

Anhang F: Entwurf und Konstruktion des Referenzfachwerkträgers

Anhang FA: Rechnerische Abbildung des Referenzfachwerkträgers	3
Anhang FA1: Anforderungen an Tragelemente und Fügedetails für einen Referenzfachwerkträger aus HPC-Fertigteilen	3
FA1.1 Definieren von Standardparametern.....	3
FA.1.2 Rechnerische Abbildung und Parameterstudien am Endsystem	5
FA.1.2.1 Modellierungsschritt 1 - 3D am Einzelträger (Einfaches Modell).....	5
FA.1.2.2 Modellierungsschritt 2 - 3D am Einzelträger (verfeinertes Modell).....	13
FA.1.3 Segmentverbindungen modularer Fachwerkträger	36
FA.1.4 Montagekonzepte und daraus resultierende Beanspruchungen.....	38
FA.1.5 Konstruktiver Brandschutz.....	40
FA.1.6 Dauerhaftigkeit (Korrosionsschutz)	45
Anhang FA2: Vorspannkräfte	47
Anhang FA3: Lastannahmen und Lastfallkombinationen.....	48
Anhang FA4: Bauzustände.....	51
Anhang FA5: Brandschutz	55
Anhang FB: Baubetriebliche Aspekte	56
Anhang FB1: Massenermittlung und Zusammenstellung für einen FWT	56
Anhang FB2: Kalkulation Herstellung.....	63
Anhang FB3: Zusammenstellung Kalkulationsgrundlagen zur Herstellung	72
Anhang FB4: Kalkulation Montage	75
Anhang FB5: Zusammenstellung Kalkulationsgrundlagen zur Montage	76
Anhang FC: Zeichnungen zum Fachwerkträger.....	77
Anhang FC1: Gesamtträger Segmentverbindung „Doppelpfosten“.....	77
Anhang FC2: Gesamtträger Segmentverbindung „Diagonale“	78
Anhang FC3: Konstruktionsdetails	79

Anhang FA: Rechnerische Abbildung des Referenzfachwerkträgers

Anhang FA1: Anforderungen an Tragelemente und Fügedetails für einen Referenzfachwerkträger aus HPC-Fertigteilen

FA1.1 Definieren von Standardparametern

Lastansatz

Für die weitere Betrachtung des Fachwerkträgers werden Lastannahmen für die Schneelast, Windlast, Eigenlast der Dachhaut sowie Pfetten und der Anhängelast getroffen (Tab. FA.1).

Randbedingungen:

- freistehende geschlossene Halle ($l/b/h = 100\text{m}/60\text{m}/25\text{m}$)
- Schneelastzone 2
- Höhe von 400m.ü.NN
- Winddruck $q_{w,k}$ wird für den maßgebenden Bereich I und Anströmrichtung $\theta = 90^\circ$
- Windlastzone 2 und Geländekategorie „Mischprofil Binnenland“
- Dachaufbau besteht aus einer Dachhaut und Pfetten, welche auf dem Fachwerkträger aufliegen.

Tab. FA.1: Lastzusammenstellung (Biadatz 2015)

Bauteil/Einwirkung	Bezeichnung	Art der Einwirkung	Last in kN/m ²
Dachhaut	$g_{D,k}$	ständig	0,30
Pfetten	$g_{P,k}$	ständig	0,15
Anhängelast	$g_{A,k}$	ständig	0,15
Schneelast	$q_{s,k}$	veränderlich	0,97
Windlast	$q_{w,k}$	veränderlich	0,18

Die Lasten greifen in den Knotenpunkten an. Dachlasten werden auf dem Obergurt (F), Anhängelasten.

- (F_A) auf dem Untergurt angesetzt (Abb. FA.1).

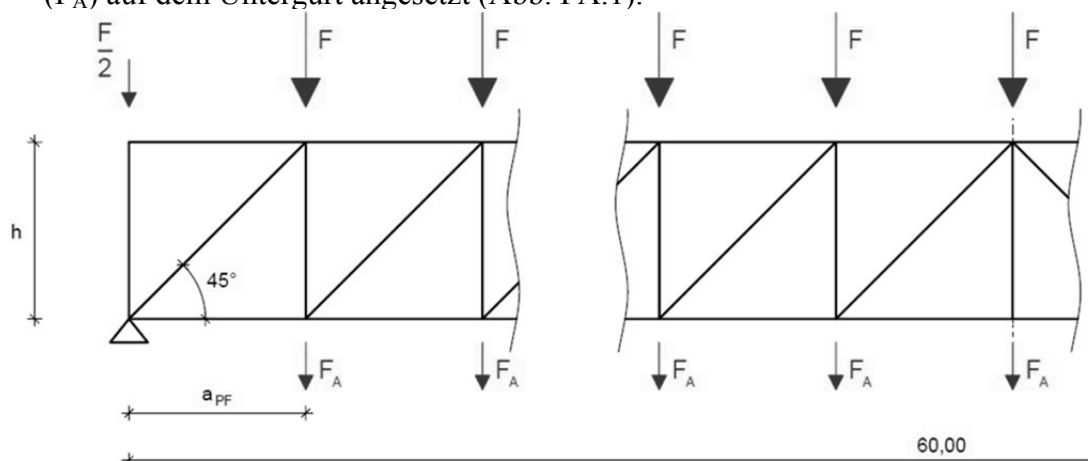


Abb. FA.1: Anordnung der Lasten und Statisches System (halber Träger) (Biadatz 2015)

Geometrie und Modellbildung

Der Fachwerkträger wird als Einfeldsystem mit einer Stützweite von 60m und einer Höhe von 4 m betrachtet. Daraus ergibt sich eine Schlankheit von 1/15. Der Abstand zwischen den Fachwerkträgern beträgt 8m und der Winkel der Diagonalen 45° . Auf der einen Seite ist die Lagerung in alle

Richtungen unverschieblich, auf der anderen Seite in Trägerrichtung verschieblich. Der Untergurt ist somit statisch bestimmt gelagert. Der Obergurt ist beidseitig senkrecht zur Trägerebene gehalten, wodurch eine Gabellagerung simuliert wird (Abb.FA.2). Die Berechnung erfolgt mit dem Computerprogramm SOFISTIK an einem dreidimensional modellierten Fachwerkträger nach der Theorie I Ordnung unter Ansatz einer linearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Der Träger wird aus Balkenelementen generiert. Es wird davon ausgegangen, dass der Beton stets im ungerissenen Zustand (Zustand I) bleibt. Dies soll durch Überdrücken aller Stäbe mittels Vorspannung erreicht werden. Es soll eine Kombination aus Vorspannung ohne Verbund sowie Vorspannung mit sofortigem Verbund eingesetzt werden. Die Vorspannung ohne Verbund im Untergurt wird an den Gurtenden als äußere Einzellasten zentrisch am Querschnitt angesetzt. Die Vorspannung mit sofortigem Verbund wird im Modell nicht berücksichtigt sondern im Nachgang auf die Berechnungsergebnisse aufaddiert. Auf die Pfosten werden zunächst keine Vorspannkräfte aufgebracht, da sich gem. Henze „für die Beschreibung des globalen Tragverhaltens keine entscheidenden Auswirkungen ergeben“ (Henze 2009, S. 144).

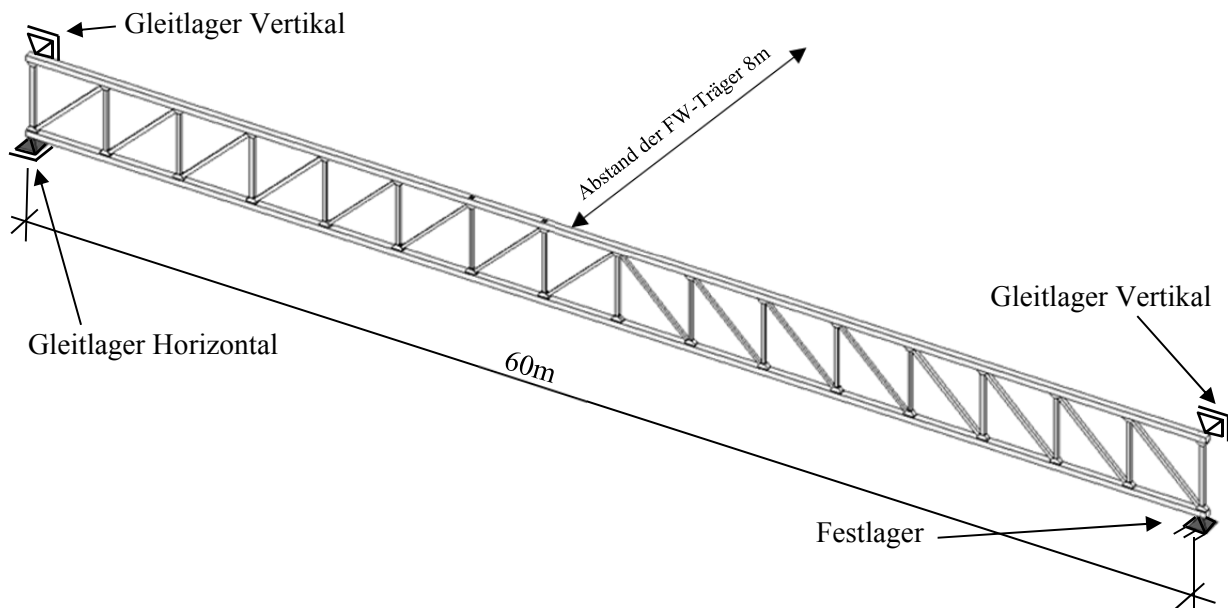


Abb. FA.2: System des Fachwerkträgers

Es wird ein Beton C100/115 modelliert und in zwei Varianten betrachtet (Tab. FA.2). Bei Materialansatz-Variante 1 treten keine oder nur vernachlässigbar kleine Betonzugspannungen $f_{ct,var1} = \sim 0 \text{ N/mm}^2$ auf. Die zulässigen Betondruckspannungen, $f_{c,var1} = \sim 40,00 \text{ N/mm}^2$, halten das Spannungsverhältnis $\sigma_{cd} / f_{cmd} \leq 0,4$ ein. In diesem Bereich zeigt Beton ein nahezu linear-elastisches Verhalten zwischen Spannungen und Dehnungen und ein lineares Kriechverhalten (Zilch, Zehetmaier 2010, S. 62, 74). In Materialansatz-Variante 2 werden für die zulässigen Druck- und Zugspannungen der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit $f_{ct,var2} = f_{ctd} = 2,10 \text{ N/mm}^2$ und der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit $f_{c,var2} = f_{cd} = 56,67 \text{ N/mm}^2$ nach DIN EN 1992-1-1 als Grenzen festgelegt (Zilch, Zehetmaier 2010, S. 68, 72). Dies stellt die Obergrenzen der Belastbarkeit des Betons C100/115 dar. Es wird der Unterschied beider Varianten betrachtet, um festzustellen, inwieweit sich eine höhere Betongüte bzw. die volle Ausnutzung des C100/115 auswirkt.

Tab. FA.2: Materialeigenschaften der Materialansatz-Varianten 1 und 2 (Biadatz 2015)

Materialansatz	Druckfestigkeit $f_{cd} [\text{N/mm}^2]$	Zugfestigkeit $f_{ctd} [\text{N/mm}^2]$	Elastizitätsmodul $E_{cm} [\text{N/mm}^2]$	Querdehnzahl ν
Variante 1	$\sim 40,00$	$\sim 0,00$	45000	0,2
Variante 2	56,67	2,1	45000	0,2

Durch Vorspannen der Querschnitte werden die genannten Grenzen der Zugfestigkeit eingehalten bzw. je nach Lastfallkombination (Tab. FA.3) nur geringfügig überschritten.

Tab. FA.3: Überblick Lastfälle und Lastfallkombinationen (Biadatz 2015)

Kurzbezeichnung	Lastfall/ -kombination	Einwirkung / Kombination
LF 1	Eigenlast Fachwerkträger	$G_{F,k}$
LF 2	Vorspannung (ohne Verbund)	P_k
LF 3	Eigenlast Dachaufbau	$G_{D,k} + G_{P,k}$
LF 4	Anhängelast	$G_{A,k}$
LF 5	Schneelast	$Q_{S,k}$
LF 6	Windlast	$Q_{W,k}$
LF 7	Pfostenvorspannung	$P_{Pf,k}$
GZT_1	Volllast (Schnee)	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
GZT_2	Volllast (Wind)	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot Q_{W,k}$
GZG_char_1	seltene Kombination (Schnee)	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,0 \cdot Q_{S,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$
GZG_char_2	seltene Kombination (Wind)	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,5 \cdot Q_{S,k} + 1,0 \cdot Q_{W,k}$
GZG_perm	Gebrauchslast	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k})$

FA.1.2 Rechnerische Abbildung und Parameterstudien am Endsystem

FA.1.2.1 Modellierungsschritt 1 - 3D am Einzelträger (Einfaches Modell)

Vordimensionierung der Querschnitte

Die Querschnitte des zu betrachtenden Fachwerkträgers werden zunächst überschlägig von Hand vorbemessen. Dabei werden die Querschnitte abgeschätzt und mit den in Kapitel FA.1 angegebenen Lasten und Randbedingungen das Feldmoment und daraus die Normalkraft in den Gurten berechnet.

$$M_{y,d,Feld} = \frac{q_{Ed,GZT1} \cdot e_{FW-Träger} \cdot l_{FW-Träger}^2}{8} \quad (Gl.FA.2)$$

$$N_{d,Gurt} = \frac{M_{y,d,Feld}}{h_{FW-Träger}} \quad (Gl.FA.2)$$

Dabei wird der Bemessungswert der einwirkenden Flächenlast in kN/m^2 für Lastfallkombination GZT1, der Abstand zwischen den Trägern $e_{FW-Träger}$ sowie die Länge $l_{FW-Träger}$ und Höhe $h_{FW-Träger}$ des Fachwerkträgers berücksichtigt. Des Weiteren wird die Druckkraft in den maßgebenden Diagonalen (Randdiagonalen) berechnet.

$$D_{d,Rand} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot q_{Ed,GZT1} \cdot e_{FW-Träger} \cdot (l_{FW-Träger} - h_{FW-Träger}) \quad (Gl.FA.3)$$

Schließlich wird aus der Druckkraft in Gurt und Diagonale die Querschnittsfläche überschlägig aus reiner Druckbeanspruchung ohne Knicken berechnet.

$$A_{Gurt} = \frac{N_{d,Gurt}}{1000 \cdot f_{cd}} \rightarrow a_{Gurt} = \sqrt{A_{Gurt}} \quad (Gl.FA.4)$$

$$A_{Stäbe} = \frac{D_{d,Rand}}{1000 \cdot f_{cd}} \rightarrow a_{Stäbe} = \sqrt{A_{Stäbe}} \quad (Gl.FA.5)$$

Der Fachwerkträger wird in SOFiSTiK gemäß den Angaben aus Kapitel 3.1 modelliert und daran Parameterstudien durchgeführt.

Studie: Abhängigkeit des Tragverhaltens von der Systemhöhe

In nachfolgend aufgeführter Parameteruntersuchung wird das Tragverhalten in Abhängigkeit einer variierenden Systemhöhe untersucht. Das Eigengewicht und die Kubatur des Fachwerkträgers nehmen mit zunehmender Systemhöhe ab (Abb.FA.3). Die Kubatur bezeichnet das Gesamtvolumen aller Bauteile. Insbesondere bei Materialansatz-Variante 1 kann eine Trägerhöhe von 3,75 m als besonders geeignet angesehen werden, da das Eigengewicht und die Kubatur (in m^3) bei kleineren Systemhöhen überproportional ansteigt. Größere Trägerhöhen hingegen bringen unter Berücksichtigung der unverhältnismäßig hohen Träger keine sinnvollen Materialeinsparungen.

Mit zunehmender Systemhöhe reduzieren sich die Bauteilquerschnitte und auch die Verformungen in Eigengewichtsrichtung nehmen ab. Auch hier ist die größte Verformungsabnahme im Bereich zwischen 2,5 und 4 m zu verzeichnen (Abb. FA.4).

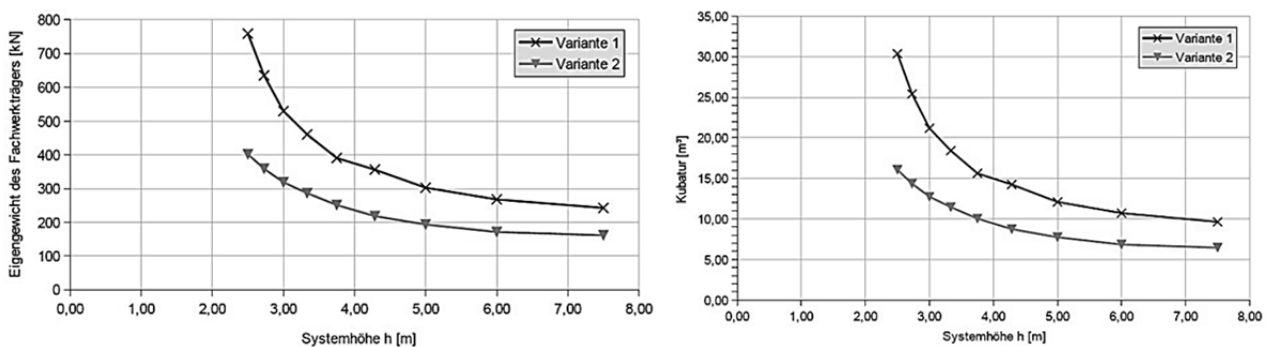


Abb. FA.3: Links: Eigengewicht des Fachwerkträgers in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante; Rechts: Kubatur des Fachwerkträgers in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

Mit zunehmender Systemhöhe reduzieren sich die Bauteilquerschnitte und auch die Verformungen in Eigengewichtsrichtung nehmen ab. Auch hier ist die größte Verformungsabnahme im Bereich zwischen 2,5 und 4 m zu verzeichnen (Abb. FA.4).

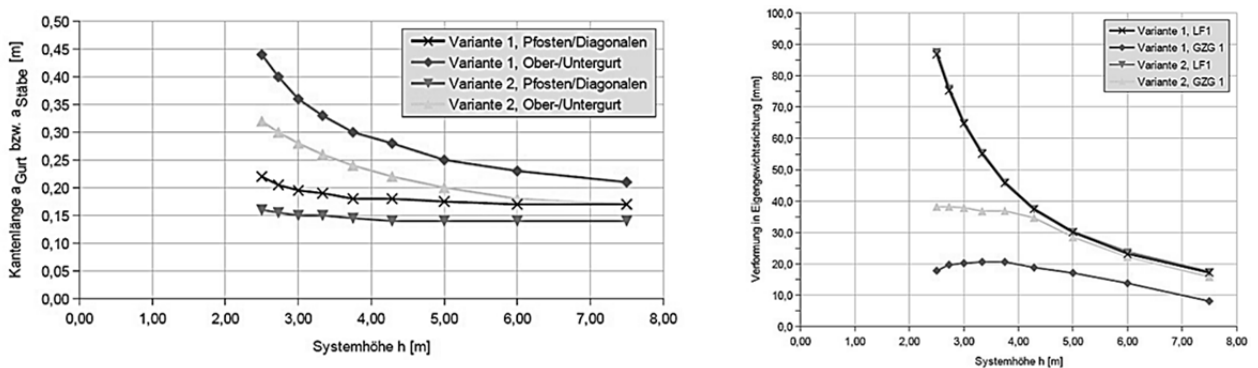


Abb.FA.4: Links: Kantenlänge des quadratischen Querschnittes in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante; Rechts: Verformung des Fachwerkträgers in Feldmitte aus LF1 und GZG1 in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

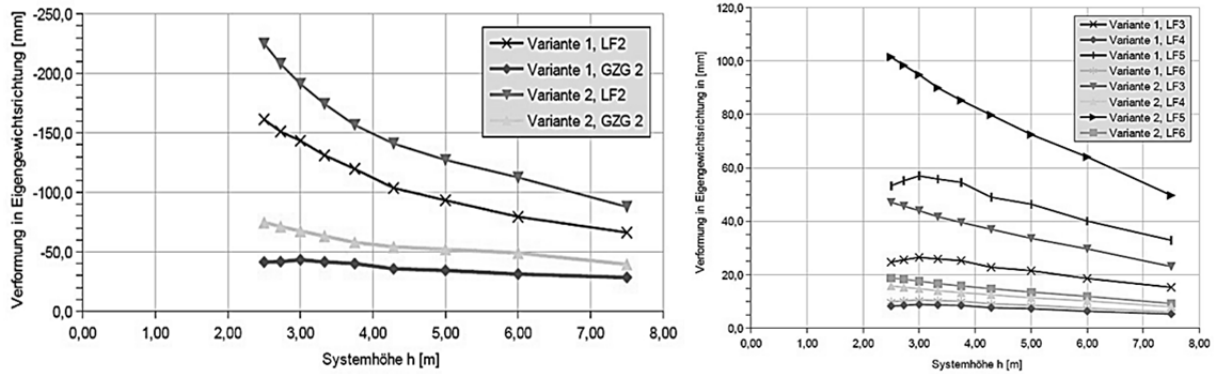


Abb. FA.5: Links: Verformung des Fachwerkträgers in Feldmitte aus LF2 und GZG2 in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante; Rechts: Verformung des Fachwerkträgers in Feldmitte aus LF3 bis LF6 in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante (Biadat 2015)

Eine Betrachtung der Vorspannkraft und der Normalkräfte im Ober- und Untergurt und des maximalen Biegemoments im GZT 1 zeigen ein analoges Verhalten (Abb. FA.6 u. FA.7 links). Bei den Normalspannungen im Untergurt aus GZT 1 ist dieses Verhalten jedoch nicht ersichtlich (Abb. FA.7 rechts).

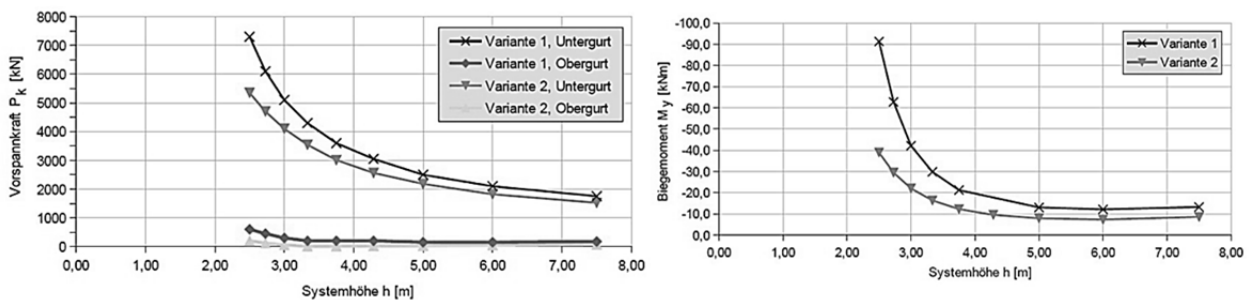


Abb. FA.6: Links: Vorspannkraft im Ober- (mit Verbund) und Untergurt (ohne Verbund) in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante; Rechts: maximales Biegemoment aus GZT1 in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante (Biadat 2015)

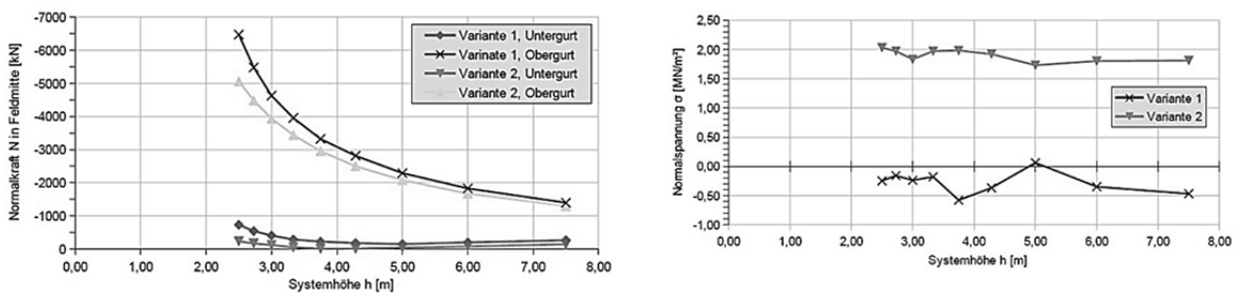


Abb. FA.7: Links: Normalkräfte im Ober- und Untergurt aus GZT1 in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante; Rechts: Normalspannungen im Untergurt aus GZT1 in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante (Biadat 2015)

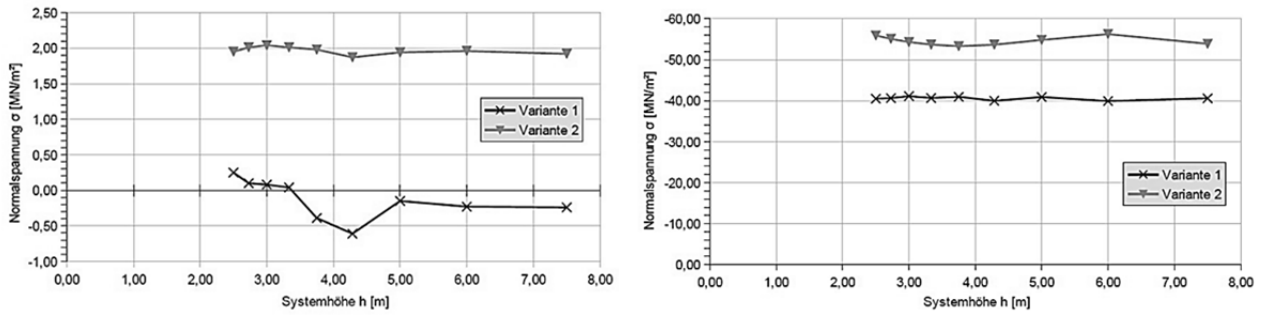


Abb. FA.8: Rechts: minimale Normalspannungen im Obergurt aus GZTI mit Vorspannung des Obergurtes (sofortiger Verbund) in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante; Rechts: maximale Normalspannungen im Obergurt aus GZTI mit Vorspannung des Obergurtes (sofortiger Verbund) in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

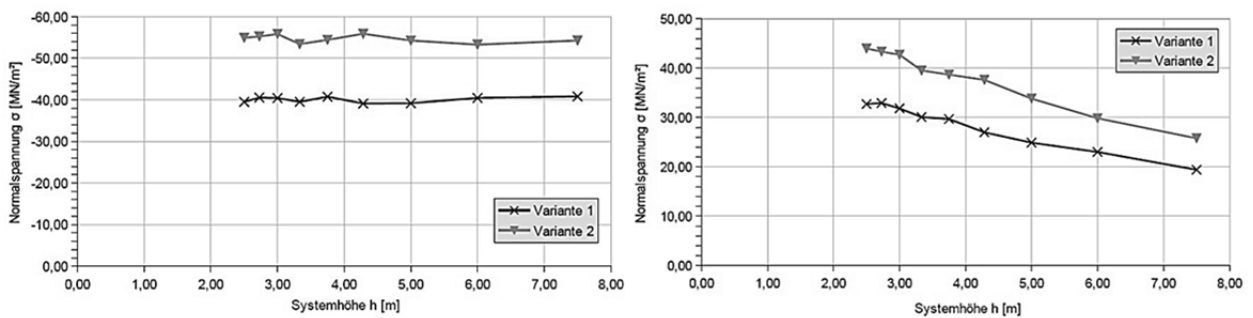


Abb. FA.9: Links: Normalspannungen in der äußersten Diagonale aus GZTI in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante; Rechts: Normalspannungen im Pfosten (Achse B) aus GZTI in Abhängigkeit der Systemhöhe und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

Im Bereich der Systemhöhe von 2,5 m bis 4,0 m erfahren die untersuchten Parameter ihre größte Abnahme. Gerade bei den Schnittgrößen, den Verformungen, dem Eigengewicht und der Kubatur ist dies eine wichtige Information um beim Entwurf des Trägers eine optimierte Konstruktion zu erhalten. Deshalb wird für die weiteren Betrachtungen eine Systemhöhe von 3,75 m gewählt. Materialansatz-Variante 1 verhält sich bei den Verformungen günstiger als Materialansatz-Variante 2, bei allen anderen Betrachtungen werden in Variante 2 die günstigeren Werte erreicht.

Studie: Abhängigkeit des Tragverhaltens von der Ausfachungsart

Der Fachwerkträger wird mit einer Systemhöhe von 3,75m modelliert und daran alle weiteren Untersuchungen durchgeführt. Eine weitere wichtige Frage bei der Konstruktion des Fachwerkträgers ist die Ausfachungsart. Deshalb werden in einem nächsten Schritt folgende Ausführungsarten untersucht:

- Ständerfachwerk mit zur Trägermitte steigenden Diagonalen
- Ständerfachwerk mit zur Trägermitte fallenden Diagonalen
- Strebenfachwerk mit steigender erster Diagonale
- Strebenfachwerk mit fallender erster Diagonale

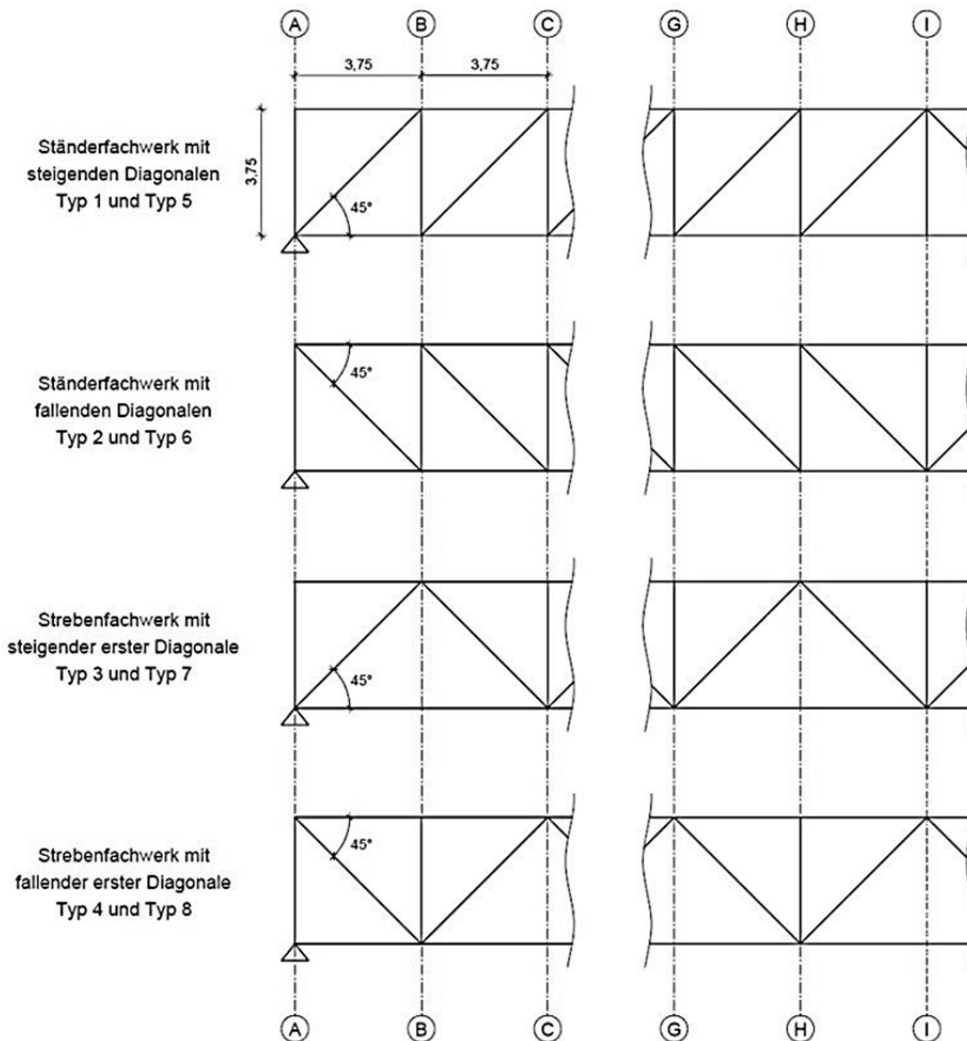


Abb. FA.10: Darstellung der Ausfachungsarten (Biadatz 2015)

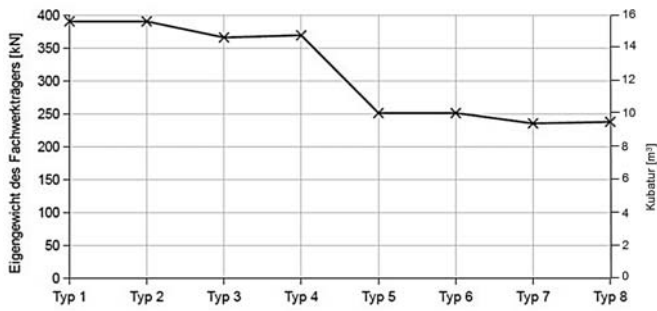


Abb. FA.11: Eigengewicht des Fachwerkträgers in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

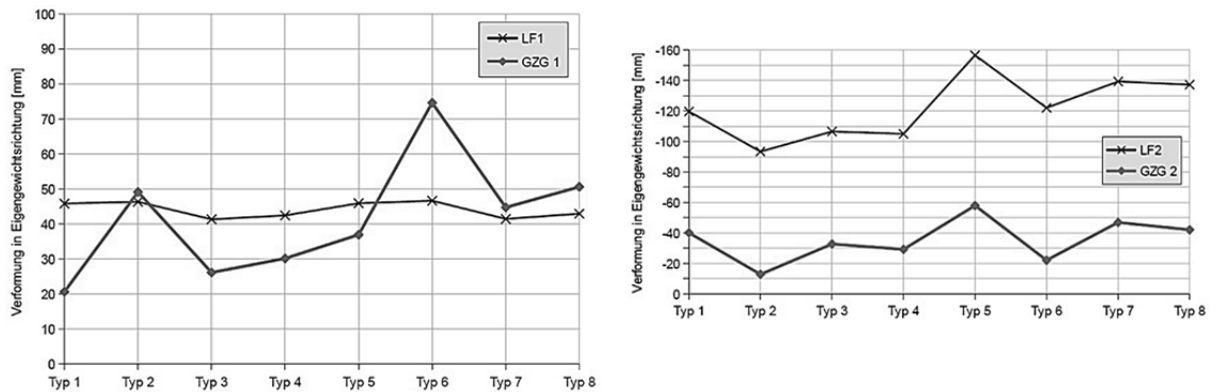


Abb. FA.12: Links: Verformung des Fachwerkträgers in Feldmitte aus LF1 und GZG1 in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante; Rechts: Verformung des Fachwerkträgers in Feldmitte aus LF2 und GZG2 in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

