

Bestandsanalyse und Instandsetzung von Holzkonstruktionen VO (208.476)

Technischer Bericht



SS 2023

Betreuer: DI Andreas Meisel

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	3
1. Projektbeschreibung.....	4
1.1. Tragwirkung	4
1.2. Fotodokumentation	5
1.3. Messergebnisse.....	8
2. Zustandsbeurteilung	10
3. Instandsetzungsarbeiten.....	14
3.1. Holzfeuchtigkeit – Belüftung des Dachraumes	14
3.2. Kippender Bundtram Stichbalken	14
3.3. Pilzbefall Wechselbalken	16
3.4. Fehlendes Kopfband.....	17
4. Knotenbereich 1: Mauerwerk – Mauerbank – Sparren – Aufschiebling – Mauerbank-Stoß.....	18
4.1. Beschreibung	18
4.2. Verbindung	18
4.3. Beschreibung der Lasten.....	20
4.4. Schäden und Instandsetzung	20
5. Knotenbereich 3: Stuhlsäule-Rähm-Spannriegel-Kehlbalken	22
5.1. Beschreibung	22
5.2. Beschreibung der Lasten.....	24
5.3. Verstärkung und Instandsetzung des Knotens	25
6. Knotenbereich 4: Stuhlsäule-Kehlbalken-Spannriegel-Kopfband.....	26
6.1. Allgemeines	26
6.2. Verbindungen	26
6.3. Kraftverteilung.....	29
6.4. Schäden.....	29
6.5. Bemessung.....	29
7. Anhang	30
7.1 Pläne.....	30
7.2 Knotenberechnungen	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ansicht auf Bauwerk.....	4
Abbildung 2: Luftbild Schloss Klaffenau	5
Abbildung 3: Ebene 1	5
Abbildung 4: Ebene 2	6
Abbildung 5: Stuhlwand zwischen Vollgespärre IIII und VII	6
Abbildung 6: Wechsel im Bundtram aufgrund des Stiegenaufganges	7
Abbildung 7: eingeschlagene Elektrode für Holzfeuchtemessung	8
Abbildung 8: Bohrwiderstandsmessung an der Verbindung Stuhlsäule - Bundtram....	9
Abbildung 9: Ergebnis einer Bohrwiderstandsmessung	9
Abbildung 10 Zapfenloch in Stuhlsäule von fehlendem Kopfband	12
Abbildung 11: geneigter Kehlbalken/Spannriegel.....	13
Abbildung 12: Nahaufnahme der Neigung des Kehlbalkens/Spannriegels.....	13
Abbildung 13: Pilzbefall Wechselbalken.....	13
Abbildung 14: Wechselbalken Vollgespärre VII Bereich Stiegenaufgang	14
Abbildung 15: Neigung des Stichbalkens	14
Abbildung 16: Instandsetzung Bundtram (Quelle: Jerome Ortner; Instandsetzungshandbuch für historische Dachwerke und deren Verbindungen)	15
Abbildung 17: Pilzbefall am Wechselbalken.....	16
Abbildung 18: fehlendes Kopfband.....	17
Abbildung 19: Knotenbereich 1	18
Abbildung 20: Bohrwiderstandsmessung	19
Abbildung 21: Bohrwiderstandsmessung Verbindung Stuhlsäule - Bundtram	19
Abbildung 22: Verbindung Sparren, Bundtram, Schwelle und Aufschiebling	20
Abbildung 23: Verbindung Stuhlsäule und Bundtram.....	21
Abbildung 24: Instandhaltung Mauerbank	21
Abbildung 25: Stahlseile von Schwelle zu Bundtram	21
Abbildung 26: Knotenbereich 3 Übersicht	22
Abbildung 27: Zapfenloch mit Holznägeln, fehlendes Kopfband	23
Abbildung 28: Bohrwiderstandsmessung Schräger Zapfen Stuhlsäule – Kehlbalken	24
Abbildung 29: Auswertung Bohrwiderstandsmessung	24
Abbildung 30: Knotenbereich 4 Übersicht	26
Abbildung 31: Verbindung Stuhlsäule - Spannriegel - Kehlbalken.....	27
Abbildung 32: Bohrwiderstandsmessung Verbindung Stuhlsäule - Spannriegel.....	27
Abbildung 33: Verbindung Stuhlsäule - Kopfband.....	28
Abbildung 34: Bohrwiderstandsmessung Kammverbindung.....	28

1. Projektbeschreibung

Beim untersuchten Objekt handelt es sich um den Dachstuhl von Schloss Klaffenau in Hartberg in der Steiermark. Es wurde im 17. Jahrhundert errichtet. Datum der Begutachtung war der 23. Mai 2023. Das Dachtragwerk ist als Kehlbalkendach mit liegendem Stuhl in drei Eben aufgebaut. Zwischen den Vollgespärren sind jeweils zwei Leergespärre angeordnet, konkret untersucht wurde das Vollgespärre mit der Nummer sieben und das danebenliegende Leergespärre Nummer sechs. Die Spannweite der Dachkonstruktion beträgt 1.275 m.



Abbildung 1: Ansicht auf Bauwerk

1.1. Tragwirkung

Die Lastabtragung des Kehlbalkendaches erfolgt über ein geschlossenes, unverschiebliches Dreieck. Die Sparren leiten die Druckkräfte über die Mauerbank in das Mauerwerk ab. Über den Bundtram wird das Dreieck geschlossen. Der Bundtram übernimmt die Zugkräfte, die die Sparren zusammenhalten. Der liegende Stuhl des Kehlbalkendachs diente zum Aufbau des Dachtragwerkes, die Spannriegel nehmen die Druckkräfte zwischen den Stuhlsäulen auf. Die Stuhlwände zwischen den Vollgespärren, bestehend aus Brustriegel und Streben übernehmen die Aussteifung in Firstrichtung. Die Leergespärre, welche ohne Bundtram ausgeführt sind, leiten die horizontalen Kräfte in die Mauerbank.



Abbildung 2: Luftbild Schloss Klaffenau

1.2. Fotodokumentation



Abbildung 3: Ebene 1



Abbildung 4: Ebene 2

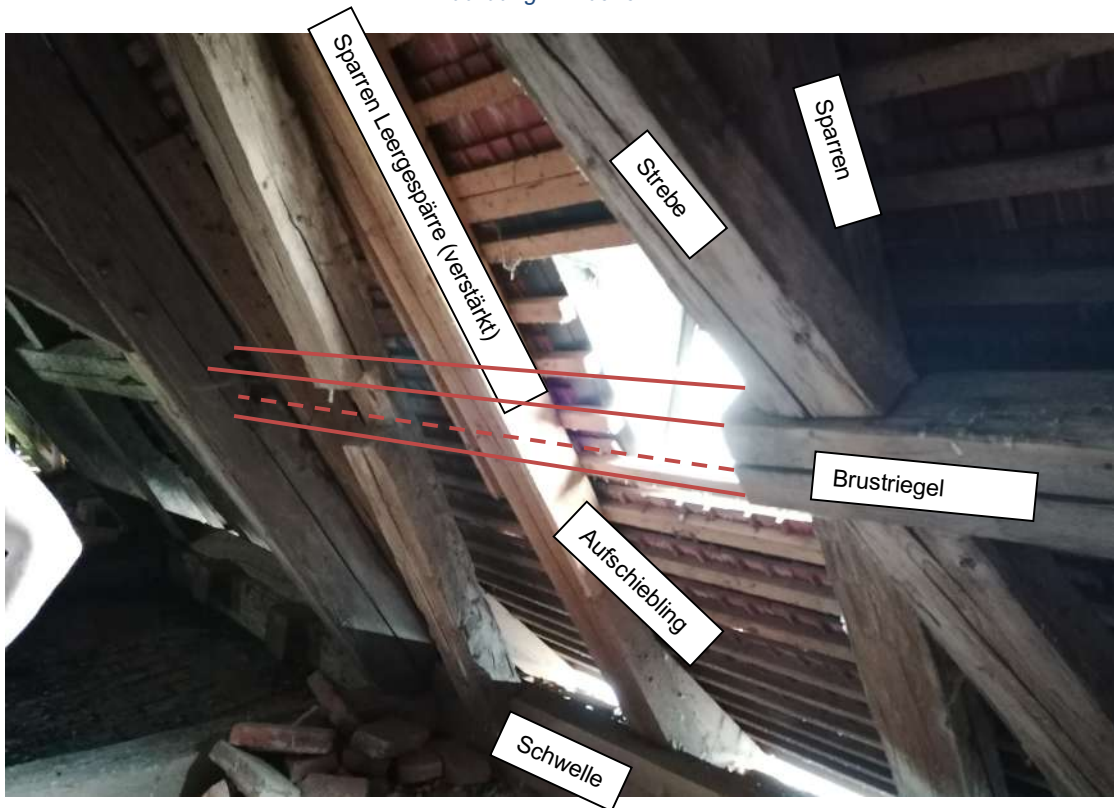


Abbildung 5: Stuhlwand zwischen Vollgespärre IIII und VII



Abbildung 6: Wechsel im Bundtram aufgrund des Stiegenaufganges

1.3. Messergebnisse

Es wurde an sieben verschiedene Stellen die Holzfeuchte gemessen. (Siehe Plan 003). Die Holzfeuchte wurde mittels Kontaktfeuchtemessung mit Einstechelektroden gemessen. Die Elektroden messen den Widerstand, der Auskunft über den Wassergehalt im Holz in Abhängigkeit der Holzart gibt. Die verwendete Holzart bei dieser Dachkonstruktion ist Fichte. Die Holzfeuchten lagen im Bereich von 15,6 % - 25,1 %, wobei die Messungen an den Fußpunkten, speziell an der Westseite des Gebäudes eine höhere Feuchtigkeit aufwiesen als die in höher gelegenen Bereichen. Diese Werte sind relativ hoch, Feuchtwerte ab 20 % können laut ÖNORM bereits zu Holzschäden führen, spätestens ab 30 % sollten umgehend Maßnahmen getroffen werden.



Abbildung 7: eingeschlagene Elektrode für Holzfeuchtemessung

Gemessene Feuchtwerte:

1. 18,6 %
2. 19,3 %
3. 15,8 %
4. 15,6 %
5. 18,0 %
6. 25,1 %
7. 22,8 %

Des Weiteren wurden Bohrwiderstandsmessungen in den drei Knotenbereichen gemacht, welche später in der Einzelarbeit genauer ausgearbeitet werden.



Abbildung 8: Bohrwiderstandsmessung an der Verbindung Stuhlsäule - Bundtram

Ein dünner Bohrer wird mit einer hohen Umdrehungszahl und konstanter Vorschubgeschwindigkeit in das Holz gebohrt. Dabei wird die Leistung gemessen und aufgezeichnet, die der Motor benötigt, um eine konstante Vorschubgeschwindigkeit zu erzielen. Aus der benötigten Leistung kann auf die relative Härte und somit auf Fehlstellen im Holz sowie Klaffungen in verdeckten Verbindungen geschlossen werden.



Abbildung 9: Ergebnis einer Bohrwiderstandsmessung

Anhand der Zacken in der Messlinie sind die Jahrringe bzw. die Lage der Jahrringe zu erkennen, deutliche Zacken weisen auf eine radiale Bohrung hin. Im Bereich von 3,5 bis 4 cm bzw. 9 bis 11 cm geht die Kurve gegen Null, hier kann man auf Klaffungen rückschließen. Der Bereich von 4 bis 9 cm hebt sich deutlich vom Rest der Kurve ab, hier ist der Zapfen zu erkennen.

2. Zustandsbeurteilung

Die Beurteilung des Zustandes der Dachkonstruktion erfolgt nach dem Konzept des Forschungsprojektes „D(N)achhaltigkeit Graz“ welches vom Institut für Holzbau der Technischen Universität Graz und der Holzbau Forschungs-Ges.m.b.H erstellt wurde.

4.3 Beurteilungsschema

Zustandsbeurteilung eines historischen Dachtragwerks aus Holz	
Schadensfolgeklasse	(maximal 1 Punkt)
	0,5 ... für gewöhnliche Bauten
	1 ... für Bauten mit Menschenansammlungen und Bauten an stark frequentierten Straßen
&	
Tragsicherheit	(insgesamt maximal 4 Punkte)
Grad der statischen Unbestimmtheit [K1]	0,5 ... für statisch bestimmte oder nahezu statisch bestimmte Tragwerke
Umbauten und Instandsetzungen [K2]	0,5 ... für Tragwerke, die in den letzten Jahrzehnten (rund 50 Jahre) nicht fachgerecht verändert wurden
	1 ... für Tragwerke, die in den letzten Jahrzehnten an statisch besonders wesentlichen Stäben und/oder Verbindungen offensichtlich nicht fachgerecht verändert wurden
Holzerstörung (Pilz- oder Insektenbefall) [K3]	0,5 ... für Tragwerke, die mäßige Schäden ohne fachgerechte Instandsetzung aufweisen. Diese Schäden gehen über oberflächige Beeinträchtigungen hinaus und betreffen auch statisch wesentliche Bauteile.
	1 ... für Tragwerke, die schwere Schäden ohne fachgerechte Instandsetzung aufweisen
	1,5 ... für Tragwerke, die schwere Schäden an statisch besonders wesentlichen Stäben oder Verbindungen aufweisen
Verbindungs- und/oder Stabversagen [K4]	0,5 ... wenn einzelne, statisch wesentliche Verbindungen und/oder Stäbe infolge von Überbelastung oder Holzerstörung versagt haben
	1 ... wenn mehrere, statisch wesentliche Verbindungen und/oder Stäbe infolge von Überbelastung oder Holzerstörung versagt haben und dies besondere Auswirkungen auf das Gesamttragverhalten hat
konstruktive Mängel [K5]	0,5 ... wenn die Dimensionen der statisch wesentlichen Bauteile außergewöhnlich schlank sind
	1 ... wenn es sich beim Tragwerk offensichtlich um eine Fehlkonstruktion handelt und/oder statisch unbedingt erforderliche Stäbe oder Verbindungen fehlen
große Verformungen und/oder Klaffungen [K6]	0,5 ... wenn statisch wesentliche Stäbe und/oder das gesamte Tragwerk deutlich sichtbar verformt sind und/oder zahlreiche Verbindungen klaffen. Die Verformungen (oder Klaffungen) können nicht mehr durch die Anatomie des Holzes erklärt werden.
Verschlechterungstendenz [K7]	0,5 ... wenn die Dachdeckung, -anschlüsse und -entwässerung mangelhaft sind und/oder das angrenzende Mauerwerk durchfeuchtet ist und/oder die Bauhölzer stark verschmutzt sind und/oder aus anderen Gründen eine Verschlechterung des Zustandes zu erwarten ist.
&	
In-Situ-Probebelastungen	- 0,5 ... wenn in den letzten drei Jahren eine außergewöhnlich große Einwirkung auftrat und infolgedessen keine Schäden eintraten.
	- 1 ... analog wie zuvor, jedoch für gezielt aufgebrachte Probebelastungen
SUMME der Punkte	
weitere Kriterien und die Erfahrung des Gutachters [K8]	Die Summe der Punkte dient als erste Entscheidungsgrundlage für die Beurteilung. Im Rahmen der „weiteren Kriterien“ erfolgt eine kritische Evaluierung der bisher vorliegenden Summe der Punkte als auch die Berücksichtigung aller bisher nicht beachteter Kriterien bzw. Aspekte. Die Durchführung regelmäßiger Inspektionen könnte hier beispielsweise berücksichtigt werden. Für die Vergabe dieser Punkte (positiv/negativ) ist die Erfahrung des Gutachters gefordert.
BEURTEILUNG des ZUSTANDS (Endsumme der Punkte = Note gemäß Bild 6)	

