



## Kornhausbrücke Bern

### Projektbasis

Stand: 05. März 2021

#### Grundlage für das Projekt «Gleisersatz und Sanierung 2024»

Die Projektbasis ist die fachbezogene Beschreibung der bauwerkspezifischen Umsetzung der Nutzungsvereinbarung und umschreibt:

- die geplante Nutzungsdauer
- die betrachteten Nutzungszustände
- die Abmessungen, Bausoffeigenschaften und Konstruktionsdetails
- die betrachteten Gefährdungsbilder
- die Anforderungen an Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit
- die wesentlichen Annahmen für die Tragwerks- und Berechnungsmodelle
- die akzeptierten Risiken

Die Projektbasis ist während der Tragwerksanalyse laufend anzupassen und zu ergänzen.

#### Separate Dokumente:

- Nutzungsvereinbarung Kornhausbrücke, Juni 2007, mit Nachführung vom März 2021
- Abmessungen und Zeichnungen aller Fahrzeuge gem. Tragwerksanalyse vom Dez. 2008

Inhaltsverzeichnis:	Seite
1. Allgemeines .....	3
1.1 Nutzungsziele .....	3
1.2. Geplante Nutzungsdauer .....	3
1.3 Vereinbarte Nutzungszustände .....	3
1.3.1 Bestehender Verkehr .....	3
1.3.2 Erhaltungsarbeiten an der Brücke .....	3
1.3.3 Zulassung neuer Tramtypen .....	4
1.4 Grundlagen .....	4
2. Tragwerkskonzept, Konstruktionsdetails und Modellbildung .....	5
2.1 Bestehendes Gesamttragwerk.....	5
2.2 Grosser Bogen .....	5
2.3 Kleiner Bogen .....	8
2.4 Endfelder .....	11
2.5 Fahrbahnplatte .....	13
2.6 Wesentliche Berechnungsannahmen .....	14
3. Baustoffe .....	15
3.1 Vorhandene Materialien .....	15
3.2. Neue Materialien (eingebaut 1997) .....	15
4. Definition der Einwirkungen .....	16
4.1 Eigenlasten .....	16
4.2 Auflasten .....	16
4.3 Einwirkungen aus dem Baugrund .....	16
4.4 Verkehrslasten .....	16
4.5 Schnee .....	16
4.6 Wind .....	17
4.7 Temperatur .....	17
4.8 Reibungs- und Rückstellkräfte von Lagern .....	17
4.9 Entgleisung .....	17
4.10 Anprall auf Leitschranken .....	17
4.11 Erdbeben .....	17
4.12 Umwelt .....	17
5. Nachweis der Tragsicherheit .....	17
5.1 Gefährdungsbilder .....	18
5.2 Akzeptierte Risiken .....	20
5.3 Nachweiskonzept Tragsicherheit .....	21
5.3.1 Zugstäbe .....	21
5.3.2 Druckstäbe .....	21
5.3.3 Druckstäbe mit Biegung .....	21
5.3.4 Biegestäbe mit Querkraft (Zwischenlängsträger ZLT) .....	22
5.3.5 Knotenbleche .....	22
5.3.6 Lochleibung .....	22
5.3.7 Abscheren .....	22
5.3.8 Schweissverbindungen .....	23
5.3.9 Sekundäre Bauteile .....	23
5.4 Fahrbahnplatte .....	23
6. Nachweis der Ermüdungssicherheit .....	23
6.1 Einwirkungen .....	23
6.2 Nachweiskonzept Ermüdungssicherheit .....	24
7. Gebrauchstauglichkeit .....	24
8. Genehmigung .....	25
Anhang 1 Betriebslasten des öffentlichen Verkehrs .....	26
Anhang 2 Belastungsgeschichte der bisherigen und zukünftigen Tramüberfahrten .....	28
Anhang 3 Lastanordnung für öffentlichen und Individualverkehr .....	31

## 1. Allgemeines

### 1.1 Nutzungsziele

Die bestehende Kornhausbrücke soll weiterhin vom öffentlichen (inkl. Feuerwehr, Tiefbauamt und Abfallentsorgung) und privatem Verkehr sowie als Träger für Werkleitungen genutzt werden und die wichtige Verbindung zwischen Stadtzentrum und Nordquartier sicherstellen.

Der private Schwerverkehr und Militärverkehr ist auf 10 to Gesamtgewicht beschränkt.

### 1.2 Geplante Nutzungsdauer

Das Gesamtbauwerk weist bereits ein Alter von 123 Jahren auf. Die weitere Nutzungsdauer ist zu 64 Jahren festgelegt (bis 2085).

Alle Bauteile, die zukünftig speziell beobachtet oder ersetzt werden müssen, erscheinen im Überwachungs- und Unterhaltsplan; *diese Dokumente wurden erst später erstellt, als die Konsequenzen aus der Tragwerksanalyse vorlagen.*

Die geplante Nutzungsdauer ist mit den erforderlichen Unterhaltsmassnahmen (Unterhalts- und Überwachungsplan) sowie mit der Einhaltung und Kontrolle der Nutzungsanweisungen sicherzustellen. Bei ungenügendem Unterhalt ist mit Nutzungseinschränkungen zu rechnen, und es ist die Restlebensdauer zu ermitteln.

### 1.3 Vereinbarte Nutzungszustände

Eine Nutzungsvereinbarung über das ganze Strassennetz der Stadt Bern muss zwischen Bernmobil, der Stadt und dem Kanton ausgehandelt werden. Im Falle der Kornhausbrücke gilt das Folgende:

#### 1.3.1 Bestehender Verkehr

Brücke für gemischten Verkehr, d.h.:

- Fussgänger, Radfahrer.
- Öffentlicher Verkehr wie Tram, Bus, Spezialfahrzeuge (Strassenunterhalt, Abfallentsorgung, Feuerwehr, Polizei, Sanität).
- Individualverkehr mit Gewichtsbeschränkung auf max. 10 to Gesamtgewicht, d.h. keine Ausnahme- oder Schwertransporte.
- Militärlasten bis 10 to Gesamtgewicht.

Die bestehende Aufteilung der Gesamtbrückenbreite in die einzelnen Verkehrsflächen (Gehwege/Fahrbahn) wird beibehalten, ebenso die Lage der Tramschienen. Keine Markierungen und keine separaten Velospuren.

Geschwindigkeitsbegrenzung auf max. 40 km/h mit Signalisation. Für den Trambetrieb gilt gemäss Geschwindigkeitsreglement von BERNMOBIL auf der Brücke 30 km/h.

#### 1.3.2 Erhaltungsarbeiten an der Brücke

Nutzungseinschränkungen sind möglicherweise notwendig bei Erhaltungsarbeiten mit zusätzlichen Gerüstlasten (z.B. für die Erneuerung des Korrosionsschutzes). Die Angaben dazu werden nach der Tragwerksanalyse festgelegt und in den Überwachungs- und Unterhaltsplan aufgenommen.

