

Punktgestützte Flachdecken aus stumpf verklebten TS3-Brettsperrholzplatten – Erfahrungen der letzten 10 Jahre

Dr. Marcel Muster
Timbatec Holzbauingenieure Schweiz AG
Zürich, Schweiz



Sven Bill
Timber Structures 3.0 AG
Thun, Schweiz



Punktgestützte Flachdecken aus stumpf verklebten TS3-Brettsperrholzplatten – Erfahrungen der letzten 10 Jahre

1. Einführung

«Ein punktgestütztes, zweiachsig tragendes Flachdeckensystem in Holz» war das Ziel, das sich die Holzbauingenieure von Timbatec aus der Schweiz um Stefan Zöllig gesetzt hatten. Sie hatten mehrere Projektwettbewerbe gegen den klassischen Stahlbeton verloren, der mit einem einfachen Stützenraster in Verbindung mit einer Flachdecke in der Lage war, die Statik des Bauwerks auf sehr effiziente Weise zu lösen. Der klassische Holzbau ist zu diesem Zeitpunkt hier an seine Grenzen gestoßen. Im Holzbau waren bisher linienförmige Stützen wie Unterzüge oder tragende Wände notwendig, da Deckenplatten oder Hohlkastenelemente mehrheitlich einachsrig tragend eingesetzt werden konnten.

Ab 2010 entwickelte federführend Timbatec gemeinsam mit der ETH Zürich, der Berner Fachhochschule und weiteren Wirtschaftspartnern deshalb ein zweiachsig, bzw. flächig tragendes, punktgestütztes Deckensystem aus Holz. Der Entwicklungsaufwand war grösser, als ein Holzbauingenieurbüro allein stemmen konnte. Das Geschäftsmodell war ein anderes, die Lieferanten und Kunden anders gelagert, die Risiken und der Finanzbedarf grösser. 2014 wurde beschlossen, für die neuen Technologien eine eigene Firma zu gründen, die Timber Structures 3.0 AG, kurz TS3. Gemäss der Philosophie: TS1 steht für Vollholz (rund oder gesägt); TS2 für verklebte Holzbauteile (Brettschichtholz und Brettsperrholz) und TS3 für die dritte Generation im Holzbau, die völlig neue Formen und Dimensionen ermöglicht. Zentrale Technologie ist die stumpfe stirnseitige Verklebung von Holz, hauptsächlich Brettsperrholzplatten. In den Jahren 2013-2023 wurden rund 40 Bauprojekte mit insgesamt 25'000 m² Flachdecken mit den TS3-Technologien in der Schweiz, Österreich und Kanada realisiert. Weitere 35 Projekte mit insgesamt 50'000 m² Flachdecken sind bis Ende 2024 beauftragt.

2. Entwicklung der TS3-Verbindung

Die Fragen der Holzbauingenieure waren:

«Wie schaffen wir es, die Vorteile von Stahlbetonkonstruktionen auch im Holzbau zu nutzen?»

«Können wir in Beton denken, aber mit Holz bauen?».

Die Antwort war eine Systemlösung, die es erlaubt, Geschossdecken aus Holz zweiachsig bzw. flächig tragend zu konstruieren und lediglich punktuell abzustützen. Die Voraussetzung dafür war ein zweiachsig tragender Holzwerkstoff. Zunächst standen aufgelöste Trägerrost-Kastensysteme im Fokus. Doch bisher konnte keine industrielle Produktion etabliert werden, die für eine wirtschaftliche Herstellung unabdingbar wäre. Außerdem war mit Brettsperrholz bereits ein zwar materialintensives, aber wirtschaftliches Produkt am Markt etabliert. Dieses zeigte bei Durchstanzversuchen für punktuelle Krafteinleitung hervorragende Werte. Zur Erzielung der zweiachsigen Durchlauftragwirkung müssen die durch die Herstellung limitierten Plattengrössen auf der Baustelle biegesteif miteinander verbunden werden. Hierfür war bis dato keine praktikable Methode vorhanden.

Aus einem Variantenstudium zur seitlichen Verbindung von Brettsperrholz-Platten folgte die Erkenntnis, dass eine reine Klebeverbindung ausreichend ist, um Stahlbetonkonstruktionen ernsthaft konkurrenzieren zu können. Mit der Untersuchung verschiedener Stoß-Geometrien zeigte eine reine stumpfe Stirnholzverklebung mit Fichtelamellen (SS-F-V) mit 14,7 N/mm² (auf Mittelwertniveau) ein ausreichendes Festigkeitspotenzial, um punktgestützte Holz-Geschossdecken mit einem Stützenraster von 8 m x 8 m bei 500 kg/m² Nutzlast zu bauen, siehe Abbildung 1 [1].