Schadensfolgeklasse:

Gewöhnliche Bauten
0,5 Punkte

Tragsicherheit:

- [K1] **Grad der statischen Unbestimmtheit:** Kehlbalkendach mit liegendem Stuhl und zusätzlichen Bundträmen und Stuhlwänden
0,5 Punkte
- [K2] **Umbauten und Instandsetzung:** Sparrenverstärkung Leergespärre V mangelhaft; Schwelle zwischen Vollgespärre III und VII getauscht
0,5 Punkte
- [K3] **Holzerstörung (Pilz- oder Insektenbefall):** geringer Insektenbefall in Sparre, offensichtlich nicht mehr aktiv; starke Holzerstörung an Knoten Längsbalken-Hängesäule im Bereich Vollgespärre X; Pilzbefall im Wechselbalken Stiegenaufgang im Bereich Vollgespärre VII; Pilzbefall in Dippelbaumdecke unter Fenster nahe Leergespärre VI
1 Punkt
- [K4] **Verbindungs- und/oder Stabversagen:** kein Versagen von Konstruktiven Hölzern ersichtlich.
0 Punkte
- [K5] **Konstruktive Mängel:** Kopfband im Vollgespärre VII Ebene 1 fehlt/wurde nicht eingebaut; Brustriegel in Stuhlwand zwischen Vollgespärre III und VII wurde abgeschnitten;
0 Punkte
- [K6] **Große Verformungen und/oder Klaffungen:** Stichbalken in Vollgespärre VII westseitig nach Wechselbalken kippt stark nach außen; Wechselbalken im Bereich Stiegenaufgang zu elastisch; Kehlbalken/Spannriegel in Vollgespärre VII stark zur Deckenmitte hingeneigt
0,5 Punkte
- [K7] **Verschlechterungstendenz:** Dachdeckung in Ordnung, Punktueller Feuchteintrag durch Dachfenster; Verschmutzung relativ stark; gemessene Holzfeuchte teilweise über 20%

0,5 Punkte

Summe vor Zusatzeinschätzung:

3,5 Punkte

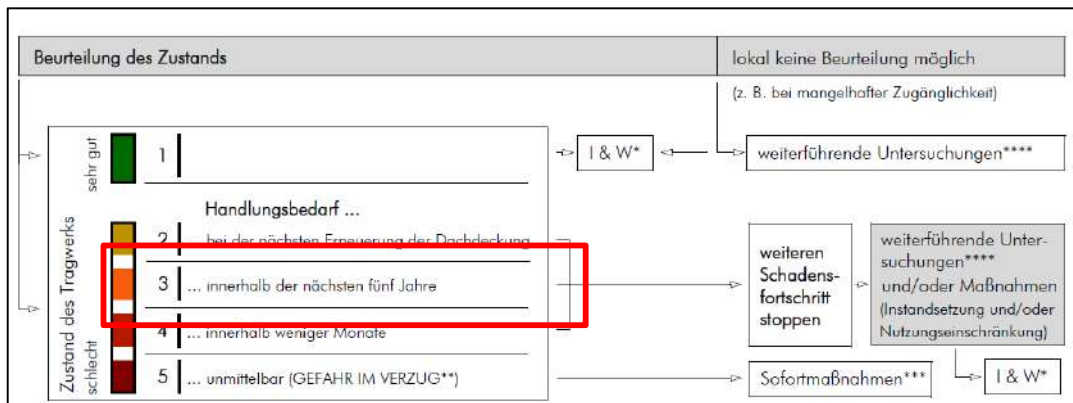
In Situ-Probebelastungen:

Keine Information vorhanden

[K8] Weitere Kriterien und Erfahrung des Gutachters: -
0 Punkte

Summe nach Zusatzeinschätzung:

3,5 Punkte



Fazit der Zustandsbeurteilung:

- Das fehlende Kopfband in Vollgespärre VII sollte ersetzt werden.



Abbildung 10 Zapfenloch in Stuhlsäule von fehlendem Kopfband

- Die Holzfeuchte ist teilweise über 20 %, die Belüftung des Dachraumes muss verbessert werden.
- Die kippenden Bundtram Stichbalken sollte gesichert werden

- Durchhängender Kehlbalken weniger problematisch



Abbildung 11: geneigter Kehlbalken/Spannriegel



Abbildung 12: Nahaufnahme der Neigung des Kehlbalkens/Spannriegels

- Die Pilzbefallenen Bauteile sollten erneuert werden



Abbildung 13: Pilzbefall Wechselbalken

3. Instandsetzungsarbeiten

3.1. Holzfeuchtigkeit – Belüftung des Dachraumes

Die gemessene Holzfeuchte liegt teilweise über 20 %, speziell an der Westseite des Dachraumes ist die Holzfeuchtigkeit am höchsten. Der Dachraum ist schlecht belüftet, der Einbau von Lüftungsöffnungen in der Dachfläche, die für konstante kreuzweise Belüftung sorgen, sollte das Problem lösen.

3.2. Kippender Bundtram Stichbalken

Aufgrund des Stiegenaufganges wurde der Bundtram des Vollgespärres VII unterbrochen und an den Enden mit Wechselbalken abgefangen. Die Lasten, welche von der Stuhlsäule und vom Sparren über die Schwelle auf den kurzen verbleibenden Bundtram Stichbalken eingeleitet werden, führten dazu, dass der Bundtram Stichbalken nach außen wegkippte.



Abbildung 14: Wechselbalken Vollgespärre VII Bereich Stiegenaufgang



Abbildung 15: Neigung des Stichbalkens

Um dieses wegkippen zu vermeiden ist die effektivste Lösung, das Wiedereinsetzen des Bundtrams über dem Stiegenhaus. Dies gewährleistet zunächst keinen guten Durchgang mehr vom Stiegenhaus in den Dachraum, allerdings wird der Bundtram Stichbalken somit gehalten und kippt nicht mehr nach außen. Eine mögliche Instandsetzung dieser Form ist in nachfolgender Abbildung aufgeführt.

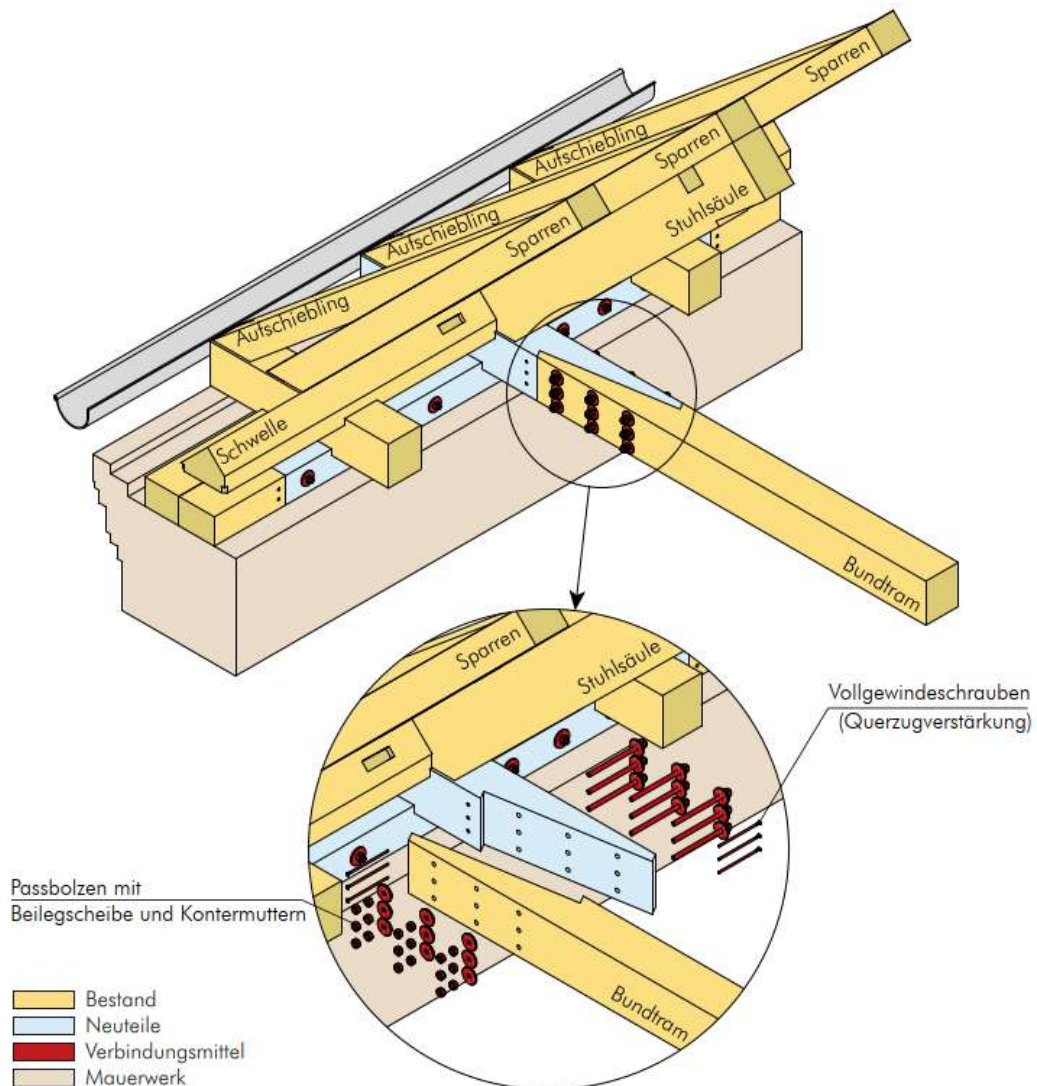


Abb. 5.14: Instandsetzung eines zerstörten Bundtrames mittels schrägem Blatt mit schrägem Stoß in 3D – Ansicht, sowie Detail der Verbindung als Explosionszeichnung

Abbildung 16: Instandsetzung Bundtram (Quelle: Jerome Ortner; Instandsetzungshandbuch für historische Dachwerke und deren Verbindungen)

Eine weitere Instandsetzung dieses Knotens wäre den Bundtram Stichbalken in geeigneter Ausführung zurückzuhängen und die Lasten gegeben falls in die Bundtrams der anliegenden Vollgesperre zu leiten. Dies kann mittels Stahllaschen / -stäbe oder Holzbalken und geeigneten Schraubverbindungen erfolgen.

3.3. Pilzbefall Wechselbalken

Aufgrund der hohen Feuchtigkeit und schlechten Durchlüftung sind an mehreren Stellen des Tragwerks Pilz- und Insektenbefälle aufgetreten. Wie nachfolgende Abbildung zeigt, ist auch ein Wechselbalken in Gesperre VII von einem Pilzbefall betroffen. Durch den Befall tritt eine Querschnittsschwächung auf und der Wechselbalken kann nicht mehr die gewünschten Lasten abtragen.



Abbildung 17: Pilzbefall am Wechselbalken

Um nun eine Instandsetzung des Wechselbalkens vornehmen zu können, muss der Bereich des Befalls komplett entfernt werden. Anschließend kann dieser Bereich durch einen neuen Holzbalken ersetzt und mittels Kammverbindungen an den bestehenden Wechselbalken angeschlossen werden.

3.4. Fehlendes Kopfband

Im linken Bereich des betrachteten Vollgespärres fehlt ein Kopfband. Dieses wurde entweder entfernt oder ist über die Jahre herausgefallen. In nachfolgender Abbildung ersichtlich.



Abbildung 18: fehlendes Kopfband

Die einzige hier geeignete Instandsetzung ist, ein Kopfband erneut einzusetzen. Die Verbindung des Kopfbands mit der Stuhlsäule und des Kehlbalkens, kann mittels Zapfenverbindung und zusätzlicher Verstärkung mit einer Schraube erfolgen. Da bereits Zapfenlöcher der vorherigen Verbindung bestehen, können dieser wieder genutzt werden. Andernfalls kann eine Überblattung oder ein Versatz genutzt werden. Eine zusätzliche Verstärkung mit Schrauben ist immer zu empfehlen.

4. Knotenbereich 1: Mauerwerk – Mauerbank – Sparren – Aufschiebling – Mauerbank-Stoß

BOFINGER Annika; 12210616

4.1. Beschreibung

Beim Knotenpunkt 1 handelt es sich um den Fußpunkt des siebten Vollgespärres. Der betrachtete Knoten zeigt die Verbindung von Mauerbank, Bundtram, Sparren, Stuhlsäule, Schwelle und Aufschiebling.

Die Mauerbank ist ein horizontaler Holzbalken, der auf dem Mauerwerk aufliegt und als Auflagefläche für die Holzkonstruktion des Dachstuhls dient. Die Schwelle verläuft ebenfalls horizontal und liegt auf dem Bundtram auf.

In der nachfolgenden Abbildung ist zu erkennen das Sparren, sowie die Stuhlsäule mit dem Bundtram verbunden sind. Die Stuhlsäule ist ebenfalls mit der Schwelle mit einem Zapfen befestigt. Der Sparren stützt sich am Bundtram ab, mit dem sie das „Dreieck“ bilden.

Der Aufschiebling ist ein schräg verlaufendes Holzelement, das am Sparrenende angebracht ist.

Die Aufmaßskizze ist im Anhang beigefügt.



Abbildung 19: Knotenbereich 1

4.2. Verbindung

Die Hauptverbindungen des Knotens sind Zapfenverbindungen.

Mithilfe einer Bohrwiderstandsmessung wurde die Verbindung Stuhlsäule und Bundtram untersucht und festgestellt, dass keine Verbindung vorliegt. Dies ist in Abbildung 21 zu sehen.

Die Stuhlsäule ist mit einem Zapfen mit der Schwelle verbunden. Auch ist der Sparren mit dem Bundtram mit einer Zapfenverbindung verbunden. Dies wurde an anderen Fußpunkten des Dachwerkes mit dem Bohrwiderstandsmessgerät gemessen.