### 1.3.3 Zulassung neuer Tramtypen

Die Zunahme des langfristig zu erwartenden Verkehrsvolumens beim öffentlichen Verkehr muss sichergestellt werden mit den folgenden Möglichkeiten:

- Erhöhung der Kapazität durch Einführung von Tramzügen mit 45 m Länge.
- Erhöhung der Achslast von Tramfahrzeugen auf max. 10 to (Festlegung der Nutzlast nach AB-EBV: 8 Personen à 59,5 kg / m<sup>2</sup> Stehplatzfläche), bzw. max. 8,3 to (Höchstlast nach Bernmobil: 4 Personen à 70 kg / m<sup>2</sup> Stehplatzfläche).

*Neue Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs müssen vom verantwortlichen Fachmann (zuständig für die Sicherheit des Tragwerks) genehmigt und im Anhang 1 ergänzt werden.*

### 1.4 Grundlagen

Nutzungsvereinbarung vom November 2007 (nachgeführt 2021)

Nutzungsplan vom November 1993, rev. Dezember 1999

Sicherheitsplan vom November 1993, rev. Dezember 1999

Sämtliche SIA-Normen und Empfehlungen sowie die VSS-Normen, insbesondere

- SIA 260 (2013) Grundlagen der Projektierung von Tragwerken
- SIA 261 (2020) Einwirkungen
- SIA 262 (2013) Betonbau
- SIA 263 (2013) Stahlbau
- SIA 264 (2014) Verbundbau
- SIA 267 (2013) Geotechnik
- SIA 269 (2011) Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken

Planmaterial aus dem Archiv des Tiefbauamtes der Stadt Bern:

- Originale Konstruktionspläne, 1895 - 1898

Pläne der Gesamterneuerung Kornhausbrücke 1997/98 des Ingenieurbüros Hager + Bettschen (vormals Wanzenried + Hager), gemäss Planverzeichnis in den Brückenakten Hauptdossier

Ausführungs-Statik der Gesamterneuerung

Lastangaben und Abmessungen der Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs (siehe Anhang 1 und Dokument "Abmessungen und Zeichnungen aller Fahrzeuge")

Richtlinie für die Beurteilung von genieteten Eisenbahnbrücken, SBB (I-AM 08/02), Juni 2002

Richtlinien für die Ausführung von Leitschranken, Bundesamt für Strassenbau ASTRA

Richtlinien für konstruktive Einzelheiten von Brücken, Bundesamt für Strassenbau, 1990

Messungen an der Kornhausbrücke, EPFL ICOM, Bericht Nr. IC 934-2, 19.02.2007

Bericht „Beurteilung der Ermüdungssicherheit der Fahrbahnplatte im Hinblick auf höhere Tramlasten“, Prof. Dr. E. Brühwiler, EPFL, vom 14. Dezember 2005

Korrespondenz zwischen Hager + Bettschen und den Experten der EPFL

Tragwerksanalyse im Zusammenhang mit der Einführung von neuen Tramtypen, Dez. 2008

Lastmodell für künftige Trambeschaffungen, Nov. 2017

## 2. Tragwerkskonzept, Konstruktionsdetails und Modellbildung

### 2.1 Bestehendes Gesamttragwerk

Die Kornhausbrücke besteht aus den acht unabhängigen Teiltragwerken:

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

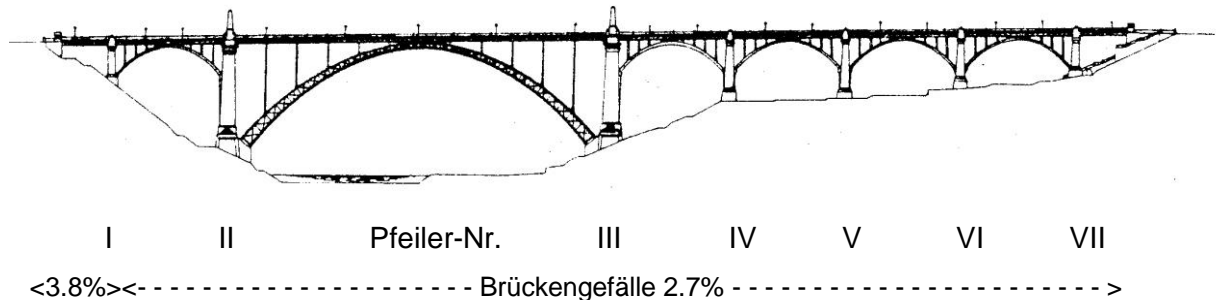


Abbildung 1: Ansicht Kornhausbrücke

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 begehbar. 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).

### 2.2. Grosser Bogen

*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 Bögen 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 und in Längsrichtung frei beweglich gestützt sind:

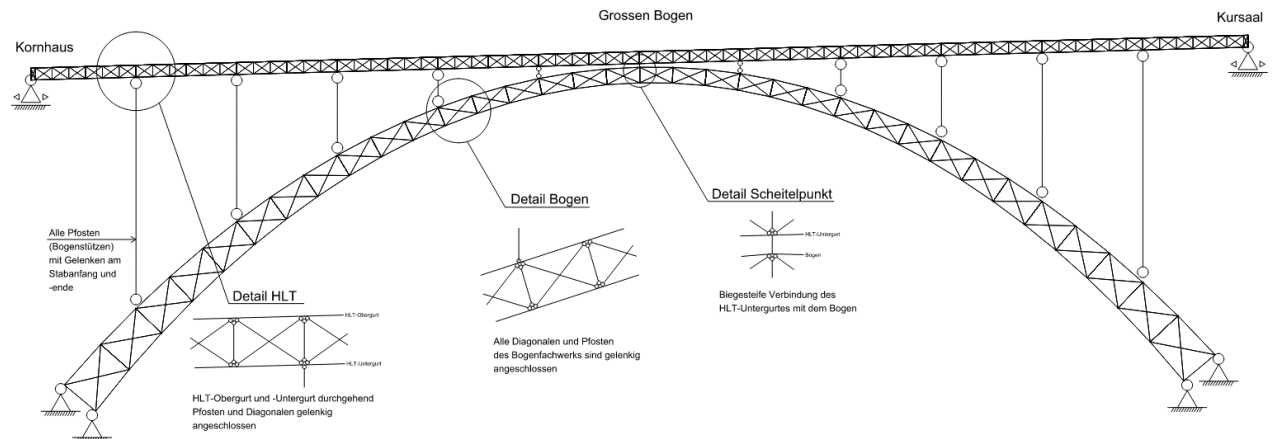
- Beidseitig je zwei aussenliegende durchlaufende Hauptlängsträger (HLT), mit Spannweiten von je 10.34 m zwischen den elf Bogenstützen, 10.78 m im Endfeld zum Pfeiler II bzw. III.
- Hauptquerträger (HQT) im Abstand von 5.17 m, mit einer Spannweite von 8.00 m zwischen den Hauptlängsträgern. Jeder zweite Hauptquerträger wird von den Bogenstützen direkt getragen.
- Vier Zwischenlängsträger (ZLT) mit einer Spannweite von 5.17 m zwischen den Querträgern.
- Alte Zwischenquerträger (ZQT) und Buckelbleche, welche bei der Gesamterneuerung 1997 entfernt worden und deshalb nicht mehr wirksam sind.
- Aussen an HLT und HQT angeschlossene Gehweg-Konsolfachwerke, verbunden durch die Gehweg-Randträger, welche die aufgesetzte Betonplatte (ohne Verbund) 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; damit kann für den Stabilitätsnachweis die Knicklänge der Diagonalen reduziert werden: Knicken aus der Fachwerkebene  $L_k = 0,5 \times L_{\text{Diag}}$  bzw. in der Fachwerkebene  $L_k = 0,4 \times L_{\text{Diag}}$ .