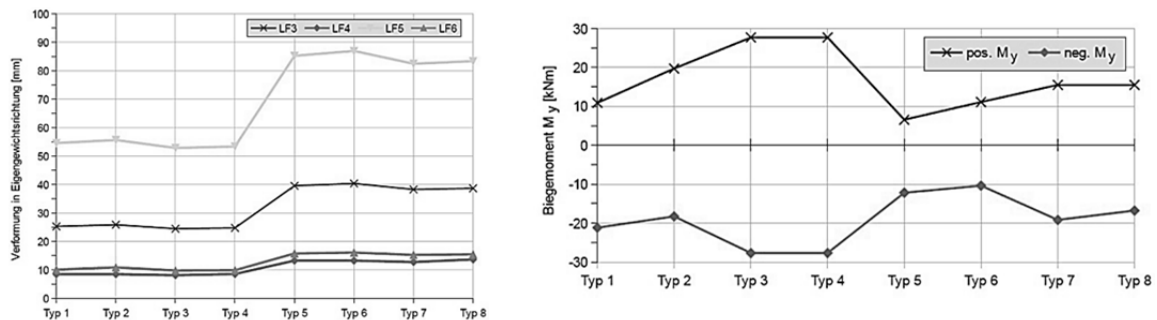


Abb. FA.13: Links: Verformung des Fachwerkträgers in Feldmitte aus LF3 bis LF6 in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante; Rechts: Maximales positives und negatives Biegemoment aus GZT1 in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

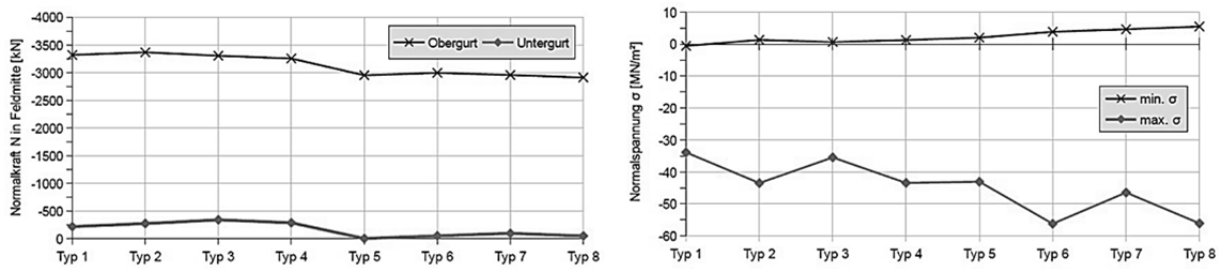


Abb. FA.14: Links: Normalkräfte im Ober- und Untergurt aus GZTI in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante; Rechts: Minimale und maximale Zug- bzw. Druckspannungen im Untergurt aus GZTI in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

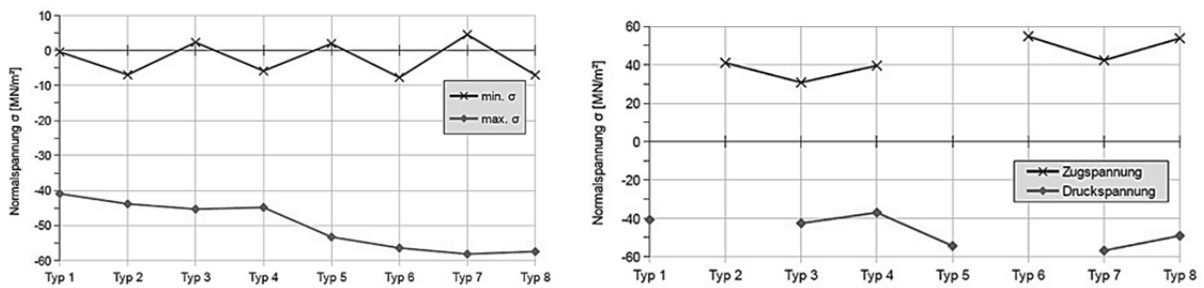


Abb. FA.15: Links: Minimale und maximale Zug- bzw. Druckspannungen im Obergurt aus GZTI mit Vorspannung des Obergurtes (sofortiger Verbund) in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante; Rechts: Maximale Zug- bzw. Druckspannungen in den Diagonalen aus GZTI in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

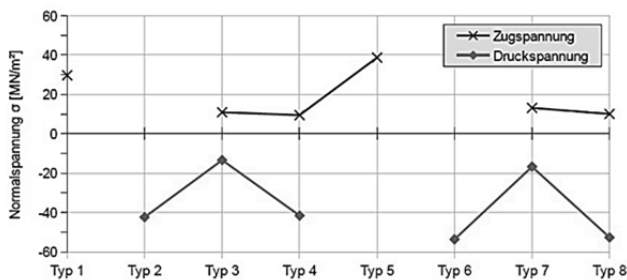


Abb. FA.16: Maximale Zug- bzw. Druckspannungen in den Pfosten aus GZTI in Abhängigkeit der Ausfachungsart und Materialansatz-Variante (Biadatz 2015)

Fachwerkkonstruktion auf Grundlage der Studien

Systemhöhe:

Der Fachwerkträger wird mit Systemhöhen zwischen 2,50m und 7,50m untersucht. Die untersuchten Parameter sind das Eigengewicht, die Kubatur, die Schnittgrößen, die Spannungen und die Verformungen. Die Tragfähigkeit nimmt von der kleinen Systemhöhe hin zur großen Systemhöhe zu. Anders herum nehmen die Schnittgrößen, die Spannungen und die Verformungen von der kleinen Systemhöhe hin zur großen Systemhöhe ab. Bei gleichen Trag- und Verformungsverhalten muss der niedrigere Fachwerkträger mit größeren Querschnitten ausgeführt werden als der große Fachwerkträger. Das hat Auswirkungen auf das Eigengewicht und die Kubatur.

Aufgrund der durchgeführten Studien zum modularen Fachwerkträger wird für die weitere Bearbeitung eine Systemhöhe von 3,75 m berücksichtigt. Bei dieser Höhe zeigen die untersuchten Parameter (Schnittgrößen, Spannungen, Verformungen, Kubatur) die größte Abnahme (s. beispielhaft Abb. FA.3).

Ausfachungsart:

Es werden die Ausfachungsarten

- Ständerfachwerk mit zur Trägermitte steigenden Diagonalen
- Ständerfachwerk mit zur Trägermitte fallenden Diagonalen
- Strebenfachwerk mit steigender erster Diagonale
- Strebenfachwerk mit fallender erster Diagonale

untersucht.

Das Eigengewicht, die Kubatur und die Normalkräfte in den Gurten unterscheiden sich bei den betrachteten Ausfachungsarten nur unwesentlich. Bei den Verformungen zeigt das Ständerfachwerk mit steigenden Diagonalen das günstigste Verhalten. Weiter sind die Biegemomente und die Spannungen in den Bauteilen bei dieser Ausfachungsart am geringsten.

Ein entscheidender Vorteil ist, dass beim Ständerfachwerk mit steigenden Diagonalen nur die Pfosten vorgespannt werden müssen.

Aufgrund dieser Eigenschaften wird das Fachwerk als Ständerfachwerk mit unter 45° steigenden Diagonalen ausgeführt.

Materialansatz-Variante:

Es wird der Materialansatz der Variante 1 berücksichtigt, wodurch ein lineares Kriechverhalten und durch die nicht vollständige Ausnutzung der Bemessungswerte der Druck- bzw. Zugfestigkeit eine zusätzliche Sicherheit gegeben ist.

FA.1.2.2 Modellierungsschritt 2 - 3D am Einzelträger (verfeinertes Modell)

Modellbildung

Das einfache Modell des Modellierungsschritt 1 wird um die Berücksichtigung der Fehlflächen der Hüllrohre in den Gurten, der Exzentrizität des Knotenelements (modelliert durch Hilfsstab) und der Pfostenvorspannung erweitert. Die Pfostenvorspannung wird durch äußere Lasten abgebildet (Abb. FA.17).

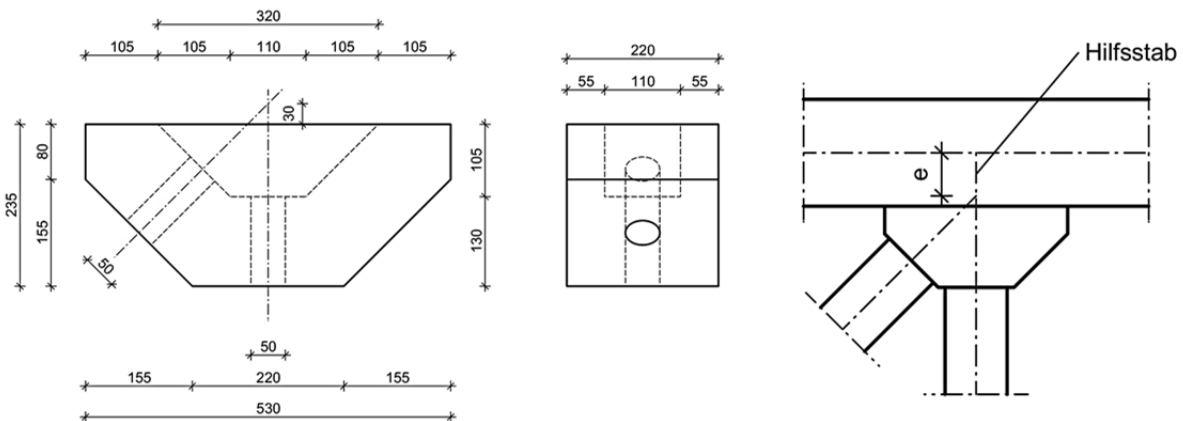


Abb. FA.17: Links: Knotenelement nach Henze; rechts: exzentrischer Stabanschluss (Biadatz 2015)

Der Obergurt wird mit einer Vorspannung im sofortigen Verbund, der Untergurt mit einer Kombination aus Vorspannung im sofortigen Verbund und Vorspannung ohne Verbund berücksichtigt. Die Pfosten werden mit Gewindestäben ohne Verbund vorgespannt. Die Diagonalen erhalten als Druckdiagonalen keine Vorspannung (Tab. FA.4). Die inneren 17 Füllstäbe (Diagonalen und Pfosten) werden mit einem Querschnitt von 14x14cm, die restlichen 16 Füllstäbe mit 18 × 18 cm ausgeführt (Abb. FA.18).

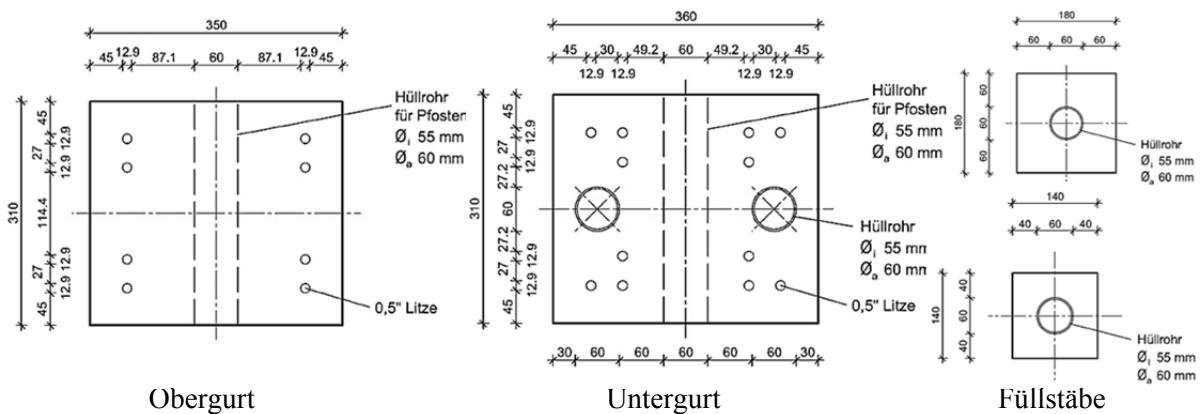


Abb. FA.18: Querschnitte Modellierungsschritt 2 (Biadatz 2015)

Tab. FA.4: Überblick zu den vorgespannt Bauteilen (Biadatz 2015)

Bauteil	Spannverfahren	Spannsystem	Vorspannkraft [kN]
Untergurt	sofortiger Verbund	0,5"-Litze ¹	12 • 105 (1260)
	ohne Verbund	0,6"-Litze ²	2 • 1080 (2160)
Obergurt	sofortiger Verbund	0,5"-Litze ¹	8 • 80 (640)
Pfosten	ohne Verbund	Gewindestab 40WR ³	30 bis 800

¹ Spannstahtlitze St 1570/1770 aus sieben kaltgezogenen, glatten Einzeldrähten (Z-12.3-107)

² SUSPA / DSI Monolitzenspannsystem ohne Verbund, Typ 6-5 (Z-13.72-30036)

³ DYWIDAG Stabspannsystem, Gewindestab 40WR (Z-13-71-50123)

Einfluss aus Schwinden

Der Schwindprozess des Betons kann in die Komponenten Kapillarschwinden, Schrumpfen, Trocknungsschwinden und Karbonatisierungsschwinden eingeteilt werden. Das Kapillarschwinden soll durch die Betonrezeptur und die Nachbehandlung vermieden werden. Es darf zu keinem oberflächennahen Wasserverlust kommen. Das Schrumpfen entsteht durch die Volumenabnahme aus der Reaktion des Wassers und des Zement (chemisches Schwinden) sowie der inneren Austrocknung der Zementsteinmatrix (autogene Schwinden). Die Abgabe der Bauteilfeuchtigkeit an die Umgebungsluft wird als Trocknungsschwinden bezeichnet. Das Trocknungsschwinden kann durch den verwendeten Zementtyp, den Schutz der betonierten Oberflächen sowie der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung beeinflusst werden. Beim Karbonatisierungsschwinden reagieren Teile des erhärteten Zementsteins mit dem CO₂ der Luft. Das führt zu einer Umbildung des kristallinen Gefüges der Betonoberfläche wodurch bereits molekular gebundenes Wasser wieder frei wird. Für den Fertigungsprozess sind jedoch das Schrumpfen und das Trocknungsschwinden maßgeblich. Neben den genannten Maßnahmen werden die Bauteile des modularen Fachwerkträgers als Endlosstränge produziert. Im Nachgang erfolgt das Ablängen der einzelnen Elemente mit einer Säge. Dadurch ist der Schwindprozess der Bauteile weitestgehend abgeklungen, wenn das Ablängen für ein Projekt erfolgt. Die einzelnen Elemente können exakt auf Länge geschnitten und, wenn nötig, noch geschliffen werden. Daher wird im Montagezustand und auch in der Berechnung kein Einfluss aus Schwinden berücksichtigt.

Einfluss aus Kriechen

Der Einfluss aus Kriechen auf die Verformung des modularen Fachwerkträgers wird aus dem Lastfall GZG 2 abgeschätzt. Die kriecherzeugenden Spannungen führen zu keiner Überschreitung des Wertes $\sigma_c = 0,45 \cdot f_{ck}$. Die mittlere Bauwerkstemperatur befindet sich im Bereich zwischen -40 °C und +40 °C und die relative Umgebungsfeuchte (RH Wert) liegt zwischen 40 % und 100 %. Somit sind die Bedingungen erfüllt um die Kriechverformungen nach DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 3.1.4 zu ermitteln. Weiterhin darf angenommen werden, dass das Kriechen und Schwinden voneinander unabhängig ist, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Kriechverformungen und kriecherzeugenden Spannungen besteht, dass das Superpositionsprinzip auch für Einflüsse aus verschiedenen Altersstufen gilt und die Einflüsse aus ungleichmäßigen Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufen vernachlässigbar sind.

Die Kriechverformung wird in der Simulation mit einem wirksamen Elastizitätsmodul abgebildet.

$$E_{c,eff} = E_{cm} / (1 + \varphi(t, t_0)) \quad (\text{Gl.FA.6})$$

mit: $E_{c,eff}$ wirksamer Elastizitätsmodul in MN/m²
 E_{cm} mittlerer Elastizitätsmodul (Sekantenwert) in MN/m²
 $\varphi(t, t_0, t_\infty)$ Kriechzahl

Die Endkriechzahl wird unter Annahme einer Belastung bei 20 Tagen sowie trockener Umgebungsbedingungen im Einbauzustand für einen Beton C100/115 mit dem Nomogramm für trockene Innenräume und relative Luftfeuchte = 50 % zu $\varphi(t_\infty) = 0,9$ bestimmt. Dabei ist für jeden Querschnitt die wirksame Bauteildicke h_0 zu bestimmen.

$$h_0 = 2 \cdot A_c / u \quad (\text{Gl.FA.7})$$

mit: A_c Betonquerschnittsfläche in cm^2
 u Luft ausgesetzte Querschnittsumfang in cm

Der Wert h_0 liegt für die Gurte, Pfosten und Diagonalen zwischen 6 und 16,3 cm, wodurch geringfügig unterschiedliche Endkriechzahlen resultieren. Der daraus errechnete wirksame Elastizitätsmodul wird in der Simulation als neuer Elastizitätsmodul des Betons mit

$$E_{c,eff} = 23684 \text{ MN/m}^2 \quad (\text{Gl.FA.8})$$

für die Berechnung der Verformung verwendet. Der reduzierte Elastizitätsmodul führt zu einer Vergrößerung der negativen Verformungen (Verformungen entgegen der Eigengewichtsrichtung). Zusätzlich erfährt das System Kriechverformungen durch die Spannungen aus dem sofortigen Verbund der Gurte. Um dies zu berücksichtigen werden die Dehnungen (Stauchungen) am ideellen Querschnitt berechnet und am System als Lastfall (äußere Kräfte) berücksichtigt. Die negativen Dehnungen betragen für den Obergurt 0,0001088 mm/mm und für den Untergurt 0,0002102 mm/mm. Im weiteren Schritt werden die Spannkraftverluste für den Ober- und Untergurt berechnet. Dabei wird sowohl die Vorspannung mit sofortigem Verbund als auch die Vorspannung ohne Verbund berücksichtigt. Die Spannkraftverluste betragen im Untergurt ca. 20 % und im Obergurt ca. 5 %. Die Vorspannkraft des Fachwerkträgers werden prozentual abgemindert und die Verformungen berechnet (Biadatz 2015).

In Tab.FA.5 sind die Verformungen des Fachwerkträgers in den Einzelkomponenten dargestellt, wobei die positiven Werte in Eigengewichts Richtung und die negativen Werte entsprechend dagegen zu betrachten sind.

Tab. FA.5 Entwicklung der Verformungen des Fachwerkträgers in Feldmitte (Biadatz 2015)

<i>Phase</i>	<i>Einfluss auf Verformung</i>	<i>Anteil an Gesamtverformung [mm]</i>	<i>Gesamtverformung in Eigengewichts Richtung [mm]</i>	
<i>Einbau Fachwerkträger</i>	<i>Eigenlast Fachwerkträger, Vorspannung</i>	-30,8	-30,8	
<i>Fertigstellung Dach (GZG, Gebrauchslast)</i>	<i>Dachaufbau, Anhängelast</i>	27,7	-3,1	
<i>Zeitabhängiges Verhalten (Endzustand, $t = \infty$)</i>	<i>Kriechen ohne Anteil aus sofortigem Verbund</i>	-2,9	-6,0	
	<i>Kriechen mit Anteil aus sofortigem Verbund</i>	<i>für A_{cn}</i>	-17,8	-23,8
		<i>für A_i</i>	-15,8	-21,8

Einfluss Umlenkkräfte aus Vorspannung

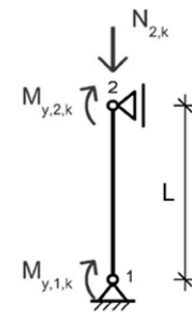
Der Einfluss aus Umlenkkräften aus Vorspannung ist gering und wird nicht weiter verfolgt (Biadatz 2015).

Knicken der Einzelstäbe

In einem weiteren Schritt werden die Druckglieder des Fachwerkträgers hinsichtlich der Knicksicherheit untersucht. Dabei werden die Schnittgrößen aus der FE-Rechnung übernommen (Tab. FA.6). Die Hüllrohre in den Querschnitten werden nicht berücksichtigt. Die daraus resultierende Differenz beträgt beim Trägheitsradius 3% und beim Flächenträgheitsmoment 9%. Es wird eine Pendelstütze abgebildet. In Wirklichkeit wird sich am Fachwerkknoten durch den Druckkontakt eine Drehfeder einstellen. Der betrachtete Querschnitt und die Knicklänge liegen auf der sicheren Seite.

Tab. FA.6: Charakteristische Schnittgrößen mit Systemskizze (Biadatz 2017)

Element	$N_{2,G,k}$ [kN]	$N_{2,Q,k}$ [kN]	$M_{y,2,G,k}$ [kNm]	$M_{y,2,Q,k}$ [kNm]	$M_{y,1,G,k}$ [kNm]	$M_{y,1,Q,k}$ [kNm]
Obergurt	1904	953	-6,01	5,50	-0,03	-2,60
Untergurt	1345	-	9,40	-	24,90	-
Diagonale	490	319	-1,99	-2,05	-7,09	-2,45
Pfosten	890	-	-3,75	-	-4,30	-



Diagonalen:

Aus dieser Berechnung folgt eine Erhöhung des Querschnitts der Diagonalen von 14 x 14cm bzw. 18 x 18cm auf 22 x 22cm, um den erforderliche Bewehrungsgrad zu senken. Aufgrund einer einheitlichen Fertigung werden im Folgenden auch die Pfosten mit diesem Querschnitt ausgeführt. Um die Konstruktion dennoch möglichst wirtschaftlich zu gestalten, wird in einer Studie die erforderliche Längsbewehrung der Diagonalen in Abhängigkeit der Bewehrungslage, des Berechnungsverfahrens und der Bewehrungsverteilung untersucht (Abb. FA.19).

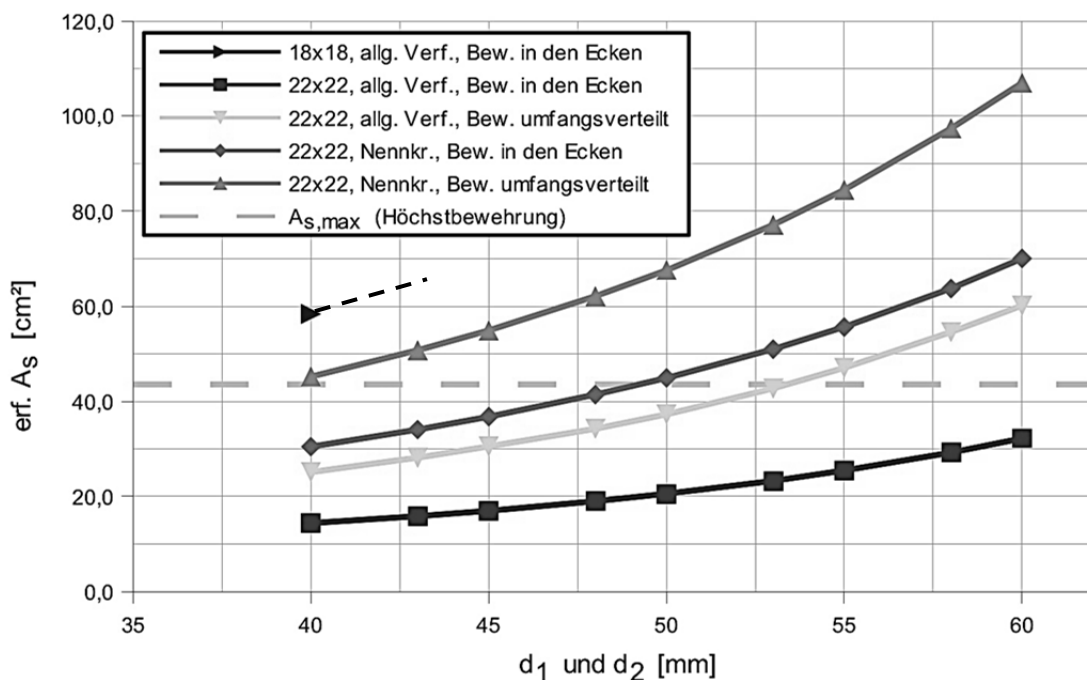


Abb. FA.19: Erforderliche Längsbewehrung der Diagonalen in Abhängigkeit der Bewehrungslage, des Berechnungsverfahrens und der Bewehrungsverteilung nach Biadatz (2017)

Je nach Produktionsanforderung werden 2 Varianten der Bewehrungsanordnung vorgeschlagen. Zum einen wird eine Längsbewehrung $\varnothing 25$ mm in den Ecken gewählt, was eine schnellere Herstellung ermöglicht. Zum anderen wird eine umfangsverteilte Längsbewehrung mit $\varnothing 16$ mm in den Ecken und dazwischen $3\varnothing 14$ mm je Seite angeordnet. Diese Variante macht nur dann Sinn, wenn möglichst geringe Stahlquerschnitte gefordert sind. Die Querkraftbewehrung wird in beiden Varianten über Bügel $\varnothing 8/22$ cm erreicht. An den Enden der Diagonalen ist ein zusätzlicher Bügel erforderlich (40 % der größeren Querschnittsabmessungen). Bei Serienfertigung und damit ggf. einer Produktion der Diagonalen als Endlosstrang ist der reduzierte Bügelabstand über die gesamte Länge vorzusehen. Dies bedeutet bei einer Stablänge von 5,3 m eine Erhöhung der Bügelanzahl um 52 % (41 statt 27 Bügel).

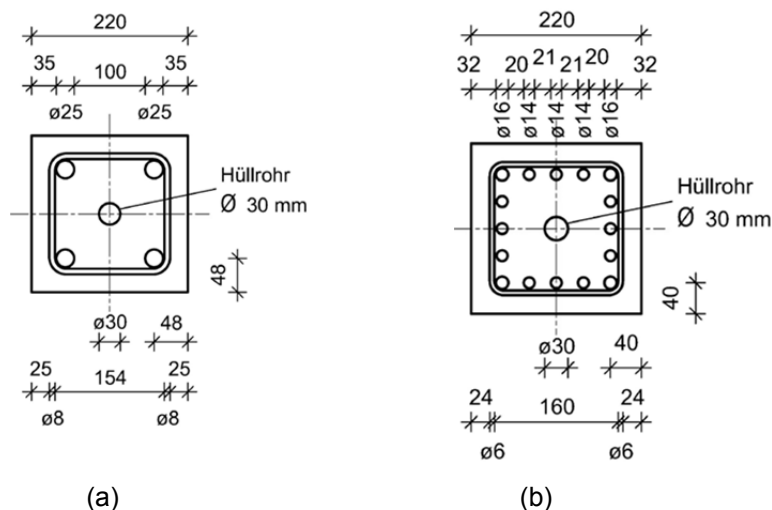


Abb. FA.20: Querschnitte der Diagonalen mit Bewehrungsanordnung; (a) Diagonale - Bewehrung in den Ecken (b) Diagonale - Bewehrung umfangsverteilt (Maße in mm) (Biadatz 2017)

In der Mitte der Diagonalen ist ein Hüllrohr $\varnothing 30$ mm vorgesehen und bei Bedarf eine Vorspannung zu erzielen.

Pfosten:

Die Pfosten werden im Bauzustand während der Vorspannung maximal belastet, im späteren Tragwerk erfahren sie aufgrund der Zugkräfte eine Entlastung. Es ist die Mindestbewehrung erforderlich. Die Längsbewehrung wird konstruktiv mit $\varnothing 25$ je Eck gewählt und die Bügelbewehrung mit $\varnothing 8/16$ cm vorgesehen. Der zusätzliche Bügel an den Enden des Pfostens sowie die Überlegungen bezüglich einer Serienfertigung sind beim Pfosten analog zu den Diagonalen zu betrachten (Abb. FA.21).

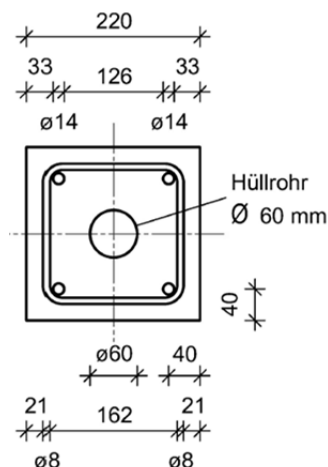


Abb. FA.21: Querschnitte der Pfosten (Bewehrung in den Ecken) mit Bewehrungsanordnung; (Maße in mm) (Biadatz 2017)

Gurte:

In Fachwerkebene sind die Gurte im Bereich der Stützen gehalten. Rechtwinklig zur Fachwerkebene ist der Obergurt durch die Koppelpfetten gehalten wodurch keine Knickgefahr besteht. Der Untergurt hingegen wird nicht bzw. nur punktuell gehalten. Die Berechnung dazu erfolgt unter Berücksichtigung der Eigenform und entsprechenden Vorverformung nach Theorie 2. Ordnung am Gesamtsystem.

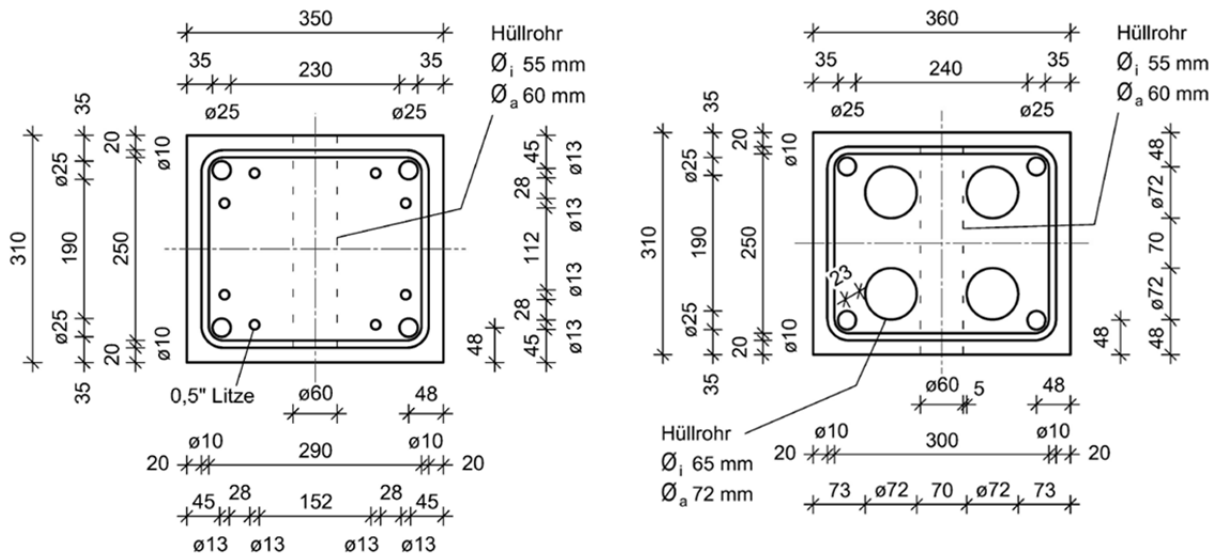


Abb. FA.22: Querschnitte Obergurt links und Untergurt rechts (Maße in mm) (Biadatz 2017)

Im Ober- und Untergurt wird eine Längsbewehrung mit 4 Stäben $\varnothing 25$, welche die Mindestbewehrung abdeckt und eine Bügelbewehrung von $\varnothing 10/30$ cm gewählt. Die Bügelbewehrung wird auf die maximale Querkraft von 43,3 kN im GZT 1 (Bereich Untergurt A-B) bemessen. Grundsätzlich wäre eine Anpassung des Obergurtquerschnittes auf eine Breite von ebenfalls 36 cm möglich um eine einheitliche Schalung zu verwenden (Abb. FA.21). Dies würde eine zu vernachlässigende Zunahme des Eigengewichts von 4,7 kN für den gesamten Träger bedeuten. Da die Gurte als Fertigteile nicht über die gesamte Trägerlänge hergestellt werden können, müssen diese gestoßen werden. Um eine aufwändige Kopplung dieser Stöße zu umgehen wird die Kombination aus Vorspannung mit Verbund und Vorspannung ohne Verbund durch eine reine Vorspannung ohne Verbund ersetzt (Abb. FA.21). Die Vorspannung erfolgt mit 4 Hüllrohren $\varnothing 72$ mm in denen je 5 Monolitzen $\varnothing 15,7$ mm (Z-13.72-30036) vorgesehen werden.

Beanspruchungen aus unterschiedlichen Laststellungen

Es wird geprüft, wie der Fachwerkträger auf eine kurzzeitige asymmetrische Belastung reagiert. Dazu werden 3 asymmetrische Fälle einer Schneelast simuliert (Abb. FA.22).

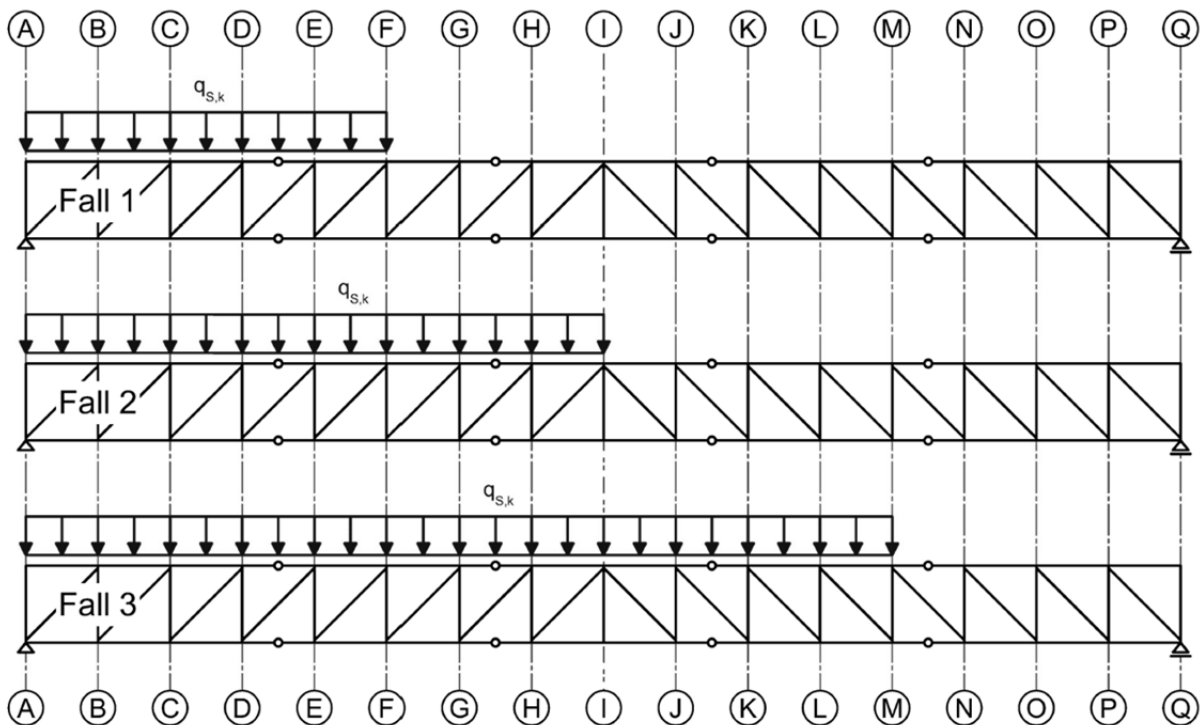


Abb. FA.23: Darstellung der 3 asymmetrischen Fälle einer Schneelast (Biadatz 2017)

Des Weiteren wird der Havariefall einer Wasserlast abgebildet. Hierbei steigt der Wasserpegel bis auf die Höhe der Notabläufe und erreicht in Achse A und Q eine Höhe von 50 cm. Bei einer angenommenen Dachneigung von 2° füllt sich das Dach bis zur Achse E bzw. M mit Wasser und bildet einen dreiecksförmigen Lastkeil aus (Abb.FA.23). Die Wasserlast beträgt an den Trägerenden $q_{wa,k} = 40\text{kN/m}$.

