



*Beat Lauber
dipl. Ing. FH
Lauber, Ingenieure für
Holzbau & Bauwerkserhalt
Luzern, Schweiz*

Ertüchtigung von Holz- tragwerken

Beispiele aus der Praxis

Ertüchtigung von Holztragwerken

Beispiele aus der Praxis

Inhalt

Dieser Beitrag beschreibt die Vorgehensweise bei der Ertüchtigung bestehender Holztragwerke. Neben den wichtigsten Grundregeln werden verschiedene Beispiele aus der Praxis näher erläutert. Es wird auf verschiedene Problemstellungen eingegangen und deren Lösungen aufgezeigt.

Einleitung

Bei der Ertüchtigung von Holztragwerken steht das Bemühen dahinter, möglichst viel Bausubstanz zu erhalten. Das setzt voraus, dass bei Schäden die Schadensursache bekannt ist und dass der Planer sich mit den Sanierungsmassnahmen auskennt. Bevor mit den Reparaturen oder den Verstärkungsmassnahmen begonnen wird, ist die Schadensursache zu beseitigen. Eine detaillierte Zustandsanalyse des geschädigten Tragwerks ist als Grundlage für eine optimale Massnahmenplanung erforderlich. Schäden treten unabhängig vom Baustoff auf und sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Grundsätzlich kann die Ursache des Fehlers in der Planung, in der Produktion/Montage oder in der Betriebsphase liegen.

Sanierungsvorschlag

Beim Erarbeiten des Sanierungsvorschlags sind in der Regel die Interessen von verschiedenen Parteien zu berücksichtigen. Lösungsmöglichkeiten müssen je nach Bauwerk in enger Zusammenarbeit mit Tragwerksplaner, Architekt, Eigentümer, Historiker und Restaurator, Denkmalpfleger, Handwerker sowie den involvierten Behörden erarbeitet werden.

Neben der Bewahrung einer ausreichenden Tragsicherheit, Steifigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind folgende Parameter von Bedeutung:

- Erhalten des kulturellen Wertes des Bauwerks sowie dessen Aussehen
- Erhalten des wirtschaftlichen Wertes des Bauwerks unter Berücksichtigung der Betriebs- und Erhaltungskosten
- Wahrnehmen der gesetzlichen Verantwortung der Eigentümerschaft
- Verhältnismässigkeit des Sanierungsvorschlages
- Verfügbare Zeit, Materialien, Handwerker und Technologien

Vorgehen zur Tragwerksanierung

Neben den gültigen Tragwerksnormen SIA 260 - 265 bildet die SIA 462 „Beurteilung der Tragsicherheit“ sowie die SIA - 469 „Erhaltung von Bauwerken“ die Grundlage für die Sanierung von Bauwerken in der Schweiz.

Bei der Beurteilung von Sanierungsmassnahmen wird zwischen Sofortmassnahmen, kurz-, mittel-, und langfristigen Massnahmen unterschieden. Eine den Anforderungen ungenügende Tragstruktur kann durch verschiedene Massnahmen verstärkt werden. Einerseits besteht die Möglichkeit die Tragstruktur zu verstärken, ohne das statische System zu verändern. Andererseits kann die Verstärkung durch Umlagerung der Schnittkräfte ausgeführt werden, z.B. mittels zusätzlichen Bauteilen/Konstruktionen unter Beibehaltung der bestehenden Spannweite oder durch die Reduzierung der Spannweite. Dies geschieht zum Beispiel durch den Einbau einer Unterspannung. Auf diese Art werden die Biegemomente in Normalkräfte umgewandelt. Eine weitere Variante besteht darin, die Einwirkung von Grund auf fernzuhalten.

In der Praxis stehen folgende Vorgehen im Vordergrund:

- zusätzliche Lamellen aufleimen (Holz, CFK)
- Leimfugen sanieren
- Verstärkung mit eingeklebten Gewindestangen und Vollgewindeschrauben
- Holzwerkstoffe aufkleben
- Biegezugverstärkung mit aufgeklebten CFK-Lamellen
- Umschnürung mit CFK-Sheet als Schubverstärkung
- Umlagern der Schnittkräfte bei gleicher Spannweite
- Umlagern der Schnittkräfte bei verkleinerter Spannweite
- Einwirkungen fernhalten

Der Einsatz der Verstärkungsmassnahmen ist objektspezifisch anzupassen. In der Regel sind verschiedene Massnahmen erforderlich. Folgende Parameter haben einen grossen Einfluss auf das gewählte Vorgehen:

- Materialbeschaffung
- Zugänglichkeit
- Klima
- Querschnittswerte, Nettoquerschnitt, Trägerhöhen, Alter des Tragwerks
- Ursachenermittlung/Gefährdungsbild (Brand, Erdbeben, Stabilität, Witterung, Klima, etc.)

