

DATipilot Modul 1 Innovationssprints

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Kurzbericht und Eingehende Darstellung öffentlich

Ressourcenschonendes Bauen - Herstellung von sandgeklebten Bau- formteilen

RebSake

Institution	Name Projektleitung	Förderkennzeichen
Fraunhofer	Dr. Thomas Kowalik	03DPS1159

LAUFZEIT: 01.07.2024 – 30.06.2025

Bremen, den 15.10.2025

Autorenschaft:

Dr. Thomas Kowalik, Fraunhofer IFAM, Wiener Strasse 12, 28359 Bremen

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Auto-
ren.

Inhalt

1	Kurzbericht	2
1.1	Ausgangslage des Vorhabens.....	2
1.1.1.	<i>Ursprüngliche Aufgabenstellung.....</i>	<i>2</i>
1.1.2.	<i>Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele.....</i>	<i>2</i>
1.1.3.	<i>Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde</i>	<i>3</i>
1.2	Ablauf des Vorhabens	3
1.3	Ergebnisse des Vorhabens	4
1.3.1.	<i>Wesentliche Ergebnisse.....</i>	<i>4</i>
1.3.2.	<i>Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....</i>	<i>5</i>
2	Eingehende Darstellung	6
2.1	Durchgeführter Arbeitsplan.....	6
2.2	Erreichte Meilensteine.....	14
2.3	Erreichte Ergebnisse	14
2.3.1	<i>Erreichung der Gesamtziele</i>	<i>14</i>
2.3.2	<i>Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele</i>	<i>15</i>
2.4	Verwertung.....	15
2.4.1	<i>Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses</i>	<i>15</i>
2.4.2	<i>Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens.....</i>	<i>15</i>
2.4.3	<i>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse</i>	<i>16</i>
2.4.4	<i>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit.....</i>	<i>16</i>

1 Kurzbericht

1.1 Ausgangslage des Vorhabens

Ziel des Projekts war die Entwicklung, die Optimierung, das Upscaling und die Umsetzung einer Methode zur Herstellung von ausgewählten Baustoffen aus "geklebtem" Sand. Die angestrebte Klebung ist nicht ein klassischer organischer Klebstoff, sondern ein anorganisches Salzgemisch. Damit sind die hergestellten Bauteile nach Ende ihres Lebenszyklus in einem nachhaltigen Recyclingschritt potenziell wieder verwendbar. Es sollten Anwendungen aus dem Bausektor hinsichtlich der geforderten Eigenschaften selektiert werden, hierbei wurde ein besonderes Augenmerk auf technologische Anforderungen, Energieintensität sowie rechtliche und normative Vorgaben gelegt werden.

Sand ist eine der fundamentalen Ressourcen im Baubereich und spielt eine unverzichtbare Rolle in zahlreichen Bauprozessen. Seine vielfältigen Verwendungen erstrecken sich über verschiedene Bereiche der Bauindustrie und tragen wesentlich zur Errichtung von Gebäuden, Infrastruktur und anderen Bauprojekten bei. Ein wesentlicher Einsatzbereich von Sand liegt in der Herstellung von Beton und Mörtel. Allerdings ist die Verfügbarkeit von Sand nicht unendlich. In einigen Regionen der Welt wird Sand bereits knapp, was auf übermäßigen Abbau, Umweltverschmutzung und die Zerstörung von Ökosystemen zurückzuführen ist. Dies hat zu einem steigenden Interesse an alternativen Baumaterialien und Recyclingmethoden geführt.

In den bisherigen Untersuchungen sind Modifikation von originalen Gießerei Sanden, wie sie bei der Gussform und Gusskern üblich sind, verwendet wurden. Die Sandarten werden mindestens eine Stunde in phosphorhaltiger wässriger Lösung im Rollen- oder Taumelmischer behandelt und abgesiebt (200 µm) und in Form getrocknet, dann bei ~200°C „gebrannt“, um wasserunlösliche Formteile zu erhalten.

1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Gesamtziel des Innovationssprints	<p>Ziel des Projekts war die Entwicklung, die Optimierung, das Upscaling und die Umsetzung einer Methode zur Herstellung von ausgewählten Baustoffen aus "geklebtem" Sand. Die Klebung ist nicht ein klassischer organischer Klebstoff, sondern ein anorganisches Salzgemisch. Damit sind die hergestellten Bauteile nach Ende ihres Lebenszyklus in einem nachhaltigen Recyclingschritt wieder verwendbar.</p> <p>Es sollten Anwendungen aus dem Bausektor hinsichtlich der geforderten Eigenschaften selektiert werden, hierbei wurde ein besonderes Augenmerk auf technologische Anforderungen, Energieintensität sowie rechtliche und normative Vorgaben gelegt.</p> <p>In der Antragsstellung des Projekts wurden zwei konkrete Anwendungsfälle anvisiert, die Ziegelherstellung und die Verwendung als flammhemmende Wandzwischenwand.</p>
--	--

1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele

Geplante konkrete Arbeitsziele
Ermittlung von Sandtypen, rezyklierte Gesteinskörnungen, feinkörnige Nebenprodukte, wie z.B. Gesteinsmehl aus Schutt, Ziegelstaub oder natürlich vorkommende Böden, mit denen Formteile hergestellt werden können.
Bestimmung von baurelevanten Materialeigenschaften und Einsatzrichtlinien, insbesondere als Inputbasis für Stakeholder. Dazu werden entsprechende Normen und Vorschriften abwärts der EU-Verordnungen recherchiert und bewertet.
Herstellung von Formteilen, Bestimmung mechanischer Kennzahlen und Einordnung zu geeigneten Benchmarkmaterialien.
Erstellen von Konzepten zum Fertigungsverfahren, inklusive beispielhafter Darstellung am Institut

Überprüfung der Recyclingfähigkeit

1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ein wesentlicher Einsatzbereich von Sand liegt in der Herstellung von Beton und Mörtel. In Kombination mit Zement und Wasser bildet Sand das Grundgerüst für Beton, das am häufigsten verwendete Baumaterial weltweit. Beton ist bekannt für seine Festigkeit, Haltbarkeit und Vielseitigkeit und findet Anwendung in einer breiten Palette von Bauvorhaben, von Wohnhäusern über Brücken bis hin zu Hochhäusern. Darüber hinaus wird Sand auch in der Herstellung von Ziegeln, Keramikfliesen und anderen Baumaterialien verwendet. Die Zugabe von Sand in Ziegelsteinmischungen verbessert deren Festigkeit und Struktur, während feiner Sand in Keramikfliesen für eine glatte Oberfläche sorgt. Im Straßenbau spielt Sand ebenfalls eine wichtige Rolle. Sand wird als Bestandteil von Asphaltmischungen verwendet, um die Bindung und Traktion zu verbessern. Sand ist nicht gleich Sand, insbesondere Wüstensände sind wenig als Ressource erschlossen. Wüstensand, insbesondere aufgrund seiner Zusammensetzung und Beschaffenheit, wird zwar oft als unbrauchbar angesehen, hat jedoch dennoch einige potenzielle Verwendungen, die bereits beschrieben wurden: als Material in Wüstenregionen zum Bau von Straße oder zur Herstellung von Solarpaneelen. Weitere Aktivitäten sind eher nicht materialspezifisch (Tourismus auf Dünen, Landwirtschaft). In der Literatur und im Patentbereich sind Arbeiten an „Sandverklebungen“ im Wesentlichen aus der Gießerei Technik und dem 3D-Druck bekannt. Vorherrschende „Bindemittel“ sind dort jedoch organische Binder, Wasserglas und Magnesiumoxidpulver.