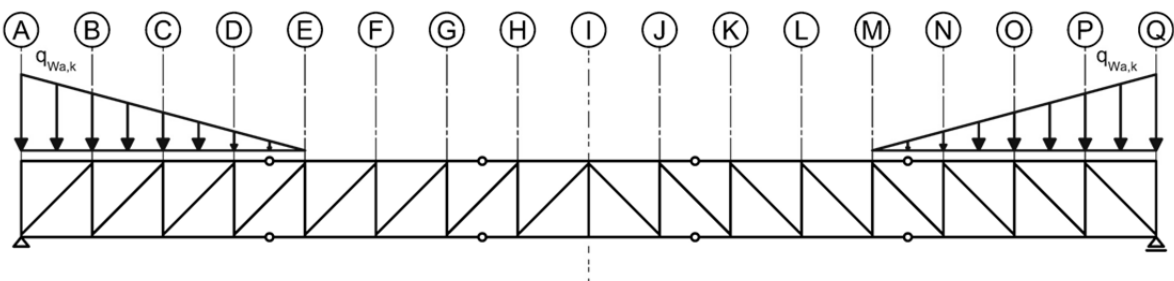


Abb. FA.24: Darstellung der Wasserlasten im Havariefall (Biadatz 2017)

Aus diesen zusätzlichen Betrachtungen ergeben sich neue Lastfallkombinationen (Tab. FA.6). Die Eigen- und Windlasten wirken sich aufgrund ihrer gleichmäßigen Verteilung teilweise günstig auf die Normalspannungen aus. Deshalb wird für die günstig wirkende Eigenlast ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_{G,inf} = 1,0$ berücksichtigt, die Windlast bleibt unberücksichtigt ($\gamma_{Q,W,inf} = 0$). Die Lasten werden als Einzellasten an den Knotenpunkten eingeleitet.

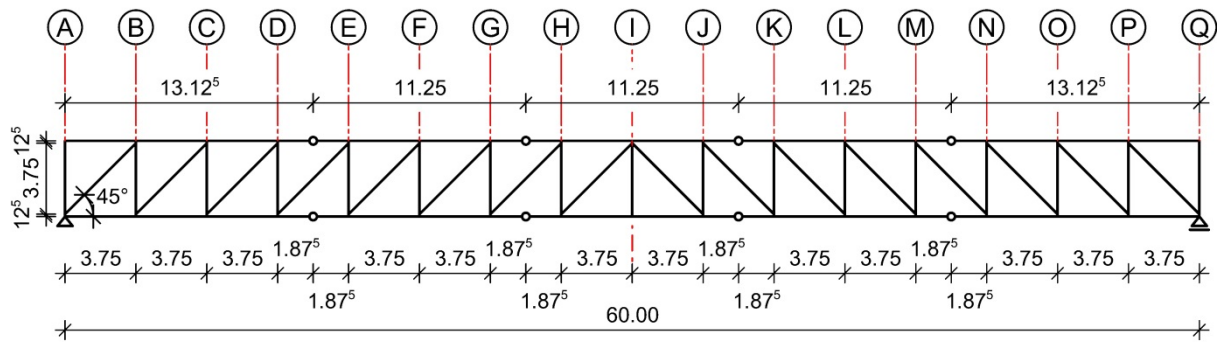


Abb. FA.25: Systemskizze Fachwerkträger (Biadatz 2017)

Auswirkungen auf die Pfosten:

Die Untersuchung der unterschiedlichen Laststellung zeigt Überschreitungen der Zugspannungen in den Pfosten. In einem iterativen Prozess werden die Vorspannkkräfte der betroffenen Pfosten erhöht, sodass die Bemessungszugspannungen eingehalten sind. Dabei werden die symmetrisch liegenden Pfosten gleichermaßen berücksichtigt.

Auswirkungen auf den Obergurt:

Die Druckspannungen betragen im Obergurt zwischen den Achsen G und H sowie J und K $-38,89 \text{ MN/m}^2$. Im Bereich der Hüllrohre für die Pfostenvorspannung (kritischer Querschnitt) erhöhen sich die Druckspannungen auf $46,93 \text{ MN/m}^2$. Diese Spannungen treten im GZT 1 auf und liegen unterhalb der Grenzen.

Auswirkungen auf den Untergurt:

Am Untergurt liegen die maximalen Druckspannungen von $-46,14 \text{ MN/m}^2$ zwischen den Achsen A und B sowie P und Q. Der kritische Querschnitt erfährt Druckspannungen von $-57,08 \text{ MN/m}^2$ direkt über den Auflagern. Durch eine Reduzierung der Vorspannkraft um 100 kN auf 3560 kN werden die Bemessungsdruckspannungen eingehalten. Alternativ könnte der Untergurt auch im Auflagebereich verbreitert werden.

Auswirkungen auf die Diagonale:

Im Lastfall S5_Ginf erfährt die Diagonale zwischen den Achsen D und H eine Zugspannung von $0,36 \text{ MN/m}^2$. Um diese zu überdrücken wird in den Diagonalen der Achsen G und H sowie J und K eine Vorspannkraft von 35 kN aufgebracht. In der Diagonale zwischen den Achsen H und I entsteht im Lastfall S8_Ginf eine Zugspannung von $3,62 \text{ MN/m}^2$, welche durch eine Vorspannkraft von 170 kN überdrückt wird. Eine analoge Vorspannung wird an der symmetrischen Diagonale zwischen den Achsen I und J eingebaut.

Alle erforderlichen Vorspannkkräfte der Pfosten und Diagonalen sowie des Ober- und Untergurtes sind im Anhang FA2 dargestellt.

Unsymmetrische Belastungen wirken sich ungünstig auf den Fachwerkträger aus. Durch die Anpassung der Vorspannkkräfte werden die Bemessungsfestigkeiten jedoch eingehalten.

Tab. FA.7: Lastfälle und Kombinationen für die Betrachtung unterschiedlicher Laststellungen (Biadatz 2017)

Kurzbezeichnung	Lastfall/ -kombination	Einwirkung / Kombination
LF 8	Schnee fünffeldrig	$Q_{S,5,k}$
LF 9	Schnee halbseitig	$Q_{S,8,k}$
LF 10	Schnee zwölfeldrig	$Q_{S,12,k}$
LF 11	Wasseransammlung Attika	$Q_{Wa,k}$
GZT_Ginf_1	Volllast (Schnee), G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
GZT_Ginf_2	Volllast (Wind), G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot Q_{W,k}$
S5	Schnee fünffeldrig	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,5,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S5_Ginf	Schnee fünffeldrig, G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,5,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S8	Schnee halbseitig	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,8,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S8_Ginf	Schnee halbseitig, G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,8,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S12	Schnee zwölfeldrig	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,12,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S12_Ginf	Schnee zwölfeldrig, G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,12,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$
WaA	Wasseransammlung Attika	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,0 \cdot Q_{Wa,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
WaA_Ginf	Wasseransammlung Attika, G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,0 \cdot Q_{Wa,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$

Endgültige Bemessung:

Die endgültige Bemessung erfolgt mit den Schnittgrößen aus Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformung. Die Pfosten und der Obergurt erfahren bei annähernd gleicher Geometrie geringere Schnittgrößen als die Diagonale und der Untergurt. Es erfolgt eine erneute Bemessung der maßgebenden Diagonale und des Untergurtes.

Die maßgebende Diagonale liegt zwischen den Achsen A und B des Fachwerkträgers und folgt aus der 3. Eigenform der Lastfallkombination GZT_1. Zusätzlich zu den Biegemomenten in Fachwerkebene, die sich nur geringfügig ändern, werden die Biegemomente senkrecht zur Fachwerkebene berücksichtigt. Da die Vorverformung der 3. Eigenformen nicht in der Diagonale angetragen sind, muss zusätzlich eine lokale Imperfektion der Diagonale berücksichtigt werden. Die Bewehrung erhöht sich von 19 cm² auf 29,85 cm², welche durch 8 Stäbe $\varnothing 25$ (39,3 cm²) (in den Ecken angeordnet) abgedeckt ist. Alternativ könnte die Randdiagonale auch in einem Querschnitt von 23 x 23 cm ausgeführt werden. Dabei wäre ein Betonstahlquerschnitt von 17,98 cm² notwendig. Diese ist mit den vorgesehenen 4 Stäben $\varnothing 25$ (19,63 cm²) vorhanden. Die genannten Erhöhungen sind nur in den Randdiagonalen notwendig.

Für die Bemessung des Untergurtes werden 2 Lastfallkombinationen maßgebend. Zum einen die 1. Eigenform der Lastfallkombination BZ_vDm, zum anderen die 2. Eigenformen der Lastfallkombination GZT_hW90_2. Die aus vorangegangener Berechnung im Untergurt vorhandene Mindestbewehrung ist weiterhin ausreichend (Biadatz 2017).

FA.1.2.3 Definition und Konstruktion des Referenzfachwerkträgers

Abmessungen und Querschnitte:

Die Abmessungen und Querschnitte des entwickelten Fachwerkträgers sind nachfolgend zusammengefasst.

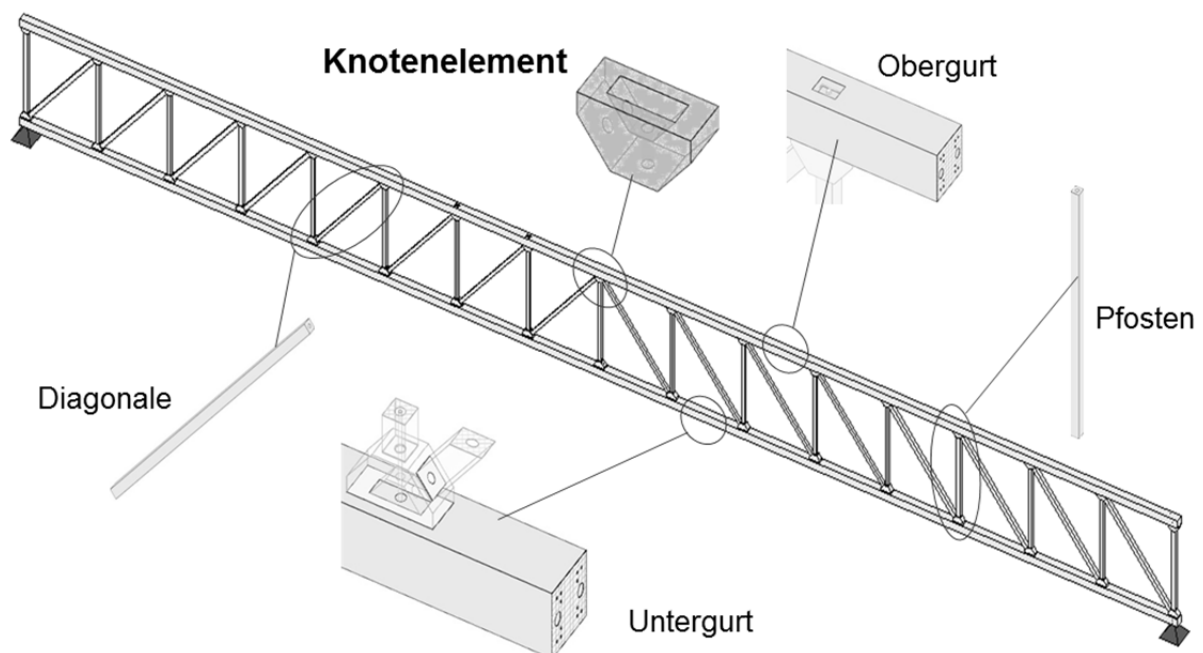


Abb. FA.26: Elemente des Fachwerkträgers (Oertel 2015)

Tab. FA.8: Querschnitte des Fachwerkträgers im Überblick

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Gurte</p>		
	<p>Obergurt</p>	<p>Untergurt</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Füllstäbe</p>		
	<p>Diagonale</p>	<p>Pfosten</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Knoten</p>		
	<p>Knotenelement</p>	

Vorspannung der Pfosten:

Die Pfosten werden über eine Vorspannung (Gewindestabsspannverfahren von DYWIDAG mit einem Gewindestabdurchmesser von 47mm) mit den Knotenelementen und den Ober- bzw. Untergurt befestigt. Im Ober- bzw. Untergurt müssen somit die Vorspannkraften eingeleitet werden. Die größte erforderliche Vorspannkraft beträgt $P_{t=\infty} = 800 \text{ kN}$. Zunächst werden die Spannkraftverluste ermittelt um die notwendige aufzubringende Vorspannung zu erhalten. Für diese Kraft wird das Spannsystem inkl. Hüllrohr festgelegt und der Lasteinleitungsbereich konzipiert. Um die Krafteinleitung zu simulieren wird ein Ausschnitt des Fachwerkträgers numerisch abgebildet. Dieser beschränkt sich auf einen Gurtabschnitt mit angeschlossenen Pfosten. Das Modell wird mit Volumenelementen (Brics) erstellt (Abb. FA.29).

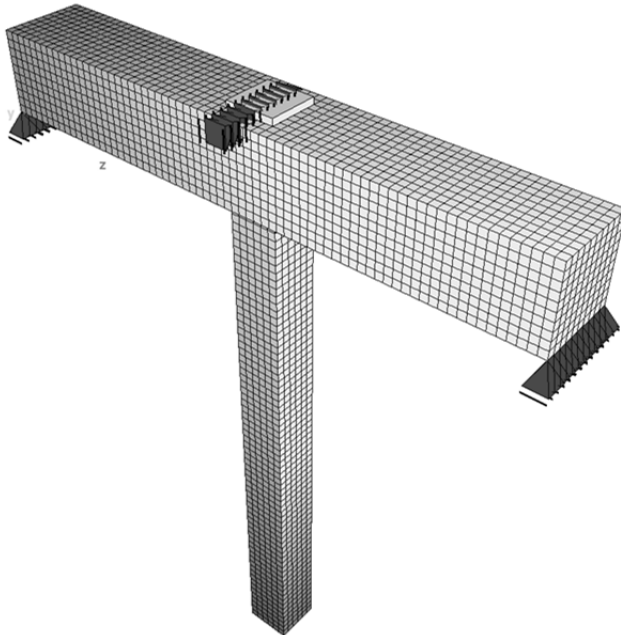


Abb. FA.27 FEM-Modell (SOFiSTiK) des Anschluss „Pfosten an Gurt“ (Knotenelement wurde vernachlässigt) (Körper/Zheng 2015)

Am Modell werden die Lasteinleitung und der Verlauf der Kräfte im Gurt und die Stütze untersucht. Anhand dieses Verlaufs wurde die effektive Querschnittsfläche der Gurte für die Berechnung der Federkonstante des Gurtes bestimmt (Abb. FA.29).

Spannkraftverluste:

Aufgrund der geringen Binderhöhe wird ein Gewindestabspannverfahren gewählt, da dieses einen geringen Schlupf aufweist und dadurch Spannkraftverluste minimiert werden. Aus Reibung resultieren keine Verluste, da die Spanngliedführung verbundlos und geradlinig ist. Bei dem vorliegenden System handelt es sich um einen Zusammenschluss aus Pfosten und Gurten, für die eine Reihenschaltung von drei Federn aufgestellt wird. Diese Federkonstante ist in der Lage, die Kriechverformungen am System ausreichend gut zu beschreiben. In nachfolgender Berechnung wird zunächst eine Vorspannkraft P_0 abgeschätzt und anschließend überprüft, ob diese mit der errechneten Vorspannkraft P_0 übereinstimmt. Da es sich hier um ein linear- elastisches Verhalten handelt, d.h., die elastische Verformung des Fachwerkträgers proportional zur Vorspannkraft P_0 ist, wird die gesamte elastische Verkürzung Δl_{el} nach dem Hooke'schen Gesetz berechnet:

$$\Delta l_{el} = \frac{P_0}{C_{ges,elastisch}} \quad (Gl. FA.19)$$

mit:

$C_{ges,elastisch}$: die gesamte Federkonstante vom Fachwerkträger.

Es wird eine Reihenschaltung von drei Federn (Obergurt, Pfosten, Untergurt) aufgestellt. Diese Reihenschaltung ergibt die Federkonstante der Gesamtschaltung, die sogenannte Ersatzfederkonstante, aus:

$$\frac{1}{C_{ges,elastisch}} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{C_2 C_3 + C_1 C_3 + C_1 C_2}{C_1 C_2 C_3} \quad (Gl.FA.20)$$

Dabei sind:

- C_1 : die Federkonstante von Obergurt;
- C_2 : die Federkonstante von Pfosten;
- C_3 : die Federkonstante von Untergurt.

Die Federkonstante hängt sowohl von Material und Form der Feder als auch von der Belastungsrichtung ab und wird wie folgt bestimmt:

$$C_i = \frac{E_i \cdot A_i}{l_i} \quad (Gl.FA.21)$$

Dabei bezeichnet

- E_i : die Elastizitätsmodul vom Material des Bauteils i ;
- A_i : die Querschnittsfläche des Bauteils i , hier die Ausbreitungsfläche;
- l_i : die Bauteillänge.

Für die Ermittlung der Federkonstante müssen die Querschnittsflächen A_i der einzelnen Federn bekannt sein. Da sich Obergurt und Untergurt über das gesamte Fachwerk erstrecken, wird eine Ausbreitungsfläche $A_1 = A_3$ für die beiden Gurte eingeführt, welcher aus der FE-Rechnung abgeleitet wird (Abb.FA.30). Die Ausbreitungsfläche gibt Ausdruck darüber, inwieweit sich die eingeleitete Vorspannkraft P_0 in den Gurten ausbreitet und dementsprechend eine elastische Verformung auf die Gurte ausübt.

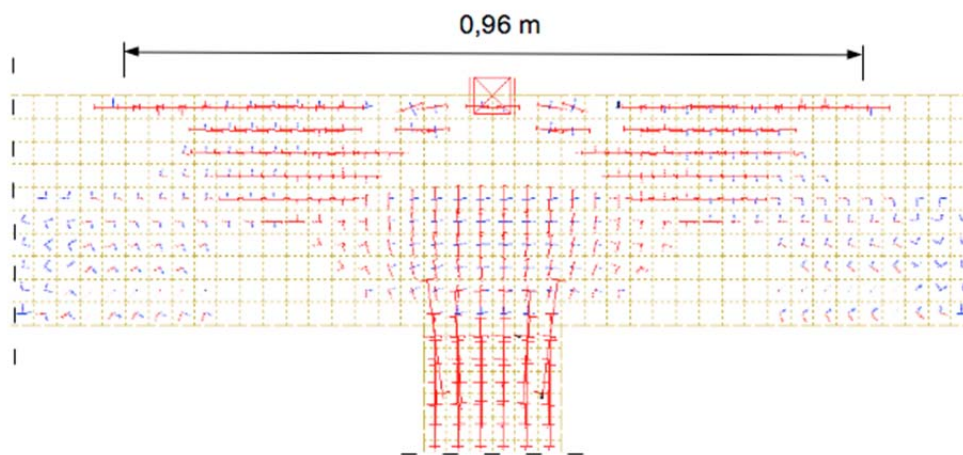


Abb. FA.28: Ausbreitungsbereich der Spannungen (Körber/Zheng 2015)

Die Federkonstanten werden für einen Beton C100/115 errechnet (Tab. FA.13).

Tab. FA.9: Federkonstanten für die Bauteile des Fachwerkträgers für einen Beton C100/115

Bauteil	E-Modul [kN/mm ²]	Fläche [mm ²]	Länge [m]	Federkonstante C_i [kN/m]
Obergurt	45,2	$0,96 \cdot 0,3 = 0,288 \cdot 10^6$	0,30	$4,339 \cdot 10^7$
Pfosten	45,2	$0,22 \cdot 0,22 = 0,0484 \cdot 10^6$	3,45	$0,0424 \cdot 10^7$
Untergurt	45,2	$0,96 \cdot 0,3 = 0,288 \cdot 10^6$	0,30	$4,339 \cdot 10^7$

Aus den einzelnen Federkonstanten folgt eine gesamte Federkonstante von

$$C_{ges,elastisch} = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_2 C_3 + C_1 C_3 + C_1 C_2} = 6,159 \cdot 10^5 \text{ kN/m} . \quad (Gl.FA.22)$$

Mit einer angenommenen Vorspannkraft $P_0 = 1258,1 \text{ kN}$ ergibt sich eine elastische Verkürzung des Betons Δl am Gesamtsystem von

$$\Delta l_{el} = \frac{P_0}{C_{ges,elastisch}} = \frac{1258,1 \text{ kN}}{6,159 \cdot 10^5 \text{ kN/m}} = 2,04 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2,04 \text{ mm} . \quad (Gl.FA.23)$$

Die Kriechzahl $\varphi = 0,55$ wird nach DIN 1992-1-1 für ein Innenbauteil und $RH 0 = 50\%$ sowie $t_0 = 30$ Tage bei Belastungsbeginn ermittelt. Die wirksame Bauteildicke ergibt sich mit $h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{U} = 232 \text{ mm}$. A_c ist dabei die Querschnittsfläche des gesamten Bauteils, U der Umfang des gesamten Bauteils. Es folgt die gesamte Federkonstante aus Kriechen und elastische Verkürzung zu

$$\begin{aligned} C_{ges,Kriechen+elastisch} &= C_{ges,elastisch} \cdot \frac{1}{1+\varphi} \quad (Gl.FA.24) \\ &= 6,159 \cdot 10^5 \text{ kN/m} \cdot \frac{1}{1+0,55} = 3,97 \cdot 10^5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Daraus erfolgt eine Verkürzung von

$$\begin{aligned} \Delta l_{ges,Kriechen+elastisch} &= \frac{P_0}{C_{ges,Kriechen+elastisch}} \quad (Gl.FA.25) \\ &= \frac{1258,1 \text{ kN}}{3,97 \cdot 10^5 \text{ kN/m}} = 3,17 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3,17 \text{ mm} . \end{aligned}$$

Das Gewindestabspannverfahren von DYWIDAG (Zulassung ETA-05/0123) mit einem Gewindestabdurchmesser von 47mm, gibt einen Keilschlupf $\Delta l_{schlupf} = 1,7 \text{ mm}$ bei der Lastübertragung von der Spannpressen auf die Verankerung an.

Die Relaxationsverluste des Spannstahls werden berechnet zu

$$\frac{\Delta \sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98 \cdot \rho_{1000} e^{8\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5} \quad (Gl.FA.26)$$

Dabei sind:

$$\sigma_{pi}: \quad = \sigma_{pm0} \text{ bei der Vorspannung ohne Verbund, und } \sigma_{pm0} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot f_{pk} \\ 0,85 \cdot f_{p0,1k} \end{array} \right. ;$$

$$\sigma_{pm0} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0,75 \cdot f_{pk} = 0,75 \cdot 1050 \text{ N/mm}^2 = 787,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (maßgebend)} \\ 0,85 \cdot f_{p0,1k} = 0,85 \cdot 950 \text{ N/mm}^2 = 807,5 \text{ N/mm}^2 \end{array} \right.$$

ρ_{1000} : der Wert der Relaxationsverluste (in %) 1000 Stunden nach dem Vorspannen bei einer Durchschnittstemperatur von 20 °C; Aus der Zulassung ETA-05/0123 wird die $\rho_{1000} = 3\%$ gewählt;

$$\mu: \quad = \sigma_{pi} / f_{pk};$$

$$t: \quad 30 \text{ Tage (Annahme)}$$

Daraus ergeben sich der Relaxationsverlust $\Delta \sigma_{pr}$:

$$\frac{\Delta \sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98 \cdot \rho_{1000} e^{8\mu} \left(\frac{t}{1000} \right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5} = 1,98 \cdot 3 \cdot e^{8 \cdot 0,75} \left(\frac{30 \cdot 24}{1000} \right)^{0,75(1-0,75)} 10^{-5} = 0,02253$$

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,02253 \cdot 787,5 \text{ N/mm}^2 = 17,74 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma_{pr}}{E} = \frac{17,74 \text{ N/mm}^2}{205000 \text{ N/mm}^2} = 8,65 \cdot 10^{-5} \quad (\text{Gl.FA.27})$$

$$\Delta l_{\text{Relaxation}} = \varepsilon \cdot l_0 = 8,65 \cdot 10^{-5} \cdot 4,05 \text{ m} = 0,350 \text{ mm}$$

Die Verkürzung aus Relaxation beträgt somit:

$$\Delta l_{\text{Relaxation}} = 0,350 \text{ mm}$$

Die gesamten Verformungen aus Kriechen, elastischer Verkürzung, Relaxation und Schlupf errechnet sich aus:

$$\begin{aligned} \Delta l &= \Delta l_{\text{ges,Kriechen+elastisch}} + \Delta l_{\text{Schlupf}} + \Delta l_{\text{Relaxation}} \\ &= 3,217 \text{ mm} + 1,7 \text{ mm} + 0,350 \text{ mm} = 5,22 \text{ mm} \end{aligned} \quad (\text{Gl.FA.28})$$

Daraus ergibt sich ein gesamter Spannkraftverlust von:

$$\Delta P = \frac{E_p \cdot A_p \cdot \Delta l}{l} = \frac{205000 \text{ N/mm}^2 \cdot 1735 \text{ mm}^2 \cdot 5,22 \text{ mm}}{4050 \text{ mm}} = 458,1 \text{ kN} \quad (\text{Gl.FA.29})$$

Mit:

$A_p = 1735 \text{ mm}^2$ aus der Zulassung ETA-05/0123

sowie der Vorspannkraft P_0 zum Zeitpunkt t_0 von:

$$P_0 = P_{t=\infty} + \Delta P = 800 \text{ kN} + 458,1 \text{ kN} = 1258,1 \text{ kN} \quad (\text{Gl.FA.30})$$

Die Annahme $P_0 = 1258,1 \text{ kN}$ ist damit bestätigt. Zum Zeitpunkt t_∞ herrscht eine Vorspannkraft $P_{t=\infty} = 800 \text{ kN}$ im Pfosten. Die nach ETA-05/0123 maximal zugelassenen Vorspannkraft von 1457 kN ist eingehalten, wobei 149 kN sofortige Spannkraftverluste aus Keilschlupf ($\Delta l_{\text{Schlupf}}$) sind.

$$P_0^* = P_0 - \frac{E_p \cdot A_p \cdot \Delta l_{\text{Schlupf}}}{l} \quad (\text{Gl.FA.31})$$

$$P_0^* = 1258,1 \text{ kN} - 149 \text{ kN} = 1109,1 \text{ kN}$$

$P_0^* = 1109,1 \text{ kN} < 0,8 \cdot S_n \cdot f_{pk} = 0,8 \cdot 1735 \text{ mm}^2 \cdot 1050 \text{ N/mm}^2 = 1457,4 \text{ kN}$, womit das Stabilisierungskriterium bei Lastübertragung erfüllt ist. S_n ist dabei die Nennquerschnittsfläche des Gewindestabes.

Spannsystem:

In einer Recherche werden mögliche Vorspannsysteme untersucht. Für die Vorspannung des Fachwerkträgerpfosten wird ein Stabspannverfahren ohne Verbund (intern) verwendet, da dieses einen geringen Schlupf hat. Grundsätzlich stehen die Verfahren Macalloy-Stabspannverfahren (Z-13.72-700462), der Fa. Macalloy und das DYWIDAG-Stabspannverfahren der Fa. DYWIDAG-System Int. GmbH zu Verfügung. Das DYWIDAG Stabspannverfahren wird aufgrund der höheren zugelassenen Vorspannkraft verwendet.

Spannweg:

Der Spannweg setzt sich aus der Verlängerung (Dehnung) des Spannstahls Δl_p und der Verkürzung des Betons Δl_{cp} zusammen. Des Weiteren ist ein Verankerungsschlupf Δl_{sl} bei der Verankerung des Spannstahls zu berücksichtigen.

$$\Delta l = \Delta l_p - \Delta l_{cp} + |\Delta l_{sl}| \quad (\text{Gl.FA.32})$$

Mit:

Δl : Spannweg

Δl_p : Verlängerung des Spannstahls infolge der Spannkraft P

Δl_{cp} : Verkürzung des Betons infolge der Spannkraft P

Die 0,1%-Dehngrenze und die Zugfestigkeit werden gemäß ETA-05/0123 angesetzt. Der erforderliche Spannweg zum Erreichen der Kraft P errechnet sich zu

$$\Delta l_p = \frac{P}{E_p \cdot A_p} \cdot l = \frac{1258,1 \text{ kN}}{205000 \text{ N/mm}^2 \cdot 1735 \text{ mm}^2} \cdot 10^3 \cdot 4,05 \text{ m} \cdot 10^2 = 1,43 \text{ cm}. \quad (\text{Gl.FA.33})$$

Dabei ist A_s die Querschnittsfläche des Stabspanngliedes und $A_s = 1735 \text{ mm}^2$ gemäß ETA-05/0123. Die Betonverkürzung beträgt $\Delta l_{cp} = \Delta l_{el} = 2,04 \text{ mm}$ und der Verankerungsschlupf $\Delta l_{sl} = 1,0 \text{ mm} + 2,7 \text{ mm} = 3,7 \text{ mm}$. Somit folgt ein Spannweg $\Delta l = 1,43 \text{ cm} + 0,37 \text{ cm} - (-0,204 \text{ cm}) = 2,0 \text{ cm}$. Für Stabspannverfahren ergibt sich der Spannweg aus der Anzahl der Umdrehungen der Mutter an der Spannpresse. Während des Vorspannens wird die Mutter fortlaufend nachgedreht, bis der Spannweg und die zugehörige Vorspannkraft voll aufgebracht sind. Die Vorspannkraft $P_0 = 1258,1 \text{ kN}$ wird mit einer Spannpresse DSI HOZ 200 Mp aufgebracht. Diese besitzt eine Kapazität von 2168 kN und ist für den Anker eines 47WR Gewindestabes geeignet.

Für den Stab 47 WR ergibt sich eine Gewindesteigung (Rippenhöhe) $c = 2,1 \text{ mm}$ und damit eine Anzahl der Umdrehungen der Mutter von $n = \frac{\Delta l}{c} = \frac{2,0 \text{ mm}}{2,1 \text{ mm}} = 0,95 \approx 1,00$ Umdrehungen.

Hüllrohr

Gemäß ETA-05/0123 wird ein Hüllrohr mit Schrumpfschlauch 70/26, Anschlussrohr $D_a=76,1 \text{ mm}$; $D_i=68,5 \text{ mm}$ und PE-Rohr $D_a=63 \text{ mm}$; $D_i=57 \text{ mm}$ verwendet.

Lasteinleitungsbereich

Der Lasteinleitungsbereich besteht aus einer Stahlplatte und dem Bauteil in das die Kräfte eingeleitet werden (Abb.FA.31). Durch die Vorspannung in vertikaler und die Normalkraft im Obergurt in horizontaler Richtung handelt es sich im Lasteinleitungsbereich um eine zweiaxiale Druckbeanspruchung. Ausgehend von der quadratischen Ankerplatte mit $26 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$ aus der Zulassung wird die Auswirkung einer Verkleinerung der Ankerplatte auf $18 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ und $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ untersucht.

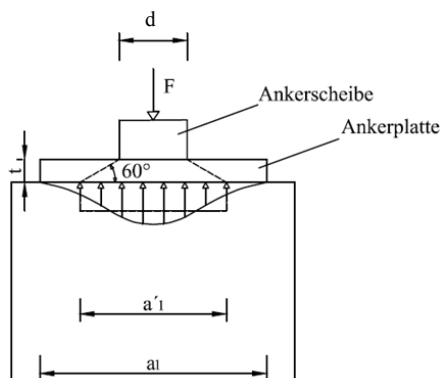


Abb. FA.29: Druckspannungsverlauf unterhalb einer weichen Ankerplatte nach (Rombach 2010)

Bei einer Obergurtbreite von 30cm wird für die Ankerplatten $26 \text{ cm} \times 26 \text{ cm}$ und $18 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ keine Erhöhung der Druckfestigkeit unterhalb der Ankerplatte berücksichtigt, da hier keine Teilflächenbelastung vorliegt. Der Nachweis wird über einen ebenen Spannungszustand mit einer aufnehmbaren Druckspannung von $\sigma_{Rd,max} = \kappa_1 \cdot v' \cdot f_{cd}$ mit $\kappa_1 = 1,1$ (nach DIN EN 1992-1-1,NPD) und dem Abminderungsbeiwert der Druckfestigkeit $v' = 1,0$ geführt. Mit Hilfe des

erzeugten FEM-Modells (Abb.FA.29) werden die Spannungen unterhalb der Ankerplatte dargestellt. Die Ankerplattendicke $t = 50 \text{ mm}$ bleibt dabei gleich. Es muss die Tragfähigkeit der Spanngliedverankerung während der Lastübertragung beim Vorspannen gewährleistet werden, um ein Versagen des Verankerungsbereiches auszuschließen. Im Folgenden wird die Berechnung der Bruchkurve (Abb.3.32) mittels einer Ellipsengleichung (vgl. Curbach et al. 2011) durchgeführt:

$$\frac{(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{f'_c} - 2c)^2}{2 \cdot a^2} + \frac{(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{f'_c})^2}{2 \cdot b^2} = 1 \quad (\text{Gl.FA.34})$$

Dabei sind:

$$a = 1,150 \cdot 10^{-4} \cdot |f'_c|^2 - 2,493 \cdot 10^{-2} \cdot |f'_c| + 1,996 \quad (\text{Gl.FA.35})$$

$$b = 0,173 \cdot 10^{-4} \cdot |f'_c|^2 - 0,259 \cdot 10^{-2} \cdot |f'_c| + 0,810 \quad (\text{Gl.FA.36})$$

$$c = -1,169 \cdot 10^{-4} \cdot |f'_c|^2 + 2,007 \cdot 10^{-2} \cdot |f'_c| - 0,239 \quad (\text{Gl.FA.37})$$

$$f'_c \approx 0,9 \cdot f_{cm} \text{ mit } f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad f_{ck} \text{ in } \text{N/mm}^2 \quad (\text{Gl.FA.38})$$

Die Spannung σ_1 aus Pfostenvorspannung $P_{0,Pfosten}$ folgt aus der konzentrierten Lasteinleitung über die Fläche der Ankerplatte $A_{\text{Ankerplatte}}$.

$$\sigma_1 = \frac{P_{0,Pfosten}}{A_{\text{Ankerplatte}}} \quad (\text{Gl.FA.39})$$

Die Spannung σ_2 folgt aus den Schnittgrößen im Obergurt im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

$$\sigma_2 = \frac{N_{\text{Gurt,GZT}}}{A_{\text{Gurt}}} \pm \frac{M_{\text{Gurt,GZT}}}{W_{\text{Gurt}}} \quad (\text{Gl.FA.40})$$

Dabei wird die Vorspannkraft $P_{0,Pfosten}$ mit $-1258,1 \text{ kN}$, die Normalkraft im Gurt aus GZT mit $N_{\text{Gurt,GZT}} = -752 \text{ kN}$ und das Moment $M_{\text{Gurt,GZT}}$ im Gurt mit -62 kNm berücksichtigt.

