat deren Einführung zu gewissen Verzögerungen geführt. Zudem war eigenes Personal über Monate mit der Inbetriebnahme und Fehlerbehebung der innovativen Anlagen gebunden.

Grundsätzlich sind die Mehrkosten für die neuartigen Anlagen im Falle von Nachrüstungen in Bestandswerken ähnlich anzusetzen, wobei inflationsbedingte Mehrkosten zu berücksichtigen sind. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Inbetriebnahme und Einstellung der Anlagen aufgrund der gemachten Erfahrungswerte deutlich schneller und mit geringerem Aufwand möglich sind.

Bei den Betriebskosten ist insbesondere beim Gasverbrauch eine Einsparung im Vergleich zum konventionellen Werk vorhanden. So beträgt die Einsparung auf Basis des Referenzwerkes 3,74 Mio. kWh (ohne Berücksichtigung der Kondensataufbereitung). Bezogen auf einen reinen Arbeitspreis für Gas von 7 Cent/kWh (festgelegte Gaspreisbremse für das Jahr 2023) bedeutet dies eine jährliche Kostenersparnis von 261.800,00 €.

Im Bereich der Rohstoffe ergibt sich die wesentliche Einsparung der Betriebskosten aus dem reduzierten Kalkverbrauch. Unter der Annahme eines Kalkpreises in Höhe von 200,00 €/t einschließlich der Frachten ins Werk ergeben sich bei einer Ersparnis von 1.000 t Kalk 200.000,00 € geringere Betriebskosten. Des Weiteren können durch den Packungsdichterechner 1.000 t Sand eingespart werden. Aufgrund des vergleichsweise geringen Preises dieses Rohstoffs resultieren hieraus keine deutlichen Betriebskosteneinsparungen.

Durch die Multifunktionsanlage reduzieren sich die Rüstvorgänge und damit der Personaleinsatz deutlich, da mit dieser Anlage für jede Wandstärke sämtliche Teilsteine ohne Umrüsten der Anlage mitgefertigt werden. Unter der Annahme, dass so ein zweistündiger Rüstvorgang mit zwei Mitarbeiter pro Produktionswoche eingespart wird ergeben sich bei 48 Produktionswochen 192 Mitarbeiterstunden pro Jahr.

Die Gesamtamortisation der Investition in das neue Kalksandsteinwerk war bei Projektbeginn mit 10 - 12 Jahren avisiert. Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses ist nach wie vor von einer ähnlichen Amortisationszeit auszugehen.

4. Übertragbarkeit

4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Die Abstimmung zwischen verschiedenen Lieferanten erwies sich als komplexer als ursprünglich gedacht. Zudem änderten sich bei manchen Anlagenteilen im Laufe der Konstruktion noch die statischen Lastangaben. Dies machte eine Anpassung der Statik erforderlich. Dies hing insbesondere damit zusammen, dass bei Prototypen, wie Multifunktionspresse oder Rückverdampfungsanlage die genauen Lasten vorab nicht feststanden.

Die Abstimmung im Bereich der Fundamentpläne zwischen Anlagenbau und Generalunternehmer war herausfordernd und bedurfte intensiver Abstimmungen

Unerwartete Schwierigkeiten machte zudem die Bauwasserhaltung, was zu einer Verlängerung der Bauzeit führte.

Beim Wärmetunnel wurde der Einfluss der mit dem Dampf verbundenen Feuchtigkeit auf das Mauerwerk nicht richtig berücksichtigt. Daher musste die komplette Konstruktion überplant werden.

Aufgrund der hohen Anzahl an Innovationen waren einige Optimierungen im Praxisbetrieb notwendig, die auch laufend weiter betrieben werden, wobei die sich ändernden Qualitäten, Größen und Größenmengen berücksichtigt werden müssen. Der Aufwand war aber durch die detaillierten Anforderungen für unsere Fachkräfte mit vertretbarem Aufwand beherrschbar.

Bei der Multifunktionsanlage mussten die Werkzeuge noch einmal überarbeitet werden, da die Heizung zunächst nicht richtig funktionierte.

Des Weiteren bestanden keine Erfahrungen mit den meisten Anlagen, da sie auch in den Bestandswerken nicht existieren und somit kein Know-how Transfer ins neue Werk erfolgen konnte.

