

2207 Gleiserneuerung Kornhausbrücke

Technischer Bericht

**Kornhausbrücke, Bern - Ermüdungsüberprüfung
Grundlage für das Projekt «Gleisersatz und Sanierung 2024»**

Version 3.0, 05.03.2021



Impressum

Erstelldatum:	30.11.2020
Letzte Änderung:	05.03.2021
Version:	3.0
Autoren:	ada, gam
Auftragsnummer:	2207 Gleiserneuerung Kornhausbrücke
Datei:	O:\2207 Gleisersatz Kornhausbrücke\pmm\Berichte\Ermüdung\TB_Koha_Ermüdungsüberprüfung_V3.0_2021-03-05_gam.docx

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	4
2	Abgrenzung	4
3	Projektorganisation	4
4	Grundlagen	4
4.1	Normen, Richtlinien	4
4.2	Projektspezifische Grundlagen	5
5	Bauwerks- und Projektbeschrieb	6
5.1	Kornhausbrücke – bestehendes Gesamttragwerk von 1898	6
5.2	Bestand, Instandsetzungen und Umbaumassnahmen	6
5.3	Tragwerkskonzept und Tragwerksmodell.....	7
5.3.1	Grosser Bogen (GRB)	7
5.3.2	Kleiner Bogen (KLB).....	9
5.3.3	Endfelder (EF).....	12
5.4	Nutzung	13
6	Baustoffe	14
7	Querschnittsformen und -werte	14
8	Beurteilung der Ermüdungssicherheit	15
8.1	Wesentliche Berechnungsannahmen	15
8.2	Formulierung der Lastfälle (Einwirkungen).....	15
8.3	Vorgehen der Beurteilung der Ermüdungssicherheit (Stufe I und II).....	17
9	Bemessungslasten und Einwirkungskombinationen für die Ermüdung	19
10	Resultate und Massnahmenempfehlung zur Ermüdungssicherheit	20
11	Schlussfolgerung und weiteres Vorgehen	24

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Aktualisierungsvermerk	Visum
1.00	30.11.2020	Erstfassung	gam
2.00	03.03.2021	Berichtsentwurf	gam
3.00	05.03.2021	Ergänzungen der Massnahmenempfehlung / Schlussfolgerung	gam

1 Aufgabenstellung

Die Eigentümerschaft (Tiefbauamt Stadt Bern, TAB) möchte für ihr Bauwerk eine Ermüdungsüberprüfung durchführen lassen. Diese soll Aufschluss über den Zustand der Brückenelemente bezüglich Ermüdungseinwirkung geben. In diesem Rahmen hat die ingenta ag den Auftrag erhalten, die Ermüdungssicherheit der Kornhausbrücke Bern zu untersuchen.

Die Untersuchungstiefe richtet sich nach der Beurteilung gemäss Tragwerksanalyse [G5] im Zusammenhang mit der Einführung von neuen Tramtypen, Dez. 2008.

2 Abgrenzung

- Die Ermüdungssicherheit der Brückenplattenkonstruktion (grosse Sicherheitsreserve) sowie Lager unter gewöhnlicher Einwirkung ist nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchung.
- Die Ermüdungssicherheit der Foundationen inkl. Böschungsstabilität unter gewöhnlicher Einwirkung wurde nicht untersucht.

3 Projektorganisation

Auftraggeberin	Tiefbauamt Stadt Bern Bundesgasse 38 3001 Bern
Projektverfasserin	ingenta ag Laubeggstrasse 70 3006 Bern

4 Grundlagen

4.1 Normen, Richtlinien

Es gelten die aktuellen Normen des SIA (Schweizerischer Ingenieuren- und Architektenverein) für die Planung und die Bemessung der Tragstruktur. Dies sind insbesondere:

[N1]	SIA 260:2013	Grundlagen der Projektierung von Tragwerken
[N2]	SIA 261:2020	Einwirkungen auf Tragwerke
[N3]	SIA 261/1:2013	Einwirkungen auf Tragwerke - Ergänzende Festlegungen
[N4]	SIA 262:2013	Betonbau
[N5]	SIA 263:2013	Stahlbau
[N6]	SIA 267:2013	Geotechnik
[N7]	SIA 269:2011	Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken
[N8]	SIA 269/1:2011	Erhaltung von Tragwerken – Einwirkungen

4.2 Projektspezifische Grundlagen

- [G1] AZP Adamina Zeerleder Partner AG, Kornhausbrücke, Bestandespläne, Bern, 1997
- [G2] Hager + Bettschen AG, Kornhausbrücke, Überwachungsplan, Bern, Dezember 2008
- [G3] Hager + Bettschen AG, Kornhausbrücke, Nutzungsvereinbarung (nachgeführt), Bern, Dezember 2008
- [G4] Hager + Bettschen AG, Kornhausbrücke, Projektbasis, Bern, Dezember 2008
- [G5] Hager + Bettschen AG, Kornhausbrücke, Tragwerksanalyse, Bern, Dezember 2008
- [G6] AZP Adamina Zeerleder Partner AG, Neue Tramlasten Kornhausbrücke, Tragwerksanalyse und Einführung neue Tramtypen, 19.04.2010
- [G7] AZP Adamina Zeerleder Partner AG, Technischer Bericht vom 30.04.2012 über die Hauptinspektion August 2011
- [G8] ingenta ag ingenieure + planer, Technischer Bericht vom 19.04.2019 über die Hauptinspektion August 2018
- [G9] ingenta ag ingenieure + planer, Kornhausbrücke, Nutzungsvereinbarung (nachgeführt), Bern, März 2021
- [G10] ingenta ag ingenieure + planer, Kornhausbrücke, Projektbasis, (nachgeführt), Bern, Mär 2021
- [G11] ingenta ag ingenieure + planer, Kornhausbrücke, Überwachungsplan, (nachgeführt), Bern, März 2021
- [G12] Metron Bern AG und ingenta ag ingenieure + planer, Technischer Bericht vom 24.06.2020 über die Machbarkeitsstudie Brückenquerschnitt, Version 2.0

5 Bauwerks- und Projektbeschreibung

5.1 Kornhausbrücke – bestehendes Gesamttragwerk von 1898

Die Kornhausbrücke liegt im Herzen von Bern und wurde von August 1895 bis Juni 1898 erbaut. Sie besteht aus den acht unabhängigen Teiltragwerken:

- Grosser Bogen mit aufgesetztem Überbau
- Fünf kleine Bögen mit aufgesetztem Überbau
- Endfeld Seite Kornhausplatz und Endfeld Seite Kursaal

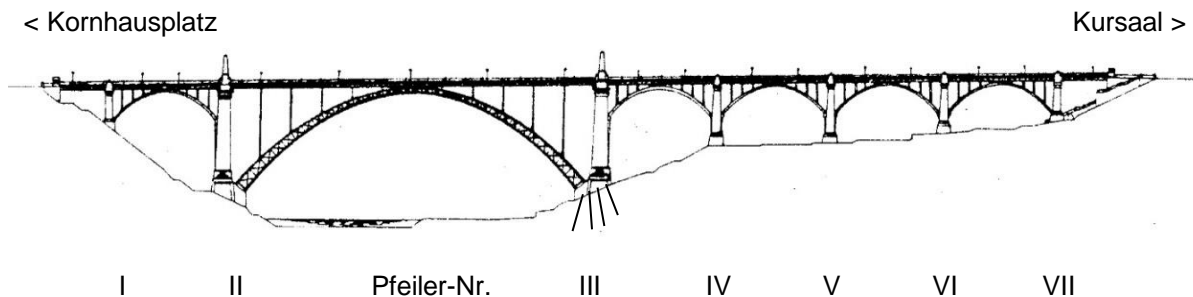


Abbildung 1: Ansicht Kornhausbrücke

Die beiden Widerlager und die massiven, mit Beton verfüllten Pfeiler I bis VII sind aus Granit- und Kalksteinblöcken gemauert. Die Pfeiler II und III sind begehrbar. Über sämtliche Pfeiler sind Dilatationsfugen, und bei den Endwiderlagern sind Trennfugen angeordnet.

Die Tragstruktur, einschliesslich dem Überbau der fünf kleinen Bögen sind identisch. Auch die beiden Endfelder sind identisch zueinander. Infolgedessen werden die statischen Berechnungen für drei Tragstrukturen, «Grosser Bogen», «Kleiner Bogen» und «Endfeld» erfolgen.

Die ganze Konstruktion besteht aus einfachen und zusammengesetzten Stahlprofilen (Flussstahl), die überwiegend voll vernietet ausgebildet sind. Ausnahmen bilden Verstärkungs- und Ersatzprofile aus Baustahl mit Schraubverbindungen. Der Stahlbeton der Fahrbahnplatte wirkt im Verbund mit den Obergurten der Hauptlängsträger (HLT), Hauptquerträger (HQT) und Zwischenlängsträger (ZLT).

5.2 Bestand, Instandsetzungen und Umbaumaassnahmen

Im Laufe der Jahre fanden verschiedene Umnutzungen, Verstärkungen und Instandstellungen statt. Eine Gesamterneuerung der Kornhausbrücke erfolgte im Jahr 1997/98. Dabei wurden nebst dem Unterbau (neue Betonplatte im Verbund mit der Stahlkonstruktion) und der Abdichtung auch die Gleise und der Belag ersetzt. 2012 wurden in einem weiteren Sanierungsprojekt sämtliche Längsfugen entlang den Schienen wie auch die Querfugen (Brückendilatationen) ersetzt. Im Sommer 2019 wurden der Belag und die Schienenfugen letztmals punktuell saniert. Die städtische Verkehrsbetriebe Bern (BERN-MOBIL) beabsichtigt im Jahr 2024, 26 Jahre nach der letzten Gleiserneuerung, einen Gleisersatz auf der Kornhausbrücke vorzunehmen und gleichzeitig den heute vom Bundesamt für Verkehr (BAV) genehmigten Abstand zwischen den Gleisachsen von 2.90 m (auf der Brücke bisher 2.70 m) zu realisieren. Grund für den Ersatz sind die Sicherstellung der Verfügbarkeit und der Sicherheit der Dilatationsvorrichtungen sowie der erhöhte Unterhaltsaufwand und die Verkehrssicherheitsdefizite an der Schnittstelle Schienenfugen zu Belag beim aktuellen Gleisoberbausystem. Unabhängig von den Arbeiten auf der Brückenebene können gleichzeitig auch die geplanten Arbeiten unterhalb der Brückenebene für die Instandsetzung des Korrosionsschutzes sowie die entsprechenden Massnahmen und Empfehlungen der Ermüdungsüberprüfung ausgeführt werden.

