

HoKa Gesellschaft für Entwicklung und Vertrieb elektronischer  
Schaltungen mbH, Würselen;  
Institut für Bauforschung der RWTH Aachen University

**Entwicklung eines geschlossenen Produktionskreislaufs  
für die Herstellung von Porenbeton mit dem Ziel der  
Dampfenergie- und Abwassereinsparung beim  
Härtungsprozess**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az.: 29683 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Andreas Hovestadt & Dr. rer. nat. Holger Nebel

Juli 2014

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>29683</b>	Referat	<b>21/0</b>	Fördersumme	<b>55.000,00 €</b>
----	--------------	---------	-------------	-------------	--------------------

**Antragstitel**                      **Entwicklung eines geschlossenen Produktionskreislaufs für die Herstellung von Porenbeton mit dem Ziel der Dampfenergie- und Abwassereinsparung beim Härtingsprozess**

**Stichworte**                      Verfahren  
Abwasser, Energie, Kreislauf

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>18 Monate</b>	<b>30.11.2011</b>	<b>29.05.2014</b>	

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	HoKa Gesellschaft für Entwicklung und Vertrieb elektronischer Schaltungen mbH	Tel 02405/897 903 Fax 02405/897 904
		Projektleitung Dipl.-Ing. Andreas Hovestadt
	Am Mühlenhaus 8 52146 Würselen	Bearbeiter Dipl.-Ing. Andreas Hovestadt

**Kooperationspartner**

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Ziel ist die Einsparung von Dampfenergie und Abwasser bei der Porenbetonherstellung durch Aufrüstung eines Autoklavens mit einem Rückverdampfer. Maßgeblich für die Produktion von Porenbeton ist die hydrothermale Dampfhärtung eines Gemisches aus heimischen mineralischen Rohstoffen in einem Autoklaven bei ca. 190 °C unter Sattdampfbedingungen. Mit heutiger Verfahrenstechnik ist dieser Prozess sehr energieintensiv und nicht geschlossen, da hohe Verluste durch Abdampf und verunreinigtes Kondensat entstehen. In einem geschlossenen Produktionsprozess hingegen kann die Energieeffizienz gesteigert sowie die Umweltbelastung erheblich reduziert werden.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Bei einem Versuchsautoklaven sollte ein neuartiger Rückverdampfer zum Einsatz kommen, der es ermöglicht, den Dampf- und Kondensationskreislauf zu schließen. In einem Modell sollte dieser Ansatz theoretisch geprüft werden, da es keine Erfahrungswerte in der Porenbetonindustrie gibt. Die HoKa GmbH plante und baute den Versuchsautoklaven mit Rückverdampfer. Da der Rückverdampfer beim Autoklavierprozess das sublimierte Kondensat mit Salzen und Ölen anreichern sollte, war in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauforschung der RWTH Aachen University zunächst die Untersuchung des Einflusses dieser Salze auf die Porenbetonqualität geplant. Bei diesem Projekt sollte das Kondensat bis zu 50x wieder verwendet werden. Nach jeder Beaufschlagung sollten Proben des Kondensats genommen und auf Ionen der gelösten Salze untersucht werden. Zudem sollten Rohdichte und Porenstruktur der autoklavierten Probekörper ermittelt werden. Es sollte somit sichergestellt werden, dass die Porenbetonqualität nicht beeinflusst wird. Bei zunehmender Wiederverwendung des Kondensats könnten unterschiedliche Phasen entstehen, die einen entscheidenden Einfluss auf Porenstruktur und Druckfestigkeit haben. Daher sollte die Rohdichte ermittelt und die durch die hydrothermale Härtung entstandenen kristallinen Phasen mittels Röntgenpulverdiffraktometrie und die Ausbildung des Gefüges mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie untersucht werden. In der 1. Phase sollten Probekörper in einem kleinen Versuchsautoklaven, in der 2. Phase in einem großen industriellen Autoklaven erstellt werden.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Mit diesem Projekt wurde das Ziel verfolgt, den Einfluss von mehrfach verwendetem rückverdampftem Kondensat auf das Produkt Porenbeton zu untersuchen. Die Herstellung von Porenbeton im Labormaßstab ist in einer Vielzahl von Versuchen mit Erfolg gelungen. Auskühlen und Trocknen des Kuchens wurde vermieden und der anschließende Härtingsprozess mit Erfolg durchgeführt.

Das primäre Ziel, Kondensat mehrfach in einem geschlossenen System zu verdampfen, ist aus technischen Gründen nicht gelungen. Der Autoklav mit seinem Volumen von 45 Litern konnte nicht ausreichend thermisch gedämmt werden. Zudem sorgten verschiedene Leckagen und Gerätedefekte für zusätzliche Probleme. Der Auskühlprozess über den Kesselstahl führte zur Bildung von Kondensat und damit zu Dampfdruckverlusten.

Das anfallende Kondensat aus dem Porenbeton wurde auf diese Weise durch Kondensat vom Abkühlprozess stark verdünnt und damit unbrauchbar.

Mehrere Versuche einer Optimierung der Isolation am Autoklav, sowie eine verbesserte Dampferzeugung haben diese Situation nicht nachhaltig verbessern können.

Analysen des Kondensats aus dem Porenbeton wurden nach einem Härtevorgang durchgeführt. Diese liefern jedoch aufgrund der zu hohen Verdünnung eine unrealistische und für die betriebliche Praxis nicht typische Zusammensetzung.

Eine modifizierte Neukonstruktion des Versuchsaufbaus, basierend auf den gemachten technischen, insbesondere Isolationsmethoden, soll diese bestehenden Probleme im Nachgang zu diesem Projekt lösen.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Keine

### ***Fazit***

Die Rückverdampfung aus Kondensat stellt idealerweise ein Verfahren dar, um Energie und Wasser beim Härteprozess zu sparen. Um den möglichen Einfluss von Salzen aus dem Kondensat auf das Produkt bestimmen zu können, ist eine mehrfache Rückverdampfung vorgesehen gewesen.