Im Folgenden werden verschiedene Methoden der Tragwerksanierung von Holztragwerken beschrieben.

Beispiel 1: Sanierung einer BSH-Pfette mit offenen Leimfugen

Trotz strenger Verarbeitungsrichtlinien können Risse in Brettschichtholzträgern nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Ursache für offene Fugen und Risse sind Verarbeitungsfehler, unzulässige Feuchteaufnahme bei Transport, Lagerung auf der Baustelle und unzulässige Überschreitungen der Querspannungen. Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine sichtbare Firstpfette, welche einige Monate nach dem Einbau offene Leimfugen aufwies. Neben der handwerklichen Ausführbarkeit und der Wirtschaftlichkeit hatte der Sanierungsvorschlag die Wiederherstellung der beeinträchtigten Schubtragfähigkeit sicherzustellen. Weiter war zu verhindern, dass Risse an gleicher oder anderer Stelle wieder auftreten können. Als eine Sanierungsmöglichkeit bot sich das Auspressen der Fugen mit Epoxydharz an, wie es schon seit längerer Zeit im Stahlbetonbau üblich ist. Dadurch konnte das äussere Erscheinungsbild beibehalten, sowie die Tragfähigkeit wieder hergestellt werden.

Für die Sanierung eines Trägers mit offenen Leimfugen, muss das Bauteil in einen spannungslosen Zustand versetzt werden. Dies erreicht man mit Abspriessungen und leichtem Anheben des betroffenen Bauteils. Vor dem Auspressen der Fugen werden diese mit einer Handfräse ausgefräst um die Fugen zu reinigen und von alten Leimrückständen zu befreien. Die Parameter Holzfeuchte, Raumtemperatur, Belüftung, Aushärtezeit haben einen grossen Einfluss auf den Erfolg der Sanierung und sind entsprechend zu beachten. Die ausgefrästen Fugen sind mit ölfreier Druckluft zu reinigen und im Bereich der Oberfläche abzukleben oder auszuspachteln. Anschliessend erfolgt das Ausinjizieren der Fugen mit Epoxydharz. Bohrungen mit möglichst kleinem Durchmesser erlauben das Einpressen des Harzes mit einer Handpresse. Nach erfolgter Injektion werden die Löcher mit Holzzapfen verschlossen und bei sichtbaren Bauteilen wird die Oberfläche geschliffen.

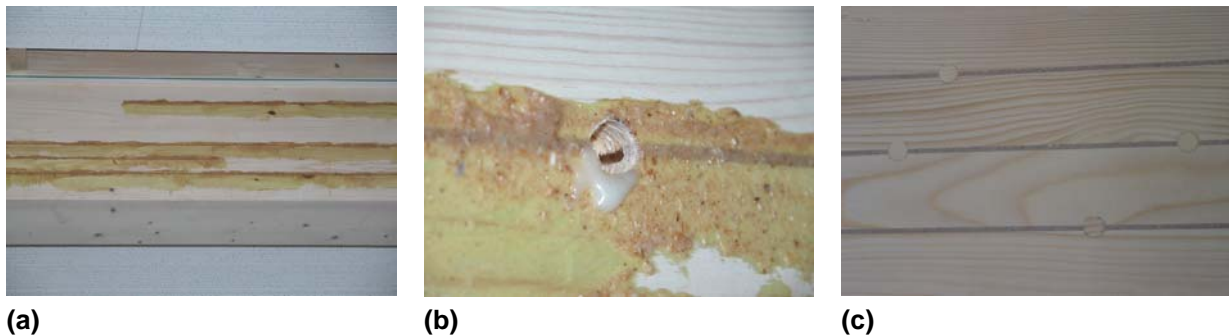


Bild 1: Nach dem Ausspachteln der Oberfläche mit Epoxydharz werden im Abstand von cirka 200 mm Löcher gebohrt. In diese wird mit einer Handpresse das Harz injiziert. Am Schluss wird das Bauteil geschliffen.