4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit

Das neue Werk setzt Maßstäbe für weitere Werke. In Deutschland gibt es derzeit 85 Kalksandsteinwerke. Das letzte wurde 1997 gebaut. Hier ist ein Ersatzbedarf abzu-sehen.

Der Bedarf an Wohnungen in Deutschland liegt bei ca. 400.000 Wohnungen p. a.in den nächsten Jahren. Dies entspricht auch dem Ziel der Bundesregierung.

Die Belegung des Wohnungsbaus wird regional unterschiedlich ausfallen. Während im Osten Deutschlands mit Ausnahme des Großraums Berlin wenig Bedarf besteht, ist in den anderen Regionen - unter anderem auch im Nordwesten - ein deutlicher Mehrbedarf erkennbar. Kalksandstein ist das führende Mauerwerksprodukt, in der Region westliches Niedersachsen mit einem Marktanteil von über 50 %. [11]

Zur Deckung des Mehrbedarfs ist der Neubau von KS-Werken abzusehen. Die Firma Cirkel hat das für ihr Einzugsgebiet bewertet und sieht Platz für ein neues Werk.

Teile der Innovationen sind in Nachrüstungen umsetzbar, im Einzelfall aber jeweils zu prüfen. Dies gilt für die kontinuierliche Siebkennlinienmessung und Dichtebestimmung, für die Rückverdampfung, die Wärmetunnel und auch für die Multifunktionsanlage.

Ein Einsatz der innovativen Anlagen werden in den existierenden Werken der Cirkel GmbH & Co. KG derzeit geprüft. Grundsätzlich ist die Nachrüstung bis einige wenige Einschränkungen möglich. So können beispielsweise die Wärmetunnel aufgrund des Werkslayouts am Standort Haltern am See nicht nachträglich errichtet werden. Die Nachrüstung der Multifunktionsanlage ist in allen Bestandswerken aufgrund der Platzverhältnisse möglich sobald eine bestehende Kalksandsteinpresse das Ende ihres Lebenszyklus erreicht hat.

5. Zusammenfassung/ Summary

Die Firma Cirkel GmbH & Co. KG verfügt über 5 Werke an den 4 Standorten: Haltern am See, Emsdetten, Bad Salzdetfurth und Wickede. Mit ca. 140 Mitarbeitern werden hochwertige Baustoffe (PORIT-Porenbeton, CIRCOSICHT®-Verblender, KS-PLUS- oder KS* Kalksandsteine) für den Baustoffmarkt produziert und Lösungen, die als Granulate (CIRCOLIT®, CIRCOSIL®) in den verschiedensten Industriezweigen eingesetzt werden.

Bei bestehenden Kalksandsteinwerken in Deutschland handelt es sich im Wesentlichen um Werke mit älteren Produktionsanlagen. Werksneubauten wurden in den vergangenen Jahren in der gesamten Branche nicht realisiert. Diese älteren Produktionsanlagen waren hinsichtlich ihres damaligen Marktes mit großen Produktionsmengen und wenigen Produktvarianten ausgelegt. Dieser Markt hat sich in den letzten Jahren komplett verändert. So ist ein stetiger Anstieg bei den Produktvarianten mit anderen Rohstoffen festzustellen, was zu einem massiven Anstieg der Bestände und dem damit verbundenem Bedarf an Lagerplatz geführt hat. Dies wiederum bedeutet eine deutliche Steigerung der Rüstkosten bei einer zu geringen Auslastung der Anlagen. Die bestehenden Werke sind für die heutigen Anforderungen nicht optimal ausgelegt.

Aus diesem Grund ist das Ziel des Vorhabens, in einem mustergültigen Werksneubau folgende Innovationen in einem Kalksandsteinwerk erstmalig anzuwenden: kontinuierlicher Siebkennlinienermittlung und Packungsdichtebestimmung während des Mischprozesses, massereduzierte und energieeffiziente Multifunktions-Pressanlagen, Industrie 4.0 Werkssteuerung und die Energieeffizienzmaßnahmen Rückverdampfung, massearme Härtewagen und Wärmetunnel.