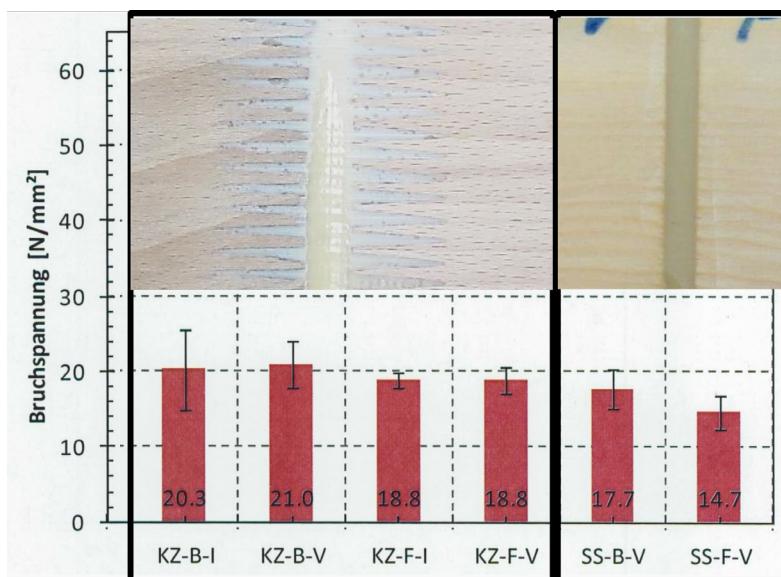


Abbildung 1: Vergleich Verbundfestigkeit von profilierten und stumpf gestossenen Fügeflächen, in der Nomenklatur steht KZ steht für Keilzinkenstoss, SS für Stumpfstoss; B für Buchenholz, F für Fichtenholz, [1]

Zur laufenden Vertiefung und Leistungssteigerung wurden mehrere Forschungsprojekte mit Unterstützung des Schweizerischen Wald- und Holzforschungsfonds sowie der Innosuisse und des Technologiefonds durchgeführt. 8 Bachelor-, 15 Masterarbeiten sowie vier Dissertationen brachten Erkenntnisse über verschiedene Klebstoffsysteme [2], Holzeigenschaften [3], Bearbeitungsparameter der Fügeflächen, Produktionsbedingungen etc. In Dutzenden Prüfserien, überwiegend bei Zug- und Biegeversuchen wurden tausende von Bruchspannungswerten generiert. Langzeitversuche und Baustellenbedingungen (Kälte [4], Feuchte, Sonneneinstrahlung, Bewegungen etc.) lieferten zusätzliche Erkenntnisse, um das Holzbausystem TS3 heute sicher anwenden zu können.

Die erste Entwicklungsstufe des TS3-Systems wurde mit der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) und der allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), welche nach 6 Jahren Erarbeitungszeit Ende 2023 ausgestellt wird, abgeschlossen. Aufgrund der langen Bearbeitungszeit des Zulassung Gesuchs bildet die aktuelle Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung und Allgemeine Bauartgenehmigung bereits nicht mehr den aktuellen Stand der Technik ab. Nach vielen neuen Erkenntnissen aus der praktischen Anwendung sowie aus den vielen Zulassungs- und Forschungsaktivitäten wird bereits die nächste Zulassungsstufe angestrebt. Hierfür wird auf Basis des aktuellen Wissensstands ein EAD erarbeitet. Mit der hieraus entstehenden ETA wird das TS3-System in geografischer wie auch in technischer Hinsicht noch breiter angewendet werden können.

3. Die TS3-Verbindung

Die TS3-Technologie ist ein Bausystem mit einer biegesteifen Verbindung in der Ebene zwischen Brettsperrholzplatten. Die TS3-Verbindung mittels Fugenverguss ermöglicht den Bau von unterzugsfreien Skelettbaustrukturen aus Holz mit schlanken, punktgestützten Platten. Die TS3-Fuge, das Kernstück der Technologie, ist standardmäßig 4 mm breit und verfügt auf einer Seite an der Unterkante jeweils über einen Absatz von 20 mm, der die Fugendicke definiert und in Kombination mit einem Dichtungsband die Abdichtung, wie auch einen sauberen Abschluss in Sichtqualität gewährleistet, siehe Abbildung 2.