Das Auspressen der Leimfugen bringt folgende Vorteile:

- Das Verfahren und der dazu eingesetzte Klebstoff wurden vor cirka 25 Jahren in Deutschland entwickelt und entsprechende Langzeiterfahrungen liegen vor.
- Eine Bescheinigung vom FMFA in Stuttgart, für das speziell für dieses Verfahren entwickelte Epoxydharz des Herstellers Wevo, liegt vor. Darin wird die Eignung dieses Epoxydharzes für solche Sanierungen bestätigt.
- Die sanierten Leimfugen verfügen über die volle Tragfähigkeit und im Bereich der Anschlüsse wird die ursprüngliche Festigkeit wieder hergestellt. Dies wurde durch entsprechende Versuche im Massstab 1:1 bestätigt.
- Die Bauteile können jederzeit nachkontrolliert werden, da sie nicht abgedeckt sind.

Das Auspressen von offenen Leimfugen erfolgt in der Regel zusammen mit der Behebung der Schadensursache wie Querszugverstärkungen, etc..

Beispiel 2: Gebogener Satteldachbinder mit Querszugversagen

Durch die hohe Schneelast im Februar 2006 bildeten sich Risse in den Satteldachbinder einer Werkhalle im Grossraum Zürich. Die rechnerische Prüfung ergab eine grosse Überschreitung der zulässigen Querszugspannungen im Firstbereich. Bei der Zustandserfassung stellte man fest, dass die Risse immer im Bereich der Leimfugen auftraten. Anhand dieser Erkenntnis entschieden wir uns, die Festigkeit der Leimfugen genauer zu untersuchen. Prüfungen im Labor sollten darüber Auskunft geben, ob der Klebstoff die Anforderungen an die Schubfestigkeit erfüllt oder nicht.

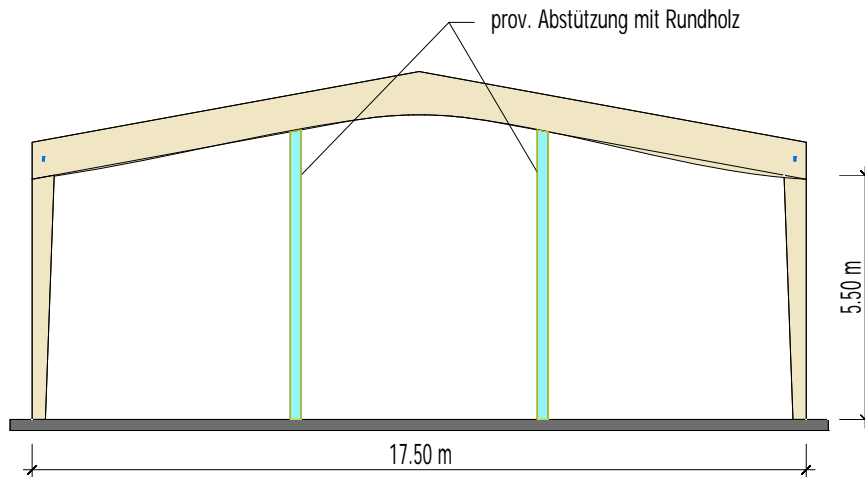
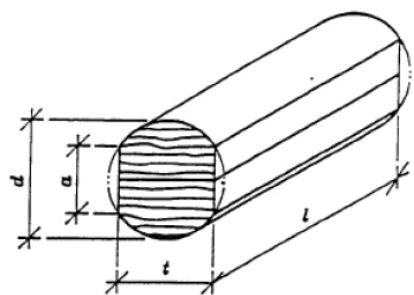


Bild 2: provisorische Abstützung mit Rundholz zur Verringerung der Schnittkräfte als Sofortmassnahme.

Als Sofortmassnahme wurden die Schnittkräfte reduziert. Die einfachste und effizienteste Methode zur Verkleinerung der Schnittkräfte stellt das zusätzliche Abstützen des Tragwerks dar. Dieses Vorgehen beschränkt sich jedoch in der Regel auf Sofort- oder kurzfristige Massnahmen, da das konstruktive Konzept verändert wird. Die ursprüngliche Erscheinung und Authentizität gehen zum Teil verloren. Für die Abstützungen eignet sich vor allem der Einsatz von Rundholz – es ist günstig, schnell erhältlich und wieder verwendbar. Durch den Ingenieur ist zu prüfen, ob der Boden bzw. das Terrain die Lasten aufnehmen kann. Je nach Bodenbeschaffenheit sind Schwellen zur Druckverteilung oder sogar Fundamente notwendig.

