

Kielsteg: geklebte Hochleistungsbauteile aus Holz

Kielsteg – glued, lightweight, high-performance
timber composites

Kielsteg, une solution bois légère, collée et composite
à haute performance

Andreas Trummer
Institut für Tragwerksentwurf, TU Graz
AT-Graz



Stefan Krestel
KIELSTEG GMBH
AT-Graz



Kielsteg: geklebte Hochleistungsbauteile aus Holz

1. Einleitung

Kielsteg ist **das** hochwertige Industrieprodukt aus Holz zur Umsetzung von weitgespannten, flächigen Dach- und Deckenkonstruktionen. In dieser Form ist es am Markt derzeit konkurrenzlos. Das Hohlkastenelement besticht durch höchste Ansprüche an die Verarbeitungsqualität und durch die Flexibilität für Anwendung von 6,0 bis 27,0 Meter Spannweite. Durch den kombinierten Querschnittsaufbau aus Plattenwerkstoffen und Schnittholz und der damit verbundenen Materialeffizienz erfüllt das Bauelement alle Anforderungen eines modernen Bauelements.



Abbildung 1: Kielstegbauelement

Folgt man den aktuellen Prognosen so steigt der Druck auf die Ressource Holz bis 2030 signifikant [1]. Kielsteg muss so auch als Beitrag zur Diskussion über die Zukunft des Umgangs mit dem Werkstoff Holz verstanden werden. Es gilt ein Gleichgewicht zwischen den aktuellen regionalen Bedürfnissen und den globalen Tendenzen für die kommenden Dekaden zu skizzieren. Vereinfacht gesagt gilt es eine Balance zwischen der Maximierung des Materialeinsatzes zur Speicherung von CO₂ und der Minimierung des Materials aus Gründen der Ressourcenschonung zu finden. Die Autoren sind überzeugt, dass Kielsteg als Leichtbausystem den ökologischen und ressourcenschonenden Anforderungen der Zukunft gewachsen ist und gleichzeitig Maßstäbe für die technische Leistungsfähigkeit und Flexibilität von Holzfertigteilen neu definiert.

Dieser Beitrag geht der Frage nach, welche Vorteile und Freiheiten Planer, Architekten und Ingenieure, durch den Einsatz von Kielsteg erlangen. Gleichzeitig wird veranschaulicht, mit welchem unternehmerischen Mut und fundiertem Ingenieurwissen Entwicklungen von einer Vision bis zu einem zugelassenen und inzwischen vielfach ausgezeichnetem Industrieprodukt kontinuierlich und verantwortungsvoll vorangetrieben wurden.

Die Firma Kulmer im österreichischen Pischelsdorf zeigt seit 2011 als ersten Kielstegproduzenten bei einem jährlichen Absatz von rd. 25.000 m² eindrucksvoll welche Chancen für eine traditionelle Großzimmerei durch Wandel und Differenzierung gegenüber der Holzleimbauindustrie gegeben sind. Das Angebot einer flexibel produzierbaren Kleinserie verlangt aber auch einen Wandel der Betriebsstruktur für Vertrieb und Kundenbetreuung. Herstellung, Produktcharakteristika sowie die Marktpositionierung zeichnen Kielstegelemente als Erweiterung der Optionen im Holzbau aus, eine Verdrängung etablierter Produkte geht damit nicht einher.

2. Der Planer

2.1. Neue Flexibilität

Für Planer, Architekten und Ingenieure sind neue Bauprodukte immer Inspiration tradierter Konzepte zu überdenken und konventionelle Lösungen durch flexiblere zu ersetzen. Die Flexibilität und Wirtschaftlichkeit, die sonst Betonhohldielen oder Trapezblech nachgesagt wird, werden durch die verblüffende Skalierbarkeit von Kielsteg mit Bauhöhen von 228 mm bis 800 mm (siehe Abbildung 2) und den dadurch ermöglichten Spannweiten von 6,0 m bis 27,0 m weit übertroffen. In Verbindung mit der Qualität einer industriellen Fertigung begeistert das System durch die daraus resultierende Planungsfreiheit.