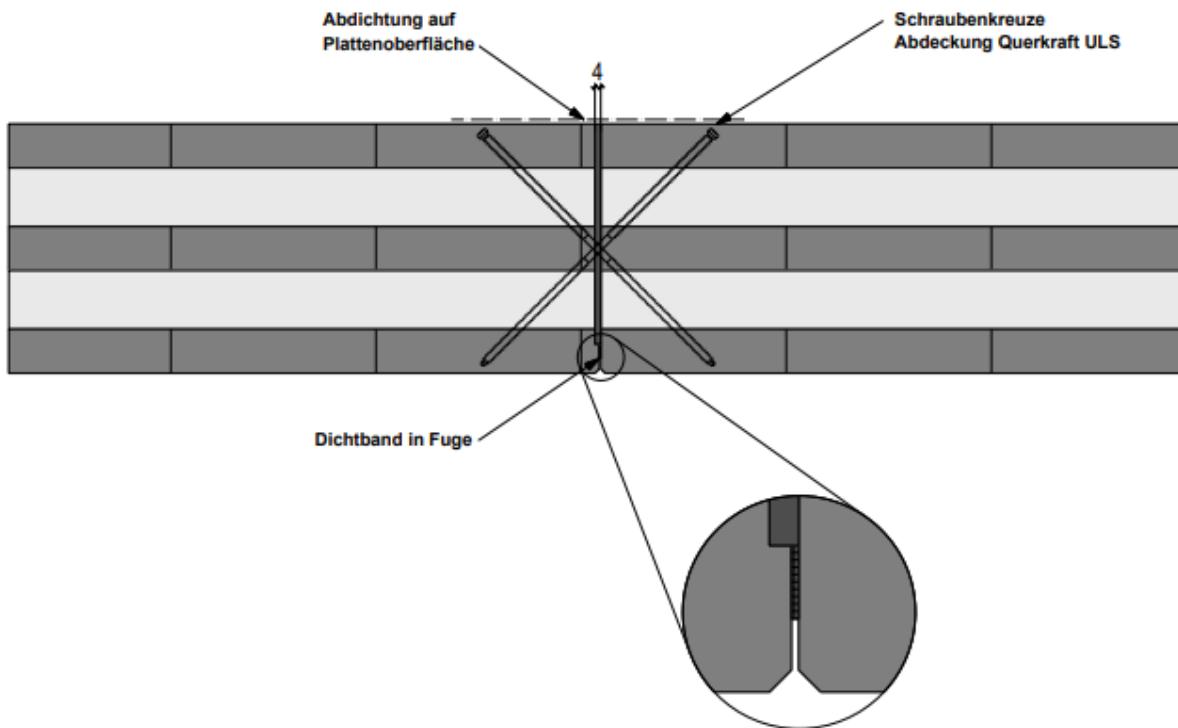
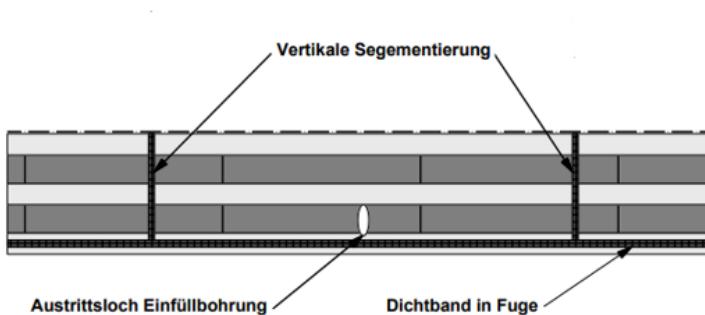


Abbildung 2: Schematische Darstellung der TS3-Fuge.

Zur Qualitätssicherung wird die Fuge vor dem Verguss in 60 – 100 cm lange Segmente unterteilt. Auf der Baustelle wird jedes Segment einzeln mit einem speziellen 2-Komponenten-Gießharz verfüllt. Die entsprechenden Einfülllöcher werden vorgängig auf einer Abbundanlage gebohrt und führen in die zweitunterste Plattenlage, vgl. Abbildung 3. Durch das Verfüllen der Fugen von unten nach oben wird sichergestellt, dass keine Lufteinschlüsse entstehen und die Fugen vollständig mit Gießharz gefüllt sind.

Längsschnitt



Querschnitt

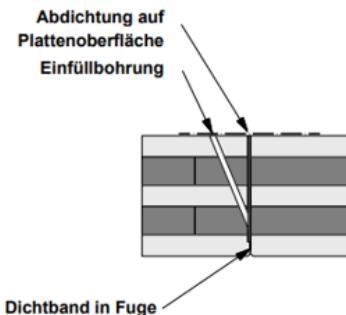


Abbildung 3: Segmentierung der TS3-Fugen.

TS3 befähigt seine Partnerbetriebe durch Schulungen und technische Dokumentationen zur eigenständigen Planung und Ausführung von TS3-Projekten, einschließlich der TS3-Fugen. TS3 bietet seinen Partnerbetrieben jederzeit beratende Unterstützung an.

