

**Bewilligungsempfänger**



Abschlussbericht zum Förderprojekt:

**„Effiziente Hohlkörpertechnologie mit hoher  
Querkrafttragfähigkeit für das ressourcenschonende  
Bauen- HochQuer“**

Art des Berichtes:

Abschlussbericht zum Vorhaben mit dem Aktenzeichen 38810/01-25,  
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

Verfasser: Dr. Karsten Pfeffer

Eltville, Juni 2025



## Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung .....	8
2. Einleitung .....	9
3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse.....	10
4. Fazit .....	44
5. Literaturverzeichnis.....	46

## Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

### Abbildungsverzeichnis:

<i>Abbildung 1: Angedachte Hohlkörperform für Platten mit hoher Querkrafttragfähigkeit (Anordnung der Hohlräume affin zu den Hauptspannungsrichtungen) .....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 2: Hohlkörper unterschiedlicher Größe entstehend durch Zusammensetzung der neu zu entwickelnden kegelstumpfförmigen Hohlkörper-Halbschale mit Halbschalen vom Typ Unidome XS-H.....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 3: Hohlkörper der neuen Serie XS-A entstehend durch Kombination der neu entwickelten kegelstumpfförmigen Halbschalen mit Hohlkörpern der Serie XS-H unterschiedlicher Höhe .....</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 4: Geometrieparameter für die Optimierungsberechnungen .....</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 5: Geometriemodell unter Ausnutzung der Achsensymmetrie bei einem mittig belasteten Drei-Punkt-Biegeversuch Quelle: (Busch 2020).....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 6: Geometrie der FEM-Modelle (unmaßstäblich).....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 7: Übersicht über Querkrafttragfähigkeiten der FEM-Berechnungen Teil 1.....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 8: Übersicht über Querkrafttragfähigkeiten der FEM-Berechnungen Teil 2.....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 9: Mittlere Querkrafttragfähigkeiten der Modelle mit unterschiedlichen oberen Radien und der Referenzmodelle .....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 10: Entwicklung der detaillierten Hohlkörpergeometrie basierend auf den Ergebnissen der AP-01 und AP-02.....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 11: Verschlussmechanismus im CAD-Modell (links) und zusammengebauter Hohlkörper (rechts) .....</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 12: Klickfähige Stabaufnehmer für Bewehrungsstäbe mit dem Durchmesser 6 mm (links) zur Montage der einzelnen XS-A Hohlkörper zu Hohlkörperelementen (rechts) .....</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 13: Gestapelte XS-A Halbschalen mit einer jeweiligen Stapelhöhe von nur 16 mm .....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 14: Kombinationsmöglichkeiten der XS-A Halbschalen mit den Halbschalen XS-H 30 bis XS-H 130 (von links nach rechts).....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 15: Überschneidungsbereich der Hohlkörper XS-A 200 und XS-A 300 bei gleichem Achsabstand .....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 16: Module von Hohlkörpern vom Typ XS-A 200.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 17: Darstellung des Spritzgusswerkzeugs zur Herstellung von Halbschalen XS-A 170, links als dreidimensionales CAD-Model und rechts als Schnitte durch das Modell mit Sicht auf die Spritzgusskammer .....</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 18: In einer Spritzgussmaschine montiertes Werkzeug zur Herstellung der Hohlkörper vom Typ XS-A .....</i>	<i>22</i>

---

Abbildung 19: Abmusterung der XS-A Halbschalen und Testmontage mit den XS-H Halbschalen zu Hohlkörpern XS-A .....	23
Abbildung 20: Querschnitt und Längsschnitt der Versuchskörper mit statischen Höhen, Dicken der Deckenspiegel und Achsabständen (links XS-A30 & rechts XS-A130).....	24
Abbildung 21: Versuchsaufbau der Bauteilversuche XS-A30 (oben) und XS-A130 (unten) .	25
Abbildung 22: Hohlkörper XS-A30 und XS-A130 (l) und zwei zu einem Modul verbundene Hohlkörper (r).....	28
Abbildung 23: Einbau und Befestigung der Bewehrung (links) und Anordnung der Hohlkörpermodule (rechts) in der Schalung .....	29
Abbildung 24: Aufschwimmen der Hohlkörper XS-A 30/130 Normalbeton (links); Beschwerung zur Herstellung der planmäßigen Lage der Hohlkörper und Betondeckung über Hohlkörper (mittig) und Konstruktion für die Probekörper XS-A30-R und XS-A130-R, um ein Aufschwimmen der Hohlkörper zu verhindern. ....	29
Abbildung 25: exemplarisches Zylinderkraft-Zeit-Diagramm des Versuchs XS-A30 V1.....	33
Abbildung 26: Sägeschnitte in Längsrichtung der Platten .....	35
Abbildung 27: Rissverlauf an Außenflächen sowie an Schnittflächen, XS-A 130 V1 .....	36
Abbildung 28: Rissverlauf an Außenflächen sowie an Schnittflächen, XS-A 130 V2 .....	37
Abbildung 29: Rissverlauf an Außenflächen sowie an Schnittflächen, XS-A 130 R V1.....	37
Abbildung 30: Rissverlauf an Außenseiten & an Schnittflächen XS-A 130 R – V2 .....	38
Abbildung 31: Porenstruktur im Versuchskörper XS-A 130 aus Normalbeton (links) und im Versuchskörper aus Recyclingbeton XS-A 130 R (rechts) .....	38
Abbildung 32: Mittels Abbruchschere vorgebrochene Versuchskörper (links) und Brechanlage mit eingefülltem Abbruchmaterial (rechts) .....	40
Abbildung 33: Reduktion der Kunststoffanteile bei drei aufeinander folgenden Durchgängen durch den Aufbereitungsprozess der Brechanlage.....	40
Abbildung 34: Hergestellte rezyklierte Gesteinskörnung des Korngemischs 0/45 (links) und entnommene Proben zur weiteren Untersuchung (rechts) .....	41
Abbildung 35: Trocknung des Korngemischs 0/45 (links), Siebung zur Messprobe der Kornklasse 8/63 (mittig) und Kornklasse 8/63 sowie Unterkorn (rechts) <b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>	
Abbildung 36: Separation der schwimmenden Kunststoffteile von der Messprobe (links) und Ermittlung des Volumens mittels Messzylinder und Tauchkolben.....	41
Abbildung 37: Getrocknete und sortierte Bestandteile der Messprobe.....	42

**Tabellenverzeichnis:**

<i>Tabelle 1: Modellmatrix zur FEM-Parameterstudie.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabelle 2: Wesentliche geometrische Parameter der untersuchten Modelle.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabelle 3: Kombination der XS-A Halbschalen mit den XS-H Betonformen und resultierende Gesamthöhen .....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 4: Versuchsmatrix Hohlkörperart/Betonart.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 5: Wesentliche Parameter der Versuchskörper .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 6: Zusammensetzung Normalbeton.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 7: Zusammensetzung Recyclingbeton.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 8: Art und Anzahl der Festbetonprüfungen gemäß DIN EN 12390-3 .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 9: Bewehrung der Versuchskörper.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 10: Übersicht der Querkrafttragfähigkeiten der Hohlkörper XS-A.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 11: Übersicht Versuchsergebnisse XS-A30-(R).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 12: Übersicht Versuchsergebnisse XS-A130-(R).....</i>	<i>35</i>
<i>Tabelle 13: Bestandteile der Messprobe und deren Anteile .....</i>	<i>42</i>

**Formelverzeichnis:**

<i>Gleichung 1</i>	<i>Querkraft</i>	<i>Seite 33</i>
<i>Gleichung 2</i>	<i>mittlere Querkrafttragfähigkeit</i>	<i>Seite 33</i>

## 1. Zusammenfassung

Zentrales Ziel des Projektes war es, die Querkrafttragfähigkeit von Hohlkörper-basierten zweiachsig gespannten Decken um 50 % zu steigern und auf diese Weise das Einsatzgebiet der Hohlkörpertechnologie sowie das Einsparpotenzial hinsichtlich Material, CO<sub>2</sub> und auch Kosten zu maximieren, sodass Hohlkörper-basierte Decken erstmals einen Preisvorteil gegenüber Massivdecken bieten.

Innovative Ansätze und Gegenstand der Arbeiten des Projektes waren die Erarbeitung und Realisierung einer innovativen Hohlkörpergeometrie, die Erarbeitung von Konzepten zur effizienten Montage und Installation auf der Baustelle und die Untersuchung der Rezyklierbarkeit der Hohlkörperdecken.

Dabei zeigte sich, dass Hohlkörper erfolgreich genutzt werden können, um Materialeinsparungen zu realisieren. Gleichzeitig wurden die Querkrafttragfähigkeiten gesteigert, im Vergleich zu Hohlkörperdecken mit bisherigen Hohlkörperformen um bis zu 44%. Auch bei einem Recycling wurden alle Werte für die Einhaltung relevanter Normen bestätigt.

## 2. Einleitung

Der Baustoff (Stahl)beton dominiert nach wie vor die weltweite und deutsche Baubranche. Bei der Herstellung von einer Tonne des für Beton benötigten Zementes werden 0,61 t CO<sub>2</sub> freigesetzt. Allein im Hochbau werden weltweit etwa 2,5 Mrd. Tonnen Zement verbraucht. Davon entfallen allein 55 % und somit ca. 1,4 Mrd. Tonnen Zement und 0,83 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> auf Decken und Fundamente im Hochbau. Mangelnde Leichtbauansätze führen dazu, dass aktuell unnötig viel Beton sowie Stahl verbraucht werden und Decken sowie Fundamente, die die Lasten aus allen darüberliegenden Bauteilen aufnehmen müssen, stärker ausgelegt werden als erforderlich. All dies ist mit einem unnötig hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß verbunden.

Eine Lösung zur Reduktion des Betoneinsatzes in Decken und Fundamenten bieten Hohlkörper mit einem Einsparpotenzial an Material und CO<sub>2</sub> von bisher ca. 25 % gegenüber massiven Betondecken. Diese Hohlkörper verdrängen den Beton in Bereichen, in denen er für die Tragfähigkeit kaum benötigt wird, und sparen hierdurch effektiv Beton und CO<sub>2</sub> ein. Nachteil bisheriger Hohlkörper-Systeme ist jedoch die Reduktion der Querkrafttragfähigkeit gegenüber Betonmassivdecken, sodass sich der effektive Einsatzbereich verringert. Zudem müssen zusätzliche Arbeitsschritte erfolgen und somit zusätzliche Kosten seitens der Baufirmen eingerechnet werden. Somit weist die Leichtbauweise mit Hohlkörpern bisher Kostennachteile gegenüber massiven Decken auf. Trotz der Umweltvorteile von Hohlkörpersystemen wird daher weiterhin der weitaus größte Teil der Decken und Fundamente in massiver Bauweise ausgeführt.

Somit besteht der Bedarf an neuen Lösungen, um das Einsatzgebiet der Hohlkörpertechnologie sowie das Einsparpotenzial hinsichtlich Material, CO<sub>2</sub> und auch Kosten zu maximieren, sodass Hohlkörper-basierte Decken erstmals einen Preisvorteil gegenüber Massivdecken bieten. Hier setzte das vorliegende Projekt an.

Übergeordnetes Ziel war und ist es, das Einsparpotenzial bzgl. Ressourcen, Kosten und CO<sub>2</sub> von Hohlkörper-basierten Decken und Fundamenten zu maximieren sowie im Anschluss an das Projekt flächendeckend in die Anwendung zu überführen und somit eine schnelle, akute und hohe Umweltwirkung zu erzielen.

Hierzu sollten auf Basis des neuen Ansatzes der Hohlkörpergeometrie und der Projektergebnisse nicht nur die praktischen Hürden zur Implementierung von Hohlkörpern reduziert werden, sondern die aktuellen kostenseitigen Nachteile in einen preislichen Vorteil gegenüber Massivdecken umgekehrt werden. Die Ergebnisse sollten einen Paradigmenwechsel in der Baubranche auslösen und einen zusätzlichen Anreiz zur CO<sub>2</sub>-Einsparung leisten.

UNIDOME verfügt dabei über ein internationales Vertriebsnetz und über hervorragende Kontakte zum Bausektor, um die Projektergebnisse schnellstmöglich in die breite Verwertung zu überführen.

### 3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

#### AP-01 Detailkonzeption

Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung eines innovativen Deckensystems unter Verwendung neuartiger Hohlkörper. Das neue System sollte eine nennenswert höhere Querkrafttragfähigkeit als bereits bestehende Hohlkörperdeckensysteme aufweisen. Dies sollte erreicht werden, indem kegelstumpfförmige Hohlkörper alternierend mit ihrer „spitzen“ Seite nach oben und nach unten angeordnet werden (vgl. Abbildung 1 ).

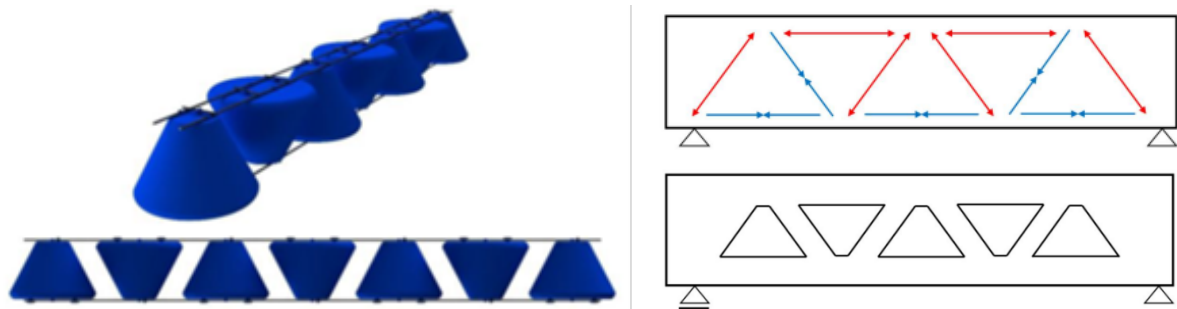


Abbildung 1: Angedachte Hohlkörperform für Platten mit hoher Querkrafttragfähigkeit (Anordnung der Hohlräume affin zu den Hauptspannungsrichtungen)

Bei der Erarbeitung der Detailkonzeption für das System waren die folgenden Punkte zu beachten:

- Entwicklung eines „Bausatzes“ zur Erzeugung einer möglichst großen Anzahl unterschiedlicher Größen geschlossener kegelstumpfförmiger Hohlkörper anhand einer möglichst geringen Anzahl unterschiedlicher Halbschalen
- Wirtschaftliche Transportierbarkeit, unkomplizierter Zusammenbau der Halbschalen zu Hohlkörpern und einfache Montage der Hohlkörper in der Schalung
- Formstabilität der Hohlkörper gegenüber dem Druck des Frischbetons während des Betoniervorganges

Wie bei bereits existierenden Systemen sollten Hohlkörper unterschiedlicher Größen dadurch entstehen, dass Halbschalen verschiedener Größen miteinander kombiniert werden. Bei dem im Rahmen des Forschungsprojekts zu entwickelnden neuartigen Hohlkörpertyp, für den im Folgenden die Typbezeichnung XS-A verwendet wird, bildet eine dieser kombinierbaren Halbschalen stets die hier zu entwickelnde kegelförmige Halbschale. Die zweite Halbschale eines jeden Hohlkörpertyps wird gebildet durch die verschiedenen Halbschalen der Serie XS-H der Firma Unidome Deutschland GmbH. (vgl. Abbildung 2).