Damit lassen sich die Alleinstellungsmerkmale wie folgt zusammenfassen:

- kurze Bauzeiten
- hohen Verlegeleistung
- ebene und optisch unverwechselbare Oberfläche
- Stützenfreiheit durch Spannweiten von 6 bis 27 Meter
- große Auskragsmöglichkeit bis zu 10 Metern
- Verfügbarkeit überhöhter und gerader Elemente in Hauptspannrichtung
- Gewichtsreduktion durch optimierten Materialeinsatz und die daraus resultierende Wirtschaftlichkeit.
- geringer CO₂ Footprint

Und nicht zu Letzt ist es die unverwechselbare Querschnittsform, welche einen starken Wiedererkennungswert unter den derzeitigen Holzleimbauprodukten hat!

Höhe Height (mm)	Breite Width (mm)	Querschnitt Cross section	REI* (min)	Form Shape	Länge/Stich Length/pitch	Spannweite Span (m)
228	1200		30 -		L/0	7.5 m
			30 -		L/1035	
280	1200		30 60		L/0	10.0 m
			30 60		L/776	
380	1200		30 60		L/0	12.5 m
			30 60		L/621	
485	1200		30 60		L/0	17.5 m
			30 60		L/443	
560	1200		30 60		L/0	20.0 m
			30 60		L/388	
615	1200		30 60		L/0	22.5 m
			30 60		L/345	
730	1200		- 60		L/0	25.0 m
			- 60		L/310	
800	1200		- 60		L/0	27.0 m
			- 60		L/287	

Abbildung 2: Kielstegelemente – Produktübersicht

90 Prozent der aktuellen Kielstegproduktion wird für weitgespannte Dächer eingesetzt. Dort eröffnet das Bauelement neue Optionen für Planer und Bauherrn.

2.2. Produktionshalle Baierl + Demmelhuber

Am Beispiel der neuen Produktionsstätte des bekannten Innenausstatters Baierl + Demmelhuber in Töding, Bayern konnte die Hinterschwepfinger Projekt GmbH unter anderem mit Kielsteg gebaute Antworten auf aktuelle Fragen die Standortplanung und Standortoptimierung für mittelständische Fertigungsunternehmen geben.

Denn, laut Hinterschwepfinger, zählen heute zu den Erfolgsfaktoren neben einer hohen Produktivität auch die Reaktionsschnelligkeit und Wandlungsfähigkeit von Fertigungsunternehmen. Daher wird es für alle Betriebe zunehmend wichtiger, Bauvorhaben nicht nur kostensicher zu realisieren, sondern auch schnell und zukunftsrobust, was die Flexibilität hinsichtlich der Gebäudenutzung über einen möglichst langen Zeitraum angeht [2].

Das System Kielsteg erfüllt die zwei wesentliche Forderungen der Planer: Kurze Bauzeit und hohe Flexibilität bei der Gebäudenutzung.

Erstmals konnte ein zweischiffiges Hallenkonzept dieser Größe und mit freien Spannweiten von 21,5 m umgesetzt werden, das auf klassische Hauptträger und Nebentragsysteme verzichten kann. Die großformatigen Kielstegelemente werden zum flächenschließenden, raumbildenden Haupttragsystem, die nur auf den Seitenwänden und den unterspannten Holzträgern in der Mittelachse gelagert sind. Lichtbänder, die in den Träger und Kielstegelementen integriert sind, gliedern die Halle. Abbildung 3 und 5 zeigen die aus diesem Konzept resultierenden Fragestellungen von Planern an Kielsteg auf. Das sind zum Beispiel die Integration von Lichtöffnungen und die Nutzung der Dachscheibe zur Weiterleitung von Horizontalkräften. Diese Punkte lassen sich als notwendige Details zur Einbindung von Kielsteg in ein Gesamtragsystem zusammenfassen.



Abbildung 3 und 4: Dargestellt ist die Montage der 21,5 m langen Einfeldenelemente eines Hallendaches mit einer Bauhöhe von 73 cm. Das Eigengewicht eines Elements beträgt 2,7 t.

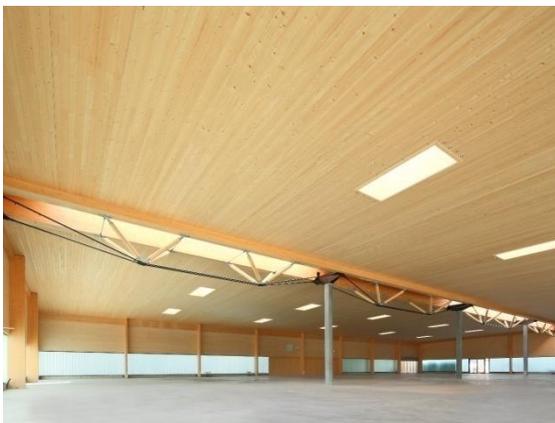


Abbildung 5: Die hölzerne Hallenkonstruktion mit einer Gesamtgröße von 66 x 46 Metern wird durch eine Mittelstützenreihe mit Lichtband gegliedert.