Zur Sicherstellung der Fugenqualität werden einheitliche Qualitätskriterien und -massnahmen definiert:

- *Vorgaben, Kontrolle und Dokumentation*
Die Einhaltung der vorgegebenen Materialeigenschaften und Ausführungsbedingungen wird durch systematische Kontrollen sichergestellt und dokumentiert.
- *Intelligentes Ausführungsprinzip*
Die Segmentierung der Fuge stellt sicher, dass die Tropfzeit des Gießharzes eingehalten wird und Auffälligkeiten beim Verguss schnell erkannt werden. Jedes Segment wird von unten her aufgefüllt, bis aus den Entlüftungslöchern Gießharz ohne Blasen austritt. Durch die Verdrängung der Luft nach oben können Lufteinschlüsse in der Fuge ausgeschlossen werden.

6 Punktgestützte Flachdecken aus stumpf verklebten TS3-Brettsperrholzplatten | M. Muster, S. Bill

- Qualitätsprüfungen

Von den fertigen TS3-Fugen werden gemäss Vorgaben in der abZ/aBG systematisch Prüfkörper entnommen und einer Festigkeitsprüfung im Labor zugeführt.

4. Bemessung der Platten und der TS3-Verbindung

Die Bemessung einer Brettsperrholzdecke, welche sich aus mehreren mit den TS3-Technologien verbundenen Brettsperrholz-Elementen zusammensetzt, ist ähnlich wie die Bemessung einer Stahlbeton-Flachdecke. Die TS3-Verbindung kann als starr angenommen werden. Die in der Ausführung eingesetzten einzelnen Brettsperrholzplatten können als eine ganze Platte mit durchgehend gleicher Steifigkeit modelliert werden, vgl. Abbildung 4.

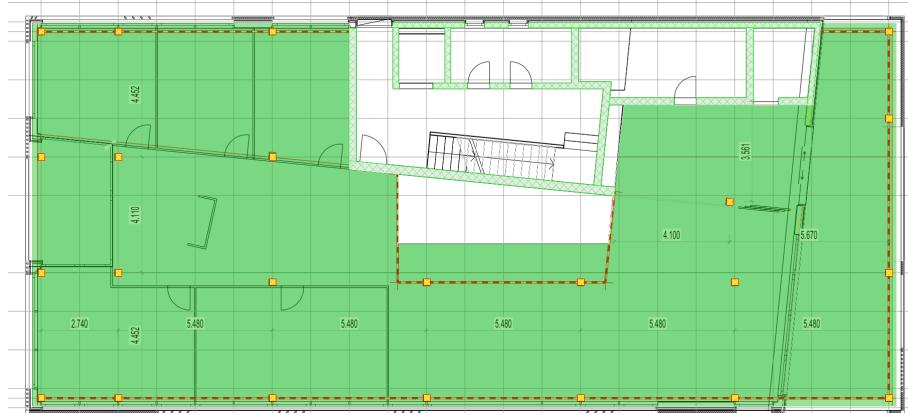


Abbildung 4: Grundriss mit Brettsperrholzdecke (grün), Stützen (gelb) und Erschliessungskern in Stahlbeton

Aufstandsflächen über Stützen und Wänden können für realitätsnahe Ergebnisse mittels Flächenbettung modelliert werden, wodurch sich schlankere Decken ergeben, da die effektiven Spannweiten gegenüber Punkt- und Linien-Lagerungen kürzer sind. Auch ist diese Art der Modellierung bezüglich Singularitäten günstiger. Nicht nur Grundrisse mit fixem Stützenraster, sondern auch Grundrisse mit einer Mischung aus tragenden Wänden und einzelnen Stützen, wie man sie im klassischen Wohnungsbau meist vorfindet, können neu effizient umgesetzt werden. Im Gegensatz zum konventionellen Holzbau eignet sich Brettsperrholz mit TS3-Technologien außerordentlich für unregelmäßige Grundrisse. Einziges Kriterium ist, dass die einzelnen Spannweiten annährend gleichmäßig verteilt sind, denn aus der größten Spannweite definiert sich in der Regel die erforderliche Plattendicke.