Der Perimeter der Ermüdungsüberprüfung umfasst gemäss Abbildung 2 die gesamte Kornhausbrücke. Sie besteht, mit einer Gesamtlänge von ca. 355.50 m Länge, aus einem die Aare überbrückenden Hauptbogen von ca. 115 m, fünf kleinen Bogenöffnungen von ca. 34.5 m Länge (ein kleiner Bogen Seite Kornhausplatz, vier kleine Bögen Seite Kursaal) und jeweils einem Endfeld von ca. 16.5 m Länge.

Die Elemente der Brücke sind fachwerkartig ausgebildet und voll vernietet oder teils verschraubt. Die Brücke verläuft gerade und weist ein Längsgefälle von 2,7 bis 3,8 % auf (Gefällswechsel beim Pfeiler I). Die Pfeiler I, IV, V, VI und VII sind massiv ausgebildet. Die beiden Pfeiler II und III sind hohl und innen begehrbar. Sämtliche Brückenabschnitte sind voneinander durch Dehnfugen getrennt und wirken statisch voneinander unabhängig.

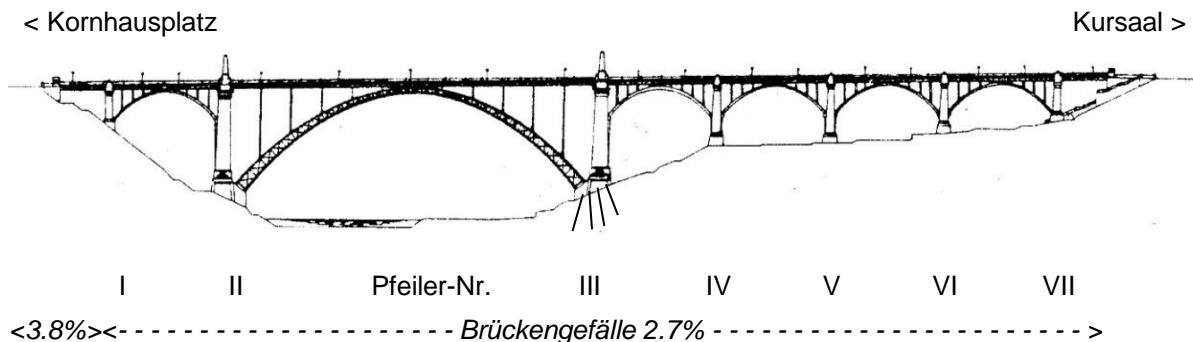


Abbildung 2: Ansicht Kornhausbrücke

5.3 Tragwerkskonzept und Tragwerksmodell

5.3.1 Grosser Bogen (GRB)

Beschreibung des Tragwerks:

Der **Unterbau** des Bogens mit einer Spannweite von ca. 115 m besteht aus zwei im Grundriss gekrümmten Bogen (die Bogenebene ist leicht schief gestellt) mit aufgesetzten Stützen:

- Ober- und unterwasserseitig je ein Fachwerkbogen mit Gurten, Pfosten und gekreuzten Diagonalen.
- Je acht vergitterte Fachwerk-Stützen und drei «Kurzstützen» pro Bogen, schräg auf den Bogen aufgesetzt, welche den Überbau tragen.
- Verschiedene Wind- und Querverbände zwischen den beiden Bogen und den Stützen.

Bei den massiven Pfeilerkämpfern weisen beide Bogengurte Lager auf; das statische System ist somit ein eingespannter Bogen.

Der Bogen besteht aus einem Fachwerk. Dessen Pfosten und Diagonalen bilden einen doppelten Strebenzug; sie weisen in der Fachwerkebene sehr geringe Exzentrizitäten auf, welche vernachlässigt werden können, weil sie nur einen sehr kleinen Einfluss auf die Spannungen (weniger als 0,1 %) haben.

Der **Überbau** über dem grossen Bogen besteht aus einem sogenannten Trägerrost mit zwölf Feldern, welche durch die Stützen elastisch auf den Bogen abgestellt und bei den massiven Pfeilern II und III vertikal starr, in Längsrichtung frei beweglich und in Querrichtung gehalten sind (siehe Lagerpläne im Anhang C):

- Beidseitig je zwei aussenliegende durchlaufende Hauptlängsträger (HLT), mit Spannweiten von je 10.34 m zwischen den elf Bogenstützen, 10.78 m im Endfeld zum Pfeiler II bzw. III.
- Hauptquerträger (HQT) im Abstand von 5.17 m, mit einer Spannweite von 8.00 m zwischen den Hauptlängsträgern. Jeder zweite Hauptquerträger wird von den Bogenstützen direkt getragen.
- Vier Zwischenlängsträger (ZLT) mit einer Spannweite von 5.17 m zwischen den Querträgern.

- Aussen an HLT und HQT angeschlossene Gehweg-Konsolfachwerke, verbunden durch die Gehweg-Randträger, welche die aufgesetzte Betonplatte des Gehweges tragen.
- Fahrbahnplatte aus Stahlbeton im Verbund mit den Obergurten.

Hauptlängsträger (HLT) und Hauptquerträger (HQT) sind Fachwerke mit Pfosten und gekreuzten Diagonalen, mit praktisch keinen Exzentrizitäten in der Fachwerkebene beim Anschluss an die Gurte. Die Diagonalen sind nur einseitig (weil gekreuzt) am Gurt angeschlossen, was somit zu Exzentrizitäten aus der Fachwerkebene führt. In den Kreuzungspunkten sind die Diagonalen mit mindestens zwei Nieten verbunden.

Die HLT wirken als «Durchlaufträger», die HQT als «einfache Balken». Die Verbundwirkung der Obergurte erzeugt eine Exzentrizität der gekreuzten Diagonalen, welche bei der Modellierung berücksichtigt wird.

Die vier Zwischenlängsträger INP 400 (Abstand 1.65 bzw. 1.57 m) mit einer Spannweite von 5.17m zwischen den Querträgern (bzw. 5.62 m gegen die Endquerträger) wirken voll im Verbund mit der Betonplatte. Sie sind bei den Querträgern auf kleinen Konsolen an den Pfosten, welche mit Knotenblechen verbunden sind, aufgelegt, gestossen und zugfest verbunden, so dass sie deshalb zusammen mit der durchgehenden und entsprechend bewehrten Betonplatte als Durchlaufträger wirken können.

Die horizontalen Windverbände auf Höhe der Untergurte wurden bei der Gesamterneuerung von 1997 belassen, sie haben jedoch nur eine aussteifende Wirkung für einzelne Querträger. Die horizontalen Beanspruchungen werden von der neuen Fahrbahnplatte via HLT und Bogenscheitel (Verbunden durch Stahlguss) in den Unterbau bzw. in die massiven Pfeiler abgeleitet.

Modellbildung und statisches System:

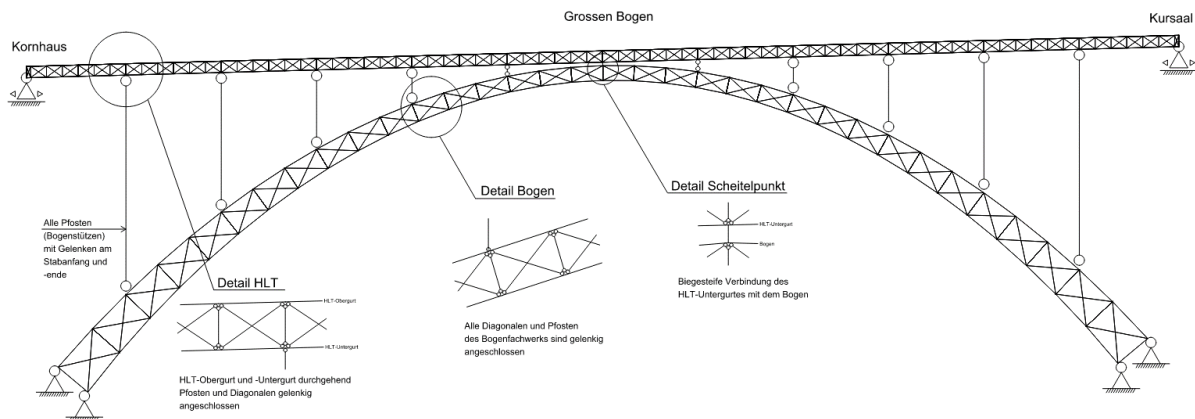


Abbildung 3: Statische System Grosser Bogen

Für die Formulierung des Tragwerks und die Berechnung der Schnittkräfte, wird das Statik-Programm AxisVM X5, Version 3h, der Firma ingWare AG in Erlenbach ZH eingesetzt.

Das ganze Tragwerk des grossen Bogens mit aufgesetztem Überbau wird als räumliches Stabmodell mit der Fahrbahnplatte als Schale im Verbund mit der Stahlkonstruktion modelliert. Gurtstäbe werden ohne Gelenke, die Füllstäbe der Fachwerke (Diagonalen und Pfosten) mit beidseits gelenkigem Anschluss an den Gurtstäben eingeführt. Die Verbundwirkung der Obergurte erzeugt eine Exzentrizität der gekreuzten Diagonalen, welche bei der Modellierung berücksichtigt wird.

Die Exzentrizitäten der Diagonalen aus der Fachwerkebene werden vernachlässigt.

Die Obergurte der HLT und HQT werden als Verbundquerschnitte eingeführt, an welchen auch die Berechnung der Spannungen erfolgt.

Alle Bogen- und Stützen-Windverbände werden wegen der Schiefstellung der Bogenebenen modelliert.

