## Koppelung der Deckenelemente zur Deckenscheibe

Neben den vertikalen Lasten tragen Decken horizontale Belastungen aus Wind, Erdbeben oder Imperfektionen ab. Die Decken leiten die über die Außenhaut eingetragenen Lasten an die Kerne oder aussteifenden Wände weiter, von wo aus sie in das Fundament übertragen werden. Im Fall einer monolithischen Decke in Ortbetonbauweise ist eine solche Scheibenwirkung ohne weitere Maßnahmen gegeben. Fertigteildecken, wie die in diesem Projekt betrachteten HBV-Decken, müssen jedoch zunächst kraftschlüssig zu einer Scheibe verbunden werden. Die Verbindungen zwischen den HBV-Deckenelementen müssen die horizontale Kraftübertragung sicherstellen. Dabei treten Kräfte parallel und quer zur Fuge auf. Die parallel zur Fuge verlaufenden Kräfte sind über die Reibung in der Fuge zu übertragen, während Kräfte quer zur Fugenebene in einem Ringbalken aufgenommen werden. Die Aufnahme der Kräfte parallel zur Fuge erfolgt über einen Verguss (siehe Kapitel xy). Für die Aufnahme der Kräfte quer zur Fuge kommen verschiedene Lösungen in Frage. Diese werden in den darauffolgenden Kapiteln vorgestellt und deren Vor- und Nachteile gegenübergestellt.

Um die statische Eignung der Verbindungsmittel für die in diesem Forschungsprojekt betrachteten Bauwerke zu beurteilen, werden die Verbindungen für ein Beispielgebäude bemessen. Dabei wird von einer Deckenscheibe mit 16,2 m Tiefe und 29,7 m Breite ausgegangen. An den Schmalseiten befinden sich in den Gebäudekernen Treppenhäuser. Die Distanz zwischen den Treppenhäusern entspricht etwa der maximal zulässigen Fluchtweglänge aus dem Brandschutzkonzept der betrachteten Gebäudeklasse und stellt die Stützweite der Deckenscheibe dar. Insgesamt besteht die Decke somit aus 2x11 HBV-Deckenelementen mit einer Länge von 8,1 m und einer Breite von 2,7m. Abbildung 69 zeigt den Grundriss eines FE-Modells der Deckenscheibe in SofiSTik.

Chart

Description automatically generated

Abbildung 1 Vereinfachtes Gebäudemodell zur Ermittlung der Aussteifungskräfte

Table

Description automatically generated with low confidence

Abbildung Referenzdecke zur Ermittlung der Koppelkräfte

Als Belastung wird überschlägig angenommen, dass ein Winddruck von 0,8 kN/m² und ein Windsog von 0,5 kN/m² wirkt. Die Geschosshöhe wird auf 3,5m festgelegt. Daraus ergeben sich Linienlasten am Deckenrand in der Höhe von 2,50 kN/m (Druck) bzw. 1,75 kN/m (Sog).

Aus diesen Lasten ergibt sich eine Koppelkraft zwischen den Deckenelementen von 43 kN (siehe Abbildung xy). Im Ringbalken fiele für diese Last eine Bewehrungsmenge von 1 cm² an. In den folgenden Details finden sich teilweise höhere Bewehrungsmengen, so dass auch höhere Lasten aufgenommen werden können Die Bewehrungsmenge und die Ausnutzung sind jeweils angegeben.

Diagram

Description automatically generated

Abbildung 70 FE Modell mit Membrankräfte und Koppelkräften an den Fugen

## Ortbeton Ringbalken

Diagram

Description automatically generated

Abbildung 71 Grundriss und Schnitte: Kopplung der Deckenelemente durch Ortbeton-Ringbalken

Für die Ausbildung eines Ortbeton Ringbalkens ragen an den Rändern der Deckenelemente, an denen sich der Ringbalken befinden wird, Steckbügel heraus. Nach der Montage der Deckenplatten wird der Ringbalken eingeschalt und die Längsbewehrung durch die Steckbügel eingefädelt. Anschließend wird der Ringbalken mit Ortbeton vergossen.

Ringbalken aus Ortbeton sind günstig in der Herstellung, erlauben große Toleranzen und bieten ein hohes Maß an Flexibilität. So können mittels bestimmter Einbauteile, z.B. Q-Isokörbe, auch auskragende Balkone ausgeführt werden. Die einzige Voraussetzung ist, dass diese Einbauteile keine zusätzlichen Kräfte in die Decke einleiten, da deren Verankerung im Fertigteil naturgemäß nicht möglich ist.