Die HLT wirken als "Durchlaufträger", die HQT als "einfache Balken". Die Obergurte werden durch die Betonplatte (voller Verbund) gehalten; dadurch ist Knicken nicht möglich. 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 5.17 m 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; der Nachweis der zugfesten Verbindung wird in der Tragwerksanalyse erbracht.

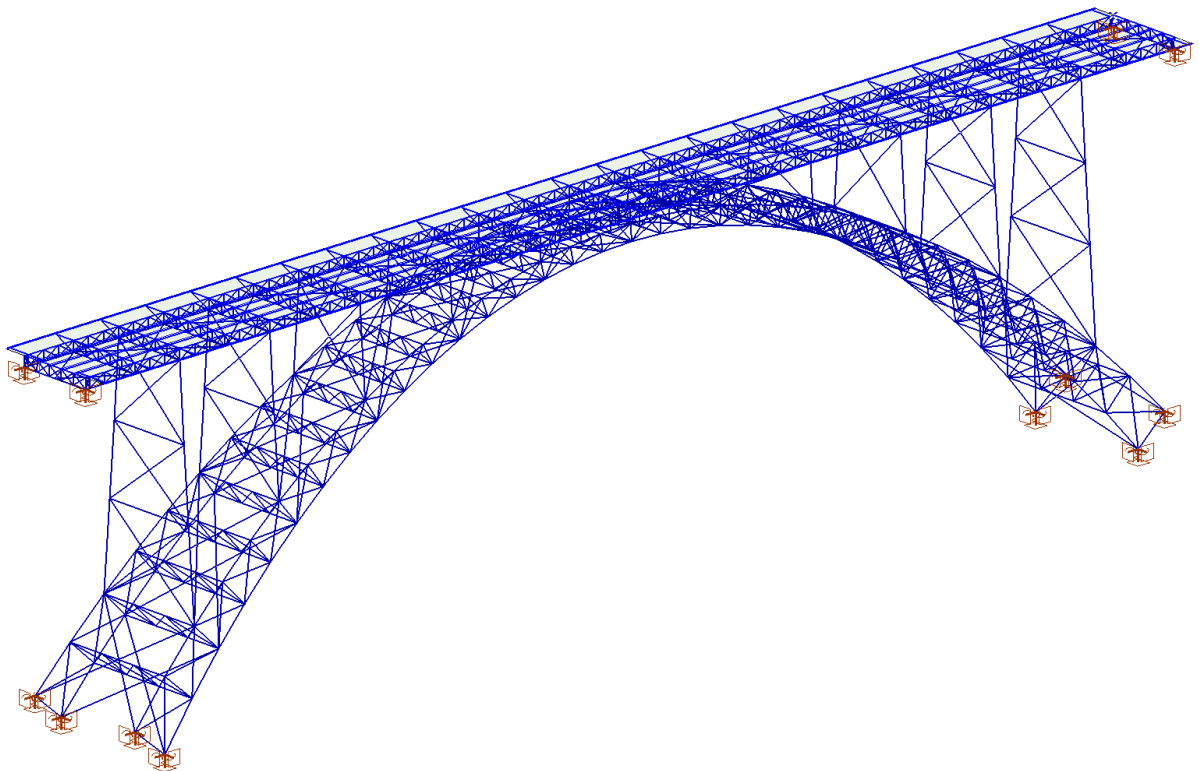
Die horizontalen Windverbände auf Höhe der Untergurte wurden bei der Gesamterneuerung von 1997 belassen, sie haben jedoch nur eine aussteifende Wirkung für einzelne Querträger. Die horizontalen Beanspruchungen werden von der neuen Fahrbahnplatte via HLT und Bogenscheitel in den Unterbau bzw. in die massiven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

*Modellbildung und statisches System:***Abbildung 2: Statisches System Grosser Bogen**

Das ganze Tragwerk des grossen Bogens mit aufgesetztem Überbau wird als räumliches Stabsystem mit den oben erwähnten Exzentrizitäten formuliert. 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 Obergurte der HLT und HQT werden als Verbundquerschnitte eingeführt, an welchen auch die Berechnung der Spannungen erfolgt.

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



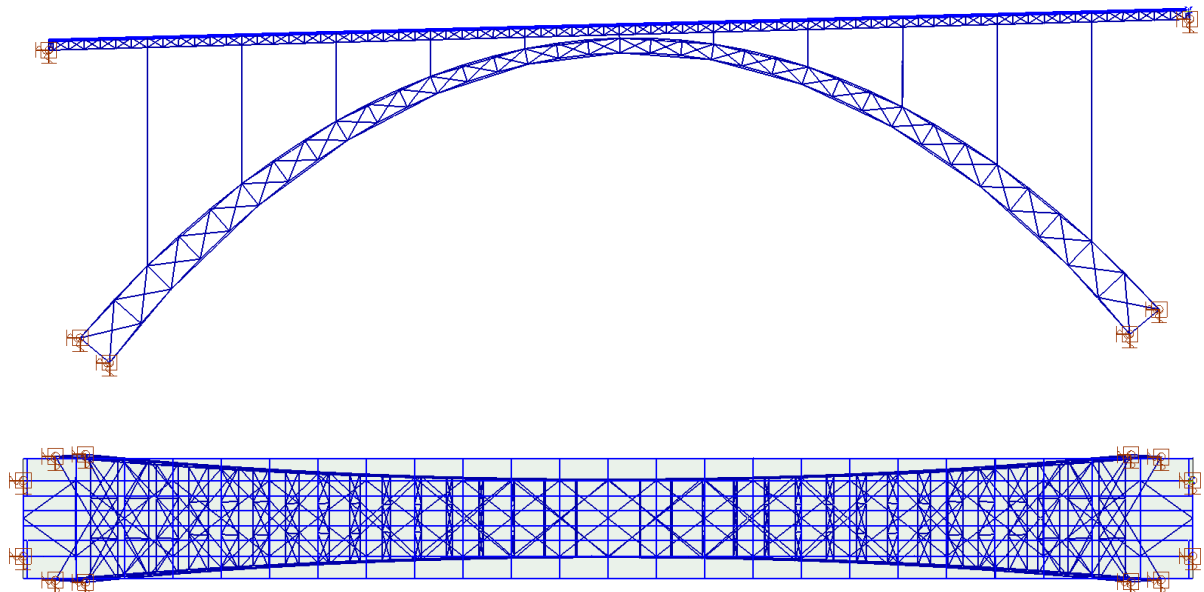


Abbildung 3: Isometrie (o.), Ansicht (m.) und Draufsicht (u.) des Grossen Bogens

### 2.3. Kleiner Bogen

#### *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 ein 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 und in Längsrichtung frei beweglich gestützt sind:

- 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.
- Alte Zwischenquerträger (ZQT) und Buckelbleche, welche bei der Gesamterneuerung 1997 entfernt worden und deshalb nicht mehr wirksam sind.
- Aussen an HLT und HQT angeschlossene Gehweg-Konsolfachwerke, verbunden durch die Gehweg-Randträger, welche die aufgesetzte Betonplatte (ohne Verbund) 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; der Nachweis der zugfesten Verbindung wird in der Tragwerksanalyse erbracht.



Die horizontalen Windverbände auf Höhe der Untergurte wurden bei der Gesamterneuerung von 1997 belassen, sie haben die gleiche Funktion wie beim grossen Bogen.

#### Modellbildung und statisches System:

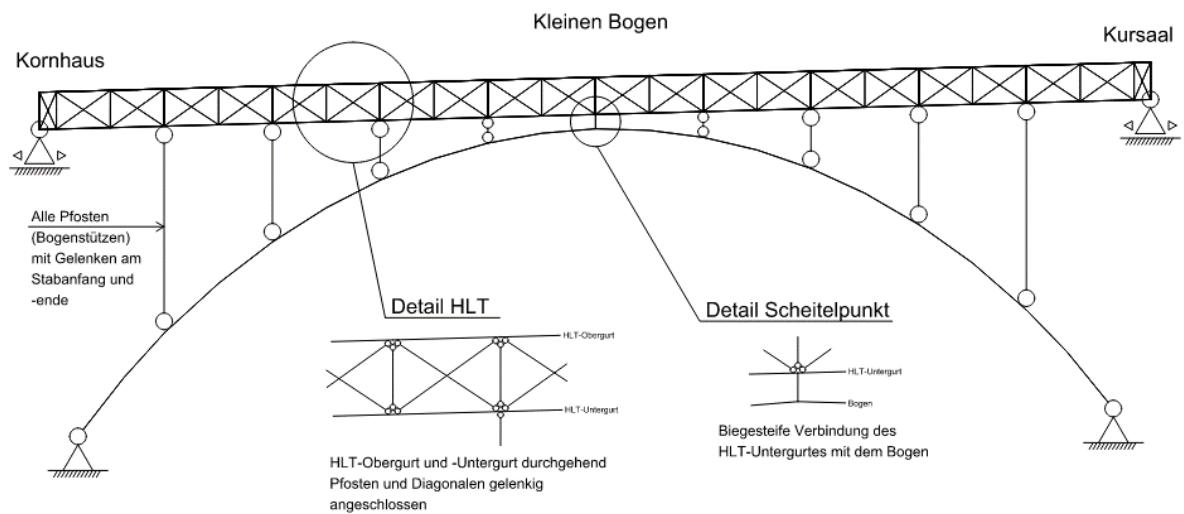
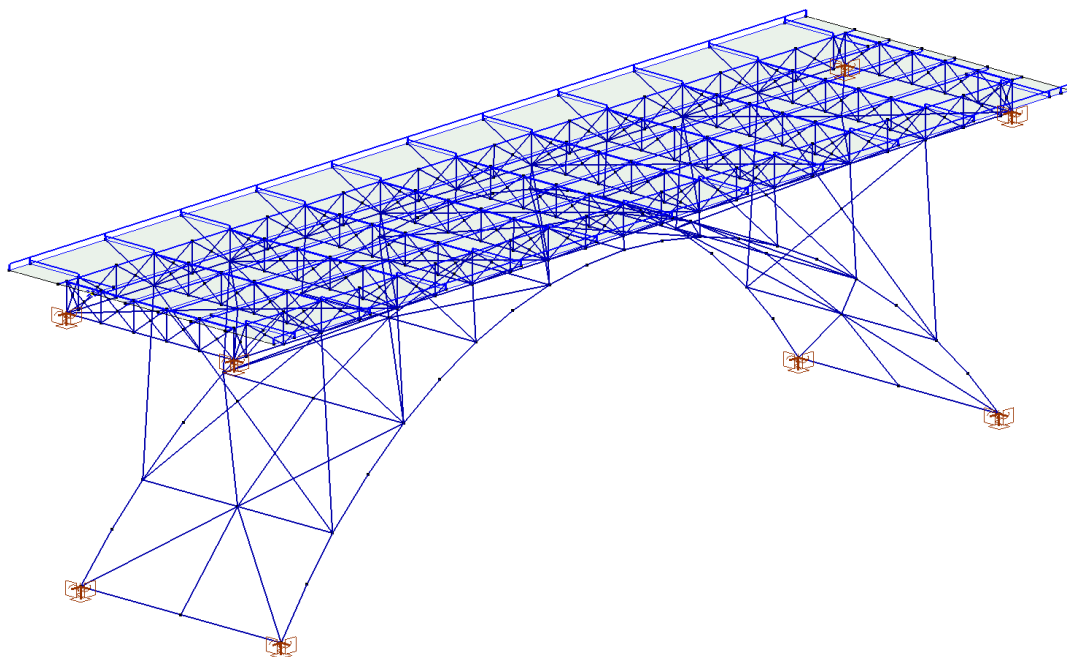


Abbildung 4: Statisches System Kleiner Bogen

Das ganze Tragwerk des kleinen Bogens mit aufgesetztem Überbau wird als räumliches Stabsystem mit den oben erwähnten Exzentrizitäten formuliert. 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 Obergurte der HLT und HQT werden als Verbundquerschnitte eingeführt, an welchen auch die Berechnung der Spannungen erfolgt, unter Berücksichtigung der Belastungsgeschichte.