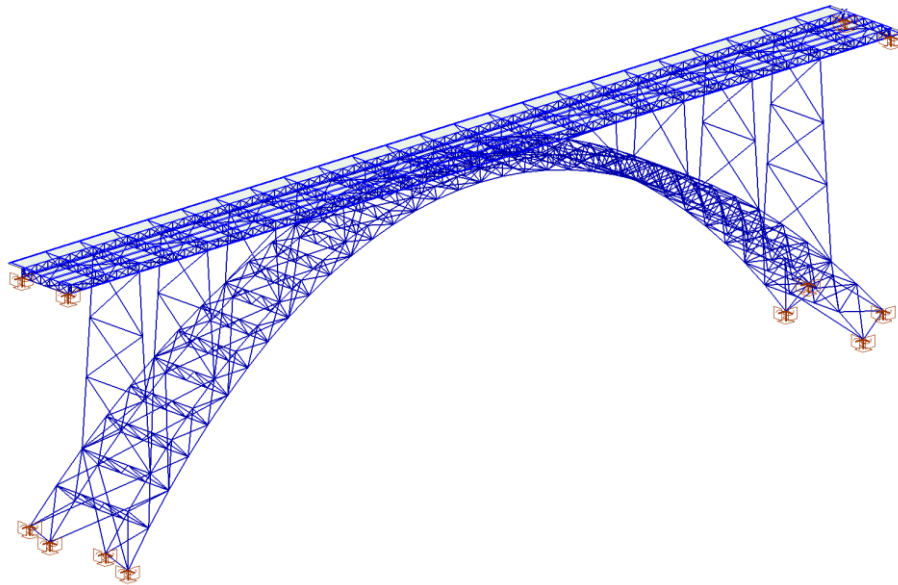


Abbildung 4: Isometrie grosser Bogen

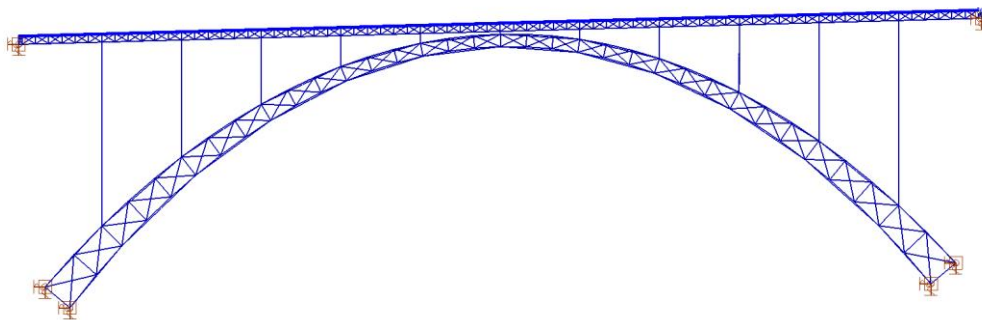


Abbildung 5: Ansicht grosser Bogen

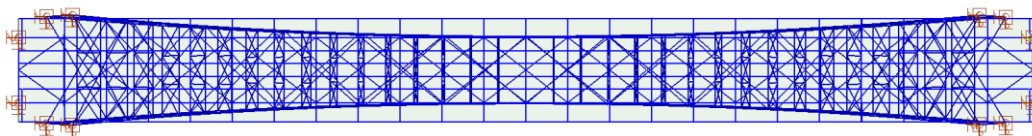


Abbildung 6: Draufsicht grosser Bogen

5.3.2 Kleiner Bogen (KLB)

Beschreibung des Tragwerks:

Der **Unterbau** des Bogens mit einer Spannweite von ca. 34.5 m besteht aus zwei im Grundriss gekrümmten Bogen (die Bogenebene ist leicht schief gestellt) mit aufgesetzten Stützen:

- Ober- und unterwasserseitig je einen Bogen mit unten offenem Kastenquerschnitt.
- Je sechs Stützen mit Vollquerschnitt und drei «Kurzstützen» pro Bogen, schräg auf den Bogen aufgesetzt, welche den Überbau tragen.
- Verschiedene Wind- und Querverbände zwischen den beiden Bogen und den Stützen.

Bei den massiven Pfeilerkämpfern weisen die Bogen Walzenlager auf; das statische System ist somit ein versteifter 2-Gelenk-Stabbogen.

Der **Überbau** über dem kleinen Bogen besteht aus einem sogenannten Trägerrost mit zehn Feldern, welche durch die Stahl-Stützen elastisch auf den Bogen abgestützt und bei den massiven Pfeilern vertikal starr, in Längsrichtung frei beweglich und in Querrichtung gehalten sind (siehe Lagerpläne im Anhang C):

- Beidseitig je zwei aussenliegende durchlaufende Hauptlängsträger (HLT), mit Spannweiten von 3.62 m zwischen den neun Bogenstützen, 4.18 m im Endfeld zu den Pfeilern.
- Hauptquerträger (HQT) im Abstand von 3.62 m, mit einer Spannweite von 8.00 m zwischen den Hauptlängsträgern. Jeder Hauptquerträger wird von den Bogenstützen direkt getragen.
- Vier Zwischenlängsträger (ZLT) mit einer Spannweite von 3.62 m zwischen den Querträgern.
- Aussen an HLT und HQT angeschlossene Gehweg-Konsolfachwerke, verbunden durch die Gehweg-Randträger, welche die aufgesetzte Betonplatte des Gehweges tragen.
- Fahrbahnplatte aus Stahlbeton im Verbund mit den Obergurten.

Hauptlängsträger, Hauptquerträger sowie Zwischenlängsträger sind gleich ausgebildet wie beim Überbau des grossen Bogens. Sie weisen auch die gleichen Eigenschaften auf bezüglich Durchlaufwirkung, Verbund der Obergurte, Exzentrizität der Diagonalen und der Stabilität. Die einzelnen Stäbe weisen teilweise etwas kleinere Profile (Querschnittswerte) auf.

Die vier Zwischenlängsträger INP 320 bzw. 340 (Abstand 1.57 bzw. 1.65 m) mit einer Spannweite von 3.62 m zwischen den Querträgern wirken voll im Verbund mit der Betonplatte. Sie sind bei den Querträgern auf kleinen Konsolen an den Pfosten, welche mit Knotenblechen verbunden sind, aufgelegt, gestossen und zugfest verbunden, so dass sie deshalb zusammen mit der durchgehenden und entsprechend bewehrten Betonplatte als Durchlaufträger wirken können.

Die horizontalen Windverbände auf Höhe der Untergurte wurden bei der Gesamterneuerung von 1997 belassen, sie haben die gleiche Funktion wie beim grossen Bogen. D.h. Die horizontalen Beanspruchungen werden von der neuen Fahrbahnplatte via HLT und Bogenscheitel (Verbunden durch Stahlguss) in den Unterbau bzw. in die massiven Pfeiler abgeleitet.

Modellbildung und statisches System:

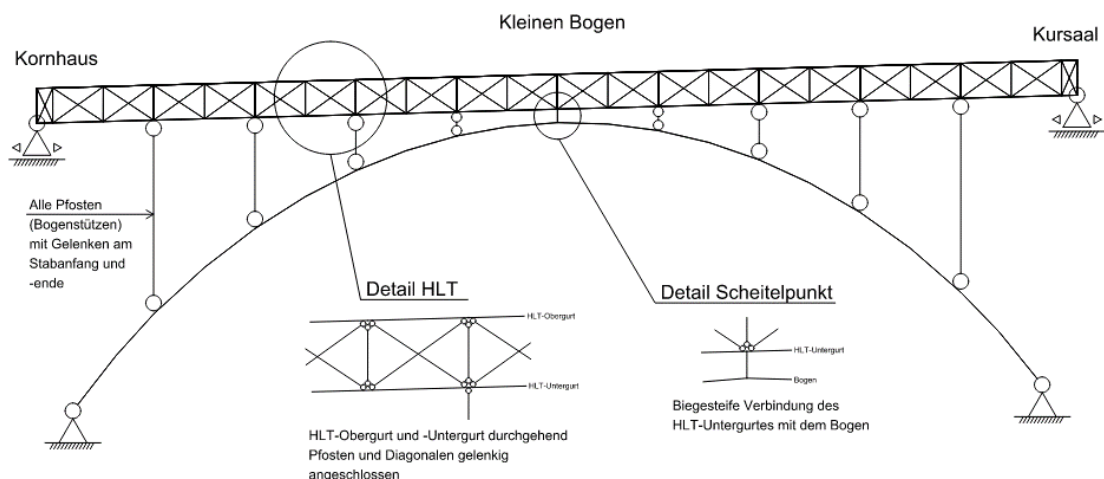


Abbildung 7: Statische System Kleinen Bogen

Für die Formulierung des Tragwerks und die Berechnung der Schnittkräfte, wird das Statik-Programm AxisVM X5, Version 3h, der Firma ingWare AG in Erlenbach ZH eingesetzt.

Das ganze Tragwerk des kleinen Bogens mit aufgesetztem Überbau wird als räumliches Stabmodell mit der Fahrbahnplatte als Schale im Verbund mit der Stahlkonstruktion modelliert. Gurtstäbe werden ohne Gelenke, die Füllstäbe der Fachwerke (Diagonalen und Pfosten) mit beidseits gelenkigem Anschluss

an den Gurtstäben eingeführt. Die Verbundwirkung der Obergurte erzeugt eine Exzentrizität der gekreuzten Diagonalen, welche bei der Modellierung berücksichtigt wird. Die Exzentrizitäten der Diagonalen aus der Fachwerkebene werden vernachlässigt.

Die Obergurte der HLT und HQT werden als Verbundquerschnitte eingeführt, an welchen auch die Berechnung der Spannungen erfolgt.

Alle Bogen- und Stützen-Windverbände werden wegen der Schiefstellung der Bogenebenen modelliert.

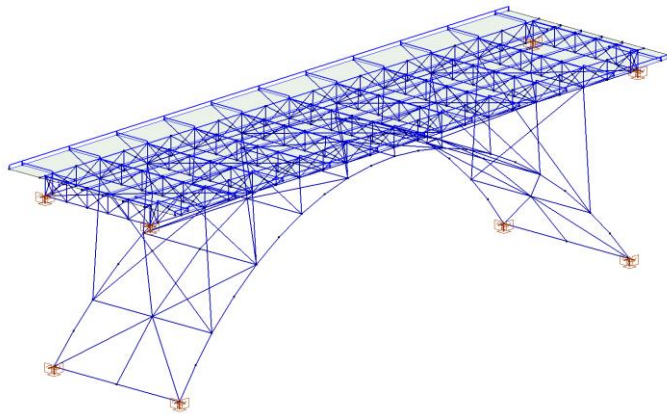


Abbildung 8: Isometrie kleiner Bogen

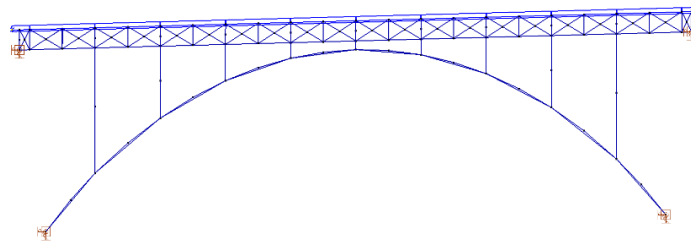


Abbildung 9: Ansicht kleiner Bogen

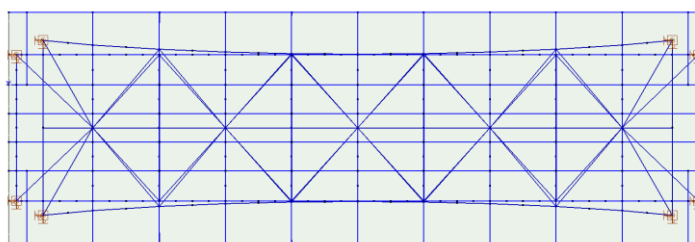


Abbildung 10: Draufsicht kleiner Bogen

5.3.3 Endfelder (EF)

Beschreibung des Tragwerks:

Das Endfeld besteht aus einfachen Balken, die beim Endwiderlager und beim massiven Pfeiler starr gestützt sind (siehe Lagerpläne im Anhang C), und die durch Querträger zu einem Trägerrost verbunden sind:

- Zwei aussenliegende und zwei innenliegende Hauptlängsträger (HLT), mit einer Spannweite von 16.53 m.
- Dazwischen drei Zwischenlängsträger (ZLT) mit einer Spannweite von 5.68, 5.17 und 5.68 m zwischen den Querträgern.
- Vier Querträger (QT) an den Enden und in den Drittelpunkten, im Abstand von ca. 5.5 m.
- Aussen an HLT und QT angeschlossene Gehweg-Konsolfachwerke, verbunden durch die Gehweg-Randträger, welche die aufgesetzte Betonplatte des Gehweges tragen.
- Fahrbahnplatte aus Stahlbeton im Verbund mit den Obergurten.
- Windverbände sind keine vorhanden.