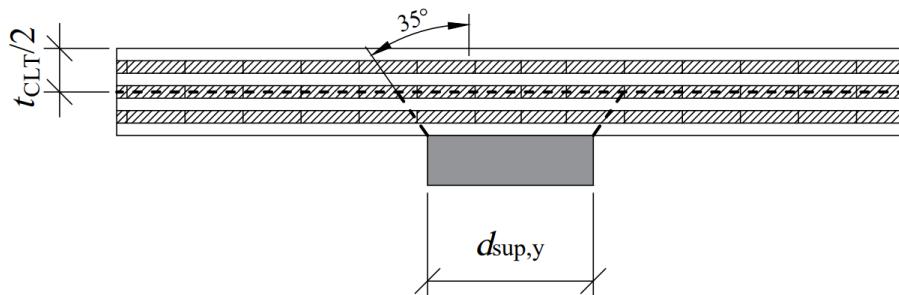


Abbildung 5: Lastausbreitung über dem Auflager aus [5]

Ist eine Decken- oder Dachfläche mit entsprechender Lagerung und Belastung in der FE-Software abgebildet, können Spannungs-, Verformungs- und Schwingungsanalysen für die weitere Planung erfolgen, vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6. Der Lagenaufbau der gewählten Brettsperrholzplatte wird hierbei auf das Spannweitenverhältnis des Grundrissrasters abgestimmt, damit die Deckenstärke und der Materialeinsatz optimiert werden können. Mit der Spannungsanalyse erfolgt eine erste Platteneinteilung für die erforderlichen Brettsperrholzelemente. Hierbei wird eine Optimierung des Verschnitts, die Herstellungs- und Transportkapazitäten wie auch das Montage- und Sprieß-Konzept bereits berücksichtigt, vgl. Abbildung 7. Der Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Deckensystems erfolgt auf der Grundlage der Einteilung der Brettsperrholzplatten für den Einbau. Durch die Abbildung in der FEM-Software kann der Schwingungsnachweis

einfach geführt werden. Der Nachweis im Brandfall geschieht analog der bekannten Bemessung für Brettsperrholz anhand des Resttragquerschnittes. Hierzu wurden die Grundlagen in Grossbrandversuchen im Rahmen eines Forschungsvorhabens gewonnen, Abbildung 8 und kürzlich bestätigt.