Der Bundtram liegt mit einem Kamm auf der Mauerbank auf. Der Aufschiebling ist mittels eines Nagels am Sparren befestigt.



Abbildung 20: Bohrwiderstandsmessung

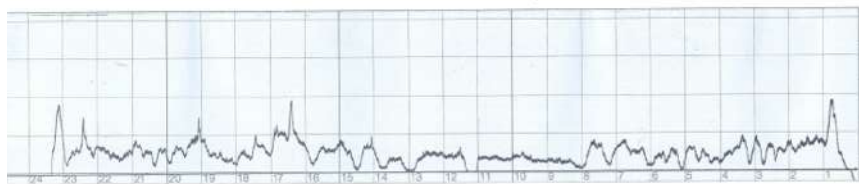


Abbildung 21: Bohrwiderstandsmessung Verbindung Stuhlsäule - Bundtram



Abbildung 22: Verbindung Sparren, Bundtram, Schwelle und Aufschiebling

4.3. Beschreibung der Lasten

Das Gespärre hat die Aufgabe, die Kräfte, die an der Dachaußenseite angreifen, in die Mauerbank abzuleiten.

Die Sparren tragen die Druckkräfte über die Mauerbank in das Mauerwerk ab. Das Dreieck, das durch den Bundtram gebildet wird, dient zur Stabilität und Schließung der Konstruktion. Der Bundtram übernimmt dabei die Zugkräfte, die die Sparren zusammenhalten und für die Gesamtstabilität der Dachkonstruktion sorgen.

Der Aufschiebling verändert die eigentliche Dachneigung, um anfallendes Regenwasser schonender in die Dachrinne abzuleiten.

Die Berechnung des Knotenbereichs ist im Anhang beigefügt.

4.4. Schäden und Instandsetzung

Aufgrund der vorliegenden Fotodokumentation ist ersichtlich, dass der Knoten in sich recht kompakt wirkt. Sodass im Moment keine dringende Reparaturmaßnahmen erforderlich wären.

In der nachfolgenden Abbildung ist eine Klaffung der Stuhlsäule am Bundtram zu erkennen.



Abbildung 23: Verbindung Stuhlsäule und Bundtram

Die Klaffung ist hauptsächlich auf die hohen Druckkräfte der Stuhlsäule zurückzuführen. Außerdem ist eine Längsverschiebung der Gesperre zu erkennen, durch die das Gesperre nach außen verschoben wird.

Die Mauerbank wurde zum Teil ersetzt siehe Abbildung 24.



Abbildung 24: Instandhaltung Mauerbank



Abbildung 25: Stahlseile von Schwelle zu Bundtram

Ebenfalls wurden zwei Stahlseile von beiden instandgesetzten Schwellen am Bundtram befestigt.

5. Knotenbereich 3: Stuhlsäule-Rähm-Spannriegel-Kehlbalken

FRÖHLICH Michael; 11902885

5.1. Beschreibung

Der betrachtete Knotenbereich liegt in der ersten Kehlbalkenebene, die Bauteile Kehlbalken, Spannriegel, Stuhlsäule (aus Ebene 1 und Ebene 2), Rähm und Sparren treffen hier aufeinander. Die untere Stuhlsäule und der Spannriegel sind noch mit einem Kopfband verbunden, dieses mündet zwar nicht direkt in diesen Knoten, wird aber trotzdem mitberücksichtigt.



Abbildung 26: Knotenbereich 3 Übersicht

Die Stuhlsäulen tragen den Rähm, die Druckkräfte werden nach unten in den Bundtram weitergeleitet.

Der Spannriegel (Druckriegel), welcher direkt unter dem Kehlbalken horizontal in der Gespärreebene verläuft, schließt die horizontalen Kräfte der liegenden Stuhlsäulen kurz. Der Spannriegel ist durch einen Versatz mit Zapfen, welcher mit einem Holznagel gesichert ist, an die Stuhlsäule angeschlossen.

Der Rähm wird in den Hauptgespärren von den Stuhlsäulen getragen, auf dem Rähm liegen die Kehlbalken auf, welche mittels Verkämmung angeschlossen sind. In den Leergespärren erfährt der Rähm keine Unterstützung durch die Stuhlsäulen, hier wirkt er als Biegenalken, wobei die Vertikale Last nur dem Eigengewicht der Kehlbalken entspricht und somit relativ gering ist. Die Form des Rähms ist typisch fünfeckig, jedoch aufgrund der schmalen Oberseite und der schiefen Lage eher unkonventionell.

Die äußerste Schicht der tragenden Dachkonstruktion bilden die Sparren, welche vom Bundtram bis zum First durchlaufen. Man kann erkennen, dass die Breite der Sparren nach oben hin abnimmt. Das liegt daran, dass solch lange Bauteile die aus einem Stamm gefertigt worden sind der Form des Baumes folgen. Die Sparren sind hauptsächlich auf Druck, aber auch auf Biegung beansprucht, die Kehlbalken unterstützen die Sparren, indem sie die Biegelast der Sparren als horizontale Druckkräfte aufnehmen.

Der Kehlbalken ist an den Sparren mit einer Weißschwanz-Überblattung angeschlossen, welche mit einem Holznagel gesichert ist. Diese Verbindung kann auch Zugkräfte aufnehmen, jedoch wird hier nur Druck über den Kontaktstoß der verbleibenden Fläche neben dem Weißschwanz, zu einem vernachlässigbar geringen Teil über den Holznagel, übertragen. Die Stuhlsäule und der Kehlbalken stoßen sich auch direkt, die Eigengewichtslasten des Kehlbalkens werden jedoch über den Rähm in die Stuhlsäule geleitet.

Zwischen dem Spannriegel und Stuhlsäule sollte ein Kopfband eingebaut sein, an diesem Knoten fehlt dieses Kopfband jedoch. Das Kopfband wird je nach Richtung der Last auf Zug oder auf Druck beansprucht. Auf Druck kann das Kopfband hohe Lasten aufnehmen, da es durch einen Stirnversatz mit Zapfen angeschlossen ist. Der Zapfen ist jeweils mit zwei nebeneinanderliegenden Holznägeln gesichert. Die aufnehmbare Zugkraft ist deutlich geringer, da diese nur von den zwei Holznägeln übertragen werden kann.

Es ist davon auszugehen, dass das Kopfband nie eingebaut wurde oder aus irgendeinem Grund ausgebaut wurde. Die Zapfenlöcher weisen keine mechanische oder biologische Schädigung auf, auch die Holznägel sind noch in der Verbindung vorhanden.



Abbildung 27: Zapfenloch mit Holznägeln, fehlendes Kopfband

Die Stuhlsäule aus der zweiten Ebene ist mit einem schrägen Zapfen an den Kehlbalken der Ebene 1 angeschlossen. Da dies eine nicht sichtbare Verbindung ist, wurde eine Bohrwiderstandsmessung durchgeführt um Aufschluss über die Stärke des Zapfens zu erhalten.



Abbildung 28: Bohrwiderstandsmessung Schräger Zapfen Stuhlsäule – Kehlbalken

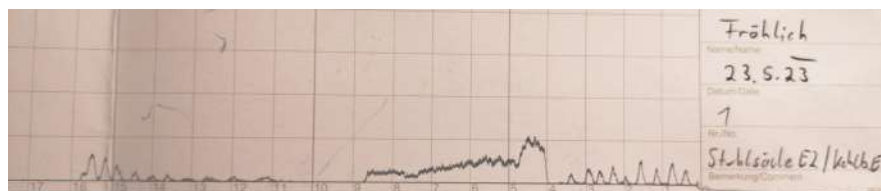


Abbildung 29: Auswertung Bohrwiderstandsmessung

Zwischen Zentimeter 4 und 9 ist eine deutliche Änderung zu erkennen, man sieht den Zapfen mit 5 cm Breite. Vor dem Zapfen ist eine Stelle mit ca. 5 mm, wo die Messung gegen Null geht, das deutet auf eine Lücke hin. Nach dem Zapfen hat diese Lücke eine Breite von in etwa 2 cm, dies ist sehr groß, das Zapfenloch wurde sehr ungenau mit viel größerer Breite gefertigt. Auf die Lastabtragung hat diese Ungenauigkeit jedoch kaum Auswirkungen, nur gegen Verdrehen ist die Stuhlsäule an diesem Anschluss nicht gut gesichert. Da in der Stuhlsäule jedoch nicht auf Verdrehung beansprucht wird, hat auch dies keine negativen Auswirkungen.

5.2. Beschreibung der Lasten

Bei den Verbindungen am Knoten handelt es sich um Kontaktstöße in verschiedenen Formen (Versatz, Zapfen, Kämme). Bei solchen Verbindungen trifft meist Hirnholz auf Querholz. Da das in keiner Verbindung das Querholz sichtbare Eindrücke zeigt ist davon auszugehen, dass die Auftretenden Lasten von den Verbindungen aufgenommen werden können.

Plakativ für diese Verbindungen wurde die maximale Drucktragfähigkeit der Weißschwanzverbindung berechnet, das Ergebnis liegt bei rund 144 kN (siehe Anhang). Die Tragfähigkeit des Holznagels wurde hierfür vernachlässigt. Zu erwähnen ist, dass die Bauteiltragfähigkeit aufgrund der Länge des Kehlbalkens und der Druckbeanspruchung sicher deutlich niedriger wäre.

5.3. Verstärkung und Instandsetzung des Knotens

Der Knoten wies einige Schäden auf:

1. 40 mm Klaffung unterhalb der Weißschwanzverbindung zwischen Kehlbalken und Sparren
2. Lücke in der Stuhlsäule Ebene 1 hinter dem Zapfen des Spannriegels bzw. Versagen des Vorholzes hinter dem Zapfen des Spannriegels
3. Kopfband nicht vorhanden

1. Klaffung:

Dieser Schaden ist auf zu große Verschiebung des Sparrens in Längsrichtung zurückzuführen. Die Druckkräfte des Sparrens sollen zum größten Teil in den Bundtram geleitet werden, jedoch wird auch ein Teil über die Weißschwanzverbindung in den Kehlbalken geleitet. Diese Verbindung kann solche Kräfte jedoch nicht sehr gut aufnehmen, weshalb hier eine Klaffung entstanden ist. Der Weißschwanz ist intakt, die Druckkräfte zwischen Sparren und Kehlbalken können noch übertragen werden. Vermutlich ist die Verformung abgeklungen, eine Sanierung scheint nicht erforderlich.

2. Lücke hinter Zapfen, Versagen des Vorholzes

Diese zwei Fehler sind auf die Druckkraft des Spannriegels zurückzuführen. Das Querholz der Stuhlsäule, welches durch die Sohle des Zapfens beansprucht wurde war scheinbar nicht stark genug, um die Kräfte aufzunehmen, es handelt sich hier um Quersug/Rollschub-Versagen. Der Hauptanteil der Druckkraft wird über die Stirnfläche des Versatzes/Zapfens übertragen. Dieser Kontaktstoß ist in Ordnung, auch hier ist keine Sanierung notwendig.

3. Fehlendes Kopfband

Das Fehlende Kopfband ist zu ersetzen.

6. Knotenbereich 4: Stuhlsäule-Kehlbalken-Spannriegel-Kopfband

HERRMANN Victor; 11707886

6.1. Allgemeines

Der zu betrachtende Knoten besteht aus einer Stuhlsäule und darüber durchlaufenden Kehlbalken. Zusätzlich wird der Kehlbalken mit einem darunter liegenden Spannriegel und einem längs zum Dachwerk laufenden Längsriegel verstärkt. Darüber hinaus werden sowohl in Quer- als auch in Längsrichtung die Stuhlsäule und der Spann-/Längsriegel mit Kopfbändern verbunden. Eine Aufnahme des Knotens ist in nachfolgender Abbildung ersichtlich. Der Grundriss und Ansichten des Knotens werden im Anhang beigefügt.



Abbildung 30: Knotenbereich 4 Übersicht

6.2. Verbindungen

Die Hauptverbindung des Knotens besteht aus einer Zapfenverbindung zwischen der Stuhlsäule und dem Spannriegel, welches nur durch eine Bohrwiderstandsmessung herausgefunden wurde. An den Spannriegel werden die Längsriegel ebenfalls mit Zapfen verbunden. Der Kehlbalken liegt auf dem Spannriegel wiederum ohne Verbindung auf.



Abbildung 31: Verbindung Stuhlsäule - Spannriegel - Kehlbalken

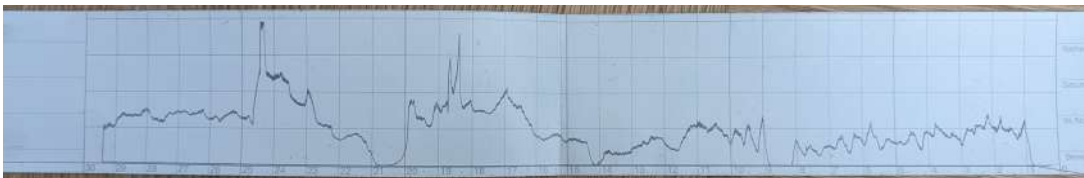


Abbildung 32: Bohrwiderstandsmessung Verbindung Stuhlsäule - Spannriegel

Betrachtet man die Verbindungen der Kopfbänder an die Stuhlsäule bzw. den Spannriegel fällt auf, dass alle Verbindungen ident sind. Die Verbindungen sind Kammverbindungen mit einem Holznagel in der Mitte fixiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt diese Verbindung in Frontansicht.



Abbildung 33: Verbindung Stuhlsäule - Kopfband

Darüber hinaus wurde von dieser Verbindung ebenfalls eine Bohrwiderstandsmessung durchgeführt, um mögliche versteckte Kaufungen zu erkennen. In der bemessenden Verbindung ist eine Klaffung zwischen Kamm und Stuhlsäule von ca. 1 cm vorhanden. Es ist davon auszugehen, dass dies in allen anderen Kammverbindungen auch der Fall ist.