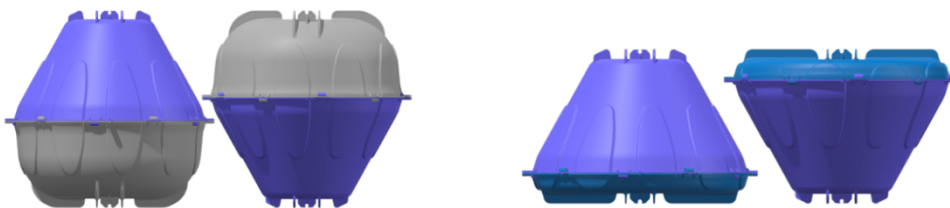
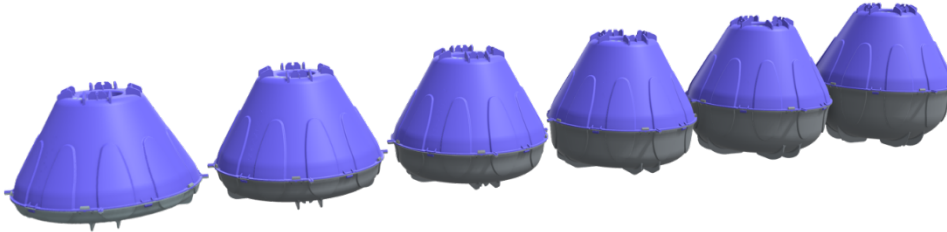


Abbildung 2: Hohlkörper unterschiedlicher Größe entstehend durch Zusammensetzung der neu zu entwickelnden kegelstumpfförmigen Hohlkörper-Halbschale mit Halbschalen vom Typ Unidome XS-H

Da eine Anwendung der neuartigen Hohlkörper im Wesentlichen in Decken der Dicken  $h = 32 \dots 42$  cm erwartet wird, wurde für die neu zu entwickelnde Halbschale eine Hohlraumhöhe

von  $h_k = 170$  mm gewählt (vgl. Abbildung 3). Um die Kombinierbarkeit der neuartigen kegelstumpfförmigen Halbschalen mit den Halbschalen der Reihe XS-H zu erlauben, wurde der größere Radius (im Folgenden bezeichnet als „der untere Radius“) mit  $r_u = 157,5$  mm festgelegt. Durch die Kombination mit Halbschalen vom Typ XS-H 30 ... XS-H 130 entstehen somit Hohlkörper mit Höhen von  $h = 20 \dots 30$  cm (vgl. Abbildung 3).



**Abbildung 3: Hohlkörper der neuen Serie XS-A entstehend durch Kombination der neu entwickelten kegelstumpfförmigen Halbschalen mit Hohlkörpern der Serie XS-H unterschiedlicher Höhe**

Bezüglich des kleineren Radius' der kegelstumpfförmigen Halbschalen (im Folgenden bezeichnet als „der obere Radius“)  $r_o$  war in AP-01 lediglich die Festlegung eines Mindestwertes möglich. Da die einzelnen Hohlkörper im Sinne einer unkomplizierten Montage mit Hilfe von Bewehrungsstäben mit einem Durchmesser von 6 mm zu Hohlkörpermodulen zusammengefügt werden sollen und hierfür ausreichend Platz zur Anordnung der Stabaufnehmer vorhanden sein muss, wurde der Mindestradius auf einen Wert von  $r_{o,min} = 70$  mm festgelegt. Der endgültige Wert des oberen Radius' wurde im Rahmen von Optimierungsberechnungen in AP-02 definiert.

## **AP-02 Erarbeitung des neuen Hohlkörper-Deckensystems**

In AP-02 wurden unter Berücksichtigung der in AP-01 festgelegten Parameter FEM-Simulationen mit dem FEM-Programm DIANA der Firma DIANA FEA B.V. durchgeführt, um die im Hinblick auf eine hohe Querkrafttragfähigkeit bei gleichzeitiger maximaler Volumenverdrängung optimalen geometrischen Abmessungen der neuen kegelstumpfförmigen Halbschalen zu definieren.

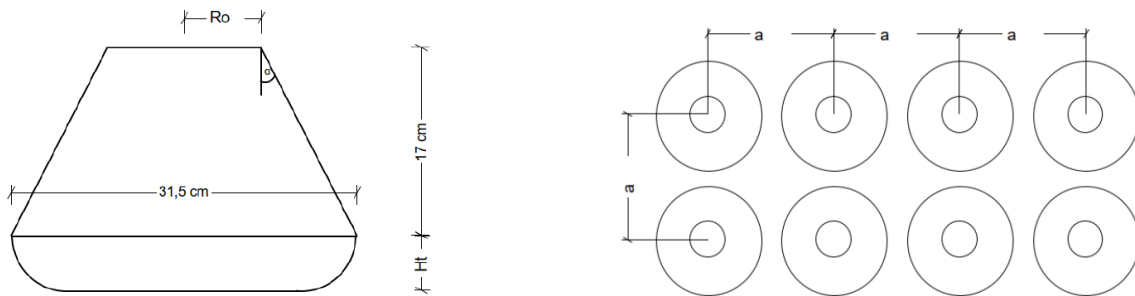
### **Definition der Geometrie der zu untersuchenden Hohlkörper**

Wie erwähnt wurden im Rahmen der Arbeiten in AP-01 bereits der Mindestwert des oberen Radius' ( $r_{o,min} = 70$  mm), die Höhe der kegelstumpfförmigen Halbschale ( $h_k = 170$  mm) sowie der untere Radius ( $r_u = 157,5$  mm) festgelegt. Als Obergrenze für den oberen Radius wurde ein Wert von  $r_{o,max} = 100$  mm festgelegt, da für größere Werte die Vorteile der Kegelform zunehmend verloren gingen. Für die Optimierungsberechnungen wurden die oberen Radien in Schritten von 10 mm variiert, so dass insgesamt Hohlkörperformen mit vier verschiedenen oberen Radien untersucht wurden (70, 80, 90 und 100 mm).

Im Rahmen der Optimierungsberechnungen wurden nun die Querkrafttragfähigkeiten von Stahlbetonplatten mit den neuartigen Hohlkörpern für verschiedene obere Radien (und somit für verschiedene Neigungen der Kegelschale) sowie für verschiedene Achsabstände  $a$  der einzelnen Hohlkörper untereinander (vgl. Abbildung 4 rechts) ermittelt. Dabei wurden jeweils Kombinationen der neu zu entwickelnden Kegelstumpfhalschale mit allen Halbschalen des

bestehenden Hohlkörperdeckensystems XS-H der Firma Unidome Deutschland GmbH mit Halbschalenhöhen  $h_i = 30 \dots 130$  mm (vgl. Abbildung 4 links) untersucht.

Das Ziel der Berechnungen bestand darin, diejenige Form der kegelstumpfförmigen Halbschale zu ermitteln, die für eine möglichst große Anzahl unterschiedlicher Kombinationen mit Halbschalen vom Typ XS-H zu einer möglichst hohen Querkrafttragfähigkeit der Stahlbetonplatten führt und gleichzeitig mit einer Volumenverdrängung von mindestens 30 % einher geht. Hierfür wurden 27 FEM-Modelle mit unterschiedlichen Höhen der Halbschalen vom Typ XS-H, unterschiedlichen Wandneigungen der kegelstumpfförmigen Halbschale sowie mit unterschiedlichen Achsabständen der Hohlkörper untersucht.



**Abbildung 4: Geometrieparameter für die Optimierungsberechnungen**

Die untersuchten Hohlkörperformen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Modellmatrix zur FEM-Parameterstudie

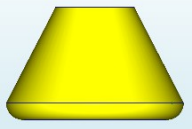
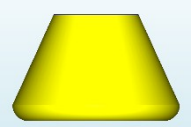
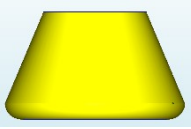
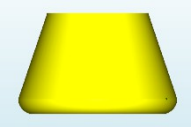
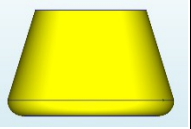
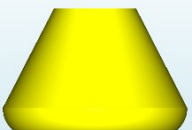

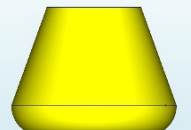



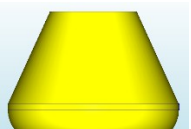
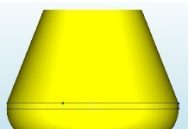
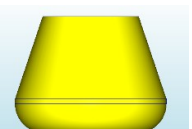

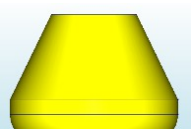
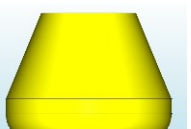
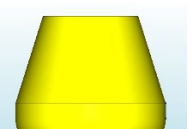
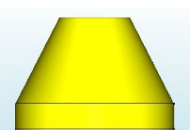

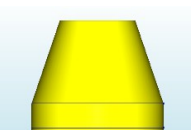

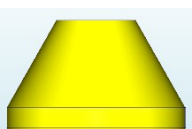
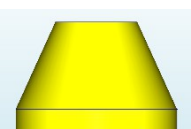
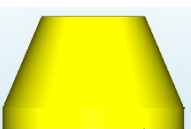

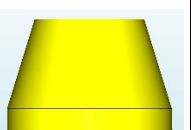
		oberer Radius $r_o$ [mm]				
		70	80	90	100	105
XS-Halbschalenhöhe $h_t$ [mm]	30					
	50					
	70					
	90					
	110					
	130					

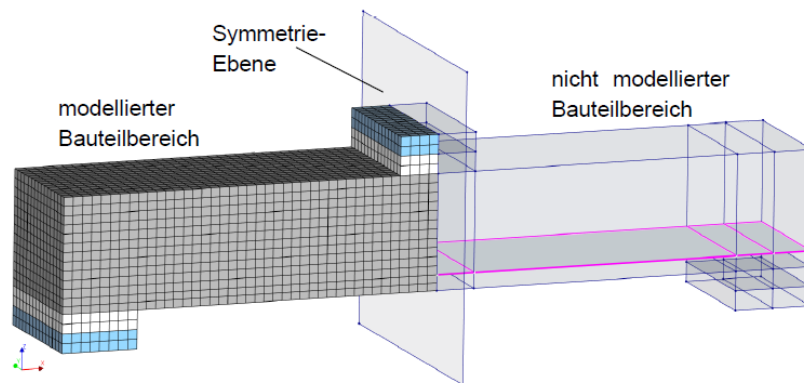
Tabelle 2 zeigt die wesentlichen Geometrieparameter der 27 untersuchten Formen inklusive der untersuchten Achsabstände und der jeweiligen daraus resultierenden Volumenverdrängung.

Tabelle 2: Wesentliche geometrische Parameter der untersuchten Modelle

XS-Höhe $h_t$ [mm]	oberer Radius $r_o$ [mm]	Wandneigung $\alpha$ [°]	Achsabstand $a$ [mm]	Volumenverdrängung [%]
30	70	27,24	290	30,3
30	80	24,51	300	30,1
30	90	21,66	310	30,0
30	100	18,69	315	30,9
50	70	27,24	300	30,7
50	80	24,51	310	30,3
50	90	21,66	320	30,0
50	100	18,69	325	30,7
50	105	17,16	330	30,6
70	70	27,24	310	30,4
70	80	24,51	315	30,9
70	90	21,66	325	30,5
70	100	18,69	335	30,1
90	70	27,24	315	30,6
90	80	24,51	325	30,0
90	90	21,66	330	30,5
90	100	18,69	340	30,1
110	70	27,24	320	30,7
110	80	24,51	330	30,0
110	90	21,66	335	30,4
110	100	18,69	340	30,8
130	70	27,24	325	30,0
130	80	24,51	330	30,2
130	90	21,66	335	30,5
130	100	18,69	345	30,0
130	105	17,16	345	30,6

## Geometrie der FEM-Modelle

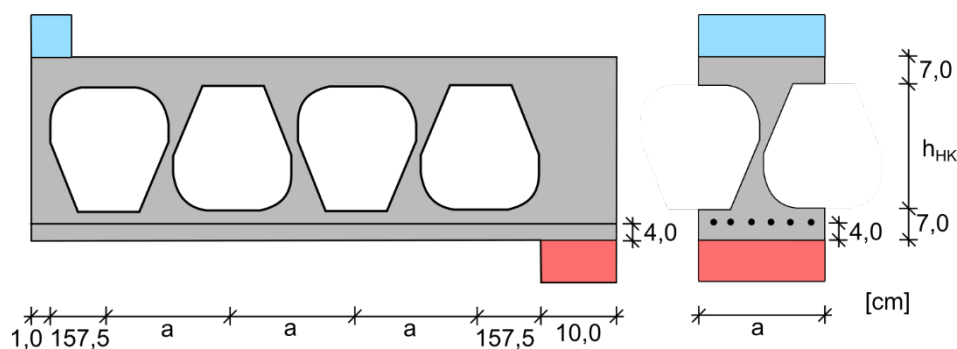
Die Querkrafttragfähigkeiten der untersuchten Hohlkörperplatten wurden in FEM-Simulationen von Drei-Punkt-Biegeversuchen ermittelt, wobei zur Minimierung der Rechenzeit unter Ausnutzung der Symmetrie jeweils nur eine Hälfte des Systems abgebildet wurde (vgl. Abbildung 5).



**Abbildung 5: Geometriemodell unter Ausnutzung der Achsensymmetrie bei einem mittig belasteten Drei-Punkt-Biegeversuch** Quelle: (Busch 2020)

In allen Modellen wurden vier hintereinander liegende Hohlkörper abgebildet. Zudem wurde ein Randabstand von 1,0 cm auf der Seite der Lasteinleitung sowie ein Randabstand von 10,0 cm auf der Seite des Auflagers berücksichtigt. Die Höhen der jeweils untersuchten Bauteile ergaben sich, indem an der Ober- und an der Unterseite zusätzlich zur Hohlkörperhöhe Betondeckungen von jeweils 7 cm zu den Hohlkörpern berücksichtigt wurden. Als Breite  $b$  der Plattenstreifen wurde der jeweilige Achsabstand  $a$  der Hohlkörper gewählt.

Zudem wurde eine Bewehrung berücksichtigt, welche einen Abstand von  $d_1=4,0$  cm zum Zugrand aufwies. Abbildung 6 zeigt die wesentlichen geometrischen Eigenschaften des Modells in unmaßstäblicher Darstellung.



**Abbildung 6: Geometrie der FEM-Modelle (unmaßstäblich)**

Die Belastung aller Modelle erfolgte anhand der Aufbringung einer Verformung auf die in Abbildung 6 hellblau dargestellte Lasteinleitungsplatte, wobei maximal 150 Lastschritte ausgeführt wurden, in denen die Verformung um jeweils 0,1 mm bis zum Versagen gesteigert wurde.

## Verwendete Materialparameter

Als Längsbewehrung wurde in den FEM-Simulationen Bewehrungsstahl B500 B mit einer Fließgrenze  $f_{yk}$  von 500 N/mm<sup>2</sup> verwendet. Der Bewehrungsgrad  $\rho_l$  wurde so gewählt, dass ein Biegeversagen der Modelle ausgeschlossen werden konnte. Weiterhin wurde der Abstand

vom Betonrand zum Mittelpunkt der Bewehrung mit  $d_1 = 4,0$  cm festgelegt. Für alle Berechnungen in DIANA wurde das Versagenskriterium nach von Mises, 1986 verwendet.