Aus dem Zusammenwirken verschiedener Innovationen resultierten gegenüber einer neuen Anlage nach Stand der Technik bezogen auf ein Referenzwerk erstmalig die Umweltvorteile:

- Reduktion Stahlverbrauch für die Anlagenherstellung um 292 t (-35 %): Dampfhärtekessel, Reaktoren, Nachmischer, Steinpressen, Presswerkzeuge und Härtewagen.
- Reduktion Erdgasverbrauch um 8.048 MWh (53 %)
- Die Materialeffizienz wurde gleichzeitig erhöht: 15 % weniger Kalk und 2 % weniger Sand.

Die CO₂ -Einsparungen an Energieträgern im Betrieb sind damit 1.609 t/a (41 %), unter Berücksichtigung vorgelagerter Emissionen an Materialien 2.676 t/a (68 %).

Realisiert wurden die Ziele durch die Umsetzung folgender Innovationen. Zum einen wurde eine kontinuierliche Sieblinienmessung sowie Berechnung der Packungsdichte eingeführt. Zum anderen realisierte die Multifunktionsanlage signifikante Energie- sowie Ressourceneinsparungen. Neben der Werksautomatisierung sowie der Rückverdampfung trugen die Härtewägen ebenfalls einen enormen Teil zur Zielerreichung bei.

Bei diesem Projekt handelt es sich aufgrund der Vielzahl an neuen Anlagen um das innovativste Kalksandsteinwerk Deutschlands, welches mit dieser Effizienz voll automatisiert ist. Damit ist es als Pionierprojekt anzusehen, welches in der Zukunft in dieser Branche als Vorbild für die Modernisierung und Neuerrichtung von Werken gilt.

6. Literatur

[1] Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV: Mengenmäßiger Betriebsvergleich 2019, Interne Industriestudie, Hannover, 2019

[2] Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV: Mengenmäßiger Betriebsvergleich 2021, Interne Industriestudie, Hannover, 2021

[3] W. Eden, T. Kaczmarek, G. Meyer, G. Waltermann, H. Zapf, Ökobilanz für den Baustoff Kalksandstein und Kalksandstein-Wandkonstruktionen, Forschungsbericht Nr. 82 der Forschungsvereinigung Kalk Sand eV, Hannover, November 1995.

[4] Institut für Bauen und Umwelt eV IBU: Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2, Kalksandstein Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV, EPD, Deklarationsnummer: EPD-BKS-20210205-IBE1-DE, Berlin, September 2021

[5] Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland, Eine Studie für den Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV, FutureCamp Climate GmbH, München, 2021

[6] Wolfgang Eden: „Einfluss der Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen auf die Scherbenrohddichte von Kalksandsteinen“, Dissertation, in: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 15, Kassel University Press (2011), ISBN 978-3-86219-040-9

[7] Wolfgang Eden, Wolf-Dieter Steinmann: „Reduzierung des Energieverbrauchs und der produktionstechnisch bedingten CO₂-Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch energietechnische Optimierungsmaßnahmen“, Abschlussbericht über ein Forschungsvorhaben der FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND EV und DLR, Institut für technische Thermodynamik, Stuttgart, gefördert unter dem Az.: 26378-24/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Forschungsbericht Nr. 112, Dezember 2010

[8] Andreas Hovestadt, Holger Nebel: „Entwicklung eines geschlossenen Produktionskreislaufs für die Herstellung von Porenbeton mit dem Ziel der Dampfenergie- und Abwassereinsparung beim Härtingsprozess“, Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az.: 29683 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Juli 2014)

<https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-29683.pdf>

[9] DBU Jahresbericht 2013, S. 34

[10] W. Eden (Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV), C. Geisenhanslüke, M. Schmidt (Uni Kassel), A. Glaubitt, B. Middendorf (Uni Dortmund): „Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen. Optimierung des Kalksandstein-Gefüges - Teil 2; Entwicklung von Grundlagen für ein Expertensystem zur Rezepturauslegung von Kalk-Sand-Rohmassen“, AiF-Nr. 14526-N, Forschungsbericht 107 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV (2008)

[11] Institut der deutschen Wirtschaft, Weiterhin hohe Wohnungsbedarfe - vor allem in Großstädten. Aktuelle Ergebnisse des IW-Wohnungsbedarfsmodells, Ralph Henger / Michael Voigtländer, Köln, 19.11.2021. Abbildung 4-3: Zukünftige Wohnungsbedarfe auf Kreisebene-