Die thermische Isolation für den Versuchsaufbau im kleinen Maßstab hat sich als technische Herausforderung dargestellt und konnte im vorgegebenen Zeitraum nicht realisiert werden.

## **Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung .....	5
2	Inbetriebnahme des Laborautoklavs .....	9
3	Ergebnisse des Forschungsprojekts .....	12
4	Fazit .....	16
5	Literatur .....	16

## Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Bild 1: Autoklaviersystem .....	6
Bild 2: Temperiergerät TMO300 der Firma Deltatherm .....	7
Bild 3: Frischdampferzeuger KE 12 der Firma Jordan .....	8
Bild 4: Autoklav mit Rückverdampfer .....	9
Bild 5: Anlagensteuerung .....	10
Bild 6: Messapparatur zur Druckfestigkeitsprüfung von Probewürfeln. Die Probe vor Beginn der Messung (a) und die Probe nach Erreichen der maximalen Druckfestigkeit (b).....	13
Bild 7: Diffraktogramm einer im Laborautoklav gehärteten Porenbetonprobe .....	15
Tabelle 1: Angaben der prozentualen Anteile der Porenbetonmischung.....	12
Tabelle 2: Bestimmung der Druckfestigkeit an Würfeln aus Porenbeton.....	14

## Zusammenfassung

Das Ziel dieses Forschungsprojekts war, zu überprüfen, ob die Wiederverwendung des Kondensats aus der Porenbetonhärtung einen negativen Einfluss auf das Produkt Porenbeton haben könnte. Der Vorteil bei der Wiederverwendung des Kondensats ist die Reduktion von Abwässern und der geringere Verbrauch an Energie. Zur Untersuchung des Einflusses des wiederverwendeten Kondensats auf den Porenbeton sollte das Kondensat bis zu 20 Mal zur Porenbetonhärtung verwendet werden. Das Kondensat sollte chemisch analysiert und bei den Probekörpern die Rohdichte und die Druckfestigkeit ermittelt werden. An ausgewählten Probekörpern sollte zudem eine Phasenanalyse mithilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie durchgeführt und die Mikrostruktur mithilfe des Rasterelektronenmikroskops und energiedispersiver Röntgenspektroskopie untersucht werden. Hierzu wurde ein Autoklaviersystem bestehend aus Autoklav und Rückverdampfer entworfen, um die Porenbetonprobekörper mit Einsatz des Kondensats zu härten. Aufgrund verschiedener technischer Probleme konnte das geplante Versuchsprogramm des beantragten Forschungsprojekts trotz Verlängerung nicht termingerecht abgearbeitet werden. Die meisten technischen Probleme konnten mithilfe von nicht eingeplanten Investitionen und Eigeninitiative gelöst werden, so dass der Autoklav in einer abgewandelten Version nun betrieben werden kann. Es wurden erste Probekörper gehärtet. An diesen Probekörpern wurden die Druckfestigkeit und der Phasenbestand ermittelt. Die Ermittlung der Druckfestigkeiten ergab, dass sich die Probekörper stark unterschieden. Selbst innerhalb des gleichen Grünlings wiesen die herauspräparierten Probekörper unterschiedliche Druckfestigkeiten auf. Die minimale Druckfestigkeit von  $1,6 \text{ N/mm}^2$  wurde nur teilweise erreicht. Die Phasenanalyse mithilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie ergab, dass der autoklavierte Porenbeton einen relativ geringen Gehalt der festigkeitsbildenden Phase Tobermorit aufwies. Somit muss die Porenbetonmischung in Hinsicht auf den Tobermoritgehalt optimiert werden.

Es ist geplant das Forschungsprojekt nach Ablauf der Förderung in Eigeninitiative durchzuführen. Zur Durchführung ist der Bau eines neuen Autoklavs auf Basis der bisher gewonnenen Erkenntnisse geplant. Zudem wird die Mischung in Hinsicht auf den Tobermoritgehalt optimiert. Nach Durchführung des geplanten Versuchsprogramms des Forschungsprojekts wird der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) ein Abschlussbericht zur Verfügung gestellt.

# 1 Einleitung

Porenbeton ist ein massiver Wandbaustoff, der aufgrund seiner hochwärmedämmenden Eigenschaft den Anforderungen der Energieeinsparverordnung in monolithischer Bauweise hervorragend gerecht werden kann. Durch Kombination von niedriger Rohdichte und einer hohen Festigkeit eignet sich Porenbeton für den Neubau und die Modernisierung von Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie die Errichtung von Wirtschaftsbauten. Ein stetig wachsender Marktanteil dokumentiert die starke Akzeptanz der Wand-, Decken- und Dachkonstruktionen aus Porenbeton.

Der Herstellungsprozess von Porenbeton ist gekennzeichnet durch die hydrothermale Dampfhärtung eines Gemisches aus mineralischen Rohstoffen in einem Autoklav. Die Porenbetonhärtung findet bei ca. 200°C unter Sattedampfbedingungen statt. Dieser äußerst energieintensive Fertigungsschritt ist mit heutiger Verfahrenstechnik nicht als geschlossen zu bezeichnen. Es entstehen hohe Verluste durch Abdampf und verunreinigtes Kondensat, welches nur unzureichend dem Prozess rückgeführt werden kann. Ein geschlossener Produktionsprozess hingegen steigert die Energieeffizienz und reduziert die Umweltbelastung erheblich.