Die äusseren Hauptlängsträger (HLTR) sind als Fachwerke mit den gleichen Eigenschaften wie die HLT beim kleinen Bogen ausgebildet.

Die inneren Hauptlängsträger (HLTM) sind eigentliche Vollwandträger mit Aussteifungsrippen.

HLT und ZLT werden mit Querträgern seitlich ausgesteift, welche aus Pfosten und zweiteiligen Diagonalen mit einfachem Strebenzug bestehen; somit gibt es hier keine Exzentrizitäten aus der Fachwerkebene.

Die drei Zwischenlängsträger INP 320 (Abstand 1.65 bzw. 1.57 m) mit einer Spannweite von ca. 5.5 m zwischen den Querträgern wirken voll im Verbund mit der Betonplatte. Sie sind bei den Querträgern nur auf kleinen Konsolen aufgelegt und gestossen, und wirken deshalb als einfache Balken mit Gelenken an beiden Enden.

Modellbildung und statisches System:

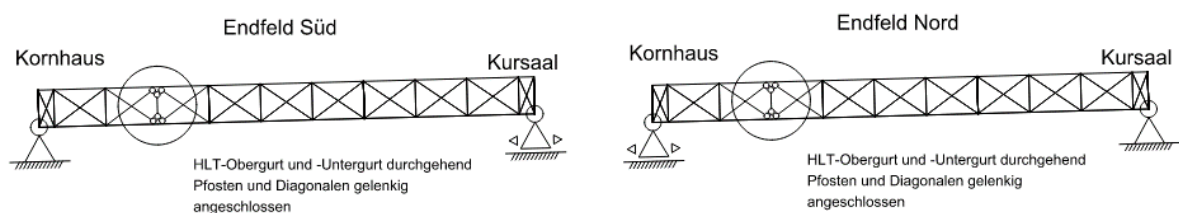


Abbildung 11: Statische System Endfelder

Für die Formulierung des Tragwerks und die Berechnung der Schnittkräfte, wird das Statik-Programm AxisVM X5, Version 3h, der Firma ingWare AG in Erlenbach ZH eingesetzt.

Das ganze Tragwerk des Endfeldes wird als räumliches Stabmodell mit der Fahrbahnplatte als Schale im Verbund mit der Stahlkonstruktion modelliert. Gurtstäbe werden ohne Gelenke, die Füllstäbe der Fachwerke (Diagonalen und Pfosten) mit beidseits gelenkigem Anschluss an den Gurtstäben eingeführt. Die Verbundwirkung der Obergurte erzeugt eine Exzentrizität der gekreuzten Diagonalen, welche bei der Modellierung berücksichtigt wird.

Die Exzentrizitäten der Diagonalen aus der Fachwerkebene werden vernachlässigt.

Die Obergurte der HLT und HQT werden als Verbundquerschnitte eingeführt, an welchen auch die Berechnung der Spannungen erfolgt, unter Berücksichtigung der Belastungsgeschichte.

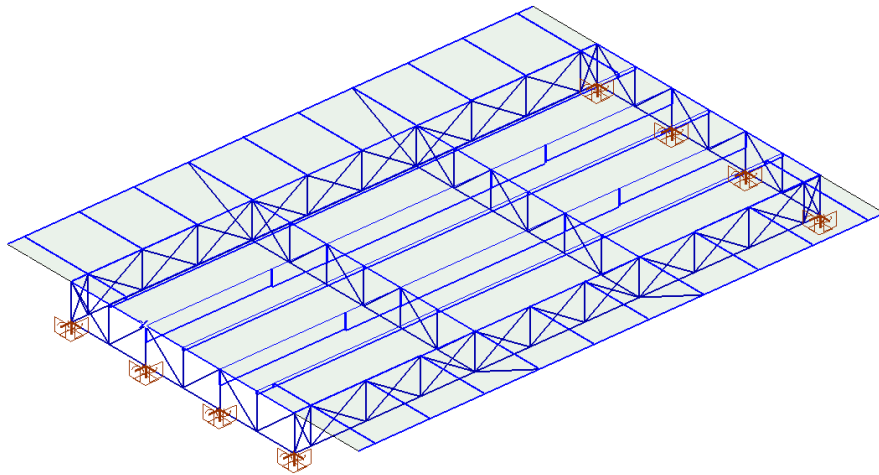


Abbildung 12: Isometrie Endfeld

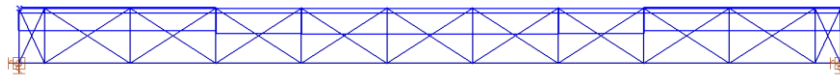


Abbildung 13: Ansicht Endfeld

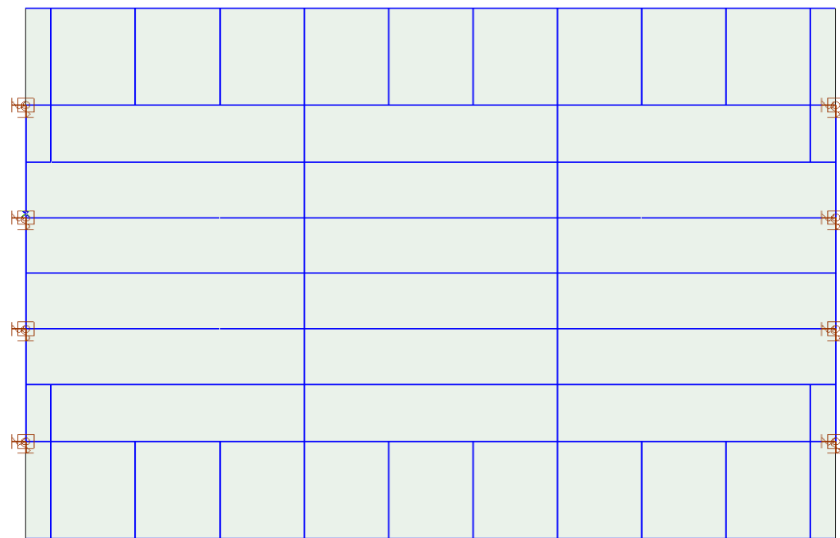


Abbildung 14: Draufsicht Endfeld

5.4 Nutzung

Die Kornhausbrücke wird vom öffentlichen Verkehr mit den zwei stärkst frequentierten Bus- und Trambuslinien der BERNMOBIL (Linien 10 und 9), vom motorisierten Individualverkehr und dem Langsamverkehr stark beansprucht. Voraussichtlich im Jahr 2028 wird der Ast Ostermundigen der heutigen Buslinie 10 auf Tram umgestellt (Projekt Tram Bern-Ostermundigen).

Für nachstehende Berechnungen werden das Lastmodell der zukünftigen Trambeschaffung sowie die Lastwechsel bis 2085 berücksichtigt.

6 Baustoffe

Die Beschreibung der Baustoffe gehen aus den projektspezifischen Grundlagen [G3], [G4] und [G5] hervor.

Vorhandene Materialien:

Baustoff		Kennwerte
Flussstahl (eingebaut 1895 – 98)	Fließgrenze Zugfestigkeit Schub-Grenzspannung	$f_y = 240 \text{ N/mm}^2$ $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ $\tau_y = 140 \text{ N/mm}^2$
Nietenmaterial	Zugfestigkeit Schub-Grenzspannung	$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{Rb} = 210 \text{ N/mm}^2 \quad (0,6 f_u)$

Tabelle 1: Baustoffen von 1898

Neue Materialien (eingebaut 1997)

Baustoff		Kennwerte
Baustahl	FeE 235 C und FeE 355D Fließgrenze Zugfestigkeit Schub-Grenzspannung	entspricht heute S235J0 und S355J2 $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ $\tau_y = 135 \text{ N/mm}^2$
Schrauben	SHV 10.9	
Beton	B 40/30, CEM I 42,5 FT Betondruckfestigkeit Schubspannungsgrenze	entspricht heute einem C30/37 XF4 $f_{cd} = 20,0 \text{ N/mm}^2$ $\tau_{cd} = 1,10 \text{ N/mm}^2$
Betonstahl	S 500 Fließgrenze von Betonstahl Elastizitätsmodul von Betonstahl	entspricht heute einem B500B $f_{sd} = 435 \text{ N/mm}^2$ $E_s = 205 \text{ kN/mm}^2$

Tabelle 2: Baustoffen von 1997

7 Querschnittsformen und -werte

Die Beschreibung der Querschnittsabwicklung, -formen und -werten gehen aus der projektspezifischen Grundlage [G5] hervor. Hingegen gehen die Beschreibung der Pfeilerabmessungen und -formen aus den Grundlagenpläne hervor.

8 Beurteilung der Ermüdungssicherheit

8.1 Wesentliche Berechnungsannahmen

Die Grundlagen der Ermüdungsberechnung sind gemäss [G5] ausführlich beschrieben. Folglich werden hier einige wesentliche Auszüge dargestellt:

Annahmen für die Schnittkraftermittlung, als Ergebnisse aus den Messungen der EPFL an einzelnen Tragwerksteilen des Überbaus (Bericht Nr. IC 934-2):

- Die Auswirkungen (Schnittkräfte) infolge der konzentrierten Verkehrslasten (Achslasten Q_k von Tram, Bus und Individualverkehr) können sowohl für den Nachweis der Tragsicherheit (Erreichen des Tragwiderstandes) wie auch für den Ermüdungsnachweis (Erreichen der Ermüdungsfestigkeit) mit einem Modellfaktor $r = 0.8$ (für Querschnitte aus Flachblech $r = 0.9$) reduziert werden. Dies gilt ausdrücklich nur für die Stahlteile des Trägerrostes des Überbaus, nicht jedoch für die Betonfahrbahnplatte und auch nicht für den Unterbau mit den Stützen.
- Die Exzentrizitäten e_y aus der Fachwerkebene bei exzentrisch angeschlossenen Fachwerkstäben dürfen sowohl für den Nachweis der Tragsicherheit wie auch für den Ermüdungsnachweis reduziert werden: $e_{y, \text{effektiv}} = 0,50 e_{y, \text{theoretisch}}$ (e_y berechnet am Bruttoquerschnitt).
- Der dynamische Beiwert (Stosszuschlag) für die konzentrierten Lasten des Individual-Verkehrs beträgt für das ganze Bauwerk inkl. Fahrbahnplatte $\Phi = 1,0$ (Angabe der Experten).
- Der dynamische Beiwert (Stosszuschlag) für Schienenfahrzeuge sowie Pneufahrzeuge des öffentlichen Verkehrs kann wie folgt angenommen werden (siehe auch Tabelle 4.2.0):
 - Stahlkonstruktion des Überbaus: $\Phi = 1,0$ für Tragsicherheit und Ermüdung
 - Fahrbahnplatte aus Stahlbeton: $\Phi = 1,0$ für Tragsicherheit und $\Phi = 1,2$ für Ermüdung
 - Stahlkonstruktion des Unterbaus: $1 \leq \Phi = 1.44 / [(I_\Phi)^{1/2} - 0.2] + 0.82 \leq 1.67$ für Tragsicherheit und Ermüdung, mit I_Φ gemäss Tragwerksanalyse, \rightarrow ergibt $\Phi = 1,1$
 - Auf die Erhöhung der Achslasten von Pneufahrzeugen des öffentlichen Verkehrs in der Nähe von Fahrbahnübergängen um 30 % (Norm SIA 261, 10.3.4) kann verzichtet werden, weil die Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen bestehen und deshalb keine Verstärkung der Einwirkungen erzeugen.