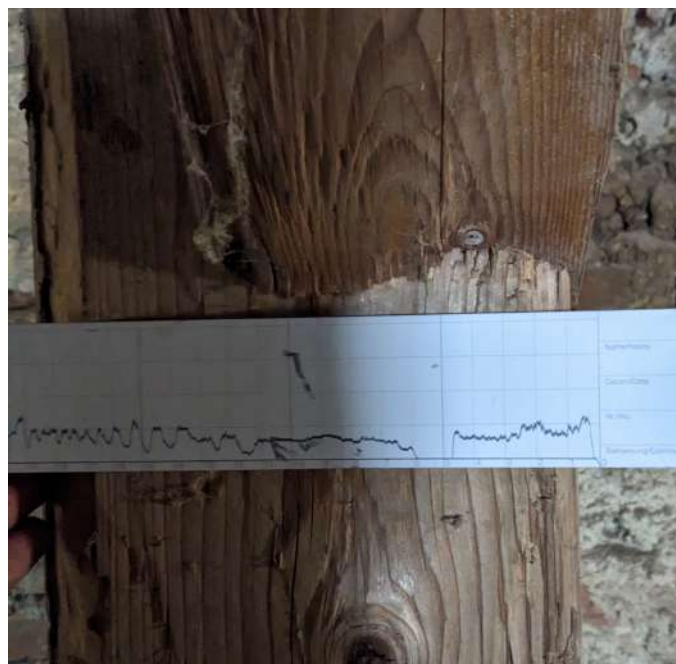


Abbildung 34: Bohrwiderstandsmessung Kammverbindung

6.3. Kraftverteilung

Über die Kraftverteilung der oberen Ebenen des Sparrendaches erfährt der Kehlbalcken Zugkräfte. Zur Unterstützung des Kehlbalckens dienen der Spannriegel und der Längsriegel. Die Stuhlsäule und die Kopfbänder erfahren vorwiegend Druckkräfte was auf die hohen drückenden Kräfte der oberen Ebenen zurückzuführen ist. Hauptsächlich soll der Knoten die Kräfte in die Stuhlsäule und anschließend in den Bundtram ableiten.

6.4. Schäden

Am Knoten wurden vorwiegend Schäden in Form von Klaffungen an den Kammverbindungen zwischen Kopfband und Stuhlsäule entdeckt. Diese sind hauptsächlich auf die hohen Druckkräfte in den Kopfbändern zurückzuführen. Außerdem ist eine starke Klaffung der Zapfenverbindung zwischen Spannriegel und Längsriegel vermutlich aufgrund der Längsverschiebungen der Gesperre. Zu erkennen ist auch eine starke Durchbiegung des Kehlbalckens und der Spannriegel an den Enden. Dies ist der Verschiebung des Gesperres nach außen verschuldet, wodurch der Kehlbalcken durch die Verbindung mit dem Gratsparen ebenfalls nach außen und unten gezogen wird.

6.5. Bemessung

Aus einer überschlagsmäßigen Bemessung ergibt sich eine mögliche aufzunehmende Kraft der Stuhlsäule aus Spannriegel und Kehlbalcken, von ca. 650 kN. Hier wurde die Annahme getroffen, dass die Verbindung aus einem Druckkontakt besteht.

Für die Berechnung der Kammverbindungen wurde die querschnittsmäßig schwächste Verbindung herangezogen. Demnach ergibt sich somit aus der Berechnung der schwächsten Verbindung, dass diese ca. 6 kN aufnehmen kann.

Die gesamte Berechnung ist dem Anhang beigefügt.

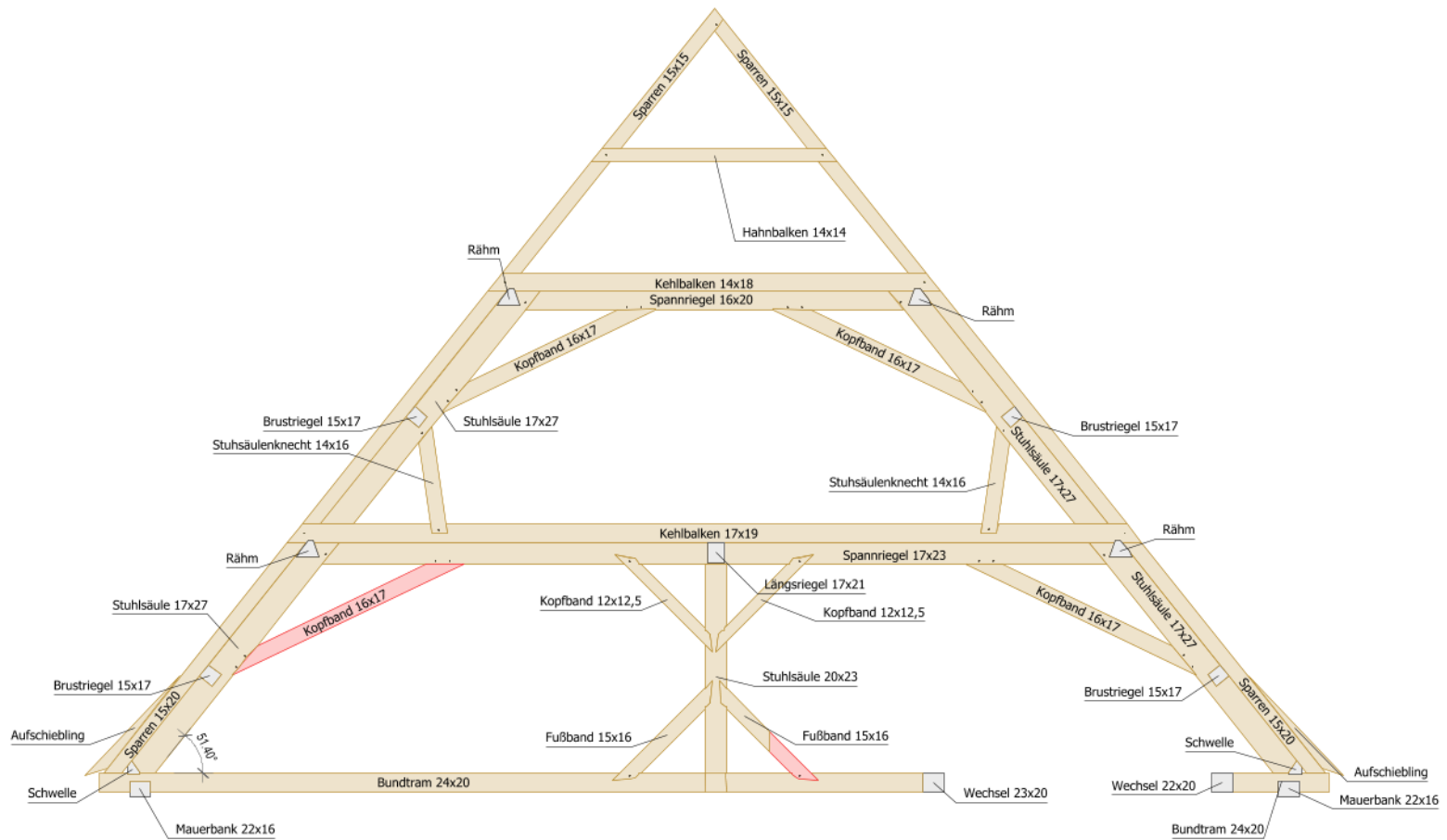
7. Anhang

7.1 Pläne

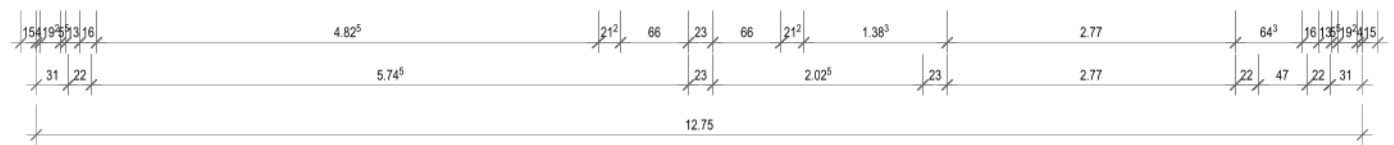
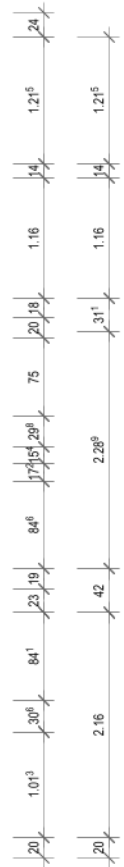
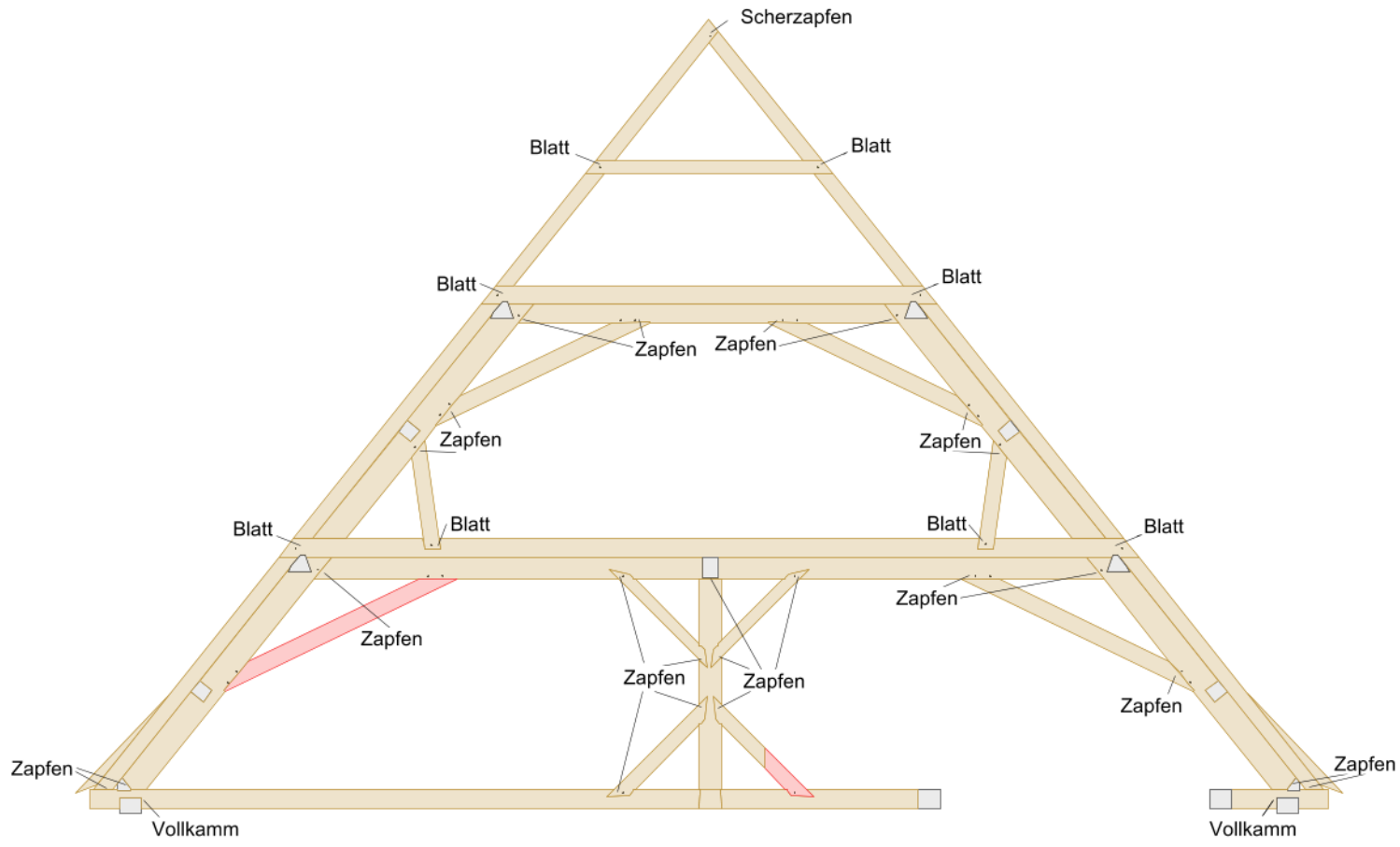
<u>Nr.:</u>	<u>Inhalt:</u>	<u>Maßstab</u>	<u>Format:</u>
001	HG: Querschnitte	1:50	A3
002	HG: Verbindungen	1:50	A3
003	HG: Messpunkte	1:50	A3
004	LG: Querschnitte	1:50	A3
005	LG: Verbindungen	1:50	A3
006	Stuhlwand	1:20	A3
007a	Detail 01: Abmessungen	1:5	A3
007b	Detail 01: Verbindungen	1:5	A3
008	Detail 03	1:5	A3
009a	Detail 04: Grundriss	1:10	A3
009b	Detail 04: Ansicht 1	1:10	A3
009c	Detail 04: Ansicht 2	1:10	A3