Im Rahmen des geförderten Forschungsprojektes untersucht die HoKa GmbH aus Würselen gemeinsam mit dem Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen University den Einfluss von rückverdampftem Heißkondensat auf die hydrothermale Härtung von Porenbetonprodukten. Das ibac besitzt in Bezug auf Baustoffe einen breiten Erfahrungsschatz. Zahlreiche Forschungs- und Industrieprojekte wurden zum Themenbereich Porenbeton durchgeführt. Eines der wichtigsten Forschungsprojekte ist das DFG-Projekt F 752, welches sich mit theoretischen und praktischen Untersuchungen zum Schubtragverhalten und der Schubbemessung von Mauerwerk beschäftigte [Bra05]. Hier wurden unter anderem auch Wände aus Porenbeton untersucht. Ein weiteres Beispiel für die Forschungsarbeit am ibac ist das Projekt F 7057 [Sch08], welches die Grundlage für die momentane Überarbeitung der Norm DIN 1053-1 [DIN96] bildet. In diesem Projekt wurden alle wichtigen Kenngrößen für die Überarbeitung der Norm zusammengetragen und ausgewertet. Neben weiteren Forschungsprojekten lassen zahlreiche Porenbetonhersteller ihre Produkte in den akkreditierten Laboren des ibac prüfen.

Die Verdampfung des Kondensats gilt als technisch sehr anspruchsvoll und bisher als kaum durchführbar. Die Oberflächen des Verdampfers drohen sehr schnell durch Kesselstein zu verkalken. Der Wärmeübergang wird erheblich gemindert und die Funktion weitgehend außer Kraft gesetzt. Zusätzlich sind mittelbare Einflüsse auf die Produktqualität denkbar. Durch die Rückverdampfung werden Salze und Öle aus dem Kondensat mit dem erzeugten Dampf in den Autoklav rückgeführt, die den empfindlichen Härteprozess des Porenbetonsteines in Hinblick auf die erzielbare Druckfestigkeit der Produkte beeinflussen könnten. Diese Einflüsse auf die Steinqualität während der Härtebildung sollen daher in dem Kooperationsprojekt eingehend geprüft werden.

Die Firma HoKa hat in intensiver Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauforschung für das Forschungsprojekt einen Versuchsautoklav mit einem angeschlossenen Rückverdampfer realisiert, sowie eine PC-Steuerung zum Betrieb dieser Anlage programmiert. Der Aufbau des Autoklavs ist darauf ausgerichtet, den Einfluss des zurückverdampften Kondensats auf das autoklavierte Bauprodukt Porenbeton zu untersuchen. Der Aufbau bestand zunächst aus einem Rückverdampfer und dem Autoklav. Diese Baugruppen wurden jeweils elektrisch von außen beheizt. Aufgrund von thermischen Isolationsproblemen – der Autoklav sollte adiabatisch betrieben werden – konnte dem Behältersystem nicht ausreichend thermische Energie zugeführt werden.

In einem zweiten Schritt wurde ein Sattdampfzeuger für kleine Dampfmengen sowie eine Speisewasserpumpe und schließlich ein Thermoölaggregat auf Kosten der HoKa GmbH zusätzlich angeschafft. Die Kosten in Höhe von ca. 25.000 € wurden nicht als Projektkosten deklariert, ebenso wie die Kosten für eine bauliche Maßnahme in Form eines Mauerdurchbruchs und diverser Elektroinstallationen aufgrund der Gerätebeschaffungen am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen University.

Dieser neue Versuchsaufbau bestand zunächst aus drei Komponenten: Autoklav, Rückverdampfer und Frischdampfzeuger (Bild 1).