Annahmen für den Ermüdungsnachweis:

- EE-Berechnung (alle Querschnittsklassen 1 - 4), d.h. elastische Schnittgrössenermittlung und elastische Ermittlung des Querschnittswiderstands am Nettoquerschnitt, ohne Reduktion des Nettoquerschnittes.
- Für den Fall einer Kreuzung zweier Trams wird für das zweite Gleis mit einem reduzierten Wert der Belastung gerechnet, d.h. nur 30 % der Fahrgäste des Trams auf dem ersten Gleis.

8.2 Formulierung der Lastfälle (Einwirkungen)

Die Formulierung der Lastfälle sind gemäss [G5] ausführlich beschrieben. Folglich werden hier einige wesentliche Auszüge und Nachführungen gemäss Dokumentationen wie beispielsweise die Nutzungsvereinbarung [G9] vom März 2021 erläutert:

Die Eigenlast der Stahlkonstruktion, Eigenlast Beton sowie Auflasten (Belag etc.) werden als Raumlasten und Streckenlasten berücksichtigt.

Die Tramlasten werden mit dem ideellen Gewicht der künftigen Trambeschaffung (siehe „Anmerkung zu den Lasten des öffentlichen Verkehrs in der Nutzungsvereinbarung (nachgeführt, März 2021) [G9]“) im Modell generiert. Die symmetrische allenfalls asymmetrische [mit der Spreizung der Gleisachsen von 2.70 auf 2.90 m verschiebt sich die Gleisachse stadtauswärts um 22 cm zur Brückenachse, die

Gleisachse stadteinwärts um 42 cm aus der Brückenachse] Anordnung der Tramlasten auf das Tragwerk wird gemäss [G12] berücksichtigt.

Die konzentrierten Achslastgruppen des Individualverkehrs ($4 \times Q_k = 4 \times 50 \text{ kN}$) werden als Punktlasten direkt auf die Fahrbahnplatte aufgebracht, mit drei verschiedenen extremen Laststellungen in Querrichtung (an beiden Fahrbahnrandern = „West“ bzw. „Ost“ und in Fahrbahnmitte = „Mitte“).

Für den Nachweis der Ermüdungssicherheit werden die Anordnung der künftigen Trambeschaffungen mit den exakten Achsabständen und Lastwerten für beide Fahrrichtungen formuliert. Für den Lastfall Kreuzen der Tramzüge in ungünstigster Position, wird die Nutzlast des Tramzuges auf dem zweiten Gleis mit 30% der maximalen Nutzlast (Personenbelegung) berücksichtigt.

Die Steifigkeit der Fahrbahnplatte wird mit dem E-Modul für gerissenen Beton berücksichtigt, um eine wirklichkeitsnahe Lastverteilung zu simulieren.

Anordnung der Lasten in Querrichtung:

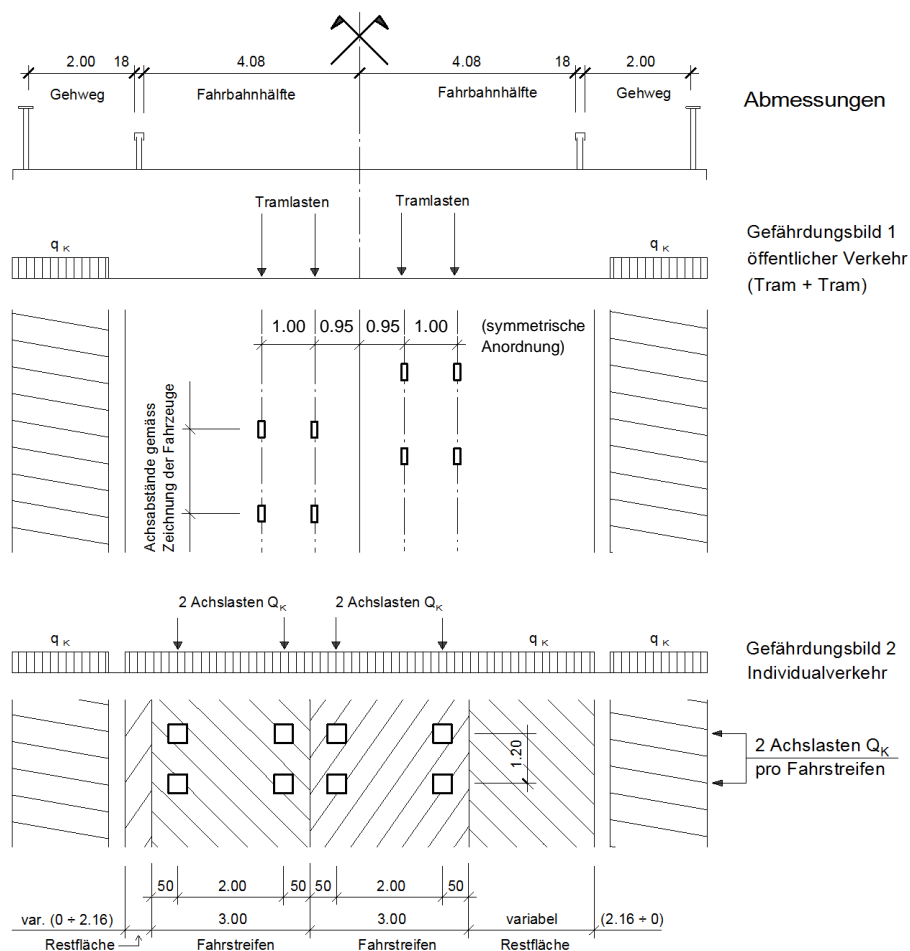


Abbildung 15: Anordnung der Lasten in Querrichtung (symmetrische Anordnung der Tramlasten, Spreizung auf 2.90 m)

Anmerkung zu den Lasten des öffentlichen Verkehrs:

Ideelle Lasten (oder ideelle Gewichte) sind fiktive Lasten für die einfache Formulierung in der Struktur. Sie sind nicht identisch mit dem effektiven (= repräsentativen) Gewicht F_{repr} der Fahrzeuge!

Damit die für die jeweiligen Nachweise erforderlichen Bemessungslasten F_d bzw. F_{fat} entstehen, müssen die ideellen Lasten F_{ideell} mit unterschiedlichen Lastbeiwerten β (nicht identisch mit γ) für Tragsicherheit bzw. Ermüdung multipliziert werden:

- Tragsicherheit: $F_d = Q_d = \beta_d \times F_{ideell} \rightarrow \beta_d = F_d / F_{ideell}$
- Ermüdung: $F_{fat} = Q_{fat} = \beta_{fat} \times F_{ideell} \rightarrow \beta_{fat} = F_{fat} / F_{ideell}$

Die massgebenden Bemessungslasten sowie die Lastbeiwerte β sind in den Tabellen des folgenden Abschnittes 9 für die jeweiligen Nachweise der zugehörigen „Einwirkungskombinationen“ der künftigen Trambeschaffung für Ermüdung ($Q_{fat} = F_{fat}$) definiert bzw. aufgelistet.

8.3 Vorgehen der Beurteilung der Ermüdungssicherheit (Stufe I und II)

Für Grenzzustände des Typs 4 (Ermüdung) gilt die Tragsicherheit als nachgewiesen, wenn das Bemessungskriterium $E_d \leq R_d$ erfüllt ist.

Gemäss Projektbasis [G10] ist ein Vorgehen in 2 Stufen durchzuführen:

Stufe I: Vereinfachtes Verfahren für den Nachweis mit der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$.

Stufe I: Verfeinertes Verfahren mit den drei folgenden Möglichkeiten:

- a) Untersuchen, was bei einem Ausfall von einzelnen Stäben geschieht, und zwar sowohl bezüglich Ermüdung wie auch bezüglich Tragsicherheit und Stabilität.
- b) Messungen durchführen an ausgewählten kritischen Bauteilen.
- c) Verfahren der Schadensakkumulations-Berechnung.

Im vorliegenden Fall genügt die Stufe I in Kombination mit den Möglichkeiten a) und b) der Stufe II. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sind im Bericht Nr. IC 934-2 „Messungen an der Kornhausbrücke“, 19.02.2007, enthalten (siehe Abschnitt 1.10). Das Verfahren der Schadensakkumulations-Berechnung muss nicht angewendet werden.

Stufe I: Vereinfachtes Verfahren für den Nachweis mit der Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$

$$E_d \leq R_d \quad \text{oder einfacher:} \quad \Delta\sigma(Q_{fat}) \leq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} \text{ am Netto-Querschnitt}$$

$\Delta\sigma(Q_{fat})$ wird berechnet als Differenz aus der maximalen und minimalen Spannung infolge der ständigen Last und der massgebenden Ermüdungslast inkl. dynamischem Beiwert Φ und beträgt nach Norm SIA 263 4.7.4.5 und 4.7.4.6:

- Zugbereich: $\sigma_{max} > \sigma_{min}$ $\Delta\sigma(Q_{fat}) = \sigma_{max}(Q_{fat}) - \sigma_{min}(Q_{fat})$
- Wechselbereich: $\sigma_{max} > 0$ und $\sigma_{min} < 0$ $\Delta\sigma(Q_{fat}) = \sigma_{max}(Q_{fat}) + 0,6 |\sigma_{min}(Q_{fat})|$
- Druckbereich: $\sigma_{min} < \sigma_{max} < 0$ $\Delta\sigma(Q_{fat}) = 0,6 [\sigma_{max}(Q_{fat}) - \sigma_{min}(Q_{fat})]$

Für alle Stäbe werden zuerst mit Hilfe von „AxisVM X5“ die maximalen und minimalen Spannungen am homogenen Brutto-Querschnitt $\sigma_{fat,brutto}$ berechnet, sowohl im Achspunkt wie auch am Rand des Querschnittes, und in Form von Tabellen dargestellt. Das „AxisVM X5“-Programm liefert die Randspannungen aus der jeweils ungünstigsten Kombination $N_{max/min}$ mit den zugehörigen M_y und M_z , bzw.