Für den Beton kam ein nichtlineares Materialmodell zur Anwendung. Dabei wurde im Druckbereich das Modell nach Thorenfeldt, 1987 verwendet, während im Zugbereich das Modell nach Hordijk, 1991 eingesetzt wurde. Als Rissmodell wurde das Total Strain Fixed Crack Model verwendet, die Rissbandbreite wurde gemäß dem Modell von Rots ermittelt.

Für die Lasteinleitungs- und die Auflagerplatten (vgl. Abbildung 6 blau bzw. rot dargestellt) wurde jeweils auf halber Höhe ein linear-elastisches Materialverhalten und auf der anderen Hälfte ein orthotropes Materialverhalten definiert. Auf diese Weise wurden ungewollte Steifigkeitserhöhungen und Spannungsspitzen im Bereich der Krafteinleitung vermieden.

### Auswertung der Parameterstudie

Zur Bewertung der Qualität der unterschiedlichen Hohlkörperformen wurde das Verhältnis der in den FEM-Berechnungen ermittelten Querkrafttragfähigkeiten der Stahlbetonbauteile mit den jeweiligen Hohlkörpern  $V_{FEM,i}$  zur rechnerisch aufnehmbaren Querkraft eines baugleichen Massivdeckenstreifens  $V_{Rm,C,i}$  gewählt. Diese Verhältniswerte sind für die einzelnen FEM-Modelle in den Diagrammen in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt.

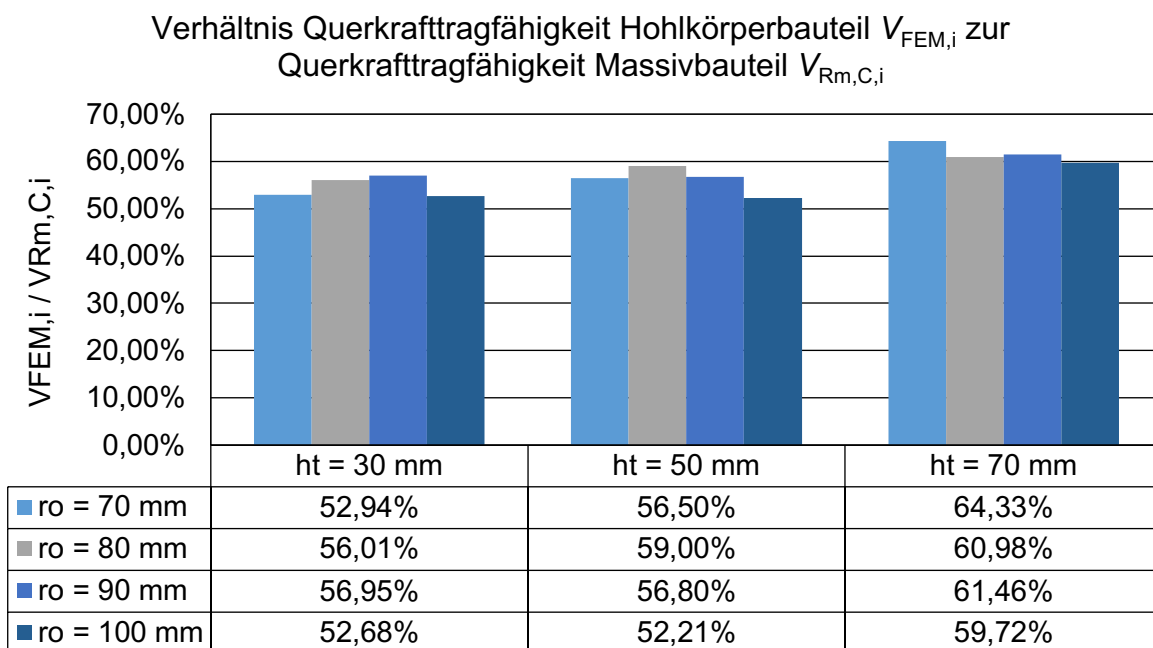


Abbildung 7: Übersicht über Querkrafttragfähigkeiten der FEM-Berechnungen Teil 1

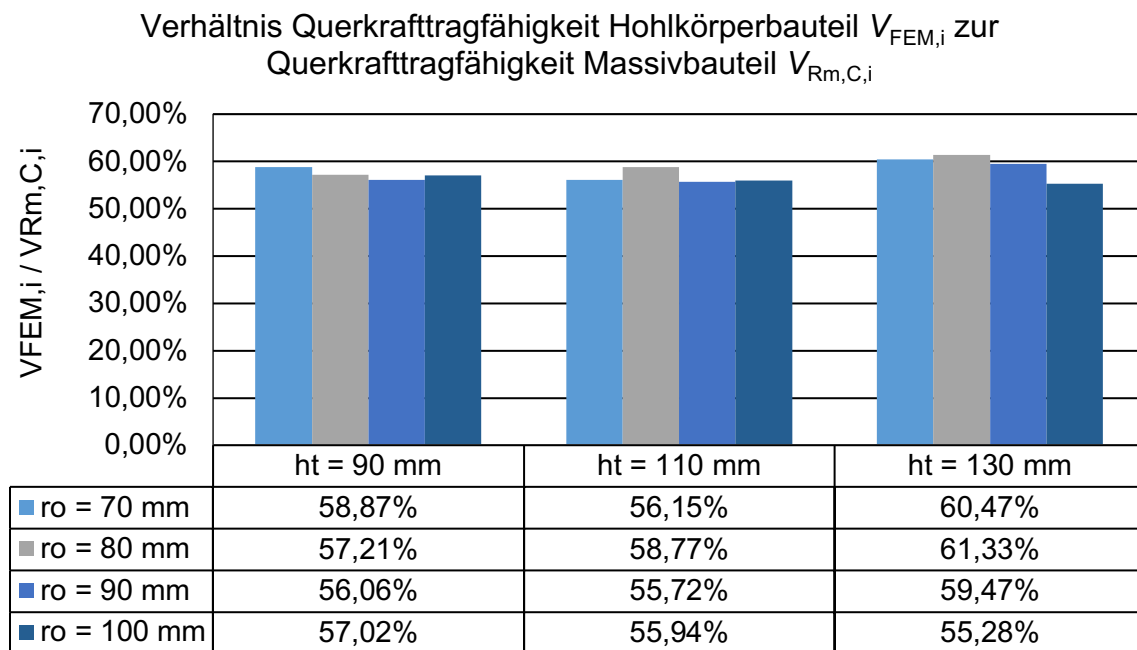


Abbildung 8: Übersicht über Querkrafttragfähigkeiten der FEM-Berechnungen Teil 2

Das Diagramm in Abbildung 9 zeigt die Mittelwerte der prozentualen Querkrafttragfähigkeiten aus den Berechnungen mit den verschiedenen XS-Halbschalenhöhen  $h_t$ , für die unterschiedlichen oberen Radien  $r_o$  der kegelstumpfförmigen Halbschalen. Zusätzlich werden dort zum Vergleich die prozentualen Querkrafttragfähigkeiten der Referenzmodelle (XS 200 und XS 220) angegeben.

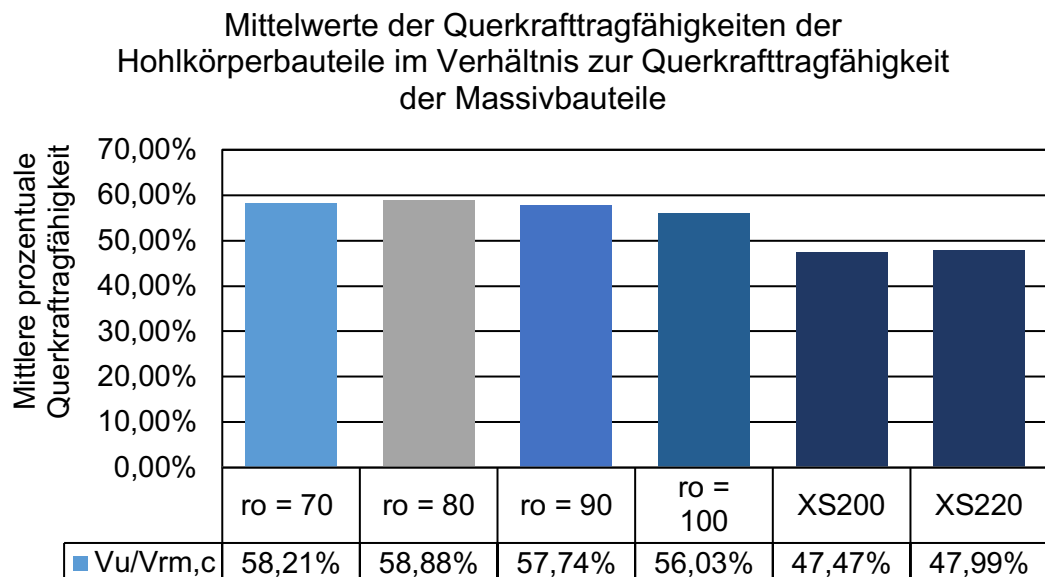


Abbildung 9: Mittlere Querkrafttragfähigkeiten der Modelle mit unterschiedlichen oberen Radien und der Referenzmodelle

Aus den obenstehenden Diagrammen ist zu erkennen, dass sich für die Modelle mit einem oberen Radius von  $r_o = 80$  mm und mit einem Radius von  $r_o = 70$  mm im Mittel die höchsten Querkrafttragfähigkeiten ergaben. Da für eine Anwendung in der Praxis insbesondere die Kombinationen mit Halbschalen der Höhen  $h_t = 70$  mm und  $h_t = 90$  mm interessant erscheinen

und sich bei diesen Kombinationen für Hohlkörper mit einem oberen Radius von  $r_o = 70$  mm sehr gute Querkrafttragfähigkeiten ergaben, wurde für die weiteren Arbeiten der obere Radius der Hohlkörper auf  $r_o = 70$  mm festgelegt.

In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass Stahlbetonbauteile mit den so definierten neuartigen Hohlkörpern bei nahezu gleicher Betonverdrängung deutlich höhere Querkrafttragfähigkeiten aufweisen als Stahlbetonbauteile mit den Referenzhohlkörpern XS-200 und XS-220. Für die Modelle mit einem oberen Radius von  $r_o = 70$  mm ergibt sich im Mittel eine um 22,10% höhere Querkrafttragfähigkeit ( $58,21/47,73=1,22$ ).

### AP-03 Werkzeugentwicklung und -anfertigung

In AP-03 wurde ein Gusswerkzeug für die Herstellung der Hohlkörper geplant und hergestellt.

Ausgehend von den in AP-01 und AP-02 festgelegten Geometrieabmessungen der kegelstumpfförmigen Halbschalen (Höhe  $h_k = 170$  mm, unterer Radius  $r_u = 157,5$  mm, oberer Radius  $r_o = 70$  mm) wurde die Detaillierung der Hohlkörpergeometrie für den Werkzeugbau schrittweise verfeinert. (vgl. Abbildung 10).

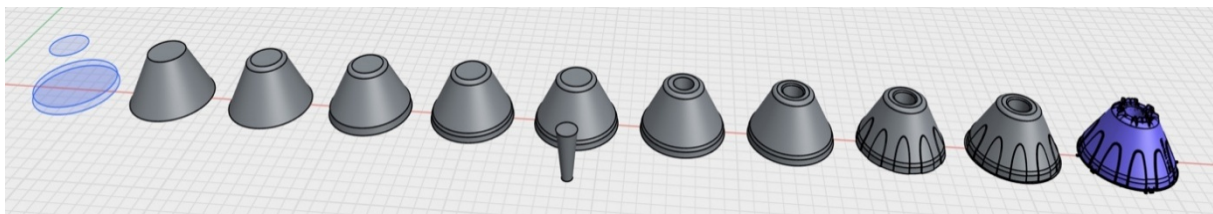


Abbildung 10: Entwicklung der detaillierten Hohlkörpergeometrie basierend auf den Ergebnissen der AP-01 und AP-02

Folgende Punkte waren bei der Verfeinerung der Geometrie zu beachten:

- Verschlussmechanismus
- Stabaufnehmer
- Rippen zur Sicherstellung der Formstabilität der Hohlkörper bei Einbau und Betonage
- Minimierung der Stapelhöhe für einen wirtschaftlichen Transport

Weitere Punkte, die bei der Planung betrachtet werden mussten, waren die Entformbarkeit der Halbschalen aus dem Werkzeug, ein gleichmäßiger Materialfluss beim Spritzvorgang sowie die Minimierung des Materialverbrauchs bei einer Herstellung aus 100 % recyceltem Kunststoff.

#### *Verschlussmechanismus*

Um eine Kompatibilität der neuartigen kegelförmigen Halbschalen mit den bereits bestehenden Halbschalen vom Typ XS-H sicher zu stellen, wurde der Verschlussmechanismus mit umlaufenden elastischen Haken, Öffnungen und Führungsrampen des Systems XS-H adaptiert und an die neuartigen Halbschalen angepasst. Hierfür wurden abwechselnd Haken (mit Führungsschienen) und entsprechende Öffnungen am unteren Rand der kegelförmigen Halbschalen angeordnet (Abbildung 11).

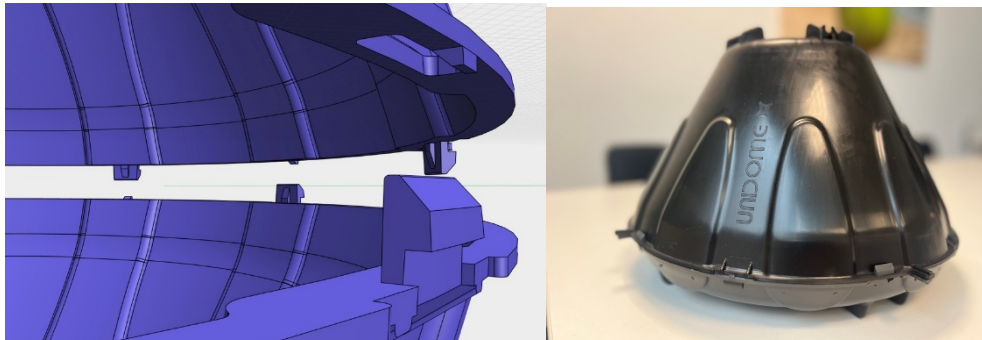


Abbildung 11: Verschlussmechanismus im CAD-Modell (links) und zusammengebauter Hohlkörper (rechts)

#### *Stabaufnehmer*

Um einen einfachen Transport sowie eine unkomplizierte Montage der Hohlkörper auf der Baustelle zu ermöglichen, sollen die Hohlkörper mittels Bewehrungsstäben des Durchmessers 6 mm zu Hohlkörpermodulen zusammengefasst werden. Hierfür wurden an der Oberseite der kegelstumpfförmigen Halbschalen „klickfähige“ Stabaufnehmer angeordnet (vgl. Abbildung 12).