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



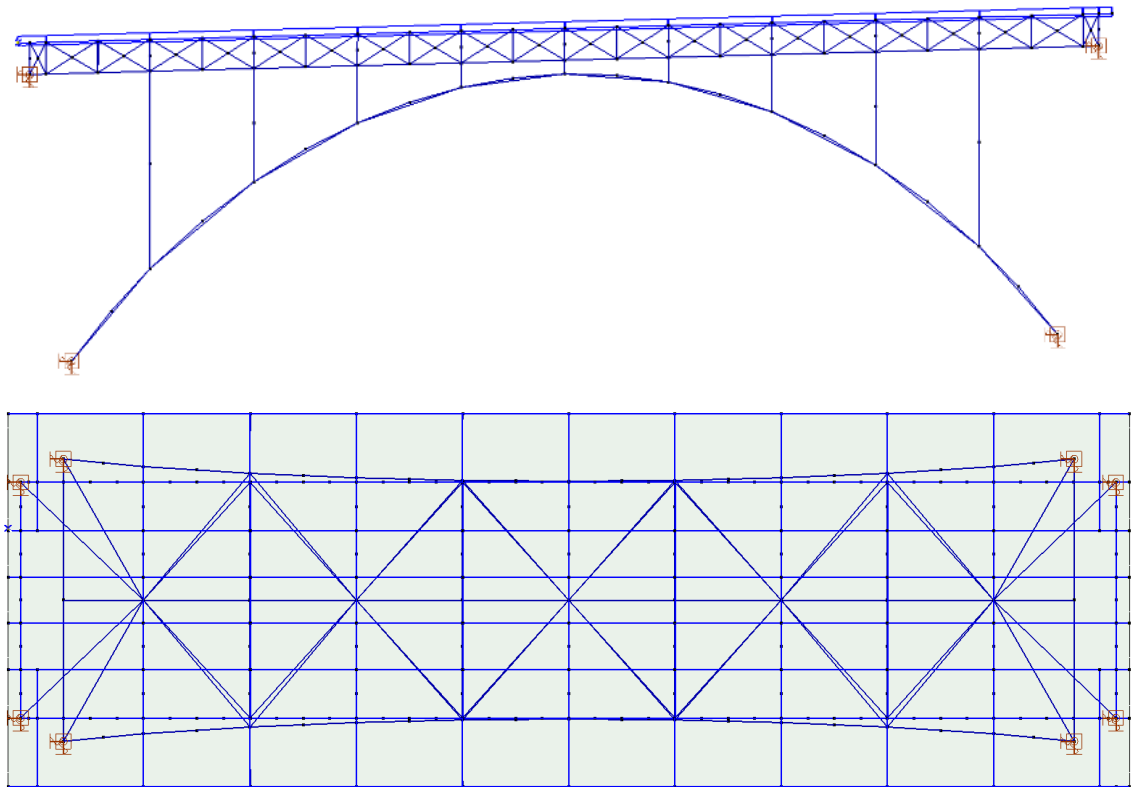


Abbildung 5: Isometrie (o.), Ansicht (m.) und Draufsicht (u.) Kleiner Bogen

## 2.4 Endfelder

### *Beschreibung des Tragwerks:*

Das Endfeld besteht aus einfachen Balken, die beim Endwiderlager und beim massiven Pfeiler starr gestützt sind, 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.
- Alte Zwischenquerträger (ZQT) und Buckelbleche, welche bei der Gesamterneuerung 1997 entfernt worden und deshalb nicht mehr wirksam sind.
- Aussen an HLT und QT angeschlossene Gehweg-Konsolfachwerke, verbunden durch die Gehweg-Randträger, welche die aufgesetzte Betonplatte (ohne Verbund) 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:*

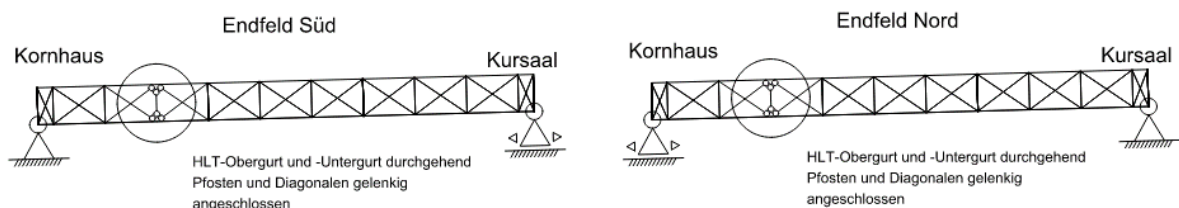


Abbildung 6: Statisches System Endfeld

Das ganze Tragwerk des Endfeldes wird als räumliches Stabsystem mit den oben erwähnten Exzentrizitäten formuliert. 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 Obergurte der HLT und HQT werden als Verbundquerschnitte eingeführt, an welchen auch die Berechnung der Spannungen erfolgt, unter Berücksichtigung der Belastungsgeschichte.