2.3. Detail

Kielstegelemente sind Leichtbauelemente, die für eine optimierte Biegesteifigkeit bei verteilten Lasten ausgelegt sind. Damit sind es speziell die Einleitungspunkte von konzentrierten Einzellasten, die sorgfältig ausgelegt werden müssen. Auch die Nutzung der Dachscheibe zur Weiterleitung der Horizontalkräfte verlangt ergänzende Konstruktionsmaßnahmen. Kielsteg hat aus jahrelanger Projekterfahrung erprobte Lösungen entwickelt.

2.4. Lichtöffnungen

Lichtöffnungen im Dachbereich und die damit verbundenen Auswechslungen können je nach Größe durch ergänzende tragende Elemente oder durch eingesetzte Schächte realisiert werden



Abbildung 6 und 7: Auswechslung durch Aktivierung der Nachbarelemente. Kleinere Öffnungen sind durch die innere Tragstruktur der Elemente ohne verstärkende Maßnahmen möglich.

2.5. Dachscheibe

Die Koppelung der Kielstegelemente durch verzahnte Deckbrettstücke nimmt auf den ungesperrten Aufbau und damit auf das Quell- und Schindverhalten Rücksicht. Auch die Lasteinleitung normal zur Spannrichtung konnte mit einfachen Mittel durch Windrispenbänder effektiv gelöst werden.

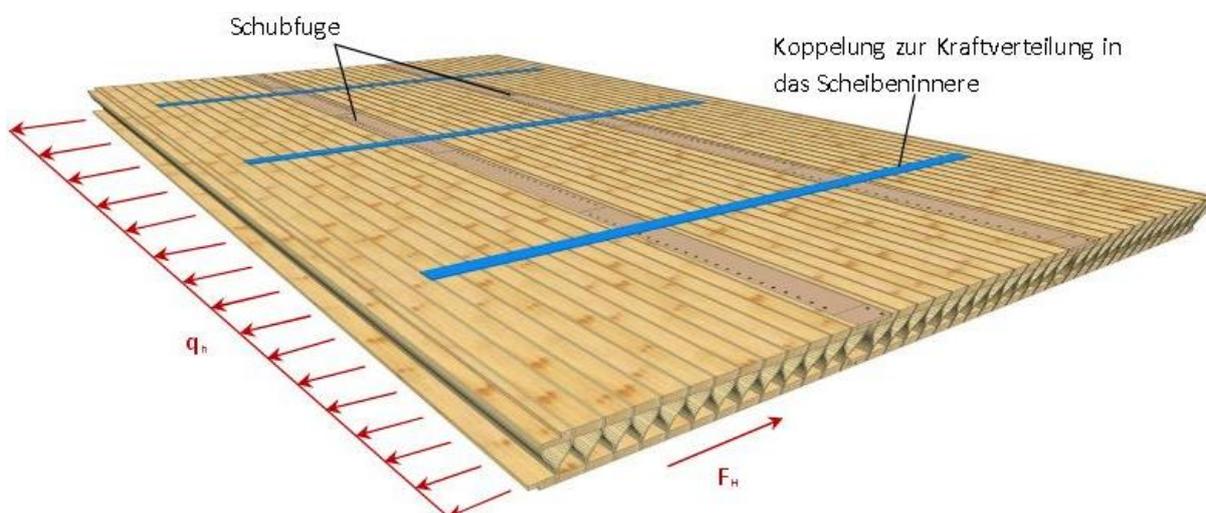


Abbildung 8: Deckbretter übernehmen Schubkräfte, Windrispen verteilen die Kräfte in der Scheibe normal zur Biegetragrichtung.

3. Das Produkt

3.1. Querschnittsaufbau

Kielstegelemente sind ungesperrte, leichte, hochtragfähige und einachsig gespannte Flächentragelemente aus Holz. Die Elemente sind entlang ihrer Längskanten mit Fälzen versehen, welche eine Verbindung zueinander ermöglichen und die Bauteilfuge brandtechnisch schützen. Die Elementbreite beträgt generell 1200 mm und die Bauteilhöhen reichen von 228 mm bis 800 mm.