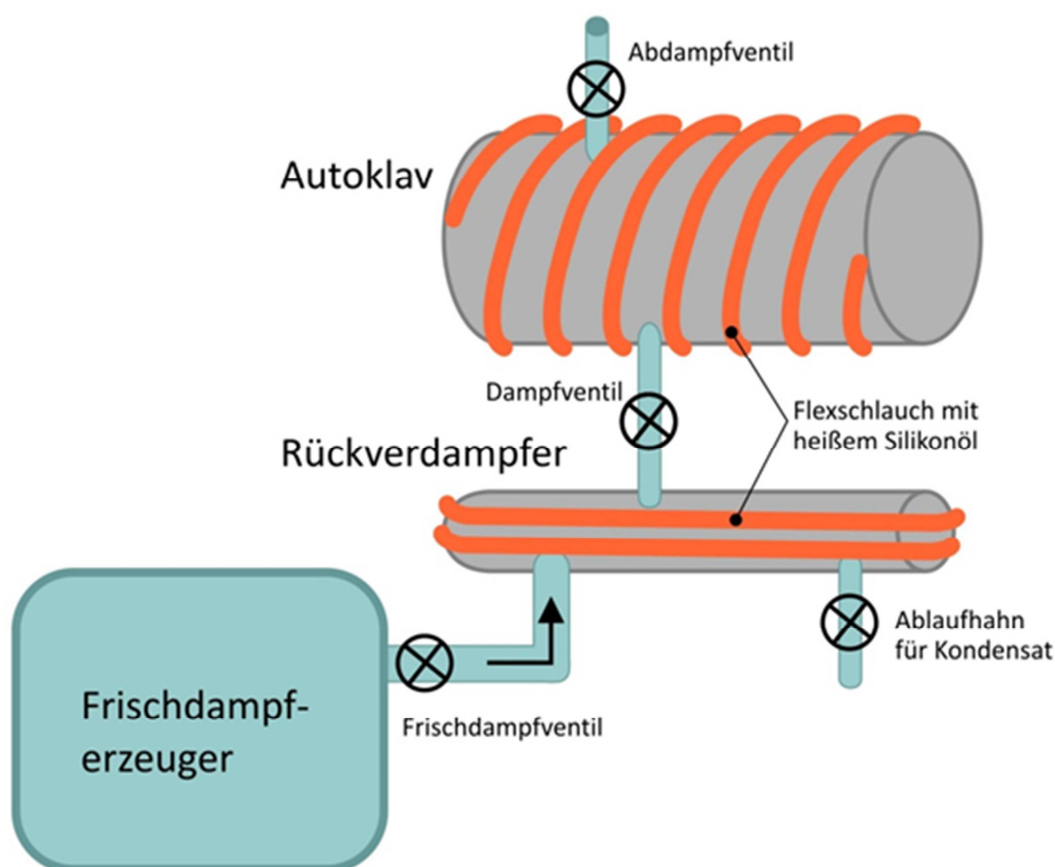


Bild 1: Autoklaviersystem



Mithilfe des Frischdampferzeugers KE 12 der Firma Jordan wird Satttdampf mit einem Druck von 1,3 MPa erzeugt. Der Satttdampf wird in den Rückverdampfer geleitet und gelangt schließlich durch das Öffnen des Dampfventils in den Autoklav. Um die Kondensation des Wasserdampfs an den Autoklavwandungen zu vermeiden, werden diese beheizt. Mithilfe eines Flexschlauchs aus Edelstahl werden der Autoklav und der Rückverdampfer von außen beheizt. Der Flexschlauch wurde hierfür um beide Anlagenteile gewickelt. Das Silikon-Thermoöl in dem Flexschlauch wird mithilfe des Temperiergeräts TMO300 der Firma Deltatherm auf 300 °C erhitzt und im Kreislauf gepumpt. Durch mehrmaliges Spülen des Systems mit Wasserdampf soll die Restluft aus dem Autoklav entfernt werden, so dass im Autoklav und im Rückverdampfer idealerweise nur noch Satttdampf vorliegt. Wird nach dem Spülvorgang ein Dampfdruck von 1,25 MPa im Autoklav erreicht, wird das Frischdampfventil geschlossen. Nun liegt ein geschlossenes System aus Autoklav und Rückverdampfer vor, welche beide durch das Dampfventil verbunden sind.



Bild 2: Temperiergerät TMO300 der Firma Deltatherm



Bild 3: Frischdampferzeuger KE 12 der Firma Jordan

Bildet sich nun Kondensat während des Autoklavierprozesses, so wird dieses an den Autoklavwandungen wieder verdampft. Beim Abfahren des Autoklav auf Atmosphärendruck wird das Kondensat mithilfe einer Kondensationseinheit gesammelt und steht somit wieder dem nächsten Härtungsprozess zur Verfügung. Die Kondensationseinheit besteht aus einer breiten Metallhaube, in die das Kondensat und der Dampf geleitet werden, abkühlen und in einer Wanne aufgefangen werden. Insgesamt soll das Kondensat 20 Mal wiederverwendet werden. Nach jedem Autoklavierprozess werden die Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Redoxpotential sowie die Gehalte an Natrium, Kalium, Calcium, Chlorid, Nitrat und Sulfat analysiert. Bei den gehärteten Probekörpern werden die Rohdichte und die Druckfestigkeit nach 7 Tagen ermittelt. Des Weiteren wird die Druckfestigkeit ausgewählter Probekörper zusätzlich nach 56 Tagen geprüft, um zu gewährleisten, dass sich nicht metastabile Phasen gebildet haben, welche die Festigkeit negativ beeinflussen könnten. Zusätzlich wird von ausgewählten Probekörpern die Phasenzusammensetzung mithilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie ermittelt. Bei diesen Probekörpern wird zudem die Mikrostruktur mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie und energiedispersiver Röntgenspektroskopie untersucht. Mit diesen Untersuchungen sollen die Ionengehalte mit den ermittelten Druckfestigkeiten und Rohdichten korreliert werden. Werden negative Einflüsse ermittelt, sollen die gebildeten Phasen und die Mikrostruktur zusätzlich untersucht und somit die Einflussfaktoren identifiziert werden.

Wesentliches Merkmal der neuen Verfahrenstechnik ist die Reduzierung des Primärenergieeinsatzes zur Dampferzeugung von bis zu 15 %. Für die Porenbetonwerke in Deutschland entspricht dieses umgerechnet ca. 9.000 Tonnen und für die

EU ca. 90.000 Tonnen CO<sub>2</sub>. Überträgt man diese neuartige Technologie auf die Kalksandsteinproduktion, verdoppeln sich diese Werte.

Umweltentlastend wirkt sich auch die Vermeidung von ca. 90% Abwasser aus Kondensat aus, welches durch die Rückverdampfung und damit Wiederverwendung von Kondensat nicht mehr entsteht. Hierdurch entsteht eine Entlastung der Umwelt in Deutschland von ca. 2,2 Millionen Tonnen Abwasser, übertragen auf die EU von ca. 22 Millionen Tonnen.

## 2 Inbetriebnahme des Laborautoklavs

Entsprechend des Arbeitsplans zum o. g. Projekt ist mit Umsetzung der Arbeitspakete 1 bis 4 der spezifizierte Laborautoklav im Versuchsfeld des ibac aufgebaut worden. Hierzu wurden adäquat ausgestattete Räumlichkeiten hergerichtet und die notwendige Peripherie zum Betrieb eines Druckbehälters mit Rückverdampfer realisiert (s. Bild 2). Mit einer zugehörigen Software ist der Anwender in der Lage die Geräteeinheit zu steuern (s. Bild 3).