Tab.FA.10: Ergebnisse der Spannungen unter der Lasteinleitungsplatte in Abhängigkeit der Lastplattengröße

Studie: Ankerplattengröße				
	Ankerplatte 26x26	Ankerplatte 18x18	Ankerplatte 12x12	Bemerkung
σ_1 (N/mm ²)	18,61	38,83	87,37	Spannung aus Pfostenvorspannung
σ_2 (N/mm ²)	17,99	17,99	17,99	Spannung im Gurt aus GZT
$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	0,97	0,46	0,21	Spannungsverhältnis
$\frac{\sigma_1}{f_c'}$	106%	127%	130%	Erhöhung und Bezug auf einaxiale Festigkeit aus Bruchkurve
f_{cd}^* (N/mm ²)	60,07	72,69	75,14	Mit dem Festigkeitszuwachs aus zweiaxialer Druckbeanspruchung, darf die Betondruckfestigkeit gesteigert werden $f_{cd}^* = f_{cd} \cdot \frac{\sigma_1}{f_c'}$
$\sigma_{Rd,max}$ (N/mm ²)	66,07	79,95	82,65	Erhöhte aufnehmbare Druckspannung nach (DIN EN 1992-1-1) $\sigma_{Rd,max} = \kappa_1 \cdot v' \cdot f_{cd}^*$
σ_z (N/mm ²)	51,8	52,4	96,7	Spannung in z-Richtung aus konzentrierter Lasteinleitung aus FE-Rechnung
σ_x (N/mm ²)	31,4	31,4	63,9	Spannung in x-Richtung aus konzentrierter Lasteinleitung aus FE-Rechnung
$\eta_{\sigma z}$	0,78	0,66	1,17	Ausnutzungsgrad σ_z
$\eta_{\sigma x}$	0,48	0,39	0,77	Ausnutzungsgrad σ_x
	Nein	Nein	Ja	Berücksichtigung Teilflächenpressung
σ_{Rdu} (N/mm ²)	-----	-----	103,9	Aufnehmbare Druckspannung unter Berücksichtigung der Teilflächenbelastung nach (DIN 1045-1) $\sigma_{Rdu} = f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = 56,67 \cdot \sqrt{\frac{257^2}{144^2}}$ Vgl. auch DIN EN 1992-1-1 und für weitere Informationen Bauschinger (1876), Pohle (1957), Spieth (1959). Es wird eine Lastverteilungsfläche bis zur Betondeckung der Längsbewehrung angesetzt. $A_{c1} = \left(a + 2 \cdot \frac{d_1}{\tan(60)} \right)^2$ $= \left(12 + 2 \cdot \frac{3,5}{\tan(60)} \right)^2 = 257 \text{ cm}^2$
η	-----	-----	61,1	Ausnutzungsgrad unter Berücksichtigung der Teilflächenbelastung

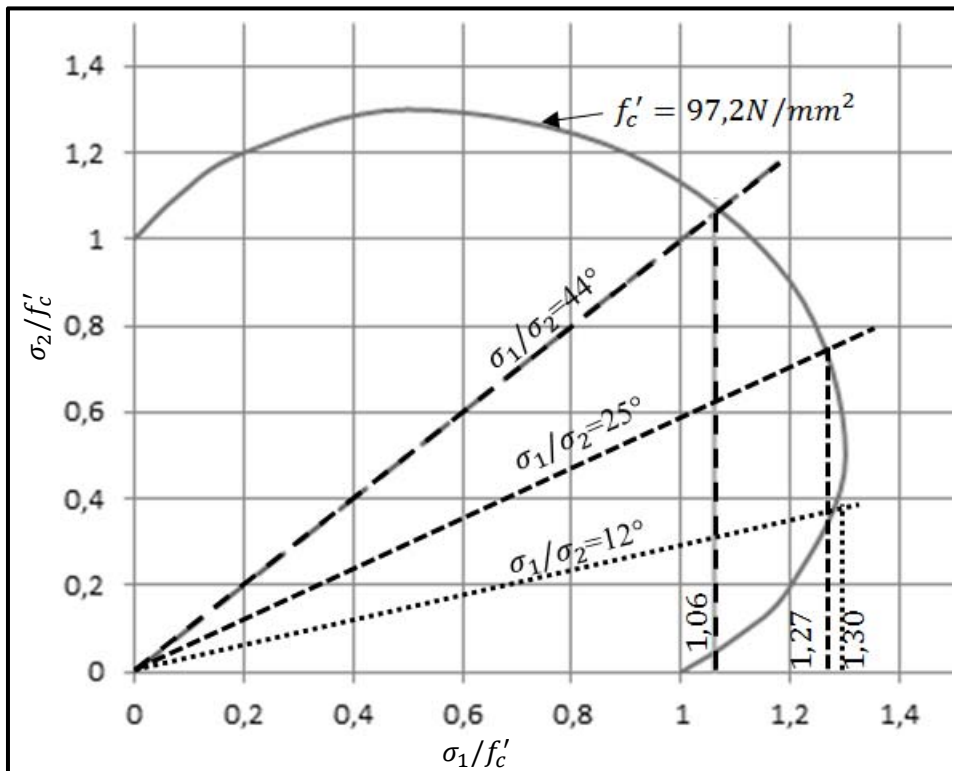


Abb.FA.30: Bruchkurve für die Lastplatten 12 x 12, 18 x 18, 22 x 22[cm]

Nachweis der Zugspannungen

Nach DAfStB Heft 240 lässt sich die Spaltzugkraft F_{sd} für eine mittig angreifende Längsdruckkraft näherungsweise errechnen (Abb. 3.33).

$$F_{sd} = 0,25 \cdot F_{Ed} \cdot \left(1 - \frac{h_0}{h_1}\right) = 0,25 \cdot 1258,1 \cdot \left(1 - \frac{18}{22}\right) = 57,2 \text{ kN} \quad (\text{Gl.3.41})$$

Es wird eine Spaltzugbewehrung von $erf. A_s = \frac{F_{sd}}{f_{yd}} = \frac{57,2 \text{ kN}}{43,5 \text{ kN/cm}^2} = 1,31 \text{ cm}^2$ eingebaut.

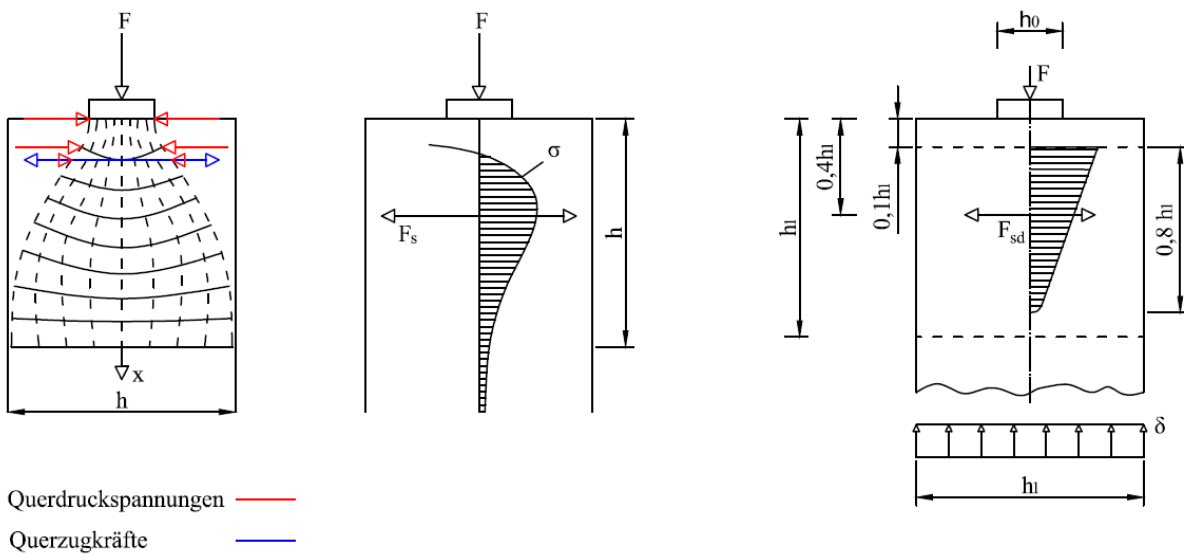


Abb.FA.31: Links: Pfade der Zug- u. Druckspannungen; Mitte: Spannungsverlauf; Rechts: Idealisierter Verlauf (nach Leonhardt 1974 und DAfStB. Heft 240)

Vorspannung des Untergurtes und Ausbildung des Auflagerpunktes

Spannsystem:

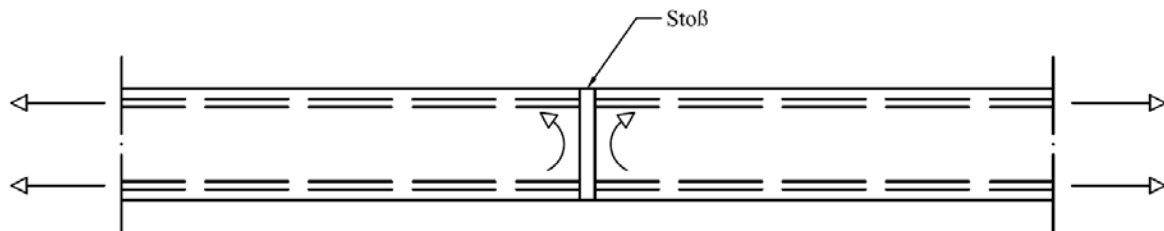
Der Untergurt wird mit dem Spannsystem SUSPA DSI Monolithen-Spannverfahren ohne Verbund (Z-13.72-3003 bzw. ETA-03/0036) (vgl. Tab.FA.4) vorgespannt. Die 4 Spannglieder im Untergurt müssen an den Stirnseiten des Untergurtes mit vier Ankerplatten ausgeführt werden. Da die in der Zulassung vorgeschriebenen Mindestabstände im Lasteinleitung Bereich des modularen Fachwerkträgers nicht eingehalten werden können, muss dieser Bereich gesondert untersucht werden.

Längsstoßausbildung des Untergurtes: Ausgangssituation und grundsätzliche Möglichkeiten:

Im Bereich der Segmentstöße (s. Kapitel 3.5) ist es notwendig die Gurte zu stoßen. Während der Obergurt durch die Koppelpfetten in horizontaler Richtung gehalten ist und deshalb nicht oder lediglich durch eine konstruktive Verdollung in der Lage gesichert wird, muss für den Untergurt eine Verbindung geschaffen werden, die ein Ausweichen in horizontaler Richtung verhindert. Diese Verbindung muss aus der Stabwerksberechnung im GZT Druckkräfte von 3238,8 kN, Biegemomente um die Eigengewichtsrichtung von 20,5 kNm, Querkräfte in Eigengewichtsrichtung von 19,0 kN und Querkräfte senkrecht zur Fachwerkebene von 13,2 kN übertragen können (Abb.FA.32). Dazu gibt es folgende Möglichkeiten:

- Nachträglicher Stoß der Bewehrung mittels Schweißen
- Nachträglicher Stoß der Bewehrung mittels Stahleinbauteil und Verschraubung

Draufsicht



Seitenansicht

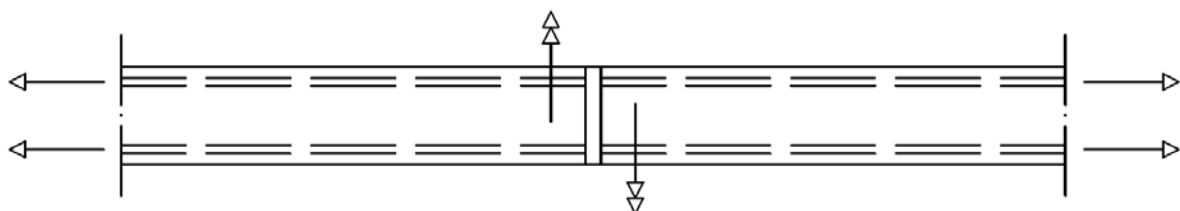


Abb.FA.32: Ausgangssituation mit Angabe der Vorspannungskräfte sowie des einwirkenden Momentes

Nachträglicher Stoß der Bewehrung mittels Schweißen:

Neben der Variante durch zusätzliche Elemente eine Verbindung zu schaffen, ist es auch möglich die Untergurte so auszubilden, dass durch Koppelung der vorhandenen Längsbewehrung eine biegesteife Ausbildung erfolgt. Dafür wird die Längsbewehrung im Stoßbereich der Gurte auf eine Länge von ca. 50cm je Seite zugänglich gelassen. D.h. die Längsbewehrung schaut aus dem Untergurt heraus und kann miteinander gekoppelt werden, der Beton ist in diesen Bereichen ausgespart (Abb. 3.43). Denkbar ist, diese Koppelung durch ein separates Bewehrungselement zu schaffen, welches auf einer Seite in einen dafür vorgesehenen Gewindeanschluss befestigt und auf der anderen Seite an der herausragenden Bewehrung angeschweißt wird. Da im Bereich der Längsbewehrung der Beton ausgespart ist, erfolgt nach der Bewehrungskoppelung ein nachträglicher Verguss.

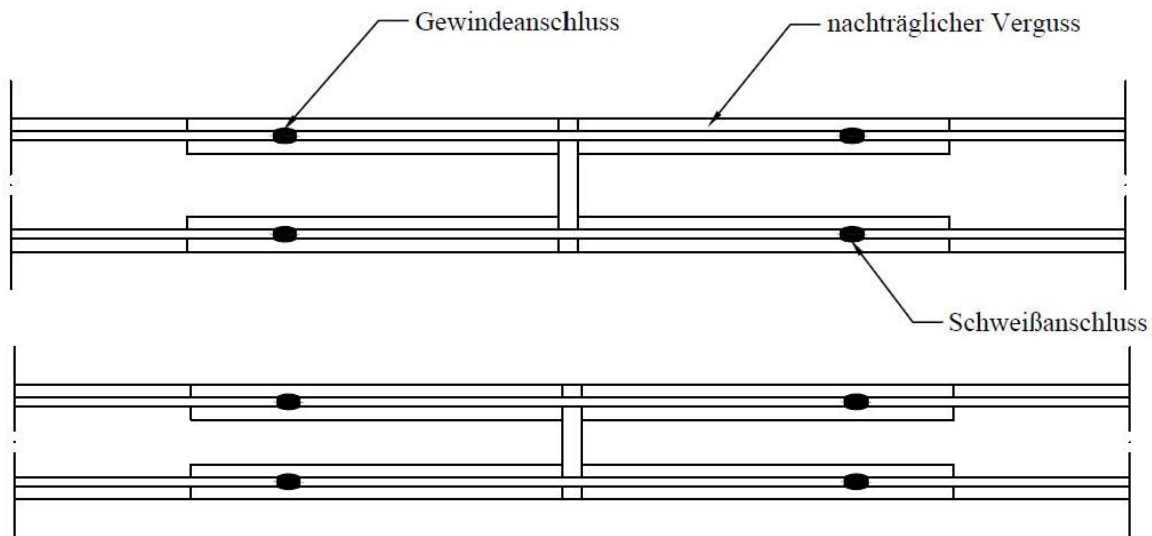


Abb.FA.33: Prinzipsskizze des nachträglichen Stoßes der Bewehrung mittels Schweißen

Nachträglicher Stoß der Bewehrung mittels Stahleinbauteil und Verschraubung:

In einer weiteren Variante wird für die Koppelung ein Stahleinbauteil genutzt. Dieses wird im Stoßbereich an allen vier Eckseiten des Untergurtes eingebaut und ist mit der Längsbewehrung dieses Gurtes verschweißt. Das Stahleinbauteil ist so konstruiert, dass die Bewehrung des anzufließenden Untergurtes über eine Verschraubung daran befestigt werden kann. Die Längsbewehrung beider Untergurte kann in einer Achse verlaufen, wodurch sich an der Grundkonstruktion nichts ändert (Abb. 3.45).

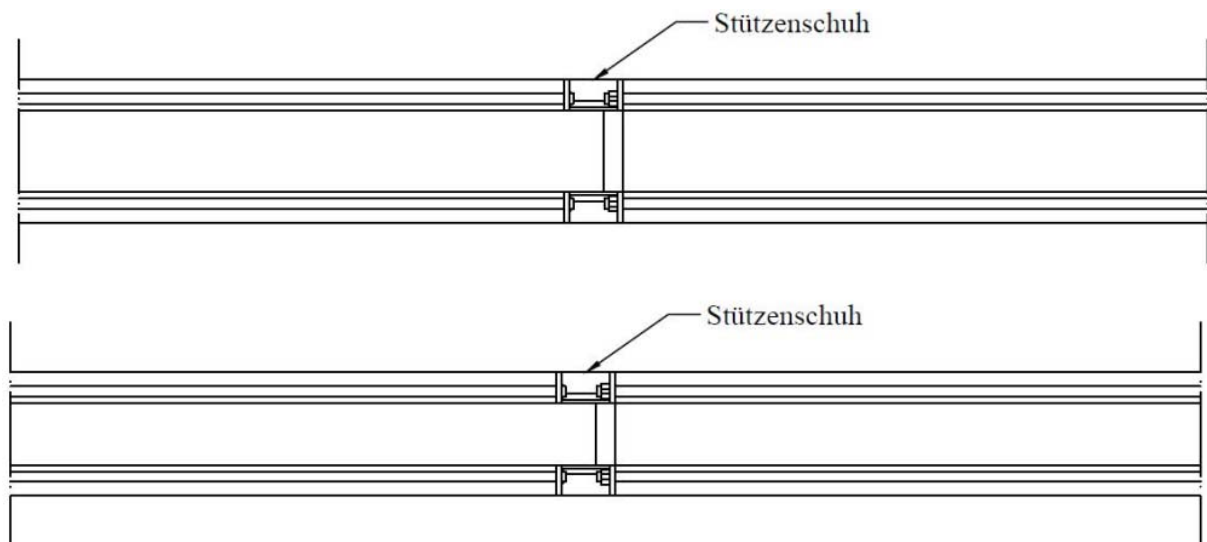


Abb.FA.34: Prinzipsskizze des nachträglichen Stoßes der Bewehrung mittels Stahleinbauteil und Verschraubung

Wahl einer Variante:

Im Folgenden wird der nachträgliche Stoß der Bewehrung mittels eines Stahleinbauteil und Verschraubung der Bewehrung mit dem Stahleinbauteil betrachtet, da hierbei eine weitgehend trockene Fügung möglich und aufgrund des Brandschutzes lediglich ein kleiner Bereich nachträglich zu vergießen ist.

Detailbetrachtung des Stahleinbauteils:

Die Stahleinbauteile werden in den Eckbereichen der Gurte platziert (Abb. 3.35). Die Hüllrohre der Vorspannung erfahren keine geometrische Beeinträchtigung. Die Längsbewehrung bleibt in beiden Gurtelementen an der vorgesehenen Stelle.

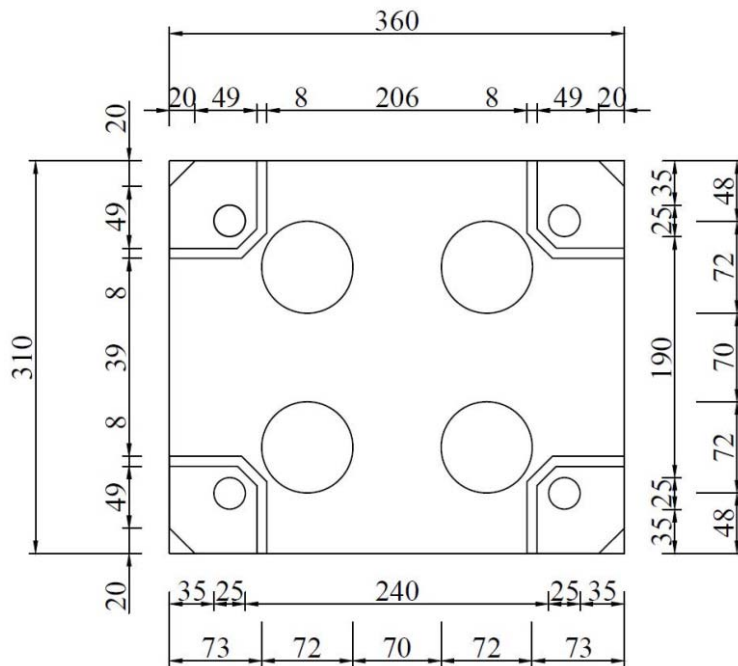


Abb.FA.35: Querschnitt des Untergurtes

Das Stahleinbauteil wird mit der Längsbewehrung über eine Schweißnaht am durchgesteckten Stab verbunden. Auf der Baustelle wird das Gegenstück mit herausragender Längsbewehrung mit Gewinde in das Stahleinbauteil eingefädelt und dort verschraubt. Der Stoß der Untergurte erfolgt über eine trockene Fuge (Abb.FA.36). Die Bügelbewehrung des Untergurtes ist mit 2 cm Abstand direkt hinter dem Stahleinbauteil zu platzieren.

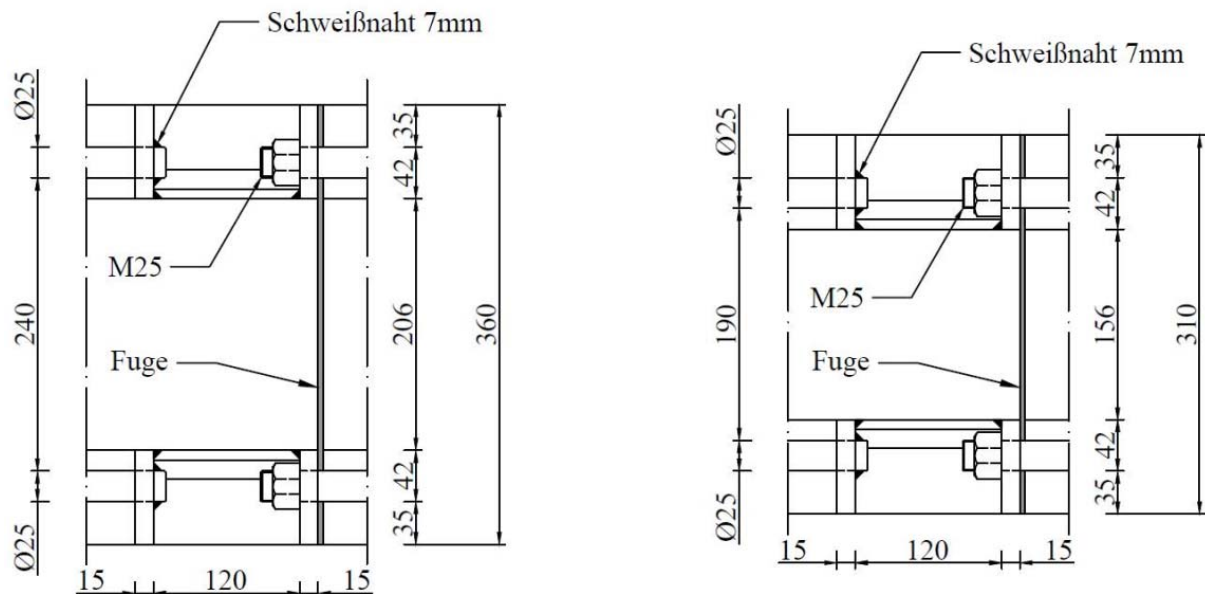


Abb.FA.36: Horizontalschnitt (links) und Längsschnitt (rechts) des Anschlussdetails

Das Stahleinbauteil selbst besteht aus verschweißten Stahlplatten (Abb.FA.36). Die Stirnseiten haben Bohrungen, durch die die Bewehrung anschließt (Abb.FA.37). Die Zugkräfte aus der Längsbewehrung

müssen über das Stahleinbauteil übertragen werden. Zwei Seiten des Stahleinbauteils sind offen, so dass die Montage erfolgen kann.

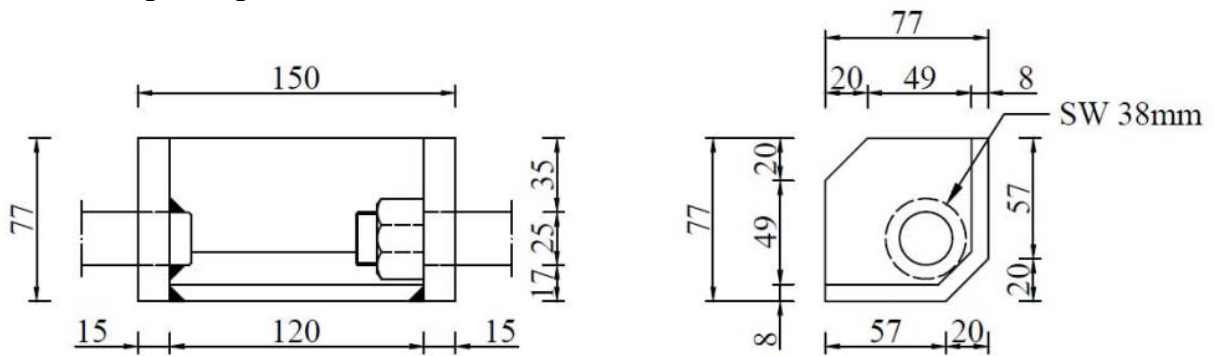


Abb.FA.37: Detail des Stahleinbauteils

Damit die Mutter auf der Längsbewehrung dauerhaft fest angezogen ist, kann diese durch einen Schweißpunkt oder durch eine Kontermutter gesichert werden. Die nach der Montage noch offenen Bereiche werden auf der Baustelle durch einen Vergussmörtel geschlossen.



Abb.FA.38: Foto eines eingebauten Stützenschuhs mit 8 Verschraubungen

FA.1.3 Segmentverbindungen modularer Fachwerkträger

Ein wesentliches Element in der Entwicklung des neuen Trägersystems stellt die Fügung einzelner Segmente dar. Der modulare Träger wird entweder komplett auf der Baustelle zusammgebaut oder im Werk teilvorgefertigt und in einzelnen Segmenten auf die Baustelle transportiert. In beiden Fällen begrenzen Herstellung und Transport die Länge des Ober- und Untergurt. Es wird also notwendig den Träger an geeigneter Stelle zu verbinden. Eine Recherche hat gezeigt, dass die von Henze (2009) vorgeschlagenen Segmentverbindungen am praktikabelsten sind. Diese werden vertieft betrachtet und geprüft welchen Einfluss die Segmentstöße auf das Trag- und Verformungsverhalten haben und wie die Fügung ausgebildet werden kann. Dazu wird der Fachwerkträger mit den Segmentverbindungen modelliert. Aufgrund der Gesamtlänge des Trägers von 60 m sind für den Transport der Elemente, im Besonderen der Gurte, mehrere Montagestöße notwendig. Die Längen der einzelnen Segmente zwischen den Stößen werden deshalb auf maximal 15 m begrenzt.

Segmentverbindung mit „Doppelpfosten“

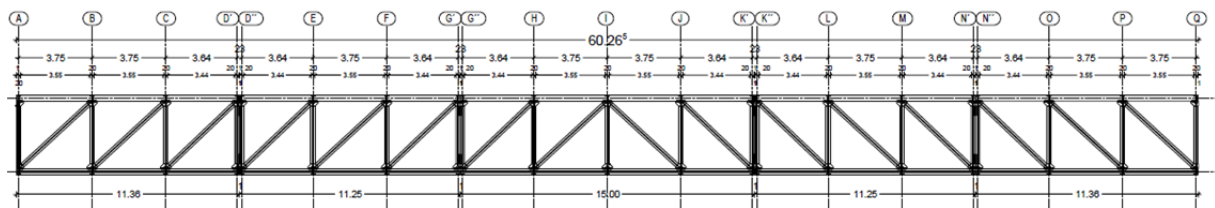


Abb.FA.39: Montagestöße in Segmentverbindung I (Schauberger 2016)

Bei der Segmentverbindung mit „Doppelpfosten“ entsteht die Fügung der Segmente über einen Doppelpfosten am Ende eines Segmentes. Die Vorspannung ohne Verbund im Untergurt ist so gewählt, dass im GZT die Fugen zwischen den Segmenten überdrückt bleiben. Der Obergurt überträgt die Druckspannungen über Kontaktpressung. Die Querkraft wird über 4 angeordnete Zahnleistenpaare (2x oben u. 2x unten) übertragen. Um die optimale Lage der Zahnleisten zu ermitteln wurden die vertikalen Abstände zwischen den Leisten mit $x_1 = 3,75$ m, $x_2 = 2,75$ m, $x_3 = 1,75$ m und $x_4 = 0,75$ m (Abb.FA.44) hinsichtlich der Schnittgrößen und Verformungen untersucht. Dabei wurde das Ausgangssystem, welches ohne Segmentverbindungen modelliert wurde als Grundmodell verwendet. In dieses Modell wurden an den Verbindungsstellen je ein Querkraftgelenk modelliert. Die Stöße befinden sich dabei in Achse D, G, K und N (Abb.FA.50). Um die Grenzen des Systems zu betrachten werden Segmentverbindungen in jedem Feld sowie ausschließlich in Feldmitte untersucht. Die Segmentverbindungen wurden dabei über Gelenke abgebildet, die in den Gurten Normal- und Querkräfte, im Bereich der Doppelpfosten ausschließlich Querkräfte (Schubkräfte) übertragen können.

Es werden die Lastfälle „Eigenlast“, „Schneelast“ sowie die Lastfallkombination GZT 1 untersucht und die Ergebnisse dieser Segmentstudie mit dem Ausgangssystem verglichen. Es werden die Auflagerkräfte, die Normalkraft in der äußersten Diagonale, die Querkraft und das Moment im Obergurt bei Achse B sowie das Moment im Pfosten aus der eingeleiteten Querkraft der Segmentverbindung in Achse D bzw. N betrachtet. Es zeigt sich, dass sowohl die Schnittgrößen als auch die Verformungen nicht nennenswert voneinander abweichen. Die Segmentverbindungen haben somit keinen negativen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten des Fachwerkträgers. Aus konstruktiven Gründen wird der Abstand der Verbindung bei $x_1 = 3,75$ m gewählt (Schauberger 2016).

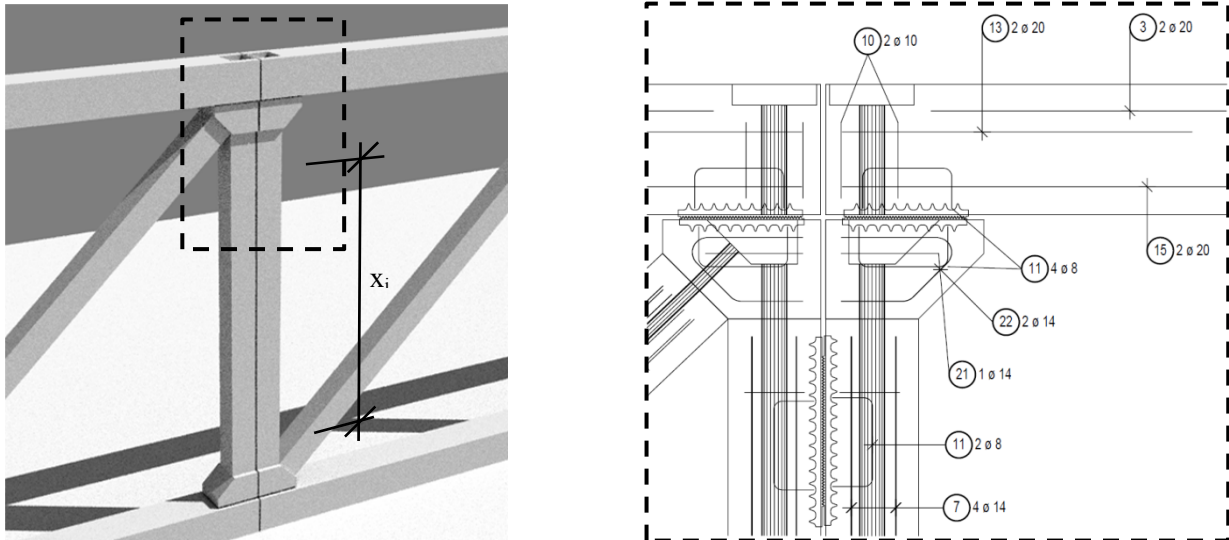


Abb.FA.40: Doppelpfosten Segmentverbindung als 3D-Darstellung und Detail nach (Schauberger 2016)

Segmentverbindung „Diagonale“

Bei der Segmentverbindung „Diagonale“ befindet sich die Verbindung der Gurte mittig zwischen 2 Stützen. Die Diagonale zwischen diesen Stützen muss vor Ort montiert werden.