Da die Stöße der Längsbewehrung keinen großen Raum einnehmen, können Ortbeton Ringbalken hoch bewehrt werden und entsprechend große Normalkräfte aufnehmen, Die Stöße müssen dabei zum Teil versetzt ausgeführt werden. In dem abgebildeten Detail sind je 3 Ø 10 (entspricht 4,7 cm²) Bewehrung jeweils oben und unten eingesetzt. Dies ist mehr als die erforderliche Mindestbewehrung von 1,0 cm² und entspricht einer Ausnutzung von etwa 20 %. Bei dieser Variante müssen die Bewehrungsstöße aus geometrischen Gründen versetzt ausgeführt werden.

Ein Nachteil der Ortbeton Ringbalken besteht darin, dass die Rückbaumöglichkeiten begrenzt sind und ein Downcycling somit nicht zu vermeiden ist. Weiterhin ist die Herstellung relativ langsam, da die Bewehrung durch die Steckbügel an den Rändern der Fertigteile gefädelt werden muss und der Ortbeton aushärten muss. Ebenso erfordert das Einfädeln der Bewehrung einen gewissen Raum rings um das Gebäude.

Aus konstruktiver Sicht sind zusätzliche Schutzmaßnahmen vor Betonfeuchtigkeit für das Holz nicht erforderlich. Aus optischen Gründen wird empfohlen, ein Kompriband oder ähnliche Abdichtungen als Schutz vor Verschmutzungen des Randträgers einzusetzen.

## Geschweißte Stahl-Verbindung

Diagram, engineering drawing

Description automatically generated

Abbildung 72 Grundriss und Schnitte: Stahlbauverbindung zur Kopplung der Fertigteile

Bei der in Abbildung xy dargestellten Verbindungsvariante mit angeschweißtem Stahlblech wurde die Randbewehrung an den späteren Rändern der Deckenscheibe bereits im Werk in die Fertigteile mit einbetoniert. Vor der Betonage der Fertigteile werden an den Ecken Stahlbleche an die Randbewehrung angeschweißt. Die Eckbereiche werden dann bei der Betonage ausgespart, sodass die Stahlbleiche offen und zugänglich bleiben. Nach der Montage der Deckenplatten werden nebeneinander liegende Platten durch Verschweißen der Stahlbleche verbunden. Die Aussparungen sind vor Band zu schützen. Dazu können sie nachträglich mit Mörtel vergossen werden oder mit einer Brandschutzplatte bzw. einem Faserbetondeckel abgedeckt werden. Die Abdeckung mit einer Platte oder einem Deckel erleichtert Inspektionen oder eine spätere Demontage.

Die Stahlblech-Verbindung erlaubt weniger Toleranzen als der Ortbeton-Ringbalken, sodass diese bei der Bemessung der Schweißnaht zu berücksichtigen sind. Auskragende Balkone sind nur ausführbar, wenn an den Fertigteilen entsprechende Aussparungen zum nachträglichen Einbau von Anschlusselementen vorgesehen werden. Die Variante erlaubt einen schnelleren Bauablauf als bspw. die Ortbetonvariante, da das Stahlblech direkt nach dem Montieren verschweißt werden kann und danach die volle Tragfähigkeit erreicht ist. Das Schweißen auf der Baustelle ist aber dennoch mit großem Aufwand verbunden und stelle einen deutlichen Nachteil der Variante dar. Der Rückbau ist, solange die Aussparungen an den Plattenecken nicht vergossen wurden, durch ein Trennen der geschweißten Verbindung möglich. Dies ist jedoch mit recht großem Aufwand verbunden.

Die Durchmesser der Randbewehrung sollen auf Ø12 begrenzt werden. Die Bewehrungsmenge ist durch die Größe des Stahlblechs und den Platzbedarf der Schweißnähte begrenzt. Insgesamt 4 Ø12 entsprechen einer Bewehrungsmenge von 4,5 cm².Die Mindestbewehrung beträgt 1,0 cm², sodass bei der gewählten Bewehrungsmenge lediglich eine Ausnutzung von etwa 20 % vorliegt. Die Bewehrungseisen sollen an den Enden, die auf die Stahlplatten geschweißt sind, jeweils eine Schlaufe bilden, um eine ausreichende Nahtlänge zu erlauben. Am Rand des Fertigteils ist eine Bewehrung mit Steckbügeln mit bis zu Ø 8 möglich.