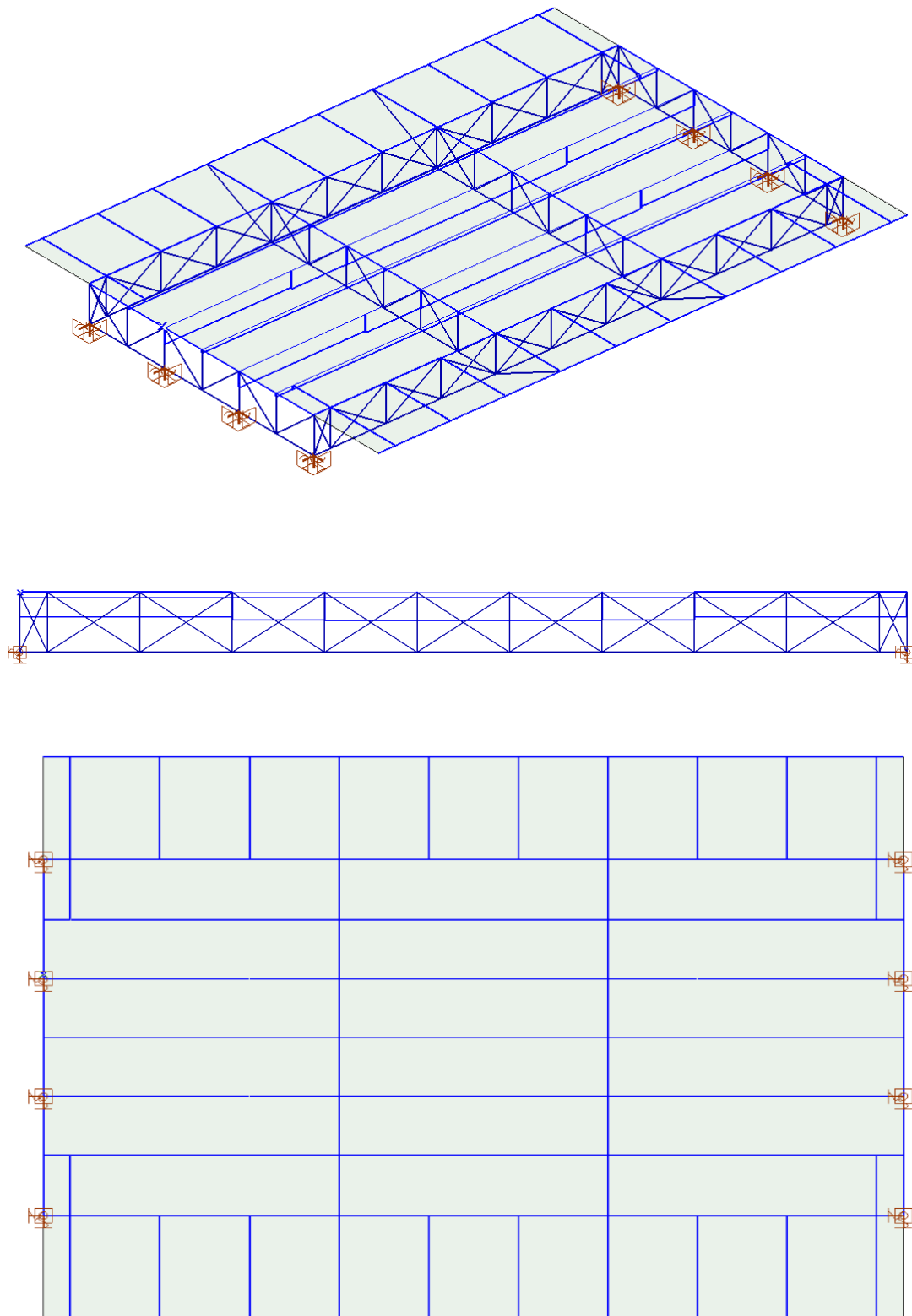


Abbildung 7: Isometrie (o.), Ansicht (m.) und Draufsicht (u.) eines Endfeldes

## 2.5 Fahrbahnplatte

### *Beschreibung des Tragwerks:*

Über die ganze Brückenlänge weist die Fahrbahnplatte aus Stahlbeton die gleichen Abmessungen und Eigenschaften auf:

- Breite 8.80 m
- Stärke minimal 20.8 cm, zur Brückenachse hin auf 24.8 cm anwachsend (Dachgefälle)
- Dilatationsfugen nur bei den massiven Pfeilern
- Betonqualität: B 40/30 CEM I 42.5, frostbeständig (entspricht heute C30/37 XF4)
- Bewehrungsstahl: S 500 (entspricht heute B500B)
- Voller Verbund mit den Träger-Obergurten

### *Modellbildung und statisches System:*

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

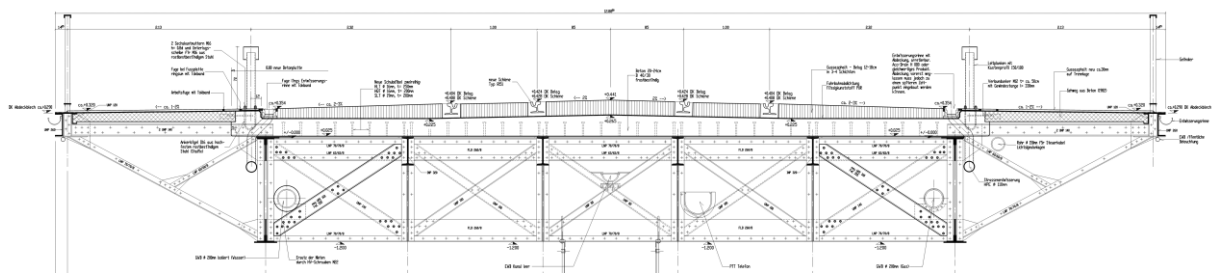


Abbildung 8: heutiger Brückenquerschnitt (Stand März 2021)

## 2.6 Wesentliche Berechnungsannahmen

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:  

$$e_{y,\text{effektiv}} = 0,50 e_{y,\text{theoretisch}} \quad (e_y \text{ berechnet am Bruttoquerschnitt}).$$
- Der dynamische Beiwert (Stosszuschlag) für die konzentrierten Lasten des Individ.-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:
  - 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 d. Unterbaus:  $1 \leq \Phi = 1,44 / [(l_\phi)^{1/2} - 0,2] + 0,82 \leq 1,67$  für Tragsicherheit und Ermüdung, mit  $l_\phi$  gemäss Tragwerksanalyse.
  - In der Nähe von Fahrbahnübergängen wird die Last von Pneufahrzeugen des öffentlichen Verkehrs um 30 % vergrössert (in Anlehnung an Norm SIA 261 10.3.4).

Annahmen für den Tragsicherheitsnachweis:

Für Flusstahl (meist genietet) gelten die Annahmen der Norm SIA 263 mit den folgenden Präzisierungen und Ergänzungen:

- elastische Schnittgrössenermittlung (ohne plastische Umlagerungen).
- EP-Berechnung (Querschnittsklassen 1, 2), d.h. plastische Ermittlung des QS-Widerstands.
- EE-Berechnung (Querschnittsklasse 3), d.h. elastische Ermittlung des QS-Widerstands.
- EER-Berechnung (Querschnittsklasse 4), elastische Ermittlung des QS-Widerstands am reduzierten Querschnitt.
- bei Druck mit Biegung (z.B. Gurt- und Diagonalenstäbe) kann je nach Spannungsverteilung  $\psi$  auch der Brutto-QS verwendet werden.
- bei Zug mit oder ohne Biegung erfolgt die Einteilung in QS-Klassen *nicht* gemäss den Kriterien in der Norm SIA 263, Tabelle 5. Das Bemessungs-Verfahren hängt ausschliesslich von der Duktilität des Materials ab, und somit von dessen Fähigkeit zu Plastifizieren (siehe Brief EPFL vom 21.12.2006); für Flusstahl sind die entsprechenden Kriterien (Norm SIA 263, 3.2.2.4) erfüllt, d.h. EP-Berechnung mit plastischer Ermittlung des QS-Widerstands am Netto-Querschnitt.

Für modernen Stahl gelten die Annahmen der Norm SIA 263 unverändert.

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.

Bauzustände:

- Der 1997 erfolgte Ersatz der Fahrbahnplatte aus Beton wird bei der Schnittkraftermittlung berücksichtigt, indem das Eigengewicht der Stahlkonstruktion und der Fahrbahnplatte an einem Bauzustand wirken, bei welchem die Obergurte von Hauptlängsträgern HLT und Querträgern QT noch keinen Verbund aufweisen, und bei welchen die Zwischenlängsträger ZLT noch als einfache Balken ohne Verbund wirken.