Die Sandarten werden mindestens eine Stunde in phosphathaltiger wässriger Lösung im Rollen- oder Taumelmischer behandelt und abgeseibt (200 µm). Dann kann:

- a. der feuchte Sand in Biegeriegel-Form gegeben und bei 110 °C getrocknet (Raumtemperaturtrocknung möglich) werden.
- b. der feuchte Sand weiträumig verteilt (flächig) und bei 110 °C getrocknet werden. Der getrocknete Sand wird in einer Kugelmühle zerkleinert, gesiebt (100 µm) und in eine Form gegeben. Anschließend mit möglichst wenig Wasser anfeuchten, verdichten und bei Raumtemperatur oder höher, z.B. 110 °C wieder trocknen.

Danach sind die Teile entformbar und fest. Die getrockneten Formen sind mit weiterer Wasserbehandlung wieder lösbar, falls nicht getempert wird (300 °C). Bisherige Festigkeitsbestimmungen ergeben eine Biegefestigkeit ohne tempem von ~ 300 N/cm²; mit Tempem ~ 1000 N/cm².

Untersuchungen mittels Röntgenphotonenspektroskopie (XPS) zeigen, dass die getrockneten Sandpartikel nach dem Phosphorbeschichten zwischen 9 bis 12 Atom-% Phosphorgehalt aufweisen, was einer geringen µm-Schicht entspricht. Bisherige Untersuchungen wurden zur Optimierung (Minimierung) der eingesetzten Phosphormengen durchgeführt.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Entsprechend der geplanten Arbeitspakete (AP) wurden die AP 1.1 bis AP 1.3 zeitgleich zum Projektanfang gestartet. Diese AP beinhalteten die Thematiken: Materialentwicklung, Recherche zu Normen und Verordnungen, und die Beschaffung von diversen Ausgangsmaterialien. Die Recherche zu Normen und Verordnungen erwies sich als zeitintensiver als bei Antragstellung angenommen und hat weit mehr als die veranschlagten 0,3 PM in Anspruch genommen.

Die Recherche teilte sich relativ frühzeitig in zwei unterschiedliche Richtungen auf, die vorliegenden Normen zur Prüfung von Beton und die Verordnungen zur Verwendung von Recyclingbaustoffen. Die Prüfung von Beton in Deutschland und Europa erfolgt nach einem umfangreichen Normenwerk, das die Eigenschaften sowohl von Frischbeton als auch von Festbeton abdeckt. Neben den beiden großen Normenreihen existieren weitere wichtige Regelwerke. Von der Herstellung über die Verarbeitung bis hin zur Nutzung und Kontrolle im fertigen Bauwerk gewährleisten die DIN-Normen eine einheitliche und nachvollziehbare Qualitätssicherung. Den wesentlich größeren Zeitbedarf hatte jedoch die Durcharbeitung der Verordnungen zu Recyclingbaustoffen in Anspruch genommen. Ausgehend von der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV,) ist die zentrale gesetzliche Basis für den Umgang mit recycelten Baustoffen in Deutschland das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Es schreibt eine fünfstufige Abfallhierarchie vor, die von der Abfallvermeidung über die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling bis hin zur sonstigen Verwertung und letztlich zur Beseitigung reicht. Dabei sind auch zur Verwendung vorgesehene Ausgangsstoffe explizit zu finden.

Beschafft wurden die Ausgangsstoffe Ziegel alt (1927), Mörtel alt (wahrscheinlich auch 1927), Porenbeton (neu, ausgewählt nach Diskussion mit Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), da Porenbeton sehr sulfathaltig ist und so ein chemisch schwieriger Ausgangsstoff ist, der sich aber gut zerkleinern lässt), gemischter Bauschutt (zur Verfügung gestellt vom IBP) und Spielsand (gewaschen, rund Körnung 0,2-2 mm) als Ersatz für Wüstensand. Deren Beschaffung wurde anfangs vorangetrieben und sich mit den länderspezifischen Regularien auseinandergesetzt. Die meisten Wüstenstaaten verbieten den Export von Sand komplett oder nur mit Lizenz. In Namibia zuständig für diese Lizenzen ist das MINISTRY OF ENVIRONMENT, FORESTRY AND TOURISM (info.pro@met.gov.na), das angeschrieben wurde, bisher erfolgte noch keine Antwort.

Da außer dem Spielsand die Ausgangsstoffe nicht in einsetzbarer Form vorlagen, wurden sie vorgebrochen und mittels Kugelmühle in kleine Bestandteile weiter zerkleinert. Anfänglich war angestrebt Formteile in der Größe von 25x9x6 cm herzustellen. Da Zerkleinern entsprechender Mengen bedeutete jedoch jeweils drei Wochen Kugelmühle, so dass im Verlauf für die Experimente das Volumen zunächst auf 15x4x4 cm, auf 4x4x4 cm verkleinert wurde.

Die identische, einfache Herstellung von Formbauteilen, wie in den Vorarbeiten beschrieben, konnte mit keinem der neu eingesetzten Ausgangsstoffe erreicht werden. Daher mussten, anders als im Antrag vorgesehen, umfangreiche Versuche durchgeführt und die potenziell Einfluss nehmende Fertigungsparameter variiert werden. Dazu gehörten Versuche mit unterschiedlichen Trocknungsregimen (Temperaturführung), wechselnden pH-Werten von sauer über neutral bei der Beschichtung der Ausgangsstoffe und gezielter Einsatz von Partikelgrößenfraktionen. Zusätzlich wurden auch analytische Untersuchungen an den modifizierten Ausgangsstoffen durchgeführt (insbesondere Rasterkraftmikroskopische Untersuchungen mit Elementbestimmung (REM/EDX), Thermogravimetrische Analyse (TGA), die nicht bei der Antragstellung geplant waren. Insbesondere die Fertigungsparametervariationen bedingten eine erhöhte Produktion von zerkleinerten Ausgangsstoffen, besonders als getrennte Siebfraktionen einzeln eingesetzt worden sind. Von allen Ansätzen wurde versucht Formbauteile zu erstellen.

Zeitgleich wurden die Ergebnisse dem IBP und der Firma Quarzwerke GmbH, Frechen, vorgestellt und diskutiert, bzw. deren Input implementiert.

Aufgrund der Umschichtung der personellen Ressourcen in die Recherche der Normen, der Einführung der Fertigungsvariation und der Analyse modifizierten Ausgangsstoffe, sowie rein zeitlich die langandauernden Zerkleinerungsarbeiten, sind die Arbeitspakete zwei und drei nicht oder nur ansatzweise durchgeführt worden. Eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes war, bekanntermaßen, nicht möglich.