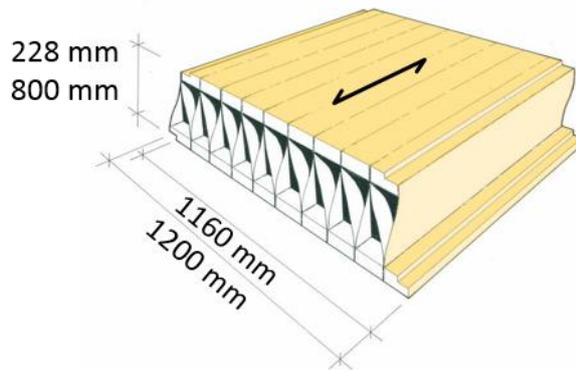


Abbildung 9: Dargestellt sind die relevanten Abmessungen des Systems sowie die Falzgeometrie entlang der Bauteilkanten zur Verbindung der Elemente zueinander.

Die Gurtzonen aus keilgezinktem Vollholz der Festigkeitsklasse C24 erlauben große Biegespannungen in Faserlängsrichtung. Die vergleichsweise schlanken Stege aus dreilagigem Sperrholz bzw. OSB-Platten dienen der Schubübertragung und erlauben eine einfache, materialoptimierte Anpassung der Bauteilhöhe an die gegebene Lastsituation und Spannweite.

Für Kielstegelemente bis zu einer Bauhöhe von 380 mm kommen Gurtdimensionen zwischen 43-57 mm x 78-112 mm zum Einsatz. Als Stegmaterial dient dreilagiges Furniersperrholz mit 4,8 mm Dicke.

Elemente mit Bauhöhen zwischen 485 und 800 mm weisen Gurtabmessungen zwischen 43-80 mm x 96-134 mm auf. Die Stege bestehen aus OSB-Platten mit Dicken zwischen 8 mm und 12 mm.

Die Deckschichten der Stegplatten laufen sowohl bei Sperrholz als auch bei OSB längs zum Element. Die Stöße der Platten sind als Stumpfstoße ausgeführt, wobei das Versatzmaß zum Stoß der benachbarten Platte mindestens 800 mm beträgt.

3.2. Tragfähigkeit

Die analytische Berechnung der Elemente erfolgt in Anlehnung an die DIN EN 1995-1-1, "Biegestäbe mit schmalen Stegen" sowie dem zugehörigen nationalen Anhang. Dabei wird die charakteristische Kielsteggeometrie durch geradstegige Verbundquerschnitte idealisiert [3].

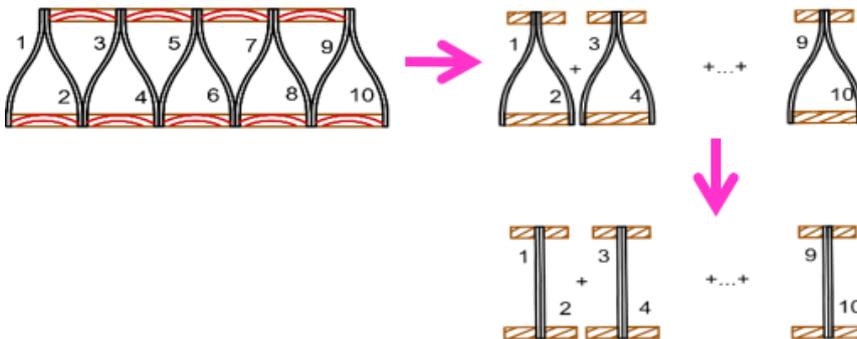


Abbildung 10: Kielstegquerschnitte und idealisierte Rechenquerschnitt.

3.3. Biegetragfähigkeit

Die experimentellen Untersuchungen zur Biegetragfähigkeit der Elemente umfassten insgesamt 12 Vierpunkt- Biegeversuche an vier verschiedenen Elementtypen. Die vorwiegende Versagensform stellte ein Biegezugversagen der unteren Gurtlage dar. Im Vergleich mit der analytischen Berechnung zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung im Hinblick auf die Gurtrandspannung. Bei der Gurtschwerpunktsspannung auf der Zugseite der Elemente zeigen die Versuche eine deutlich höhere Tragfähigkeit als die Vergleiche mit Rechenmodellen. Diesem Vergütungseffekt, der durch die Lastumlagerungsmöglichkeit auf benachbarte Gurtquerschnitte erklärbar ist, wird durch eine rechnerische Erhöhung der Zugfestigkeit der Gurthölzer im Zugbereich um 20%, Rechnung getragen [4].