### 3. Baustoffe

#### 3.1 Vorhandene Materialien

Flussstahl (eingebaut 1895-98):	Gemessene Festigkeiten / Werte:
- ETH 1896 (mehrere Dutzende von Proben)	$f_y = 270 - 300 \text{ N/mm}^2$
	$f_u = 380 - 430 \text{ N/mm}^2$
	$\lambda_{(5d)} = 22 - 30 \%$
- EMPA 1969 (2 Proben)	$f_y = 323 \text{ N/mm}^2$
	$f_u = 433 \text{ N/mm}^2$
	$\lambda_{(5d)} = 32 \%$
- EMPA 1969 (2 brauchbare Proben)	$\Delta\sigma = 177 \text{ N/mm}^2$ bei $2,91 \times 10^6$ Lastwechsel
Ermüdung	(→ entspricht gerade Kerbgr. 160 gem. SIA 263)
	$\Delta\sigma = 201 \text{ N/mm}^2$ bei $0,97 \times 10^6$ Lastwechsel
	(→ ist oberhalb Kerbgruppe 160 gem. SIA 263)
- Chemische Analyse (ETH 1896):	C $\approx 0,10 \%$
	Mn $\approx 0,26 \%$
	P $\approx 0,06 \%$
- Kerbschlagversuche (EMPA 1969):	bei $20^\circ \text{ C}$ : 283 J
	bei $0^\circ \text{ C}$ : 22 J
	bei $-20^\circ \text{ C}$ : keine Versuche

Angenommene Rechenwerte gemäss SBB-Richtlinie I-AM 08/02:

Flussstahl:	Fliessgrenze	$f_y = 240 \text{ N/mm}^2$
(eingebaut	Zugfestigkeit	$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$
1895 - 98)	Schub-Grenzspannung	$\tau_y = 140 \text{ N/mm}^2 (f_y / \sqrt{3})$
	Lochleibung	$\sigma_R = 480 \text{ N/mm}^2$
genietet:	Ermüdungsfestigkeit	$\Delta\sigma_C = 80 \text{ N/mm}^2$ (Angabe des Experten)
	Dauerfestigkeit	$\Delta\sigma_D = 59 \text{ N/mm}^2$
geschraubt:	Ermüdungsfestigkeit	$\Delta\sigma_C$ und $\Delta\sigma_D$ entsprechend den Kerbgruppen
(mit gebohrten Löchern)		der Norm SIA 263
Nietmaterial:	Zugfestigkeit	$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$
	Schub-Grenzspannung	$\tau_{Rb} = 210 \text{ N/mm}^2 (0,6 \cdot f_u)$

Bei vorgespannten Verschraubungen mit SHV 10.9 und ausgebohrten Löchern kann allenfalls mit einer Erhöhung von  $\Delta\sigma_C$  bis auf max.  $112 \text{ N/mm}^2$  gerechnet werden, abhängig von der Gesamtblechstärke und der Anzahl Bleche bzw. Farbschichten. Die vorhandene Vorspannung ist jedoch am Bauwerk zu überprüfen.

#### 3.2. Neue Materialien (eingebaut 1997)

Baustahl: FeE 235C und FeE 355D entspricht heute S235J0 und S355J2  
 Ermüdungsfestigkeit bezüglich Schub (Ergänzung der SIA-Norm 263):  $\Delta\tau_c = 80 \text{ N/mm}^2$   
 Schrauben: SHV 10.9

Beton: B 40/30, CEM I 42,5 FT entspricht heute C30/37 XF4

Bewehrung: S 500 entspricht heute B500B  
 - Tragsicherheit  $f_{sd} = 435 \text{ N/mm}^2$   
 - Ermüdung nach Angabe von Prof. E. Brühwiler EPFL beträgt die Dauerfestigkeit  
 $\Delta\sigma_{sd,D} = 150 \text{ N/mm}^2$  und der Widerstandsbeiwert beträgt  $\gamma_{Mf} = 1.1$

#### 4. Definition der Einwirkungen

Wenn nichts Spezielles vermerkt ist, gelten die Werte gemäss Norm SIA 261.

**4.1 Eigenlasten**      Stahl inkl. Verbindungsmittel + Stossbleche      Raumlast = 85.0 kN/m<sup>3</sup>

Konstruktionsbeton (Raumlast = 25.0 kN/m<sup>3</sup>) nach den plangemässen Abmessungen, unterschiedlich verteilt auf die verschiedenen Tragelemente       $g_k = 60.6 \text{ kN/m}^1 \text{ Brücke}$

**4.2 Auflasten**      Beläge (Raumlast = 24.0 kN/m<sup>3</sup>) nach den plangemässen Abmessungen, unterschiedlich verteilt auf die verschiedenen Tragelemente       $q_k = 35.8 \text{ kN/m}^1 \text{ Brücke}$

Tramschienen, Geländer und Leitschranken, Kontrollstege, Werkleitungen       $q_k = 5.8 \text{ kN/m}^1 \text{ Brücke}$

#### 4.3 Einwirkungen aus dem Baugrund

Setzungen      Es wird davon ausgegangen, dass die Setzungen längst abgeklungen sind.      akzeptiertes Risiko, siehe 5.2

Erddruck      Nur auf Widerlager      Ruhedruck

#### 4.4 Verkehrslasten (teilweise mit Abweichung zu Norm SIA 261)

Gehweg:      verteilte Belastung       $q_k = 4 \text{ kN/m}^2$   
oder Einzellast       $Q_k = 10 \text{ kN}$

Fahrbahn:      aufgeteilt in 2 Fahrbahnhälften; pro Fahrbahnhälfte entweder öffentlicher Verkehr (a) oder Individualverkehr bzw. Menschengedränge (b).

a) Öffentlicher Verkehr: pro Fahrbahnhälfte eine Kolonne von Tram- und Buslasten sowie Spezialfahrzeuge (Feuerwehr, Tiefbauamt und Abfallentsorgung, Polizei Sanität), mit den effektiven Betriebsgewichten.  
Abmessungen, Gewichte und Lastanordnungen siehe      Anhänge 1 und 3

Dynamischer Beiwert  $\Phi$  (Stosszuschlag) für Schienenfahrzeuge sowie Pneufahrzeuge des öffentlichen Verkehrs: siehe Kapitel 2.6 Wesentliche Berechnungsannahmen.

Bremskräfte:  $QA_k = QB_k = [0,30 \cdot Q_k]$ , d.h. 30 % der Fahrzeuggewichte auf der Einflusslänge des betrachteten Bauteils, jeweils nur auf ein Gleis (auf dem zweiten Gleis wird immer in der entgegengesetzten Richtung gefahren).

b) Individualverkehr: pro Fahrstreifen:      zwei Achslasten       $Q_k = 50 \text{ kN}$   
und verteilte Last       $q_k = 4 \text{ kN/m}^2$   
Beiwerte  $\alpha_{Qi}$  und  $\alpha_{qi} = 1.0$ ; die 4 Radlasten wirken immer zusammen.  
Kein Stosszuschlag (dynamischer Beiwert  $\Phi = 1,0$ ).