Zur Bestimmung der Scherfestigkeit der Verleimung wurden am verbauten Brettschichtholz Prüfkörper entnommen und gemäss untenstehender Skizze für die Scherprüfung bearbeitet **(A)**, **(B)**.

Der Faserbruchanteil wurde visuell bestimmt. Durch Einfärbung **(C)** der Scherflächen konnte der Anteil von Kohäsionsbruch bzw. Adhäsionsbruch festgestellt werden.



Maße: Länge, l 70 mm bis 80 mm
 Durchmesser, d : \approx 35 mm
 ebene Flächen, a : \approx 23 mm
 Dicke, t : \approx 26 mm



(A)

(B)

(C)

Bild 3: Prüfkörper für Scherprüfungen

Die Prüfung zeigte, dass die Festigkeit des Klebstoffes die Anforderungen nicht ganz erfüllte. Auf dieser Grundlage konnte ein Massnahmenplan erarbeitet und die Sanierung ausgeführt werden.



Bild 4: Satteldachbinder mit grossen Rissen im Bereich der Rundung unter dem First.

Mit dem Einbau von je zwei Zugstangen konnten die Biegemomente im Binder und somit auch die Querspannungen deutlich reduziert werden. Bei den Schubspannungen zeigte sich eine genügende Reserve gegenüber den anhand der Proben ermittelten Festigkeiten. Mit der Vorspannung der Zugstangen war es möglich, die Binder wieder in die ursprüngliche Position zu bringen. Anschliessend wurden die offenen Fugen mit Epoxydharz Injektionen saniert.

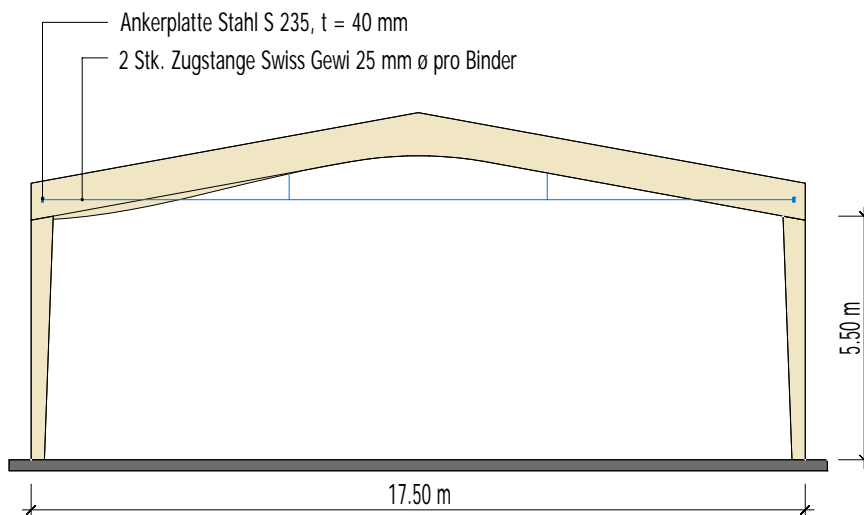


Bild 5: Ertüchtigung eines Satteldachbinders mit dem Einbau von Zugbändern.

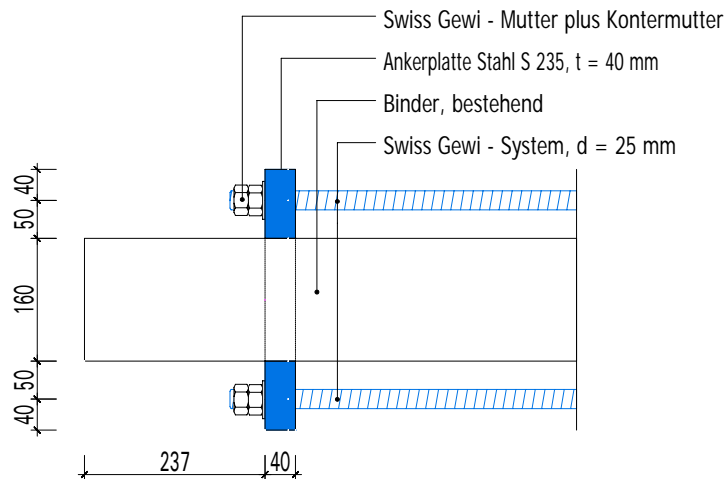


Bild 6: Anschluss der Zugbänder an die bestehenden Satteldachbinder.