Neben der Schweißung am Fertigteilstoß ist es denkbar, die Stahlbleche stahlbaumäßig mit Schrauben zu verbinden. Die Toleranzen der Fertigung können durch Langlöcher ausgeglichen und über eine vorgespannte gleitfeste Verbindung angeschlossen werden. Die Raumforderung dieser Konstruktion ist größer und erst ab einer Plattenstärke von 12 cm oder mehr sinnvoll zu realisieren. Der Rückbau ist hier günstiger als bei der geschweißten Variante.

## Bewehrungsverbindung über Koppelelemente

Diagram, engineering drawing

Description automatically generated

Abbildung 73 Grundriss und Schnitte: Kopplung der Deckenelemente durch Kopplungselemente für die Bewehrung

Bewehrungsanschlüsse von beispielsweise BGW-Bohr GmbH oder HALFEN (siehe Abbildung xy) erlauben das Koppeln von Deckenplatten bei geringem Montageaufwand. Wie zuvor bei der Variante mit Stahlbelchen wird die Randbewehrung bereits im Werk einbetoniert. Auch hier werden bei der Betonage die Plattenecken ausgespart. Die Randbewehrung steht in den ausgesparten Eckbereich aus dem Beton vor. Je nach Wahl des Koppelelements ragen die Eisen als freies Stabende hervor oder sind zu einer Schlaufe gebogen. Bei schmalen Trägern oder ungeraden Stabanzahlen ist die Variante mit freien Stabenden zu bevorzugen. Benachbarte Fertigteile können im Bauwerk direkt nach dem Einheben gekoppelt werden. Wie bereits bei der Stahlblech-Variante ist die Aussparung vor Brand zu schützen, entweder durch eine Brandschutzplatte bzw. Faserbetondeckel oder durch Verguss.

Der Vorteil der Koppelelemente besteht in der einfachen und schnellen Montage. Die Verbindung ist sofort belastbar. Der Anschluss auskragender Balkone ist, wie zuvor bei der Variante mit Stahlblechen nicht ohne zusätzliche Aussparungen an den Fertigteilelementen möglich. Ein Nachteil der Elemente besteht in den recht hohen Kosten für die Verbinder. Die Kopplungselemente sind, solange die Fuge nicht vergossen wurde, einfach lösbar und ermöglichen einen vollständigen Rückbau.

Bei der Verwendung vom BGW-Bügelschloss ist die Randbewehrung auf 4 Ø12 (4,52 cm²) bzw. 2 Ø 16 (4,0 cm²) begrenzt. Der HALFEN MBT ist für ungerade Stabanzahl geeignet.

## Bemessung der Längsfugen

Die Längsfugen zwischen den Fertigteilplatten übertragen Schubkräfte parallel zu den Fugen. Sie sollen unbewehrt ausgeführt, also nur vergossen werden, da sie so mechanisch gelöst werden können und so eine Rückbaubarkeit der Deckenelemente gewährleisten. Um dies zu erreichen, müssen die Fugen „rau“ ausgeführt werden. Der Nachweis ist nach DIN EN 1992-1-1:2011-01 und DIN EN 1992-1-1/NA 6.2.2 zu führen. Die folgenden Gleichungen zeigen den Bemessungsablauf.

nRdi = c • fctd + μ • σn + ρ • fyd • (μ • sin α + cos α) ≤ 0,5 •⋅n • fcd (6.25)

Mit

ν: nach DIN EN 1992-1-1/NA, zu 6.2.2 (6) ist  für eine raue Fuge = 0,5

c: nach DIN EN 1992-1-1, 6.2.5 (2) ist c für eine raue Fuge = 0,4

Der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit wird definiert als

fctd = αct • fctk;0,05 / γ~~C~~ (3.16)

fctd = 0,85 • 2,0 / 1,5 = 1,13 MN/m²

Der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit wird definiert als

fcd = αcc • fck / γC (3.15)

fcd = 0,85 • 30 / 1,5 = 17 MN/m²

σn: Spannung Quer zur Fugenebene  0, auf der sicheren Seite liegend

ρ: As/Ai: Verhältnis der fugenkreuzenden Bewehrung zu der Fugenfläche  0

Damit wird nRdi = c • fctd ≤ 0,5 •⋅n • fcd

nRdi = 0,4 • 1,13 = 0,45 ≤ 0,5 • 0,5 • 17 = 4,25 [N/mm²]

Für eine Ausführung mit 10 cm Deckenplatte und einer Fugenlänge von 16,2 m können je Vergussfuge 729 kN übertragen werden. Die Fugenlänge entspricht hier der Länge von zwei Deckenplatten. Die am Referenzgebäude ermittelten Lasten betragen 94 kN im Lastfall GZT. Eine Ausführung ohne Fugenbewehrung und mit rauer Fuge kann die auftretenden Lasten aufnehmen. 729 kN > 94 kN.