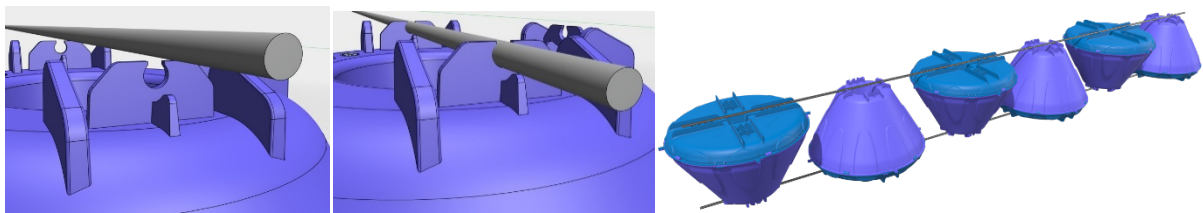


Abbildung 12: Klickfähige Stabaufnehmer für Bewehrungsstäbe mit dem Durchmesser 6 mm (links) zur Montage der einzelnen XS-A Hohlkörper zu Hohlkörpererelementen (rechts)

#### *Rippen zur Sicherstellung der Formstabilität*

Um die Formstabilität der Hohlkörper während der Betonage zu gewährleisten, wurden im Inneren der Kegelhalbschalen sowie an deren Außenseite in geeignetem Abstand Rippen angeordnet. Weiterhin wurde ein „Stütztunnel“ vorgesehen, um Haken einbauen zu können, die den Bewehrungsstab, der oberhalb der Hohlkörper angeordnet ist, mit demjenigen unterhalb der Hohlkörper zu verbinden (vgl. Abbildung 13, links und mittig). Zusätzlich wurden Sicken an den Außenseiten der kegelstumpfförmigen Hohlkörper angeordnet (vgl. Abbildung 13, rechts).

#### *Minimierung der Stapelhöhe*

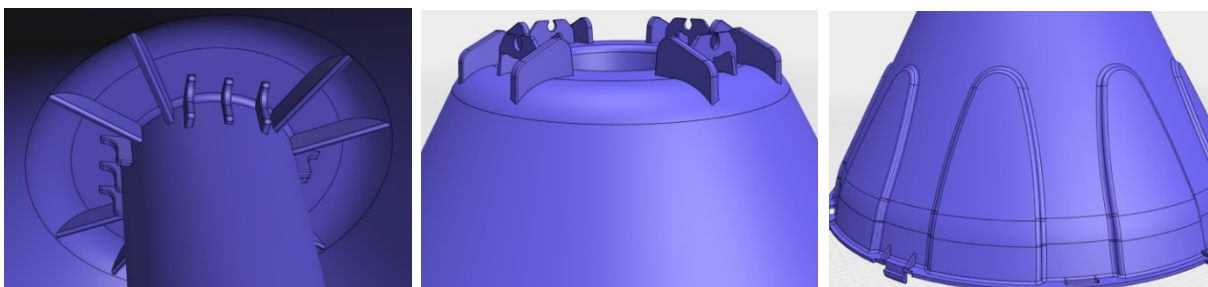


Abbildung 13: Innere und äußere Rippen sowie Stütztunnel und Sicken der kegelstumpfförmigen Halbschalen zur Sicherstellung der Formstabilität während der Betonage

Um einen wirtschaftlichen Transport zu ermöglichen, sollten die Kegelhalbschalen so konzipiert werden, dass eine Stapelung mit möglichst geringer Höhe ermöglicht wird. Dabei konnte eine Stapelhöhe von 16 mm erzielt werden (vgl. Abbildung 13).

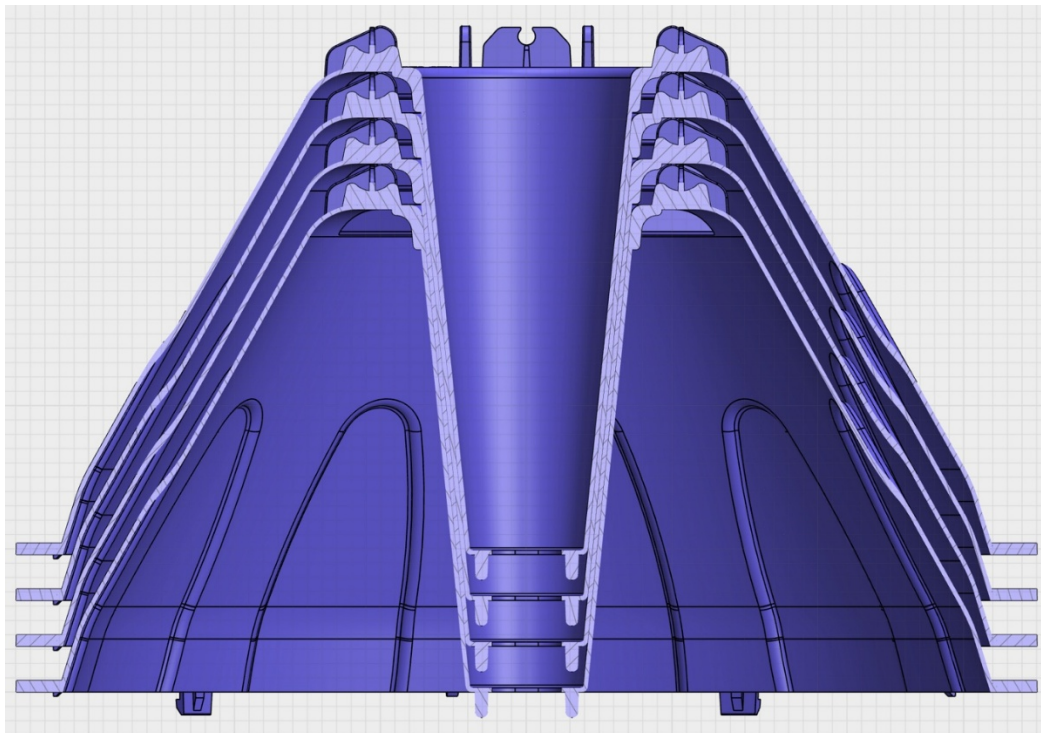


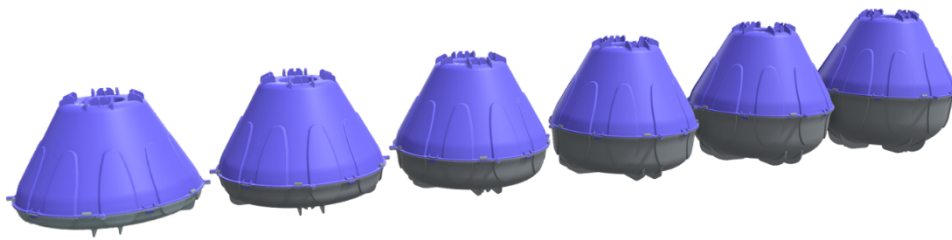
Abbildung 13: Gestapelte XS-A Halbschalen mit einer jeweiligen Stapelhöhe von nur 16 mm

Tabelle 3 zeigt die Hohlraumhöhen sowie die Gesamthöhen aller Hohlkörper, die durch eine Kombination der nunmehr abschließend geplanten kegelförmigen Halbschalen und der Halbschalen der Serie XS-H erstellt werden können.

In Abbildung 14 sind die verschiedenen Hohlkörperarten graphisch dargestellt.

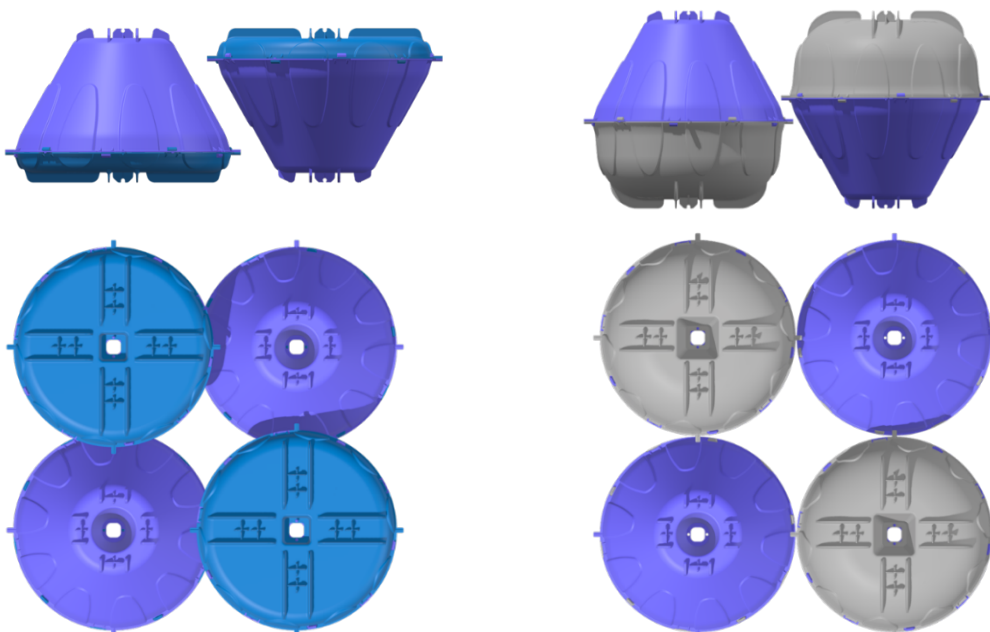
Tabelle 3: Kombination der XS-A Halbschalen mit den XS-H Betonformen und resultierende Gesamthöhen

Hohlkörper	XS-A 200	XS-A 220	XS-A 240	XS-A 260	XS-A 280	XS-A 300
Hohlraumhöhe	200 mm	220 mm	240 mm	260 mm	280 mm	300 mm
Gesamthöhe	230 mm	250 mm	270 mm	290 mm	310 mm	330 mm
<b>1.Halbschale</b>	<b>XS-A 170</b>					
Hohlraumhöhe	170 mm					
Gesamthöhe	185 mm					
<b>2.Halbschale</b>	<b>XS-H 30</b>	<b>XS-H 50</b>	<b>XS-H 70</b>	<b>XS-H 90</b>	<b>XS-H 110</b>	<b>XS-H 130</b>
Hohlraumhöhe	30 mm	50 mm	70 mm	90 mm	110 mm	130 mm
Gesamthöhe	45 mm	65 mm	85 mm	105 mm	125 mm	145 mm



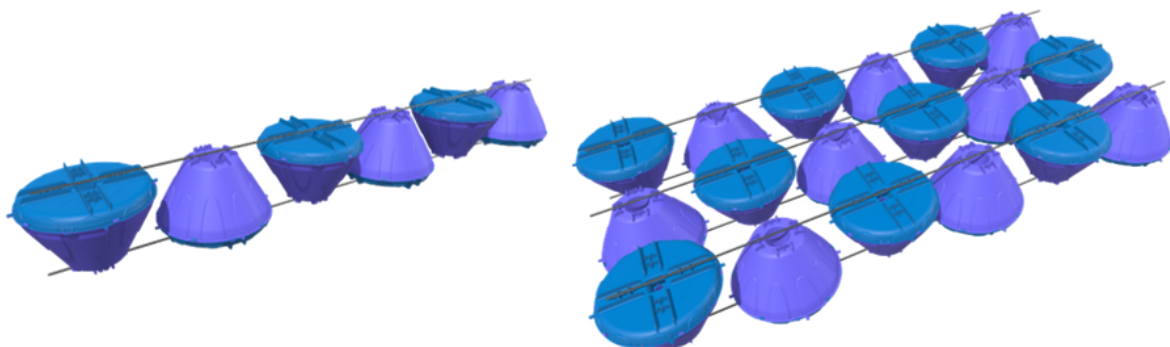
**Abbildung 14: Kombinationsmöglichkeiten der XS-A Halbschalen mit den Halbschalen XS-H 30 bis XS-H 130 (von links nach rechts)**

Bezüglich der exakten Achsabstände der Hohlkörper untereinander war zu beachten, dass Hohlkörper des Typs XS-A 200 (230) einen kleineren Achsabstand ( $< 30$  cm) erlauben würden als Hohlkörper des Typs XS-A 300 (330) (vgl. Abbildung 15).



**Abbildung 15: Unterschiedlich mögliche Achsabstände der Hohlkörper XS-A 200 und XS-A 300**

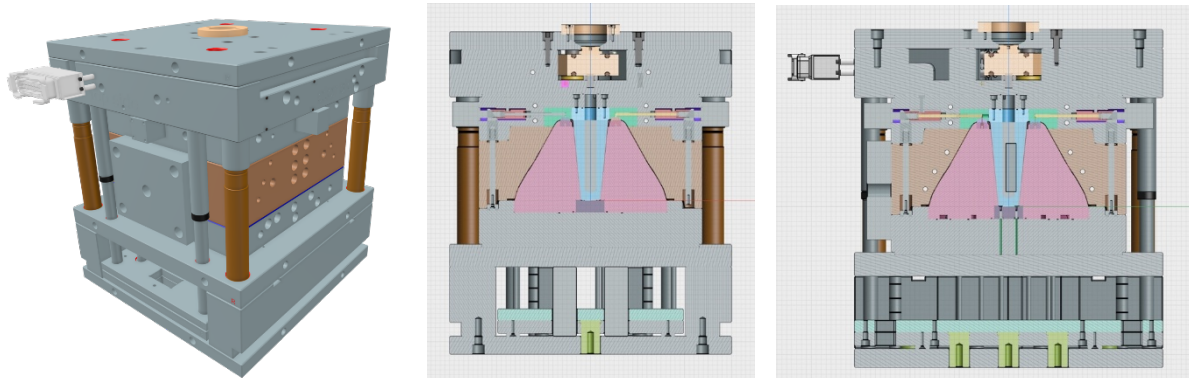
Aus Gründen der Vereinheitlichung wurde jedoch ein Achsabstand von  $a = 33$  cm in Quer- und in Längsrichtung für alle Größen festgelegt. Abbildung 16 zeigt beispielhaft Module von Hohlkörpern vom Typ XS-A 200 mit den festgelegten Achsabständen der Hohlkörper.