1.3 Ergebnisse des Vorhabens

1.3.1. Wesentliche Ergebnisse

Die anfängliche Recherche nach DIN Prüfungen zur Bestimmung der Materialeigenschaften, wie die Klassifizierung von Beton nach Festigkeitsklassen (C), Konsistenzklassen (F) und Expositionsklassen (X) sowie deren konkreten Bestimmung (z.B. DIN 19698-1) erwies sich schnell als zu kurz gegriffen. Bei der Verwendung von Rezyklat-Materialien greifen eine Reihe von Verordnungen, die die Herstellung, die Verarbeitung bis hin zur Nutzung und Kontrolle im fertigen Bauwerk gewährleisten sollen. Das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV) ist die zentrale gesetzliche Basis für den Umgang mit recycelten Baustoffen in Deutschland - das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Es schreibt eine fünfstufige Abfallhierarchie vor, die von der Abfallvermeidung über die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling bis hin zur sonstigen Verwertung und letztlich zur Beseitigung reicht. Dieses Regelwerk stellt als solches erst einmal kein Hindernis zur Umsetzung der Projektarbeiten dar, wäre aber bei der Bewertung der späteren Umsetzung zu berücksichtigen. Die Beschaffung von Wüstensand erwies sich als schwierig, da oft Exportverbote existieren. Nach anfänglichen Versuchen die Ausfuhr von Sand aus Namibia zu erreichen, die ohne Erfolg endeten, wurde von der Verwendung von Wüstensand abgesehen. Alternativ dazu wurde mit hoch gereinigten, glatten Spielsand gearbeitet, sowie vermehrt Rezyklat-Material eingesetzt. Der Ausgangspunkt der Projektarbeiten beruhte auf der sehr einfachen Herstellung von Sandformteilen mit Gießerei-Sanden. Die Übertragung des einfachen Verfahrens auf eine Vielzahl von anderen Ausgangsbaustoffen (Mörtel, Porenbeton, Bauschutt, Ziegel, Spielsand) konnte nicht dargestellt werden. Es wurden Variation der Fertigungsparametern untersucht, um dennoch feste Formbauteile zu erhalten. Dazu gehörten verschiedene pH-Wert-Einstellungen, die Variation der Vorbehandlungsdauer, der Körnung und des Trocknungsregimes. Nur mit sehr feinem Ziegelstaub (Partikelgröße kleiner 200 µm) konnte ein Formbauteil erhalten werden. Dieses zeigte jedoch keinerlei Wasserbeständigkeit auch bei höheren Einbrenntemperaturen von 250 °C, sondern löste sich sehr schnell, wenn Wassertropfen auf die Oberfläche gegeben wurden (als Regentropfen Imitat).

Die im Antrag beschriebene Verwendung der Personal Ressourcen sowie die Zeitdauer pro Arbeitspaket erwies sich als so nicht haltbar. Die Komplexität der Verordnungen und Richtlinien wurde unterschätzt, ebenso der benötigte Zeitaufwand, um Ausgangsmaterialien herzustellen. Wesentlicher Punkt ist aber, dass die Übertragung der ursprünglichen Projektidee auf die anvisierten Materialien nicht funktioniert. Damit wurden die darauffolgenden Projektziele auch nicht erreicht.

1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zu dem im Antrag beschriebenen Netzwerkaufbau zu Baustoffherstellern und Baustoffanwendern ist es aufgrund der nicht vorhandenen technischen Ergebnisse nicht gekommen. Es wurde aber Kontakt zum Institut für Bauphysik (IBP) und den Quarzwerke Group, Frechen aufgenommen, um Input zu bekommen, wie das nicht erfolgreiche Umsetzen der Grundidee dennoch gelingen könnte. Dieser Input wurde in den Variationen der Herstellungsparameter berücksichtigt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Durchgeführter Arbeitsplan

Arbeitspaket	abgeschlossen		
	nicht abgeschlossen		nicht durchgeführt
1.1 Recherche nach relevanten Bauvorschriften	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.2 Beschaffung von diversen Sandausgangsmaterialien	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.3 Kennwertermittlung verschiedener Sandformteile	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 Fertigungskonzepte und Demonstratoren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.1 Netzwerkaufbau zu Baustoffherstellern und -verarbeitern	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.2 Netzwerkaufbau zu Hilfsorganisatoren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Arbeitspaket 1.1 Recherche nach relevanten Bauvorschriften

Die Zielstellung des Arbeitspaketes war relevante Bauvorschriften für die anvisierten Anwendungsfälle (z.B. Ziegelherstellung, flammenhemmende Wandzwischenlage) zu recherchieren, sowie durchzuführende Tests hinsichtlich Probengeometrie und Testbedingungen zu evaluieren und mit vorhandenen Möglichkeiten abzugleichen.

Die anfängliche Recherche nach relevanten Bauvorschriften, die angedachten DIN Prüfungen zur Bestimmung der Materialeigenschaften, wie die Klassifizierung von Beton nach Festigkeitsklassen (C), Konsistenzklassen (F) und Expositionsklassen (X) sowie deren konkreten Bestimmung (z.B. DIN 19698-1) erwiesen sich schnell als zu kurz gegriffen. Bei der Verwendung von Rezyklat-Materialien greifen eine Reihe von Verordnungen, die die Herstellung, die Verarbeitung bis hin zur Nutzung und Kontrolle im fertigen Bauwerk gewährleisten sollen.

DIN-Normen zur Prüfung von Beton:

Die Prüfung von Beton in Deutschland und Europa erfolgt nach einem umfangreichen Normenwerk, das die Eigenschaften sowohl von Frischbeton als auch von Festbeton abdeckt. Diese Normen stellen sicher, dass Qualität, Sicherheit und Dauerhaftigkeit von Bauwerken gewährleistet sind. Für Frischbeton ist insbesondere die Normenreihe DIN EN 12350 maßgeblich. Für Festbeton ist die DIN EN 12390 von zentraler Bedeutung. Sie regelt die Anforderungen an Probekörper, deren Herstellung und Lagerung sowie die Prüfungen im erhärteten Zustand. Dazu zählen insbesondere die Druckfestigkeit, die Biegezug- und Spaltzugfestigkeit sowie die Bestimmung der Dichte. Ergänzend dazu werden auch Prüfungen zur Wassereindringtiefe, zum Schwindverhalten und zur Chlorid- sowie Karbonatisierungsbeständigkeit beschrieben. Auch Normen wie die DIN EN 14630, die die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe behandelt, oder die DIN EN 1015, die Prüfverfahren für Mörtel beschreibt, sind für die Bewertung von Beton im Bauwesen von Bedeutung. Insgesamt bietet das Normenwerk ein umfassendes System, um die Eigenschaften von Beton in allen Phasen seines Lebenszyklus zu prüfen.

Verordnungen zur Verwendung von recycelten Baustoffen:

Die Bauwirtschaft zählt zu den ressourcenintensivsten Sektoren weltweit. In Deutschland entfallen rund 60 % des gesamten Abfallaufkommens auf Bau- und Abbruchabfälle. Vor diesem Hintergrund gewinnen Recycling und die gezielte Wiedereinführung von Sekundärrohstoffen in den Bauprozess zunehmend an Bedeutung. Um den Einsatz recycelter Baustoffe zu fördern und gleichzeitig Umwelt- sowie Sicherheitsstandards einzuhalten, existieren verschiedene gesetzliche Regelungen und technische Verordnungen. Diese dienen nicht nur der Schonung natürlicher Ressourcen, sondern auch der Förderung einer Kreislaufwirtschaft, wie sie in der europäischen Abfallrahmenrichtlinie und im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz verankert ist.