7.2 Knotenberechnungen

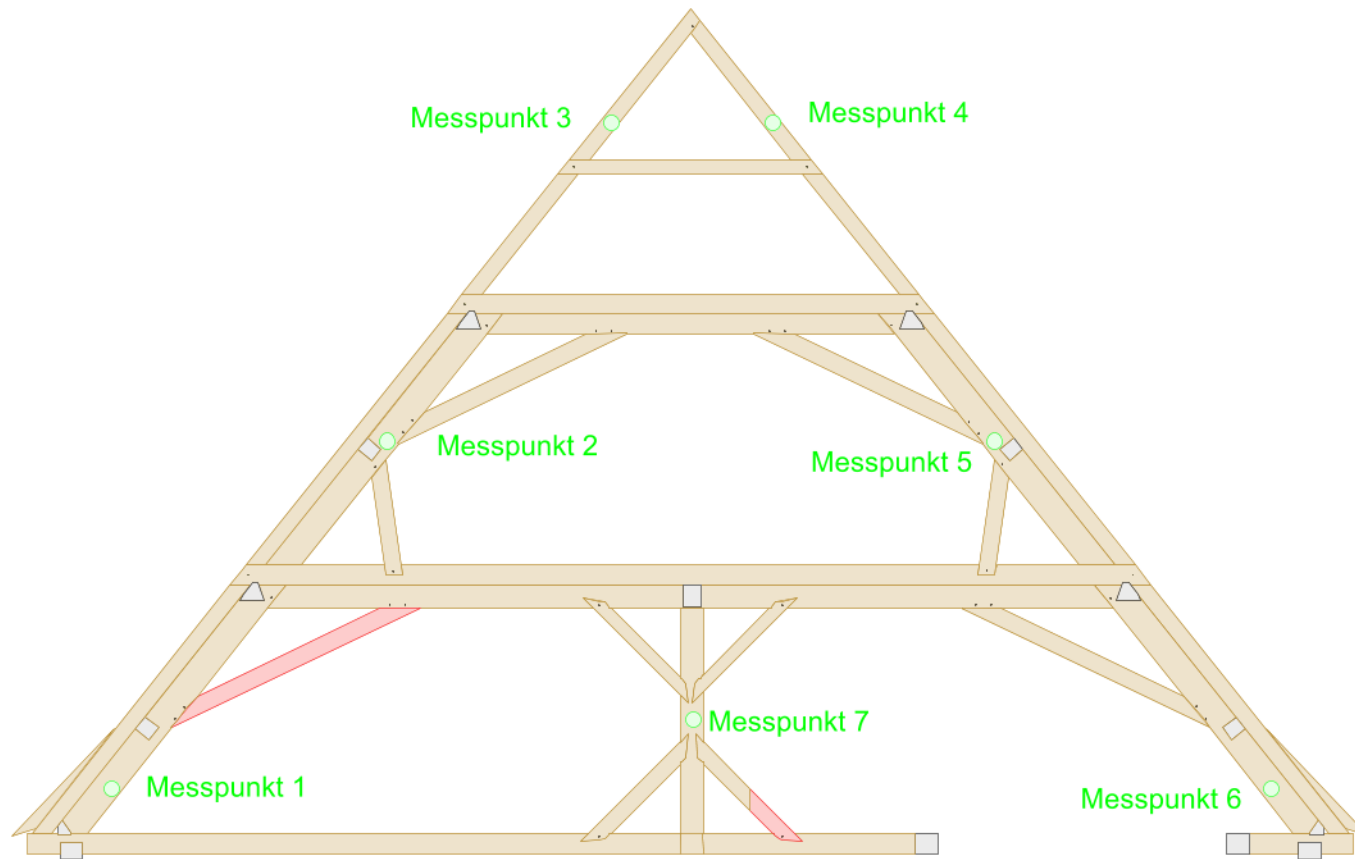
1. Detail 1
2. Detail 3
3. Detail 4



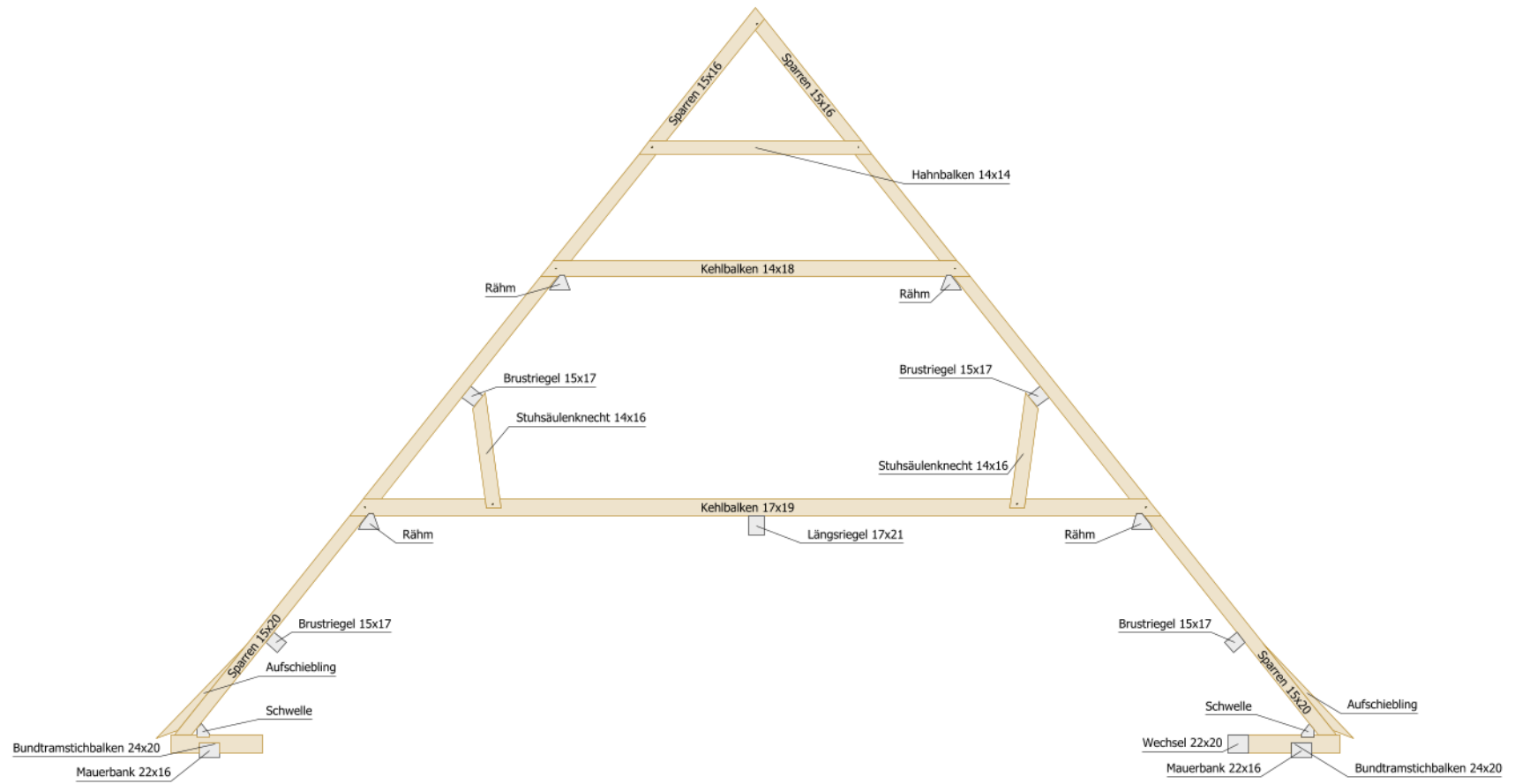
Bauvorhaben Schloss Klaffenau	Planinhalt Hauptgespärre - Querschnitte	Maßstab 1 : 50
Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen		Datum 23.05.2023
Plan 001		gezeichnet [Redacted]



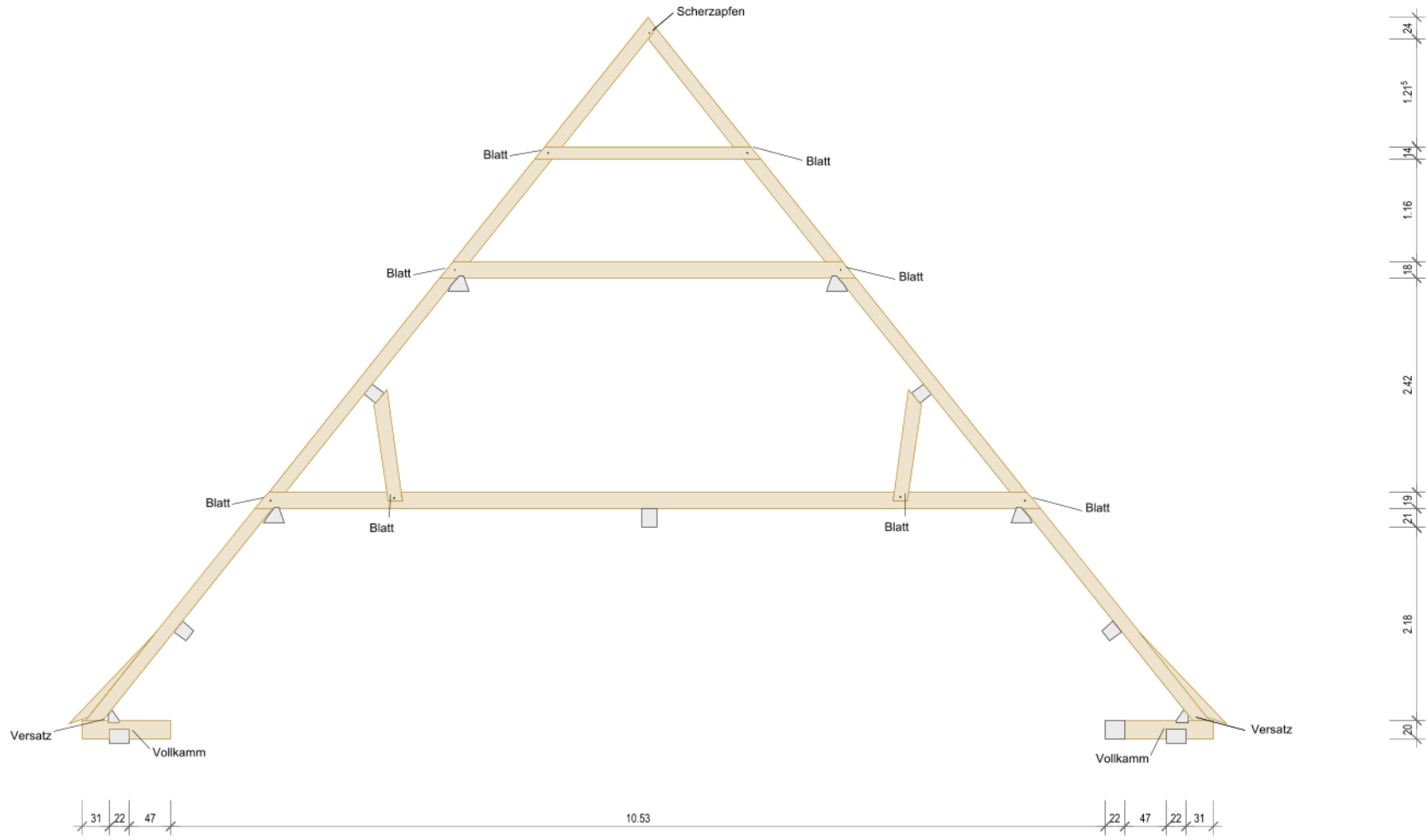
Bauvorhaben Schloss Klaffenau	Planinhalt Hauptgespärre - Verbindungen	Maßstab 1 : 50
Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen		Datum 23.05.2023
Plan 002		gezeichnet [Redacted]



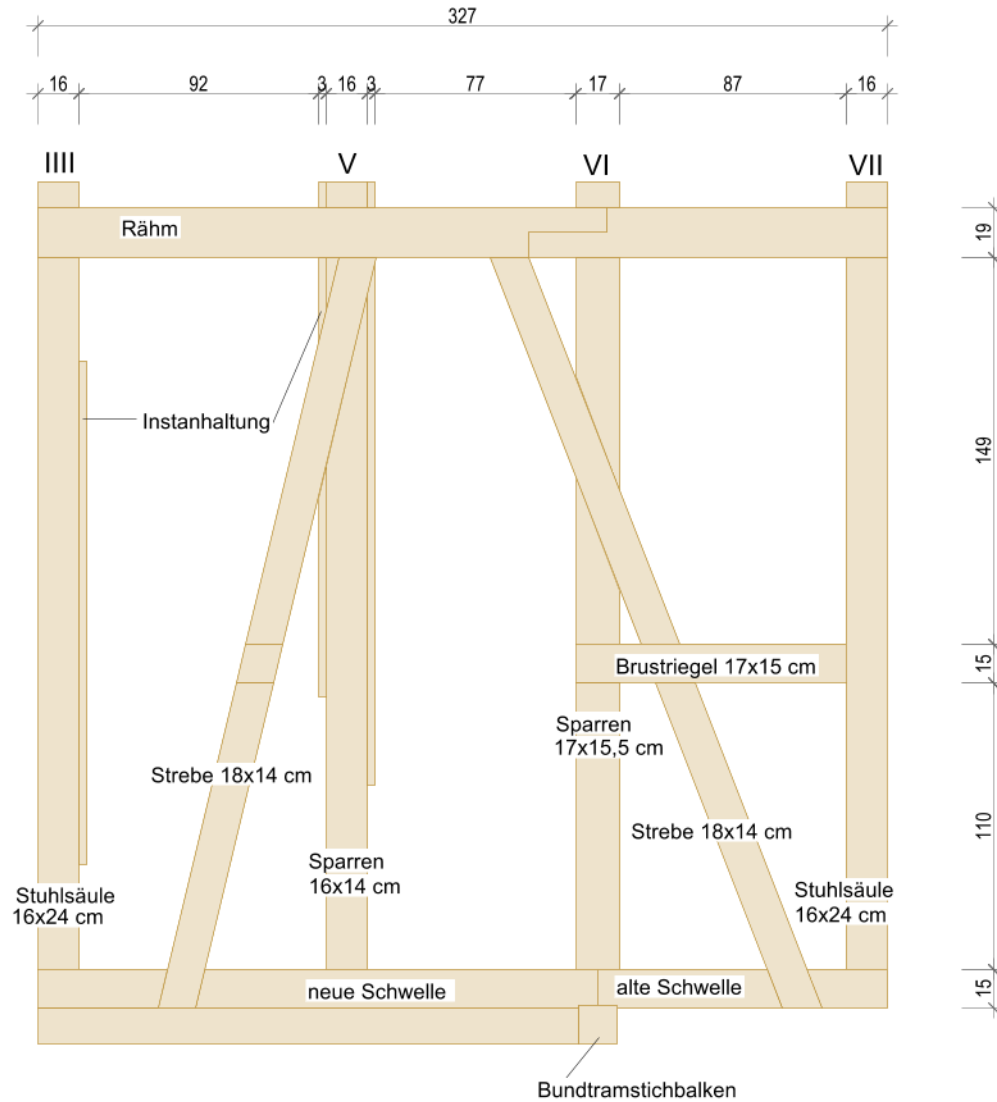
Bauvorhaben Schloss Klaffenau	Planinhalt Hauptgespärre - Messpunkte Feuchtegehalt	Maßstab 1 : 50
Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen		Datum 23.05.2023
Plan 003		gezeichnet [Redacted]