V,längs = 0,45 x 0,1 x 16,2 = 0,729 MN entspr. 729 kN.

Chart, histogram

Description automatically generated

Abbildung 74 Auflagerreaktionen GZT am Referenzmodell

## Zusammenfassung und Fazit

Die unterschiedlichen Scheibenkopplungen übertragen alle ähnliche Maximalkräfte. Gegenüber den am Referenzmodell ermittelten Mindestlasten sind höhere Lasten aufnehmbar, so dass auch statisch anspruchsvollere Deckensysteme möglich sind, wie schmalere Deckenfelder oder horizontal auskragende Deckenscheiben. Da die Varianten in Hinblick auf die Tragfähigkeit keine Unterschiede aufweisen, erfolgt die Bewertung anhand folgender Kriterien.

* Wirtschaftlichkeit
* Zirkularität bzw. Rückbaubarkeit
* Baugeschwindigkeit bzw. Vorfertigung
* Toleranzanforderngen
* Anschluss von auskragenden Balkonen an die Decke
* Platz auf der Baustelle

Da bei allen Varianten die Längsfugen zu vergießen sind, wird dies im Folgenden Vergleich nicht weiter erwähnt. Der Verguss der Längsfugen erfolgt in allen Fällen mit Spezialmörtel, der üblicherweise nach 24 Stunden tragfähig ist.

Variante 1 mit dem Ortbetonringbalken ist besonders wirtschaftlich. Allerdings ist sie in der Herstellung etwas langsamer als die beiden anderen Varianten, weil das Einfädeln der Bewehrung recht zeitaufwändig ist und der Ortbetonbalken aushärten muss. Es können große Toleranzen ausgeglichen werden. Auskragende Balkone sind durch Einbauteile in den Ringbalken einfach auszuführen. Durch die monolithische Verbindung der Deckenelemente ist die Rückbaubarkeit dieser Variante als schlecht zu bewerten.

Die Variante 2 mit Stahlblechen, die durch eine Schweißung oder vorgespannte Verschraubung verbunden werden, ist schneller. Allerdings bleibt die Montage durch das Verschweißen bzw. das Vorspannen der Schrauben dennoch aufwändig. Die Variante erlaubt nur geringe Toleranzen, sodass höhere Anforderungen an die Genauigkeit der Fertigteile gestellt werden. Die Rückbaubarkeit ist, sofern die Aussparung für die Verbindung nicht vergossen wurde, möglich, jedoch weiterhin mit Aufwand für das Auftrennen bzw. Lösen der Verbindung verbunden. Variante 3 mit Kopplungselementen erlaubt die schnellste Montage, ist aber teurer durch den Einsatz dieser Spezialverbinder. Da diese sich wieder öffnen lassen, ist die Rückbaubarkeit hier am günstigsten, vorausgesetzt, die Aussparung für die Koppelelemente wurde nicht vergossen. Bei Varianten 2 und 3 ist der Anschluss auskragender Balkone nicht ohne zusätzliche Aussparungen in den Fertigteilen möglich.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Ortbeton Ringbalken | Stahlblech-Verbindung | Kopplungselemente |
| Wirtschaftlichkeit | + | 0 | - |
| Rückbaubarkeit | - | 0 | + |
| Toleranzausgleich | + | - | ? |
| Auskragende Balkone | + | - | - |
| Platzbedarf Baustellen? |  |  |  |

Die Gewichtung der hier genannten Auswahlkriterien fällt für jedes Projekt unterschiedlich aus. Weiterhin beeinflussen die Präferenzen des Herstellers der HBV-Decke die Wahl der Bauweise. Aus diesen Gründen wird hier keine generelle Empfehlung getroffen. Für das Forschungsprojekt ist als Optimierungsziel allerdings ausdrücklich die Wirtschaftlichkeit der Konstruktion gefordert, sodass in diesem Rahmen die Variante mit Ortbeton Ringbalken (siehe Kapitel xy) als angemessenste angesehen wird, da sie die wirtschaftlichste Variante darstellt.