$M_{y,max/min}$ mit den zugehörigen N und M_z , bzw. $M_{z,max/min}$ mit den zugehörigen N und M_y . Darauf werden die Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma$ (Q_{fat}) am Brutto-QS berechnet.

Weil der erforderliche Nachweis am Netto-QS erfolgen muss, werden die berechneten maximalen Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma(Q_{fat})_{brutto}$ anschliessend mit Hilfe einer Exceltabelle „Querschnittswerte brutto / netto“ auf den Netto-QS umgerechnet. Der Nachweis für die Ermüdung lautet dann:

$$\Delta\sigma (Q_{fat})_{netto} = \Delta\sigma (Q_{fat})_{brutto} / \eta \leq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} = 0,74 \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf} \quad \eta = A_{netto} / A_{brutto} \text{ bzw. } I_{netto} / I_{brutto}$$

Für Stäbe, welche die obige Bedingung nicht erfüllen, sowie obligatorisch für Stäbe mit exzentrischem Anschluss (ey), folgt ein verfeinerter Nachweis mit den maximalen und minimalen Stabschnittkräften N , M_y , M_z am Netto-Querschnitt, dargestellt in Form von Tabellen:

$$\sigma_{fat,netto} = (N_{fat} / A_{netto}) \pm (M_{y,fat} z_r / I_{y,netto}) \pm (M_{z,fat} y_r / I_{z,netto})$$

Daraus können wiederum die maximalen Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma(Q_{fat})$ nach den oben stehenden Formeln berechnet und verglichen werden:

$$\Delta\sigma (Q_{fat})_{netto} \leq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} = 0,74 \Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}$$

- Flussstahl (genietet):
 $\Delta\sigma_D = 0,74 \Delta\sigma_c = 59 \text{ N/mm}^2$
- Flussstahl und Baustahl S235/S355 (geschraubt oder geschweisst):
 $\Delta\sigma_D$ je nach Konstruktionsdetail / Kerbfall in der Norm SIA 263, Anhang E

Der Widerstandsbeiwert beträgt $\gamma_{Mf} = 1,00$ bis $1,35$ je nach Schadensfolge (Norm SIA 263, Tabelle 11)

Für Flussstahl gilt demnach die folgende „sichere“ Grenzspannungsdifferenz:

$$\Delta\sigma (Q_{fat})_{netto} \leq \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf} = 59 / 1,35 = 43,7 \text{ N/mm}^2$$

Dieser Nachweis kann für fast alle Stäbe erbracht werden. Für diejenigen Stäbe, bei welchen dieser Nachweis nicht gelingt, wird der Widerstandsbeiwert direkt berechnet: $\gamma_{Mf} = \Delta\sigma_D / \Delta\sigma (Q_{fat})_{netto}$; je nach Grösse des vorhandenen Widerstandsbeiwertes γ_{Mf} und abhängig von Schadensfolge und Inspektionsmöglichkeit können dann für jeden dieser Stäbe die erforderlichen Massnahmen festgelegt werden, welche dann auch im Überwachungsplan festgehalten werden müssen.

Stufe II: Bei Bauteilen, wo die oben dargestellten Nachweise und Massnahmen nicht genügen, wird untersucht, was bei einem Ausfall von einzelnen Stäben geschieht, und zwar sowohl bezüglich Ermüdung wie auch bezüglich Tragsicherheit und Stabilität.

9 Bemessungslasten und Einwirkungskombinationen für die Ermüdung

Bemessungslasten

Nur die Beanspruchungen infolge der Tram- und Buslasten (neben den ständigen Lasten) sind ermüdungswirksam.

Eine Vergleichsberechnung hat gezeigt, dass nicht alle vorkommenden Tram- und Bustypen bei der Ermittlung der Beanspruchungen berücksichtigt werden müssen, sondern nur das Gewicht der künftigen Trambeschaffung [G9 + G10].

Die Bemessungslasten für den Ermüdungsnachweis wurden aus der Durchfahrt von 1 Tramzug welches sich mit einem Tramzug auf dem 2. Gleis kreuzt (mit 30% Nutzlast für Ermüdung) ermittelt.

- Tramzug 1. Gleis: F_{fat} = massgebender Bemessungswert Ermüdung (mit 4 Pers./m²)
 (1-spurig rechts) $F_{fat} = 574 \text{ kN} \times 1,0 + 238 \text{ kN} \times 1,0 = 812 \text{ kN}$
 $F_{fat} = Q_{fat} = \beta_{fat} F_{ideell} \rightarrow \beta_{fat} = F_{fat} / F_{ideell}$
 F_{ideell} = ideeller Wert der Einwirkung in den Lastfällen
 $F_{ideell} = 10 \times 105 \text{ kN} = 1'050 \text{ kN}$
 $\beta_{fat} = 812 \text{ kN} / 1'050 \text{ kN} = 0,78$
- Tramzug 2. Gleis: $F_{fat} = 574 \text{ kN} \times 1,0 + 238 \text{ kN} \times 1,0 \times 0,30 = 645,4 \text{ kN}$
 (1-spurig links) $F_{ideell} = 10 \times 105 \text{ kN} = 1'050 \text{ kN}$
 $\beta_{fat} = 645,4 \text{ kN} / 1'050 \text{ kN} = 0,62$

Einwirkungskombinationen

Grenzwertspezifikation:
Standard-Bemessungssituation:

Ermüdung
Erreichen der Ermüdungsfestigkeit
(Grenzzustand Typ 4)

Überbau ohne Fahrbahnplatte:

Modellfaktor $r = 0,80$
(0,90 nur für FLB) (= Faktor) Dynam. Beiwert
 $\Phi = 1,00$

Einwirkung			Einwirkungskombinationen mit Lastbeiwerten β_{fat}	
Nr	Name	Faktor	1	2
1	Eigenlasten	1.00	1.00	1.00
2	Auflasten	1.00	1.00	1.00
3	kün. Trambeschaffung 1-spurig rechts	0.80 (0.90)	0.78	0.62
4	kün. Trambeschaffung 1-spurig links	0.80 (0.90)	0.62	0.78

F_{ideell} = ideeller Wert der Einwirkung in den Lastfällen

β_{fat} = Lastbeiwert = F_{fat} / F_{ideell}

F_{fat} = massgebender Bemessungswert Ermüdung

Reduktionsfaktor für das 2. Gleis beim Kreuzen
 $k = \beta_2 / \beta_1$

Unterbau mit Stützen:

Modellfaktor $r = 1,00$ Dynam. Beiwert
 $\Phi = 1,10$ (= Faktor)

Einwirkung			Einwirkungskombinationen mit Lastbeiwerten β_{fat}	
Nr	Name	Faktor	1	2
1	Eigenlasten	1.00	1.00	1.00
2	Auflasten	1.00	1.00	1.00
3	kün. Trambeschaffung 1-spurig rechts	1.10	0.78	0.62
4	kün. Trambeschaffung 1-spurig links	1.10	0.62	0.78

Tabelle 3: Einwirkungskombinationen

ingenta ag ingenieure + planer

Ein Auszug der detaillierten Berechnung ist in den folgenden Tabellen dargestellt:

Tabelle 4: Auszug Querschnitte Axis

Tabelle 5: Zusammenzug / Übersicht Querschnittswerte

Superposition Tram West - 6.8 Ost																					
mit Faktor 0.6 für Druck																					
		1.0°West				1.0°Ost				0.86°West			0.86°Ost								
S \	Querschnitt	σ_{x1}	σ_{x2}	σ_{x3}	σ_{x4}	σ_{x1}	σ_{x2}	σ_{x3}	σ_{x4}	$\Delta\sigma_{max}$	$\Delta\sigma_{min}$	σ_{x1}	σ_{x2}	σ_{x3}	σ_{x4}	$\Delta\sigma_{max}$	$\Delta\sigma_{min}$				
		0.624°West + 0.496°Ost																0.496°West + 0.624°Ost		Gefährdung $\Delta\sigma_{max} > 43.7 \text{ MPa}$	
S \	Querschnitt	σ_{x1}	σ_{x2}	σ_{x3}	σ_{x4}	σ_{x1}	σ_{x2}	σ_{x3}	σ_{x4}	$\Delta\sigma_{max}$	$\Delta\sigma_{min}$	σ_{x1}	σ_{x2}	σ_{x3}	σ_{x4}	$\Delta\sigma_{max}$	$\Delta\sigma_{min}$				
333	UNP140(H/LT)	-3.11	-3.11	-3.11	-3.11	-16.59	-16.59	-16.58	-16.58	32.89	26.15	-10.17	-10.17	-10.16	-10.16	38.95	-11.89	-11.89	37.95	nicht ermüdungsgefährdet	
345	UNP140(H/LT)	-6.22	-6.22	-6.22	-6.22	-16.93	-16.93	-16.92	-16.92	35.57	24.97	-12.28	-12.28	-12.27	-12.27	40.20	-13.65	-13.65	38.63	nicht ermüdungsgefährdet	
419	UNP140(H/LT)	-3.46	-3.46	-3.45	-3.45	-16.59	-16.59	-16.58	-16.58	33.19	25.66	-10.38	-10.38	-10.38	-10.38	38.88	-12.07	-12.07	37.76	nicht ermüdungsgefährdet	
427	UNP140(H/LT)	-6.22	-6.22	-6.22	-6.22	-16.93	-16.93	-16.92	-16.92	35.07	24.97	-12.28	-12.28	-12.27	-12.27	39.84	-13.65	-13.65	38.34	nicht ermüdungsgefährdet	
501	HOTUG	-2.03	-2.03	-1.11	-1.11	-1.85	-1.85	-1.85	-1.85	20.26	39.15	-1.61	-1.61	-1.61	-1.61	37.27	-1.70	-1.70	40.08	nicht ermüdungsgefährdet	
503	HOTUG	-1.11	-1.11	-2.03	-2.03	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	36.93	25.34	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	41.41	-1.35	-1.35	39.69	nicht ermüdungsgefährdet	
504	HOTUG	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.66	28.50	-0.00	0.00	0.00	0.00	40.00	-0.00	0.00	41.61	nicht ermüdungsgefährdet	
508	HOTUG	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	27.56	35.16	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	40.36	-0.09	-0.09	41.48	nicht ermüdungsgefährdet	
505	HOTUG	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	28.09	34.38	-0.23	-0.23	-0.23	-0.23	42.01	-0.18	-0.18	41.15	nicht ermüdungsgefährdet	
551	HOTUG	-0.18	-0.18	-0.18	-0.18	0.31	0.31	0.31	0.31	27.40	34.92	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	40.08	0.04	0.04	41.20	nicht ermüdungsgefährdet	
557	HOTUG	-5.17	-5.17	-5.17	-5.17	-1.11	-1.11	-1.11	-1.11	35.13	25.02	-3.77	-3.77	-3.77	-3.77	39.92	-3.25	-3.25	38.42	nicht ermüdungsgefährdet	
604	UNP140(QT)	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	17.44	43.39	-0.60	-0.60	-0.60	-0.60	37.68	-0.56	-0.56	41.54	nicht ermüdungsgefährdet	
621	UNP140(QT)	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	37.94	19.62	-0.39	-0.39	-0.39	-0.39	38.84	-0.39	-0.39	36.12	nicht ermüdungsgefährdet	
692	UNP140(QT)	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	37.94	19.12	-0.39	-0.39	-0.39	-0.39	38.56	-0.39	-0.39	35.76	nicht ermüdungsgefährdet	
744	UNP140(QT)	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	37.65	19.62	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	38.63	-0.22	-0.22	35.95	nicht ermüdungsgefährdet	
758	UNP80	-3.38	-3.38	-3.38	-3.38	-1.04	-1.04	-1.04	-1.04	16.54	43.49	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38	37.09	-1.33	-1.33	41.33	nicht ermüdungsgefährdet	
758	UNP80	-3.04	-3.04	-3.04	-3.04	-15.22	-15.22	-15.20	-15.20	27.92	30.53	-9.45	-9.45	-9.44	-9.44	37.86	-11.00	-11.00	38.25	nicht ermüdungsgefährdet	
812	UNP140(QT)	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.35	-0.35	-0.35	37.65	19.12	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	38.34	-0.22	-0.22	35.59	nicht ermüdungsgefährdet	
813	UNP140(QT)	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38	-1.04	-1.04	-1.04	-1.04	16.54	43.49	-1.38	-1.38	-1.38	-1.38	37.09	-1.33	-1.33	41.10	nicht ermüdungsgefährdet	
817	UNP80	-3.04	-3.04	-3.04	-3.04	-15.22	-15.22	-15.20	-15.20	27.92	30.53	-9.45	-9.45	-9.44	-9.44	37.86	-11.00	-11.00	38.25	nicht ermüdungsgefährdet	