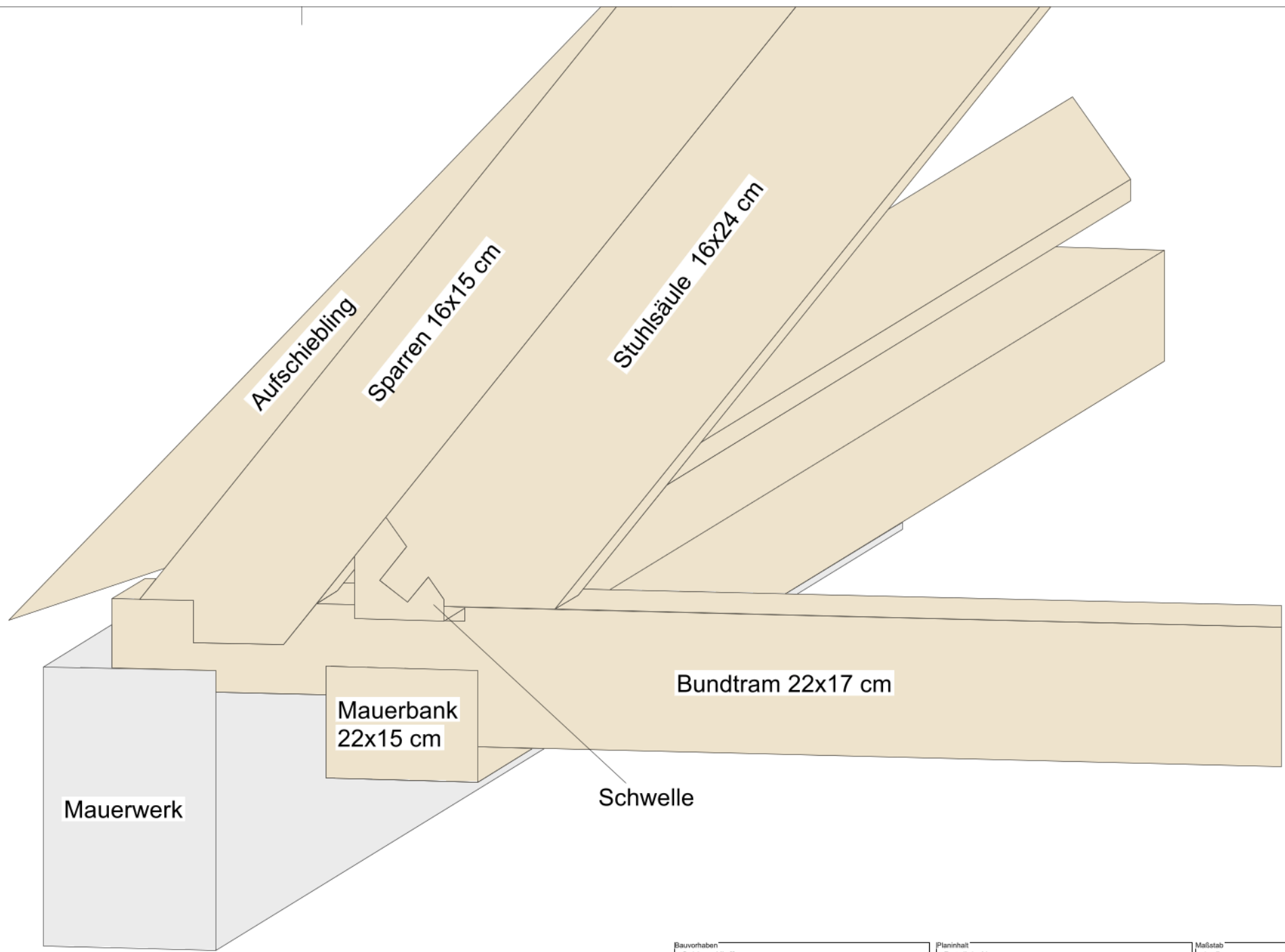
Bauvorhaben Schloss Klaffenau	Planinhalt Leergesparre - Querschnitte	Maßstab 1 : 50
Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen		Datum 23.05.2023
Plan 004		gezeichnet [Redacted]



Bauvorhaben Schloss Klaffenau	Planinhalt Leergespärre - Verbindungen	Maßstab 1 : 50
Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen		Datum 23.05.2023
Plan 005		gezeichnet [Redacted]



Bauvorhaben Schloss Klaffenau	Planinhalt Stuhlwand-Abschnitt	Maßstab 1 : 20
Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen		Datum 23.05.2023
Plan 006		gezeichnet [Redacted]



Aufschiebling

Sparren 16x15 cm

Stuhlsäule 16x24 cm

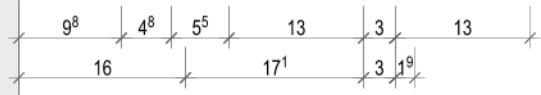
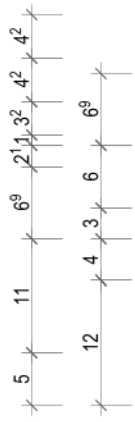
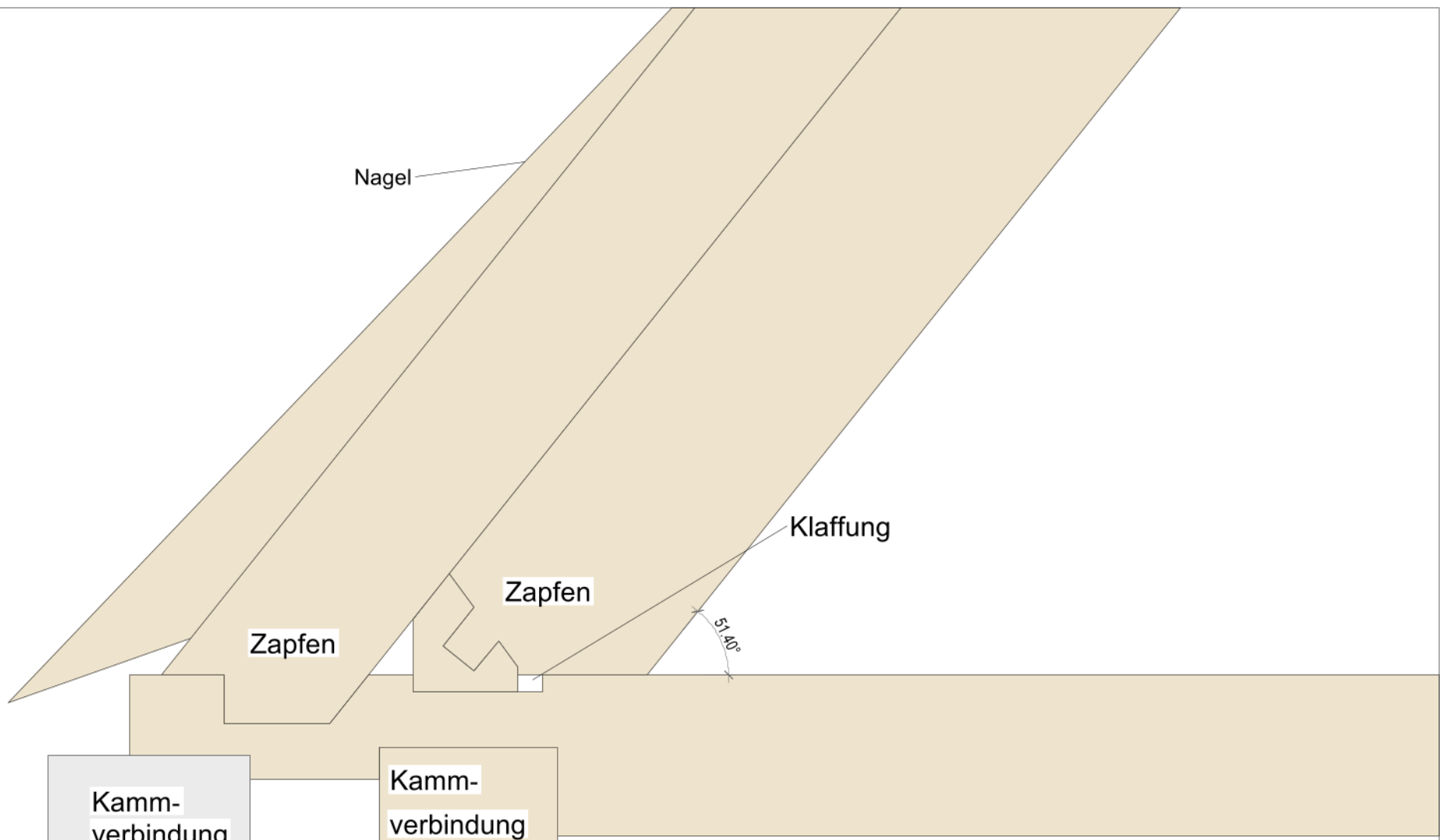
Bundtram 22x17 cm

Mauerbank
22x15 cm

Mauerwerk

Schwelle

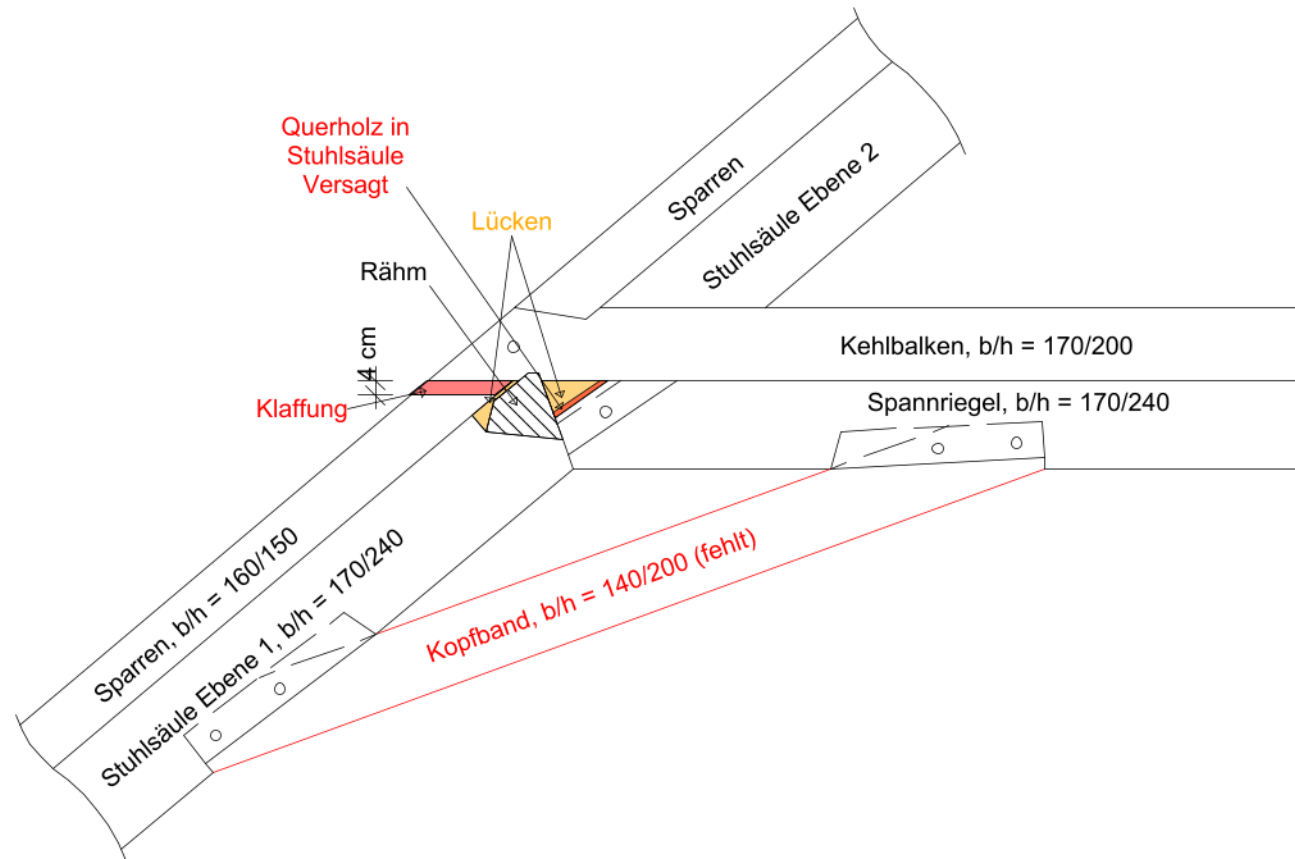
Bauvorhaben Schloss Klaffenau	Planinhalt Detail 1: Abmessungen	Maßstab 1 : 5
Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen		Datum 23.05.2023
Plan 007a		gezeichnet [Redacted]



Kamm-
verbindung

Kamm-
verbindung

Bauvorhaben Schloss Klaffenau	Planinhalt Detail 1: Verbindungen	Maßstab 1 : 5
Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen		Datum 23.05.2023
Plan 007b		gezeichnet [Redacted]

