



Robots Reuse

**Digitale Tools und die
Wiederverwendung von
unbearbeitetem Bauschutt**

Maria Wyller
Hana Svatoš-Ražnjević
Eva Schad
Prof. Achim Menges

**Digitale Entwurfs- und
Fertigungsmethoden
erlauben komplexe
Montageprozesse mit
Bauschutt**

**Potenziale des automati-
sierten Verlegens und
Vergießens nutzen**

**Robotik: Zeit, Kosten und
Energieverbrauch von
Bauprozessen senken**



Abb. 1: Wiederverwendung. Von links: Fassade San Marco, Venedig, Ausschnitt der Trümmersäule, Berlin, Beispiele Opus Caementicium, Rom, Foto: David Chipperfield Architects / ICD Universität Stuttgart

Bau- und Abbruchabfälle (construction and demolition waste – CDW) sind der größte Abfallstrom in Europa und ein großes globales Problem (Gálvez-Martos et al. 2018; Zhang et al. 2022). Trotz zunehmenden Interesses und Fokus auf diese Materialgruppe findet sie nur selten ihren Weg zurück in die Architektur. Um eine zirkuläre Nutzung von Baumaterialien zu erreichen, bedarf es sowohl der Entwicklung kosteneffizienter und zeiteffizienter Technologien, die die Wiederverwendung ermöglichen, als auch einer architektonischen Ästhetik für Nutzende, Investoren sowie Architektinnen und Architekten, welche es attraktiv macht, mit dem Material zu bauen.

In der Vergangenheit war die Wiederverwendung eine gängige Praxis. Viele anerkannte Architekturprojekte wurden aus wiederverwendetem Holz, Steinen und Ziegeln gebaut (Moravánszky 2021; Meier 2020; Stricker 2022). Diese Projekte veranschaulichen sowohl das große als auch das vielfältige ästhetische Potenzial der Wiederverwendung (Abbildung 1). Dennoch bleibt allen Projekten gemeinsam, dass sie auf manuelle Arbeit von erfahrenen Handwerkerinnen und Handwerkern angewiesen sind. Heute übersteigt das Ausmaß der Massenproduktion und des Bauabfallproblems die Kapazität handwerklicher Arbeit. Die hohen Kosten, die mit der Verarbeitung nicht-standardisierter Materialien verbunden sind, sind

neben den Hindernissen, die mit der Materialqualität, den Bauvorschriften und der Logistik zusammenhängen, eine der größten Barrieren für die Wiederverwendung in der Architektur (Park/Tucker 2016).

Aktuelle Fortschritte im Bereich der Robotik und des Scannens ermöglichen jedoch, die Technik von der manuellen Arbeit zu entkoppeln (Clifford/McGee/Muhonen 2018). Während der Industrialisierung sind wir von der handwerklichen Produktion zur Massenproduktion übergegangen. Heute stehen wir an der Schwelle eines weiteren technologischen Wandels. Während die mass-customization bereits weit fortgeschritten ist, ist eine mögliche Zukunft der flexiblen Automatisierung in Sicht. Damit können komplexe Fertigungs- und Montageprozesse mit nicht-standardisierten Materialien in Bezug auf Zeit, Kosten und Energieverbrauch ebenso effizient werden, wie die Herstellung mit standardisierten Materialien (Rakhshan et al. 2020; Riuttala et al. 2024). Neben der Automatisierung bestehender Techniken bieten digitale Technologien auch die Möglichkeit, neue Techniken zu entwickeln.

Durch die Kombination von Expertise aus Praxis und Wissenschaft wurde im Rahmen des Projekts untersucht, wie eine Synergie zwischen Material, Werkzeugen und Ästhetik im Hinblick auf vier übergreifende Forschungsfragen erreicht werden kann:

- Wo liegen die derzeitigen Grenzen von computerbasiertem Entwerfen und digitalen Fabrikationsabläufen, die zur Verarbeitung und Montage nicht standardisierter Baumaterialien eingesetzt werden?
- Welche digitalen Entwurfsprozesse könnten für das Bauen mit wiederverwendeten Baumaterialien geeignet sein?
- Wie kann der Einsatz von computerbasiertem Entwerfen und digitalen Fabrikationsmethoden die Wiederverwendung von Baumaterialien für Architekten und Architektinnen, Unternehmen und Nutzende in Bezug auf Ästhetik, Skalierbarkeit und Effizienz attraktiv machen?
- Wie können wir die Lücke zwischen architektonischer Entwurfspraxis und aktueller akademischer Forschung zur Wiederverwendung von Baumaterialien schließen?

Diese Fragen haben wir sowohl auf theoretischer Ebene in einer Studie über die Wiederverwendung in der Architektur, als auch auf praktischer Ebene in einer Fallstudie konzentriert auf Schutt untersucht. Durch Methoden, die von der Analyse traditioneller Techniken bis zur Materialanalyse und Prototyping reichen, haben wir verschiedene Ansätze entwickelt, wie man über Schutt denken, mit diesen umgehen und gestalten kann. Eine Richtung, Jammed Rubble, wurde zusammen mit Konzepten für die robotergestützte Verlegung und Vergießen von Schutt erforscht (Abbildung 2 und 3). Dieses Projekt ist ein konzeptionelles Grundlagenforschungsprojekt, welches zum Ziel hat, einen Ausgangspunkt für die Wiederentdeckung des Potenzials der Wiederverwendung von Bauschutt durch digitale Werkzeuge zu entwickeln.