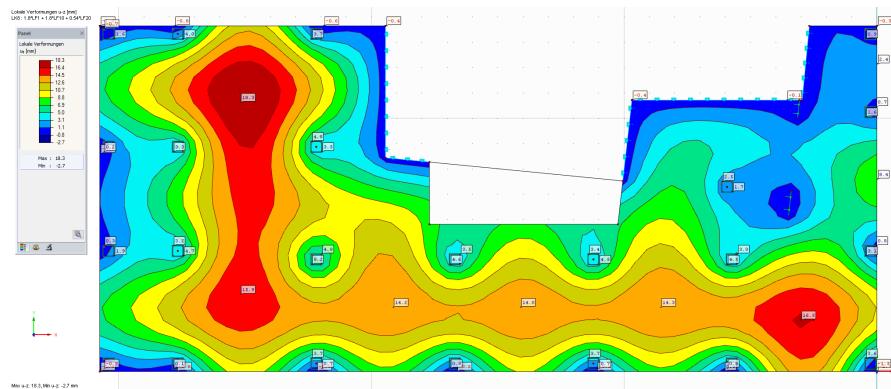


Abbildung 5: Verformungsanalyse mittels FEM-Software

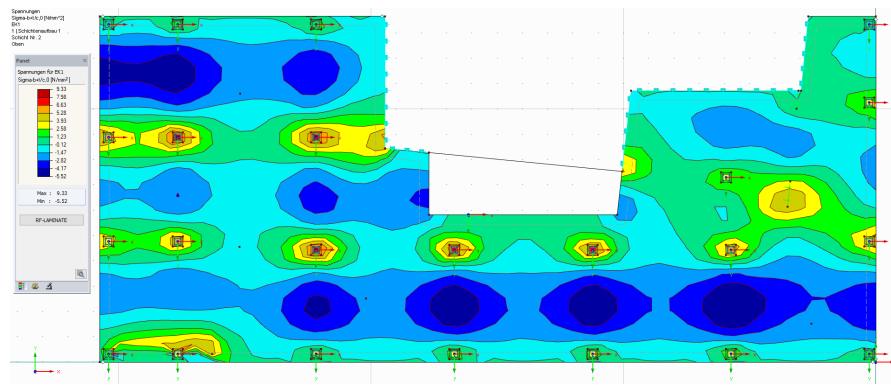


Abbildung 6: Spannungsanalyse mittels FEM-Software

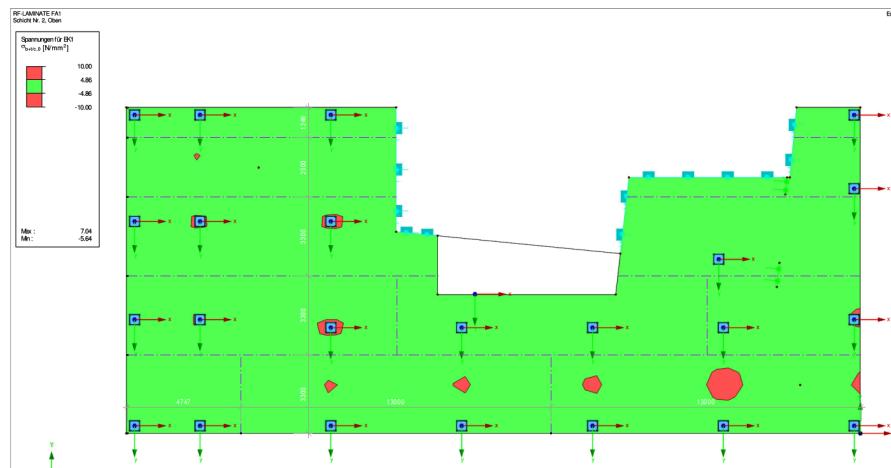


Abbildung 7: Einteilung der Brettsperrholzplatten unter Berücksichtigung des Spannungsbildes



Abbildung 8: Grossbrandversuch unter Last

5. Ausführung der TS3-Verbindung

Die TS3-Fuge wird in zwei Arbeitsschritten ausgeführt:

1. Vorbehandeln der Fügeflächen im Werk
2. Vergessen der TS3-Fugen auf der Baustelle.

Nach dem Abbund der Brettsperrholz-Deckenelemente werden die Fügeflächen im Ab bundwerk vorbehandelt. Die Fügeflächen werden mit dem 2K PUR «TS3 PTS PT192» und geeigneten Spachtelwerkzeugen versiegelt. Diese Vorbehandlung erfüllt gleichzeitig mehrere Zwecke. Sie ermöglicht zunächst die Haftung des Giessharzes auf der Holzstirnseite unter optimalen Werksbedingungen. Im Weiteren wird die frische Schnittkante in ihrem für die Verklebung optimalen Zustand konserviert. Zusätzlich werden die Fügeflächen während des Transports zur Baustelle vor äusseren Einflüssen wie z.B. Feuchteveränderungen geschützt.



Abbildung 9: Fügefläche mit Dicht- und Segmentierungsbänder

Nach der Vorbehandlung und dem Anbringen von Dicht- und Segmentierungsbänder werden die Elemente für den Transport wasserdicht verpackt. Auf der Baustelle werden die Platten ausgepackt, visuell kontrolliert und mit dem Kran gemäss Verlegeplan an die korrekte Position eingehoben. Die Auflagerung erfolgt auf Wänden, Stützen oder falls erforderlich auf Lehrgerüsten und werden ggf. mit Spriegeln unterstützt. Die Oberseite der TS3-Fugen wird mit transparentem Klebeband abgedichtet, vgl. Abbildung 10. Das 2K-PUR-Giessharz TS3-PTS CR192 wird durch die vorgesehenen Einfüllbohrungen injiziert, siehe Abbildung 11. Das Giessharz erreicht nach zwei Tagen 80 % und nach 10 Tagen 100 % seiner Endfestigkeit. Temperaturen deutlich unter- oder oberhalb von 20 °C verlangsamen, resp. beschleunigen die Aushärtung. Für kühle Temperaturen wurden durch TS3 entsprechende Massnahmen entwickelt, um die erforderlichen Festigkeiten zu erreichen.

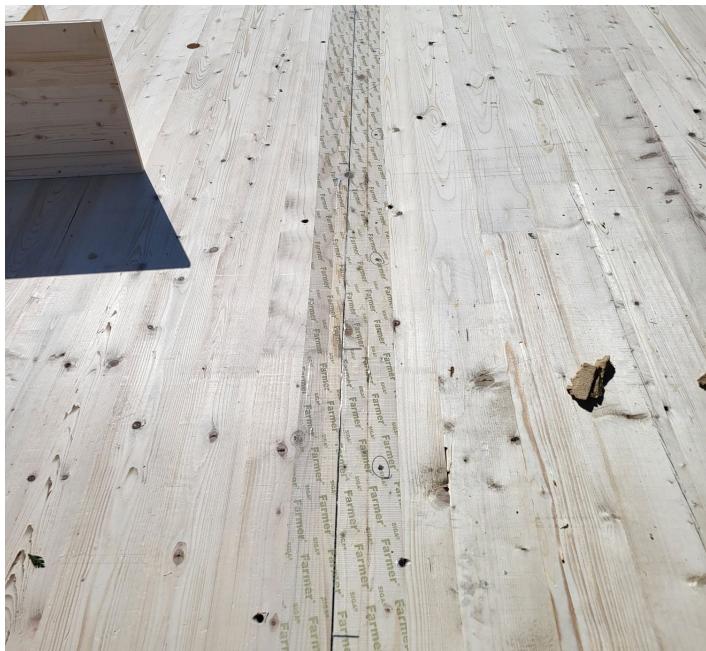


Abbildung 10: Abgeklebte TS3-Fuge



Abbildung 11: Vergießen der TS3-Fugen durch die werkseitig erstellten Einfüllbohrungen.