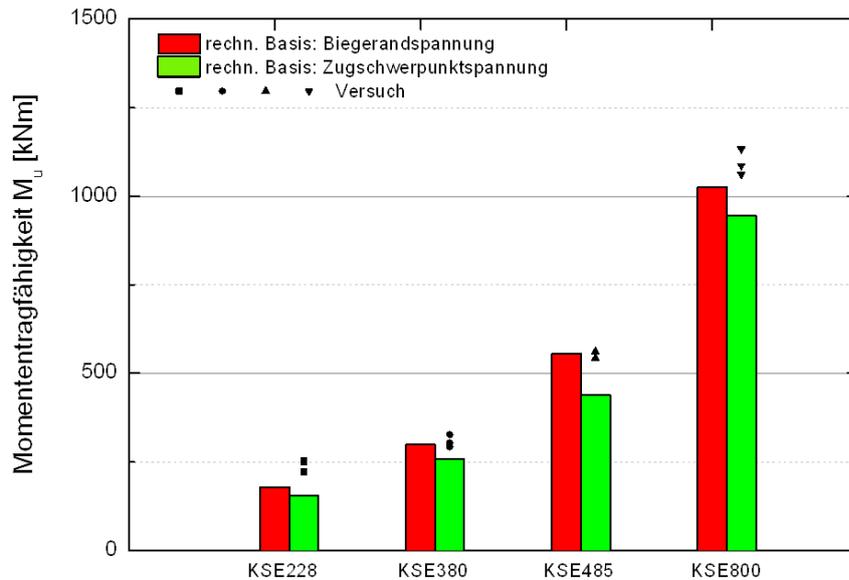


Abbildung 11: Dargestellt ist der Vergleich der analytischen und experimentellen Momententragfähigkeit.

3.4. Querkrafttragfähigkeit

Aufgrund der gekrümmten Steggeometrie sind Anpassungen an das Bemessungsverfahren gemäß DIN EN 1995-1-1 erforderlich. Die gekrümmte Steggeometrie der schlanken Stege wird durch eine abgeminderte Schubfestigkeit $f_{v,eff,05}$ im Schubnachweis der Stege berücksichtigt. Die Querkrafttragfähigkeit der Kielstegelemente wurde experimentell an insgesamt 12 Prüfkörpern im Biege-Schubversuch ermittelt [5].

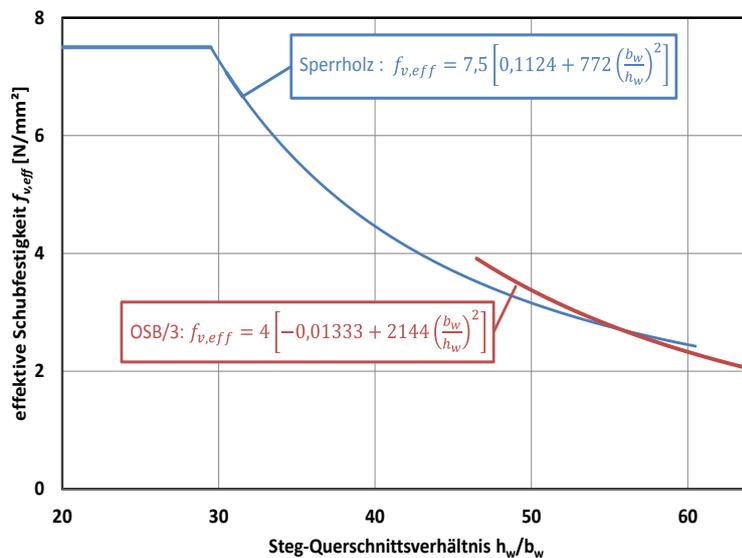


Abbildung 12: Dargestellt ist der Materialabhängige Zusammenhang zwischen Stegslankheit (h_w/b_w) und effektiver Schubfestigkeit $f_{v,eff}$.

3.5. Stegkrümmung

Um Überbeanspruchungen der Stegplatten im Zuge der Produktion zu vermeiden, sind die Biegespannungen der Platten am Übergang zum Gurt begrenzt. Je nach Stegmaterial, Stegdicke und freier Steghöhe ergeben sich maximal zulässige Stegdrehwinkel für die Stege [6].