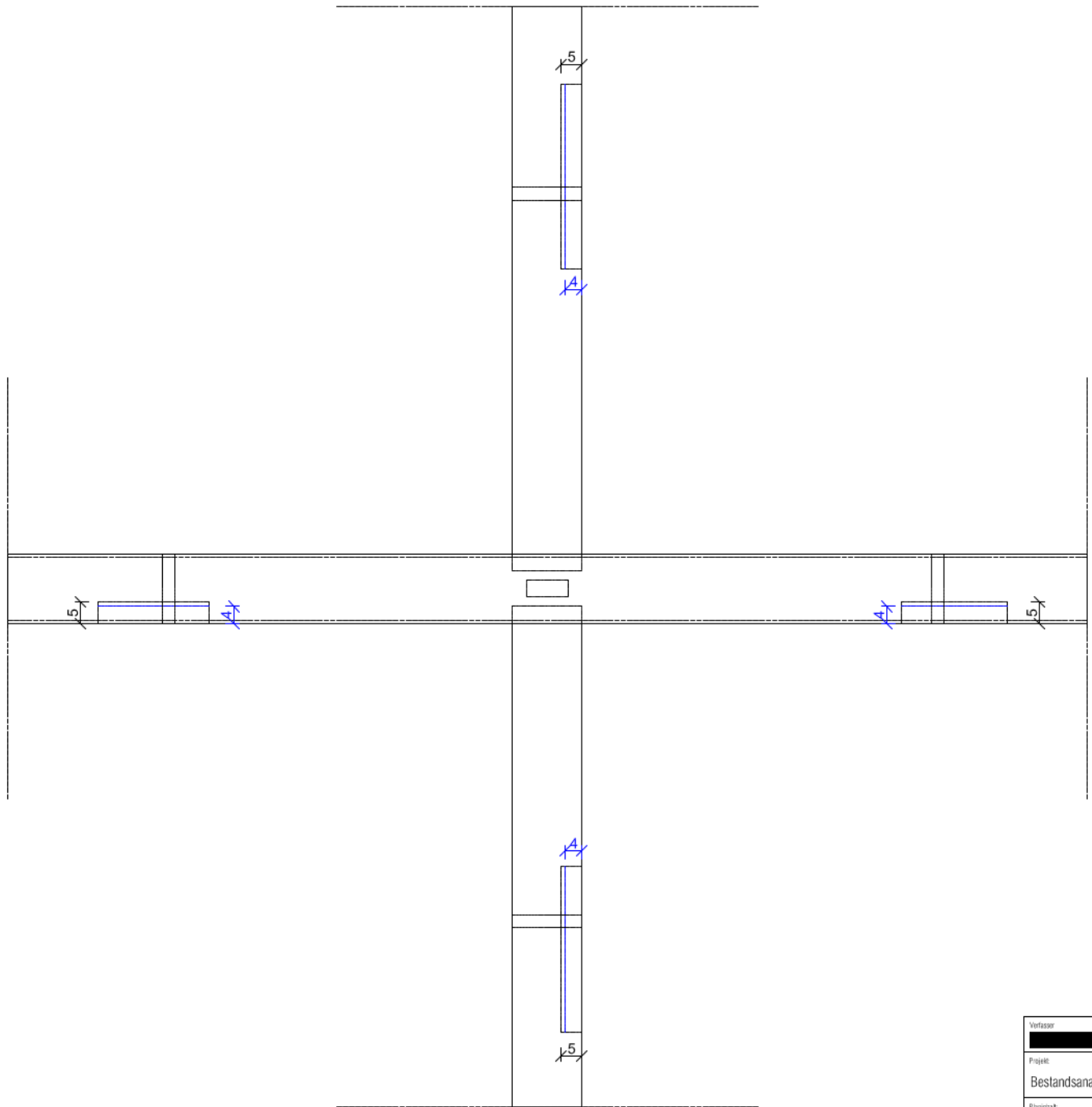


Plan 008

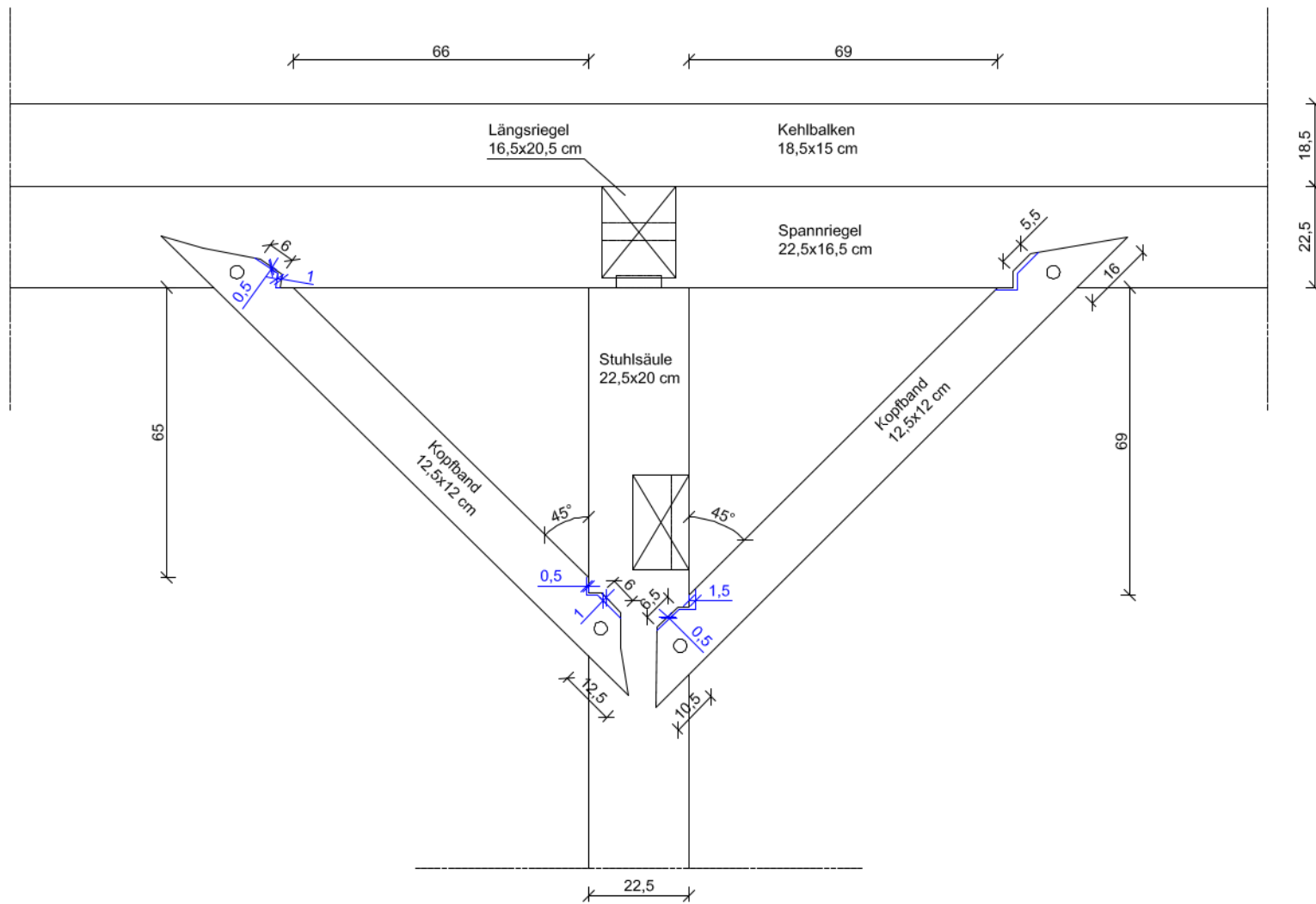
LV Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen

Knotenbereich 3, Aufriss

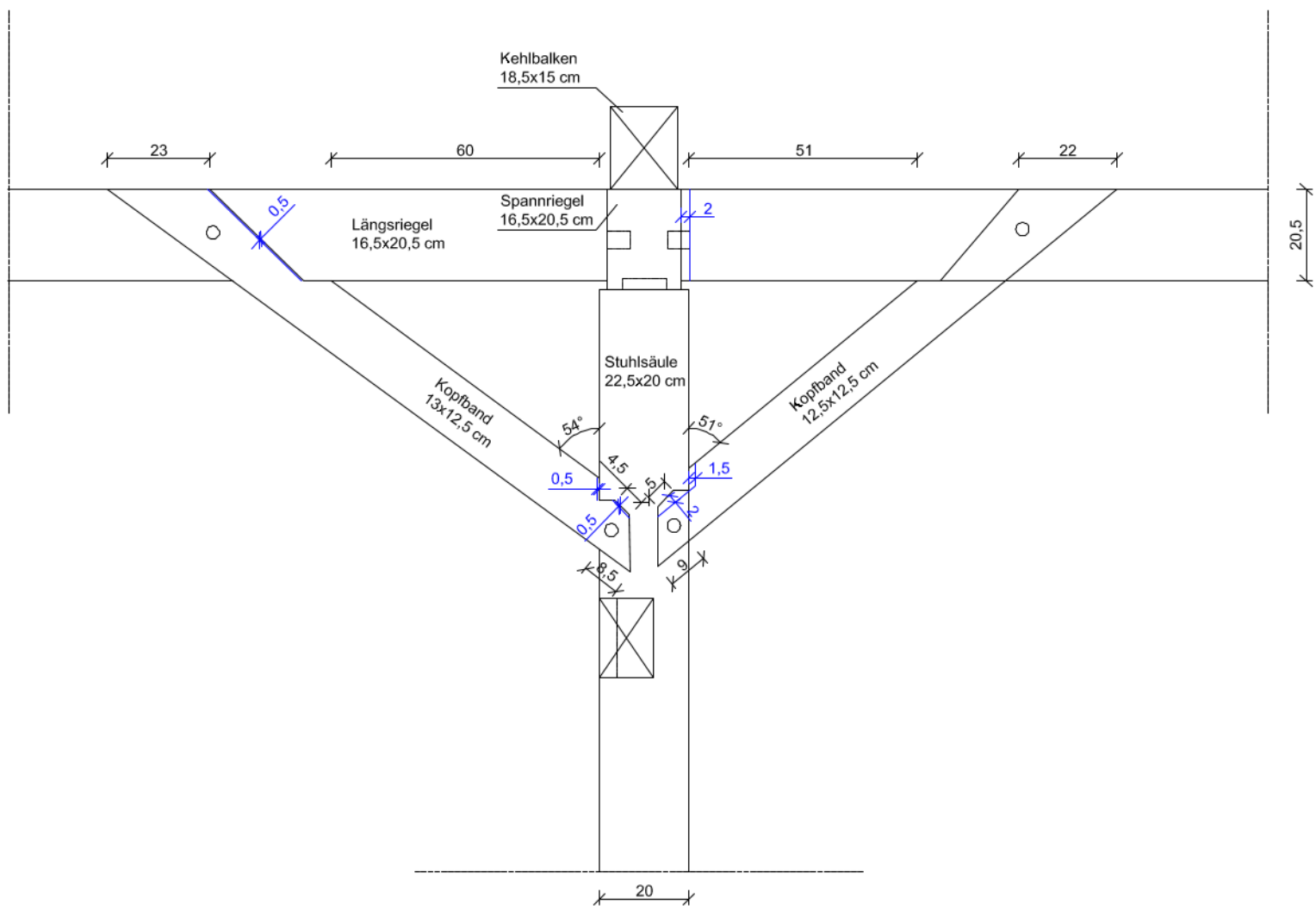




Verfasser: [Redacted]	Blatt: 420x297 A3	Datum: 12.04.2018	Masstab: 1:10
Projekt: Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen			
Planname: Grundriss Plan 009a		Gruppenmitglieder: [Redacted]	

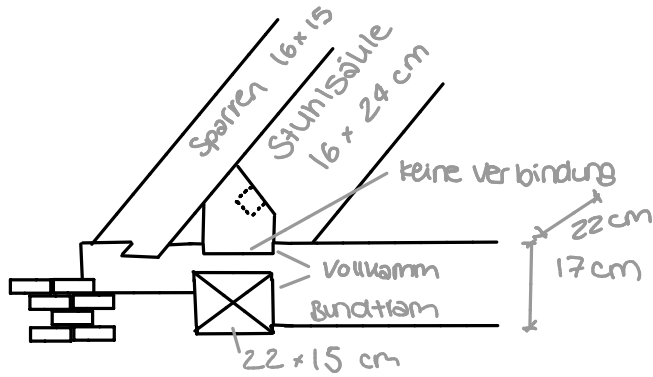


Verfasser: [Redacted]	Blatt: 420x297 A3	Datum: 12.04.2018	Masstab: 1:10
Projekt: Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen			
Planname: Ansicht 1 Plan 009b		Gruppenmitglieder: [Redacted]	



Verfasser: [Redacted]	Blatt: 420x297 A3	Datum: 12.04.2018	Masstab: 1:10
Projekt: Bestandsanalyse und Instandhaltung von Holzkonstruktionen			
Planname: Ansicht 2 Plan 009c		Gruppenmitglieder: [Redacted]	

Knotenbereich 1: Mauerwerk, Mauerbank, Sparren, Aufschiebtring, Mauerbank-Stoß



Annahme: C 24
 LFK s-f < 1000 m. ü. NN
 $k_{mod} = 0,9$
 $\gamma_n = 1,3$

$$f_{cod} = 14,54 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c90d} = 1,73 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{wd} = 1,87 \text{ N/mm}^2$$

Querschnittstragfähigkeit:

Sparren (Druck): $N_{Ed} = (160 \cdot 150) \cdot 14,54 : 1000 = 348,96 \text{ kN}$

Sparren (Biegung): $M_{Ed} = \frac{(160 \cdot 150^2)}{6} \cdot 16,62 \cdot 10^{-6} = 9,97 \text{ kNm}$

Mauerbank (Querdruk): $F_{c90,Ed} = (220 \cdot 220) \cdot 1,5 \cdot 1,73 : 1000 = 125,60 \text{ kN}$

Verbindung: Kamm
 Bundtrahm - Mauerwerk

Abmessungen: $t_k = 6 \text{ cm}$ (Einschnitt) \rightarrow Annahme!
 $b_1 = 22 \text{ cm}$
 $f_k = 3 \text{ cm} \rightarrow$ Annahme!
 $h_2 = 15 \text{ cm}$

Bemessungstragfähigkeit

$$F_{Rd} = \frac{F_{Rk, \text{kontakt}} \cdot k_{mod}}{\gamma_n} + V_{Ed} \cdot \mu_{1,d}$$

mit: $\mu_{1,d} = 0,18$

$$F_{Rk, \text{kontakt}} = \min \left[\begin{array}{l} F_{Rk, \text{querzug}} \\ F_{Rk, \text{querdruk}} \end{array} \right]$$

mit: $F_{Rk, qz} = 1,0 \cdot 1,44 \cdot \left(6,5 + \frac{18 \cdot 220^2}{150^2} \right) \cdot (30 \cdot 150)^{0,8} \cdot 0,4 = \underline{18\,660,69 \text{ kN}}$

$$k_s = 1,0$$

$$k_r = 0,7 \cdot (1,4 \cdot 220) / 150 = 1,44$$

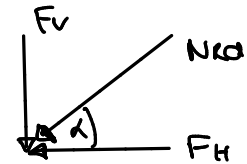
mit: $F_{Rk, qd} = 2,5 \cdot 1,5 \cdot 16800 = \underline{63.000 \text{ N}}$

$$A_g = 60 \cdot (220 + 2 \cdot 30) = 16.800 \text{ mm}^2$$

$$F_{Rk, \text{kontakt}} = \underline{18\,660,69 \text{ kN}}$$

$$F_{Rd} = \frac{18,661 \cdot 0,8}{1,3} + 0,18 \cdot 63 \cdot \cos 51^\circ = \underline{102,10 \text{ kN}}$$

Verbindung: Zapfen
Sparren - Bundstrahl



Abmessungen : $t_2 = 6 \text{ cm} \rightarrow$ Annahme!

$b_2 = \frac{b_{\text{sparren}}}{2} = 8 \text{ cm} \rightarrow$ Annahme!

$l_2 = 10 + t_2 \cdot \sin 51^\circ = 14,66 \text{ cm} \rightarrow$ Annahme!