**Abbildung 16: Module von Hohlkörpern vom Typ XS-A 200**

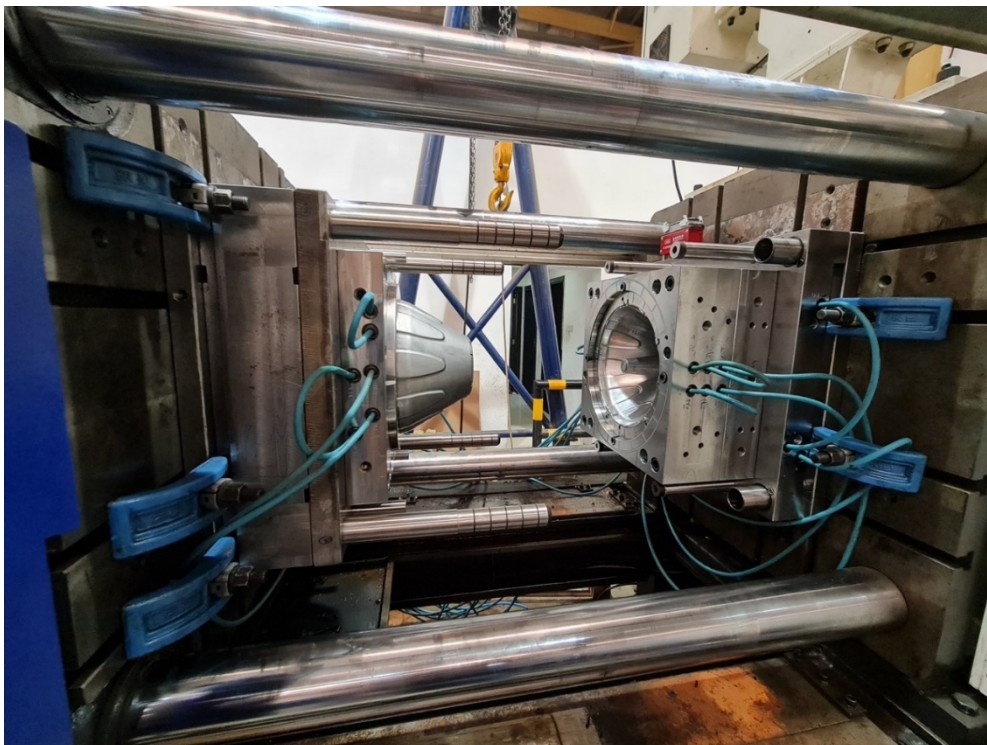
Nach Abschluss des Produktdesigns konnte in enger Abstimmung mit einem Werkzeughersteller das erforderliche Spritzgusswerkzeug gefertigt werden. (vgl. Abbildung

17) Das Werkzeug wurde als Einfachwerkzeug (einfache Kavität) konzipiert. Es kann beispielsweise mit einer 380 Tonnen-Spritzgussmaschine betrieben werden und verfügt über einen Heißkanal (Hot-Runner), ein integriertes Kühlsystem sowie über vollautomatische Ausstoßerpins. Die Zykluszeit für die Herstellung eines Teils liegt je nach Maschine und Einstellungen zwischen 18 und 30 Sekunden. Das Werkzeug ist zudem geeignet für die Herstellung von Kunststoffteilen aus 100 % recyceltem Kunststoff (hier RPP).



**Abbildung 17:** Darstellung des Spritzgusswerkzeugs zur Herstellung von Halbschalen XS-A 170, links als dreidimensionales CAD-Modell und rechts als Schnitte durch das Modell mit Sicht auf die Spritzgusskammer

Anhand der Pläne wurde im Anschluss das Spritzgusswerkzeug XS-A 170 hergestellt und in eine Spritzgussmaschine eingebaut (vgl. Abbildung 18).



**Abbildung 18:** In einer Spritzgussmaschine montiertes Werkzeug zur Herstellung der Hohlkörper vom Typ XS-A

Nach der Inbetriebnahme des Werkzeuges, der Abmusterung erster prototypischer Teile und der Durchführung geringfügiger Korrekturen konnten die in Abbildung 19 zu erkennenden ersten Hohlkörper vom Typ XS-A und entsprechende Hohlkörpermodule hergestellt werden.



**Abbildung 19: Abmusterung der XS-A Halbschalen und Testmontage mit den XS-H Halbschalen zu Hohlkörpern XS-A**

## AP-04 Planung der Bauteilversuche und Probekörperherstellung

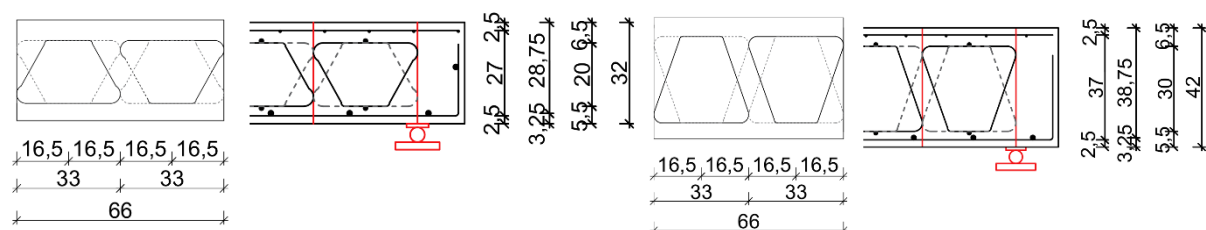
Mit den optimierten Geometriedaten wurden zur Validierung der Forschungsziele Bauteilversuche an Prüfkörpern mit entsprechenden Hohlkörpern durchgeführt. Ein zusätzliches Augenmerk lag auf dem Vergleich zwischen den Querkrafttragfähigkeiten der Hohlkörperbauteile bei einer Verwendung von Recycling- bzw. von Normalbeton.

Insgesamt wurden vier Platten hergestellt, wobei zwei der Platten mit Normal- und zwei mit Recyclingbeton hergestellt wurden. Für die Versuche kamen sowohl die Hohlkörper mit der geringsten Höhe, welche mit der neuen Halbschalenform herstellbar sind, als auch die Hohlkörper mit der größten Höhe zum Einsatz. Die Hohlkörper mit der geringsten Höhe ( $h=20$  cm) entstehen durch eine Kombination der neuen Halbschalen mit Halbschalen vom Typ XS-H 30 und werden im Folgenden mit XS-A 30 bezeichnet. Werden die neuen Halbschalen kombiniert mit Halbschalen vom Typ XS-H 130, so ergeben sich die Hohlkörper mit der größten Höhe ( $h=30$  cm). Diese Hohlkörper werden im weiteren als Hohlkörper vom Typ XS-A 130 bezeichnet. Die Versuchskörper waren so konzipiert, dass mit jedem Körper zwei Bauteilversuche durchgeführt werden konnten. Das Versuchsprogramm umfasste somit insgesamt 8 Bauteilversuche (zwei Versuche je Hohlkörpertyp und Betonrezeptur).

Die Bauteilversuche wurden als einachsige gespannte Drei-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Dabei wurde eine Längsbewehrung zur Verhinderung eines Biegeversagens und eine konstruktive obere Mattenbewehrung eingelegt. Die Höhen der Versuchskörper ergaben sich aus der Summe der jeweiligen Hohlkörperhöhe und der minimal erforderlichen Deckenspiegelhöhe.

### Versuchsprogramm

Für die Platten mit Hohlkörpern wurde jeweils eine Dicke des unteren Betonspiegels von 5,5 cm und eine Dicke des oberen Betonspiegels von 6,5 cm gewählt. Da aufgrund der gültigen Brandschutzvorschriften geringere Spiegeldicken kaum möglich sind, sind durch diese Wahl die ungünstigsten Verhältnisse bezüglich der Querkrafttragfähigkeiten der Bauteile erfasst. Somit ergab sich für die Platten mit den Hohlkörpern des Typs XS-A 30 eine Dicke von  $h=32$  cm und für die Platten des Typs XS-A 130 eine Dicke von  $h=42$  cm (vgl. Abbildung 20).



**Abbildung 20: Querschnitt und Längsschnitt der Versuchskörper mit statischen Höhen, Dicken der Deckenspiegel und Achsabständen (links XS-A30 & rechts XS-A130)**

Die Hohlkörper wurden in der Spannrichtung der Versuchsplatten jeweils in zwei Reihen - abwechselnd mit ihrer Spitze nach oben und unten - eingebaut. In den Platten mit Dicken von  $h=32$  cm wurden vier, in den Platten mit Dicken von  $h=42$  cm fünf Hohlkörper je Seite verbaut. Als Achsabstand zwischen den Hohlkörpern wurde  $a=33$  cm gewählt, der Randabstand in Längsrichtung betrug  $15$  cm und die Breite der Platten insgesamt  $b=66$  cm. Als statische Höhe ergaben sich  $d=28,75$  cm (XS-A30) bzw.  $d=38,75$  cm (XS-A130) (vgl. Abbildung 20).

An jedem Stahlbetonplattenstreifen wurden zwei voneinander unabhängige Querkraftversuche durchgeführt. In jedem Versuch wurden die Abstände zwischen den

Auflagern und dem Lasteinleitungspunkt so gewählt, dass auf der einen Seite des Plattenstreifens eine um ca. 20 % größere Querkraft als auf der anderen Seite entstand. Der Versuchsaufbau für beide Versuche geht aus Abbildung 21 hervor. Hierbei ist der erste Versuch eines jeden Plattenstreifens in blauer Farbe und der zweite Versuch in roter Farbe dargestellt.

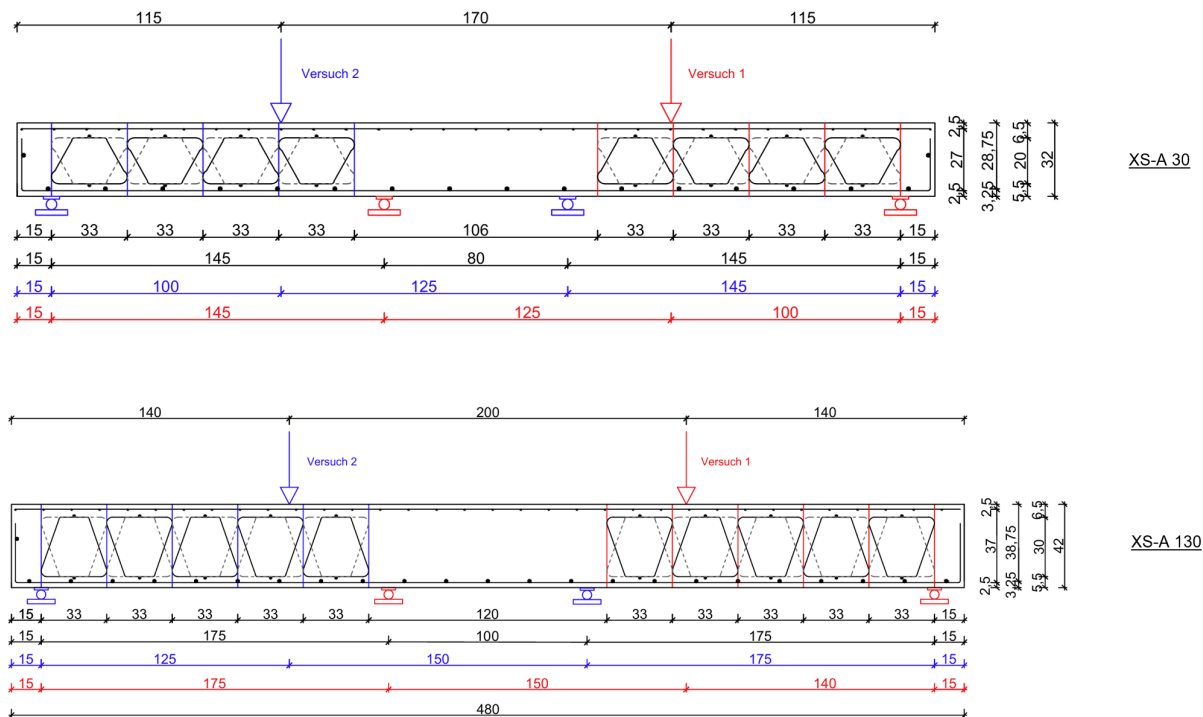


Abbildung 21: Versuchsaufbau der Bauteilversuche XS-A30 (oben) und XS-A130 (unten)

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die in den acht durchgeführten Querkraftversuchen verwendeten Hohlkörper und Betonarten.

Tabelle 4: Versuchsmatrix Hohlkörperart/Betonart

Versuchsmatrix XS-A					
Versuchsbezeichnung	Versuchskörper	Hohlkörperart		Betonart	
		XS-A30	XS-A130	Normalbeton	Recyclingbeton
XS-A30 V1	1	x		x	
XS-A30 V2		x		x	
XS-A30-R V1	2	x			x
XS-A30-R V2		x			x
XS-A130 V1	3		x	x	
XS-A130 V2			x	x	
XS-A130-R V1	4		x		x
XS-A130-R V2			x		x

Tabelle 5 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Parameter und Abmessungen der Versuchskörper inklusive der für die Versagensart bedeutsamen Schubslankheit.

Tabelle 5: Wesentliche Parameter der Versuchskörper

Übersicht über das Versuchsprogramm						
Information	Bez.	Einheit	XS-A30		XS-A130	
			Normalbeton	RC-Beton	Normalbeton	RC-Beton
Allgemeines zu den Versuchskörpern						
Versuchskörperlänge	$l$	[cm]	400	400	480	480
Versuchskörperbreite	$b$	[cm]	66	66	66	66
Querschnittshöhe	$h$	[cm]	32	32	42	42
Statische Nutzhöhe	$d$	[cm]	28,75	28,75	38,75	38,75
HK-Anzahl in VK	---	---	16	16	20	20
Daten zu den Versuchen an den Versuchskörpern						
Versuchsanzahl je VK	---	---	2	2	2	2
Versuchsstützweite	$a$	[cm]	225	225	275	275
Lage der Lasteinleitung	---	[cm]	100/125	100/125	125/150	125/150
Schubschlankheit	$a/d$	---	3,48	3,48	3,23	3,23

## Materialparameter

### Materialparameter der verwendeten Betone

Sowohl für die Versuchskörper aus Normalbeton als auch für diejenigen aus Recyclingbeton wurde eine Festigkeitsklasse von C25/30 (R) angestrebt, wobei runde Gesteinskörnung mit einem Größtkorndurchmesser von  $d_G = 16$  mm verwendet wurde. Beide Betone wurden als Transportbeton hergestellt und am Tag der Betonage zum Ort der Herstellung geliefert, ihre Zusammensetzungen sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 6: Zusammensetzung Normalbeton

Kenndaten Normalbeton					
Betonzusammensetzung	Gesteinskörnung	Sand 0/2	687 kg/m <sup>3</sup>	Anteil an GK	38%
		Splitt 2/8	318 kg/m <sup>3</sup>		17%
		Splitt 8/16	838 kg/m <sup>3</sup>		45%
	Zement	CEM II / A-LL 42,5 R	275 kg/m <sup>3</sup>		
	Gesamtwassergehalt	Trinkwasser	178 kg/m <sup>3</sup>		
	Zusatzstoffgehalt	SFA	70 kg		
Wasserzementwert	$(w/z)_{qe}$	0,59			
Expositionsklasse	---	XC4 / XF1 / XA 1			
angestrebte Betonfestigkeitsklasse	---	C25/30			
angestrebte Konsistenzklasse	---	F3			

Tabelle 7: Zusammensetzung Recyclingbeton

Kenndaten Recyclingbetons					
Betonzusammensetzung	Gesteinskörnung	Sand 0/2	688 kg/m <sup>3</sup>	Anteil an GK	38%
		Splitt 2/8	318 kg/m <sup>3</sup>		17%
		RC-GK Typ 1	740 kg/m <sup>3</sup>		45%
	Zement	CEM II / A-LL 42,5 R	280 kg/m <sup>3</sup>		
	Gesamtwassergehalt	Trinkwasser	179 kg/m <sup>3</sup>		
	Zusatzstoffgehalt	SFA	60 kg		
Wassermenge	(w/z) <sub>qe</sub>	0,59			
Expositionsklasse	---	XC4 / XF1 / XA 1			
angestrebte Betonfestigkeitsklasse	---	C25/30			
angestrebte Konsistenzklasse	---	F3			

Zur Überprüfung der Materialkennwerte unmittelbar vor Durchführung der Querkraftversuche wurden zu jedem Versuchskörper 6 Würfel- und 6 Zylinderproben (und somit 3 Würfel- und Zylinderproben für jeden Querkraftversuch) hergestellt. Tabelle 8 zeigt die Zahl und die Art der in Summe durchgeführten Begleitversuche sowie die zugehörigen Probekörper.