6. Anwendungsbeispiele

6.1. Grundrissgestaltung

TS3 ist speziell geeignet für Geschoßdecken und Dächer in Mehrfamilienhäusern, auch für solche mit sehr unregelmässigen Grundrisse. Auskragende Ecken ohne Eckstützen oder Stützen, die nicht auf einer Linie stehen, können mit den grossformatigen TS3-Decken einfach überspannt werden, vgl. Abbildung 12. Auch Übergänge von Innen nach Aussen, z.B. bei Balkonen oder Loggien sind mit TS3 statisch, aber auch bauphysikalisch einfach zu lösen. Während bei Stahlbetondecken thermische Kragplattenanschlüsse erforderlich wären, führen die TS3-Brettsperrholzplatten ohne weitere Massnahmen von Innen nach Aussen.

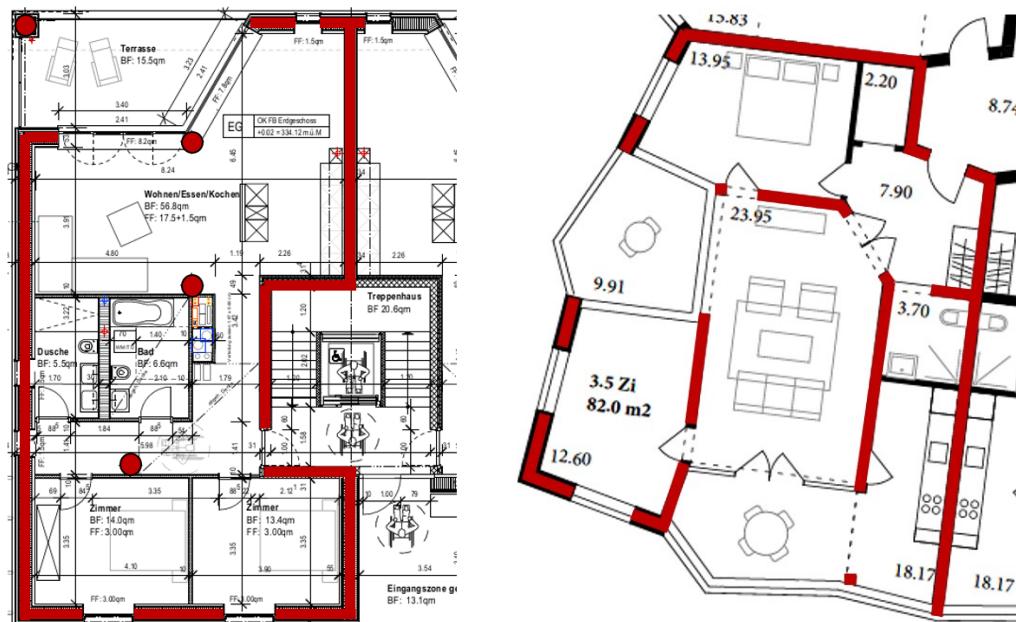


Abbildung 12: Unregelmässige Grundrisse mit Decken-Auflagern auf tragenden Wänden und einzelnen Stützen.

Auch für nutzungsflexible Gebäude mit quadratischen Stützenrastern ohne tragende Innenwände sind die TS3-Technologien geeignet. So wurde unter anderem das Gewerbegebäude der Firma Handl in Pians im Tirol A mit einem Stützenraster von 7 x 7 Metern konstruiert, siehe Abbildung 13. Die 240 mm dicke Brettsperrholz-Dachplatte des 2020 neu gebauten Gastroteils wurde einzig auf Stützen im genannten Raster montiert. Sie dient bei einer späteren Aufstockung als Geschossdecke.