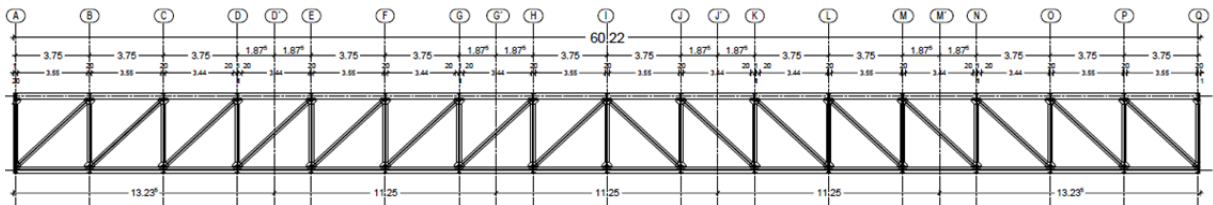


Abb.FA.41: Montagestöße in Segmentverbindung 2 (Schauberger 2016)

Die Segmentstöße werden zwischen den Achsen D und E (D'), G und H (G'), J und K (J') sowie M und N (M') angeordnet. Die Randfelder haben eine Länge von 13,23 m, die 3 inneren Felder von 11,25 m. In den Ober- und Untergurten werden Gelenke eingefügt um die Verbindungen zu simulieren. Diese Gelenke können Normkräfte und Querkkräfte übertragen.

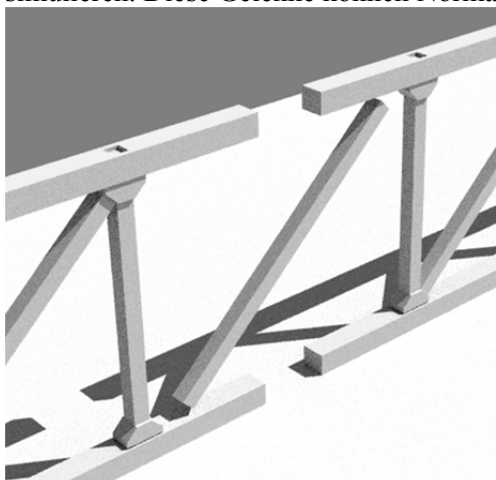


Abb.FA.42: Diagonalen Segmentverbindung 2 (Schauberger 2016)

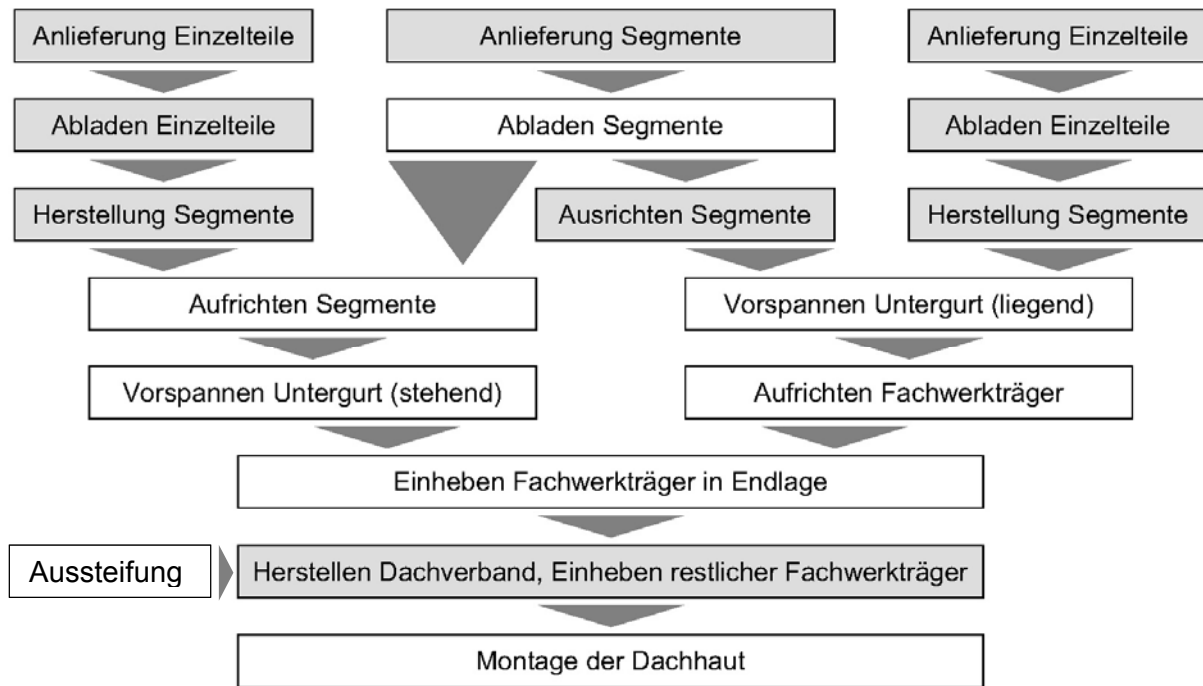


Abb.FA.44: Ablaufschema beim Bau eines Daches mit modularem Fachwerkträger nach (Biadatz 2017)

In den Rechenmodellen werden folgende Bauzustände untersucht:

- Abladen der liegenden Segmente
- Stehende Segmente vor dem Vorspannen des Untergurtes
- Vorspannen des Untergurtes im stehenden Zustand
- Vorspannen des Untergurtes im liegenden Zustand
- Einheben des Fachwerkträgers mit Traversen
- Dachmontage

In diesen Bauzuständen wiederum werden mehrere Varianten bzw. Parameter untersucht. Ziel der Untersuchung ist, durchführbare Ablaufschemata für die Fachwerkträgermontage zu entwickeln. Die statischen Systeme, Belastungen und Berechnungsergebnisse der untersuchten Bauzustände können der Anlage FA2 entnommen werden. Die Bemessungsdruckfestigkeit von $f_{c,var2} = f_{cd} = 56,67 \text{ N/mm}^2$ ist in den meisten Fällen eingehalten. Die Bemessungszugfestigkeit von $f_{ct,var2} = f_{ctd} = 2,10 \text{ N/mm}^2$ wird öfter bis zu $1,00 \text{ MN/m}^2$ und in manchen Fällen um mehr als $2,00 \text{ MN/m}^2$ im Bereich der Diagonalen überschritten. Die Betonkennwerte werden nach DIN EN 1992-1-1 (s. Kap. FA.1) angesetzt. Die charakteristische Betonzugfestigkeit $f_{ctk;0,05} = 3,70 \text{ MN/m}^2$, welche theoretisch in 95 % der Fälle nicht überschritten wird, wird somit nur in den seltenen Fällen bei einer Überschreitung um $2,00 \text{ MN/m}^2$ überschritten. In diesen Fällen kommt es zu einer lokalen Rissbildung und somit zu einem lokalen Steifigkeitsabfall. Die eingelegte Bewehrung verhindert eine Vergrößerung der Risse. Im Endzustand sind die Diagonalen unter der Gebrauchslast überdrückt und die Risse wieder geschlossen. Unter diesen Gesichtspunkten werden die Spannungsüberschreitungen akzeptiert. Aus den vorangegangenen Betrachtungen können zwei Ablaufschemata mit entsprechenden statischen Systemen und Lastansätzen abgeleitet werden (Tab.FA.15 u. FA.16) (Biadatz 2017).

Tab.FA.11: Ablaufschema 1 beim Bau eines Daches mit modularen Fachwerkträgern (Biadatz 2017)

Ablaufschema 1		
Nr.	Arbeitsschritt/Bauzustand	Rechenmodell
1a	Abladen der liegenden Segmente	erwM_v4_A2
1b	Montieren der einzelnen Elemente zu Segmenten	-----
2	Aufrichten der Segmente	erwM_v4_A2 oder erwM_v4_A4
3	Positionieren der stehenden Segmente	erwM_v4_B1 oder erwM_v4_B2
4	Vorspannen des Untergurtes mit stehenden Segmenten	erwM_v4_C
5	Einheben des Fachwerkträgers in die Endlage mit Traversen	erwM_v4_E4
6	Herstellen des Dachverbandes, Einheben der restlichen Fachwerkträger	-----
7	Montage der Dachhaut	erwM_v4, alle Varianten

Tab.FA.11: Ablaufschema 2 beim Bau eines Daches mit modularen Fachwerkträgern (Biadatz 2017)

Ablaufschema 2		
Nr.	Arbeitsschritt/Bauzustand	Rechenmodell
1a	Abladen der liegenden Segmente	erwM_v4_A2
1b	Montieren der einzelnen Elemente zu Segmenten	-----
2	Platzieren und Ausrichten der Segmente liegend auf der Montagefläche	erwM_v4_A2
3	Vorspannen des Untergurtes der liegenden Segmenten auf der Montagefläche	erwM_v4_D1 ohne Eigengewicht
4	Aufrichten des Fachwerkträgers	erwM_v4_D2 oder erwM_v4_D4
5	Einheben des Fachwerkträgers in die Endlage mit Traversen	erwM_v4_E4
6	Herstellen des Dachverbandes, Einheben der restlichen Fachwerkträger	-----
7	Montage der Dachhaut	erwM_v4, alle Varianten

Der grundsätzliche Unterschied der Ablaufschemata liegt im Vorspannen des Untergurtes, das bei Ablaufschema 1 im stehenden Zustand und bei Ablaufschema 2 liegend auf der Montagefläche erfolgt. Um die Zugspannungen bei Bedarf zu verringern, könnte die Größe der Segmente auf zwei Felder begrenzt werden, wobei die Verbindung mittig zwischen zwei Achsen bleibt. Weiter kann eine geringe Vorspannung mit sofortigem Verbund im Untergurt eingesetzt werden und alle Diagonalen eine Vorspannung ohne Verbund erhalten.

In beiden Fällen entstehen Zugspannungen im Obergurt aus Vorspannung des Untergurt. Die maßgebende Zugkraft beträgt 15 kN beim liegenden Vorspannen (Ablaufschema 2), da hier das Eigengewicht des Fachwerkträgers zunächst nicht aktiviert wird. Die Zugkraft von 15 kN wird im Montagezustand durch eine konstruktive Verschraubung übertragen.

FA.1.5 Konstruktiver Brandschutz

Anders als bei Stahl- oder Holzfachwerken ermöglicht die Betonbauweise einen Schutz gegen Brandeinwirkung. Die einzelnen Bauteile des modularen Fachwerkträgers werden auf Grundlage der Verwendung der tabellierten Daten beurteilt. Dabei werden die Gurte, Pfosten und Diagonalen sowie Stützen nach DIN EN 1992-1-2 betrachtet. Da es sich um hochfesten Beton handelt, werden die zusätzlichen Vorschriften der Klasse 3 berücksichtigt. Diese sind in DIN EN 1992-1-2 + NA; Kap. 6 für Betone der Festigkeitsklasse C 90/105 geregelt. Die Problematik bei Betonen mit dieser hohen Festigkeitsklasse und darüber hinaus insbesondere für ultrahochfeste Betone ist das dichte Gefüge der Betonmatrix. Das im Bauteil enthaltene Wasser hat keinen Raum (Luftporen) um sich im Brandfall ausdehnen zu können. Dies führt zu Abplatzungen am Beton, der die Bewehrung dann nicht mehr vor der Brandeinwirkung schützen kann. Um diese Abplatzungen zu vermeiden, kann gemäß DIN EN 1992-1-2 bei Methode A ein dichtes konstruktives Bewehrungsnetz mit 15 mm Betondeckung

vorgesehen werden. Methode B sieht Betontypen (Betonzusammensetzungen) vor, bei denen erwiesenermaßen keine Abplatzungen auftreten. Ein weiterer Schutz vor Abplatzungen ist das Anbringen einer Schutzschicht (Methode C) sowie das Beimischen von mehr als 2 kg/m³ Polypropylenfasern. Diese sollen bei hohen Temperaturen schmelzen und somit einen Hohlraum für das sich ausdehnende Wasser bilden. Bei Betonen C100/115 sowie höheren Festigkeitsklassen wird vorgeschlagen eine Kombination aus 2 Methoden vorzunehmen. Beispielsweise könnten Polypropylenfasern in Kombination mit einer oberflächennahen Netzbewehrung eingesetzt werden (vgl. ZMB/10/2002).

Die Bauteilabmessungen von hochfesten Betonen müssen gegenüber den Normalbetonen um den Wert $2 \cdot (k - 1) \cdot a$ erhöht werden. Der Achsabstand a und der Wert k , der die Festigkeitsreduzierung des Betons bei hohen Temperaturen berücksichtigt, werden nachfolgend angegeben.

$k = 1,1$ für Betone der Klasse 1

$k = 1,3$ für Betone der Klasse 2

Für Betone der Klasse 3 wird empfohlen das genauere Berechnungsverfahren anzuwenden. Obwohl hier ein Beton der Klasse 3 vorliegt, soll die brandschutztechnische Betrachtung anhand der Tabellen durchgeführt werden. Unter Beachtung der Kombination aus zwei konstruktiven Methoden der Sicherung gegen Betonabplatzungen wird für die Bemessung der Wert $k = 1,3$ angesetzt.

Der Wert a ist der Achsenabstand gem. DIN EN 1992-1-2 + NA; Kap. 5 und in Abhängigkeit der erforderlichen Feuerwiderstandsklasse und des Ausnutzungsgrades zu ermitteln.

Der Ausnutzungsgrad wird wie folgt berechnet:

$$\mu_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Ed}} \quad (Gl.3.54)$$

mit

$N_{Ed,fi}$ Bemessungswert der Normalkraft im Brandfall

N_{Ed} Maximaler Bemessungswert der Normalkraft im GZT bei Normaltemperatur, anstelle des Bemessungswertes der Tragfähigkeit der Stütze bei Normaltemperatur N_{Rd} (vereinfachte Annahme auf der sicheren Seite)

Die Berechnung des Fachwerkträgers erfolgt mit außergewöhnlichen Einwirkungskombinationen nach DIN EN 1990. Die untersuchten Lastfälle, verwendeten Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte sowie die Lastfallkombinationen sind in Anhang FA4 aufgeführt. Die Kriterien zur Anwendung der DIN EN 1992-1-2 + NA Tab. 5.2a sind erfüllt. Die Ersatzlänge der Stütze im Brandfall beträgt $l_{0,fi} \leq 3,0$ m und der Bewehrungsgehalt $A_s < 0,04 \cdot A_c$. Dabei wird der Untergurt nur zwischen den Pfosten betrachtet. Es wird eine mehrseitige Brandbeanspruchung angesetzt.

Das Knotenelement weist eine Analogie zu Konsolen auf und wird deshalb nach DIN 4102, Teil 4, Tab.5 dimensioniert. Dabei werden die Bauteilabmessungen und Mindeststababstände unabhängig vom Ausnutzungsgrad festgelegt. Die Betondeckung der Zahnleiste wird aufgrund der ähnlichen Einbausituation wie Verbundstützen behandelt. In beiden Fällen wird ein Stahlbauteil einbetoniert und damit vor Brand geschützt. Die Dimensionierung erfolgt nach DIN EN 1994-1-2, Tabelle 4.4 – Zeile 2.2. Auch bei der Konsole wird analog der Gurte, Diagonalen und Pfosten eine Querschnittserhöhung wegen des hochfesten Betons vorgenommen (Tab.FA.16).

Die Mindestabstände und Bauteilabmessungen sind so gewählt, dass gilt:

$$\frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi}} \leq 1,0 \quad (Gl.3.55)$$

mit:

$E_{d,fi}$ Bemessungswert der Schnittgröße im Brandfall

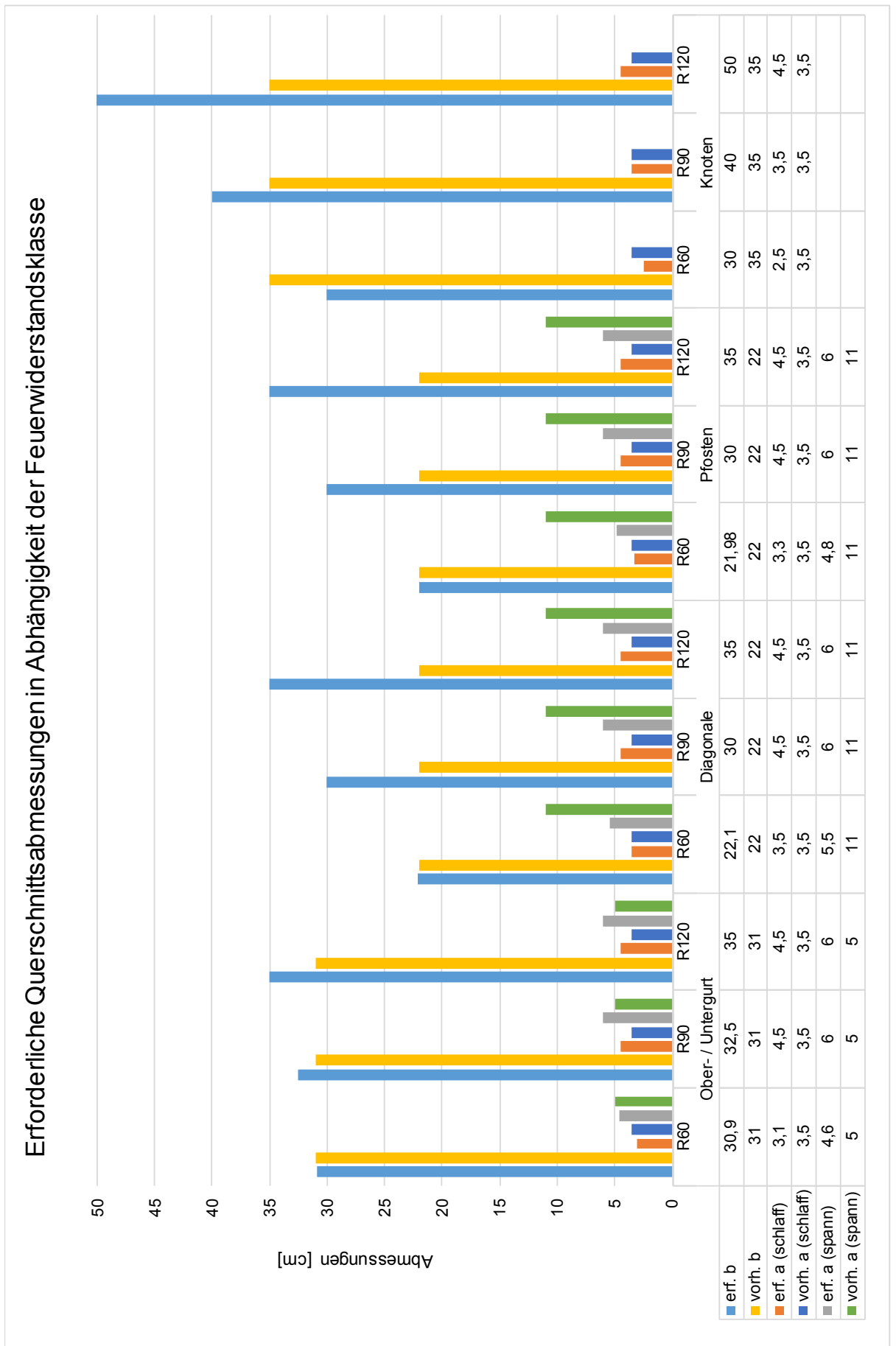
$R_{d,fi}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit im Brandfall

Die Bemessung mit Tabellen zeigt eine Anwendbarkeit des Fachwerkträgers bis zu einer Feuerwiderstandsklasse R60. Mit größeren Querschnittsabmessungen können auch höhere Feuerwiderstandsklassen erreicht werden (Tab.FA.17). Da es aus Montagegründen eine Fuge zwischen Knotenelement und Gurt gibt, ist diese entsprechend der Brandschutzanforderungen mit einem Fugendichtstoff (Fugendichtband) zu schließen (vgl. MB7, FDB,11/2012).

Tab.FA.12: Ergebnisse der brandschutztechnischen Betrachtung (Schubert 2017)

Bauteil	Feuerwiderstandsklasse	erforderliche Abmessungen	Grundlagen	Beschreibung	gewählte Abmessungen	Begründung
Ober- / Untergurt	R60	$b \geq 30,9$ cm $a_{\text{Schlaiff}} \geq 3,1$ cm $a_{\text{Spanndraht}} \geq 4,6$ cm	DIN EN 1992-1-2 + NA, Tabellarische Daten nach Kapitel 5.3.2, Methode A, Tabelle 5.2a	Bemessungssituation für Schnittgrößenermittlung: Außergewöhnlich (Brandfall); Annahme zur Ermittlung des Ausnutzungsfaktors μ : aufnehmbare Normalkraft der Stütze $N_{Rd} \approx N_{Ed}$ Normalkraft der Stütze im GZT; Verwendung der Tabellarischen Daten für Stützen, da Momentenbeanspruchung der Bauteile im Fachwerkträger gering ist; Berücksichtigung der Querschnittserhöhungen bei Verwendung von HFB nach Kap. 6.4.3	$b/h = 35/31$ cm $a_{\text{Schlaiff}} = 3,5$ cm $a_{\text{Spanndraht}} = 5,0$ cm	Minimale Unterschreitung der erforderlichen Abmessungen werden durch folgende Aspekte begründet: N_{Rd} auf der sicheren Seite liegend, dadurch ungünstigerer Ausnutzungsfaktor μ ; Verwendung von C100/115, jedoch mögliche Anwendung mehrerer Methoden gleichzeitig zur Verhinderung von Betonabplatzungen nach Kapitel 6.2; Tabellarische Daten liegen im Allgemeinen auf der sicheren Seite und resultieren in größeren Querschnittsabmessungen als genaue Berechnungsmethoden
		$b \geq 22,1$ cm $a_{\text{Schlaiff}} \geq 3,5$ cm $a_{\text{Spanndraht}} \geq 5,5$ cm	DIN EN 1992-1-2 + NA, Tabellarische Daten nach Kapitel 5.3.2, Methode A, Tabelle 5.2a		$b/h = 22/22$ cm $a_{\text{Schlaiff}} = 3,5$ cm $a_{\text{Spanndraht}} = 11,0$ cm	
Pfosten	R60	$b \geq 22$ cm $a_{\text{Schlaiff}} \geq 3,3$ cm $a_{\text{Spanndraht}} \geq 4,8$ cm	DIN EN 1992-1-2 + NA, Tabellarische Daten nach Kapitel 5.3.2, Methode A, Tabelle 5.2a	Mindestabmessungen unabhängig von Ausnutzungsfaktor des Bauteils; Bemessung analog zu Stahlbeton-Konsolen	$b/h = 22/22$ cm $a_{\text{Schlaiff}} = 3,5$ cm $a_{\text{Spanndraht}} = 11,0$ cm	Geometrie von Stahlbeton-Konsolen ähnlich zum Knotenpunkt
Knoten	R60	$b \geq 23,5$ cm $a_{\text{Schlaiff}} \geq 3,0$ cm $a_{\text{Zahnleiste}} \geq 4,0$ cm	DIN EN 1994-1-2 + NA, Tabelle 4.4, Zeile 2.2	Mindestabstand des Stahleinbauteils nach Vorgaben für Verbundstützen ermittelt	$b/h = 35/24$ cm $a_{\text{Schlaiff}} = 3,5$ cm $a_{\text{Zahnleiste}} = 6,5$ cm	Stahlverbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlquerschnitt gewählt, da dies der Einbausituation der Zahnleiste am ähnlichsten ist

Abb.FA.45: Diagramm mit Mindestabmessungen je Feuerwiderstandsklasse (Schubert 2017)



FA.1.6 Dauerhaftigkeit (Korrosionsschutz)

Allgemeines zum Korrosionsschutz

Der Fachwerkträger ist analog der Expositionsklasse in eine Korrosivitätskategorie einzuteilen. Es wird die Korrosivitätskategorie C1 für Innenräume mit üblicher Luftfeuchte angesetzt. Hierfür ist für die genannten Stahlteile des Fachwerkträgers die Korrosionsschutzart „a“, der Schutz durch eine Betondeckung ausreichend. Die Betondeckung ist analog der Expositionsklasse zu wählen.

Korrosionsschutz von Spannsystemen

Beim modularen Fachwerkträger wird zur Vorspannung der Obergurtelelemente eine Vorspannung im Verbund mit Spannstahllitzen St 1570/1770 verwendet. Die einbetonierten Spannstahllitzen werden durch die Betondeckung und die Rissbreitenbeschränkung geschützt.

Der Untergurt wird ohne Verbund mit dem SUSPA DSI Monolitzen-Spannverfahren vorgespannt. Dabei werden 7-drähtige Spannstahllitzen mit einem 1,5mm dicken PE-Mantel umhüllt. Der Zwischenraum wird mit einem dauerelastischen Korrosionsmittel ausgefüllt. Der Korrosionsschutz erfüllt alle Expositionsklassen. Ankerbauteile und Kopplungen sind mit einer Korrosionsschutzmasse (Nontribos MP2 oder Vaseline COX GX) zu schützen. Die Enden der Monolitzen werden mit PE-Kappen versehen. Die PE-Kappen enthalten eine Korrosionsschutzmasse, eine Korrosionsschutzbinde oder sind mit Einpressmörtel verfüllt.

Für die Pfostenvorspannung wird ein verbundloses Stabspannsystem (DYWIDAG) angewandt. Der dafür verwendete Gewindestab verläuft in einem Hüllrohr und erfordert somit einen Dauerkorrosionsschutz. Hier kann zum Korrosionsschutz generell ein Verpressmörtel, ein Strumpfschlauch, eine Korrosionsschutzmasse oder eine Korrosionsschutzbinde zum Einsatz kommen.

Korrosionsschutz von Stahleinbauteilen

Der Korrosionsschutz der Stahlzahnleiste sowie der Ankerplatten für die Vorspannungen und das Auflagerdetail wird auf Grundlage von (FDB MB2 2011) bewertet. Gefährdet sind die Vorspannelemente und hier insbesondere die Ankerplatten der Pfosten- sowie der Untergurtvorspannung. Des Weiteren ist das Auflager (Gabellager) vor Korrosion zu schützen.

Da die Zahnleiste zum Teil einbetoniert ist, wird diese durch die Betondeckung geschützt. Der aus dem Beton herausstehende Bereich ist nach Korrosivitätskategorie C1 nicht zu schützen.

Für die Auflagerplatte sowie die Stahlplatten zur Kippsicherung der Gabellagerung müssen nach Korrosivitätskategorie C1 keine Korrosionsschutzmaßnahmen vorgesehen werden.

Die Einbauteile der Spannsysteme sind gemäß der jeweiligen Zulassungen gegen Korrosion zu schützen.

Zusammenfassung zum Korrosionsschutz

Tab.FA.13: Übersicht der Korrosionsschutzmaßnahmen nach (Kießling 2017)

Bauteil	Spannsystem/Verfahren	Stahleinbauteil	Korrosionsschutzmaßnahme
Untergurt	SUSPA DSI Monolitzen-Spannverfahren ohne Verbund mit 1 bis 5 Monolitzen (ohne Verbund) Z-13.72-30036 bzw. ETA-03/0036	Spannglied	Betondeckung $C_{\min} = 30$ mm PE-Mantel mit Korrosionsschutzmittel
		Verankerung	vollständiges verfüllen mit Korrosionsschutzmasse Schutzsystem nach EN ISO 12944 PE-Kappen gefüllt mit Korrosionsschutzmasse
		Kopplungen	Korrosionsschutzmasse
		Auflager-Stahlplatte	ohne Korrosionsschutzmaßnahme im Einzelfall Grundierung
Obergurt	Spannstahllitze ST 1570/1770 (sofortiger Verbund) Z-12.3-107	Spannglied	Betondeckung $C_{\min} = 43$ mm
Pfosten/ Diagonale	DYWIDAG Stabspannsystem (ohne Verbund) Z-13.72-50123 bzw. ETA-05/0123	Spannglied	Betondeckung $C_{\min} = 30$ mm Schrumpfschlauch bzw. Korrosionsschutzbinde
		Verankerung	Beschichtungssystem nach DIN EN ISO 12944-5 PE-Kappen gefüllt mit Korrosionsschutzmasse
		Kopplungen	Korrosionsschutzmasse
Knotenelement	-	Zahnleiste	Korrosionsschutzbeschichtung auf Epoxidharzbasis Beschichtungssystem nach DIN EN ISO 12944-5

Anhang FA2: Vorspannkraft

Vorspannkraft (Biadatz 2016)

Modell	Vorspannkraft [kN] in			
	Obergurt		Untergurt	
	ohne Verbund	mit Verbund	ohne Verbund	mit Verbund
erwM_final	-	640	2160	1260
erwM_v1	-	640	2160	1500
erwM_v2	-	640	3660	-
erwM_v3	-	640	3560	-
erwM_v4	-	640	3560	-

Modell	Vorspannkraft [kN] in Pfosten									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
	Q	P	O	N	M	L	K	J		
erwM_final	200	800	700	600	450	350	210	80	30	
erwM_v1	210	800	700	600	450	350	240	180	40	
erwM_v2	210	800	700	600	450	350	240	180	40	
erwM_v3	210	815	700	600	530	430	290	350	155	
erwM_v4	210	815	700	600	530	430	290	350	155	

Modell	Vorspannkraft [kN] in Diagonale								
	A-B	B-C	C-D	D-E	E-F	F-G	G-H	H-I	
	P-Q	O-P	N-O	M-N	L-M	K-L	J-K	I-J	
erwM_final	-	-	-	-	-	-	-	-	
erwM_v1	-	-	-	-	-	-	-	-	
erwM_v2	-	-	-	-	-	-	-	-	
erwM_v3	-	-	-	-	-	-	35	170	
erwM_v4	-	-	-	-	-	-	35	170	

Anhang FA3: Lastannahmen und Lastfallkombinationen

Lastannahmen (Biadatz 2015)

Bauteil/Einwirkung	Bezeichnung	Art der Einwirkung	Last in kN/m ²
Dachhaut	$g_{D,k}$	ständig	0,30
Pfetten	$g_{P,k}$	ständig	0,15
Anhängelast	$g_{A,k}$	ständig	0,15
Schneelast	$q_{S,k}$	veränderlich	0,97
Windlast	$q_{W,k}$	veränderlich	0,18

Lastfälle und Kombinationen (Biadatz 2015)

Kurzbezeichnung	Lastfall	Einwirkung / Kombination
LF1	Eigenlast Fachwerkträger	$G_{F,k}$
LF2	Vorspannung (ohne Verbund)	P_k
LF3	Eigenlast Dachaufbau	$G_{D,k} + G_{P,k}$
LF4	Anhängelast	$G_{A,k}$
LF5	Schneelast	$Q_{S,k}$
LF6	Windlast	$Q_{W,k}$
GZT1	Volllast	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot P_k + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
GZG1	seltene Kombination	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot P_k + 1,0 \cdot Q_{S,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$
GZG2	Gebrauchslast	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot P_k$

Erweiterung der Lastfälle und Kombinationen für verschiedene Laststellungen (Biadatz 2016)

Kurzbezeichnung	Lastfall/ -kombination	Einwirkung / Kombination
LF 8	Schnee fünffeldrig	$Q_{S,5,k}$
LF 9	Schnee halbseitig	$Q_{S,8,k}$
LF 10	Schnee zwölffeldrig	$Q_{S,12,k}$
LF 11	Wasseransammlung Altika	$Q_{Wa,k}$
GZT_Ginf_1	Volllast (Schnee), G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
GZT_Ginf_2	Volllast (Wind), G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot Q_{W,k}$
S5	Schnee fünffeldrig	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,5,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S5_Ginf	Schnee fünffeldrig, G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,5,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S8	Schnee halbseitig	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,8,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S8_Ginf	Schnee halbseitig, G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,8,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S12	Schnee zwölffeldrig	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,12,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
S12_Ginf	Schnee zwölffeldrig, G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,12,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$
WaA	Wasseransammlung Altika	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,0 \cdot Q_{Wa,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
WaA_Ginf	Wasseransammlung Altika, G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,0 \cdot Q_{Wa,k} + 0,6 \cdot Q_{W,k}$


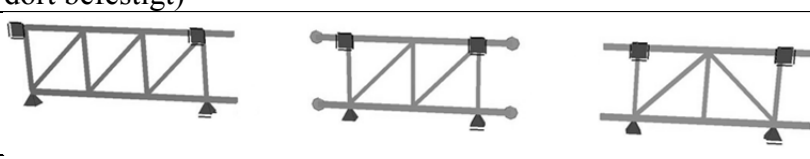
Winddruck auf Wandabschnitte am Gesamtsystem (Biadatz 2016)

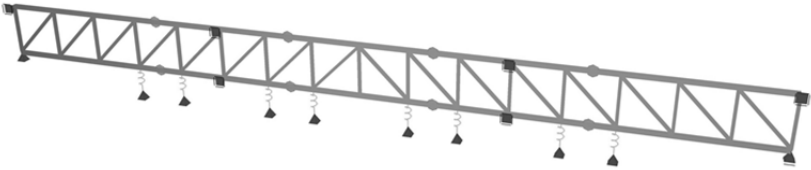

Wind- einwirkungs- richtung	Winddruck w_e (Außendruck) in kN/m ²				
	für Wandabschnitt*				
	A	B	C	D	E
0°	-1,04	-0,69	-0,43	0,62	-0,28
90°	-1,04	-0,69	-0,43	0,61	-0,26
180°	-1,04	-0,69	-0,43	0,62	-0,28

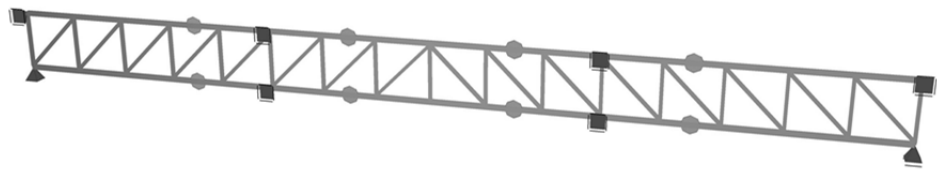
Erweiterung der Lastfälle und Lastfallkombinationen auf das Gesamtsystem (Biadatz 2016)