Der Einbau von zusätzlichen Bauteilen ist eine sehr effiziente Art zur Sanierung von überbeanspruchten Tragwerken. Stahlseile oder Stahlstangen können eingesetzt werden um die Tragfähigkeit und Steifigkeit eines einzelnen Bauteils oder des Gesamtsystems zu erhöhen. Mit Spannschlössern lassen sich die Zugkräfte einstellen, entweder um einen Träger vorzuspannen, oder um übermässige Verformungen zu vermeiden. Regelmässiges nachspannen kann notwendig werden um Kriechen, Quellen und Schwinden, hervorgerufen durch Feuchteänderungen, auszugleichen. Ein weiterer Vorteil von Zugstangen aus Stahl ist die Abgrenzung gegenüber dem Holztragwerk bei Bauten unter Denkmalschutz. Die alte Bausubstanz bleibt nahezu erhalten und die eingebauten Verstärkungen sind reversibel. Die neuen Bauteile treten als Unterstützung der alten Elemente in Erscheinung.

Beispiel 3: Umschnürung mit CFK-Sheets als Schubverstärkung

Der Riegel eines 2-Gelenkrahmens in einer schneereichen Gegend musste im Eckbereich bezüglich der Schubkräfte verstärkt werden. Zwischen den Bindern sind die Sparrenpfetten in einem engen Abstand mittels Vollgewindeschrauben befestigt. Über dem Binder liegt die Dachschalung mit Dämmung und einer Blecheindeckung. Eine Sanierung von oben war ausgeschlossen, das Zurückschneiden der Sparrenpfetten infolge der Verschraubung nur mit grossem Aufwand möglich. Deshalb wurde die Ertüchtigung mit einer Umschnürung der Bauteile mit CFK-Sheets ausgeführt. Die Umschnürung des Bauteils mit einem hochmoduligen Karbongewebe eignet sich vor allem als zusätzliche Schubverstärkung. Idealerweise wird das Bauteil mit einem CFK-Sheet umwickelt, eine dreiseitige Applikation ist jedoch auch möglich. Die aufgeklebten CFK-Sheets hatten gegenüber einem plattenförmigen Werkstoff den Vorteil, dass sie zwischen den Sparrenpfetten montiert werden konnten und trotzdem die grossen Schubkräfte aufzunehmen vermögen. Weiter mussten dadurch die Sparrenpfetten nicht mit grossem Aufwand verkürzt sowie der vorhandene Querschnitt nicht durch Bohrungen und Schlitzte zusätzlich geschwächt werden. Ein anderer Vorteil ist die geringe Auftragsdicke von ein paar wenigen Millimetern. Die aufgeklebten CFK-Sheets weisen die gleiche Steifigkeit auf wie die Leimfugen im Holz. Deshalb konnte für die Dimensionierung die Querkraft anteilmässig auf die aufgeklebte CFK-Lamelle und das Leimholz verteilt werden. Um die Wirksamkeit zu gewährleisten, mussten im Bereich der Sheets die offenen Fugen zuerst mit Epoxydharz ausgepresst und die Holzoberfläche geschliffen und entsprechend grundiert werden. Eine zusätzliche Lamelle mit abgerundeten Kanten im unteren Bereich sorgt für den optimalen Kraftfluss im Sheet. Voraussetzung für eine derartige Instandstellung ist ein konstantes Raumklima und somit konstanter Holzfeuchte. Die Sanierungsarbeiten sind durch ausgewiesene Fachkräfte auszuführen.



Bild 7: Aufgeklebte CFK-Sheets als Schubverstärkung bei einem Gratsparren.

Als Sofortmassnahme wurde das Fernhalten der Nutzlasten gewählt. Eine Schliessung des Gebäudes war nicht verhältnismässig sowie undenkbar. Das Fernhalten von Einwirkungen ist als Sofortmassnahme sehr geeignet und kann sehr wirtschaftlich sein. Es ist aber abhängig vom jeweiligen Gefährdungspotential. Nutzungsbeschränkungen, erstellen eines Notdaches, Installation einer Dachheizung, ein Notfallplan mit Pikettdienst für die Schneeräumung sowie eine Temporeduktion bei Brücken sind dieser Kategorie zuzuordnen.