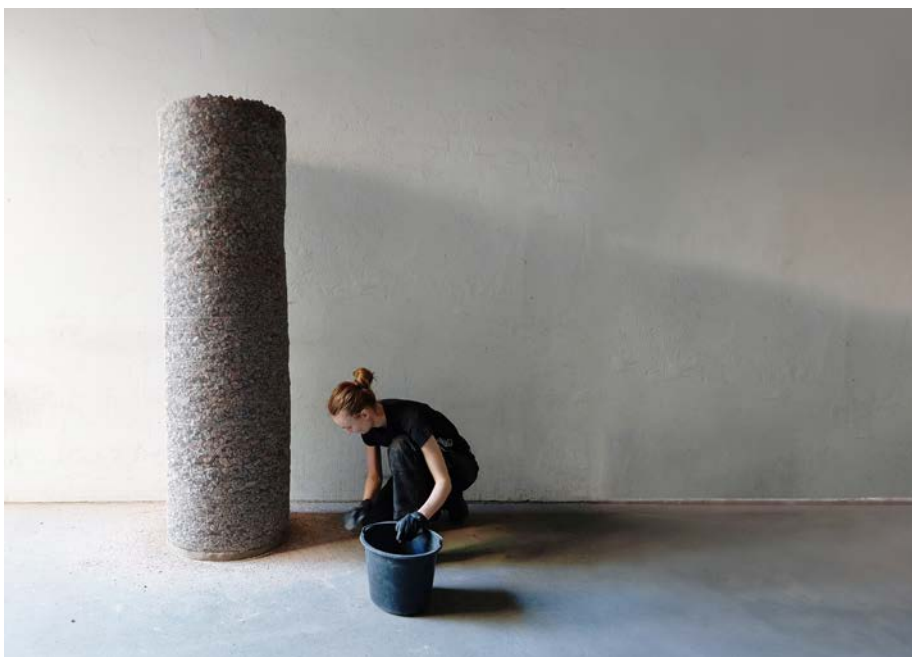


Abb. 2: (oben) Robotergestütztes Verlegen und Vergießen, Foto: David Chipperfield Architects / ICD Universität Stuttgart

Abb. 3: (links) Prototyp, erstveröffentlicht in Svatoš-Ražnjević et al. 2024: Jammed Rubble. Höhe: 220cm, Durchmesser: 50cm, Foto: David Chipperfield Architects / ICD Universität Stuttgart

Ergebnisse

1.1 Studie zur Wiederverwendung in der Architektur

Im ersten Teil des Projekts haben wir mehr als 300 Projektreferenzen gesammelt, die für die Wiederverwendung in der Architektur relevant sind. Um die Projekte zu ordnen, zu verstehen und zu bewerten – nicht aus theoretischer oder exakt historischer Sicht, sondern aus der praktischen Perspektive der Architektur – haben wir eine einfache und schnelle Methode entwickelt, die aus vier Fragen und 11 Kategorien besteht: Was wurde wiederverwendet (Baugruppen, Bauteile, Bauelemente), was war die Motivation für die Wiederverwendung (pragmatische Wiederverwendung, ideologische Wiederverwendung, kompositorische Wiederverwendung), wie beeinflusste die Wiederverwendung den Entwurfsprozess (top-down, bottom-up, top-down/bottom-up), welche Technologien wurden entwickelt, um die Wiederverwendung zu ermöglichen (flexible Konstruktionsmethoden, Design für Montage/Demontagemethoden). Eine wichtige Erkenntnis aus dieser Studie war, dass es eine Vielzahl, insbesondere historischer Referenzen gibt, welche die mögliche ästhetische Qualität der Wiederverwendung bereits zeigen. Eine nähere Definition der Kategorien und Projektbeispiele wurde in einem Aufsatz definiert, der auf der Projektwebsite www.rubble-works.com veröffentlicht ist.

1.2 Analyse von Schutt

Auf der Grundlage einer empirischen Analyse von unterschiedlichem Bestandsmaterial von mehreren aktiven Bau- und Renovierungsbaustellen in Berlin haben wir festgestellt, dass es einen wichtigen Zusammenhang zwischen der Herkunft des Materials, d. h. einer Ziegelwand oder einer Betonplatte, und der daraus resultierenden Größe und Geometrie der Schuttelemente gibt. Ziegelschutt ist in der Regel eher rechteckig und zerbricht in Längsrichtung, sodass die Elemente ein oder zwei ihrer ursprünglichen Abmessungen beibehalten. Im Gegensatz dazu ist Betonschutt im Allgemeinen runder und weist eine größere Größenvariation auf (Abbildung 4). Die Größe von Ziegel- und Keramikschnitt ist durch die genormten Abmessungen des ursprünglichen Elements begrenzt. Während Betonschutt nicht begrenzt ist, da die Abmessungen von Betonbauteilen variieren.

Darüber hinaus haben wir zwei verschiedene Sichtweisen auf den Schutt entdeckt. Erstens als eine granulare Masse, die in der Lage ist, aggregierte Strukturen zu bilden. Zum anderen als eine Sammlung von Einzelobjekten, die jeweils eigene Merkmale aufweisen, die eine Reihe von Kompositionsmöglichkeiten eröffnen. Wenn man entweder das granulare Verhalten des Schutts oder die Qualitäten der einzelnen Objekte als Leitprinzip für die Gestaltung verwendet, können radikal unterschiedliche architektonische Ausdrucksformen und Typologien entstehen.



Abb. 4: Schutt, angepasst nach Svatoš-Ražnjević et al. 2024; Foto: David Chipperfield Architects / ICD Universität Stuttgart

1.3 Erhebung der Schutttechniken

Insgesamt haben wir 47 Techniken erfasst und eingeordnet, die entweder Schutt oder Materialien, aus denen Schutt entstehen, beinhalten. Auf der Grundlage der Verarbeitungsmethode haben wir die Techniken in zwei Hauptkategorien eingeteilt: Verlegen und Vergießen. Verlegetechniken nutzen die individuellen Eigenschaften des einzelnen Schuttteils, während Gießverfahren sich das Zusammenspiel der Teile zunutze machen. Die Methoden wurden weiter unterteilt nach der Verwendung eines Bindemittels. So entsteht ein Überblick über Schutttechniken, der als Leitfaden für die Verwendung von Schutt dienen kann. Er ist für jeden geeignet, für Architektinnen und Architekten, Forschende oder Amateure.



Abb. 5: Fünf Prototypen, Foto: David Chipperfield Architects / ICD Universität Stuttgart

1.4 Bewertung des Automatisierungspotenzials

Um das Automatisierungspotenzial verschiedener Schutttechniken zu bewerten, wählten wir fünf repräsentative Verfahren aus der Technikübersicht aus und testeten sie in physischen Prototypen (Abbildung 5). Anhand der Prototypen konnten wir feststellen, dass die Präzisionsanforderungen und der Bedarf an Sensordaten zwischen den Verlege- und Gießverfahren variieren. Verlegeverfahren, bei denen einzelne Teile gehandhabt werden, erfordern im Allgemeinen umfangreiche Sensordaten und eine hohe Fertigungsgenauigkeit. Im Gegensatz dazu erfordern die Gießverfahren, bei denen der sortierte Schutt als Masse gehandhabt wird, weniger Sensordaten und geringere Präzision bei der Montage. Generell sind für das Verlegen und Vergießen unterschiedliche Werkzeuge und Methoden erforderlich. Bei den Verlegeverfahren können digitale Werkzeuge die Erkundung der Zusammensetzung und die Regeln für die Herstellung durch generatives Design und adaptive Roboterfertigung verbessern. Bei den Gießverfahren können sie die Unvorhersehbarkeit granularer Systeme durch programmierte Gießsequenzen bewältigen.

Durch den Prototypingprozess haben wir jedoch auch gelernt, dass es beim Bauen mit Schutt entscheidend ist, die gesamte Baustelle zu berücksichtigen, einschließlich der verfügbaren Materialien, der Entwurfsziele, der Baustellenlogistik und der Technologien. Es reicht nicht aus, nur die einzelnen Techniken zu automatisieren, um das Bauen mit Schutt zu einer nachhaltigen Bauweise zu machen.

Weitere Forschungen sind nicht nur zu digitalen Werkzeugen für bestimmte Techniken erforderlich, sondern auch dazu, wie Technologien in Bauumgebungen integriert werden können. Die Erforschung der wirtschaftlichen und nachhaltigen Vorteile von in-situ-Fertigungstechnologien mit Schutt sollte ebenfalls ein Schwerpunkt sein.

Eine vollständige Beschreibung der Technikübersicht und -bewertung wurde im Rahmen des Design Modelling Symposiums 2024 in Kassel veröffentlicht (Wyller et al. 2024).

1.5 Experimentelles Bausystem: Jammed Rubble

Wir haben einen Ansatz für eine eingehende Untersuchung ausgewählt. Inspiriert vom granularen Verhalten von Schutt und einfachen Gabionenkonstruktionen entwickelten wir ein Bausystem aus komprimiertem Schutt. Jammed Rubble hat das Potenzial, ein vollständig recycelbares und wiederverwendbares Bausystem für temporäre und permanente Bauten zu werden. Es kann für Bauelemente wie Wände, Pfeiler oder Fundamente verwendet werden, und die spezifische Verfüllungsstrategie passt sich an verschiedene Materialien und Größen an, sodass In-situ-Bauen vor Ort möglich ist, an dem das Material entnommen wird.

Das System besteht aus einem leichten Glasfasernetz-container, der nach einer bestimmten Choreografie mit Schutt gefüllt wird. Wir haben eine Reihe von Experimenten in verschiedenen Maßstäben durchgeführt, um herauszufinden, wie der Schuttbruch verteilt werden muss, um ein stabiles Bauteil zu erhalten (Abbildung 6). Darüber hinaus zeigten Druckversuche, dass: 1) eine Schichtfolge mit sowohl horizontaler als auch vertikaler Schichtung von Schutt unterschiedlicher Größe am besten funktioniert, 2) ein Container mit einer hohen Zugfestigkeit die Leistung deutlich verbessert (Abbildung 7). Der erfolgreichste Prototyp konnte 3,5 t bei einer vertikalen Verformung von 66,6 mm standhalten. Bei dieser Schichtfolge wurden große Teile in der Mitte des Bauteils platziert und mittlere, kleine und besonders kleine Teile entlang des Bauteilrands und in Schichten über die großen Stücke gegossen. Wir haben diese Schichtabfolge in einem 1:1 Prototyp einer Säule getestet.

Da sich das System noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet, sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die strukturelle Stabilität zu erhöhen und die vertikale Verschiebung zu verringern. Mögliche Richtungen

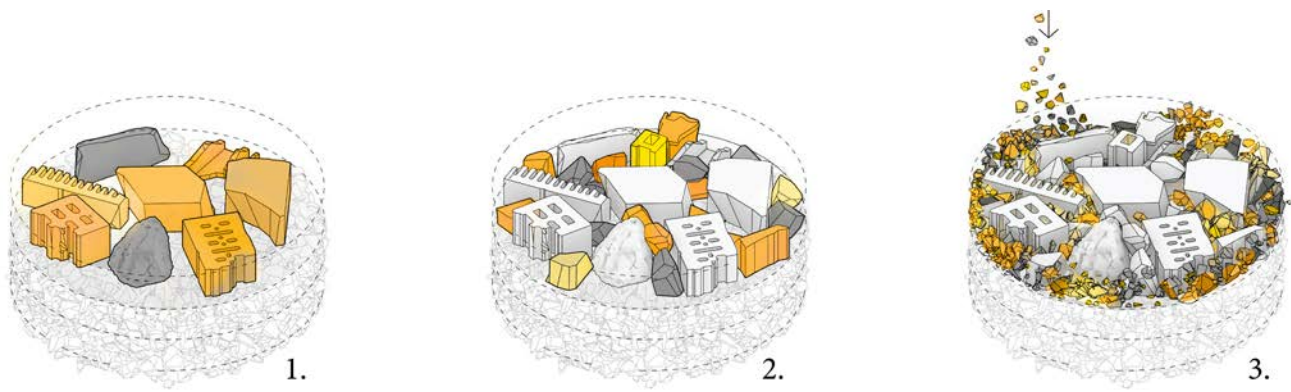


Abb. 6: Füllungsstrategie, erstveröffentlicht in Svatoš-Ražnjević et al. 2024; Foto: David Chipperfield Architects / ICD Universität Stuttgart

sind die Weiterentwicklung des Containers, die Optimierung der Füllstrategie und die Untersuchung biobasierter oder wiederverwertbarer Bindemittel wie Myzel, die wir im Rahmen des Projekts kurz erforscht haben. Es wäre auch interessant, eine Ökobilanz und eine Kosten-Nutzen-Bewertung des Systems durchzuführen, um sein Gesamtpotenzial besser einschätzen zu können.

Eine vollständige Beschreibung der Entwicklung des Bausystems wurde im Rahmen der eCAADe 2024 veröffentlicht (Svatoš-Ražnjević et al. 2024).

1.6 Robotisches Verlegen und Vergießen

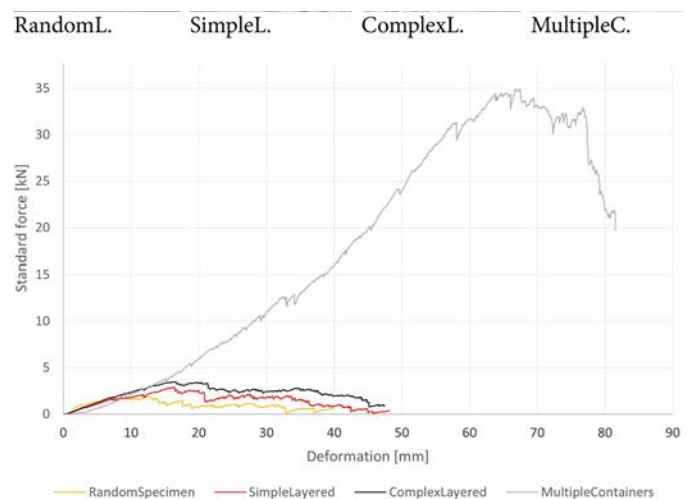
Da das Bauen mit Bauschutt nicht nur komplex und langsam, sondern auch „langweilig, schmutzig und gefährlich“ ist, haben wir grundlegende robotische Fertigungskonzepte sowohl für das Verlegen als auch für das Vergießen entwickelt. Durch die Automatisierung beider Techniken ist es möglich, nicht nur Jammed Rubble zu errichten, sondern auch eine breite Auswahl der genannten Schutttechniken.

Für das robotische Verlegen, haben wir mehrere Experimente zum Einbringen von Robotern durchgeführt, um verschiedene Typen von Mauerwerk und Trockenstapeln zu konstruieren. Das robotische Vergießen basierte auf grundlegenden Prinzipien des granularen Verhaltens. Eine Schaufel wurde ständig gedreht, um sicherzustellen, dass sich die Teile nicht verkeilen. Gleichzeitig änderte sich der Verteilungswinkel in Abhängigkeit von der Schuttmenge, um den Schutt in gleichmäßigen Strömen zu verteilen.

Für das robotergestützte Vergießen sind weitere Tests der Parameter sowie Strategien zur Integration dieser Verfahren in eine Baustellenumgebung erforderlich. Ein leichter Roboter, der besser für die Größe und das Ge-

wicht eines Schuttteils geeignet ist, als ein großer Industrieroboterarm, wäre von Vorteil. Darüber hinaus müsste untersucht werden, wie diese Verfahren kombiniert werden können, die beides erfordern, zum Beispiel durch die Entwicklung eines Endeffektors, der sowohl das Verlegen als auch das Vergießen übernehmen kann, oder durch einen kollaborativen Arbeitsablauf zwischen mehreren Robotern.

Abb. 7: Druckfestigkeitsprüfungen, erstveröffentlicht in Svatoš-Ražnjević et al. 2024; Foto: David Chipperfield Architects / ICD Universität Stuttgart



2.1 Das richtige Werkzeug für die richtige Aufgabe

Wo liegen die derzeitigen Grenzen von computerbasiertem Entwerfen und digitalen Fabrikationsabläufen, die zur Verarbeitung und Montage nicht standardisierter Baumaterialien eingesetzt werden?

Wir sind der Ansicht, dass die derzeitigen Grenzen digitaler Werkzeuge für die Verarbeitung und Montage nicht standardisierter Baumaterialien nicht im Mangel an Technologien oder Werkzeugen liegen, sondern in der Art und Weise, wie wir sie nutzen – oder eben nicht nutzen. Die Herausforderung besteht darin, die richtige Aufgabe und Technik mit der richtigen Technologie zu verbinden.

Unsere Fallstudie über Schutt zeigt beispielsweise, dass sich ein Großteil der aktuellen Forschung zur Wiederverwendung von Schutt auf die Implementierung einer breiten Palette von Technologien konzentriert, wie zum Beispiel Objekterkennung, Optimierungsalgorithmen und robotergestützte Fertigung zum Schneiden oder Anpassen der Materialien. Diese Projekte demonstrieren zwar die Leistungsfähigkeit aktueller technologischer Entwicklungen für die Wiederverwendung, wenden sie aber meist auf größere Schuttteile an. Die von uns analysierten Schutthaufen bestanden jedoch hauptsächlich aus kleineren Teilen. Das Scannen, Katalogisieren und Verarbeiten von zwanzig großen Stücken ist im Hinblick auf die Effizienz sinnvoll, aber die gleichen Prozesse bei zwanzigtausend kleinen Stücken vielleicht nicht. Wir sehen einen klaren Bedarf an Arbeitsabläufen, die diese Technologien integrieren, um unbearbeitete, gemischte Kleinteile in großem Maßstab zu verarbeiten.

Wir haben damit begonnen, diese Möglichkeiten zu untersuchen. Anhand unserer Technikübersicht und -bewertung zeigen wir, wie robotergestütztes Vergießen und Verlegen bestehende und neuartige Schutttechniken besser zugänglich machen können. Da beide Verfahren bereits in einiger Form in der Industrie existieren, müssen die Werkzeuge und Maschinen für die Herstellung lediglich für das Bauen mit Schutt angepasst – oder „gehackt“ – werden. Darüber hinaus haben wir durch Prototyping in verschiedenen Maßstäben Möglichkeiten aufgezeigt, wie man je nach Art des verfügbaren Schutts eine Herstellungsmethode auswählen kann. Ein wichtiges Ergebnis des Projekts sind mehrere neue Forschungsrichtungen,

von denen wir hoffen, dass sie andere Architektinnen, Architekten und Forschende inspirieren werden, sich den Hindernissen der Wiederverwendung zu nähern.

2.2 Den Entwurfsprozess umdenken

Welche digitalen Entwurfsprozesse könnten für das Bauen mit wiederverwendeten Baumaterialien geeignet sein?

Die meisten Architekturprojekte folgen einem linearen Entwurfsprozess mit verschiedenen Planungsphasen, bei denen Entwurf und Ausführung voneinander getrennt sind. Das Material und die genaue Fertigung werden in der Entwurfsphase festgelegt und erst Monate später auf der Baustelle ausgeführt. Die Materialverfügbarkeit und -konformität werden dabei berücksichtigt. Bei der Arbeit mit wiederverwendeten Materialien sind diese jedoch oft nicht genormt und ihre Verfügbarkeit zum richtigen Zeitpunkt kann nicht garantiert werden, was bedeutet, dass Entwurf, Fertigung und Materialverfügbarkeit viel stärker voneinander abhängen und aufeinander reagieren müssen. An dieser Stelle kommen digitale Entwurfswerkzeuge ins Spiel. Sie sind ein wesentlicher Bestandteil des Prozesses, da sie als Vermittler zwischen den Entwerfenden und dem Schutt fungieren und eine Möglichkeit bieten, mit der Unsicherheit des Materials umzugehen. Durch die Korrelation von Parametern zur Materialverfügbarkeit, zu Fertigungsbeschränkungen und -logik sowie zu den Entwurfszielen ist ein integrativer und adaptiver Entwurfsprozess möglich. Es ist jedoch auch eine gleichzeitige Entwicklung von Entwurfs- und Fertigungsmethoden erforderlich.

Bei standardisierten Materialien wie Ziegeln können bestehende Muster einfach ausgewählt und angewendet werden. Bei zerbrochenen Ziegeln oder anderen wiederverwendeten Materialien muss das Verlegemuster neu erfunden und in Echtzeit auf der Grundlage der verfügbaren Teile angepasst werden. Damit verlagert sich die Rolle der Entwerfenden von der reinen Erstellung einer festen Geometrie auf die Entwicklung von Entwurfsregeln und Logik, die in Algorithmen und Anweisungen für Roboter übersetzt werden können. Diese Regeln können ästhetisch oder strukturell sein und zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen führen (Abbildung 8).



Abb. 8: Drei Modelle aus ein und demselben Material, die das kompositorische Potenzial von Schutt zeigen, erstveröffentlicht in Wyller et al. 2024 by Springer Nature; Foto: David Chipperfield Architects / ICD Universität Stuttgart

2.3 Den Wert wiederentdecken

Wie kann der Einsatz von computerbasiertem Entwerfen und digitalen Fabrikationsmethoden die Wiederverwendung von Baumaterialien für Architektinnen und Architekten, Unternehmen und Nutzenden in Bezug auf Ästhetik, Skalierbarkeit und Effizienz attraktiv machen?

Die Sammlung historischer Referenzen für die Wiederverwendung und der Überblick über die Techniken zeigen, dass eine Ästhetik der Wiederverwendung bereits existiert und nicht erst erfunden, sondern lediglich wiederentdeckt werden muss. In der Fallstudie über Schutt stießen wir auf eine ähnliche Erkenntnis: Indem wir den Schutt einfach aus seinem ursprünglichen Kontext – dem Haufen – entfernten, konnten wir neue Werte freilegen.

Daher glauben wir, dass die Herausforderung nicht in einem Mangel an Ästhetik liegt, sondern in der Tatsache, dass es aufgrund der hohen Kosten für die manuelle Arbeit schwierig ist, an sie heranzukommen. Digitale Werkzeuge können jedoch sowohl traditionelle als auch neue Techniken und Ästhetiken zugänglicher machen, indem sie die inhärenten Qualitäten der Materialien verstärken (Abbildung 8).

In unserer Fallstudie untersuchten wir die Qualitäten von Schutt sowohl als granulares Material mit der Fähigkeit zur Selbstorganisation als auch als individuelle Objekte mit skulpturalen Formen, reichen Farben und Texturen. Wir haben uns entschieden, uns eingehend mit dem Konzept des Jammed Rubble zu befassen, das sowohl durch seinen einfachen ästhetischen Anspruch als auch durch die Skalierbarkeit und Effizienz seines Herstellungsverfahrens, das mit den heutigen Praktiken übereinstimmt, überzeugt. Warum sollte man Bauschutt in den Boden

verfüllen, wenn man es auch zu Architektur verfüllen kann?

Es gibt viele Gründe, nicht mit Bauschutt zu bauen: unsichere Materialqualität, strikte Bauvorschriften, logistische Herausforderungen, das heterogene Aussehen und zeitaufwändige Herstellung, um nur einige zu nennen. Wir haben gerade erst begonnen, uns mit den Hindernissen in Bezug auf Gestaltung und Herstellung zu befassen, und sind noch weit von endgültigen Lösungen entfernt. Jedoch bietet das Projekt eine Methode zur Wiederentdeckung des Wertes von Bauschutt, verstärkt durch digitale Werkzeuge, und soll andere Architekten und Architektinnen, Forschenden, Unternehmen und Kundinnen und Kunden dazu inspirieren und ermutigen, sein Potenzial weiterzuerkunden.

2.4 Gemeinsame Grundlagen

Wie können wir die Lücke zwischen architektonischer Entwurfspraxis und aktueller akademischer Forschung zur Wiederverwendung von Baumaterialien schließen?

Wir sind davon überzeugt, dass die Überwindung der Lücke zwischen Wissenschaft und Praxis auf dem Gebiet der Wiederverwendung eine enge Zusammenarbeit und eine Phase der gemeinsamen Suche nach einer gemeinsamen Grundlage erfordert.

Das Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung gewährte Einblicke in die aktuelle Forschungspraxis, den Laborraum und die Testausrüstung und David Chipperfield Architects Einblicke in die aktuelle architektonische Praxis, das Material und den Prototyping-Raum. Darüber hinaus hatten wir die Möglichkeit, die Unterschiede in unseren Ansätzen und Standards besser zu verstehen. Während in der architektonischen Praxis das physische Ergebnis – das Gebäude – im Mittelpunkt steht, liegt der Schwerpunkt in der Forschung stärker auf dem Prozess und der Neuartigkeit der Methodik. Dies bezieht sich auch auf die tägliche Arbeit in einem Büro, wo Zeitpläne und Ziele oft von außen festgelegt werden. Dies lässt wenig Raum für Experimente, während sich in der Forschung die Ziele und Fragen im Laufe des Prozesses manchmal ändern können, da die Erkundung gefördert wird.

Um einen Wandel hin zu nachhaltiger Architektur und nachhaltigem Bauen mit wiederverwerteten Materialien zu erreichen, müssen wir weiterhin an der Schnittstelle von Forschung und Praxis arbeiten und den Austausch von Forschungsergebnissen, neuartigen Bausystemen und Entwurfs- und Konstruktionsmethoden in der Praxis verstärken.

Methodik und Projektverlauf

3.1 Methodik

Das Projekt wurde in drei Arbeitspakete unterteilt, die aufeinander aufbauen.

Arbeitspaket 1: Das Ziel der ersten Projektphase war es, ein Verständnis für historische und zeitgenössische Wiederverwendung in der Architektur zu gewinnen und eine Materialgruppe für die nächsten Arbeitspakete zu identifizieren. Basierend auf der Sammlung von Referenzen und Statistiken haben wir relevante Materialgruppen und relevante Forschungslücken und -ziele für jede identifiziert.

Arbeitspaket 2: Ziel der zweiten Projektphase war es, 1–3 Arbeitsabläufe zu entwickeln, die wiederverwendete Baumaterialien, computergestütztes Design und digitale Fabrikationsmethoden integrieren, und diese in kleinem Maßstab in Fallstudien zu untersuchen. Wir entschieden uns für die Materialgruppe gemischte mineralische Abfälle bzw. Schutt und spezifizierten unsere Methoden auf dieser Grundlage. Dazu gehörten die Analyse verschiedener Bestandsmaterialien, die Untersuchung verschiedener historischer und zeitgenössischer Bauschutttechniken und die Erkundung erfolversprechender tektonischer Systeme für die Wiederverwendung von Bauschutt durch physische Entwurfsuntersuchungen und Prototypen im kleinen und mittleren Maßstab. Schließlich verglichen und bewerteten wir diese Fallstudien und konzentrierten uns dabei auf die Materialverwendung, die Komplexität der Entwurfsentscheidungen und die Herausforderungen der Automatisierung und Roboterfertigung. Diese Bewertung diente als Grundlage für die Entscheidung, welches Bausystem in der nächsten Phase des Projekts weiterverfolgt werden sollte.

Arbeitspaket 3: In der dritten Phase wollten wir eines der Materialsysteme aus der zweiten Phase eingehend entwickeln. Wir entschieden uns für ein System mit gestautem Bauschutt und spezifizierten auf dieser Grundlage unsere Ziele und Methoden. Zunächst untersuchten wir den Einsatz von granularem Verhalten in Praxis, Forschung und Technik, analysierten den Stand der Technik in der granularen Architektur und skizzierten ein Gebäudesystemkonzept mit granularem Verband. Anschließend untersuchten wir die Eigenschaften des Systems anhand kleiner und mittelgroßer Prototypen, wobei wir uns auf verschiedene Strategien zur Schichtung von Schutt konzentrierten. Anschließend entwickelten wir ein Herstel-

lungskonzept, das die Sortierung, die Schichtung und das Vergießen von Schutt umfasste, und bewerteten dieses anhand von Prototypen und Leistungstests im mittleren Maßstab. Schließlich ermittelten wir die Herstellungsparmeter durch großmaßstäbliches Prototyping und entwickelten und testeten eine robotergestützte Herstellungsanlage.

3.2. Projektverlauf

Wir sammelten und kategorisierten 160 Wiederverwendungsprojekte mit der online Kollaborationsplattform Miro – die Quellen waren Bücher, Zeitschriften und Online-Ressourcen. Die Datenbank wurde während des Projekts kontinuierlich erweitert und umfasst derzeit mehr als 300 Referenzen.

Ursprünglich war geplant, die Referenzsammlung als kollaborative Datenbank öffentlich zugänglich zu machen, und gemeinsam mit Studenten der Technische Universität Berlin wurde ein Vorschlag für eine Website entwickelt. Leider war es aufgrund von Einschränkungen der Bildrechte und rechtlichen Implikationen bezüglich der Texthaftung nicht möglich, die Referenzsammlung öffentlich zugänglich zu machen.

Wir sehen jedoch großes Potenzial in dieser Idee und glauben, dass die Datenbank mit weiteren Ressourcen realisierbar wäre. Eine Liste der Projekte wurde in der Datensammlung der Universität Stuttgart, DaRUS, veröffentlicht und ist öffentlich zugänglich.

Anhand der Referenzliste und der Statistiken über Bauabfälle wurden vier Materialgruppen definiert: Holz, Beton, Ziegel und gemischter Schuttbruch. Für jede Gruppe haben wir Forschungslücken identifiziert und beschlossen, mit Bauschutt fortzufahren. Obwohl Bauschutt heute den größten Teil der Bau- und Abbruchabfälle ausmacht und in der Vergangenheit in großem Umfang wiederverwendet wurde, fanden wir im Vergleich zu den anderen Materialgruppen relativ wenig Forschungsergebnisse über die Wiederverwendung von Bauschutt und sehen eine große Forschungslücke sowie eine Fülle von hochwertigen historischen Referenzen.

Mithilfe der aktiven Baustellen von David Chipperfield Architects in Berlin konnten wir Material aus dem Schutt-

bestand für die Materialanalyse und das Prototyping erwerben. Die Materialanalyse umfasste sowohl die Dokumentation individueller Eigenschaften des Schutts in jedem Bestand: Material, Farbe, Abmessungen und Dichte, als auch das körnige Verhalten des Schutts. Anhand der Referenztafel sammelten wir verschiedene Bauschutttechniken und stellten sie in einer Technikübersicht zusammen. Fünf Techniken wurden für die Prototypen ausgewählt, die mithilfe eines Handwerkers gebaut wurden. Für jede Technik bauten wir mehrere Prototypen (insgesamt 15). Sowohl für die Gieß- als auch für die Verlegetechniken wurde ein robotergestützter Fertigungsablauf erstellt. Für das Verlegen wurden drei verschiedene Greifer und für das Schütten vier verschiedene Verteilungsstrategien für den Schutt verwendet.

Obwohl sich mehrere Techniken als interessant für weitere Untersuchungen erwiesen, entschieden wir uns in Phase 3 für die von Gabionen inspirierte Technik. Wichtige Gründe für diese Entscheidung waren, dass die Technik kein Bindemittel erfordert, dass sie wiederverwendbar und rekonfigurierbar ist und dass wir uns vorstellen können, dass sie in industriellem Maßstab umgesetzt werden kann.

Das System wurde in physikalischen Experimenten weiterentwickelt. Die Experimente wurden in den Maßstäben 1:10, 1:5 und 1:1 durchgeführt, mit einer Reihe von Prototypgrößen.

Modelle in kleinem Maßstab wurden zur Erforschung von Form und Geometrie verwendet, Modelle in mittlerem Maßstab für die Füllstrategie und die Systementwicklung und -bewertung, einschließlich Drucktests, und Prototypen in großem Maßstab für den endgültigen Demonstrator und die Roboterfertigung.

Auch die Verwendung eines Bindemittels, entweder als Schutzhülle (Mörtel) oder als durchdringender Mörtel (Myzel), wurde untersucht. Schließlich extrahierten wir die relevanten Herstellungsparameter aus der Entwicklung unseres Bausystems und stellten ein Segment einer Jammed Rubble-Säule mit einem Roboter her.

Literatur

Clifford, B.; McGee, W.; Muhonen, M., 2018: Recovering Cannibalism in Architecture with a Return to Cyclopean Masonry. *Nexus Network Journal*, 20 (3): 583–604. <https://doi.org/10.1007/s00004-018-0392-x>

Gálvez-Martos, J.-L.; Styles, D.; Schoenberger, H.; Zeschmar-Lahl, B., 2018: Construction and demolition waste best management practice in Europe. *Resources, Conservation and Recycling* (136): 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.016>

Meier, H. R., 2020: *Spolien: Phänomene der Wiederverwendung in der Architektur*. Berlin.

Moravánszky, Á., 2021: Der Kreislauf der Bausteine – Stichworte zu einer Ökologie des Bauens. In: Stricker, E.; Brandi, G.; Sonderegger, A.; Angst, M.; Buser, B.; Massmünster, M. (Hrsg.): *Bauteile wiederverwenden: Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*. Zürich: 27.

Park, J.; Tucker, R., 2017: Overcoming barriers to the reuse of construction waste material in Australia: a review of the literature. *International Journal of Construction Management*, 17. Jg. (3): 228–237. <https://doi.org/10.1080/15623599.2016.1192248>

Rakhshan, K.; Morel, J.-C.; Alaka, H.; Charef, R., 2020: Components reuse in the building sector – A systematic review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 38. Jg. (4): 347–370. <https://doi.org/10.1177/0734242X20910463>

Riuttala, M.; Harala, L.; Aarikka-Stenroos, L.; Huuhka, S., 2024: How building component reuse creates economic value – Identifying value capture determinants from a case study. *Journal of Cleaner Production* (443): 141112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141112>

Stricker, E., 2021: Wiederverwender. In: Stricker, E.; Brandi, G.; Sonderegger, A.; Angst, M.; Buser, B.; Massmünster, M. (Hrsg.): *Bauteile wiederverwenden: Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*. Zürich: 59–77.

Svatoš-Ražnjević, H.; Wyller, M.; Schad, E.; Menges, A., 2024: Jammed Rubble: A building system concept for granular architecture from mixed mineral waste. In: eCAADe; University of Cyprus, Department of Architecture (ed.): *Proceedings of the 42nd Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, Data-Driven Intelligence*, Vol. 2: 587–596.

Wyller, M.; Svatoš-Ražnjević, H.; Schad, E.; Menges, A., 2024: A taxonomy of techniques and tools for rubble: design and fabrication concepts for (re)use of mixed mineral construction and demolition waste. In: Eversmann, P.; Gengnagel, C.; Lienhard, J.; Ramsgaard Thomsen, M.; Wurm, J. (Hrsg.): *Scalable Disruptors*. Cham: 3–14.

Zhang, C.; Hu, M.; Di Maio, F.; Sprecher, B.; Yang, X.; Tukker, A., 2022: An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of The Total Environment* (803): 149892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>

Projektbeteiligte

David Chipperfield Architects



Universität Stuttgart

ICD
Institute for Computational
Design and Construction

IntCDC
CLUSTER OF EXCELLENCE

Cluster of Excellence IntCDC –
Integrative Computational Design
and Construction for Architecture.

Impressum

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG



Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-22.19
Projektlaufzeit: 09.2022 bis 03.2025
Bundesmittel in €: 192.974

Zuwendungsempfängende:
David Chipperfield Architects Gesellschaft
von Architekten mbH, Berlin

Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes Entwerfen
und Baufertigung

Über Zukunft Bau

Mit dem Innovationsprogramm Zukunft Bau stärkt das BMWSB gemeinsam mit dem BBSR die Zukunfts- und Innovationsfähigkeit des Bausektors. Die Zukunft Bau Forschungsförderung schafft Vorbilder, die die Machbarkeit von neuen Ideen ausloten und die Baupraxis weiterentwickeln. Gefördert werden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die einen Gebäudebezug als Schwerpunkt haben und einen substantiellen Beitrag zur Bewältigung aktueller und künftiger Herausforderungen im Baubereich erwarten lassen.

zukunftbau.de

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Referat WB 3 „Forschung und Innovation
im Bauwesen“
Daniel Wöffen
daniel.woeffen@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Maria Wyller
David Chipperfield Architects, Berlin
maria.wyller@davidchipperfield.de

Hana Svatoš-Ražnjević
Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung

Eva Schad
David Chipperfield Architects, Berlin

Prof. Achim Menges
Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung

Redaktion

David Chipperfield Architects, Berlin

Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung

Stand
März 2025

Grafisches Konzept
www.sans-serif.de

Satz und Barrierefreiheit
www.sans-serif.de
www.satzweiss.com

Bildnachweis

Titelbild: David Chipperfield Architects /
ICD Universität Stuttgart

Vervielfältigung



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative-Commons-Lizenz Attribution – Share Alike 4.0 (CC BY-SA 4.0). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers und der Weitergabe unter gleichen Bedingungen die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. Nähere Informationen zu dieser Lizenz finden sich unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de/>. Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitiervorschlag

Wyller, M.; Svatoš-Ražnjević, H.; Schad, E.; Menges, A., 2025: Robots Reuse: Digitale Tools und die Wiederverwendung von unbearbeitetem Bauschutt. Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Zukunft Bau – Forschung KOMPAKT 2/2025. Bonn. <https://doi.org/10.58007/cttc-zz70>



Bonn 2025
ISSN 2944-067X

Dieses Werk ging aus folgendem Forschungsbericht hervor:

Svatoš-Ražnjević, H.; Wyller, M.; Schad, E.; Menges, A., 2025: Rubble Works: Einsatz digitaler Technologien für das Planen und Bauen mit gemischten mineralischen Bau- und Abbruchabfällen. Stuttgart.

Hier geht es zum kostenfreien Forschungsbericht:

<https://doi.org/10.18419/opus-15636>