Kurzbezeichnung	Lastfall/-kombination	Einwirkung / Kombination
LF 12	horiz. Windlast 0°	$Q_{W,0^\circ,k}$
LF 13	horiz. Windlast 90°	$Q_{W,90^\circ,k}$
LF 14	horiz. Windlast 180°	$Q_{W,180^\circ,k}$
GZT_1	Volllast (Schnee)	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
GZT_2	Volllast (Wind)	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot Q_{W,k}$
GZG_perm	Gebrauchslast	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k})$
GZT_Ginf_1	Volllast (Schnee), G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_{W,k}$
GZT_Ginf_2	Volllast (Wind), G günstig	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot Q_{W,k}$
BZ_vDm	Bauzustand vor Dachmontage	$1,0 \cdot G_{F,k} + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k})$
GZT_hW0_1	Volllast (Schnee) mit horizontalem Wind 0°	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,0^\circ,k})$
GZT_hW0_2	Volllast (Wind) mit horizontalem Wind 0°	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,0^\circ,k})$
GZG_hW0_perm	Gebrauchslast mit horizontalem Wind 0°	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{W,0^\circ,k}$
GZT_hW0_Ginf_1	Volllast (Schnee), G günstig mit horizontalem Wind 0°	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,0^\circ,k})$
GZT_hW0_Ginf_2	Volllast (Wind), G günstig mit horizontalem Wind 0°	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,0^\circ,k})$
GZT_hW90_1	Volllast (Schnee) mit horizontalem Wind 90°	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,90^\circ,k})$
GZT_hW90_2	Volllast (Wind) mit horizontalem Wind 90°	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,90^\circ,k})$
GZG_hW90_perm	Gebrauchslast mit horizontalem Wind 90°	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{W,90^\circ,k}$
GZT_hW90_Ginf_1	Volllast (Schnee), G günstig mit horizontalem Wind 90°	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,90^\circ,k})$
GZT_hW90_Ginf_2	Volllast (Wind), G günstig mit horizontalem Wind 90°	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,90^\circ,k})$
GZT_hW180_1	Volllast (Schnee) mit horizontalem Wind 180°	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,180^\circ,k})$
GZT_hW180_2	Volllast (Wind) mit horizontalem Wind 180°	$1,35 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,180^\circ,k})$
GZG_hW180_perm	Gebrauchslast mit horizontalem Wind 180°	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{W,180^\circ,k}$
GZT_hW180_Ginf_1	Volllast (Schnee), G günstig mit horizontalem Wind 180°	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 1,5 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,180^\circ,k})$
GZT_hW180_Ginf_2	Volllast (Wind), G günstig mit horizontalem Wind 180°	$1,0 \cdot (G_{F,k} + G_{D,k} + G_{P,k} + G_{A,k}) + 1,0 \cdot (P_k + P_{Pf,k}) + 0,75 \cdot Q_{S,k} + 1,5 \cdot (Q_{W,k} + Q_{W,180^\circ,k})$

Anhang FA4: Bauzustände

Überblick über die betrachteten Bauzustände																																																																																																																																				
Arbeitsschritt	Abladen der liegenden Segmente																																																																																																																																			
Rechenmodell	erwM_v4_A1 (siehe System)																																																																																																																																			
	erwM_v4_A2 (Lagerung OG und UG in allen Achsen)																																																																																																																																			
	erwM_v4_A3 (A1, jedoch UG vollständig aufgelagert, Linienlager)																																																																																																																																			
	erwM_v4_A4 (A2, jedoch UG vollständig aufgelagert, Linienlager)																																																																																																																																			
System																																																																																																																																				
Belastung	Eigengewicht wirkt senkrecht zur Fachwerkebene.																																																																																																																																			
Ergebnisse	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Modell</th> <th colspan="8">Normalspannungen in MN/m²</th> <th rowspan="2"></th> </tr> <tr> <th colspan="2">Obergurt</th> <th colspan="2">Pfosten</th> <th colspan="2">Diagonale</th> <th colspan="2">Untergurt</th> </tr> <tr> <th></th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>erwM_v4_A1</td> <td>4,15</td> <td>-15,91</td> <td>-1,78</td> <td>-20,30</td> <td>4,42</td> <td>-5,71</td> <td>9,89</td> <td>-9,89</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>B-C; O-P</td> <td>B-C; O-P</td> <td>I</td> <td>B, P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_A2</td> <td>-4,51</td> <td>-9,68</td> <td>-1,68</td> <td>-20,59</td> <td>2,65</td> <td>-5,15</td> <td>1,89</td> <td>-1,90</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>B-C; O-P</td> <td>B-C; O-P</td> <td>I</td> <td>B, P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_A1 ohne Eigeng.</td> <td>-5,32</td> <td>-8,88</td> <td>-3,09</td> <td>-19,91</td> <td>1,82</td> <td>-3,77</td> <td>1,25</td> <td>-1,26</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>B-C; O-P</td> <td>B-C; O-P</td> <td>A, Q</td> <td>B, P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_A3</td> <td>1,12</td> <td>-14,43</td> <td>3,62</td> <td>-23,92</td> <td>5,54</td> <td>-5,77</td> <td>2,88</td> <td>-2,88</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>B-C, O-P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>A, Q</td> <td>B, P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_A4</td> <td>-4,52</td> <td>-9,68</td> <td>-1,68</td> <td>-20,60</td> <td>2,65</td> <td>-5,15</td> <td>1,55</td> <td>-1,55</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>B-C, O-P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>I</td> <td>B, P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> </tbody> </table>									Modell	Normalspannungen in MN/m ²									Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt			max	min	max	min	max	min	max	min		erwM_v4_A1	4,15	-15,91	-1,78	-20,30	4,42	-5,71	9,89	-9,89	Spannungen überschritten	an Element	B-C; O-P	B-C; O-P	I	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q	erwM_v4_A2	-4,51	-9,68	-1,68	-20,59	2,65	-5,15	1,89	-1,90	Spannungen überschritten	an Element	B-C; O-P	B-C; O-P	I	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q	erwM_v4_A1 ohne Eigeng.	-5,32	-8,88	-3,09	-19,91	1,82	-3,77	1,25	-1,26	Spannungen eingehalten	an Element	B-C; O-P	B-C; O-P	A, Q	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q	erwM_v4_A3	1,12	-14,43	3,62	-23,92	5,54	-5,77	2,88	-2,88	Spannungen überschritten	an Element	B-C, O-P	B-C, O-P	A, Q	B, P	B-C, O-P	B-C, O-P	A-B, P-Q	A-B, P-Q	erwM_v4_A4	-4,52	-9,68	-1,68	-20,60	2,65	-5,15	1,55	-1,55	Spannungen überschritten	an Element	B-C, O-P	B-C, O-P	I	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q
	Modell	Normalspannungen in MN/m ²																																																																																																																																		
Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt																																																																																																																														
	max	min	max	min	max	min	max	min																																																																																																																												
erwM_v4_A1	4,15	-15,91	-1,78	-20,30	4,42	-5,71	9,89	-9,89	Spannungen überschritten																																																																																																																											
an Element	B-C; O-P	B-C; O-P	I	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q																																																																																																																												
erwM_v4_A2	-4,51	-9,68	-1,68	-20,59	2,65	-5,15	1,89	-1,90	Spannungen überschritten																																																																																																																											
an Element	B-C; O-P	B-C; O-P	I	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q																																																																																																																												
erwM_v4_A1 ohne Eigeng.	-5,32	-8,88	-3,09	-19,91	1,82	-3,77	1,25	-1,26	Spannungen eingehalten																																																																																																																											
an Element	B-C; O-P	B-C; O-P	A, Q	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q																																																																																																																												
erwM_v4_A3	1,12	-14,43	3,62	-23,92	5,54	-5,77	2,88	-2,88	Spannungen überschritten																																																																																																																											
an Element	B-C, O-P	B-C, O-P	A, Q	B, P	B-C, O-P	B-C, O-P	A-B, P-Q	A-B, P-Q																																																																																																																												
erwM_v4_A4	-4,52	-9,68	-1,68	-20,60	2,65	-5,15	1,55	-1,55	Spannungen überschritten																																																																																																																											
an Element	B-C, O-P	B-C, O-P	I	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q																																																																																																																												
Bemessungsfestlichkeiten des Betons: Druck eingehalten; Zug überschritten																																																																																																																																				
Arbeitsschritt	Stehende Segmente <i>Segment stehend vor dem Vorspannen des Untergurtes</i>																																																																																																																																			
Rechenmodell	erwM_v4_B1 (siehe System)																																																																																																																																			
	erwM_v4_B2 (vertikale Lagerung am UG in allen Achsen)																																																																																																																																			
	erwM_v4_B3(2x Vertikallager am OG, falls Transportschlaufen dort befestigt)																																																																																																																																			
	erwM_v4_B3(Vertikallager am OG in allen Achsen, falls Transportschlaufen dort befestigt)																																																																																																																																			
System																																																																																																																																				
Belastung	Eigengewicht wirkt in Fachwerkebene. Die Vorspannung der Füllstäbe ist aufgebracht.																																																																																																																																			
Ergebnisse	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Modell</th> <th colspan="8">Normalspannungen in MN/m²</th> <th rowspan="2"></th> </tr> <tr> <th colspan="2">Obergurt</th> <th colspan="2">Pfosten</th> <th colspan="2">Diagonale</th> <th colspan="2">Untergurt</th> </tr> <tr> <th></th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>erwM_v4_B1</td> <td>-5,03</td> <td>-9,81</td> <td>-3,18</td> <td>-19,66</td> <td>2,91</td> <td>-5,19</td> <td>2,26</td> <td>-1,83</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>C-D, N-O</td> <td>C-D, N-O</td> <td>I</td> <td>B, P</td> <td>C-D, N-O</td> <td>H-I, I-J</td> <td>B-C, O-P</td> <td>C-D, N-O</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_B2</td> <td>-5,12</td> <td>-9,57</td> <td>-3,93</td> <td>-19,75</td> <td>2,88</td> <td>-3,85</td> <td>2,18</td> <td>-1,79</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>C-D, N-O</td> <td>C-D, N-O</td> <td>A, Q</td> <td>B, P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>B-C, O-P</td> <td>C-D, N-O</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_B3</td> <td>-5,06</td> <td>-9,78</td> <td>-2,99</td> <td>-19,63</td> <td>2,87</td> <td>-5,19</td> <td>2,35</td> <td>-1,77</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>C-D, N-O</td> <td>C-D, N-O</td> <td>A, Q</td> <td>B, P</td> <td>C-D, N-O</td> <td>H-I, I-J</td> <td>B-C, O-P</td> <td>C-D, N-O</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_B4</td> <td>-4,95</td> <td>-9,27</td> <td>-3,16</td> <td>-18,69</td> <td>3,48</td> <td>-5,26</td> <td>2,16</td> <td>-4,14</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>I</td> <td>B, P</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>B-C, O-P</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> </tbody> </table>									Modell	Normalspannungen in MN/m ²									Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt			max	min	max	min	max	min	max	min		erwM_v4_B1	-5,03	-9,81	-3,18	-19,66	2,91	-5,19	2,26	-1,83	Spannungen überschritten	an Element	C-D, N-O	C-D, N-O	I	B, P	C-D, N-O	H-I, I-J	B-C, O-P	C-D, N-O	erwM_v4_B2	-5,12	-9,57	-3,93	-19,75	2,88	-3,85	2,18	-1,79	Spannungen überschritten	an Element	C-D, N-O	C-D, N-O	A, Q	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	B-C, O-P	C-D, N-O	erwM_v4_B3	-5,06	-9,78	-2,99	-19,63	2,87	-5,19	2,35	-1,77	Spannungen überschritten	an Element	C-D, N-O	C-D, N-O	A, Q	B, P	C-D, N-O	H-I, I-J	B-C, O-P	C-D, N-O	erwM_v4_B4	-4,95	-9,27	-3,16	-18,69	3,48	-5,26	2,16	-4,14	Spannungen überschritten	an Element	A-B, P-Q	A-B, P-Q	I	B, P	A-B, P-Q	B-C, O-P	A-B, P-Q	A-B, P-Q																			
	Modell	Normalspannungen in MN/m ²																																																																																																																																		
Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt																																																																																																																														
	max	min	max	min	max	min	max	min																																																																																																																												
erwM_v4_B1	-5,03	-9,81	-3,18	-19,66	2,91	-5,19	2,26	-1,83	Spannungen überschritten																																																																																																																											
an Element	C-D, N-O	C-D, N-O	I	B, P	C-D, N-O	H-I, I-J	B-C, O-P	C-D, N-O																																																																																																																												
erwM_v4_B2	-5,12	-9,57	-3,93	-19,75	2,88	-3,85	2,18	-1,79	Spannungen überschritten																																																																																																																											
an Element	C-D, N-O	C-D, N-O	A, Q	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	B-C, O-P	C-D, N-O																																																																																																																												
erwM_v4_B3	-5,06	-9,78	-2,99	-19,63	2,87	-5,19	2,35	-1,77	Spannungen überschritten																																																																																																																											
an Element	C-D, N-O	C-D, N-O	A, Q	B, P	C-D, N-O	H-I, I-J	B-C, O-P	C-D, N-O																																																																																																																												
erwM_v4_B4	-4,95	-9,27	-3,16	-18,69	3,48	-5,26	2,16	-4,14	Spannungen überschritten																																																																																																																											
an Element	A-B, P-Q	A-B, P-Q	I	B, P	A-B, P-Q	B-C, O-P	A-B, P-Q	A-B, P-Q																																																																																																																												
Bemessungsfestlichkeiten des Betons: Druck eingehalten; Zug überschritten																																																																																																																																				

Fortsetzung Überblick über die betrachteten Bauzustände																																																																																																																																		
Arbeitsschritt	Vorspannen des Untergurtes im stehenden Zustand																																																																																																																																	
Rechenmodell	erwM_v4_C (siehe System)Vorspannen des UG																																																																																																																																	
System																																																																																																																																		
Belastung	Eigengewicht in Eigengewichts Richtung. Die Vorspannung wird schrittweise aufgebracht (10 %, 20 %, 40 %, 80 %, 100 %).																																																																																																																																	
Ich komme gleich	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Modell</th> <th colspan="8">Normalspannungen in MN/m²</th> <th rowspan="3"></th> </tr> <tr> <th colspan="2">Obergurt</th> <th colspan="2">Pfosten</th> <th colspan="2">Diagonale</th> <th colspan="2">Untergurt</th> </tr> <tr> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>erwM_v4_C 10% Vorsp.</td> <td>-4,75</td> <td>-12,39</td> <td>-3,18</td> <td>-17,86</td> <td>1,25</td> <td>-6,33</td> <td>1,26</td> <td>-4,72</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>H-I, I-J</td> <td>I</td> <td>B, P</td> <td>E-F, L-M</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>G-H, J-K</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_C 20% Vorsp.</td> <td>-4,66</td> <td>-14,55</td> <td>-3,16</td> <td>-16,97</td> <td>0,84</td> <td>-8,02</td> <td>-0,55</td> <td>-10,00</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>H-I, I-J</td> <td>I</td> <td>B, P</td> <td>F-G, K-L</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>G-H, J-K</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_C 40% Vorsp.</td> <td>-4,65</td> <td>-18,27</td> <td>-3,14</td> <td>-16,14</td> <td>-0,43</td> <td>-10,10</td> <td>-4,30</td> <td>-20,04</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>G-H, J-K</td> <td>I</td> <td>B, P</td> <td>G-H, J-K</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>G-H, J-K</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_C 80% Vorsp.</td> <td>-4,50</td> <td>-20,20</td> <td>-1,95</td> <td>-17,47</td> <td>-0,18</td> <td>-10,14</td> <td>-18,26</td> <td>-38,48</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>G, K</td> <td>B, P</td> <td>G-H, J-K</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_C 100% Vorsp.</td> <td>-4,20</td> <td>-21,25</td> <td>-1,18</td> <td>-18,14</td> <td>-0,06</td> <td>-10,16</td> <td>-24,84</td> <td>-47,70</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>G, K</td> <td>B, P</td> <td>G-H, J-K</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> </tbody> </table>									Modell	Normalspannungen in MN/m ²									Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt		max	min	max	min	max	min	max	min	erwM_v4_C 10% Vorsp.	-4,75	-12,39	-3,18	-17,86	1,25	-6,33	1,26	-4,72	Spannungen eingehalten	an Element	A-B, P-Q	H-I, I-J	I	B, P	E-F, L-M	A-B, P-Q	G-H, J-K	A-B, P-Q	erwM_v4_C 20% Vorsp.	-4,66	-14,55	-3,16	-16,97	0,84	-8,02	-0,55	-10,00	Spannungen eingehalten	an Element	A-B, P-Q	H-I, I-J	I	B, P	F-G, K-L	A-B, P-Q	G-H, J-K	A-B, P-Q	erwM_v4_C 40% Vorsp.	-4,65	-18,27	-3,14	-16,14	-0,43	-10,10	-4,30	-20,04	Spannungen eingehalten	an Element	A-B, P-Q	G-H, J-K	I	B, P	G-H, J-K	A-B, P-Q	G-H, J-K	A-B, P-Q	erwM_v4_C 80% Vorsp.	-4,50	-20,20	-1,95	-17,47	-0,18	-10,14	-18,26	-38,48	Spannungen eingehalten	an Element	B-C, O-P	H-I, I-J	G, K	B, P	G-H, J-K	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q	erwM_v4_C 100% Vorsp.	-4,20	-21,25	-1,18	-18,14	-0,06	-10,16	-24,84	-47,70	Spannungen eingehalten	an Element	B-C, O-P	H-I, I-J	G, K	B, P	G-H, J-K	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q
	Modell	Normalspannungen in MN/m ²																																																																																																																																
		Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt																																																																																																																										
		max	min	max	min	max	min	max	min																																																																																																																									
	erwM_v4_C 10% Vorsp.	-4,75	-12,39	-3,18	-17,86	1,25	-6,33	1,26	-4,72	Spannungen eingehalten																																																																																																																								
	an Element	A-B, P-Q	H-I, I-J	I	B, P	E-F, L-M	A-B, P-Q	G-H, J-K	A-B, P-Q																																																																																																																									
	erwM_v4_C 20% Vorsp.	-4,66	-14,55	-3,16	-16,97	0,84	-8,02	-0,55	-10,00	Spannungen eingehalten																																																																																																																								
an Element	A-B, P-Q	H-I, I-J	I	B, P	F-G, K-L	A-B, P-Q	G-H, J-K	A-B, P-Q																																																																																																																										
erwM_v4_C 40% Vorsp.	-4,65	-18,27	-3,14	-16,14	-0,43	-10,10	-4,30	-20,04	Spannungen eingehalten																																																																																																																									
an Element	A-B, P-Q	G-H, J-K	I	B, P	G-H, J-K	A-B, P-Q	G-H, J-K	A-B, P-Q																																																																																																																										
erwM_v4_C 80% Vorsp.	-4,50	-20,20	-1,95	-17,47	-0,18	-10,14	-18,26	-38,48	Spannungen eingehalten																																																																																																																									
an Element	B-C, O-P	H-I, I-J	G, K	B, P	G-H, J-K	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q																																																																																																																										
erwM_v4_C 100% Vorsp.	-4,20	-21,25	-1,18	-18,14	-0,06	-10,16	-24,84	-47,70	Spannungen eingehalten																																																																																																																									
an Element	B-C, O-P	H-I, I-J	G, K	B, P	G-H, J-K	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q																																																																																																																										
Bemessungsfestlichkeiten des Betons: Druck eingehalten; Zug eingehalten																																																																																																																																		
Arbeitsschritt	Vorspannen des Untergurtes im liegenden Zustand																																																																																																																																	
Rechenmodell	erwM_v4_D1 (siehe System)																																																																																																																																	
	erwM_v4_D2 (Lagerung des OG und UG in allen Achsen)																																																																																																																																	
	erwM_v4_D3(UG vollständig aufgelagert (Linienlager); OG in den Achsen A, F, L und Q gelagert, Lage der Abhebepunkte)																																																																																																																																	
	erwM_v4_D4(UG vollständig aufgelagert; OG in jeder Achse gelagert, Lage der Abhebepunkte)																																																																																																																																	
System																																																																																																																																		
Belastung	Eigengewicht wirkt senkrecht zur Fachwerkebene. Die Vorspannung der Füllstäbe ist aufgebracht.																																																																																																																																	
Ergebnisse	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Modell</th> <th colspan="8">Normalspannungen in MN/m²</th> <th rowspan="3"></th> </tr> <tr> <th colspan="2">Obergurt</th> <th colspan="2">Pfosten</th> <th colspan="2">Diagonale</th> <th colspan="2">Untergurt</th> </tr> <tr> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>erwM_v4_D1 ohne Eigeng.</td> <td>-1,15</td> <td>-12,50</td> <td>-1,37</td> <td>-23,13</td> <td>2,21</td> <td>-5,84</td> <td>-33,66</td> <td>-51,00</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>G, K</td> <td>B, P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_D1</td> <td>71,57</td> <td>-85,47</td> <td>6,68</td> <td>-25,32</td> <td>19,96</td> <td>-27,84</td> <td>29,28</td> <td>-114,21</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A, Q</td> <td>B, P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_D2</td> <td>-0,71</td> <td>-12,94</td> <td>-0,73</td> <td>-23,69</td> <td>3,09</td> <td>-6,69</td> <td>-33,15</td> <td>-51,51</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>G, K</td> <td>B, P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_D3</td> <td>17,38</td> <td>-30,57</td> <td>15,48</td> <td>-29,78</td> <td>10,44</td> <td>-10,88</td> <td>-32,57</td> <td>-51,80</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>F-G, K-L</td> <td>F-G, K-L</td> <td>A, Q</td> <td>C, O</td> <td>F-G, K-L</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>erwM_v4_D4</td> <td>-0,71</td> <td>-12,94</td> <td>-0,73</td> <td>-23,71</td> <td>3,05</td> <td>-6,69</td> <td>-33,64</td> <td>-51,01</td> <td rowspan="2">Spannungen überschritten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>G, K</td> <td>B, P</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> </tr> </tbody> </table>									Modell	Normalspannungen in MN/m ²									Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt		max	min	max	min	max	min	max	min	erwM_v4_D1 ohne Eigeng.	-1,15	-12,50	-1,37	-23,13	2,21	-5,84	-33,66	-51,00	Spannungen überschritten	an Element	H-I, I-J	H-I, I-J	G, K	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J	erwM_v4_D1	71,57	-85,47	6,68	-25,32	19,96	-27,84	29,28	-114,21	Spannungen überschritten	an Element	H-I, I-J	H-I, I-J	A, Q	B, P	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J	erwM_v4_D2	-0,71	-12,94	-0,73	-23,69	3,09	-6,69	-33,15	-51,51	Spannungen überschritten	an Element	H-I, I-J	H-I, I-J	G, K	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J	erwM_v4_D3	17,38	-30,57	15,48	-29,78	10,44	-10,88	-32,57	-51,80	Spannungen überschritten	an Element	F-G, K-L	F-G, K-L	A, Q	C, O	F-G, K-L	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q	erwM_v4_D4	-0,71	-12,94	-0,73	-23,71	3,05	-6,69	-33,64	-51,01	Spannungen überschritten	an Element	H-I, I-J	H-I, I-J	G, K	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J
	Modell	Normalspannungen in MN/m ²																																																																																																																																
		Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt																																																																																																																										
		max	min	max	min	max	min	max	min																																																																																																																									
	erwM_v4_D1 ohne Eigeng.	-1,15	-12,50	-1,37	-23,13	2,21	-5,84	-33,66	-51,00	Spannungen überschritten																																																																																																																								
	an Element	H-I, I-J	H-I, I-J	G, K	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J																																																																																																																									
	erwM_v4_D1	71,57	-85,47	6,68	-25,32	19,96	-27,84	29,28	-114,21	Spannungen überschritten																																																																																																																								
an Element	H-I, I-J	H-I, I-J	A, Q	B, P	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J																																																																																																																										
erwM_v4_D2	-0,71	-12,94	-0,73	-23,69	3,09	-6,69	-33,15	-51,51	Spannungen überschritten																																																																																																																									
an Element	H-I, I-J	H-I, I-J	G, K	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J																																																																																																																										
erwM_v4_D3	17,38	-30,57	15,48	-29,78	10,44	-10,88	-32,57	-51,80	Spannungen überschritten																																																																																																																									
an Element	F-G, K-L	F-G, K-L	A, Q	C, O	F-G, K-L	H-I, I-J	A-B, P-Q	A-B, P-Q																																																																																																																										
erwM_v4_D4	-0,71	-12,94	-0,73	-23,71	3,05	-6,69	-33,64	-51,01	Spannungen überschritten																																																																																																																									
an Element	H-I, I-J	H-I, I-J	G, K	B, P	B-C, O-P	H-I, I-J	H-I, I-J	H-I, I-J																																																																																																																										
Bemessungsfestlichkeiten des Betons: Druck überschritten; Zug überschritten																																																																																																																																		

Fortsetzung Überblick über die betrachteten Bauzustände																																																		
Arbeitsschritt	Einheben des Fachwerkträgers mit Traversen																																																	
Rechenmodell	erwM_v4_E1 (siehe System)																																																	
	erwM_v4_E2 (Horizontallager am OG u. UG in Achse F u. L werden durch Federn ersetzt)																																																	
	erwM_v4_E3 (Horizontallager am OG u. UG in Achse F u. L u. im OG in Achse A u. Q werden durch Federn ersetzt)																																																	
	erwM_v4_E4 (Horizontallager werden durch Federn ersetzt)																																																	
	In Allen Modellen werden die Federn mit folgenden Feder Steifigkeiten in Kilonewton pro Meter untersucht: 100.000, 50.000, 10.000, 5.000, 1.500, 1.000 und 500.																																																	
System	 <p>Transportschlaufen sind in den Achsen A, F, L und Q simuliert. Am UG in Achse A und Q wird ein Vertikallager, in Achse F und L eine haltende Kraft von 80kN (entspricht 1/6 des Gesamtgewichts) als Halterung angesetzt.</p>																																																	
Belastung	Eigengewicht in Eigengewichts Richtung.																																																	
Ergebnisse	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Modell</th> <th colspan="8">Normalspannungen in MN/m²</th> <th rowspan="3">Spannungen eingehalten</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Obergurt</th> <th colspan="2">Pfosten</th> <th colspan="2">Diagonale</th> <th colspan="2">Untergurt</th> </tr> <tr> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>erwM_v4_E1</td> <td>-4,62</td> <td>-16,86</td> <td>-0,88</td> <td>-20,53</td> <td>1,74</td> <td>-7,03</td> <td>-29,24</td> <td>-47,33</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>an Element</td> <td>B-C, O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>G, K</td> <td>B, P</td> <td>D-E, M-N</td> <td>H-I, I-J</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> </tbody> </table> <p>Bemessungsfestlichkeiten des Betons: Druck eingehalten; Zug eingehalten</p> <p>Für die Modelle erwM_v4_E2 bis E4 ändern sich die Normalspannungen nicht, jedoch liefert die Eigenwertanalyse unterschiedliche Lastfaktoren, welche nachfolgend aufgeführt sind.</p>	Modell	Normalspannungen in MN/m ²								Spannungen eingehalten	Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt		max	min	max	min	max	min	max	min	erwM_v4_E1	-4,62	-16,86	-0,88	-20,53	1,74	-7,03	-29,24	-47,33	Spannungen eingehalten	an Element	B-C, O-P	H-I, I-J	G, K	B, P	D-E, M-N	H-I, I-J	H-I, I-J	A-B, P-Q				
	Modell		Normalspannungen in MN/m ²									Spannungen eingehalten																																						
Obergurt			Pfosten		Diagonale		Untergurt																																											
max		min	max	min	max	min	max	min																																										
erwM_v4_E1	-4,62	-16,86	-0,88	-20,53	1,74	-7,03	-29,24	-47,33	Spannungen eingehalten																																									
an Element	B-C, O-P	H-I, I-J	G, K	B, P	D-E, M-N	H-I, I-J	H-I, I-J	A-B, P-Q																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Federsteifigkeit [kN/m]</th> <th colspan="4">Eigenwert</th> </tr> <tr> <th>erwM_v4_E1 (keine Federn)</th> <th>erwM_v4_E2 (4 Federn)</th> <th>erwM_v4_E3 (6 Federn)</th> <th>erwM_v4_E4 (8 Federn)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>starr</td> <td>2,95</td> <td>2,95</td> <td>2,95</td> <td>2,95</td> </tr> <tr> <td>100000</td> <td>2,95</td> <td>2,94</td> <td>2,93</td> <td>2,92</td> </tr> <tr> <td>50000</td> <td>2,95</td> <td>2,94</td> <td>2,91</td> <td>2,89</td> </tr> <tr> <td>10000</td> <td>2,95</td> <td>2,83</td> <td>2,70</td> <td>2,58</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>2,95</td> <td>2,47</td> <td>2,30</td> <td>2,13</td> </tr> <tr> <td>1500</td> <td>2,95</td> <td>1,38</td> <td>1,20</td> <td>1,04</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>2,95</td> <td>1,11</td> <td>instabil</td> <td>instabil</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>2,95</td> <td>instabil</td> <td>instabil</td> <td>instabil</td> </tr> </tbody> </table>	Federsteifigkeit [kN/m]	Eigenwert				erwM_v4_E1 (keine Federn)	erwM_v4_E2 (4 Federn)	erwM_v4_E3 (6 Federn)	erwM_v4_E4 (8 Federn)	starr	2,95	2,95	2,95	2,95	100000	2,95	2,94	2,93	2,92	50000	2,95	2,94	2,91	2,89	10000	2,95	2,83	2,70	2,58	5000	2,95	2,47	2,30	2,13	1500	2,95	1,38	1,20	1,04	1000	2,95	1,11	instabil	instabil	500	2,95	instabil	instabil	instabil
Federsteifigkeit [kN/m]	Eigenwert																																																	
	erwM_v4_E1 (keine Federn)	erwM_v4_E2 (4 Federn)	erwM_v4_E3 (6 Federn)	erwM_v4_E4 (8 Federn)																																														
starr	2,95	2,95	2,95	2,95																																														
100000	2,95	2,94	2,93	2,92																																														
50000	2,95	2,94	2,91	2,89																																														
10000	2,95	2,83	2,70	2,58																																														
5000	2,95	2,47	2,30	2,13																																														
1500	2,95	1,38	1,20	1,04																																														
1000	2,95	1,11	instabil	instabil																																														
500	2,95	instabil	instabil	instabil																																														

Arbeitsschritt	Dachmontage																																																																																			
Rechenmodell	erwM_v4 (siehe System)																																																																																			
System	<p>Die Varianten 1 bis 3 stellen die untersuchten Möglichkeiten der Dachmontage (schrittweise Montageabfolge) dar.</p>																																																																																			
Belastung	Eigengewicht FWT, Vorspannung des Untergurtes und der Füllstäbe, schrittweise Belastung der Dachhaut und Anhängelast. In der Praxis wird die Dachhaut i.d.R. über mehrere Felder montiert. Die Anhängelast wird i.d.R. erst nach Dachmontage aufgebracht. Der hier untersuchte Ansatz stellt einen auf der sicheren Seite liegenden Grenzfall dar. Somit kann die Dachmontage und Anhängelast sehr flexibel aufgebracht werden.																																																																																			
Ergebnisse	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Modell erwM_v4</th> <th colspan="8">Normalspannungen in MN/m²</th> <th rowspan="3"></th> </tr> <tr> <th colspan="2">Obergurt</th> <th colspan="2">Pfosten</th> <th colspan="2">Diagonale</th> <th colspan="2">Untergurt</th> </tr> <tr> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> <th>max</th> <th>min</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Variante 1</td> <td>-3,71</td> <td>-26,39</td> <td>-0,69</td> <td>-18,18</td> <td>0,44</td> <td>-14,78</td> <td>-19,79</td> <td>-49,40</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>in Element</td> <td>O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>K</td> <td>B, P</td> <td>G-H</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>Variante 2</td> <td>-3,71</td> <td>-26,39</td> <td>-0,85</td> <td>-17,99</td> <td>-0,29</td> <td>-14,78</td> <td>-19,79</td> <td>-49,40</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>in Element</td> <td>O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>K</td> <td>B, P</td> <td>G-H, J-K</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> <tr> <td>Variante 3</td> <td>-3,71</td> <td>-26,39</td> <td>-0,69</td> <td>-17,99</td> <td>0,11</td> <td>-14,78</td> <td>-19,79</td> <td>-49,40</td> <td rowspan="2">Spannungen eingehalten</td> </tr> <tr> <td>in Element</td> <td>O-P</td> <td>H-I, I-J</td> <td>K</td> <td>B, P</td> <td>G-H</td> <td>A-B, P-Q</td> <td>H-I, I-J</td> <td>A-B, P-Q</td> </tr> </tbody> </table> <p>Bemessungsfestlichkeiten des Betons: Druck eingehalten; Zug eingehalten</p>	Modell erwM_v4	Normalspannungen in MN/m ²									Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt		max	min	max	min	max	min	max	min	Variante 1	-3,71	-26,39	-0,69	-18,18	0,44	-14,78	-19,79	-49,40	Spannungen eingehalten	in Element	O-P	H-I, I-J	K	B, P	G-H	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q	Variante 2	-3,71	-26,39	-0,85	-17,99	-0,29	-14,78	-19,79	-49,40	Spannungen eingehalten	in Element	O-P	H-I, I-J	K	B, P	G-H, J-K	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q	Variante 3	-3,71	-26,39	-0,69	-17,99	0,11	-14,78	-19,79	-49,40	Spannungen eingehalten	in Element	O-P	H-I, I-J	K	B, P	G-H	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q
Modell erwM_v4	Normalspannungen in MN/m ²																																																																																			
	Obergurt		Pfosten		Diagonale		Untergurt																																																																													
	max	min	max	min	max	min	max	min																																																																												
Variante 1	-3,71	-26,39	-0,69	-18,18	0,44	-14,78	-19,79	-49,40	Spannungen eingehalten																																																																											
in Element	O-P	H-I, I-J	K	B, P	G-H	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q																																																																												
Variante 2	-3,71	-26,39	-0,85	-17,99	-0,29	-14,78	-19,79	-49,40	Spannungen eingehalten																																																																											
in Element	O-P	H-I, I-J	K	B, P	G-H, J-K	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q																																																																												
Variante 3	-3,71	-26,39	-0,69	-17,99	0,11	-14,78	-19,79	-49,40	Spannungen eingehalten																																																																											
in Element	O-P	H-I, I-J	K	B, P	G-H	A-B, P-Q	H-I, I-J	A-B, P-Q																																																																												

Anhang FA5: Brandschutz

Lastfälle zur Ermittlung der Schnittkräfte des Fachwerkträgers (Schubert 2016)

Lastfall	Bezeichnung	Einwirkung	$\gamma_{G;inf/sup}$	$\gamma_{Q;inf/sup}$	Ψ_1	Ψ_2
1	Eigengewicht	G_k	1,0/1,0	-	-	-
2	Vorspannung	P_k	1,0/1,0	-	-	-
3	Dach	G_k	1,0/1,0	-	-	-
4	Ausbau	G_k	1,0/1,0	-	-	-
5	Schneelast	$Q_{k,S}$	-	0/1,0	0,2	0
6	Windlast	$Q_{k,W}$	-	0/1,0	0,2	0
7	Pfostenvorspannung	P_k	1,0/1,0	-	-	-

Das Berechnungsmodell wird um die außergewöhnlichen Bemessungskombinationen erweitert. Diese lassen sich auf drei Kombinationen reduzieren und lauten wie folgt:

$$E_{d,fi,1} = 1,0 \cdot (G_k + P_k) + 0 \cdot (Q_S + Q_W) = 1,0 \cdot (LF1 + LF2 + LF3 + LF4 + LF7)$$

Gl. FA4-1: Kombination 1, ohne Schnee- und Windeinwirkung

$$E_{d,fi,2} = 1,0 \cdot (G_k + P_k) + 1,0 \cdot \Psi_1 \cdot Q_S = 1,0 \cdot (LF1 + LF2 + LF3 + LF4 + LF7) + 1,0 \cdot 0,2 \cdot LF5$$

Gl. FA4-2: Kombination 2, nur Schneeeinwirkung

$$E_{d,fi,3} = 1,0 \cdot (G_k + P_k) + 1,0 \cdot \Psi_1 \cdot Q_W = 1,0 \cdot (LF1 + LF2 + LF3 + LF4 + LF7) + 1,0 \cdot 0,2 \cdot LF6$$

Gl. FA4-3: Kombination 3, nur Windeinwirkung

Der gleichzeitige Ansatz von Schnee- und Windlasten ergibt keine neuen Einwirkungskombinationen, da der Kombinationsfaktor bei beiden Einwirkungen $\Psi_2 = 0$ ist.