Tabelle 8: Art und Anzahl der Festbetonprüfungen gemäß DIN EN 12390-3

Prüfung	Art der Probekörper	Anzahl	Betonart
Druckfestigkeit (DIN EN 12390-3)	Würfel $a = 150 \text{ mm}$	$3 \times 4 = 12$	Normalbeton
Druckfestigkeit (DIN EN 12390-3)	Würfel $a = 150 \text{ mm}$	$3 \times 4 = 12$	RC-Beton
Spaltzugfestigkeit (DIN EN 12390-6)	Zylinder $d = 150 \text{ mm}, l = 300 \text{ mm}$	$3 \times 4 = 12$	Normalbeton
Spaltzugfestigkeit (DIN EN 12390-6)	Zylinder $d = 150 \text{ mm}, l = 300 \text{ mm}$	$3 \times 4 = 12$	RC-Beton
Elastizitätsmodul (DIN EN 12390-13)	Zylinder $d = 150 \text{ mm}, l = 300 \text{ mm}$	$3 \times 4 = 12$	Normalbeton
Elastizitätsmodul (DIN EN 12390-13)	Zylinder $d = 150 \text{ mm}, l = 300 \text{ mm}$	$3 \times 4 = 12$	RC-Beton

Zusätzlich wurde die am Tag der Betonage vorliegende Frischbetonkonsistenz gemäß DIN EN 12350-5 (2019) ermittelt und dokumentiert.

### Materialparameter der verwendeten Bewehrung

Für die Längsbewehrung der Versuchskörper wurde Ankerstabstahl St 900/1100 gemäß (Zulassung Z-12.5-96 2010) verwendet. Der Durchmesser der Bewehrungsstäbe betrug  $\varnothing_{s,l} = 15 \text{ mm}$ . In den Versuchskörpern mit Hohlkörpern vom Typ XS-A 30 wurden je 8 Bewehrungsstäbe, in den Versuchskörpern mit Hohlkörpern vom Typ XS-A 130 jeweils 11

Stäbe verbaut. Hieraus ergaben sich Stababstände von  $s_1 = 7,5 \text{ cm}$  (XS-A30) und  $s_1 = 5,5 \text{ cm}$  (XS-A 130).

Die Betondeckung der Längsbewehrung wurde entsprechend den Anforderungen gemäß (DIN EN 1992-1-1/NA 2013) für die Expositionsklasse XC1 festgelegt.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 15 + 10 = 25 \text{ mm}$$

Die Verwendung des höherwertigen Ankerstabstahls führte gegenüber einer Bewehrung aus Betonstahl B500 mit gleicher Tragfähigkeit zu höheren Längsdehnungen und zu vergleichsweise geringeren Verdübelungswirkungen. Bezüglich der Querkrafttragfähigkeiten der Versuchskörper ergaben sich somit Werte, die als konservativ anzusehen sind.

Als obere Bewehrung wurde Mattenstahl (Q188B) verwendet. Um die Bewehrung in Position zu halten, wurden Abstandhalter zwischen der unteren Längsbewehrung und dem Mattenstahl eingebaut. Diese wurden an Stellen angeordnet, an denen sie keinen Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit der Platte hatten.

Tabelle 9 fasst die wichtigsten Daten bezüglich der Bewehrung der Versuchskörper zusammen.

**Tabelle 9: Bewehrung der Versuchskörper**

Bewehrungsdaten								
Versuchs- bezeichnung	Bewehrung [-]			d [mm]	$C_{nom}$ [mm]	$A_{sl}$ [cm <sup>2</sup> ]	$\rho_l$ [%]	$f_{yk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	Unten längs	Unten quer	Oben					
XS-A30	8Ø15	16Ø8	Q188B	28,75	25	14,1	0,01	1100
XS-A130	11Ø15	22Ø8	Q188B	38,75	25	19,4	0,02	1100

### Herstellung der Versuchskörper

Die Probekörper wurden im Betonfertigteilterwerk der Firma bwb in Hamm/Westfalen hergestellt. Abbildung 22 (links) zeigt die dabei verwendeten Hohlkörper XS-A30 und XS-A130. Jeweils zwei Hohlkörper, einer mit der Spitze nach oben und der andere mit der Spitze nach unten angeordnet, wurden mit Hilfe von zwei Bewehrungsstäben  $\varnothing=6 \text{ mm}$ , von denen einer oberhalb der Hohlkörper und einer unterhalb der Hohlkörper angeordnet wurde, miteinander zu Modulen verbunden (vgl. Abbildung 22 (rechts)).

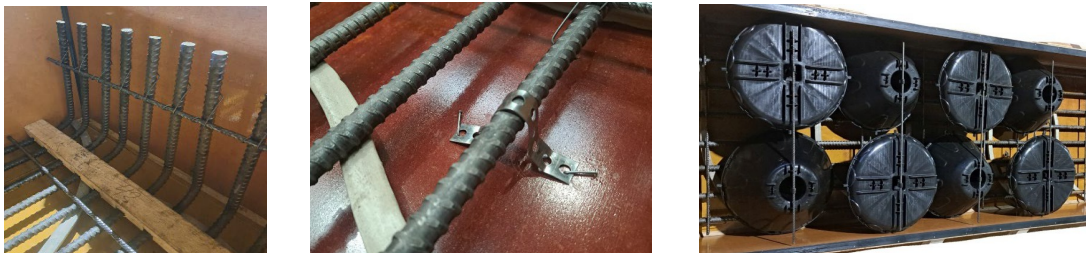


**Abbildung 22: Hohlkörper XS-A30 und XS-A130 (l) und zwei zu einem Modul verbundene Hohlkörper (r)**

Der obere und der untere Bewehrungsstab jedes Moduls wurden dabei durch die in den Hohlkörpern integrierten „Tunnel“ mit Hilfe von Plastikhaken verbunden, wodurch die

Hohlkörper zwischen den beiden Bewehrungsstäben  $\text{Ø}=6$  mm „eingeklemmt“ und somit fest miteinander verbunden waren.

In die vorgefertigten Schalungen wurden anschließend die Längseisen in den jeweiligen Stabachsabständen verlegt und mittels Windrispenbändern an der Schalung befestigt. Hiermit wurde ein durch den Auftrieb der Hohlkörper bedingtes Aufschwimmen der Längsbewehrung und der mit ihr verbundenen Hohlkörper verhindert. Anschließend wurde die Querbewehrung auf der Längsbewehrung verlegt und mittels Draht mit ihr verbunden. Im nächsten Schritt wurden die vier (XS-A 30) bzw. fünf (XS-A 130) Hohlkörpermodule im Achsabstand von 33 cm eingebaut und mit der Längsbewehrung verbunden. Abbildung 23 zeigt die Bewehrung sowie die Hohlkörpermodule im Einbauzustand in der Schalung.



**Abbildung 23: Einbau und Befestigung der Bewehrung (links) und Anordnung der Hohlkörpermodule (rechts) in der Schalung**

Nach dem Einbau der Hohlkörpermodule wurde die obere Bewehrungsmatte Q188B eingebaut und mit Bindedraht mit der unteren Längsbewehrung verbunden.

Am Tag der Betonage wurden zunächst die beiden Platten aus Normalbeton hergestellt. Aufgrund der unplanmäßig flüssigen Konsistenz des Betons kam es beim Einbringen und Verdichten des Betons zu einem geringfügigen Aufschwimmen der Hohlkörper (s. Abbildung 24 (links)). Durch das unmittelbare Aufbringen von Abstandhaltern und Gewichten (s. Abbildung 24 (Mitte)) konnte die planmäßige Betondeckung dennoch annähernd hergestellt werden. Um eine ähnliche Problematik bei den aus Recyclingbeton hergestellten Versuchskörpern XS-A30-R und XS-A130-R zu vermeiden, wurden auf die oberen Bewehrungsmatten im Bereich der Hohlkörper Abstandhalter gelegt und in Querrichtung Kanthölzer angeordnet, die an der Schalung mit Windrispenbändern befestigt wurden (s. Abbildung 24 (rechts)).



**Abbildung 24: Aufschwimmen der Hohlkörper XS-A 30/130 Normalbeton (links); Beschwerung zur Herstellung der planmäßigen Lage der Hohlkörper und Betondeckung über Hohlkörper (mittig) und Konstruktion für die Probekörper XS-A30-R und XS-A130-R, um ein Aufschwimmen der Hohlkörper zu verhindern.**

Der ebenfalls als Transportbeton gelieferte Recyclingbeton wies jedoch eine steife Frischbetonkonsistenz auf, sodass die Problematik des Aufschwimmens der Hohlkörper und

des Bewehrungskorbs auch ohne die zusätzlich ergriffenen Maßnahmen vermutlich nicht aufgetreten wäre.

Die Probekörper wurden drei Tage nach der Betonage ausgeschalt. Anschließend wurden die Stahlbetonplattenstreifen bis zur Prüfung trocken gelagert.

Da die Oberflächen der Probekörper nach der Erhärtung des Betons Unebenheiten aufwiesen, wurde an den Stellen der Lasteinleitung jeweils eine zusätzliche dünne Mörtelschicht aufgetragen, um eine gleichmäßige Einleitung der Last im Versuch zu ermöglichen.

## AP-05 Bauteilversuche

Die Prüfung der Versuchskörper erfolgte im Labor für Baustoffe und Konstruktiven Ingenieurbau der Hochschule Bochum. Hierfür wurden die Versuchskörper zur Hochschule Bochum transportiert und anschließend bis zum Tag der Versuchsdurchführung trocken gelagert. Das Alter der Versuchskörper betrug am jeweiligen Versuchstag 8 bzw. 9 Tage.

### Bestimmung der rechnerischen Querkrafttragfähigkeit und Lastschritte

In den Versuchen wurde die Belastung zunächst in 10 Zyklen kraftgesteuert bis zu einem Niveau, das näherungsweise der Belastung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit entspricht, erhöht und reduziert. Im Anschluss daran wurde die Last gleichmäßig bis zum jeweiligen Querkraftversagen gesteigert. Die in den Lastzyklen verwendete Maximallast wurde so ermittelt, dass sich durch sie eine Querkraft  $V_{GZG}$  gemäß Gleichung 1 ergab.

$V_{GZG} = 1,3 \cdot \frac{V_{Rm,c}}{\gamma_C \cdot \gamma_F}$		(1)
Dabei ist:		
$V_{Rm,c}$ :	die mittlere Querkrafttragfähigkeit nicht querkraftbewehrter Stahlbetonbauteile nach Gleichung 5.2 in [N/mm <sup>2</sup> ]	
$\gamma_C$	= 1,5	
$\gamma_F$	= $\frac{1,35+1,5}{2} = 1,425$	

Gemäß DIN EN 1992-1-1 (2011, S. 90) ergibt sich die mittlere Querkrafttragfähigkeit von nicht querkraftbewehrten Stahlbetonbauteilen, für Bauteile ohne Normalspannungen mittels Gleichung 2.

$V_{Rm,c} = 0,2 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm,cyl,dry})^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d$		(2)
Dabei ist:		
$k$	= $1 + \sqrt{\frac{200}{d [mm]}} \leq 2,0 [-]$ Maßstabsfaktor	
$\rho_l$	= $\frac{A_{sl}}{b \cdot d} \leq 0,02 [-]$ Längsbewehrungsgrad	
$f_{cm,cyl,dry}$ :	gewichtetes Mittel der Zylinderdruckfestigkeiten	
$b$ :	die kleinste Querschnittsbreite	
$d$ :	die statische Nutzhöhe	
$A_{sl}$ :	Querschnittsfläche der Längsbewehrung	

Zusätzlich wurde ein Abminderungsfaktor  $f_v = 0,5$  verwendet, um die Reduktion der Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rm,c}$  durch die eingelegten Hohlkörper zu berücksichtigen.

## **Versuchsdurchführung**

### **Versuchsaufbau**

Die Versuchskörper wurden auf zwei verdrehbaren Rolllagern aufgelagert. Zwischen den Auflagern und der jeweiligen Versuchsplatte wurden zusätzlich Stahlplatten mit Elastomerschichten eingelegt.

Die Belastung der Versuchskörper erfolgte mittels eines servohydraulischen Prüfzylinders mit einer maximalen Prüfkraft von 3000 kN. Die Prüflast wurde über eine gelenkig aufgehängte Traverse und eine daran ebenfalls gelenkig angebrachte Biegefinne eingeleitet, sodass eine gleichmäßige Krafteinwirkung über die gesamte Breite der jeweiligen Versuchsplatte gewährleistet war. Um Unebenheiten auf der Betonoberfläche der Probekörper auszugleichen, wurde zwischen der Betonoberfläche und dem Träger zusätzlich zu der bereits erwähnten Mörtelschicht ein Elastomerstreifen angeordnet.

### **Eingesetzte Messtechnik**

Zur Durchführung der Untersuchungen wurden verschiedene Messsysteme eingesetzt, um sowohl die Verformungen und erkennbaren Risse des Bauteils als auch die innere Rissentwicklung präzise erfassen zu können.

### **Induktive Wegaufnehmer und manuelle Rissaufnahme**

Es wurden jeweils 3 Wegaufnehmer (WA1-3) mittig an der Unterseite des Bauteils angebracht, die während der Versuche kontinuierlich die Verformungen der Bauteile erfassten. Dabei befand sich der Wegaufnehmer WA2 bei allen Versuchen direkt unterhalb der Lasteinleitung, während die Wegaufnehmer WA1 und WA3 jeweils mittig zwischen Lasteinleitung und den Auflagern angeordnet wurden. Um eine gleichmäßige Oberfläche für die Wegaufnehmer zu gewährleisten, wurden Objektträger an der jeweiligen Versuchsplatte befestigt.

Entstehende Risse wurden auf einer Seite der Versuchskörper gekennzeichnet. Hierbei wurden nach Abschluss der 10 zu Beginn eines jeden Versuchs aufgebrachten Lastzyklen sowie nach jedem im Anschluss aufgebrachten Lastschritt Risse inklusive ihrer jeweiligen Breite am Bauteil angezeichnet.

### **Digitale Bildkorrelation – GOM**

Während auf einer Seite der Versuchskörper die Rissentwicklung manuell angezeichnet wurde, wurde sie auf der gegenüberliegenden Seite mithilfe eines GOM-Messsystems mit digitaler Bildkorrelation erfasst. Diese Technologie ermöglicht die Erfassung bereits sehr geringer Dehnungen auf der Oberfläche eines Versuchskörpers und stellt somit eine ideale Ergänzung zur manuellen Rissaufnahme dar.

### **Schallemissionsmessungen**

Die Schallemissionsanalyse (Acoustic Emission – AE) ist ein Verfahren in der Überwachung von Bauwerksstrukturen (Structural Health Monitoring, SHM) und in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) von Bauteilen. Sie basiert auf der Erfassung hochfrequenter elastischer Wellen, die durch plötzliche Energieentladungen im Bauteil entstehen – etwa bei der Entstehung von Rissen.

Im Rahmen der Bauteilversuche wurden zur Erprobung des Verfahrens und zur Validierung der Ergebnisse Schallemissionsmessungen durchgeführt.

Auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse der Messungen mittels der digitalen Bildkorrelation sowie der Schallemissionsmessungen wird an dieser Stelle verzichtet.

### Versuchsablauf

Wie beschrieben wurden zu Beginn eines jeden Versuchs 10 Lastzyklen aufgebracht, bei denen die Kraft des Prüfzylinders abwechselnd auf das jeweils zuvor ermittelte Lastniveau gesteigert und anschließend auf eine Last von 5 kN reduziert wurde. Nach Durchführung der 10 Lastzyklen wurden die entstandenen Risse am jeweiligen Versuchskörper in schwarzer Farbe angezeichnet.