- Biegelinie

$$w(x) = \frac{b_f}{4} \cdot \left[1 + 3 \frac{x}{h_w} - 4 \left(\frac{x}{h_w} \right)^3 \right]$$

- Biegerandspannung an der Gurt-Stegeinspannung

$$\sigma_{m,90} = 3 \cdot \tan \psi \cdot b_w \cdot E_{m,90}$$

- Realisierter Drehwinkelbereich

$$8^\circ < \psi < 15^\circ$$

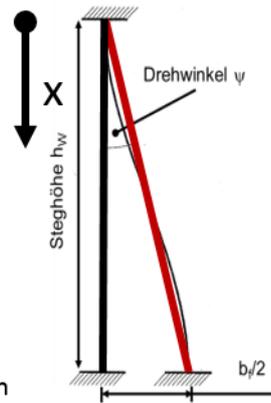


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Stegdrehwinkel und Biegespannung der Stege.

3.6. Verformung

Bei weitgespannten Biegeträgern stellt üblicherweise der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit das Bemessungskriterium dar. Der Durchbiegungsnachweis darf unter Ansatz des vereinfachten Querschnittsmodells unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Steifigkeitskennwerte der verschiedenen Materialien geführt werden. Aufgrund der behinderten Querkontraktion der Gurtquerschnitte darf der wirksame E-Modul der Gurtlagewie folgt berücksichtigt werden:

$$E_{0,\text{mean},f} = E_{0,\text{mean}} / (1 - \nu^2) \quad \nu = 0,2 \quad [7]$$

Aus produktionstechnischer Sicht ist eine Überhöhung der Elemente mit einem konstanten Radius von 970 m möglich. Bei einer Spannweite von 25,0 m entspricht dies etwa $l/300$.



Bild 14: Zeigt ein überhöhtes Kielstegelement im eingebauten Zustand.

3.7. Brandverhalten

Die brandtechnischen Untersuchungen der Kielstegelemente wurden am Institut für Brand- und Sicherheitsforschung Linz durchgeführt. In Abhängigkeit der Gurtstärke ist die Einstufung der Elemente in die Klassen REI 30 und REI 60 möglich. Die Bemessung im Brandfall erfolgt gemäß EN 1995-1-2. Die Abbrandrate ist mit $\beta_0 = 0,656 \text{ mm/min}$ anzunehmen [8].

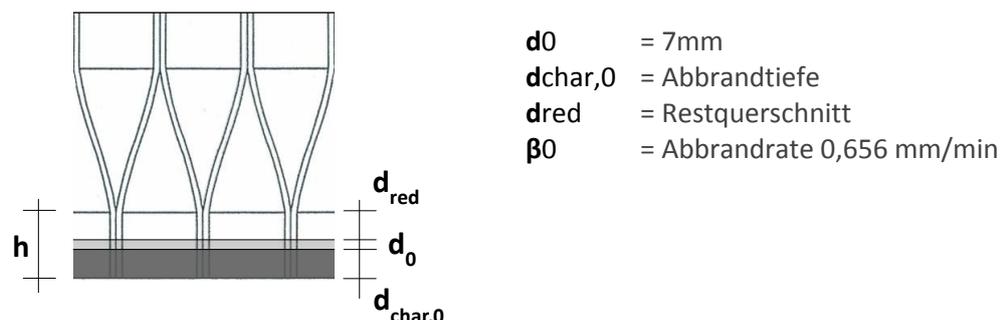


Bild 15: Relevante Querschnittabmessungen zur Abbrandberechnung gemäß EN 1995-1-2.

3.8. Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung

Im März 2013 wurde die allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) erteilt. Die vorangegangenen analytischen und experimentellen Untersuchungen dazu fanden an der MPA Stuttgart statt.

3.9. Die Fertigung



Bild 16: Automatisierte Kielstegproduktionsanlage

Die erste und derzeit einzige Kielstegproduktionsanlage läuft seit dem dritten Quartal 2011 bei der Firma Kulmerin in Österreich. Das effiziente Fertigungsprinzip ist der Schlüssel für die enorme Skalierbarkeit der Elementbauhöhe, die von 228 mm bis 800 mm reicht. Die Vorteile einer stehenden Verpressung wurden zur Fertigungsmöglichkeit von geraden und ihrer Hauptspannungsrichtung entlang überhöhten Elementen ausgebaut. Die automatisierte Kielstegfertigungsanlage hat eine Kapazität von ca. 35.000 m² pro Jahr im Einschichtbetrieb. Die Herstellung eines 35 m langen, geraden oder überhöhten und 1,2 m breiten Elementes benötigt durchschnittlich 20 Minuten und wird dabei von zwei Mitarbeitern betrieben.

Das Grundprinzip der Anlage beruht auf zwei parallel laufenden Arbeitsstrecken, in denen die beiden Grundmaterialien, die Stegplatten (OSB und Sperrholz) und Fichtenholzplatten, in Einzelteilen zu Strängen von bis zu 35 m gefügt und verleimt werden.

Durch Übereinanderlegen der beiden Arbeitsstationen werden die beiden Stränge miteinander verbunden und in eine stehende Presse gefördert.



Abbildung 17: Pressvorgang von beleimten und gestapelten Ober- und Untergurtlagen.

Die Abbildungen 18 - 23 zeigen in chronologischer Reihenfolge das Zusammenfügen eines Kielsteg- Grundsystems, bestehend aus einer Ober- und Untergurtlage.

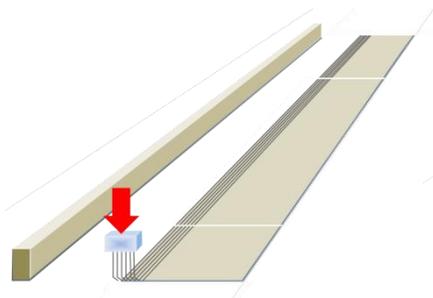


Abbildung 18: Beleimen des Plattensteges

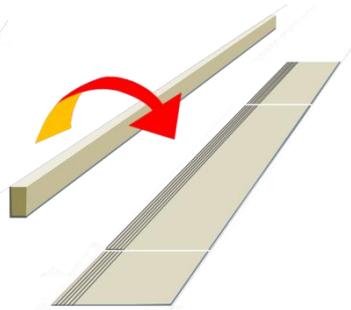


Abbildung 19: Aufsetzen des Gurtes am Plattensteg

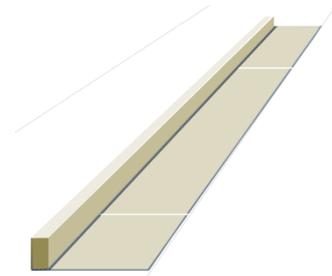


Abbildung 20: Gurt und Steg bilden eine Obergurtlage

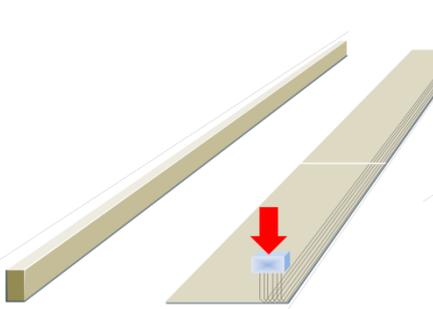


Abbildung 21: Beleimen des Plattensteges

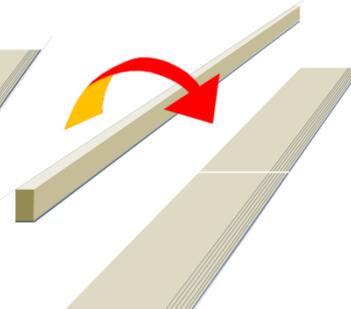


Abbildung 22: Aufsetzen des Gurtes am Plattensteg

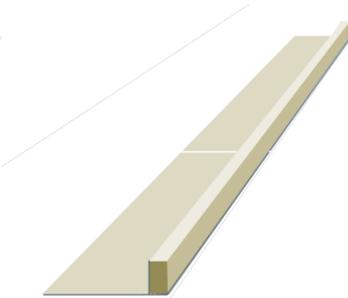


Abbildung 23: Gurt und Steg bilden eine Untergurtlage

3.10. Hobelung und Profilierung

Die allseitige Formatierung der Kielstegelemente erfolgt in einem einzigen Arbeitsgang. Die Hobelmaschine ist für die volle Flexibilität zur Höhen- und Breitenbearbeitung ausgelegt.