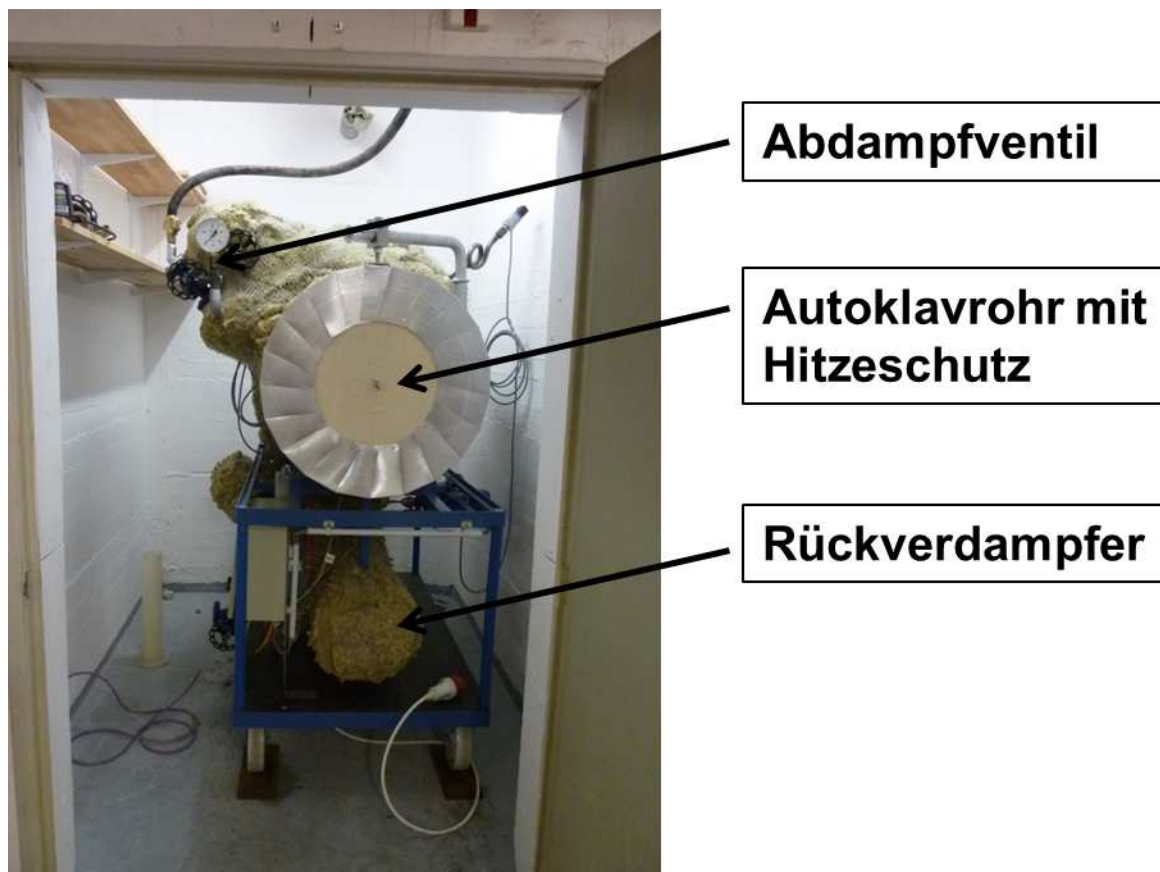


Bild 4: Autoklav mit Rückverdampfer



Bild 5: Anlagensteuerung

Die erste funktionelle Inbetriebnahme der Versuchseinrichtung vor Ort scheiterte aufgrund eines irreparablen Schadens des unteren Heizbandes, welches um den Rückverdampfer gewickelt war. Nachdem das Heizband vom ibac gewechselt worden war, wurde die Inbetriebnahme wieder aufgenommen. Das Warten auf die Lieferung des Heizbandes und der Einbau führten zu einem Stillstand von etwa 8 Wochen. Anschließend versagte nach wenigen Testfahrten das obere Heizband, welches um den Autoklav gewickelt war. Dieses wurde nicht neu beschafft, da Heizbänder anscheinend nicht für längere Vollastperioden des Heizens konzipiert sind. Bei den Testfahrten wurde zudem in dem Autoklav nicht der gewünschte Druck von ca. 12,5 bar erreicht. Somit wurden verschiedene Alternativlösungen diskutiert und es wurde ein Frischdampferzeuger angeschafft. Mit diesem Frischdampferzeuger sollte die Dampferzeugung eines Porenbetonwerks simuliert werden.

Zur Aufnahme potentiell schädlicher Ionen wurde der Dampfstrom durch das vorher aufgefangene Kondensat im Rückverdampfer geleitet. Die Beschaffung der Dampfeinheit führte zu einem Anlagenstillstand von mehr als 14 Wochen. Es wurde zunächst auf eine Aufheizung des Autoklavs verzichtet, da der Dampf den Aufheizvorgang übernehmen und die Dämmschicht die Temperatur des Autoklavs halten sollte. Eine Kombination aus verschiedenen kleinen Undichtigkeiten und einer relativen dicken Autoklavwandung führten dazu, dass der eingebaute 6 L-Vorratstank des Frischdampferzeugers nicht ausreichend war und der Härtungsvorgang durch sinkende Drücke unterbrochen wurde. Daraufhin wurde eine Pumpe angeschafft, welche den Vorratstank bei der Dampferzeugung immer wieder mit neuem Wasser versorgt. Die Pumpe wurde mit der Elektronik des Dampferzeugers gekoppelt, damit der Tank automatisch befüllt wird. Nach mehreren Installationsterminen wurden dann mehrere Testfahrten gefahren und die Druckstabilität des Systems getestet.

Der Betrieb des Autoklavsystems musste erneut eingestellt werden, als ein Plastikteil der Pumpe brach und Wasser aus der Pumpe strömte. Das Teil musste beim Hersteller nachbestellt werden. Nach Einbau des Ersatzteils musste die Testfahrt wieder unterbrochen werden, da das neue Plastikteil ebenfalls brach. Das ibac ersetzte daraufhin das Plastikteil durch ein Metallbauteil.

Diese erheblichen Schwierigkeiten führten zu einem erneuten Ausfall von etwa 12 Wochen. Nun konnten erste Testfahrten mit Probekörpern durchgeführt werden, allerdings trat ein weiteres Problem auf. Die Kondensatvolumina der durchgeführten Versuche betragen bis zu 30 L. Bei diesen Volumina standen die Probekörper hinterher im Kondensat. Die entstandenen Kondensatmengen waren verhältnismäßig zu den notwendigen Kondensatmengen viel zu hoch. Somit wären die Ionenkonzentrationen des Kondensats kaum messbar und zudem würde kaum eine Aufkonzentration der verschiedenen Ionen, wie z. B.  $\text{SO}_4$ , Na, K, Ca, durch mehrfache Nutzung des Kondensates zur Rückverdampfung auftreten. Diese Testfahrten zeigten, dass dieser Autoklav ohne zusätzliche Heizung der Autoklavwände nicht für die Durchführung der Versuche geeignet ist, obwohl der gewünschte Druck nun erreicht wurde.

Nach intensiver Recherche einer adäquaten, robusten Lösung des Heizproblems hat man sich für ein Temperiergerät der Firma Deltatherm entschieden. Mit diesem Gerät kann Silikonöl bis zu 300 °C aufgeheizt und im Kreislauf gepumpt werden. Das Öl wird durch einen Flexschlauch gepumpt, welcher zunächst um das Autoklavrohr und den Rückverdampfer gewickelt wurde.

Aufgrund der Größe des Geräts musste vor Inbetriebnahme ein Durchbruch zum Nachbarraum realisiert werden, da auf den technischen Zeichnungen die Auslassventile nicht berücksichtigt wurden. Somit war das Gerät zu groß für den Raum. Bei der Inbetriebnahme schaltete sich das Gerät immer wieder von selbst aus, da die Pumpe nicht stabil im System gehalten werden konnte. Der Hersteller hatte vergessen zwei Ventile mitzuliefern, welche den Öldruck regulieren. Deltatherm schickte einen Techniker, der das System nachrüsten musste. Bei weiteren Testfahrten stellte sich heraus, dass weiterhin übermäßig hohe Kondensatmengen anfielen.

Das nächste Problem war die Heizung des Rückverdampfers, welche durch den Flexschlauch realisiert werden sollte. Die Verbindung des Flexschlauchs mit dem Rückverdampfer war aufgrund der geometrischen Beschaffenheit nicht optimal, so dass das Kondensat kühler als der Autoklavraum war. Somit wurde der Rückverdampfer ausgebaut und das Kondensat sollte direkt in den Autoklav gefüllt werden. Nach weiteren Testfahrten wurde festgestellt, dass der Autoklav immer noch Undichtigkeiten aufwies, was zu signifikanten Dampfverlusten führte. Daraufhin wurden möglichst viele Ventile entfernt und mit Blindstopfen abgedichtet. Verschiedene Versuche zeigten, dass gerade die motorgesteuerten Ventile nicht richtig abdichteten. Daraufhin wurden diese entfernt.

Die momentane Herausforderung ist die Entnahme des Kondensats, die noch adäquat gelöst werden muss. Die Kondensationseinheit mit der Metallhaube ist nur ein Notbehelf. Das Problem ist, dass beim Abdampfen des Kondensats Salze an den Autoklavwandungen kristallisieren und somit die Ionenkonzentration des Kondensats geändert wird. Es ist zudem angedacht auf Basis der vielen negativen Erfahrungen einen neuen Autoklaven zu bauen, mit dem die Durchführung der Untersuchungen dieses Forschungsprojekts möglich ist.

### 3 Ergebnisse des Forschungsprojekts

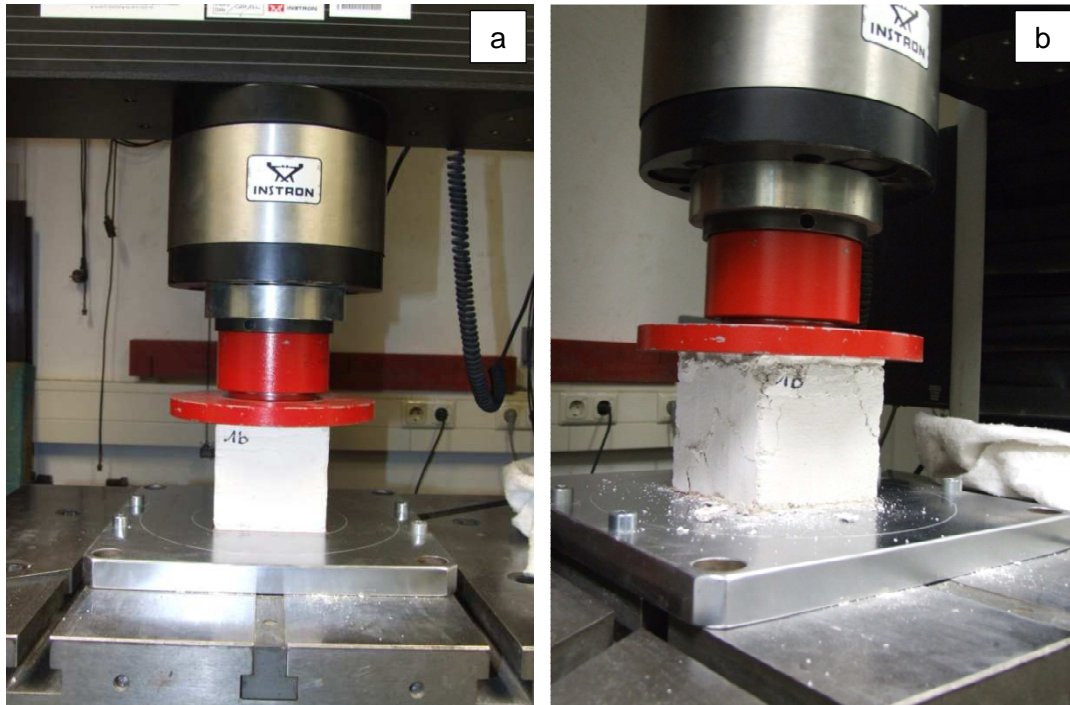
Bezugnehmend auf das Arbeitspaket 6 wurde vom ibac eine Porenbetonmischung zur Herstellung von Probekörpern entwickelt. Hierzu wurde eine Basismischung modifiziert und verschiedene Parameter für die Mischung optimiert. In Tabelle 1 wird die Zusammensetzung der entwickelten Mischung gezeigt.

Tabelle 1: Angaben der prozentualen Anteile der Porenbetonmischung

Ausgangsstoffe	Mischung in M.-%
Brantkalk	11,04
Zement	14,35
Anhydrit	2,07
Wasser	32,42
Al-Pulver	0,12
Sand	40,01

Des Weiteren wurden vom ibac Druckfestigkeitsprüfungen nach Norm DIN EN 772-1:2011 an gehärteten Porenbetonwürfeln, welche bei einem Vorversuch gehärtet werden konnten, durchgeführt. Bild 6 zeigt die Würfel vor und nach der Bestimmung der Druckfestigkeit.





**Bild 6:** Messapparatur zur Druckfestigkeitsprüfung von Probewürfeln. Die Probe vor Beginn der Messung (a) und die Probe nach Erreichen der maximalen Druckfestigkeit (b).

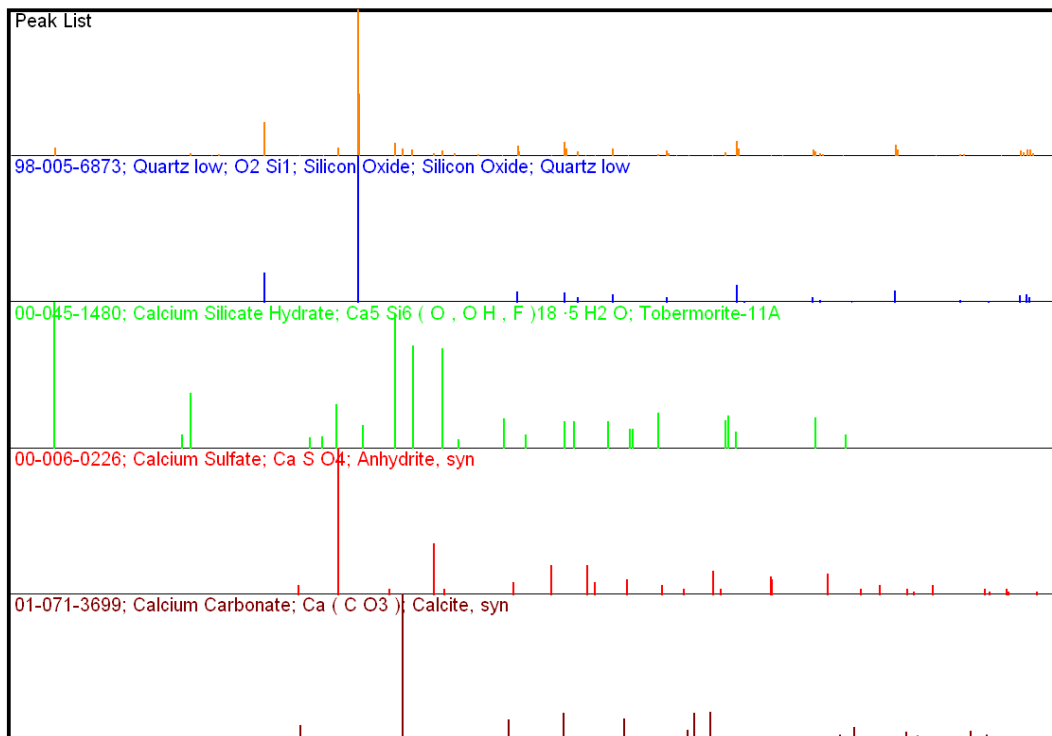
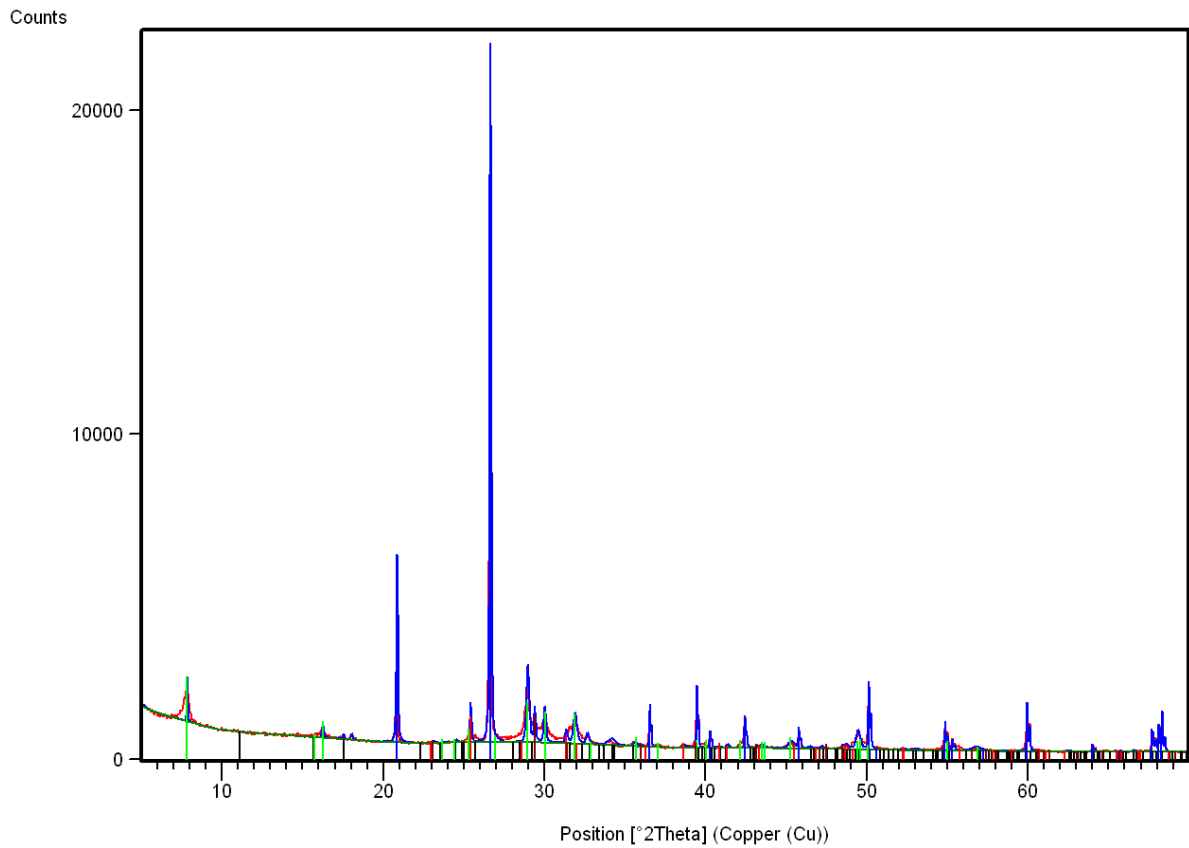
Die Ergebnisse der Messungen der Druckfestigkeiten werden in Tabelle 2 gezeigt. Die minimale zulässige Druckfestigkeit von  $1,6 \text{ N/mm}^2$  wird nur teilweise erfüllt. Auch der Mittelwert (MW) von  $1,56 \text{ N/mm}^2$  liegt knapp unter der Grenze. Selbst die Probekörper des gleichen Grünlings zeigen teilweise stark unterschiedliche Druckfestigkeiten, dies weist auf Inhomogenitäten hin. Die Druckfestigkeiten der Würfel sind demnach nicht zufriedenstellend.

Tabelle 2: Bestimmung der Druckfestigkeit an Würfeln aus Porenbeton

PK	Maße			$F_{D,max}$	$\beta_D$
	l	b	h		
	mm			kN	N/mm <sup>2</sup>
1a	109,5	106,1	111,9	15,02	1,29
1b	105,0	105,1	103,8	22,37	2,03
2a	104,7	104,6	111,5	15,60	1,43
2b	99,9	104,2	110,8	16,29	1,57
3a	104,5	99,3	103,7	10,49	1,01
3b	104,3	105,1	104,3	22,14	2,02
MW	104,6	104,0	107,6	16,99	1,56

Eine vom ibac durchgeführte röntgenographische Analyse (XRD) der geprüften Probekörper zeigt, dass bei dem Härtingsprozess wenig der festigkeitsbildenden Phase Tobermorit gebildet wurde (Bild 5). Hingegen ist der Quarzanteil ungewöhnlich hoch, was sich durch den geringen Umsatz von Quarzsand mit Branntkalk erklären lässt.





**Bild 7:** Diffraktogramm einer im Laborautoklav gehärteten Porenbetonprobe

Somit muss die Mischung auf Hinsicht des Produkts Porenbeton weiter optimiert werden. Die Versuche zur Steigerung der Festigkeiten werden momentan

durchgeführt. Hierzu soll die Feinheit des Quarzsandes reduziert und die Gehalte an Zement und Branntkalk variiert werden.

## **4 Fazit**

Das Versuchsprogramm konnte leider in der vorgegebenen Zeit nicht abgearbeitet werden, da aufgrund von erheblichen technischen Problemen am Autoklaviersystem die Arbeiten immer wieder eingestellt werden mussten. Somit kam es zu massiven Zeitverzögerungen, welche leider nicht mehr aufgeholt werden konnten. Grundsätzlich ist die Forschungsidee zur Wiederverwendung des Kondensats immer noch aktuell, um Energie und Abwasser einzusparen. Das Institut für Bauforschung wird seine Mischung optimieren, um einen Porenbeton zu entwickeln, welcher vergleichbar mit industriell hergestelltem Porenbeton ist. Zudem ist der Neubau eines Autoklaven geplant, so dass das Forschungsprogramm adäquat abgearbeitet werden kann. Es ist eine gemeinsame Fortführung des Projekts geplant ohne den Erhalt von weiteren Zuwendungen. Die erzielten Ergebnisse werden der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) zur Verfügung gestellt.

## **5 Literatur**

- [Bra05] Brameshuber, W. ; Schmidt, U. ; Kang, B.-G. ; Hannawald, J.: Theoretische und praktische Untersuchungen zum Schubtragverhalten und der Schubbemessung von Mauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, 2005. - Forschungsbericht Nr. F 752
  
- [DIN96] DIN 1053-1 : 1996-11: Mauerwerk Teil1: Berechnung und Ausführung
  
- [Sch08] Schmidt, U. ; Graubohm, M. ; Brameshuber, W.: Porenbetoneigenschaften für DIN 1053-1 : Properties of Autoclaved Aerated Concrete for DIN 1053-1. Aachen : Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2008 - Forschungsbericht Nr. F 7057