Im Anschluss erfolgte eine stufenweise Belastung der Versuchskörper bis zu ihrem Versagen. Die stufenweise Belastung der Probekörper erfolgte dabei mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/s. Nach Erreichen jeder Laststufe wurden die neu entstandenen Risse in roter Farbe am Bauteil gekennzeichnet.

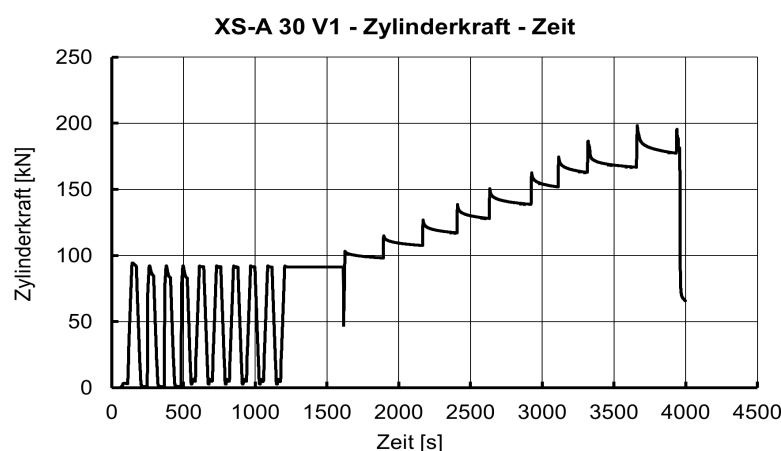


Abbildung 25: exemplarisches Zylinderkraft-Zeit-Diagramm des Versuchs XS-A30 V1

Abbildung 25 zeigt repräsentativ für alle Versuche das Zylinderkraft-Zeit-Diagramm des Versuchs XS-A30 V1.

### Versuchsauswertung

In den Versuchen mit den Bezeichnungen XS-A30-R (RC-Beton) und XS-A30 (Normalbeton) trat das Querkraftversagen jeweils auf einem ähnlich hohen Lastniveau von ca. 190 kN ein. Aufgrund der vorab gemessenen höheren Druckfestigkeit des RC-Betons im Vergleich zum Normalbeton wäre jedoch eine höhere Querkrafttragfähigkeit der Platten aus RC-Beton zu erwarten gewesen. Somit ergaben sich für die Platten aus RC-Beton ungünstigere Verhältniswerte bezogen auf die rechnerische Querkrafttragfähigkeit einer nicht-querkraftbewehrten Massivplatte aus Normalbeton.

Bei den Versuchen XS-A130-(R) trat das Versagen der Bauteile aus RC-Beton auf einem deutlich niedrigeren Lastniveau als bei den Versuchskörpern aus Normalbeton ein. Die Verhältniswerte bezogen auf die rechnerische Querkrafttragfähigkeit einer nicht-querkraftbewehrten Massivplatte aus Normalbeton entsprachen auch in diesen Versuchen mit guter Übereinstimmung denen der Versuche XS-A30-R (RC-Beton) und XS-A30 (Normalbeton). Die deutlich ungünstigeren Verhältniswerte von Platten aus RC-Beton als von Platten aus Normalbeton wurden somit bestätigt.

Tabelle 10 gibt die Ergebnisse der Versuche sowie die daraus ermittelten Verhältniswerte der Querkrafttragfähigkeiten wieder.

Tabelle 10: Übersicht der Querkrafttragfähigkeiten der Hohlkörper XS-A

Übersicht der Querkrafttragfähigkeit						
		Bruchlast	Querkraftanteil	Querkrafttragfähigkeit (Versuch)	rech. Querkrafttragfähigkeit (Massivdecke)	Faktor zu $V_{Rm,c}$
		[kN]	[-]	$V_u$ [kN]	$V_{Rm,c}$ [kN]	$V_u / V_{Rm,c}$
XS-A 30	V1	198,39	0,556	110,30	169,01	65,27%
	V2	184,32		102,48		60,64%
XS-A 30-R	V1	178,24		99,10	185,80	53,34%
	V2	191,42		106,43		57,28%
XS-130	V1	263,96	0,545	143,86	221,19	65,04%
	V2	263,13		143,41		64,83%
XS-130-R	V1	225,73		123,02	236,25	52,07%
	V2	231,08		125,94		53,31%

Die Versuchsergebnisse aller Versuche sind in Tabelle 11 und Tabelle 12 nach Versuchskörpern gegliedert aufgelistet.

Tabelle 11: Übersicht Versuchsergebnisse XS-A30-(R)

Information	Bez.	Einheit	XS-A 30		XS-A 30-R		
			XS-A 30 V1	XS-A 30 V2	XS-A 30-R V1	XS-A 30-R V2	
Daten	Betonagedatum	---	---	10.12.2024	10.12.2024	10.12.2024	10.12.2024
	Betoncharge-Nr.	---	---	303 355 718 0	303 355 718 0	303 358 718 0	303 358 718 0
	Datum Versuchsdurchführung	---	---	18.12.2024	18.12.2024	18.12.2024	19.12.2024
	Betonalter am Versuchstag	---	[d]	8	8	8	9
Betoneigenschaften	Ausbreitmaß	$f$	[mm]	620		400	
	Konsistenzklasse	---	---	F5		F2	
	Festbetonrohddichte (gemittelt)	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2352		2300	2293
	Würfeldruckfestigkeit Mittelwert aus 3 Proben (geprüft)	$f_{cm,cube,dry}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	23,62	24,27	31,72	32,37
	Zylinderdruckfestigkeit (berechnet)	$f_{cm,cyl,dry}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	18,95	19,48	25,5	26,1
	Zylinderdruckfestigkeit (Mittel)	$f_{cm,cyl,dry,mean}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	19,2		--	--
	Spaltzugfestigkeit (geprüft)	$f_{ctm,sp}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,22		2,55	2,51
	Zentrische Zugfestigkeit (0,9 $f_{ctm,sp}$ )	$f_{ctm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,00		2,30	2,26
	Elastizitätsmodul (gemittelt)	$E_{cm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	29002		28579	28118
Versuchsergebnisse	Zylinderkraft im GZG	$F_{GZG}$	[kN]	92,51		101,7	101,7
	Laststeigerung je Laststufe	$\Delta F$	[kN]	12		13	13
	Zylinderkraft im Bruchzustand	$F_u$	[kN]	198,39	184,32	178,24	191,42
	Querkraftfaktor	---	---	0,556		0,556	
	Querkraft im Bruchzustand	$V_u$	[kN]	110,30	102,48	99,10	106,43
	rechnerische Querkrafttragfähigkeit	$V_{Rm,c}$	[kN]	169,01		185,80	
	Faktor zu $V_{Rm,c}$	$V_u / V_{Rm,c}$	---	65,27%	60,64%	53,34%	57,28%

Tabelle 12: Übersicht Versuchsergebnisse XS-A130-(R)

Übersicht der Querkrafttragfähigkeit							
				XS-A 130		XS-A 130-R	
Information		Bez.	Einheit	XS-A 130 V1	XS-A 130 V2	XS-A 130-R V1	XS-A 130-R V2
Daten	Betonagedatum	---	---	10.12.2024	10.12.2024	10.12.2024	10.12.2024
	Betoncharge-Nr.	---	---	303 355 718 0	303 355 718 0	303 358 718 0	303 358 718 0
	Datum Versuchsdurchführung	---	---	19.12.2024	19.12.2024	19.12.2024	19.12.2024
	Betonalter am Versuchstag	---	[d]	9	9	9	9
Betoneigenschaften	Ausbreitmaß	$f$	[mm]	620		400	
	Konsistenzklasse	---	---	F5		F2	
	Festbetonrohichte (gemittelt)	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2352		2293	
	Würfeldruckfestigkeit Mittelwert aus 3 Proben (geprüft)	$f_{cm,cube,dry}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	25,92	26,29	31,95	31,54
	Zylinderdruckfestigkeit (berechnet)	$f_{cm,cyl,dry}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	20,81	21,12	25,71	25,38
	Zylinderdruckfestigkeit (Mittel)	$f_{cm,cyl,dry,mean}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	21,0		25,5	
	Spaltzugfestigkeit (geprüft)	$f_{ctm,sp}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,05		2,21	
	Zentrische Zugfestigkeit (0,9 · $f_{ctm,sp}$ )	$f_{ctm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,85		1,989	
	Elastizitätsmodul (gemittelt)	$E_{cm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	30234		28348	
Versuchsergebnisse	Zylinderkraft im GZG	$F_{GZG}$	[kN]	123,31		131,71	
	Laststeigerung je Laststufe	$\Delta F$	[kN]	16		17	
	Zylinderkraft im Bruchzustand	$F_u$	[kN]	263,96	263,13	225,73	231,08
	Querkraftfaktor	---	---	0,545		0,545	
	Querkraft im Bruchzustand	$V_u$	[kN]	143,86	143,41	123,02	125,94
	rechnerische Querkrafttragfähigkeit	$V_{Rm,c}$	[kN]	221,19		236,25	
	Faktor zu $V_{Rm,c}$	$V_u / V_{Rm,c}$	---	65,04%	64,83%	52,07%	53,31%

Eine der möglichen Erklärungen für die im Verhältnis geringeren Querkrafttragfähigkeiten von Hohlkörper-Platten aus RC-Beton gegenüber Hohlkörper-Platten aus Normalbeton lag in der sehr steifen Konsistenz des RC-Betons und etwaiger daraus resultierender Fehlstellen im Beton. Zur Klärung dieser Frage wurden in Längsrichtung jeweils zwei Sägeschnitte durch die Versuchskörper XS-A 130 und XS-A 130 R geführt, welche die Versuchskörper in zwei 16,5 cm und einen 33 cm breiten Plattenstreifen unterteilen.

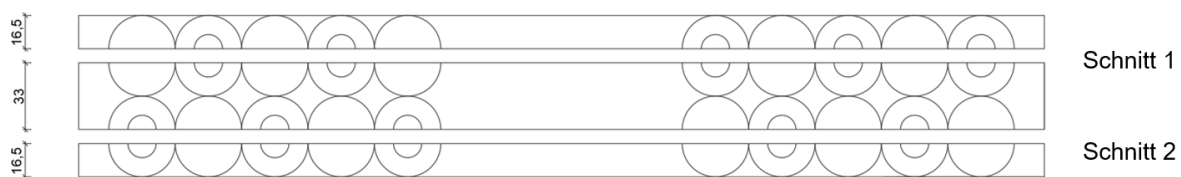


Abbildung 26: Sägeschnitte in Längsrichtung der Platten

In den nachfolgenden Abbildungen sind für die Versuche V1 und V2 des jeweiligen Versuchskörpers die Rissverläufe an der Vorderseite, im Schnitt 1 und 2 sowie an der Rückseite dokumentiert. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden einzelne Aufnahmen gespiegelt, sodass eine einheitliche Betrachtungsrichtung entsteht – sinnbildlich „von vorne durch das Bauteil hindurch“.

**XS-A 130 V1**



Vorderseite  
y = 0

Schnitt 1  
y = 16.5 cm

Schnitt 2  
y = 49.5 cm

Rückseite  
y = 66 cm

**Abbildung 27: Rissverlauf an Außenflächen sowie an Schnittflächen, XS-A 130 V1**

**XS-A 130 V2**



Vorderseite  
y = 0

Schnitt 1  
y = 16.5 cm

Schnitt 2  
y = 49.5 cm

Rückseite  
y = 66 cm

Abbildung 28: Rissverlauf an Außenflächen sowie an Schnittflächen, XS-A 130 V2

**XS-A 130 R V1**



Vorderseite  
y = 0

Schnitt 1  
y = 16.5 cm

Schnitt 2  
y = 49.5 cm

Rückseite  
y = 66 cm

Abbildung 29: Rissverlauf an Außenflächen sowie an Schnittflächen, XS-A 130 R V1

**XS-A 130 R V2**

Vorderseite  
 $y = 0$

Schnitt 1  
 $y = 16.5 \text{ cm}$

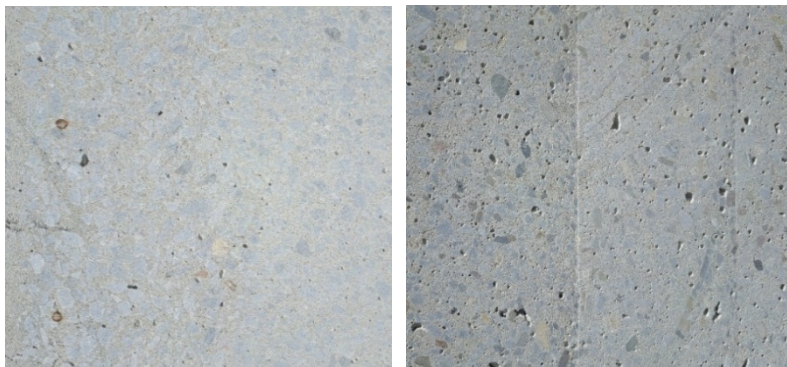
Schnitt 2  
 $y = 49.5 \text{ cm}$

Rückseite  
 $y = 66 \text{ cm}$

**Abbildung 30: Rissverlauf an Außenseiten & an Schnittflächen XS-A 130 R – V2**

In Abbildung 27 bis Abbildung 30 ist zu erkennen, dass sowohl in den Versuchskörpern aus Normalbeton als auch in denen aus RC-Beton die Hohlkörper gegenüber ihrer planmäßigen Lage geringfügig verschoben sind. Zu erkennen ist sowohl eine geringfügige seitliche Verschiebung als auch eine Verschiebung nach oben durch das Aufschwimmen der Hohlkörpermodule und der Bewehrung. Vereinzelt ist ein Eintrag von Zementsuspension in die Hohlkörper zu erkennen. In dem Versuchskörper XS-A 130 V2 wies der zweite Hohlkörper von links eine erkennbare Deformation auf.

Bei dem Versuchskörper aus Recyclingbeton konnten trotz der bei der Betonage vorliegenden deutlich steiferen Frischbetonkonsistenz keine größeren Luftporen festgestellt werden. Allerdings waren im Vergleich zu dem Versuchskörper aus Normalbeton insbesondere im Bereich der Längsbewehrung größere Luftporen zu erkennen. (Abbildung 31).



**Abbildung 31: Porenstruktur im Versuchskörper XS-A 130 aus Normalbeton (links) und im Versuchskörper aus Recyclingbeton XS-A 130 R (rechts)**

In dokumentierten Forschungsarbeiten zur Querkrafttragfähigkeit von Platten aus Recyclingbeton wurde bereits festgestellt, dass durch die Verwendung von Recyclingbeton die

Querkrafttragfähigkeit gegenüber Platten aus Normalbeton reduziert ist. Für Bauteile aus RC-Beton wird deshalb in der Neufassung des EC2 im Anhang N ein Anpassungsfaktor  $\eta_{\tau}$  angegeben, der abhängig vom vorhandenen Substitutionsanteil der rezyklierten Gesteinskörnung eine Abminderung der Querkrafttragfähigkeit bewirkt. Berücksichtigt man diesen Anpassungsfaktor bei der Berechnung der Querkrafttragfähigkeit einer Massivplatte aus RC-Beton, so ergeben sich in den Bauteilversuchen für die Versuchskörper aus RC-Beton Verhältniswerte der Querkrafttragfähigkeit von 57-63%. Auch wenn die Ergebnisse nun recht nah bei den Ergebnisse für die Platten aus Neubeton liegen, ist erkennbar, dass auch bei Verwendung des pauschalen Faktors gemäß EC2 die Abminderung der Querkrafttragfähigkeit der Hohlkörperplatten aus RC-Beton nicht zutreffend erfasst wird. Für eine umfassendere Bewertung der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonplatten mit integrierten Hohlkörpern aus RC-Beton wird daher die Durchführung weiterer Bauteilversuche vorgeschlagen. Dabei könnten sowohl unterschiedliche Substitutionsraten der Gesteinskörnung als auch variierende Mischungsverhältnisse der Grob- und Feianteile der rezyklierten Gesteinskörnung untersucht werden.