Beispiel 4: Bogenbinder mit Querzugversagen

Die Bogenbinder von einer Dachkonstruktion wiesen Risse auf, teilweise durchgehend über die ganze Trägerbreite. Die Analyse der Risstiefen und deren Länge dienten als Grundlage für die Weiterbearbeitung und ergaben einen Überblick des Schadenausmasses.

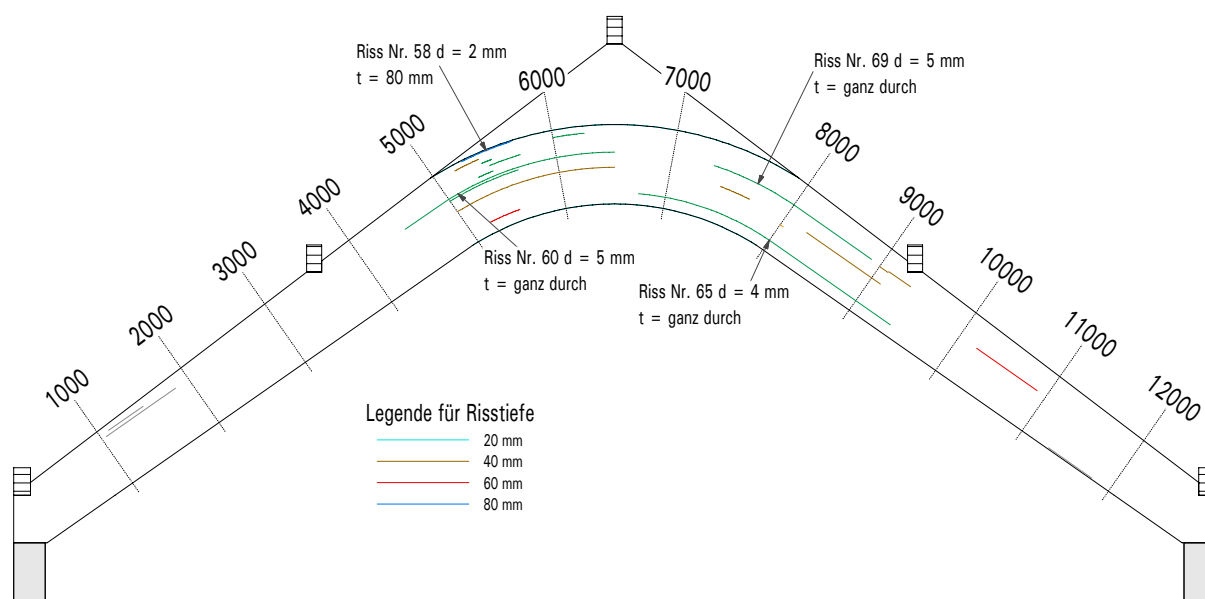


Bild 8: Analyse des Bogenbinders inkl. Bezeichnung und Vermessung der Risstiefen.

Eine statische Berechnung der Träger mit der heute üblicherweise verwendeten Holzqualität GL24h ergibt, unter der Annahme dass der Querschnitt unbeschädigt und im Rundungsbereich querzugverstärkt ist, eine maximale Auslastung von 57 %. Die Träger weisen aber folgende Mängel auf:

- Die Verleimung der Lamellen erfüllt nicht die Anforderungen.
- Die Träger weisen Risse in den Leimfugen aus klimatischen Beanspruchungen (Schwinden) auf.
- Die Träger weisen Risse in den Leimfugen aus Querzugspannungen im Rundungsbereich auf.
- Die Lamellen der Träger sind stumpf gestossen und schwächen somit den Zugbereich.

Dadurch ist die Auslastung, insbesondere der Schub- sowie der Querzugspannungen, deutlich höher. Unter der Annahme, dass die Träger infolge der Schwächungen nur zu etwa 50 % tragfähig sind, ergibt sich eine Ausnutzung von 114 %. Bei genauer Betrachtung der Querzugspannungen im Rundungsbereich resultieren Ausnutzungen von bis zu 500 %.

Eine absolute Resttragfähigkeit der Träger kann nicht angegeben werden, da sie durch mehrere nicht quantifizierbare Faktoren beeinflusst wird.

Im Rahmen der Sanierung wurden die offenen Leimfugen saniert, die Binder im Firstbereich mit Querzugverstärkungen verstärkt sowie zusätzliche Zugbänder eingefügt.