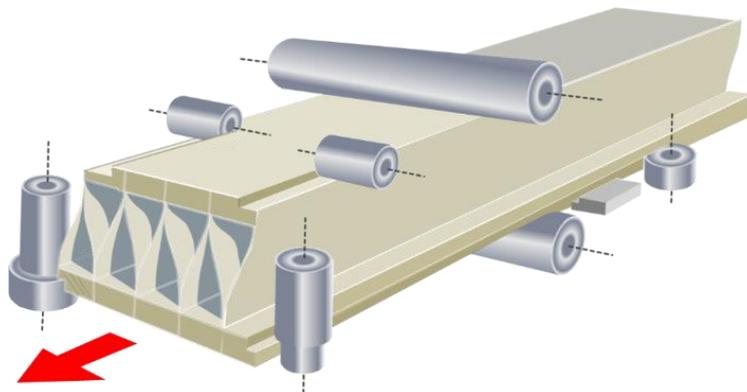


Abbildung 24: Arbeitsprinzip der Hobelanlage

Dies ermöglicht die Bearbeitung der Elementhöhen von 228 mm bis 800mm mit der hohen Anforderung die Präzision in einem Toleranzbereich von ± 2 mm auf einer Länge von 35 m zu halten. Auch alle gekrümmten Kielstegelemente aller Dimensionen werden auf dieser Maschine allseitig formatiert. Nach dem Hobeln werden die Elemente lediglich auf Ihre benötigte Länge zugeschnitten und sind damit montagefertig.



Abbildung 25: Zeigt ein gekrümmtes Kielstegelement nach der Hobelung.

4. Resümee

Kielsteg ist heute ein erprobtes Holzbauelement. Für große Bauhöhen, wie in Abbildung 25 gezeigt, ist der Vorteil durch den niedrigen Materialverbrauch offensichtlich. Speziell bei Dach- und Deckenkonstruktionen von 6,0 bis 9,0 Meter ist der Vergleich mit etablierten Massivholzsystemen interessant. Das Kielstegsystem kann bis zu 30% mehr Bauhöhe bei gleichem Material-Input realisieren, was in der Regel bis zu einem Meter mehr Spannweite ermöglicht.

Das Produkt erreicht seinen wirtschaftlichen Break-Even bei recht kleinen Mengen von ca. 25.000 m²/Jahr und dies zu branchenüblich Margen. Das Beispiel der Firma Kulmer als Lizenznehmer der Kielstegtechnologie zeigt, dass Investitionen gerade in der Phase wirtschaftlicher Spannungen ein Weg war, um weiteres Wachstum zu ermöglichen und langfristig wirtschaftliche Perspektiven auszubauen.

Die Entwicklung von Kielsteg ist beispielhaft für eine gelungene Zusammenarbeit der Erfinder, Universitäten und des Produzenten. Die Basis der Entwicklung war der Ansatz des leistbaren Wohnens und damit die Suche nach einer kostengünstigen und flexiblen Systembauweise aus Holz. Gemeinsam mit den kreativen Lösungsansätzen für die Fertigung dieses vierteiligen Querschnitts konnte die Basis für den Prozess einer professionellen Produktentwicklung gelegt werden. Die Förderinstrumente für Forschung und Innovation konnten für Kielsteg vielseitig genutzt werden. Doch erst die Gründung der Firma Kielsteg und der Schritt von einer gewerblichen zu einer industriellen Fertigung ermöglichten den Schritt zu einem hochwertigen Industrieprodukt.

Inzwischen ist Kielstegeine patentierte, zugelassene und lizenzierbare Technologie mit einer Produktionsreferenz und einer Vielzahl von Referenzprojekten. Die Firma Kielsteg und Kulmer haben begonnen, in den an Österreich angrenzenden Ländern mit Direktvertriebspartnern zu arbeiten. Damit ist der Schritt auf überregionale Märkte gemacht, der in den nächsten Jahren konsequent ausgebaut wird.

5. Literaturangaben

- [1] OECD, Umweltausblick bis 2030, 2008.
- [2] ZMP GMBH, leicht und weit gespannt, in architektur aktuell!, September 2014, Heft 414.
- [3] bis [7] Prüfbericht 51210-902.2784.000/4 vom 06.07.2012 der MPA Stuttgart zur Erteilung einer bauaufsichtlichen Zulassung für Kielstegelemente.
- [8] Prüfbericht 08080520 vom 18.01.2010 des Instituts für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung Linz „Selbst- und lastabtragende sowie raumabschließendes Kielstegelement mit Stößen“.