Die zentrale gesetzliche Basis für den Umgang mit recycelten Baustoffen in Deutschland bildet das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Es schreibt eine fünfstufige Abfallhierarchie vor, die von der Abfallvermeidung über die Vorbeereitung zur Wiederverwendung und das Recycling bis hin zur sonstigen Verwertung und letztlich zur Beseitigung reicht. Darauf aufbauend regeln verschiedene Verordnungen die konkrete Umsetzung im Bausektor. Besonders hervorzuheben sind hier die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) und die Mantelverordnung, die im Jahr 2023 in Kraft getreten sind. Ziel dieser Regelwerke ist es, bundeseinheitliche Standards für die Herstellung und den Einsatz mineralischer Ersatzbaustoffe zu schaffen. Die Ersatzbaustoffverordnung definiert, welche Bau- und Abbruchmaterialien nach einer Aufbereitung als sogenannte Ersatzbaustoffe eingesetzt werden dürfen. Sie legt dabei Qualitätsklassen fest und bestimmt, unter welchen Bedingungen diese Materialien in verschiedenen Bauprojekten Verwendung finden können. Wichtige Kriterien sind unter anderem die stoffliche Zusammensetzung, mögliche Schadstoffbelastungen sowie die Umweltverträglichkeit im Hinblick auf Boden- und Grundwasserschutz. Die Verwendung recycelter Baustoffe unterliegt strengen technischen Anforderungen. Hierbei spielen Normen wie die DIN 4226 (Betonzuschlagstoffe) oder die DIN EN 12620 (Zuschläge für Beton) eine entscheidende Rolle. Diese Normen stellen sicher, dass recycelte Materialien eine gleichbleibend hohe Qualität aufweisen und im Bauwesen ohne Sicherheitsrisiken verwendet werden können. Die Ersatzbaustoffverordnung schreibt zudem umfangreiche Prüf- und Nachweispflichten vor. Baustoffproduzenten müssen regelmäßig chemische und physikalische Analysen durchführen lassen, um die Eignung ihrer Produkte nachzuweisen. Insbesondere die Grenzwerte für Schwermetalle, Sulfate oder andere potenziell umweltschädliche Substanzen sind hier von Relevanz. Auch für die Bauunternehmen selbst besteht eine Dokumentationspflicht, die die Nachvollziehbarkeit des Materialeinsatzes sicherstellen soll.

Der Einsatz recycelter Baustoffe verfolgt das Ziel, natürliche Ressourcen wie Kies, Sand oder Naturstein zu schonen und gleichzeitig Deponiekapazitäten zu entlasten. Durch die klare gesetzliche Regelung wird verhindert, dass schadstoffbelastete Materialien unkontrolliert in den Stoffkreislauf gelangen. Die Mantelverordnung trägt durch einheitliche Standards wesentlich zur Akzeptanz von Recyclingbaustoffen bei, da Bauherren und Auftraggeber dadurch eine höhere Planungssicherheit erhalten. Besondere Bedeutung kommt hierbei auch den Bodenschutzvorgaben zu. Da viele Bau- und Abbruchabfälle potenziell Schadstoffe enthalten, besteht das Risiko, dass bei unsachgemäßer Wiederverwendung Böden und Grundwasser kontaminiert werden. Die Verordnungen schreiben deshalb vor, dass nur geprüfte Materialien in sensiblen Bereichen, beispielsweise im Erd- oder Straßenbau, eingesetzt werden dürfen.

Die gesetzlichen Vorgaben wirken sich unmittelbar auf die Baupraxis aus. Für Recyclingunternehmen bedeuten sie einerseits zusätzlichen bürokratischen Aufwand, andererseits aber auch Marktchancen, da hochwertige Recyclingprodukte zunehmend nachgefragt werden. Bauunternehmen sind verpflichtet, Recyclingbaustoffe vorrangig einzusetzen, wenn diese den technischen Anforderungen entsprechen und wirtschaftlich verfügbar sind. Öffentliche Auftraggeber haben darüber hinaus eine besondere Vorbildfunktion: Sie sollen gemäß den Vorgaben des Vergaberechts recycelte Materialien bevorzugt berücksichtigen. Langfristig stärken die Verordnungen die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Während in der Vergangenheit viele Bau- und Abbruchabfälle deponiert wurden, ermöglichen die heutigen Regelungen eine hochwertige Verwertung. Damit leisten sie auch einen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele, da die Wiederverwendung von Baustoffen energieintensive Neuproduktionen reduziert. Trotz der positiven Entwicklungen bestehen nach wie vor Herausforderungen. Kritiker bemängeln etwa, dass die Prüf- und Dokumentationspflichten sehr aufwendig sind und kleinere Betriebe überfordern können. Auch die Akzeptanz von Recyclingbaustoffen ist noch nicht flächendeckend vorhanden. Die Verordnungen zur Verwendung recycelter Baustoffe stellen einen wichtigen Schritt in Richtung nachhaltiger Bauwirtschaft dar. Sie tragen dazu bei, Ressourcen effizienter zu nutzen, Umweltbelastungen zu reduzieren und die Kreislaufwirtschaft zu stärken. Zukünftig wird es entscheidend sein, die bestehenden Regelungen kontinuierlich weiterzuentwickeln und an neue technologische Möglichkeiten anzupassen. Auch die Sensibilisierung der Bauherren, Planer und Verbraucher für die Vorteile von Recyclingbaustoffen ist ein zentraler Faktor.

Insgesamt zeigt sich, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen eine solide Grundlage geschaffen haben, um den Einsatz von recycelten Baustoffen im Bauwesen zu fördern. Ihre praktische Umsetzung wird jedoch nur dann langfristig erfolgreich sein, wenn sie mit wirtschaftlichen Anreizen, technologischem Fortschritt und gesellschaftlicher Akzeptanz einhergeht.

Schadensanalysen für Recyclingbaustoffe:

1. Chemische Schadstoffanalysen

Diese Analysen prüfen, ob Recyclingbaustoffe umweltrelevante Stoffe enthalten, die in Boden oder Grundwasser gelangen könnten. Wichtige Prüfungen sind:

- Schwermetalle (z. B. Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Zink)
- Sulfate und Chloride
- Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
- Asbest (zwingend auszuschließen)

- PCB (Polychlorierte Biphenyle) oder andere organische Schadstoffe

Die Untersuchungen erfolgen häufig mittels Eluat-Analysen, die das Auswaschverhalten im Kontakt mit Wasser prüfen.

2. Physikalisch-mechanische Prüfungen

Zur Sicherstellung der bautechnischen Verwendbarkeit sind Prüfungen notwendig wie:

- Korngrößenverteilung (Siebkurvenanalyse)
- Dichte und Wasseraufnahmefähigkeit
- Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit
- Festigkeit (z. B. Druck- oder Spaltzugfestigkeit)
- Abriebfestigkeit (insbesondere im Straßen- und Wegebau)

3. Gefahrstoff- und Schadstoffscreening vor Ort

Bereits vor dem Recyclingprozess müssen Abbruchmaterialien untersucht werden. Dies geschieht durch Schadstoff-erkundungen, z. B.:

- Gebäudeschadstoffkataster (Asbest, PCB, teerhaltige Materialien)
- Sichtkontrollen und Probenahmen während des Rückbaus
- Ausschluss hochbelasteter Stoffe, die nicht recycelt werden dürfen

4. Langzeit- und Umweltverträglichkeitsprüfungen

Diese Prüfungen sichern ab, dass die Materialien langfristig keine Schäden verursachen:

- Elutionsprüfungen zur Bestimmung der Schadstoffauswaschung
- pH-Wert- und Leitfähigkeitsmessungen
- Karbonatisierungs- und Sulfatbeständigkeit
- Bewertung der Auswirkungen auf Boden- und Wasserchemie

5. Dokumentations- und Nachweispflichten

Hersteller von Recyclingbaustoffen unterliegen einer kontinuierlichen Eigen- und Fremdüberwachung. Dies umfasst:

- Regelmäßige Laboranalysen durch zertifizierte Prüfstellen
- Dokumentation der Ergebnisse und Grenzwerteinhaltung
- Kennzeichnung der Materialklassen (z. B. RC-1, RC-2)
- Bereitstellung der Nachweise für Bauherren und Behörden

Für Recyclingbaustoffe sind umfangreiche Schadensanalysen vorgeschrieben. Sie betreffen sowohl die chemische Zusammensetzung als auch die physikalisch-mechanische Eignung und die langfristige Umweltverträglichkeit. Nur geprüfte und dokumentierte Materialien dürfen als Ersatzbaustoffe in Verkehr gebracht und im Bauwesen eingesetzt werden.

In der ursprünglichen Arbeitsplanung wurde der benötigte Zeitaufwand unterschätzt. Das Durcharbeiten und Verstehen der diversen Vorschriften benötigte einen höheren Zeitaufwand.

Arbeitspaket 1.2 Beschaffung von diversen Sandausgangsmaterialien

Die Zielstellung dieses Arbeitspaketes war die Beschaffung diverser Sandtypen, rezyklierte Gesteinskörnungen, feinkörnige Nebenprodukte (wie z.B. Gesteinsmehl aus Schutt oder Ziegeln) oder natürlich vorkommende Böden, insbesondere Wüstensand.

Zur Herstellung der Ausgangsmaterialien wurde vom IBP typischer Bauschutt zur Verfügung gestellt. Dieser war nicht zerkleinert oder vorsortiert, sondern eine heterogene Masse aus Beton, Mörtel, Papierbeimischungen (Tapete) und Steinmaterialien. Das Papier wurde soweit möglich aussortiert und die restliche Komposition wie vorhanden weiterverwendet. Aus der Diskussion mit dem IBP über die Möglichkeit einen „reinen“ Betonschutt zu verwenden, ergab sich stattdessen die Verwendung eines neuen Porenbetons („Ytong“), der einfach handelsüblich aus dem Baumarkt zu beziehen ist. Der Porenbeton wurde ausgewählt, da er eine bekannte Problematik beinhaltet: einen hohen Anteil an Sulfat, das zum Ausblühen neigt. Dadurch wurde wesentlich ein möglicher Störfaktor mit abgeprüft. Ein weiterer Vorteil des Porenbeton ist, dass er durch die schon vorhandenen Poren leichter zu zerkleinern ist.

Aus privaten Beständen wurde reiner Wandmörtel aus dem Jahr 1927 beschafft, um wiederum einen Teil der Bauschuttmischung als Einzelkomponente vorliegen zu haben. Als weiteres Rezyklat-Material wurde ebenso ein aus 1927 stammender Dachziegel verwendet.

Die Beschaffung von Wüstensand erwies sich ungleich schwieriger. Bei der Recherche nach Möglichkeiten diesen zu beschaffen, wurden zunächst die Länder Ägypten und Namibia in Augenschein genommen, wobei festgestellt werden

musste, dass die meisten Wüstenstaaten den Export von Sand komplett verbieten oder nur mit Lizenz gestatten. In Namibia zuständig für diese Lizenzen ist das MINISTRY OF ENVIRONMENT, FORESTRY AND TOURISM (info.pro@met.gov.na), das angeschrieben wurde, es erfolgte aber keine Antwort. Als Ersatz für Wüstensand wurde Spielsand (gewaschen, rund Körnung 0,2-2 mm) eingesetzt. Dieser ist zwar nicht mit Wüstensand gleich zu setzen, aber der Aufwand für die Beschaffung von Wüstensand erschien mit fortschreitender Projektdauer als zu hoch.

Sehr zeitaufwendig stellte sich die Zerkleinerung der Materialien „Bauschutt“, „Ziegel“ und „Mörtel“ dar. Hier war es teils notwendig über drei Wochen lang das Ausgangsmaterial in einer Kugelmühle weiter zu zerkleinern, insbesondere galt dies für den Bauschutt. Der Porenbeton ließ sich verhältnismäßig besser zerkleinern und war innerhalb einer Woche bereitgestellt. Die benötigte Zeit ist von der benötigten Menge abhängig, anfangs war der Ansatz eine Form zu verwenden, die die Abmaße 250x90x60 mm hat, dies wurde aber insbesondere mit der Ausdehnung auf weitere Fertigungsparameter auf das Volumen von zunächst 150x40x40 mm und dann auf 40x40x40 mm verkleinert. Diese Umstände verlängern den einzusetzenden Personalaufwand als auch die Bearbeitungsdauer dieses Arbeitspaketes.

Arbeitspaket 1.3 Kennwertermittlungen verschiedener Sandformteile

Die Kennwertermittlung sollte eigentlich nach der DIN-Norm DIN EN 1015-11 (Druck- und Biegefestigkeiten) erfolgen, Voraussetzung dafür ist jedoch ein Formbauteil, das eine entsprechende Festigkeit zum Handhaben besitzt. Nach der Vorgehensweise - wie sie im Antrag beschrieben steht - wurden keine Formbauteile mit nennenswerter Festigkeit erhalten, sondern sie neigen beim Entformen zum Zerbröseln. Statt in die Kennwertermittlung wurden daher Ressourcen in die Variation der Fertigungsparameter gesteckt. Folgende Parameter wurden systematisch variiert:

- Dauer der Vorbehandlung mit phosphathaltiger Lösung von 0,5 Stunden (bisher angenommenes notwendiges Minimum der Vorbehandlungsdauer) über 3 Stunden, 12 Stunden und 72 Stunden.
- pH-Werteinstellung der wässrigen Beschichtungslösung von sauer (pH=2) zu neutral (pH 7). Auch hier wurden unterschiedlich lange Behandlungsdauern (bis zu 72 Stunden) ausprobiert.
- Trocknungsdauer und Trocknungstemperatur von Raumtemperaturtrocknung bis zur Ofentrocknung bei 150 °C und 250 °C. In einzelnen Fällen wurden die Proben mit 300 °C beaufschlagt.
- Auftrennung der aus der Kugelmühle erhaltenen Mischung mittels Siebturm (gleichzeitig mit Partikelgrößen Analyse). Es wurden gezielte Größen verwendet von sehr klein (< 63 µm) und Körnungen zwischen 100 bis 500 µm.

Das Beschichten der Ausgangsstoffe erfolgte in PE-Flaschen auf einem Rollenmischer, nach definierter Zeit wurden die Suspensionen in Formen gegeben. Dabei wurde sukzessive die Größe der Formen minimiert, um den Aufwand bei der Materialherstellung zu reduzieren.

In der Abbildung 1 links ist die größte Form mit 250x90x60 mm zu sehen, diese Form war an den Seiten geschlossen und hat einen Lochdeckel, damit Wasser abgetrocknet werden kann. Im mittleren Bild ist die Form der Größe 150x40x40 mm dokumentiert. Durch Einlegen von dünnen Abstandshaltern (> 100 µm) an den Seitenbleche, wird erreicht, dass überflüssige Suspension durch die Ritze abfließen kann. Die kleinste Form in 40x40x40 mm wurde mittels beschichteten Holz hergestellt. Durch die „natürlichen“ Spalte des Holzes wird auch in dieser Variation ein Abfluss erreicht.



Abbildung 1: Verwendete Formen

Der pH-Wert wurde zunächst als Ausgangswert des jeweiligen Ausgangsmaterials in Wasser bestimmt, dann die Beschichtungslösung zugegeben und wiederum gemessen. Eine Einstellung erfolgte mit Phosphorsäure zum sauren pH; ausgehend von dem pH-Wert, der bei der erfolgreichen Behandlung von Gießereisand gemessen worden war (pH 3 bis 4), Tabelle 1.

Baustoff + dest. Wasser	pH-Wert [Anfang]	pH-Wert [+ 4h]	pH-Wert [Baustoff + Phosphat-Lsg.]
Bauschutt	~ 8	~ 9-10	~ 4-5
Ytong-Stein	~ 9-10	~ 9-10	~ 4-5
Mörtel	~ 8	~ 8	~ 4-5
Sand	~ 6	~ 6	~ 3-4

Tabelle 1: pH-Werte

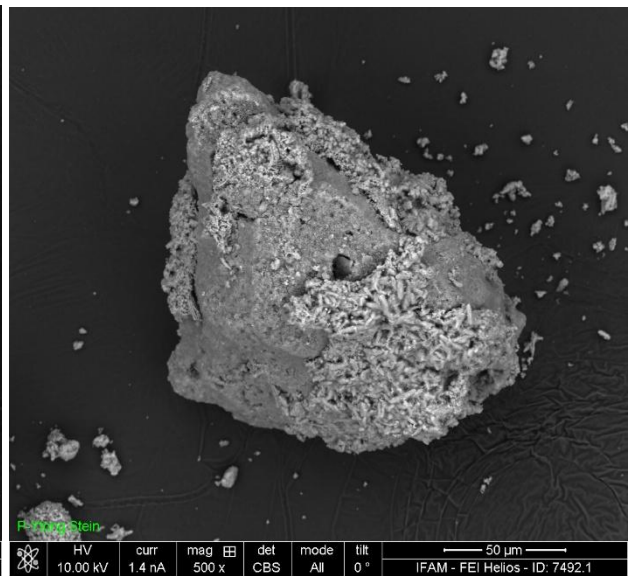
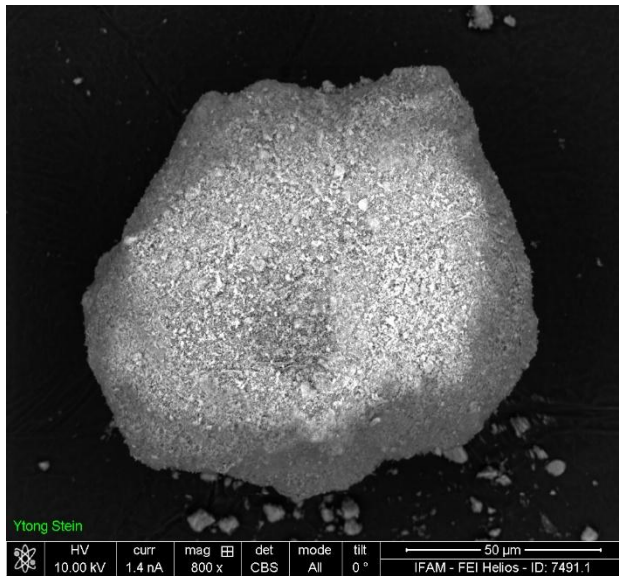
Ob eine Beschichtung mit den Phosphatsalzen auf die verschiedenen Ausgangsmaterialien überhaupt stattgefunden hat, wurde mittels Rasterelektron-Mikroskopie (REM) und Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht (jeweils an drei Partikeln). Tabelle 2 fasst die Phosphorkonzentrationen der untersuchten Ausgangsstoffe zusammen. Es kann jeweils deutlich gezeigt werden, dass eine Phosphorschicht auf der Partikeloberfläche gebildet worden ist. Dabei sind zwar geringe Abweichungen in den Konzentrationen feststellbar, es wird aber eingeschätzt, dass dies nicht ursächlich für das Nichtformen ist. In Abbildung 2 sind die Partikelbilder dargestellt.

Ausgangsmaterial	P-Gehalt vor Beschichten [Gew.-%]	P-Gehalt nach Beschichten [Gew.-%]
Bauschutt	0,03	16,32; 11,74; 9,08;
Ytong-Stein	0	12,7; 12,79; 8,30
Mörtel	0	11,45; 7,86; 9,10

Tabelle 2: Phosphorwerte vor und nach Beschichten von Ausgangsstoffen.

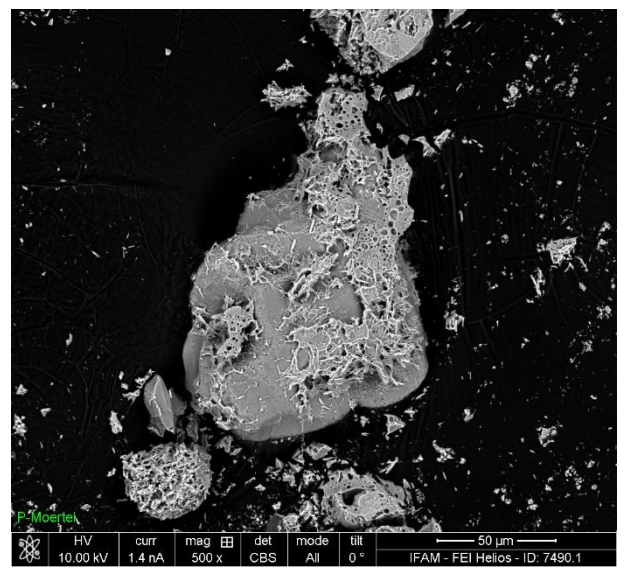
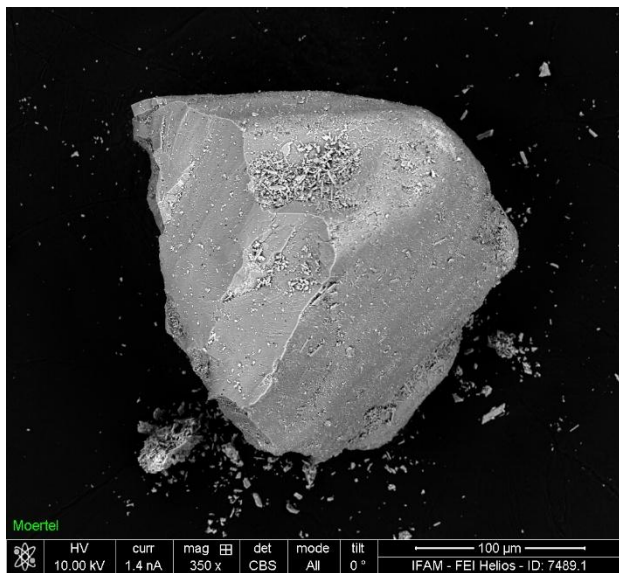
Porenbeton: Vor

Nach



Mörtel: Vor

Nach



Bauschutt: Vor

Nach

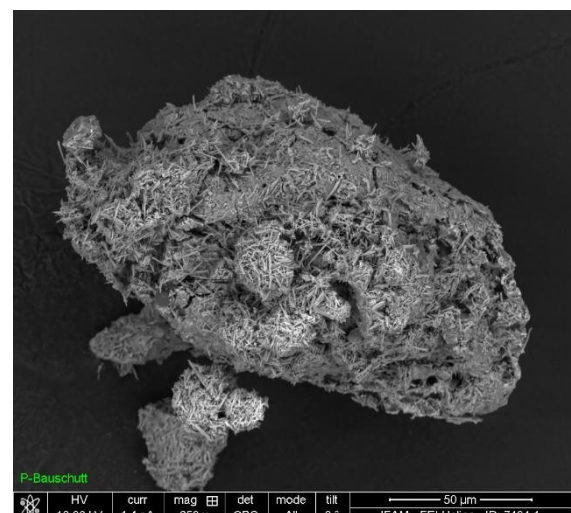
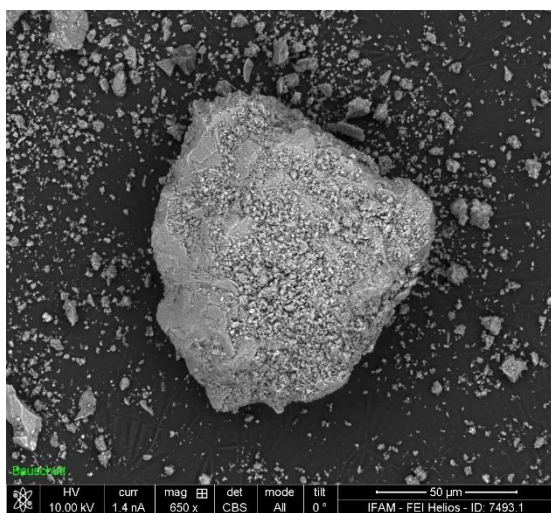
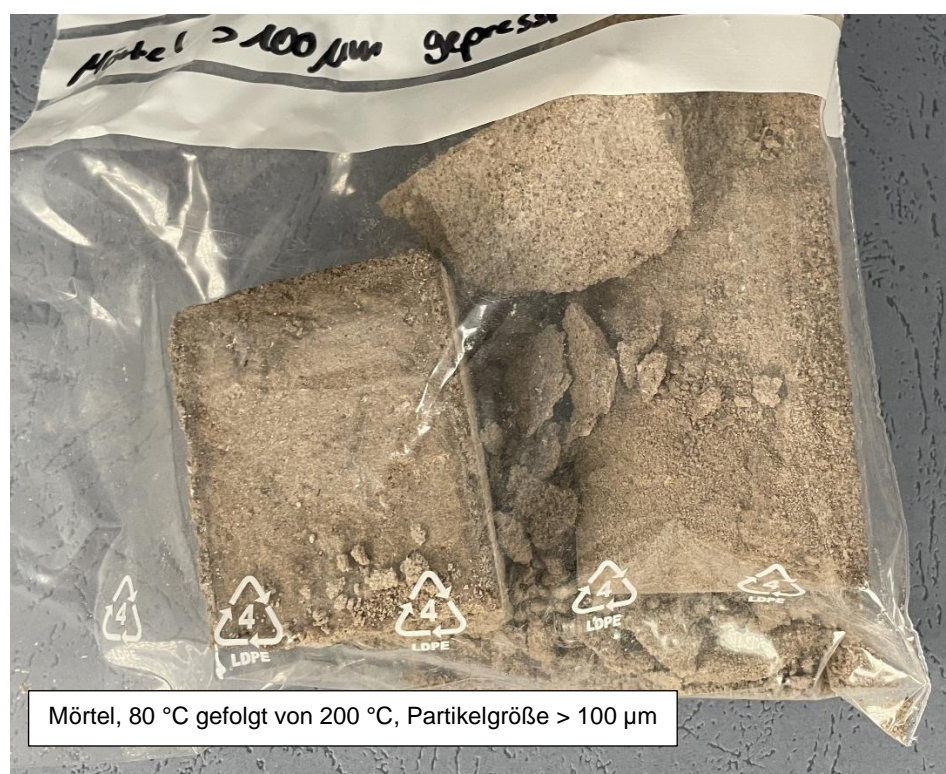
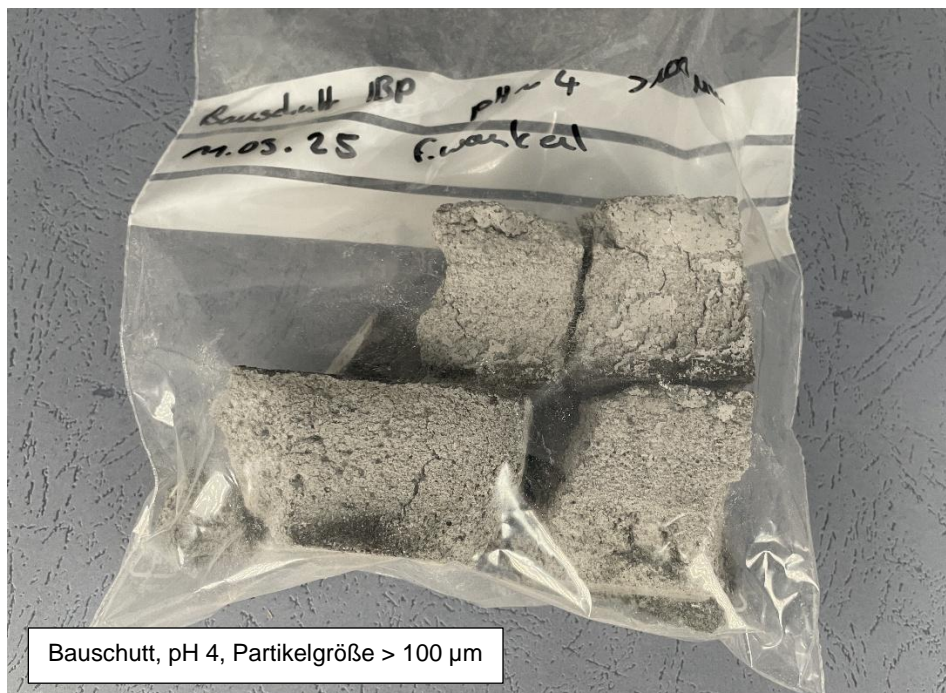


Abbildung 2: REM Bilder vor und nach Beschichten mit Phosphatlösung.

Die Herstellung der Formbauteile war in allen Fällen nicht erfolgreich. Ansatzweise wurde mit sehr feinem Ziegelstaub ein Formteil erreicht, dass nicht beim Entformen auseinanderfiel. Abbildung 3 zeigt beispielhaft für einige Variationsparameter der Ausgangsstoffe Bauschutt, Mörtel, Porenbeton und Ziegel die erhaltenen Materialien.



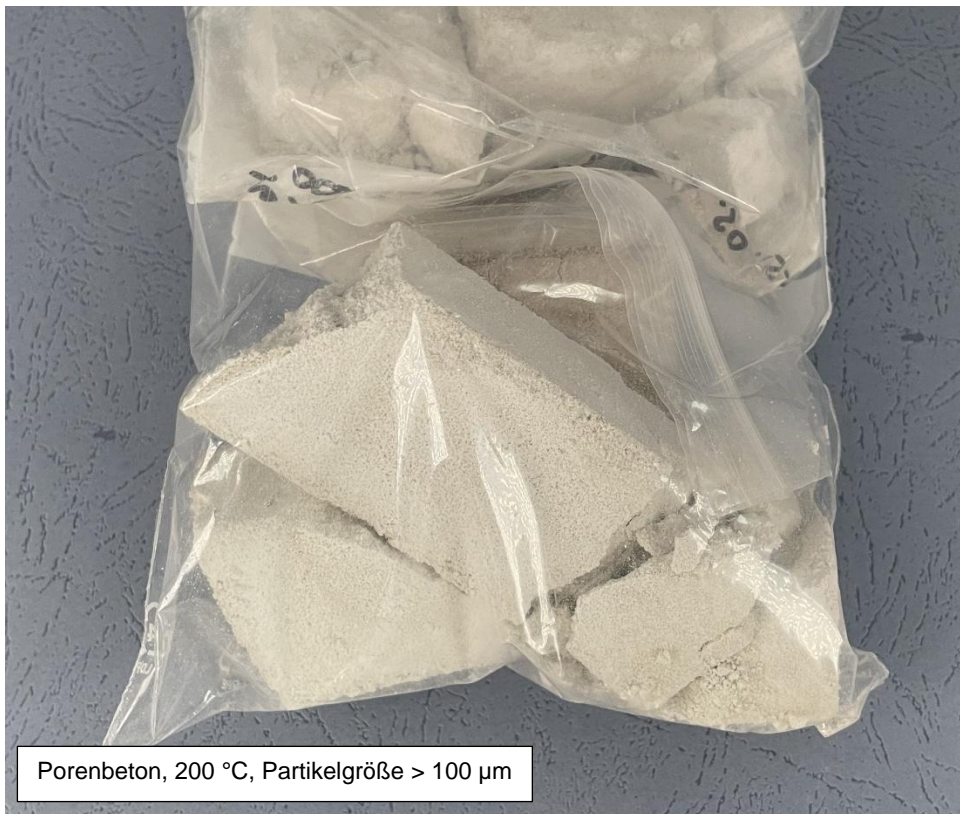


Abbildung 3: Beispielhafte Bilder der erhaltenen Formbauteile

Das Ziegelformbauteil rechts konnte allerdings nicht durch eine Temperaturbehandlung von 200 °C bzw. mehr in eine wasserunlösliche Form überführt werden, wie dies beim Ausgangsmaterial Gießereisand möglich war.

Dieser Stand der Arbeiten konnte erst sehr viel später erreicht werden als im Antrag geplant. Zum einen hatten die aufwendige Aufbereitung der verschiedenen Materialien in der Kugelmühle sehr viel mehr Zeit gebraucht als geplant, zum anderen war die hohe Variationsvielfalt der Experimente so nicht geplant. Insgesamt hat dies dazu geführt, dass von den 12 Monaten Projektlaufzeit knapp 11 Monate hierfür aufgewendet wurden.

Arbeitspaket 2: Fertigungskonzepte und Demonstratoren

Zielstellung des Arbeitspaketes war anschauliche Konzepte zu einer möglichen industriellen Fertigung zu entwickeln. Es sollten Demonstratoren aus einer individuellen Fertigung aus Bauschuttmaterialien und rezyklierten Material erfolgen. Aus den o.g. Gründen erfolgte eine Bearbeitung des Paketes nicht.

Arbeitspaket 3: Netzwerkaufbau und Transfer

Ziel des Arbeitspaketes war der Netzwerkaufbau zu Baustoffherstellern und -verarbeitern sowie Hilfsorganisatoren, um die erzielten technischen Ergebnisse vorzustellen und umzusetzen. Aus den o.g. Gründen erfolgte eine Bearbeitung des Paketes nicht.

2.2 Erreichte Meilensteine

Meilensteine

Beschreibung: messbare Zielparameter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
Materialkenndaten sind ermittelt worden und die Rezyklierbarkeit ist gezeigt.	1	7	12	Durch die lange Bearbeitungsdauer, im Besonderen der Zeitaufwand beim Zerkleinern und die Erhöhung des Variationsaufwandes konnte erst mit Ablauf der Projektzeit sicher festgestellt werden, dass die im Projektantrag unter Punkt 6 „Notwendigkeit der Zuwendung“ hier voll zugetroffen hat. Es ist schlussendlich festzustellen, dass die technischen Ziele insgesamt nicht erreicht wurden.
Demonstratoren sind gefertigt und zeigen das Potential der Verwendung von Wüstensand und Bauschutt als Ressource. Benchmarking ist zu Vergleichsmaterialien ist erfolgt.	2	10	x	Nicht erreicht

2.3 Erreichte Ergebnisse

2.3.1 Erreichung der Gesamtziele

Gesamtziel des Innovationssprints	<i>Ziel des Projekts ist die Entwicklung, die Optimierung, das Upscaling und die Umsetzung einer Methode zur Herstellung von ausgewählten Baustoffen aus "geklebtem" Sand. Die Klebung ist nicht ein klassischer organischer Klebstoff, sondern ein anorganisches Salzgemisch. Damit sind die herge-</i>	<i>Bildlich gesprochen ist aus dem Innovationssprint ein Langstreckenlauf geworden, dessen Ziel nicht erreicht worden ist. Dadurch, dass die Übertragung des Ausgangskonzeptes nicht auf die für das Projekt ausgewählten Materialien funktioniert hat, ist das unter Punkt sechs des Antrages maximale Desaster eingetreten.</i>
--	--	---

	<p><i>stellten Bauformteile nach Ende ihres Lebenszyklus in einem nachhaltigen Recyclingschritt wieder verwendbar.</i></p> <p><i>Es sollen Anwendungen aus dem Bausektor hinsichtlich der geforderten Eigenschaften selektiert werden, hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf technologische Anforderungen, Energieintensität sowie rechtliche und normative Vorgaben gelegt.</i></p> <p><i>Im Rahmen des beantragten Projekts werden zwei konkrete Anwendungsfälle, wie z.B. die Ziegelherstellung und die Verwendung als flammhemmende Wandzwischen-schicht, ausgewählt und das neu entwickelte Material hinsichtlich seiner technologischen Eigenschaften angepasst.</i></p>	
--	--	--

2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele

Geplante konkrete Arbeitsziele	Erfüllung
Überprüfung der Verwendung diverser Sandtypen und Rezyklaten auf konzeptionelle Eignung zur Herstellung von Formbauteilen.	Die Überprüfung erfolgte in breiterer Variation als im Antrag angedacht, die Formteileherstellung war aber nicht erfolgreich.
Bestimmung baurelevanter Materialeigenschaften.	Nicht erfüllt.
Erstellen von Fertigungskonzepten.	Nicht erfüllt.
Recyclingfähigkeit gezeigt.	Nicht erfüllt.

Zusätzliche oder neue Arbeitsergebnisse, die im Projektverlauf entstanden sind:

<i>keine</i>

2.4 Verwertung

2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Fraunhofer nutzt zur Verwertung der Projektergebnisse grundsätzlich sämtliche Transferpfade wie Ausgründungen, Lizenzierung/Übertragung, Transfer über Köpfe oder Veröffentlichungen. Hierbei verfolgt Fraunhofer eine aktive Patentpolitik und meldet schutzrechtsfähige Ergebnisse im Rahmen der rechtlichen Möglichkeiten und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit national und ggf. auch international an.

Im Vorhaben sollten schutzrechtsfähige Ergebnisse für solche Länder angemeldet, in denen eine künftige Verwertung ermöglicht bzw. gegen (unberechtigte) Dritte abgesichert werden soll. Die im Vorhaben zu erwartenden geschützten und/oder ungeschützten Ergebnisse werden vorzugsweise - vorbehaltlich gesonderter Vereinbarungen - im Rahmen sachlich, zeitlich oder örtlich konkretisierter Lizenzvereinbarungen mit den häufig international tätigen Verbundpartnern und deren weltweiten Konzerngesellschaften verwertet werden.

Aufgrund der nicht Erreichung der Zielsetzung kann nicht von einer Verwertung der Ergebnisse ausgegangen werden.

2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens

Es sind keine Fortschritte Dritter bekannt.

2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Keine Veröffentlichung neben der des Abschlussberichtes bei der TIB Hannover geplant.

2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Eine positives technisches Projektergebnis hängt im Wesentlichen von den erzielbaren Ergebnissen bei der Verwendung von ressourcenschonenden Materialien und der Überprüfung der Rezyklierbarkeit der erzeugten Materialien ab. Im Rahmen des Projektes wurde gezeigt, dass diese Voraussetzung nicht erfüllt werden konnte.