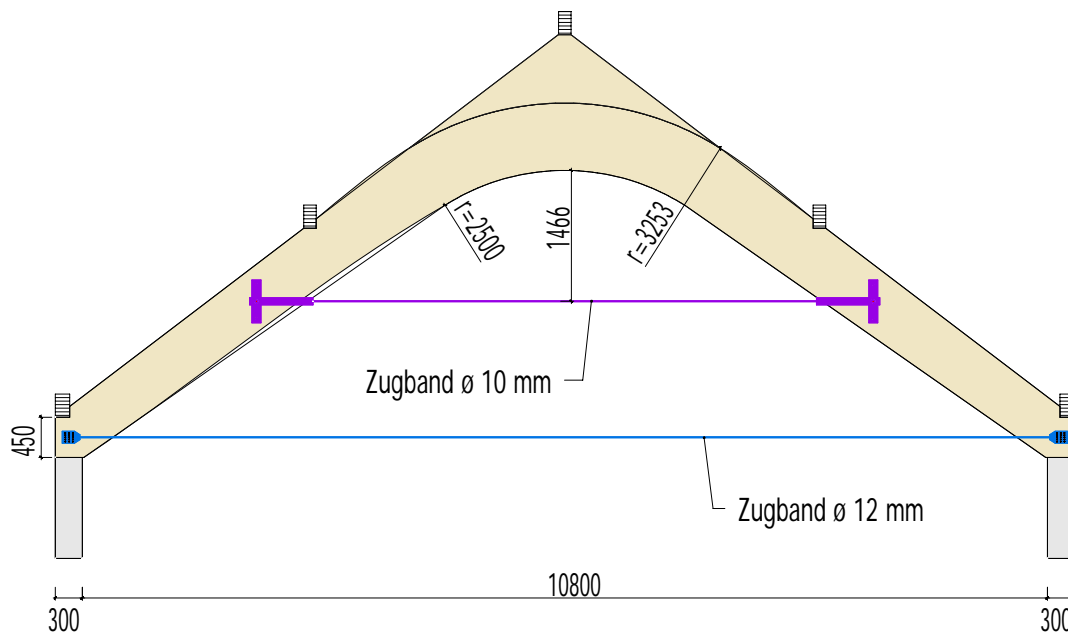


Bild 9: Sanierungsmassnahmen des Bogenbinders:
ein zusätzliches Zugband wurde zum bestehenden Zugband eingebaut.

Beispiel 5: Eingespannte Rahmenecke mit Querzugversagen

Bei einer Turnhalle führten hohe Schnittkräfte, fehlerhafte Verleimungen und Klima-Einflüsse zu Rissen in den Brettschichtholz-Stützen. Die Diagnose der Zustandsbeurteilung lautete: Querzugversagen der konisch angeschnittenen Stützen. Die Ertüchtigung der Stützen beinhaltete einerseits die Sanierung der gerissenen Leimfugen, sowie das Eindrehen von Vollgewindeschrauben zur Aufnahme der Querzugkräfte.

Die Leimfugenfestigkeiten sind gemäss Prüfung der entnommenen Bohrkern zu klein. Die Biege- und Torsionsspannung muss bei vorliegendem Schrägfaserverlauf um rund 60 % abgemindert werden. Zusätzlich ungünstig auf das Tragverhalten wirkt sich ein allfälliger Schrägfaserverlauf von den verleimten Brettern aus.



Bild 10: Stütze mit durchgehendem Riss.

Beispiel 6: Satteldachbinder mit zu geringer Schubfestigkeit

In diesem Fall war der Träger dreiseitig zugänglich und konnte auf einfache Weise im Auflagerbereich mit Furniersperrholz verstärkt werden. Diese wurden mittels Schraubpressleimung aufgebracht. Spannungen, besonders Schubspannungen und Zugspannungen, die der Konstruktion nicht mehr zugemutet werden sollen, können durch aufgeklebte Holzwerkstoffplatten aufgenommen werden. Ästhetische Gesichtspunkte, das Platzverhältnis und die Zugänglichkeit sind in der Planung zu berücksichtigen.



Bild 11: Satteldachträger mit aufgeklebten Furnierschichtholz – Schubverstärkungen.