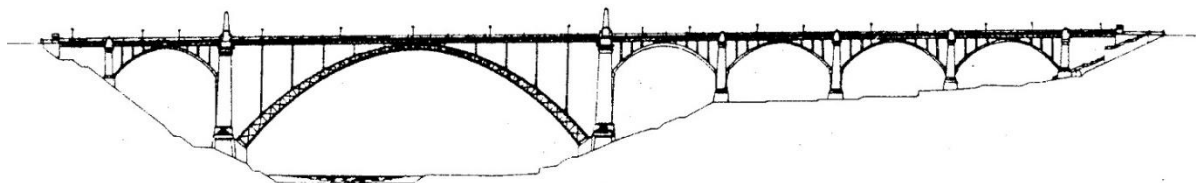
Superposition Tram West - Tram Ost																														
mit Faktor 0,6 für Druck																														
		1.0°West				1.0°Ost				0.86°West				0.86°Ost				Beiwerte Unterbau						Beiwerte Überbau						
S	Querschnitt	σ_{1u}	σ_{2u}	σ_{3u}	σ_{4u}	σ_{1u}	σ_{2u}	σ_{3u}	σ_{4u}	σ_{1u}	σ_{2u}	σ_{3u}	σ_{4u}	σ_{1u}	σ_{2u}	σ_{3u}	σ_{4u}	$\Delta\sigma_{1max}$	$\Delta\sigma_{2max}$	$\Delta\sigma_{3max}$	$\Delta\sigma_{4max}$	σ_{1u}	σ_{2u}	σ_{3u}	σ_{4u}	$\Delta\sigma_{1u}$	$\Delta\sigma_{2u}$	$\Delta\sigma_{3u}$	$\Delta\sigma_{4u}$	Gefährdung $\Delta\sigma_{max} > 43.74$ MPa
2	BOG-875	-8.31	-8.31	-8.31	-8.31	-2.47	-2.47	-2.47	-2.47	6.08	4.31	-8.83	-8.83	-8.83	-8.83	8.80	-7.78	-7.78	-7.78	-7.78	8.56	nicht ermüdungsfähig								
3	BOG-875	-1.83	-1.83	-1.83	-1.83	-7.62	-7.62	-7.62	-7.62	3.58	4.35	-6.75	-6.76	-6.76	-6.76	10.26	-7.80	-7.80	-7.80	-7.80	11.28	nicht ermüdungsfähig								
4	BOG-875	-5.29	-5.29	-5.29	-5.29	-5.24	-5.24	-5.24	-5.24	6.90	6.85	-8.11	-8.11	-8.11	-8.11	12.31	-8.10	-8.10	-8.10	-8.10	12.30	nicht ermüdungsfähig								
7	BOG-850	-1.63	-1.63	-1.63	-1.63	-6.79	-6.79	-6.79	-6.79	3.21	7.55	-6.02	-6.02	-6.02	-6.02	9.17	-6.95	-6.95	-6.95	-6.95	10.08	nicht ermüdungsfähig								
8	BOG-850	-4.69	-4.69	-4.69	-4.69	-4.67	-4.67	-4.67	-4.67	6.14	6.12	-7.20	-7.20	-7.20	-7.20	10.98	-7.20	-7.20	-7.20	-7.20	10.97	nicht ermüdungsfähig								
11	BOG-850	-1.34	-1.34	-1.34	-1.34	-5.99	-5.99	-5.99	-5.99	2.93	6.86	-5.22	-5.22	-5.22	-5.22	8.36	-6.06	-6.06	-6.06	-6.06	9.18	nicht ermüdungsfähig								
12	BOG-850	-3.86	-3.86	-3.86	-3.86	-4.21	-4.21	-4.22	-4.22	5.33	5.64	-6.18	-6.18	-6.19	-6.19	9.79	-6.25	-6.25	-6.25	-6.25	9.85	nicht ermüdungsfähig								
15	BOG-825	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	2.39	6.85	-6.24	-6.24	-6.24	-6.24	9.90	-6.31	-6.31	-6.31	-6.31	9.91	nicht ermüdungsfähig								
16	BOG-825	-3.90	-3.90	-3.90	-3.90	-4.26	-4.26	-4.26	-4.26	5.39	5.70	-6.24	-6.24	-6.24	-6.24	9.90	-6.31	-6.31	-6.31	-6.31	9.96	nicht ermüdungsfähig								
20	BOG-825	-3.65	-3.65	-3.65	-3.65	-3.57	-3.57	-3.57	-3.57	4.85	4.78	-5.57	-5.57	-5.57	-5.57	8.64	-5.55	-5.55	-5.55	-5.55	8.62	nicht ermüdungsfähig								
24	BOG-800	-3.69	-3.69	-3.69	-3.69	-3.62	-3.62	-3.62	-3.62	4.91	4.85	-5.63	-5.63	-5.63	-5.63	8.74	-5.62	-5.62	-5.62	-5.62	8.73	nicht ermüdungsfähig								
40	BOG-750	-4.03	-4.03	-4.03	-4.03	-4.03	-4.03	-4.03	-4.03	5.49	5.47	-6.21	-6.21	-6.21	-6.21	9.82	-6.21	-6.21	-6.21	-6.21	9.81	nicht ermüdungsfähig								
66	BOG-D-V	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-4.49	-4.49	-4.49	-4.49	4.81	5.85	-3.65	-3.65	-3.65	-3.65	9.43	-4.34	-4.34	-4.34	-4.34	9.65	nicht ermüdungsfähig								
101	BG-STUTZ	-7.15	-7.15	-7.15	-7.15	-3.35	-3.35	-3.35	-3.35	6.15	3.71	-8.43	-8.43	-8.43	-8.43	8.77	-7.74	-7.74	-7.74	-7.74	8.17	nicht ermüdungsfähig								
103	BG-STUTZ	-6.70	-6.70	-6.70	-6.70	-3.72	-3.72	-3.72	-3.72	6.30	3.74	-8.30	-8.30	-8.30	-8.30	9.25	-7.76	-7.76	-7.76	-7.76	8.72	nicht ermüdungsfähig								
106	BG-STUTZ	-8.42	-8.42	-8.42	-8.42	-2.23	-2.23	-2.23	-2.23	6.28	3.84	-8.76	-8.76	-8.76	-8.76	8.71	-7.64	-7.64	-7.64	-7.64	8.30	nicht ermüdungsfähig								
106	BG-STUTZ	-1.49	-1.49	-1.49	-1.49	-7.60	-7.60	-7.60	-7.60	3.31	8.45	-6.45	-6.45	-6.45	-6.45	9.99	-7.55	-7.55	-7.55	-7.55	11.01	nicht ermüdungsfähig								
107	BG-STUTZ	-5.81	-5.81	-5.81	-5.81	-4.84	-4.84	-4.84	-4.84	3.73	6.19	-8.29	-8.29	-8.29	-8.29	12.03	-8.11	-8.11	-8.11	-8.11	11.83	nicht ermüdungsfähig								
111	BG-STUTZ	-4.84	-4.84	-4.84	-4.84	-2.90	-2.90	-2.90	-2.90	5.55	3.78	-6.14	-6.14	-6.14	-6.14	8.54	-5.79	-5.79	-5.79	-5.79	8.17	nicht ermüdungsfähig								
115	BG-STUTZ	-5.44	-5.44	-5.44	-5.44	-3.13	-3.13	-3.13	-3.13	5.74	3.76	-6.80	-6.80	-6.80	-6.80	8.71	-6.39	-6.39	-6.39	-6.39	8.30	nicht ermüdungsfähig								

Die Ergebnisse der periodischen zerstörungsfreien Prüfungen dienen als Basis bzw. Referenz für die Folge-Inspektion(en), um den Verlauf des Zustandes (Bsp. voranschreitende Schäden) frühzeitig erkennen und entsprechende Massnahmen treffen zu können.

Die Tragelemente im Überbau der fünf kleinen Bögen und des grossen Bogens, welche bezüglich Risse, periodisch gemäss [G11] (Anzahl und Ausmass) zu untersuchen sind, sind in den folgenden Abbildungen definiert.