Anhang FB: Baubetriebliche Aspekte

Anhang FB1: Massenermittlung und Zusammenstellung für einen FWT

Massenermittlung Bewehrung

Dichte [kg/cm³]

0,00785

Obergurt 15,26	
Länge [m]	15,19
Längsbewehrung	
Anzahl [Stck.]	4,00
Durchmesser [mm]	25,00
Gewicht [kg]	234,10
Bügelbewehrung	
Verlegeabstand [cm]	30,00
Anzahl [Stck.]	51,63
Durchmesser [mm]	10,00
Länge [cm]	116,00
Gewicht [kg]	36,90
Gesamtgewicht [kg]	271,00

Untergurt 15,26	
Länge [m]	15,19
Längsbewehrung	
Anzahl [Stck.]	4,00
Durchmesser [mm]	25,00
Gewicht [kg]	234,10
Bügelbewehrung	
Verlegeabstand [cm]	30,00
Anzahl [Stck.]	51,63
Durchmesser [mm]	10,00
Länge [cm]	118,00
Gewicht [kg]	37,60
Gesamtgewicht [kg]	271,70

Obergurt 11,51	
Länge [m]	11,44
Längsbewehrung	
Anzahl [Stck.]	4,00
Durchmesser [mm]	25,00
Gewicht [kg]	176,30
Bügelbewehrung	
Verlegeabstand [cm]	30,00
Anzahl [Stck.]	39,13
Durchmesser [mm]	10,00
Länge [cm]	116,00
Gewicht [kg]	28,00
Gesamtgewicht [kg]	204,30

Untergurt 11,51	
Länge [m]	11,44
Längsbewehrung	
Anzahl [Stck.]	4,00
Durchmesser [mm]	25,00
Gewicht [kg]	176,30
Bügelbewehrung	
Verlegeabstand [cm]	30,00
Anzahl [Stck.]	39,13
Durchmesser [mm]	10,00
Länge [cm]	118,00
Gewicht [kg]	28,50
Gesamtgewicht [kg]	204,80

Massenermittlung Bewehrung

Dichte [kg/cm³] 0,00785

Pfosten	
Länge [m]	3,05
Längsbewehrung	
Anzahl [Stck.]	4,00
Durchmesser [mm]	14,00
Gewicht [kg]	14,80
Bügelbewehrung	
Verlegeabstand [cm]	16,00
Anzahl [Stck.]	20,08
Durchmesser [mm]	8,00
Länge [cm]	71,20
Gewicht [kg]	5,60
Gesamtgewicht [kg]	20,40

Diagonale	
Länge [m]	4,61
Längsbewehrung	
Anzahl [Stck.]	4,00
Durchmesser [mm]	25,00
Gewicht [kg]	71,00
Bügelbewehrung	
Verlegeabstand [cm]	22,00
Anzahl [Stck.]	21,93
Durchmesser [mm]	8,00
Länge [cm]	68,00
Gewicht [kg]	5,90
Gesamtgewicht [kg]	76,90

Knotenelement nomal	
Bügel / Befestigung Zahnleiste	
Anzahl [Stck.]	2,00
Durchmesser [mm]	8,00
Länge [m]	0,43
Gewicht [kg]	0,30
Bügel / Schlaufe	
Anzahl [Stck.]	1,00
Durchmesser [mm]	14,00
Länge [m]	1,20
Gewicht [kg]	1,50
Bügel / Haken	
Anzahl [Stck.]	2,00
Durchmesser [mm]	14,00
Länge [m]	0,95
Gewicht [kg]	2,30
Gesamtgewicht [kg]	4,10

Knotenelement verkürzt	
Bügel / Befestigung Zahnleiste	
Anzahl [Stck.]	2,00
Durchmesser [mm]	8,00
Länge [m]	0,43
Gewicht [kg]	0,30
Bügel / Schlaufe	
Anzahl [Stck.]	1,00
Durchmesser [mm]	14,00
Länge [m]	0,85
Gewicht [kg]	1,00
Bügel / Haken	
Anzahl [Stck.]	2,00
Durchmesser [mm]	14,00
Länge [m]	0,75
Gewicht [kg]	1,80
Gesamtgewicht [kg]	3,10

Massenermittlung Betonage

Obergurt 15,26	
Länge [m]	15,26
h [cm]	31,00
b [cm]	35,00
Abrutto [cm ²]	1085,00
dHüll [mm]	0,00
Ahüll [cm ²]	0,00
Anetto [cm ²]	1085,00
Volumen netto [m ³]	1,66
Gewicht [t]	4,14

Untergurt 15,26	
Länge [m]	15,26
h [cm]	31,00
b [cm]	36,00
Abrutto [cm ²]	1116,00
dHüll [mm]	72,00
Ahüll [cm ²]	162,86
Anetto [cm ²]	953,14
Volumen netto [m ³]	1,45
Gewicht [t]	3,64

Obergurt 11,51	
Länge [m]	11,51
h [cm]	31,00
b [cm]	35,00
Abrutto [cm ²]	1085,00
dHüll [mm]	0,00
Ahüll [cm ²]	0,00
Anetto [cm ²]	1085,00
Volumen netto [m ³]	1,25
Gewicht [t]	3,12

Untergurt 11,51	
Länge [m]	11,51
h [cm]	31,00
b [cm]	36,00
Abrutto [cm ²]	1116,00
dHüll [mm]	72,00
Ahüll [cm ²]	162,86
Anetto [cm ²]	953,14
Volumen netto [m ³]	1,10
Gewicht [t]	2,74

Massenermittlung Betonage

Pfosten	
Länge [m]	3,12
h [cm]	22,00
b [cm]	22,00
Abrutto [cm ²]	484,00
dHüll [mm]	60,00
Ahüll [cm ²]	28,27
Anetto [cm ²]	455,73
Volumen netto [m ³]	0,14
Gewicht [t]	0,36

Diagonale	
Länge [m]	4,68
h [cm]	22,00
b [cm]	22,00
Abrutto [cm ²]	484,00
dHüll [mm]	30,00
Ahüll [cm ²]	7,07
Anetto [cm ²]	476,93
Volumen netto [m ³]	0,22
Gewicht [t]	0,56

Massenermittlung Betonage

Knotenelement normal			
Länge [m]		0,6277	
Teilflächen [cm ²]			Stärke [cm] Volumen [cm ³]
Fläche oben	321,07	30,00	9632,06
Dreiecke unten (beide)	338,01	30,00	10140,25
Rechteck unten	478,01	30,00	14340,30
Aussparung oben			
Dreiecke beide	110,25	-6,00	-661,50
Rechteck	218,09	-6,00	-1308,51
Hüllrohr Mitte			
	28,27	-13,00	-367,57
Hüllrohr Seite			
	7,07	-13,20	-93,31
		Vol., ges [cm ³]	31681,72
		Vol., ges [m ³]	0,03
		Gewicht [t]	0,08

Knotenelement verkürzt			
Länge [m]		0,44385	
Teilflächen [cm ²]			Stärke [cm] Volumen [cm ³]
Fläche oben	227,03	30,00	6810,88
Dreieck unten	169,00	30,00	5070,12
Rechteck unten	478,01	30,00	14340,30
Aussparung oben			
Dreieck	55,13	-6,00	-330,75
Rechteck	193,04	-6,00	-1158,26
Hüllrohr Mitte			
	28,27	-13,00	-367,57
Hüllrohr Seite			
	7,07	-13,20	-93,31
		Vol., ges [cm ³]	24271,42
		Vol., ges [m ³]	0,02
		Gewicht [t]	0,06

Zusammenstellung der Betonbauteile für einen Fachwerkträger

Bauteil	Netto Volumen	Betonfestigkeitsklasse	Anzahl für einen Fachwerkträger	Netto Volumen für einen Fachwerkträger
[-]	[m³]	[-]	[Stck.]	[m³]
Obergurt 15,26 m	1,66	C 100/115	1	1,66
Untergurt 15,26 m	1,45	C 100/115	1	1,45
Obergurt 11,51 m	1,25	C 100/115	4	5,00
Untergurt 11,51 m	1,10	C 100/115	4	4,39
Pfosten 3,12 m	0,14	C 100/115	21	2,99
Diagonale 4,675 m	0,22	C 100/115	16	3,57
Knotenelement normal	0,03	> C 150	22	0,70
Knotenelement verkürzt	0,02	> C 150	20	0,49
Gesamt			89	20,23

Zusammenstellung der Bewehrung und der Einbauteile für einen Fachwerkträger

Konstruktiv erforderlich

Bauteil	Bewehrung je Teil	Einbauteile				Zahnleiste verkürzt	Anzahl Teile für einen Fachwerkträger	Bewehrung für einen Fachwerkträger
		Hüllrohr D=72 [lfm]	Hüllrohr D=60 [lfm]	Hüllrohr D=30 [lfm]	Zahnleiste normal [Stck.]			
Obergurt 15,26 m	271,00	0,00	1,55	0	3	2	1	0,27
Untergurt 15,26 m	271,70	61,04	1,55	0	3	2	1	0,27
Obergurt 11,51 m	204,30	0,00	1,24	0	2	2	4	0,82
Untergurt 11,51 m	204,80	46,04	1,24	0	2	2	4	0,82
Pfosten 3,12 m	20,40	0,00	3,12	0	0	0	21	0,43
Diagonale 4,675 m	76,90	0,00	0	4,68	0	0	16	1,23
Knotenelement normal	4,10	0,00	0,13	0,11	1	0	22	0,09
Knotenelement verkürzt	3,10	0,00	0,13	0,11	0	1	20	0,06
Gesamt							89	3,99

Transporteinbauteile

Bauteil	Pfeifer Wellenanker kurz RD 24 [Stck.]	Pfeifer Wellenanker kurz RD 24 [Stck.]	Pfeifer Wellenanker kurz RD 24 [Stck.]	Pfeifer Hülse RD 12 [Stck.]	Anzahl für einen Fachwerkträger [Stck.]
Obergurt 15,26 m	2	0	0	0	2
Untergurt 15,26 m	0	2	0	0	2
Obergurt 11,51 m	0	0	2	0	8
Untergurt 11,51 m	0	0	2	0	8
Pfosten 3,12 m	0	0	0	2	42
Diagonale 4,675 m	0	0	0	2	32
Knotenelement normal	0	0	0	0	0
Knotenelement verkürzt	0	0	0	0	0
Gesamt	2	2	4	4	94

**Zusammenstellung des Transports für einen Fachwerkträger
In Einzelteilen:**

Bauteil	Länge [m]	Querschnitt [cm x cm]	Gewicht [t]	Anzahl [Stck.]	Gesamtgewicht [t]
Obergurt	15,26	35 x 31	4,139	1	4,139
Untergurt	15,26	36 x 31	3,636	1	3,636
Obergurt	11,51	35 x 31	3,122	4	12,488
Untergurt	11,51	36 x 31	2,743	4	10,971
Pfosten	3,12	22 x 22	0,356	21	7,470
Diagonale	4,68	22 x 22	0,557	16	8,920
Knotenelement	0,63	-	0,079	22	1,742
Knotenelement verkürzt	0,44	-	0,061	20	1,214
Gesamt	76,6	-	-	89	50,581

Transportbox für Knotenelemente (normal)	
Länge [m]	1,75
Breite [m]	1,5
Höhe (stapelbar) [m]	0,7
Kapazität [Stck.]	16
Gewicht (voll) [t]	1,522

Transportbox für Knotenelemente (verkürzt)	
Länge [m]	1,75
Breite [m]	1,5
Höhe (stapelbar) [m]	0,7
Kapazität [Stck.]	16
Gewicht (voll) [t]	1,226

Transportbox für Pfosten	
Länge [m]	3,5
Breite [m]	2,8
Höhe (stapelbar) [m]	0,9
Kapazität [Stck.]	21
Gewicht (voll) [t]	8,661

Transportbox für Diagonalen	
Länge [m]	5,05
Breite [m]	1,7
Höhe (stapelbar) [m]	0,55
Kapazität [Stck.]	8
Gewicht (voll) [t]	5,111

In Einzelteilen:

Transportteile für einen kompletten Fachwerkträger

Teil [-]	Gewicht [t]	Anzahl [Stck.]	Gesamtgewicht [t]
Obergurt 15,26 m	4,139	1	4,139
Untergurt 15,26 m	3,636	1	3,636
Obergurt 11,51 m	3,122	4	12,488
Untergurt 11,51 m	2,743	4	10,971
Transportbox Pfosten 21	8,661	1	8,661
Transportbox Diagonalen 8	5,111	2	10,222
Transportbox Knotenelemente normal 16	1,522	1	1,522
Transportbox Knotenelemente verkürzt 16	1,226	1	1,226
Transportbox Knotenelemente gemischt n6 v4	0,973	1	0,973
Gesamt			53,839

In Segmenten

Segment [-]	Höhe [m]	Länge [m]	Breite [m]	Gewicht [t]	Anzahl [Stck.]
Typ A	4,22	11,51	0,36	9,52	2
Typ B	4,22	15,26	0,36	12,50	1
Typ C	4,22	11,51	0,36	9,52	2

Anhang FB2: Kalkulation Herstellung

Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationsendsumme		Stundenverrechnungssatz: 30,00 €/Std										Angebot					
		Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze		je Einheit ohne Zuschläge			Menge x Einheit ohne Zuschläge			je Einheit mit Zuschlägen			Angebotpreis je Teilleistung €	Angebotpreis je Einheit (EP) €			
				Lohn Std.	SoKo €	Fremdl. €	Lohn Std.	SoKo €	Fremdl. €	Lohn €	SoKo €	Fremdl. €					
Pos.	Menge	Einheit															
1.0	1	Stck.	Obergurt 15,26 m herstellen. Länge = 15,26 m, rechteckiger Querschnitt 31 x 35 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2. Kalkulation siehe extra Formblatt													1.265,45	1.265,45
2.0	1	Stck.	Untergurt 15,26 m herstellen. Länge = 15,26 m, rechteckiger Querschnitt 31 x 36 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2. Kalkulation siehe extra Formblatt													1.494,89	1.494,89
3.0	4	Stck.	Obergurt 11,51 m herstellen. Länge = 11,51 m, rechteckiger Querschnitt 31 x 35 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2. Kalkulation siehe extra Formblatt													1.002,19	4.008,78
4.0	4	Stck.	Untergurt 11,51 m herstellen. Länge = 11,51 m, rechteckiger Querschnitt 31 x 36 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2. Kalkulation siehe extra Formblatt													1.177,46	4.709,85
5.0	21	Stck.	Pfosten 3,12 m herstellen. Länge = 3,12 m, rechteckiger Querschnitt 22 x 22 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2. Kalkulation siehe extra Formblatt													92,81	1.949,01
6.0	16	Stck.	Diagonale 4,675 m herstellen. Länge = 4,675 m, rechteckiger Querschnitt 22 x 22 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2. Kalkulation siehe extra Formblatt													164,58	2.633,31
7.0	22	Stck.	Knotenelement normal, Länge 63 cm herstellen. Geometrie siehe Plan Nr. 3. Kalkulation siehe extra Formblatt													134,69	2.963,14
8.0	20	Stck.	Knotenelement verkürzt, Länge 44 cm herstellen. Geometrie siehe Plan Nr. 3. Kalkulation siehe extra Formblatt													112,04	2.240,88
Gesamt																	21.265,32

Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationsendsumme																						
Pos.	Menge	Einheit	Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze	je Einheit ohne Zuschläge				Menge x Einheit ohne Zuschläge				Stundenverrechnungssatz: 30,00 €/Std				Angebotpreis je Einheit (EP) €	Angebotpreis je Teilleistung €					
				Lohn	SoKo	Fremdl.	€	Lohn	SoKo	Fremdl.	€	Lohn	SoKo	Fremdl.	€			Lohn	SoKo	Fremdl.	€	
1.0	1	Stek.	Obergurt 15,26 m herstellen. Länge = 15,26 m, rechteckiger Querschnitt 31 x 35 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2														1.265,45	1.265,45				
1.1	15,02	m ²	Stahlschalung für Obergurt Pos. 1.0 einschalen und ausschalen. Vor- und Nacharbeiten der Schalung z.B. einölen															3,62	54,39			
			Lohn: 0,1000																			
			Schalung Material: 70.000 €/(10 Teile/Schalung *250 Einsätze/Jahr*3 Jahre*15,02 m ²)				0,6214															
			Bewehrung für Obergurt Pos. 1.0 schneiden, biegen und verlegen. B500B Längsbewehrung D=25 mm, Bügel D=10 mm. Inklusive Kleinteile wie z.B. Draht																			
1.2	0,271	t	Lohn Schneiden und Biegen: 2,0000 Lohn Verlegen und Einbauen: 20,0000 Material B500B: 600,0000																1.260,00	341,46		
1.3	1,66	m ³	Betonieren Obergurt aus Pos. 1.0 Transportbeton C100/115 mit Kran und Kübel																	115,00	190,90	
			Lohn: 0,5000																			
			Material Beton C100/115: 100,0000																			
1.4	2	Stek.	Transportbauten Pfeiler Wellenanker kurz RD 24 inklusive Schrägzugbewehrung einbauen. Gewinde vor Beton schützen																		8,20	16,40
			Lohn: 0,1000																			
			Material Wellenanker kurz RD 24: 4,7000																			
			Material Schrägzugbewehrung: 0,5000																			
1.5	5	Stek.	Hüllrohr D=60 mm, l=0,31 m passgenau zuschneiden und senkrecht in Obergurt einbauen und gegen Betonandrängen schützen																			
			Lohn: 0,1000																			
			Material: 3,70 €/m *0,31 m																			
1.6	2	Stek.	Zahnleiste (vekturiert) einbauen inklusive Rückbewehrung																			
			Lohn: 0,1500																			
			Material: 80,0000																			
1.7	3	Stek.	Zahnleiste (normal) einbauen inklusive Rückbewehrung																			
			Lohn: 0,1500																			
			Material: 100,0000																			
1.8	4	Stek.	für Betonage und Lutzen nach Betonage schneiden																			
			Lohn: 1,0000																			
			Material: 9,7664																			

Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationsendsumme																
Pos.	Menge	Einheit	Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze	je Einheit ohne Zuschläge			Menge x Einheit ohne Zuschläge			Stundenverrechnungssatz: 30,00 € / Std			Angebot			
				Lohn Std.	SoKo €	Fremdl. €	Lohn Std.	SoKo €	Fremdl. €	Lohn €	SoKo €	Fremdl. €	Angebotspreis je Einheit (EP) €	Angebotspreis je Teilleistung €		
2.0	1	Stck.	Untergrut 15,26 m herstellen. Länge = 15,26 m, rechteckiger Querschnitt 31 x 36 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2													
2.1	15,18	m ²	Stahlschabung für Untergrut Pos. 1.0 einschalen und ausschalen. Inklusive Vor- und Nachberichten der Schalung z.B. einölen Lohn: Schabung Material: 70.000 €/(10 Teile Schalung *250 Einätze/Jahr*3 Jahre*15,18 m ²)	0,1000	0,6148		1,52	9,33		3,00				3,61	54,87	
2.2	0,2717	t	Bewehrung für Untergrut Pos. 1.0 schneiden, biegen und verlegen. B500B Längsbewehrung D=25 mm, Bügel D=10 mm. Inklusive Kleinteile wie z.B. Draht Lohn Schneiden und Biegen: Lohn Verlegen und Einbauen: Material B500B:	2,0000 20,0000			0,54 5,43			60,00 600,00					1,260,00	342,34
2.3	1,45	m ³	Betonieren Untergrut aus Pos. 1.0 Transportbeton C100/115 mit Kraus und Kiesel Lohn: Material Beton C100/115:	0,5000	100,0000		0,73	145,00		15,00					115,00	166,75
2.4	2	Stck.	Transporteinbauteil Pfeiler Wellenanker kurz RD 20 inklusive Schrägverbewehrung einbauen. Gewinde vor Beton schützen Lohn: Material Wellenanker kurz RD 20: Material Schrägverbewehrung:	0,1000	3,8500 0,5000		0,20	7,70 1,00		3,00					7,35	14,70
2.5	5	Stck.	Hüllrohr D=60 mm, l=0,31 m passgenau zuschneiden und senkrecht in Untergrut einbauen und gegen Betoneindringen schützen Lohn: Material: 3,70 € m*0,31 m	0,1000	1,1470		0,50	5,74		3,00					4,15	20,74
2.6	2	Stck.	Zahnleiste (verkürzt) einbauen inklusive Rückbewehrung	0,1500	80,0000		0,30	160,00		4,50					84,50	169,00
2.7	3	Stck.	Zahnleiste (normal) einbauen inklusive Rückbewehrung	0,1500	100,0000		0,40	300,00		4,50					104,50	313,50
2.8	4	St	Hüllrohr D=72 mm, l=15,26 m passgenau zuschneiden und waagrecht in Untergrut einbauen und gegen Betoneindringen schützen Lohn: Material: 4,80 € m*15,26 m	1,0000	73,2480		4,00	292,99		30,00					103,25	412,99

Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationsendsumme																					
Pos.	Menge	Einheit	Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze	je Einheit ohne Zuschläge				Menge x Einheit ohne Zuschläge				Stundenverrechnungssatz: 30,00 €/Std			Angebot						
				Lohn	SoKo	Fremdl.	€	Lohn	SoKo	Fremdl.	€	Lohn	SoKo	Fremdl.		€	je Einheit mit Zuschlägen	Angebotpreis je Einheit (EP)	Angebotpreis je Teilleistung		
3.0	1	Stk.	Obergurt 11,51 m herstellen, Länge = 11,51 m, rechteckiger Querschnitt 31 x 35 cm, Geometrie siehe Plan Nr. 2														1.002,19	1.002,19			
3.1	11,38	m²	Stahlblech für Obergurt Pos. 1.0 einschalen und ausschalen, Vor- und Nacharbeiten der Schalung z.B. einölen																3,82	43,47	
			Lohn: 0,1000																		
			Schalung Material: 70.000 €/(10 Teile/Schalung *250 Einsätze/Jahr*3 Jahre*11,38 m²)																		
			Bewehrung für Obergurt Pos. 1.0 schneiden, biegen und verlegen, B500B Längsbewehrung D=25 mm, Bügel D= 10 mm. Inklusive Kleinteile wie z.B. Draht																		
			Lohn Schneiden und Biegen: 2,0000																		
			Lohn Verlegen und Einbauen: 20,0000																		
			Material B500B: 600,0000																		
3.2	0,2043	t	Betonieren Obergurt aus Pos. 1.0 Transportbeton C100/115 mit Kran und Kibbel																		
			Lohn: 0,5000																		
			Material Beton C100/115: 100,0000																		
3.3	1,25	m³	Transporteinbaul Plaster Wellenanker kurz RD 18 inklusive Schrägzugbewehrung einbauen.																		
			Lohn: 0,1000																		
			Material Wellenanker kurz RD 18: 3,2500																		
			Material Schrägzugbewehrung: 0,5000																		
3.4	2	Stk.	Hüllrohr D= 60 mm, l= 0,31 m passgenau zuschneiden und senkrecht in Obergurt einbauen und gegen Betondeckungen schützen																		
			Lohn: 0,1000																		
			Material: 3,70 €/m*0,31 m																		
3.5	4	Stk.	Zahnleiste (vertikal) einbauen inklusive Rückbewehrung																		
			Lohn: 0,1500																		
			Material: 80,0000																		
3.6	2	Stk.	Zahnleiste (normal) einbauen inklusive Rückbewehrung																		
			Lohn: 0,1500																		
			Material: 100,0000																		
3.7	2	Stk.	für Betonage und Litzen nach Betonage schneiden																		
			Lohn: 1,0000																		
			Material: 7,3664																		
3.8	4	Stk.																			
			Lohn: 30,00																		
			Material: 7,37																		

Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationsendsumme														
Pos.	Menge	Einheit	Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze	je Einheit ohne Zuschläge			Menge x Einheit ohne Zuschläge			Stundenverrechnungssatz: 30,00 €/Std			Angebot	
				Lohn	SoKo	Fremdl.	Lohn	SoKo	Fremdl.	Lohn	SoKo	Fremdl.		Angebotspreis je Teilleistung
				€	€	€	€	€	€	€	€	€	€	
4.0	1:Stck		Untergurt 11,51 m berrstallen, Länge = 11,51 m, rechteckiger Querschnitt 31 x 36 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2										1.177,46	1.177,46
4.1	11,5:mq		Stahlchahung für Untergurt Pos. 1.0 einschalen und ausschalen. Inklusiv Vor- und Nachbereiten der Schabung z.B. einölen										3,81	43,83
			Lohn:	0,1000			1,15		3,00					
			Schabung Material: 70.000 €/10 Teile/Schabung *2,50 Einsätze/Jahr*3 Jahre*11,50 mq		0,8116			9,33		0,81				
4.2	0,2046:t		Bewehrung für Untergurt Pos. 1.0 schneiden, biegen und verlegen. B500B Längsbewehrung D=25 mm, Bügel D=10 mm. Inklusiv Kleinenteile wie z.B. Draht											258,05
			Lohn Schneiden und Biegen:	2,0000			0,41		60,00					
			Lohn Verlegen und Einbauen:	20,0000			4,10		600,00					
			Material B500B:		600,0000			122,88		600,00				
4.3	1,1:mq		Betonieren Untergurt aus Pos. 1.0 Transportbeton C100/115 mit Kran und Kübel											115,00
			Lohn:	0,5000			0,55		15,00					
			Material Beton C100/115:		100,0000			110,00		100,00				
4.4	2:Stck		Transportbauteil Pfeifer Wellenanker kurz RD 18 inklusive Schrägverbewehrung einbauen. Gewinde vor Beton schützen											6,75
			Lohn:	0,1000			0,20		3,00					
			Material Wellenanker kurz RD 18:		3,2500			6,50		3,25				
			Material Schrägverbewehrung:		0,5000			1,00		0,50				
4.5	4:Stck		Hüllrohr D=60 mm, l=0,31 m passgenau zuschneiden und senkrecht in Untergurt einbauen und gegen Betoneindrungen schützen											16,59
			Lohn:	0,1000			0,40		3,00					
			Material: 3,70 €/mq*0,31 m		1,1470			4,59		1,15				
4.6	2:Stck		Zahnleiste (verfürt) einbauen inklusive Rückbewehrung											84,50
			Lohn:	0,1500			0,30		4,50					
			Material:		80,0000			160,00		80,00				
4.7	2:Stck		Zahnleiste (normal) einbauen inklusive Rückbewehrung											209,00
			Lohn:	0,1500			0,30		4,50					
			Material:		100,0000			200,00		100,00				
4.8	4:St		Hüllrohr D=72 mm, l=11,51 m passgenau zuschneiden und waagrecht in Untergurt einbauen und gegen Betoneindrungen schützen											340,99
			Lohn:	1,0000			4,00		30,00					
			Material: 4,80 €/mq*11,51 m		55,2480			220,99		55,25				

Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationsendsumme		je Einheit ohne Zuschläge				Menge x Einheit ohne Zuschläge				Stundenverrechnungssatz: 30,00 €/Std				Angebot	
		Lohn Std. €	SoKo €	Fremdl. €	Lohn Std.	Lohn Std.	SoKo €	Fremdl. €	Lohn €	SoKo €	Fremdl. €	Lohn €	SoKo €	Fremdl. €	Angebotspreis je Einheit (EP) €
Pos.	Menge Einheit	Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze													
5.0	1 Stck.	Pfosten 3,12 m herstellen. Länge = 3,12 m, rechteckiger Querschnitt 22 x 22 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2													
5.1	2,16 m²	Stahlschalung für Pfosten Pos. 5.0 aus einschalen und ausschalen. Inklusive Vor- und Nacharbeiten der Schalung z.B. einölen													
		Lohn: 0,1000				1,0288				3,00				92,81	
		Schalung Material: 70.000 €/(42 Teile/Schalung *250 Einsätze/Jahr*3 Jahre*2,16 m²)								2,22					
		Bewehrung für Pfosten Pos. 5.0 schneiden, biegen und verlegen. B500B Längsbewehrung D=14 mm, Bügel D= 8 mm. Inklusive Kleinteile wie z.B. Draht													
5.2	0,0204 t	Lohn Schneiden und Biegen: 2,0000								0,04					
		Lohn Verlegen und Einbauen: 20,0000				600,0000				600,00				1.260,00	
		Material B500B: 600,0000								12,24				600,00	
5.3	0,14 m³	Betonieren Pfosten aus Pos. 5.0 Transportbeton C100/115 mit Kran und Kibel												115,00	
		Lohn: 0,5000				100,0000				15,00					
		Material Beton C100/115: 100,0000								14,00				100,00	
5.4	2 Stck.	Transportebauteil Pfosten Hülse RD 12 inklusive Schrägzug- und Rückbewehrung einbauen. Gewinde vor Beton schützen												10,88	
		Lohn: 0,1000				1,4400				6,00					
		Material Hülse RD 12: 1,4400				1,0000				2,88				2,88	
		Material Schrägzug- und Rückbewehrung: 1,0000								2,00				2,00	
5.5	1 Stck.	Hüllrohr D= 60 mm, l= 3,12 m passgenau zuschneiden und mittig in Pfosten einbauen und gegen Betoneindrungen schützen												20,54	
		Lohn: 0,3000				11,5440				9,00					
		Material: 2,00 €/m *3,12 m								11,54				11,54	

Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationsendsumme																	
Pos.	Menge	Einheit	Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze	je Einheit ohne Zuschläge			Menge x Einheit ohne Zuschläge			Stundenverrechnungssatz: 30,00 €/Std			Angebot				
				Lohn Std.	SoKo €	Fremdfl. €	Lohn Std.	SoKo €	Fremdfl. €	Lohn €	SoKo €	Fremdfl. €	Angebotspreis je Einheit (EP) €	Angebotspreis je Teilleistung €			
6.0	1	Stck.	Diagonale 4,675 m herstellen. Länge = 4,675 m, rechteckiger Querschnitt 22 x 22 cm. Geometrie siehe Plan Nr. 2														
6.1	3,18	m²	Stahlschahung für Diagonale Pos. 6.0 einschalen und ausschalen. Inklusiv Vor- und Nachbereiten der Schahung z.B. einölen	0,1000			0,32					3,00			164,58	164,58	
6.2	0,0769	t	Lohn: Schahung Material: 70.000 €/(32 Teile/Schahung *250 Einsätze/Jahr*3 Jahre*3,18 m²)	2,0000	0,9172		0,15	2,92				60,00				1.260,00	
			Lohn Schneiden und Biegen: Lohn Verlegen und Einbauen: Material B500B:	20,0000			1,54	46,14				600,00					
6.3	0,22	m³	Bewehrung für Diagonale Pos. 6.0 schneiden, biegen und verlegen. B500B Längsbewehrung D= 25 mm, Bügel D= 8 mm. Inklusiv Kleinerteile wie z.B. Draht														
			Betonieren Diagonale aus Pos. 6.0 Transportbeton C100/115 mit Kran und Kübel														
			Lohn: Material Beton C100/115:	0,5000			0,11	22,00				15,00				115,00	25,30
6.4	2	Stck.	Transportebauteil Pfeiler Hülse RD 12 inklusive Schrägzug- und Rückbewehrung einbauen. Gewinde vor Beton schützen														
			Lohn: Material Hülse RD 12: Material Schrägzug- und Rückbewehrung:	0,1000			0,20	2,88				3,00					
			Hüllrohr D= 30 mm, l= 4,675 m passgenau zuschneiden und mittig in Diagonale einbauen und gegen Betoneindrungen schützen														
6.5	1	Stck.	Lohn: Material: 2.00 €/m*4,675 m	0,3000	10,0513		0,30	10,05				9,00				19,05	19,05

Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationsendsumme																		
Pos.	Menge	Einheit	Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze	je Einheit ohne Zuschläge				Menge x Einheit ohne Zuschläge				Stundenverrechnungssatz: 30,00 €/Std				Angebot		
				Lohn	SoKo	Fremdl.	€	Lohn	SoKo	Fremdl.	€	Lohn	SoKo	Fremdl.	€	Angebotspreis je Einheit (EP) €	Angebotspreis je Teilleistung €	
7.0	1	Stck.	Knotenelement normal, Länge 63 cm herstellen. Geometrie siehe Plan Nr. 3													134,69	134,69	
7.1	1	Stck.	Stahlschalung für Knotenelement Pos. 7.0 einschalen und ausschalen. Inklusive Vor- und Nachbereiten der Schalung z.B. einölen. Lohn: Schalung Material: 35.000 €/(40 Teile/Schalung *275 Einsätze/Jahr*3 Jahre)	0,2000				0,20				6,00					7,06	7,06
7.2	1	Stck.	Bewehrung für Knotenelement Pos. 7.0 schneiden, biegen und verlegen. B500B. Inklusive Kleinteile wie z.B. Draht. Lohn: Material B500B: 600 €/(0,0041 t	0,2500	2,4600			0,25	2,46			7,50	2,46				9,96	9,96
7.3	0,03	m³	Transportbeton UHPC > C150 mit Kran und Kibel. Lohn: Material Beton C100/115:	0,5000	200,0000			0,02	6,00			15,00	200,00				215,00	6,45
7.4	1	Stck.	Hüllrohr D= 50 mm, l= 0,11 m passgenau zuschneiden und passgenau in Knotenelement einbauen und gegen Betoneindringen schützen. Lohn: Material: 2,00 €/m*0,11 m	0,1000	0,2365			0,10	0,24			3,00	0,24				3,24	3,24
7.5	1	Stck.	Hüllrohr D= 60 mm, l= 0,13 m passgenau zuschneiden und passgenau in Knotenelement einbauen und gegen Betoneindringen schützen. Lohn: Material: 2,00 €/m*0,13 m	0,1000	0,4810			0,10	0,48			3,00	0,48				3,48	3,48
7.6	1	Stck.	Zahnleiste (normal) einbauen inklusive Rückbewehrung. Lohn: Material:	0,1500	100,0000			0,15	100,00			4,50	100,00				104,50	104,50

Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationsendsumme																	
Pos.	Menge	Einheit	Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze				je Einheit ohne Zuschläge				Stundenverrechnungssatz: 30,00 €/Std				Angebot		
			Lohn Std.	SoKo €	Fremdl. €		Lohn Std.	SoKo €	Fremdl. €		Lohn €	SoKo €	Fremdl. €	je Einheit mit Zuschlägen	Angebotspreis je Einheit (EP) €	Angebotspreis je Teilleistung €	
8.0	1	Stck.													112,04	112,04	
			Knotenelement verkürzt, Länge 44 cm, Herstellen. Geometrie siehe Plan Nr. 3														
8.1	1	Stck.													7,17	7,17	
			Stahlschalung für Knotenelement Pos. 8.0 Einschalen und Ausschalen. Inklusive Vor- und Nachbereiten der Schalung z.B. einölen														
				0,2000											6,00		
							1,1667								1,17		
8.2	1	Stck.													9,36	9,36	
			Bewehrung für Knotenelement Pos. 8.0 schneiden, biegen und verlegen. B500B. Inklusive Kleinteile wie z.B. Draht														
				0,2500											7,50		
							1,8600								1,86		
8.3	0,02	m³													215,00	4,30	
			Transportbeton UHPC > C150 mit Kraam und Kibel														
				0,5000											15,00		
							200,0000								200,00		
8.4	1	Stck.													3,24	3,24	
			Hüllrohr D= 30 mm, l= 0,11 m passgenau zuschneiden und passgenau in Knotenelement einbauen und gegen Betoneindringen schützen														
				0,1000											3,00		
							0,2365								0,24		
8.5	1	Stck.													3,48	3,48	
			Hüllrohr D= 60 mm, l= 0,15 m passgenau zuschneiden und passgenau in Knotenelement einbauen und gegen Betoneindringen schützen														
				0,1000											3,00		
							0,4810								0,48		
8.6	1	Stck.													84,50	84,50	
			Zahnleiste (verkürzt) einbauen inklusive Rückbewehrung														
				0,1500											4,50		
							80,0000								80,00		

Anhang FB3: Zusammenstellung Kalkulationsgrundlagen zur Herstellung

Stahlschalung			
Lohn	0,1	Std/m ²	Erfahrungswert für Stahlschalungen in Fertigteilwerken [Keßler, 2016]
Knotenelemente	0,2	Std/Stck.	Erfahrungswerte: 8 Stunden für eine komplette Stahlschalung, Kapazität 40 Teile [Keßler, 2016]
Material Obergurt	70000	€	70.000 € für Stahlschalung [Schultheiß et al., 2016], Kapazität für 10 Teile, 500 Binder pro Jahr -> 250 Einsätze/Jahr, Schalung hält 3 Jahre
Material Untergurt	70000	€	70.000 € für Stahlschalung [Schultheiß et al., 2016], Kapazität für 10 Teile, 500 Binder pro Jahr -> 250 Einsätze/Jahr, Schalung hält 3 Jahre
Material Pfosten	70000	€	70.000 € für Stahlschalung [Schultheiß et al., 2016], Kapazität für 42 Teile, 500 Binder pro Jahr -> 250 Einsätze/Jahr, Schalung hält 3 Jahre
Material Diagonale	70000	€	70.000 € für Stahlschalung [Schultheiß et al., 2016], Kapazität für 32 Teile, 500 Binder pro Jahr -> 250 Einsätze/Jahr, Schalung hält 3 Jahre
Material Knoten normal	35000	€	35.000 € für Stahlschalung [Schultheiß et al., 2016], Kapazität für 40 Teile, 500 Binder pro Jahr -> 275 Einsätze/Jahr, Schalung hält 3 Jahre
Material Knoten verkürzt	35000	€	35.000 € für Stahlschalung [Schultheiß et al., 2016], Kapazität für 40 Teile, 500 Binder pro Jahr -> 250 Einsätze/Jahr, Schalung hält 3 Jahre
Bewehrung			
Lohn Schneiden und Biegen	2	Std/t	5,5 h/t (-> nach Interpolation der Werte von Plümecke [2008] S. 343), in Fertigteilwerk jedoch automatisierte Maschinen und immer wieder die gleichen Formen -> 2,0 [Keßler, 2016]
Lohn Verlegen und Einbauen	20	Std/t	20 h/t (-> nach Interpolation der Werte von Plümecke [2008] S. 345)
Lohn Knotenelemente	0,25	Std/Stck.	Erfahrungswert [Keßler, 2016]
Material	600	€/t	600 €/t [Kaiser Bauservice Gbr., 2016]
Beton			
Lohn	0,5	Std/m ³	0,64 Std/m ³ -> Plümecke [2008] S. 310. Bessere Bedingungen in Fertigteilwerk -> 0,5
Material C100/115	100	€/m ³	100 €/m ³ [Schultheiß et al., 2016] S. 21
Material >C150	200	€/m ³	Schätzung von Vorderwülbecke

Einbauteile			
Pfeifer Transporteinbauteile			
Lohn Einbau	0,1	Std/Stck.	Schätzung von Vorderwülbecke anhand <i>Plümecke [2008] S. 342</i> Ankerschienen auf Schalungsfläche befestigen 0,08 Std/m
Material			
Welle kurz RD24	4,7	€/Stck.	Pfeifer Preisliste 03/2016 S.6 [<i>PFEIFER Seil- und Hebetechnik GmbH, 2016</i>]
Schrägzugb.	0,5	€/Stck.	Pauschale Annahme von Vorderwülbecke
Welle kurz RD20	3,85	€/Stck.	Pfeifer Preisliste 03/2016 S.6 [<i>PFEIFER Seil- und Hebetechnik GmbH, 2016</i>]
Schrägzugb.	0,5	€/Stck.	Pauschale Annahme von Vorderwülbecke
Welle kurz RD18	3,25	€/Stck.	Pfeifer Preisliste 03/2016 S.6 [<i>PFEIFER Seil- und Hebetechnik GmbH, 2016</i>]
Schrägzugb.	0,5	€/Stck.	Pauschale Annahme von Vorderwülbecke
Hülse RD12	1,44	€/Stck.	Pfeifer Preisliste 03/2016 S.6 [<i>PFEIFER Seil- und Hebetechnik GmbH, 2016</i>]
Schrägzugb. und Rückhängeb.	1	€/Stck.	Pauschale Annahme von Vorderwülbecke
Hüllrohre			
Lohn Zuschneiden und Einbau senkrecht in Ober-/Untergurt D=60mm, l= 0,31 m	0,1	Std/Stck.	Schätzung/Erfahrungswert von Vorderwülbecke
Lohn Zuschneiden und Einbau waagrecht in Untergurt D=72 mm, l= 15,26 m	1	Std/Stck.	Schätzung/Erfahrungswert von Vorderwülbecke
Lohn Zuschneiden und Einbau waagrecht in Untergurt D=72 mm, l= 11,51 m	0,9	Std/Stck.	Schätzung/Erfahrungswert von Vorderwülbecke
Lohn Zuschneiden und Einbau waagrecht in Pfosten D=60 mm, l= 3,12 m	0,3	Std/Stck.	Schätzung/Erfahrungswert von Vorderwülbecke
Lohn Zuschneiden und Einbau waagrecht in Diagonale D=60 mm, l= 4,675 m	0,3	Std/Stck.	Schätzung/Erfahrungswert von Vorderwülbecke
Lohn Zuschneiden und Einbau in Knotenelemente D=60 mm und 30 mm, l= 0,13 m und 0,11	0,1	Std/Stck.	Schätzung/Erfahrungswert von Vorderwülbecke

Material			
72 mm Hüllrohr für SUSPA Monolitzenbündel DSI	4,8 €/m		telefonische Anfrage: 4,8 €/m, Lieferlänge: 5m. Ca. 10 % Nachlass für benötigte Mengen, jedoch ca. 10 % Zuschlag für Verschnitt [Froschmeier GmbH & Co. KG., 2016]
60 mm Hüllrohr für DYWIDAG 40WR Spannstab	3,7 €/m		telefonische Anfrage: 3,7 €/m, Lieferlänge: 5m. Ca. 10 % Nachlass für benötigte Mengen, jedoch ca. 10 % Zuschlag für Verschnitt [Froschmeier GmbH & Co. KG., 2016]
30 mm Hüllrohr für 18 WR Spannstab	2,15 €/m		telefonische Anfrage: 2,15 €/m, Lieferlänge: 5m. Ca. 10 % Nachlass für benötigte Mengen, jedoch ca. 10 % Zuschlag für Verschnitt [Froschmeier GmbH & Co. KG., 2016]
<u>Zahnleisten</u>			
Lohn Einbau mit Rückbewehrung	0,15 Std/Stck.		Schätzung von Vorderwülbecke anhand Plümecke [2008] S. 342 Ankerschienen auf Schalungsfläche befestigen 0,08 Std/m
Material Zahnleiste lang	100 €/Stck.		Schätzung von Vorderwülbecke, anhand von angefragten Kosten von J. Schmidt bei PFEIFER Seil- und Hebetchnik GmbH
Material Zahnleiste kurz	80 €/Stck.		Schätzung von Vorderwülbecke, anhand von angefragten Kosten von J. Schmidt bei PFEIFER Seil- und Hebetchnik GmbH
<u>Spannstahl</u>			
0,5'' Litze			
Lohn Spannen l=15,26 m und 11,51m	1 Std/Stck.		Schätzung von Vorderwülbecke; 500 €/t [Dressel, 2016] -> 22 €/Stck.
Material	0,64 €/m		Eingeholter Preis [Gebr. Lotter KG - Kummetat Stahl, 2016] : 800€/t, der Meter wiegt ca. 0,726 kg -> 0,58€/m + 10 % Verschnitt und Überlänge = 0,64 €/m
<u>SUSPA Monolitze</u>			
Lohn Spannen	1 Std/Stck.		Schätzung von Vorderwülbecke
Material l= 61,3 m inkl. Spann- und Festanker	950 €/Stck.		Eingeholter Preis [DYWIDAG-Systems International, 2016]
<u>Gewindestab 40 WR, l= 4,22 m</u>			
Lohn Spannen	0,5 h/Stck.		Schätzung von Vorderwülbecke
Material	340 €/Stck.		Eingeholter Preis [DYWIDAG-Systems International, 2016]
<u>Gewindestab 18 WR</u>			
Lohn Spannen	0,5 Std/Stck.		Schätzung von Vorderwülbecke
Material	200 €/Stck.		Eingeholter Preis [DYWIDAG-Systems International, 2016]

Anhang FB4: Kalkulation Montage

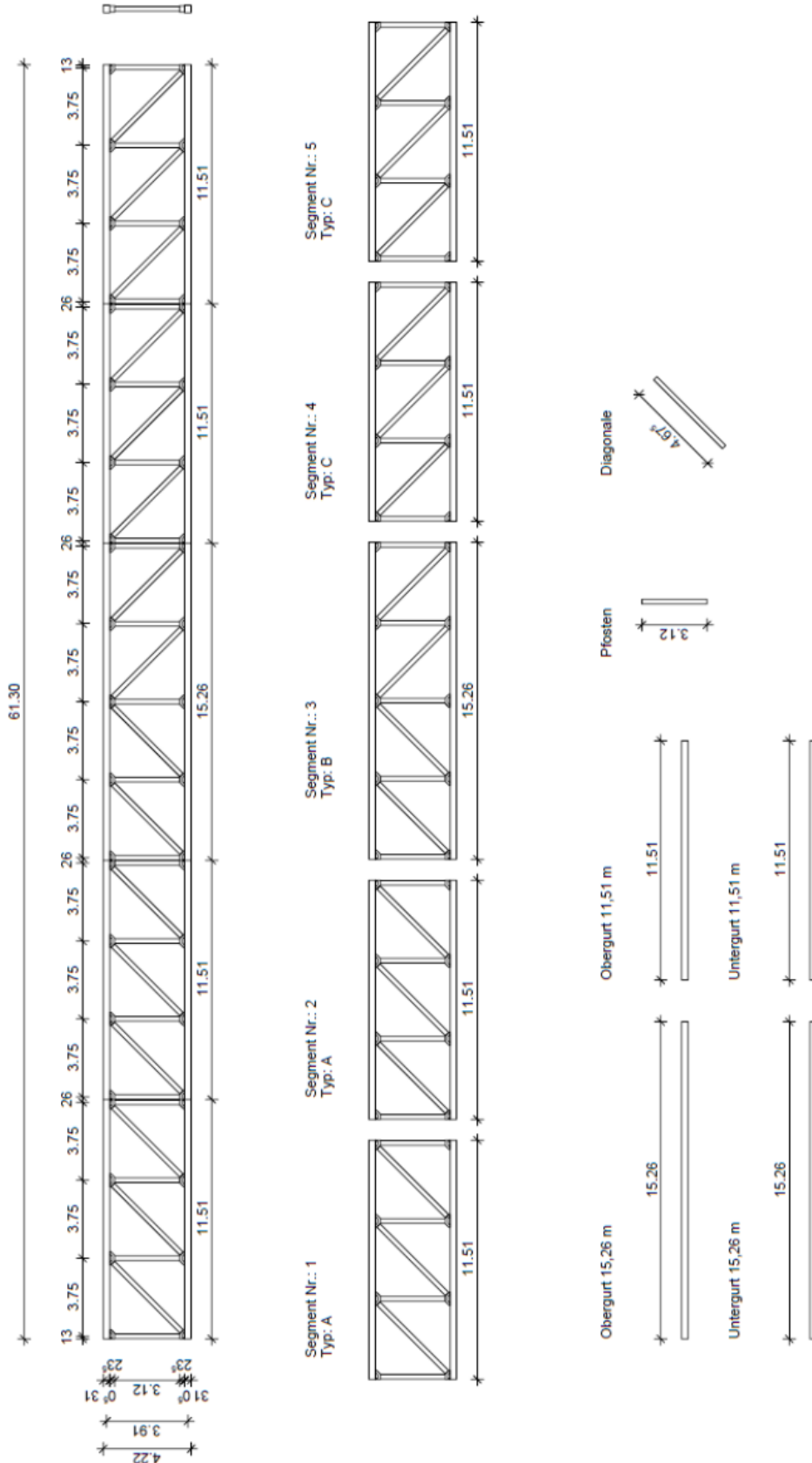
Entwicklung des Angebotspreises über die Kalkulationssumme														
Pos.	Menge	Einheit	Kurzbeschreibung der Teilleistungen und Kalkulationsansätze	je Einheit ohne Zuschläge			Menge x Einheit ohne Zuschläge			je Einheit mit Zuschlägen			Angebot	
				Lohn Std.	SoKo €	Fremdl. €	Lohn Std.	SoKo €	Fremdl. €	Lohn €	SoKo €	Fremdl. €		Angebotpreis je Einheit (EP) €
Stundenverrechnungssatz: 30,00 €/Std														
1.0	47	Stck.	Fachwerkträger Einzelteil (außer Knotenelemente) auf Montagefläche ausrichten und montieren Lohn: 3 Mann * 0,5 Std/Mann Teleskopler 0,5 Std * 109 €/10 Std.	1,5000		5,45	70,50		45,00				50,45	2.371,15
2.0	42	Stck.	Knotenelemente auf Montagefläche ausrichten und montieren Lohn: 3 Mann * 0,25 Std/Mann	0,7500			31,50		22,50				22,50	945,00
3.0	21	Stck.	Vorspannen eines Pfostens Lohn: 2 Mann * 0,25 Std/Mann Material:	0,5000		340,00	10,50		15,00		7.140,00		355,00	7.455,00
4.0	4	Stck.	Vorspannen einer Diagonale Lohn: 2 Mann * 0,25 Std/Mann Material:	0,5000		200,00	2,00		15,00		800,00		215,00	860,00
5.0	12	Stck.	Verbunden von Diagonale und Knotenelementen Lohn: 2 Mann * 0,25 Std/Mann Material:	0,5000		40,00	6,00		15,00		480,00		55,00	660,00
6.0	4	Stck.	Einbauen und vorspannen der SUSPA Monolitzen in die Hüllrohre im Untergurt. L= 61,3 m Lohn: 2 Mann * 0,5 Std/Mann Material:	1,0000		950,00	4,00		30,00		3.800,00		980,00	3.920,00
7.0	1	Stck.	Einbau des liegenden Fachwerkträgers in die Endposition im Gabelager in 15m Höhe Autokräne 2 Stck inkl. An-/Abfahrt und Kranführer * 0,5 Tage Hubsteiger 2 Stck. * 0,5 Tage Lohn: 3 Mann * 5 Std	15,0000			15,00		450,00				4.309,00	4.309,00
Gesamt														20.520,15

Anhang FB5: Zusammenstellung Kalkulationsgrundlagen zur Montage

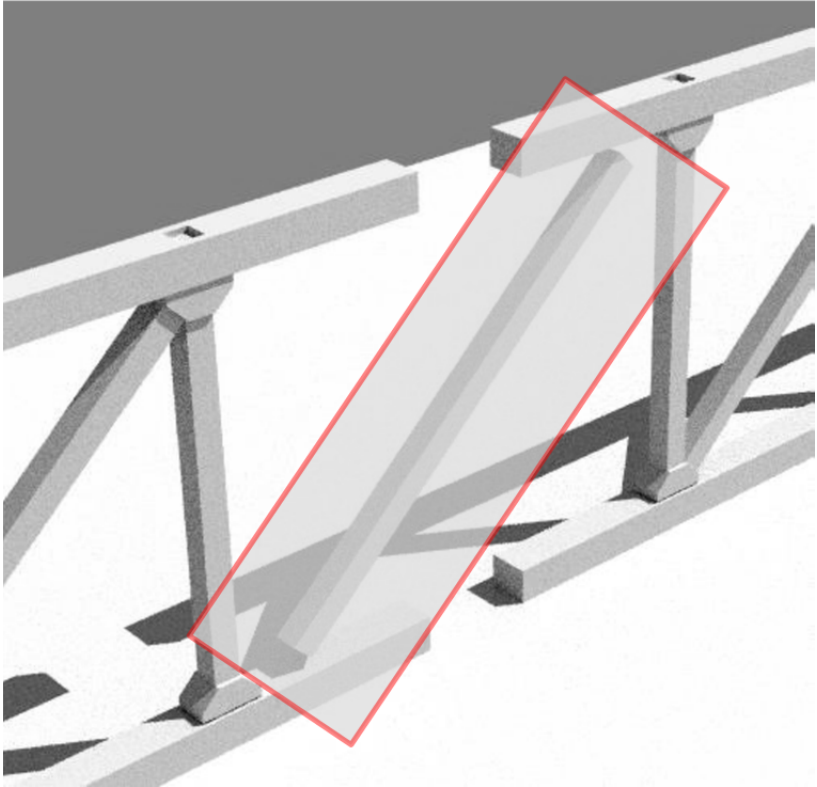
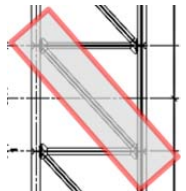
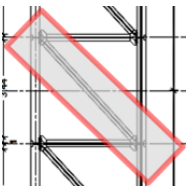
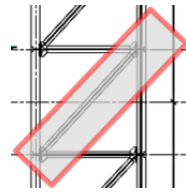
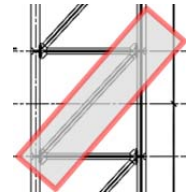
Teleskoparbeitsbühne T200 DA-L	109 €/Tag	tel. Anfrage [Wagert, 2016]
An- und Abtransport Teleskoparbeitsbühne T200 DA-L	160 €	tel. Anfrage [Wagert, 2016]
200 t Autokran inkl. An- /Abfahrt und Kranführer	3750 €/Tag	Angebot Fa. Grimm [Steckmann, 2016]
Teleskoplader	150 €/Tag	tel. Anfrage [Wagert, 2016]
An- und Abtransport Teleskoplader	160 €	tel. Anfrage [Wagert, 2016]
Ausrichten auf Montagefläche Einzelteile	0,5 Std/Teil/Mann	Montagetrupp besteht aus 3 Mann und einem Teleskoplader [Schultheiß et al., 2016]
Ausrichten auf Montagefläche Knotenelemente	0,25 Std/Teil/Mann	Montagetrupp besteht aus 3 Mann und einem Teleskoplader. Schätzung von Vorderwülbecke nach Schultheiß et al., [2016]
Spannstahl		
Material		
Gewindespannstab 18 WR; l= 4,675	200 €/Stck.	Eingeholter Preis [DYWIDAG-Systems International, 2016]
Gewindespannstab 40 WR; l= 4,22	340 €/Stck.	Eingeholter Preis [DYWIDAG-Systems International, 2016]
SUSPA Monolitze; l=61,3 m	950 €/Stck.	Eingeholter Preis [DYWIDAG-Systems International, 2016]
Lohn		
Gewindestab	0,5 Std/Stck.	Schätzung Vorderwülbecke
Monolitze	0,5 Std/Stck./Mann	Schätzung Vorderwülbecke
Verbinden von Diagonale und Knotenelementen	0,5 Std/Stck.	Schätzung Vorderwülbecke
Einbau in Endposition		
Halber Tag mit einem Montagetrupp bestehend aus 2 x Autokran, 2 x Hubsteiger, 3 Mann		

Anhang FC: Zeichnungen zum Fachwerkträger

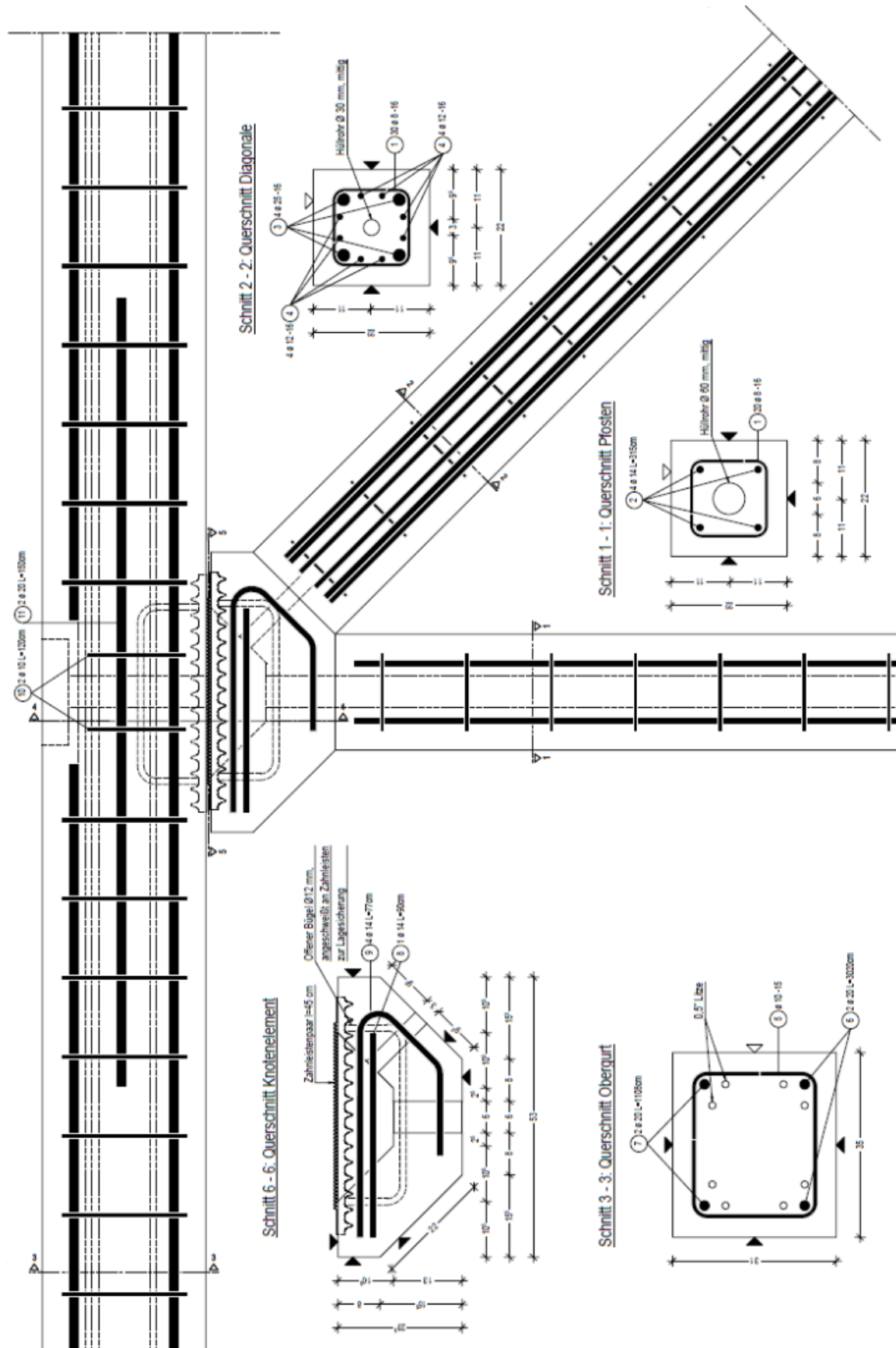
Anhang FC1: Gesamtträger Segmentverbindung „Doppelpfosten“



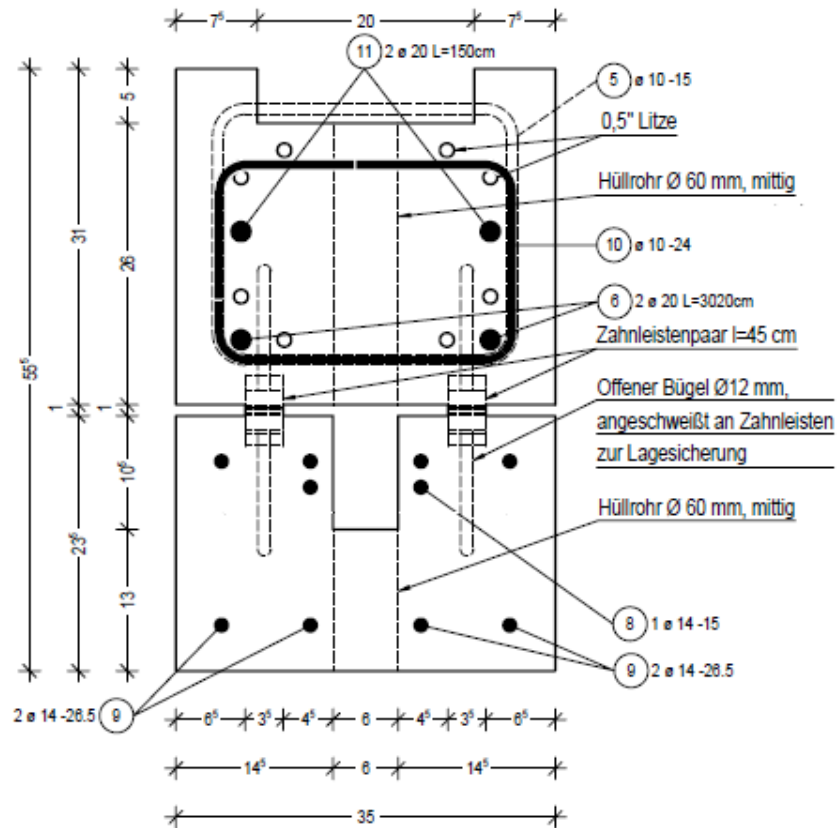
Anhang FC2: Gesamtträger Segmentverbindung „Diagonale“



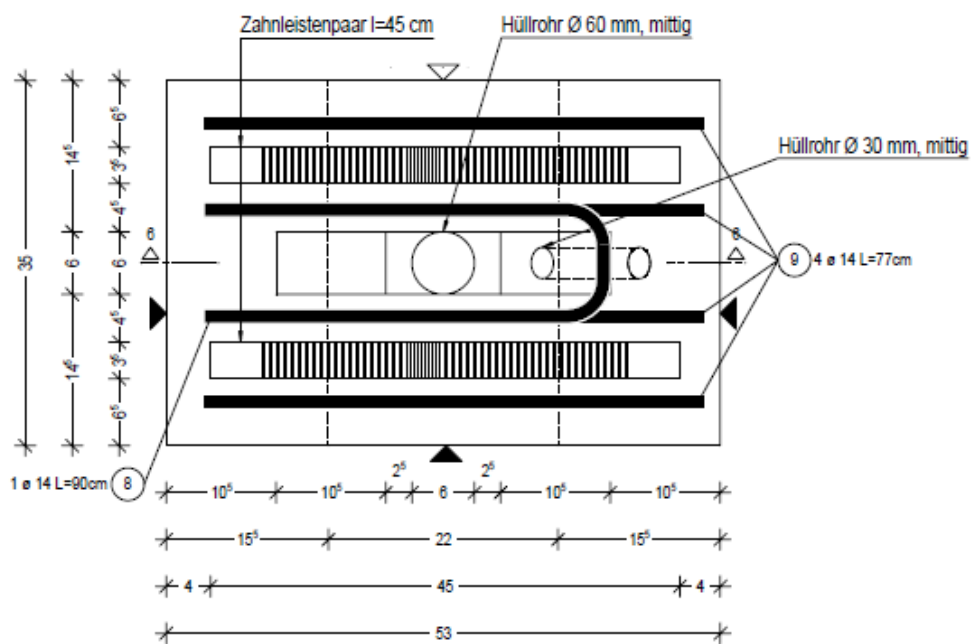
Anhang FC3: Konstruktionsdetails



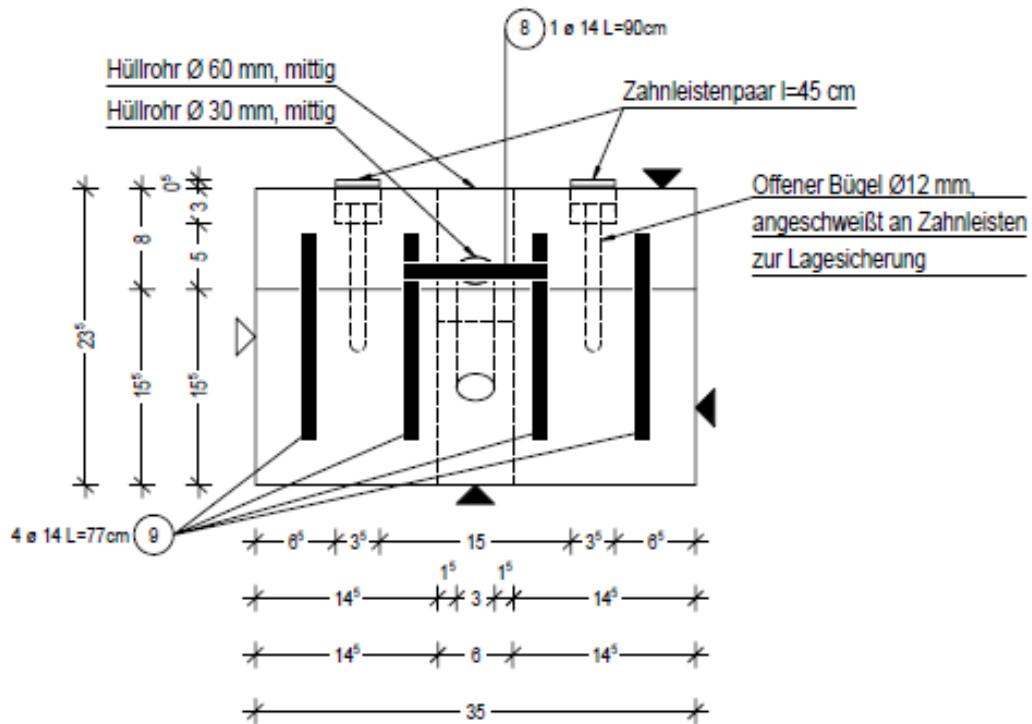
Schnitt 4 - 4: Querschnitt Obergurt - Knotenelement



Schnitt 5 - 5: Draufsicht Knotenelement

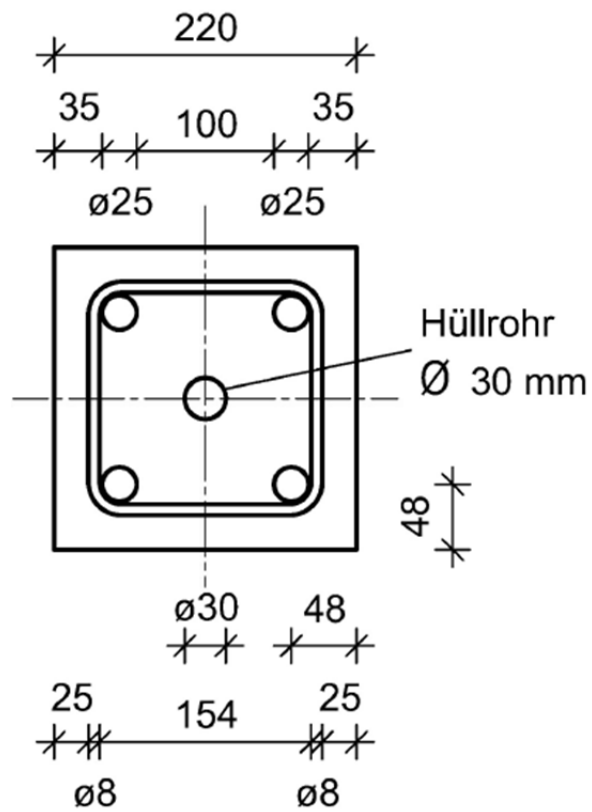


Seitenansicht Knotenelement



Betondeckung (Verlegemaß)	Betonfestigkeitsklassen	Betonoberflächen Schalseite:	Betonoberflächen Einfüllseite
Allgemein: 3,5cm	C100/115	▼ Schalungsglatt	▽ Handgeglättet
Zahnleisten: 4,0cm		▼ Keine besond. Anforderungen	▽ Sauber abgerieben
[XC1]	Kantenfasung a = 1,0cm	▼ Aufgeraut	▽ Aufgeraut
		Waschbeton, Struktur	Besenstrich

Diagonale



Pfosten