Abbildung 13: Grundriss TS3-Decke mit Stützenraster 7 x 7 m

6.2. Mehrfamilienhaus Fasanenhof Frenkendorf BL, Schweiz

| | |
|------------------------|----------------------------------|
| Anzahl Geschosse: | 4 |
| Anzahl Wohnungen: | 15 |
| Baujahr: | 2021 |
| Brutto Geschossfläche: | 1221 m ² |
| Brettschichtholz: | 293 m ³ |
| TS3-Technologie: | 567 m Fugen |
| Bauherrschaft: | privat |
| Architektur: | Scherer Architekten, Frenkendorf |
| Holzbauingenieur: | Timbatec Holzbauingenieure, Bern |
| Bauphysik: | Timbatec Holzbauingenieure, Bern |
| Holzbau: | Stamm Bau, Arlesheim |



Abbildung 14: Ansicht Fasanenhof

In Frenkendorf entstand das erste viergeschossige Gebäude mit der TS3-Technologie als Skelettbau mit Stützen und Platten aus Holz, s. Abbildung 14. Dank TS3 konnte das zunächst in Stahlbeton geplante Gebäude kurz vor der Auftragsvergabe in kurzer Zeit auf Holz umgeplant und realisiert werden. Einzig der Treppenhauskern wurde betoniert. Hier wurde jedoch die bis anhin übliche Reihenfolge gedreht: Der Holzbau wurde zuerst aufgerichtet und diente später als verlorene Schalung für den flüssigen Beton. Die Außenwände und die Wohnungstrennwände wurden tragend ausgebildet. Alle Innenwände wurden nichttragend ausgebildet. Sie können jederzeit ausgebaut oder versetzt werden. Die geplanten Grundrisse, Stützenabstände und Bauteildimensionen konnten von der ursprünglich geplanten Stahlbeton-Bauweise übernommen werden. Die Geschossdecken bestehen aus grossformatig zugeschnittenen Brettsperrholzplatten, die mit der TS3-Technologie stirnseitig miteinander verbunden sind.

Den Gebäudenutzern ermöglicht der Einsatz von Holz und der TS3-Technologie nebst einem angenehmen Raumklima eine maximale Nutzungsflexibilität. Für den Bauherr verkürzte sich die Bauzeit durch den Wegfall von Austrocknungs- und Aushärtungszeiten. Das ganze Gebäude konnte durch vorgefertigte Bauteile und der exakten Planung innert drei Wochen aufgerichtet werden.



Abbildung 15: Ansicht Wohnzimmer mit Übergang zum Balkon Fasanenhof

6.4. Überdachung Strandbad Hopfräben Brunnen SZ, Schweiz

| | |
|---------------------|--------------------------------|
| Anzahl Geschosse: | 1 |
| Anzahl Dachflächen: | 3 |
| Dachfläche: | 899 m ² |
| Brettsperrholz: | 163 m ³ |
| TS3-Technologie: | 265 m Fugen |
| Architektur: | Steiner Architektur, Brunnen |
| Holzbauingenieur: | Besmer Holz ingenieure, Sattel |
| Bauherrschaft: | Gemeinde Ingenbohl, Brunnen |
| Holzbau: | Dettling Holzbau, Brunnen |



Abbildung 16: Schwebendes Dach über dem Eingangsbereich des Strandbads

Der Eingangsbereich der Badeanlage Brunnen SZ wurde neu gestaltet. Vier pavillonartige Gebäude für Restaurant, Umkleide, Toiletten und Betriebsräume wurden mit TS3-Brettsperrholzplatten überdacht. Am augenfälligsten zeigt sich diese Konstruktion beim organisch geschwungenen, schwebenden Hauptdach auf «tanzenden» Stützen über dem Eingangsbereich und den Aussensitzplätzen des Restaurants. Dieses Dach mit 250 m² Fläche wurde aus 7 einzelnen CLT-Platten zusammengesetzt. Durch die stirnseitige TS3-Fugenverbindung der CLT-Platten erscheint das schwebende Dach als eine einzige Einheit ohne sichtbare Fugen. Die 210 mm dicken 7-Schicht-CLT-Platten liegen auf schlanken Stahlstützen mit einem Raster von rund 4 x 5 bzw. 5 x 6 Metern auf.

7. Literatur

- [1] Zöllig, S., Frangi, A., Franke, S., Muster, M. (2016) Timber structures 3.0 – New technology for mulit-Axial, Slim, high performance timber structures, World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016), Wien, August 2016
- [2] Themessl A.M., Lehmann M., Salzgeber D, Franke S. (2018) Butt joint gluing of cross laminated timber, World Conference on Timber Engineering (WCTE 2018), Seoul, August 2018.
- [3] Bissig D., Frangi A. (2022) Variantenstudium zur Entwicklung einer zweiachsrig tragenden Hohlkastendecke aus Holz, Doktorandenkolloquium Stuttgart
- [4] Lins D., Franke S. (2023) Influence of low curing temperatures on the strength development of end-grain bonded timber, World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), Oslo, June 2023.
- [5] Muster, M. (2020) Column-Slab Connection In Timber Flat Slabs, Doktorarbeit, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich.