

INDUSTRIELL NUTZBARE, NACHHALTIGE UND WIEDERVERWENDBARE SCHALUNGEN ZUR REALISIERUNG VON DOPPELSEITIG GEKRÜMMTEN BETONFERTIGTEILEN

ABSCHLUSSBERICHT 28.02.2021

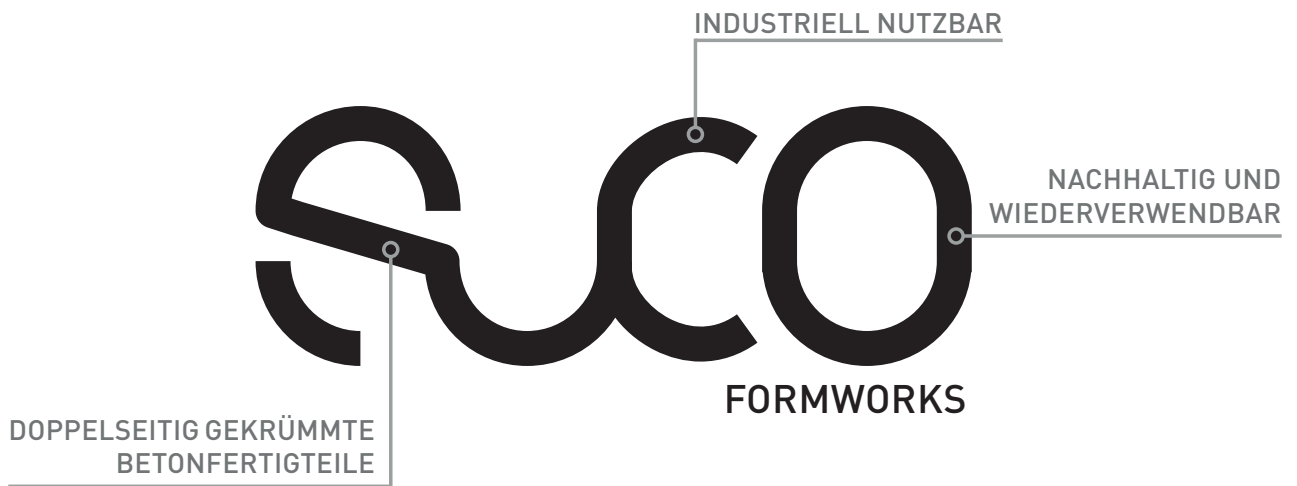
Prof. Manfred Grohmann, Prof. Philipp Eversmann, Anne Liebringshausen,
Saskia Drebes, Andreas Göbert, Christian Freudenberger

ABSCHLUSSBERICHT

„Industriell nutzbare, nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung von doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen für energieeffizientes, ressourcenschonendes und klimagerechtes Bauen“

Kurztitel	Industriell nutzbare, nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung von doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen
Aktenzeichen	SWD-10.08.18.7-18.30
Projektförderung	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) Deichmanns Aue 31-37 53179 Bonn
Forschungsstelle	FG Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren FB06 Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung Universität Kassel
Bearbeiter	Prof. Manfred Grohmann Prof. Philipp Eversmann Anne Liebringshausen, M.Sc. Saskia Drebes, Dipl.-Des. Andreas Göbert, M.Sc. Christian Freudenberger
Projektleitung	Anne Liebringshausen
Institutsleitung	Prof. Philipp Eversmann
Datum	28.02.2021

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-18.30)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.



INHALTSVERZEICHNIS

0. ZUSAMMENFASSUNG	S. 06
0.1. Zusammenfassung (Deutsch)	
0.2. Abstract (English)	
1. EINLEITUNG	S. 10
1.1. Zusammenfassung und Problemstellung	
1.2. Fragestellung und Methodik	
1.3. Ziele	
1.4. Prozesserläuterung	
2. FORMSTOFFE	S. 14
2.1. Formgrundstoffe	
2.1.1. Gießereialtsande	
2.1.1.1. Formsand	
2.1.1.2. Quarzsand	
2.1.2. Keramiksand (Cerabeads 1700)	
2.1.3. Holzspan/ Holzmehl	
2.2. Formstoffbinder	
2.2.1. Bentonit	
2.2.2. Alkalisilikat (Wasserglas)	
2.2.3. Polyurethanharz (PU)	
2.2.4. Stärke	
<i>Exkurs: Schimmelvermeidung</i>	
3. VERFAHRENSPROZESSE & REZEPTUREN ZUR HERSTELLUNG VON SCHALUNGSROHLINGEN	S. 19
<i>Exkurs: Mischen, Verdichten, Trocknen</i>	
Auflistung nach Formstoff in Kombination mit Bindertypus:	
3.1. Formsand	
3.2. Quarzsand-Wasserglas	
3.3. Quarzsand-Stärke	
3.4. Keramiksand-Polyurethanharz	
<i>Exkurs: Quarzsand-Polyurethanharz</i>	
3.5. Holzspan-Stärke	
3.5.1. Trocknung	
3.5.2. Entwicklung eines Halbzeugs im Lagenprinzip	
4. SUBTRAKTIVE BEARBEITUNG VON SCHALUNGSROHLINGEN	S.31
5. OBERFLÄCHENBEARBEITUNG UND TESTBETONAGE	S. 35
5.1. Oberflächenbehandlung je nach Verfahren	
5.2. Keramiksand-Schalungen	
5.3. Holzspan-Stärke-Schalungen	

6. PRÜFVERFAHREN	S. 45
6.1. Druckfestigkeit von Schalungen	
6.2. Bewertung von Oberflächen	
<i>Exkurs: Sichtbetonoberflächen</i>	
6.2.1. Bewertung von Schalungsoberflächen	
6.2.2. Bewertung resultierender Betonoberflächen	
6.3. Toleranzabgleich	
6.3.1. Toleranzabgleich von Schalungen	
6.3.2. Toleranzabgleich von Betonabgüssen	
7. RÜCKFÜHRUNG	S. 52
7.1. Formsand-Schalungen	
7.2. Quarzsand-Stärke-Schalungen	
7.3. Quarzsand-Wasserglas-Schalungen	
7.4. Keramiksand-Schalungen	
7.5. Holzspan-Stärke-Schalungen	
7.5.1. Rückführung durch Schreddern	
7.5.2. Rückführung im Wasserbad	
8. VERFAHRENSVERGLEICH	S. 56
9. UMSETZUNG 1:1 DEMONSTRATOR	S. 59
9.1. Vorstudien in den Betonfertigteilverken zur Umsetzung eines 1:1 Demonstrators	
9.2. Entwurf und Fertigung eines 1:1 Demonstrators	
<i>EXKURS Reduzierung des Eigengewichts von Sandschalungen</i>	
9.3. Produktion, Ergebnisse und Auswertung von Betondemonstratoren	
9.3.1. Betonage in den Betonfertigteilverken	
9.3.2. Ergebnisse der Betonage von „Elementbau Osthessen GmbH & Co., ELO KG“	
9.3.3. Ergebnisse der Betonage von „Runkel Fertigteiltbau GmbH“	
9.3.4. Auswertung der Betondemonstratoren	
10. AUSWERTUNG/ FAZIT / RESÜMEE	S. 94
10.1. Ökobilanzierung	
10.2. Resümee	
10.3. Anwendung der Forschungsergebnisse	
10.4. Danksagung	
11. LITERATUR- UND BILDNACHWEIS	S. 112
11.1. Literaturnachweis	
11.2. Abbildungsverzeichnis	
11.3. Projektpartner	

0. KURZBERICHT

0.1. Kurzbericht (Deutsch)

Problemstellung und Lösungsansatz

Die Möglichkeiten und Entwicklungen der digitalen Formfindungen steigen, doch fehlt es in der Praxis noch immer an einer nachhaltigen Umsetzung und Realisierung von komplexen, dünnen und doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen, die zum jetzigen Stand der Technik nur unter hohem Materialaufwand hergestellt werden können, und dadurch sowohl aus Mangel an Umsetzungsvermögen als auch Kostengründen nur partiell realisiert werden können. Aus dieser Notwendigkeit zielte diese Forschungsarbeit auf die Entwicklung eines Zero-Waste-Verfahrens, zur Herstellung nachhaltiger, komplexer, skalierbarer, recyclier- und wiederverwendbarer Schalungen für die industrielle Fertigung.

Gegenstand des Forschungsvorhabens. Beschreibung der Arbeitsschritte und des Lösungswegs

Gegenstand der Forschungsarbeit war die Untersuchung von Industrieabfällen wie Altsand und Altholz auf ihre Tauglichkeit als Schalungsmaterial und deren vorwiegend subtraktiver Bearbeitung mittels digitaler Fertigungsweisen. In einzelnen Arbeitsschritten wurden die Formstoffe durch Prüfverfahren und die Erstellung von Demonstratoren in unterschiedlichen Skalierungsschritten in Zusammenarbeit mit Industriepartnern überprüft und optimiert.

Schalungen wurden stetig in unterschiedlichen Stadien geprüft, analysiert und ausgewertet, um quantifizierbare und vergleichbare Kennwerte zu generieren. Die Untersuchungen sahen sowohl Prüfungen zur Druckfestigkeit der unterschiedlichen Schalungen vor als auch zur Charakterisierung von Oberflächenqualität sowie der Gesamtpräzision zwischen dem realen, gefrästen Schalungskörper und dem digitalen 3D-Modell.

Zur Auswahl der Schalungsgrundstoffe wurde eine breit aufgestellte Grundlagenstudie erstellt, die deponierte Gießereialtsande auf Basis von Quarzsand und Quarzsand mit Bentonitanteil (Form- oder auch Bentonitsand genannt), kreislauffähigen und recyclebaren Keramiksand, sowie seitens der nachwachsenden Rohstoffe Holzspan/ Holzmehl auf Altholzbasis miteinschließt.

Die Formgrundstoffe selbst haben keine bindende Funktion und sind auf die vermittelnde Wirkung eines Bindemittelsystems angewiesen, um für die Herstellungen von Schalungen ein verdichtbares, formstabiles Kollektiv zu bilden und anfallenden Kräfteeinwirkungen wie die der digitalen Fertigung, Transport und Handling in Betonfertigteilerwerken standzuhalten. In eine engere Wahl wurden die Bindersysteme Bentonit, Wasserglas, kaltquellende

Stärke und Furanharz, der aus nachhaltigen Ressourcen gewonnen wird, einbezogen. Evaluiert wurden folgende Kombinationen von Formgrundstoffen und Bindertypen (Abb. 1).

BINDER	QUARZSAND	HOLZSPAN	KERAMIK
Bentonit	x		
Wasserglas	x		
Stärke	x	x	
Furanharz	x		x

Abb. 1: Untersuchte Formgrundstoffe und ihre Formstoffbinder

Bei der Wahl von Formstoffen und Bindersystemen stand die Betrachtung der ökologischen Verträglichkeit, eine sortenreine Rückführung der Schalungen und Wiederaufbereitung – die kohärent ist mit einem konsequenten Verzicht auf (schädliche) Additive in Formstoffrezepturen – im Vordergrund zur Umsetzung eines zusätzlichen geschlossenen Materialkreislaufsystems.

Zur Herstellung eines Formstoffrohlings wurden je nach Formstoff-Bindersystem variierende Verfahren angewendet. Im Sinne des Forschungsprojektes, einen maximal nachhaltigen Ansatz zu verfolgen, wurde dabei auf bereits bestehende Maschinen und Verfahren zurückgegriffen.

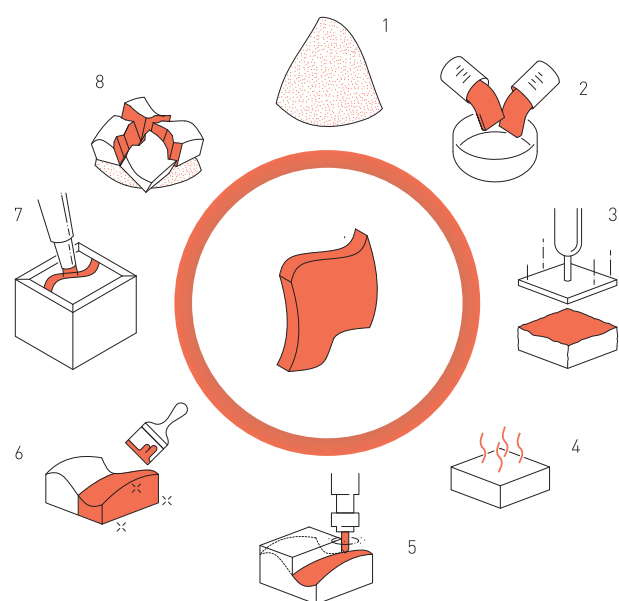


Abb. 2: Prozessklärung

Grundlegend ließen sich alle Systeme in folgende Prozesse einteilen: Wurde der Formstoff mit (1) Binder versehen, gab es je nach Art des Stoffes die Notwendigkeit, den resultierenden Formstoffbrei (2) zu verdichten. Abhängig vom verwendeten Formgrundstoff und Formstoffbinder, variieren Trocknung sowie Vernetzung sowohl nach (3) Art als auch (4) Vernetzungsverfahren (siehe Abb. 2).

Aus dem Herstellungsprozess hervorgegangene, gebundene und ausgehärtete Werkstoffe konnten mit einer CNC-Fräse subtraktiv geformt werden. Um den Industriestandard an Sichtbetonoberflächen erfüllen zu können (Sichtbetonklasse 4: Betonflächen mit besonders hoher gestalterischer Bedeutung), wurde der Betrachtung von resultierenden Schalungsoberflächen eine hohe Bedeutung zugrunde gelegt, da diese bildgebend sind für das spätere Werkstück. Der Auftrag einer Versiegelung bildet die Kontaktfläche zwischen Schalung und Beton. Neben einer Glättung der rauen und saugenden Schalung dient sie einer schützenden Wirkung vor dem Eindringen des Frischbetons, ohne jedoch durch schädliche Additive eine sortenreine Rückführung der Schalungen zu gefährden.

Die oberflächenbehandelten Schalungen (Schalung und Konterschalung) wurden vertikal aufgestellt und mit einem äußeren Schalrahmen versehen. Der Hohlraum zwischen beiden Schalungselementen wurde justiert und mit Beton ausgegossen.

Durch konsequente, nachhaltige Maßnahmen ließen sich nach der Betonage Schalung und Betonelement sortenrein trennen. Die Schalungen konnten repetitiv mit Beton ausgegossen werden (ohne eine erneute Versiegelung) oder via Zermahlungs-, Zerstoß- oder Auflösungsprozesse zurückgeführt werden. Am Ende der Prozesskette wurden die recycelten Formstoffe wiederverwendet, durchliefen erneut die Prozesskette und starteten so einen weiteren Lebenszyklus.

Resümee

Aufgrund von hohen Festigkeitswerten, Oberflächengüten, Industriefähigkeit, Präzision - und nicht zuletzt den Rückführungseigenschaften - überzeugte das Holzspan-Stärke-Verfahren und das Keramiksand-Verfahren im Vergleich zu anderen erprobten Formstoffabfällen.

Das Keramiksand-Verfahren erzielte Schalungskörper mit den höchsten Festigkeitswerten und konnte aufgrund dessen als industrielles Verfahren in Einsatz gebracht werden. Prüfverfahren und 1:1 Umsetzungen in Form eines großmaßstäblichen Demonstrators zeigten, dass hier großes Potenzial bezüglich der Oberflächengüte lag. Die Oberflächenbehandlungen waren unaufwändig und die Rückführung möglich, wobei nach einer gewissen Anzahl an Prozesszyklen die Keramik regeneriert werden musste.

Das Holzspan-Stärke-Verfahren weist durch seine hohe Oberflächengüte und das geringe Gewicht der Schalungen großes Potenzial auf. Auch die positiven Erkenntnisse über den möglichen Einsatz jeglicher Holzarten und die Unabhängigkeit von Spanlängen sowie die umstandslose Rückführung der Schalungen bestärkten das Verfahren. Neben den grundlegenden materialtechnischen Vorteilen des Formstoffes stellte auch die einfache Implementierung in bestehende Betriebe und Produktionsweisen sowie der geringe Werkzeugverschleiß große Vorteile gegenüber allen anderen Verfahren dar.

0. KURZBERICHT

0.2. Abstract (English)

Problem definition and solution approach

The possibilities and developments of digital form finding are increasing, but in practice there is still a lack of sustainable implementation and realisation of complex, thin and doubly curved precast concrete parts. At the current state of research, these parts can only be produced at a high costs due to expensive materials and high production costs.

This research developed a zero-waste manufacturing process for sustainable, complex, scalable, recyclable and reusable formworks for industrial production.

Subject of the research project. Description of the work steps and the solution

The subject of the research was the examination of industrial waste such as used sand and wood for their suitability as formwork materials, and their processing using digital manufacturing methods. At each stage of the process, testing methods were used to check and optimise the moulding materials. Demonstrators were produced in different scales with the help of industrial partners to check and optimise the results. Formworks were constantly checked, analysed and evaluated to generate quantifiable and comparable parameters. The research tested the compressive strength, the characterisation of the surface quality and the precision between the prototypes and the digital 3D model.

An experimental material study was carried out in order to select the basic formwork materials. These included deposited waste foundry sand based on quartz sand and quartz sand with bentonite (moulding or bentonite sand), and reusable and recyclable sintered ceramics. Renewable raw materials such as waste wood, in the form of chips and wood flour, were also included in the research.