#### **AP-06 Untersuchung der Rezyklierfähigkeit der Versuchskörper**

Abschließend sollte im Rahmen von AP-06 die Rezyklierfähigkeit der neuartigen Hohlkörperdecken untersucht werden. Rezyklierte Gesteinskörnungen werden gemäß DIN 4226-101:2017 in die Typen 1 bis 4 unterteilt, wobei die Typen 1 und 2 für Beton nach DIN 1045-2:2023 verwendet werden können. Die Typisierung erfolgt auf Grundlage der stofflichen Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung. Im Rahmen der Untersuchungen sollte festgestellt werden, ob der beim Rückbau der neuartigen Hohlkörperdecken anfallende Kunststoff der Hohlkörper mit den etablierten Aufbereitungstechniken in dem Maße vom Beton separiert werden kann, dass die Anforderungen entsprechend der stofflichen Zusammensetzung zur Wiederverwendung des Abbruchs als recycelte Gesteinskörnung vom Typ 1 oder 2 eingehalten werden.

Hierfür wurden die Versuchskörper XS-A-130 und XS-A-30 beim Recyclingunternehmen REMEX Bochum GmbH aufbereitet. Zunächst wurden die Versuchskörper manuell mithilfe einer Abbruchschere vorgebrochen, um die maximal zulässige Bruchstückgröße von 60 cm für die Aufbereitungsanlage sicherzustellen (vgl. Abbildung 32 links). Anschließend wurden die Bruchstücke in die Aufbereitungsanlage gegeben und mit Hilfe eines Schleuderbrechers, verschiedener Siebstationen, eines Magnetabscheiders für Bewehrung, eines Windsichters zum Abtrennen leichterer Bestandteile sowie durch eine manuelle Fließbandsortierung zur einer Kornzusammensetzung von 0/45 aufbereitet.



**Abbildung 32: Mittels Abbruchschere vorgebrochene Versuchskörper (links) und Brechanlage mit eingefülltem Abbruchmaterial (rechts)**

Abbildung 32 links zeigt das in den Brecher einzufüllende Grundmaterial. Es ist zu erkennen, dass zu diesem Zeitpunkt große Kunststoffteile im Material enthalten waren.

Der Aufbereitungsprozess wurde kontinuierlich per Video an den entscheidenden Bearbeitungsschritten der Anlage überwacht (vgl. Abbildung 32, rechts).



**Abbildung 33: Reduktion der Kunststoffanteile bei drei aufeinander folgenden Durchgängen durch den Aufbereitungsprozess der Brechanlage**

Abbildung 33 veranschaulicht die kontinuierliche Reduktion des Kunststoffanteils sowie die fortschreitende Zerkleinerung des Materials über drei aufeinanderfolgende Durchläufe des Aufbereitungsprozesses.

Zur Bestimmung des verbleibenden Kunststoffanteils im Recyclingmaterial wurde aus der aufbereiteten rezyklierten Gesteinskörnung des Korngemischs 0/45 eine Probe mit einer Masse von 39 kg in der Aufbereitungsanlage entnommen (vgl. Abbildung 34). Die anschließende Analyse der stofflichen Zusammensetzung gemäß DIN EN 933-11:2011-05 wurde im Labor für Baustoffe und Konstruktiven Ingenieurbau der Hochschule Bochum durchgeführt.



**Abbildung 34: Hergestellte rezyklierte Gesteinskörnung des Korngemischs 0/45 (links) und entnommene Proben zur weiteren Untersuchung (rechts)**

Die ermittelten Anteile der Bestandteile wurden anschließend gemäß DIN EN 12620:2002 klassifiziert und mit den Grenzwerten für rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 1 und 2 nach DIN 4226-101:2017 verglichen. Für die Beurteilung der Rezyklierbarkeit waren in erster Linie die Bestandteile, welche Kunststoff beinhalten – also schwimmende Materiale (FL) sowie die Summe aus den Anteilen sonstiger Materialien (X) und Glas (Rg) – relevant.

Bei der Klassifizierung von Gesteinskörnung vom Typ 1 und Typ 2 wird der Anteil FL in Kubikzentimeter pro Kilogramm der Messprobe bestimmt. Der Grenzwert liegt bei  $2,0 \text{ cm}^3/\text{kg}$ . Der Anteil der Summe aus X und Rg wird in Massenprozent bezogen auf die Grundmasse der Messprobe ermittelt. Der Grenzwert liegt für Typ 1 GK bei 1,0 M-% und für Typ 2 GK bei 2,0 M-%.

Im Labor wurde die entnommene Probe zunächst bei  $40 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$  bis zur Massenkonstanz im Trockenschrank getrocknet. Anschließend erfolgte die Wägung der trockenen Probe ( $M_0$ ) sowie deren vollständige Siebung mit einem Analysensieb der Lochweite 4 mm. Die Masse der durch das 4-mm-Sieb hindurchgegangenen Fraktion ( $M_4$ ) wurde ermittelt und dokumentiert. Die Fraktion wurde anschließend verworfen. Die auf dem 4-mm-Sieb zurückgehaltene Kornfraktion bildete die Messprobe, an der die Analyse der stofflichen Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung durchgeführt wurde. Die Masse dieser Messprobe ( $M_1$ ) wurde ebenfalls bestimmt und dokumentiert.

Anschließend wurden Ton und Boden aus der Messprobe entfernt und deren Masse ( $M_{cs}$ ) bestimmt. Danach wurde der Rest der Messprobe für maximal eine Minute in Wasser eingetaucht, um schwimmende Partikel zu separieren. Das Volumen der schwimmenden Partikel ( $V_{FL}$ ) wurde anschließend mithilfe eines skalierten Messzylinders (Messgenauigkeit:  $5 \text{ cm}^3$ ) und eines Tauchkolbens bestimmt (vgl. Abbildung 35).



**Abbildung 35: Separation der schwimmenden Kunststoffteile von der Messprobe (links) und Ermittlung des Volumens mittels Messzylinder und Tauchkolben.**

Nach Separation der schwimmenden Partikel wurden nicht schwimmenden Körner aufgefangen und bis zur Massenkonstanz getrocknet. Anschließend wurden dieser Körner auf einer ebenen Fläche ausgebreitet und visuell von Hand in die einzelnen Bestandteile sortiert und gewogen (vgl. Abbildung 36).

Mittels der Massen der einzelnen Bestandteile konnten anschließend die jeweiligen Anteile ermittelt und die Messprobe kategorisiert werden. Alle relevanten Angaben hierzu sind in Tabelle 13 dargestellt.



Abbildung 36: Getrocknete und sortierte Bestandteile der Messprobe

Tabelle 13: Bestandteile der Messprobe und deren Anteile

	Bez.	Einheit	Masse							
Trockene Probe	$M_0$	[g]	37.452,5							
Siebdurchgang 4 mm	$M_4$	[g]	4.103,0							
Messprobe	$M_1$	[g]	33.349,5							
Ton und Boden	$M_{cs}$	[g]	29,9							
Information	Bez.	Einheit	Ermittlung Bestandteile							
			Rc	Ru	Rb	Ra	Rg	X	FL (HK)	FL
Masse	$M$	[g]	30.154,1	1.932,8	703,9	155,8	2,0	50,2	12,2	16,9
Volumen	$V$	[cm <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	-	-	15	20
Massenanteile	$P_M$	[M-%]	90	5,8	2,1	0,5	0,0	0,2	-	-
Anteile schwimmender Partikel	$P_V$	[cm <sup>3</sup> /kg]	-	-	-	-	-	-	0,37	0,51
Verlust	$P_L$	[M-%]	1,0							
Gesteinsart	Kategorisierung									
	Rc + Ru		Rb	X + Rg		Ra		FL		
	[M-%]		[M-%]	[M-%]		[M-%]		[cm <sup>3</sup> /kg]		
Proben GK	96		2,1	0,2		0,5		0,51		
Typ 1 GK	≥ 90		≤ 10	≤ 1		≤ 1		≤ 2		

Die Ergebnisse der Untersuchungen belegen, dass der Kunststoff der Hohlkörper beim Rückbau der Platten weitgehend entfernt werden kann. Das gewonnene Recyclingmaterial erfüllt die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung für rezyklierte Gesteinskörnung vom Typ 1 gemäß DIN 4226-101 und ist somit grundsätzlich für den Einsatz in Beton nach DIN 1045-2:2023 geeignet. Für eine abschließende Beurteilung der Verwendbarkeit sind jedoch weitergehende Untersuchungen aller relevanten Materialkennwerte erforderlich, insbesondere hinsichtlich Wasseraufnahme, Rohdichte und Dauerhaftigkeit unter Einwirkung von Frost und Tausalz.

### **AP-07 Optimierung & Dokumentation**

Sowohl die Optimierung als auch die Dokumentation der Arbeiten wurden projektbegleitend vorgenommen, sodass die Inhalte dieses Arbeitspaketes in die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete eingeflossen sind.

## 4. Fazit

Die großen Einsparungen, die Hohlkörper in Betondecken ermöglichen, gelingen sowohl mit Neubeton als auch mit Recyclingbeton. Auch die entstehenden Hohlkörperdecken selbst sind gut rezyklierbar. Im Projekt wurden erfolgreich Hohlkörper entwickelt, die für die Herstellung von Betondecken geeignet sind. Damit lassen sich wesentliche Einsparungen an Beton realisieren, sowie leichtere Decken herstellen. So wurde eine wichtige Grundlage für die weitere Nutzung des Materials geschaffen und die Einhaltung relevanter Normen bestätigt. Sehr erfolgreich war der Nachweis über die Rezyklierbarkeit, wohingegen bei der Nutzung von Recyclingbeton die Querkrafttragfähigkeiten rechnerisch nicht vollständig erreicht wurden. Der Grund hierfür liegt in den generell noch nicht ausreichend erforschten Auswirkungen der Verwendung von RC-Beton auf die Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen aus Stahlbeton. Ob sich bei Verwendung von Hohlkörpern in Bauteilen aus RC-Beton zusätzliche Effekte gegenüber der Verwendung in Bauteilen aus Neubeton ergeben, konnte durch die hier durchgeführten Versuche nicht abschließend geklärt werden. Es wird daher die Durchführung weiterer Bauteilversuche vorgeschlagen. Dabei könnten sowohl unterschiedliche Substitutionsraten der Gesteinskörnung als auch variierende Mischungsverhältnisse der Grob- und Feianteile der rezyklierten Gesteinskörnung untersucht werden.

Gemäß Antrag wurde eine Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit von Hohlkörperdecken um 50 % angestrebt, entsprechend 75 % der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonmassivdecken. Zur abschließenden Einordnung der erzielten Ergebnisse werden ausschließlich Versuche mit Normalbeton herangezogen, da für Hohlkörperplatten unter Verwendung von RC-Beton bislang keine Versuchsdaten, außer den in diesem Projekt gewonnenen, vorliegen.

Die im Rahmen des Projekts neu entwickelten Hohlkörpertypen sind ab einer Mindestdeckendicke von 32 cm einsetzbar. Bei derzeit in Deutschland zugelassenen Hohlkörpersystemen ist die Querkrafttragfähigkeit bei vergleichbaren Deckenstärken auf 45 % im Vergleich zur Massivdecke begrenzt; ein Ansatz von 50 % ist lediglich für dünnere Decken zulässig. Demgegenüber erreichen Decken mit den neuartigen Hohlkörpertypen im Mittel eine Querkrafttragfähigkeit von 64 % (für Normalbeton), was einer Steigerung von 42 % gegenüber den zugelassenen Systemen entspricht. Die angestrebte Erhöhung um 50 % wurde damit zwar nicht vollständig erreicht, jedoch stellt die erzielte Steigerung von 42 % bereits ein beachtliches Ergebnis dar.

Eine derartige Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit kann – abhängig vom statischen System und der anzusetzenden Belastung – zu einer Vergrößerung der im Grundriss wirksamen Hohlkörperfläche um etwa 15 % bis über 40 % führen. Umgekehrt lassen sich notwendige Massivbereiche ohne Hohlkörperanordnung deutlich reduzieren. Die damit verbundene Verringerung der Eigenlast führt zu geringeren Bauteilverformungen und ermöglicht schlankere Decken in Relation zur Spannweite. Das Einsparpotenzial hinsichtlich Materialeinsatz und CO<sub>2</sub>-Emissionen kann für eine gesamte Decke somit, wie angestrebt, auf bis zu 40 % gegenüber einer Bauweise ohne Hohlkörper gesteigert werden. Bei bislang verwendeten Hohlkörpertypen liegt dieses Einsparpotenzial bei etwa 25 %, ohne Berücksichtigung sekundärer Effekte auf die Gesamtstruktur des Gebäudes.

Die erzielte Steigerung der Materialeffizienz wird insbesondere vor dem Hintergrund kontinuierlich steigender Betonpreise zu einem entscheidenden wirtschaftlichen Vorteil. Dadurch ist zu erwarten, dass sich diese und vergleichbare Bauweisen künftig stärker wirtschaftlich durchsetzen. Darüber hinaus eröffnen sich weitere Anwendungsbereiche, beispielsweise im Bereich von Bodenplatten. Für eine detailliertere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind Auswertungen erster Bauprojekte mit dem neuen Hohlkörpersystem erforderlich.

## 5. Literaturverzeichnis

- Busch, Denis. *Bemessungsansätze für zweiachsig gespannte Hohlkörperdecken mit neuartigen Hohlkörperformen*. Dissertation; Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2020.
- DIN 1045-2. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008.
- DIN 4226-101. *Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- DIN EN 12350-5. *Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019.
- DIN EN 12390-13. *Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021.
- DIN EN 12390-3. *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019.
- DIN EN 12390-6. *Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2024.
- DIN EN 12620. *Gesteinskörnungen für Beton*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- DIN EN 1992-1-1. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1. Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- DIN EN 1992-1-1/NA. *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013.
- DIN EN 933-11. *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober recycelter Gesteinskörnung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- Hordijk, Dirk Arend. *Local approach to fatigue of concrete*. Dissertation; Delft: Technische Universität Delft, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geotechnik, 1991.
- Thorenfeldt, A, A Tomaszewicz, und J.J Jensen. *Mechanical Properties of high*. Norway, 1987.
- von Mises, Jan G.M. *Multiaxial strain-softening of concrete*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, Institute for Building Materials und Structure, 1986.
- Z-12.5-96. *Zulassungsbescheid Ankerstabstahl St 900/1100 mit Gewinderippen AWM 1100, Nenndurchmesser: 15 und 20 mm*. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2020.