Übersicht, Blickrichtung gegen Westen:

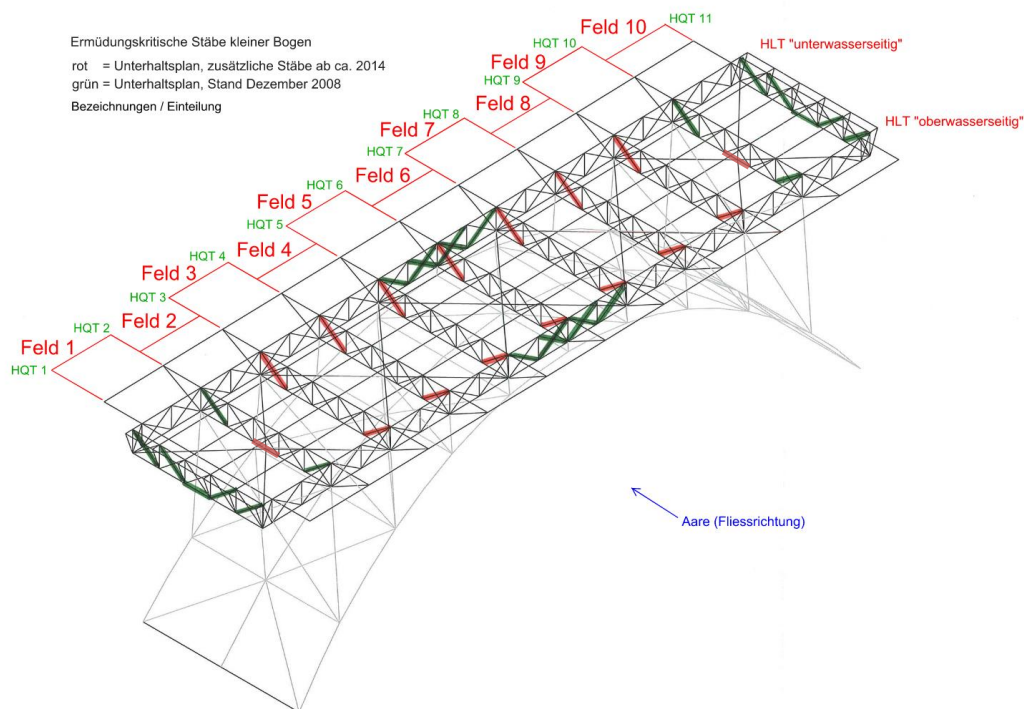
← gegen Süden, Richtung Zytglogge gegen Norden, Richtung Kursaal →



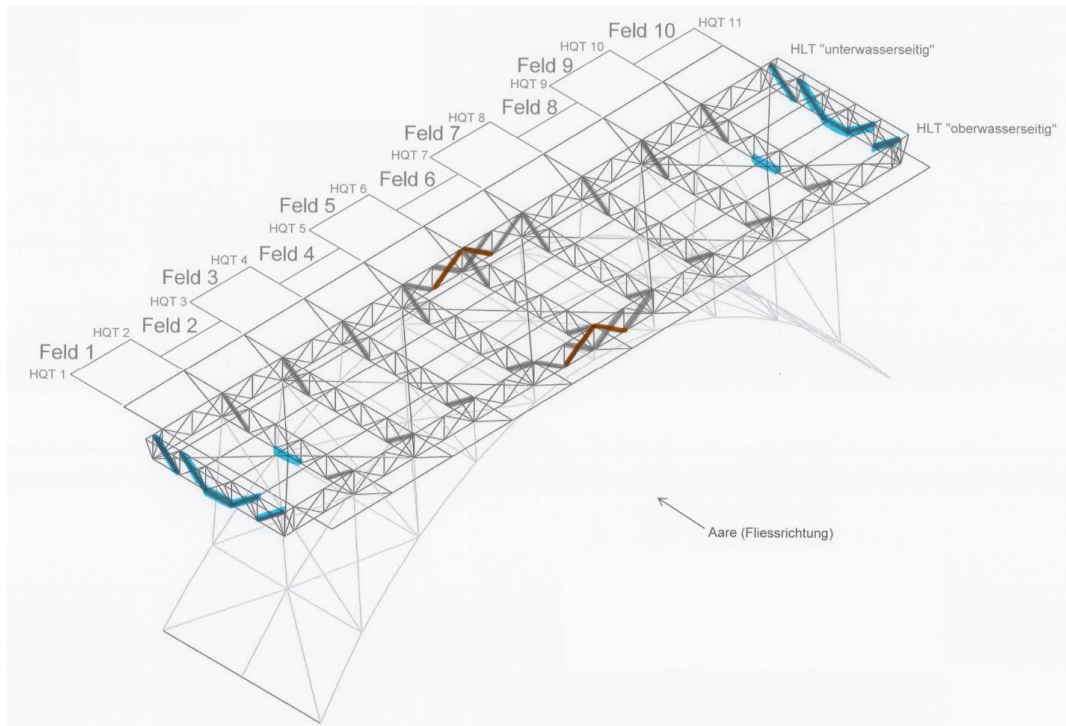
I	II	Pfeiler-Nummern	III	V	VI	VII	VIII
← grosser Bogen →				← → kleiner Bogen (5 x)			

Bei allen kleinen Bögen sind in den beiden Hauptlängsträgern (HLT) 12 Diagonalen, sowie in allen Querträgern (QT) 4 Untergurte und 26 Diagonalen, die mittels Sichtprüfungen zu überwachen sind. Hierbei sind 16 Zugdiagonalen, in den beiden End-, Zwischenquerträgern und Hauptlängsträgern besonders gefährdet. Siehe hierzu folgende Darstellung.

Sichtprüfung der kritischen Stäbe (42 Stück):

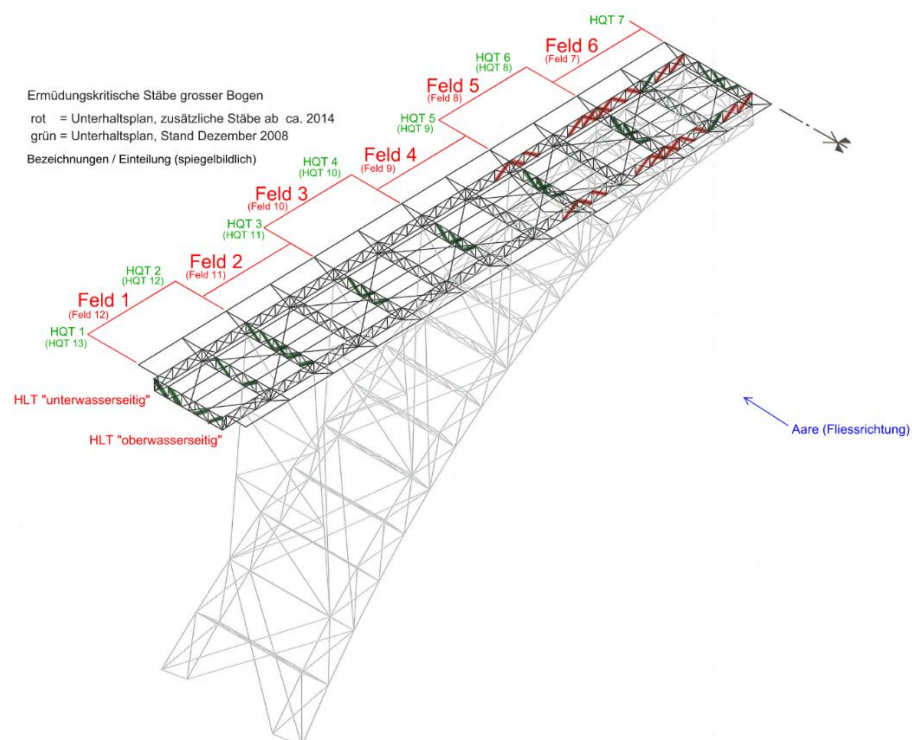


Prüfung der besonders kritischen Stäbe (16 Stück) mithilfe digitaler Röntgentechnik:

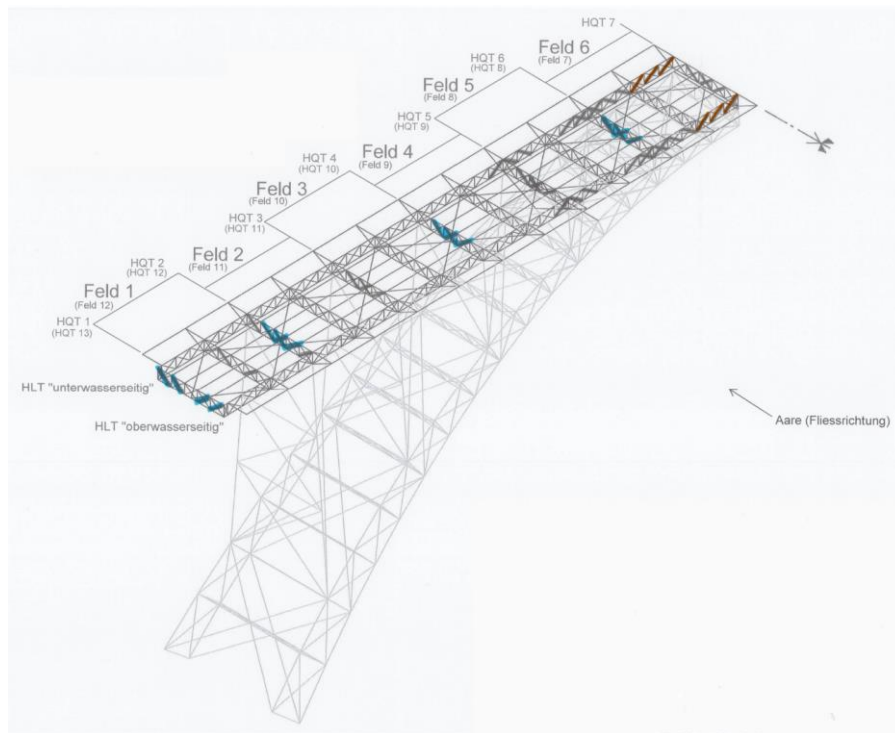


Beim grossen Bogen sind in den beiden Hauptlängsträgern 52 Diagonalen, sowie in den vorhandenen 15 Querträgern insgesamt 60 Diagonalen ebenfalls mittels Sichtprüfungen zu überwachen, wobei auch hier 44 Zugdiagonalen in den beiden Endquerträgern besonders kritisch sind. Siehe hierzu die nachfolgenden Darstellungen (Darstellung halber Bogen):

Sichtprüfung der kritischen Stäbe (112 Stück):



Prüfung der besonders kritischen Stäbe (44 Stück) mithilfe digitaler Röntgentechnik:



11 Schlussfolgerung und weiteres Vorgehen

Die Ermüdungssicherheit kann entsprechend den Vorgaben der Nutzungsvereinbarung und unter Berücksichtigung der zukünftigen Trambeschaffungen als genügend nachgewiesen werden. Unter diesen Voraussetzungen sind keine erforderlichen Sofortmassnahmen an einzelnen Tragwerksteilen erforderlich.

Im 2. Q 2021 finden die zerstörungsfreien Prüfungen an den besonders kritischen Stäben statt (digitale Röntgentechnik). Werden Veränderungen festgestellt, so sind die detaillierten Angaben und Vorschriften gemäss Überwachungsplan [G11] umzusetzen.

Für das Projekt «Gleisersatz und Sanierung 2024» ist davon auszugehen, dass an ca. 50 Stäben Er-
tüchtigungsmassnahmen umzusetzen sind.