Beispiel 7: Durchlaufräger mit zu geringer Schubfestigkeit

Bei der Überprüfung eines Zweifeldträgers zeigte sich, dass die Schubspannungen im Bereich der Auflager überschritten wurden. Die Pfette ist sichtbar, womit eine Verstärkung mit einer aufgeklebten Holzwerkstoffplatte nicht mehr möglich war. Erschwerend wirkte sich auch aus, dass auf der linken Seite unmittelbar eine Wand anschloss. Es wurde als unverhältnismässig betrachtet, für eine Sanierung die ganze Wand auszubauen. Nach einem intensiven Variantenstudium entschieden wir uns für eine Ertüchtigung mit Vollgewindeschrauben. Vollgewindeschrauben sorgen für eine Querarmierung der Bauteile und tragen zur Ertüchtigung der Schubfestigkeit bei. Vollgewindeschrauben erlauben eine Montage mit einfachen Mitteln. Ein am Schluss montiertes Abdeckbrett schliesst die Einschraublöcher. Querschnittsminderungen infolge der Schrauben sind bei der Dimensionierung zu berücksichtigen. Es ist zu beachten, dass Schubbewehrungen mittels eingeschraubten Vollgewindeschrauben erst zur Tragwirkung kommen, wenn bereits Schubrisse eingetreten sind. Im vorliegenden Fall wurden die Schrauben dimensioniert, für den Lastfall Schnee als aussergewöhnliche Einwirkung.



Bild 12: Pfette mit diagonal eingedrehten Vollgewindeschrauben als Schubverstärkung.

Beispiel 8: Gratsparren mit Biegezugverstärkung

Ein sichtbarer Gratsparren musste verstärkt werden, weil die Biegespannungen deutlich überschritten wurden. Das Bauteil reichte durch eine Zwischenwand in einen zweiten Raum. Eine Ertüchtigung mit zusätzlichen aufgeklebten Holzlamellen wurde ausgeschlossen, weil dadurch der Träger aus ästhetischen Gründen zu hoch wurde. Zudem war ein „Einfahren“ der relativ steifen Lamellen durch die Zwischenwand nicht möglich, die Zwischenwand hätte mit grossem Aufwand demontiert werden müssen. Aus diesem Grund entschied man sich für die Ertüchtigung mit schlaff aufgeklebten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Diese sind relativ flexibel und können auch in engen Raumverhältnissen und sogar durch kleine Aussparungen hindurch montiert werden.

Mit der Technik des Anklebens steht eine schnelle und wirtschaftliche Methode zur Verfügung. Am Schluss wurde die Lamelle mit einer Holzlamelle abgedeckt.



Bild 13: Gratsparren mit schlaff aufgeklebten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK).



Bild 14: Die CFK-Lamellen lassen sich aufrollen und sind deshalb besonders gut geeignet für enge Raumverhältnisse.

Der Einleitungsbereich der Lamellenzugkraft in den verstärkten Baukörpern stellt einen besonders gefährdeten Bereich der Verbundzone dar. Eine unzureichende Verankerungslänge führt zu einer Entkoppelung der Lamelle und somit zum Bruch der Klebeverbundverankerung. Besonders ökonomisch ist die Anwendung zur Aufnahme von Biegespannungen bei Mehrfeldträgern im Bereich der Auflager. Die Lamellen können flächig auf das Bauteil geklebt oder nahezu unsichtbar in eingefräste Nuten eingeklebt werden. Diese Methode wird mit Erfolg bei alter, unter Denkmalschutz stehender Bausubstanz angewandt. Der geringe Auftrag durch die Lamelle und das einfache Handling auch bei grossen Trägerlängen, machen diese Lösung gegenüber Holzlamellen interessant.

Zusammenfassung

Die optimale Ertüchtigung eines Tragwerks erfordert einen objektspezifischen Sanierungsplan, der die Interessen von verschiedenen Parteien sowie die Vielzahl von Sanierungsmöglichkeiten berücksichtigt. Neben der handwerklichen Ausführbarkeit sind auch die wirtschaftlichen Aspekte mit einzubeziehen. In der Regel sind verschiedene Massnahmen erforderlich. Nutzungsvereinbarung, Projektbasis sowie die Unterhalts- und Überwachungspläne sind an die neuen Gegebenheiten anzupassen.

Die Möglichkeiten zur Ertüchtigung von Holztragwerken sind sehr gross. Neben Holzwerkstoffen, verschiedenen Arten von mechanischen Verbindungsmittel, wie eingeklebte Gewindestangen oder Vollgewindeschrauben, werden auch schlaff aufgeklebte kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) mit Erfolg eingesetzt. Eine erfolgreiche Sanierung setzt voraus, dass bei Schäden die Schadensursache bekannt ist, und dass der Planer sich mit den Sanierungsmassnahmen gut auskennt.