Basic mould materials have no binding function and are dependent on the intermediary effect of a binding agent system to form a compact, stable collective for the production of formworks and to withstand the forces that arise, such as those of digital production, transport and handling in precasting plants.

The binder systems bentonite, sodium silicate, cold-swelling starch and furan resin, which is obtained from sustainable resources, were included in a closer selection. The following combinations of mould base materials and binder types were evaluated (Fig. 1).

BINDER	QUARZ SAND	WOOD CHIP	CERAMIC
Bentonite	x		
Sodium silicate	x		
Starch	x	x	
Furan resin	x		x

Fig. 1: Examined basic moulding materials and their binders

When choosing moulding materials and binder systems, the focus was on ecological compatibility, correctly sorted recycling of the formwork, and reprocessing, which consistently avoids (harmful) additives in moulding material formulas to implement an additional closed material cycle system. To produce a moulding material blank, varying processes were used depending on the moulding material-binder system. In keeping with the research project's goal to pursue a maximally sustainable approach, existing machines and processes were used.

Basically, all systems can be divided into the following processes: If the moulding material was provided with a binder, depending on the type of material, there was a need to compress the resulting material pulp.

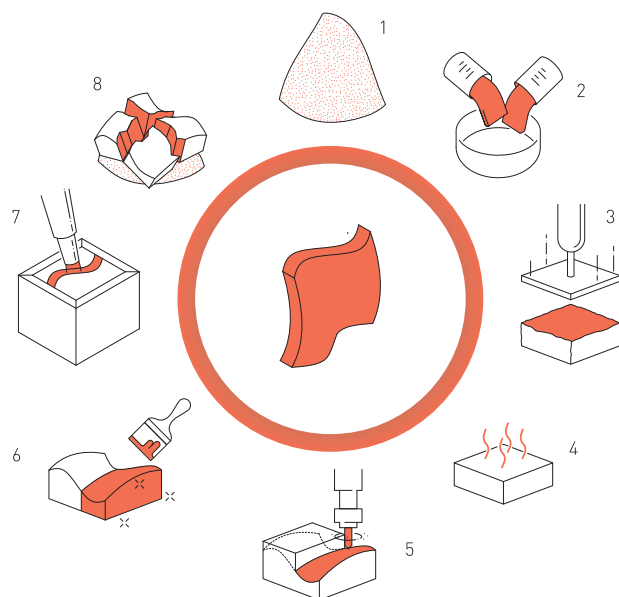


Fig. 2: Process explanation

Depending on the chosen moulding base and binder, drying and crosslinking vary according to both type and cross-linking process (fig. 2).

Bounded and hardened materials, resulting from the manufacturing process, could be subtractively shaped with a CNC milling machine. In order to be able to meet the industrial standards for architectural concrete requirements (Expodes Concrete Class 4: "concrete surfaces with particularly high design importance" from DBV Merkblatt Sichtbeton Fassung 2004), the consideration of the resulting formwork surfaces was given a high level of importance, as these affect the appearance of the final workpiece.

The application of a seal forms the contact area between the formwork shell and the concrete. In addition to smoothing the rough and absorbent formwork shell, it also has a protective effect against the ingress of fresh concrete, but without endangering the reuse to their original components of the formwork as a result of harmful additives.

The surface-treated formworks (formwork and counterformwork) was erected vertically and provided with an outer formwork frame. The cavity between the two formwork elements was adjusted and filled with concrete. Through consistent, sustainable measures, the formwork and concrete element could be separated and correctly sorted after concreting. Concrete could repeatedly be poured from the formwork (without renewed sealing) or its being returned to its original state via grinding, crushing or dissolving processes. At the end of the process chain, the recycled moulding materials were reused, run through the process chain again and started another life cycle.

Conclusion

Due to the high strength values, surface quality, industrial suitability, precision - and finally the return properties - the wood chip starch process and the sintered ceramic process were convincing in contrast to other tried and tested moulding waste materials.

The ceramic sand process achieved formworks with the highest strength values and could be used as an industrial process.

Test methods and 1:1 implementations in the form of a large-scale demonstrator showed the great potential in terms of surface quality. The surface treatments were inexpensive and the recycling possible, whereby the ceramic had to be regenerated after a certain number of process cycles.

The wood chip and starch process have great potential due to a high surface quality and the low weight of the formworks. The positive findings about the possible use of any type of wood and the independence of chip lengths, as well as the easy return of the formwork, strengthened the process. In addition to the fundamental material-technical advantages of the moulding material, the simple implementation in existing plants and production methods as well as the low tool stripping are major advantages over other processes that have been explored.