Kraftumrechnung: $N_{kd} = F_v \cdot \sin \alpha = F_v \cdot \sin 51^\circ$
 $= F_H \cdot \cos \alpha = F_H \cdot \cos 51^\circ$

Bemessungstauglichkeit:

$$N_{kd} = 1,35 \cdot \min \left[\begin{array}{l} \sin 51^\circ \cdot F_{v, kd}, \text{ Querdruck} \\ \cos 51^\circ \cdot F_{H, kd}, \text{ Kontaktdruck} \\ \cos 51^\circ \cdot F_{H, kd}, \text{ Schub, Vorholz} \\ \cos 51^\circ \cdot F_{H, kd}, \text{ Schub, Zapfen} \end{array} \right]$$

$F_{v, kd}, \text{ Querdruck} = A_q \cdot k_{c90} \cdot f_{c90}$
 mit : $A_q = (16 - 9) \cdot \left(\frac{16}{\sin 51^\circ} + 2 \cdot 3 \right) = 1871,18 \text{ cm}^2$

$F_{v, kd}, \text{ Querdruck} = 1871,18 \cdot 1,5 \cdot 1,73 = \underline{48.573,21 \text{ N}}$

$F_{H, kd}, \text{ Kontaktdruck} = A_q \cdot f_{c90}$
 mit $f_{c90} = \frac{1,73 \cdot 14,54 \cdot 1,5}{14,54 \cdot \sin^2 51^\circ + 1,73 \cdot \cos^2 51^\circ \cdot 1,5} = 3,846 \text{ N/mm}^2$

$A_q = 8 \cdot 6 = 48 \text{ cm}^2$

$F_{H, kd}, \text{ Kontaktdruck} = 4800 \cdot 3,846 = \underline{18.460,80 \text{ N}}$

$F_{H, kd}, \text{ Schub, Vorholz} = 0,7 \cdot f_{vd} \cdot A_v$
 mit $A_v = 3 \cdot 16 = 48 \text{ cm}^2$

$F_{H, kd}, \text{ Schub, Vorholz} = 0,7 \cdot 1,87 \cdot 4800 = \underline{6.283,2 \text{ N}} \rightarrow$ Maßgebend

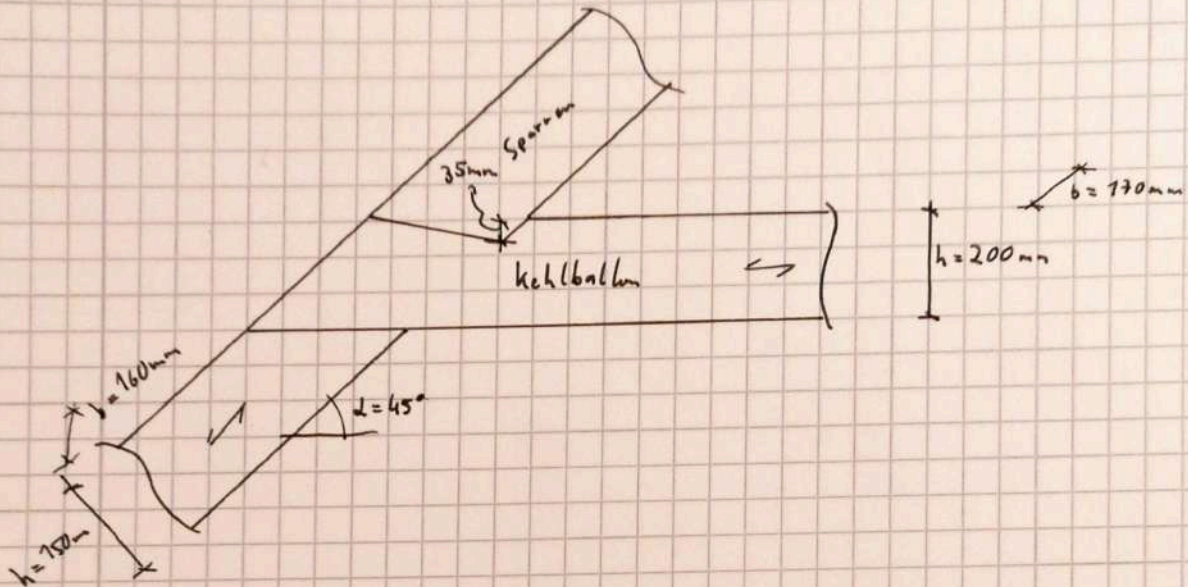
$F_{H, kd}, \text{ Schub, Zapfen} = k_s \cdot \frac{f_{vd} \cdot b_{ef} \cdot l_2}{1,0} \quad k_s \approx 2,0$

mit : $b_{ef} = 0,67 \cdot 8 = 5,36 \text{ cm}$

$F_{H, kd}, \text{ Schub, Zapfen} = 2,0 \cdot \frac{14,66 \cdot 5,36 \cdot 100 \cdot 1,87}{1,0} = \underline{29.388,02 \text{ N}}$

$N_{kd} = 1,35 \cdot 6.283,2 \text{ N} = 8.482,32 \text{ N} \approx \underline{\underline{8,48 \text{ kN}}}$

Knotenbereich 3: maximal übertragbare Druckkraft
der Weißschwanzverbindung Sparren-Kehlbalken



„Druck unter einem Winkel zur Faser“

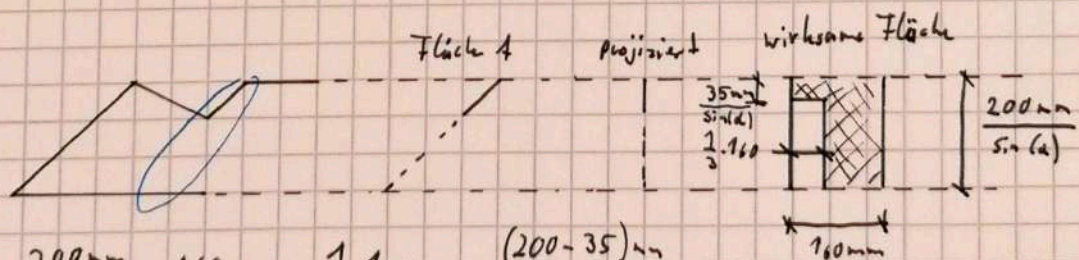
$$\hookrightarrow F_{c,d} \leq A \cdot f_{c,d}$$

Annahme: C24, LTK s-f < 1000 m.ü. NN $\rightarrow k_{mod} = 0,9$

$$\rightarrow f_{c,0,d} = 14,54 \frac{N}{mm^2}$$

$$\rightarrow f_{c,90,d} = 1,73 \frac{N}{mm^2}$$

$$\rightarrow k_{c,90} = 1,5 \text{ (beidseitiges Vorholz)}$$



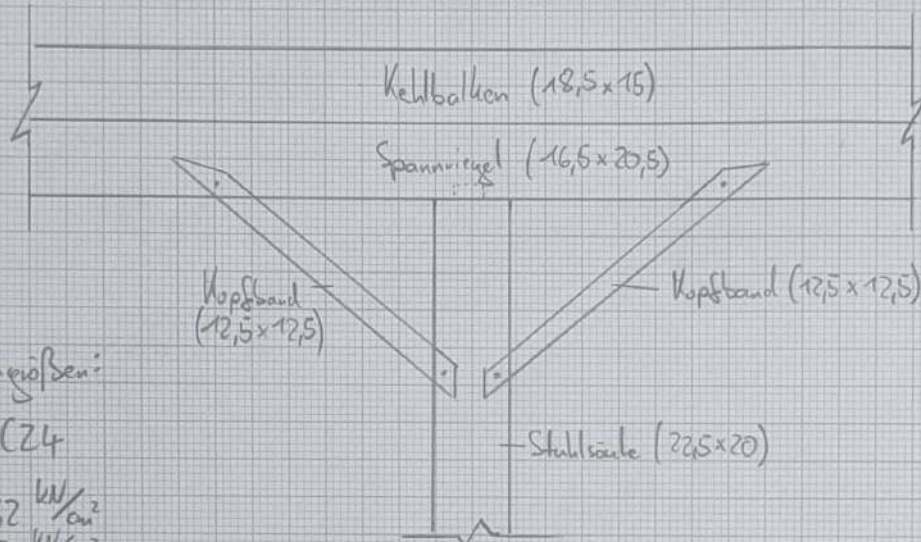
$$A = \frac{200 \text{ mm}}{\sin \alpha} \cdot 160 \text{ mm} - \frac{1}{3} \cdot 160 \text{ mm} \cdot \frac{(200 - 35) \text{ mm}}{\sin \alpha}$$

$$A = 32,81 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$f_{c,d} = \frac{f_{c,0,d} \cdot f_{c,90,d} \cdot k_{c,90}}{f_{c,0,d} \cdot \sin^2(\alpha) + f_{c,90,d} \cdot k_{c,90} \cdot \cos^2(\alpha)} = \frac{14,54 \cdot 1,73 \cdot 1,5}{14,54 \cdot \sin^2(45^\circ) + 1,73 \cdot 1,5 \cdot \cos^2(45^\circ)} = 4,4 \frac{N}{mm^2}$$

$$\Rightarrow \underline{F_{c,d,d} = 4,4 \frac{N}{mm^2} \cdot 32,81 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 = 144,45 \cdot 10^3 \text{ N} = 144,45 \text{ kN}}$$

Knoten 4: Ermittlung d. Bemessungstragfähigkeit



Materialkenngrößen:

Annahme: C24

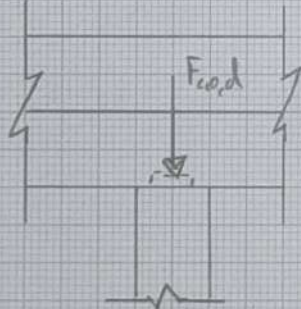
$$f_{m,ed} = 1,662 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{t,d} = 0,158 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{c,0,d} = 1,454 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{s,0,d} = 0,173 \text{ kN/cm}^2$$

Berechnung Druckkraft Stuhlsäule



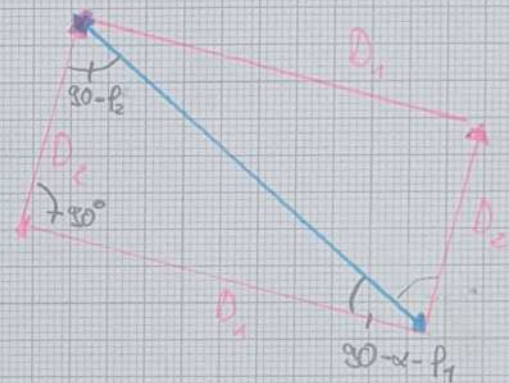
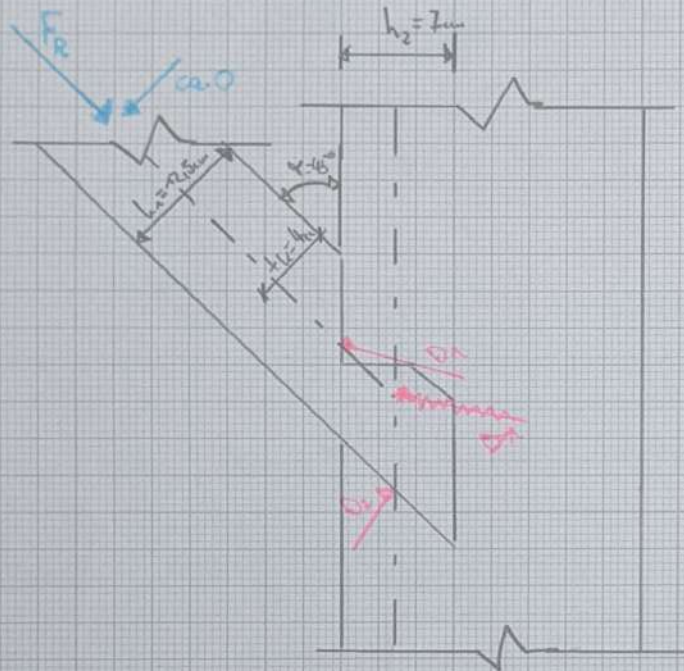
→ Annahme Druckkontakt

$$F_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

$$F_{c,0,d} = A_N \cdot f_{c,0,d} = 450 \cdot 1,454 = 654,3 \text{ kN}$$

$$\text{mit: } A_N = 22,5 \cdot 20 = 450 \text{ cm}^2$$

Berechnung Blattverbindung Kopfband-Stillsäule (nach Dis Meisel S115/116)
 Behandelt wird Kopfband mit geringsten Querschnitt und kleinsten Überdeckung



Annahme: $\mu_{\perp\mu} \approx 0,35$

$$f_k = f_{1,k} = f_{2,k} = \arctan(0,35) = 19,30^\circ$$

$F_{Rk} = \min \begin{cases} F_{Rk,vm1} \dots \text{Querschnitt Stab 2} \\ F_{Rk,vm2} \dots \text{Biegezug Rafter} \\ F_{Rk,vm3} \dots \text{Stab Holz} \\ F_{Rk,vm4} \dots \text{Schub vertikal} \end{cases}$

$$\rightarrow F_{Rd} = \frac{F_{Rk,vm1} \cdot 0,8}{\gamma_M \cdot 1,3}$$

$$F_{Rk,vm1}: A_1 = (12,5 - 4) \cdot \left(\frac{12,5}{\sin 45} + 2 \cdot 3 \right) + 4 \cdot \left(\frac{4}{\sin 45} + 3 \right) = 287 \text{ cm}^2$$

$$D_{1,N} = 2,5 \cdot 1,5 \cdot 28700 = 107.625 \text{ N} = 107,6 \text{ kN}$$

$$F_{Rk,vm1} = \frac{107,6 \cdot \sin(83,6)}{\cos(19,3) \cdot \sin(70,7)} = 120 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow R_{Rd,vm1} = \frac{120 \cdot 0,8}{1,3} = 83,08 \text{ kN}$$

F_{ex,vm2}: $A_B = 4 \cdot (12,5 - 4) = 34 \text{ cm}^2$

$$W_B = \frac{4 \cdot (12,5 - 4)^2}{6} = 48,17 \text{ cm}^3$$

$$e_B = \frac{12,5 - 4}{\tan 45} + \frac{7}{4 \cdot \sin 45} = 10,87 \text{ cm}$$

$$D_{2N} \approx \frac{24 \cdot 1,0 \text{ \& nicht merkw\u00fcrdigfrei}}{\left(\frac{10,87 + \tan(19,3) \cdot 12,5 - \frac{4}{2}}{48,17} - \frac{\tan(19,3)}{34} \right)} \approx 28,22 \text{ kN}$$

$$F_{ex,vm2} = \frac{28,22 \cdot \sin(83,6)}{\cos(19,3) \cdot \sin(25,7)} = 68,52 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{red,vm2} = \frac{68,52 \cdot 0,9}{1,3} = 47,44 \text{ kN}$$

F_{ex,vm3}: $A = \frac{\sin(25,7)}{0,1 \cdot 7 \cdot (0,7 - 7)} = 0,13$

$$B = \frac{\cos(19,3) \cdot (12,5 - 4)}{0,04 \cdot 12,5 \cdot 7 \cdot (0,7 - 7) \cdot 2} = 0,23$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{1}{0,13^2 + 0,23^2}} = 3,79 \text{ kN}$$

$$F_{ex,vm3} = \frac{3,79 \cdot \sin(83,6)}{\sin(25,7)} = 8,69 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{red,vm3} = \frac{8,69 \cdot 0,9}{1,3} = 6,02 \text{ kN}$$

F_{ex,vm4}: $D_1 = \frac{0,1 \cdot 12,5 \cdot (0,7 - 7) \cdot (1 + 0,15)}{\sin(25,7)} = 16,24 \text{ kN}$ | $k_k = \frac{4 \cdot 4}{12,5 - (12,5 - 4)} = 0,15$

$$F_{ex,vm4} = \frac{16,24 \cdot \sin(83,6)}{\sin(70,7)} = 17,10 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{red,vm4} = \frac{17,10 \cdot 0,9}{1,3} = 11,84 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{ed} = \min \begin{bmatrix} 83,08 \text{ kN} \\ 47,44 \text{ kN} \\ 6,02 \text{ kN} \\ 11,84 \text{ kN} \end{bmatrix} = 6,02 \text{ kN}$$

→ Die Verbindung der Überbleitung kann 6,02 kN aufnehmen.

Da hier die ungünstigste Verbindung betrachtet wurde, ist davon auszugehen, dass die anderen Überbleitungen der Kopfbander minimal mehr tragfähig sind.