Bremskräfte:  $QA_k = QB_k = 1,2 Q_k + 0,1 q_k b_1 L$ , auf eine Fahrbahnhälfte mit  $b = 4.00 \text{ m}$

**4.5 Schnee**      vernachlässigt (siehe Gefährdungsbilder)



<b>4.6 Wind</b>	Staudruck, horizontal und vertikal	$q_{p0} = 0.9 \text{ kN/m}^2$
<b>4.7 Temperatur</b>	Stahlbeton Verbund Stahl - Beton Stahl	$\Delta T_{1k} = \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta T_{1k} = \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta T_{1k} = \pm 30 \text{ }^\circ\text{C}$
<b>4.8 Reibungs- und Rückstellkräfte von Lagern</b>		nur aus ständigen Lasten und Temperatur
<b>4.9 Entgleisung</b>		
	<ul style="list-style-type: none"><li>- innerhalb der Leitschranken: Für den Nachweis der Tragsicherheit und der Gesamtstabilität: Tramlasten mit den effektiven Betriebsgewichten. Abmessungen und Gewichte siehe</li><li>- mit Durchschlagen der Leitschranken</li></ul>	Anhänge 1 und 2 akzeptiertes Risiko, siehe 5.2
<b>4.10 Anprall auf Leitschranken</b>		
	Kein rechnerischer Nachweis	siehe 5.2 akzept. Risiken
<b>4.11 Erdbeben</b>		
	Bauwerksklasse II gem. Norm SIA 261, konstruktive Massnahmen entsprechend Norm SIA 262 und 263	
<b>4.12 Umwelt</b>		
	Einfluss:	Massnahmen:
	Konzentriertes CO <sub>2</sub> (Karbonatisierung): Streuströme (Tram):	Genügende Betondeckung der Bewehrung Abisolieren der Bewehrung von den Schienen, Ableitung der vagabundierenden Ströme mit separaten Mitteln
	tierische Exkremente: Tausalz, Frost:	Verhindern von Vogelansitz, periodische Reinigung Durchgehende Abdichtung der gesamten Brückenoberfläche (Fahrbahn- und Gehwegplatte), Korrosionsschutz der gesamten Stahlkonstruktion

## 5. Nachweis der Tragsicherheit

Grenzzustände der Tragsicherheit, welche gemäss Norm SIA 260 zu betrachten sind:

- Typ 1 betrifft die Gesamtstabilität eines Tragwerkes → nicht massgebend !
- Typ 2 betrifft das Erreichen des Tragwiderstand des Tragwerkes oder eines seiner Teile.
- Typ 3 betrifft das Erreichen des Tragwiderstandes des Baugrundes → nicht massgebend !
- Typ 4 betrifft das Erreichen der Ermüdungsfestigkeit des Tragwerkes.

Für Grenzzustände des Typs 2 gilt die Tragsicherheit als nachgewiesen, wenn das Bemessungskriterium  $E_d \leq R_d$  erfüllt ist.

Für Grenzzustände des Typs 4 siehe Abschnitt 6.

## 5.1 Gefährdungsbilder

Folgende Einwirkungen bzw. Einflüsse können eine Leitgefahr darstellen:

- Eigenlasten und Auflasten (nur für Bauzustände während evtl. Verstärkungsarbeiten)
- Verkehrslasten (öffentlicher Verkehr mit Tram und/oder Bus sowie Individualverkehr, jeweils inkl. Fussgängerlast auf den Gehwegen)
- Windlasten
- Entgleisung
- Erdbeben

Folgende Einwirkungen fallen als Leitgefahr ausser Betracht:

- Da die Brücke im Winter schwarzgeräumt wird, treten Schneelasten und Verkehrslasten nicht gleichzeitig in voller Grösse auf. Nach Norm SIA 260 Anhang B wird die Schneelast daher vernachlässigt.
- Einwirkungen aus dem Baugrund, Temperatur, Reibungskräfte sind für die Tragsicherheit normalerweise nicht von Bedeutung.

Für andauernde und vorübergehende Bemessungssituationen wird die Tragsicherheit wie folgt nachgewiesen:

$$E_d = E \{ \gamma_G G_k, \gamma_{Q1} Q_{k1}, \psi_{0i} Q_{ki} \} \leq R_d$$

Für aussergewöhnliche Bemessungssituationen wird die Tragsicherheit wie folgt nachgewiesen:

$$E_d = E \{ G_k, A_d, \psi_{2i} Q_{ki} \} \leq R_d$$

Die für den Grenzzustand Typ 2 massgebenden Bemessungslasten  $F_d = \gamma_F \cdot F_{rep}$  von Tram und Bus werden mit den folgenden Lastfaktoren  $\gamma_F = \gamma_s \cdot \gamma_f$  bestimmt (Modellfaktor  $\gamma_s = 1,1$  und Partiaalfaktor  $\gamma_f$  für evtl. ungünstige Abweichungen vom repräsentativen Wert,  $\gamma_f = 1,0$  bis  $1,4$ ) :

	Stehplätze	Eigengewicht Tram / Bus	Nutzlast Personen	Gewicht / Achse und Gewicht / m'
Häufige Belastung, mit 2 Personen/m <sup>2</sup>	2 Pers./m <sup>2</sup>	$\gamma_G = 1,1 \cdot 1,1 = 1,21$	$\gamma_Q = 1,1 \cdot 1,4 = 1,54$	siehe Anhang 1
Maximale Belastung (seltener Wert), mit 4 Pers./m <sup>2</sup>	4 Pers./m <sup>2</sup>	$\gamma_G = 1,1 \cdot 1,1 = 1,21$	$\gamma_Q = 1,1 \cdot 1,2 = 1,32$	siehe Anhang 1
Extreme Belastung, mit 8 Personen/m <sup>2</sup>	8 Pers./m <sup>2</sup>	$\gamma_G = 1,1 \cdot 1,1 = 1,21$	$\gamma_Q = 1,1 \cdot 1,0 = 1,10$	siehe Anhang 1

Abbildung 9: Lastbeiwerte mit verschiedenen Belastungen.

Die Ausnützung der Stehplatzfläche für Tramfahrzeuge beträgt gemäss AB-EBV 85 %.  
Für Pneufahrzeuge gilt eine Ausnützung der Stehplatzfläche von 100 %.

**Künftige Trambeschaffung:**

Für die künftige Trambeschaffung gilt folgendes Lastmodell:

Grenzwerte für Lasten und Abmessungen (Angaben charakteristisch gemäss SIA 261, d.h. ohne Teilsicherheitsbeiwerte):

Auf Gesamtlänge L verschmierte Linienlast, maximal	$q_{k,max} = 21.5 \text{ kN/m}$
Maximale Achslast	$Q_{k,max} = 105 \text{ kN}^*)$
minimaler Achsabstand innerhalb Schemel	$a_{min} = 1.40 \text{ m}^*)$
minimaler Abstand der Schemel	$s_{min} = 8.50 \text{ m}^*)$

\*) Eine geringfügige Verletzung eines Kriteriums ist in Ausnahmefällen möglich, muss aber fallweise überprüft werden. Die maximale Achslast wurde mit einer Personenbelegung von 8 Pers./m<sup>2</sup> bestimmt.

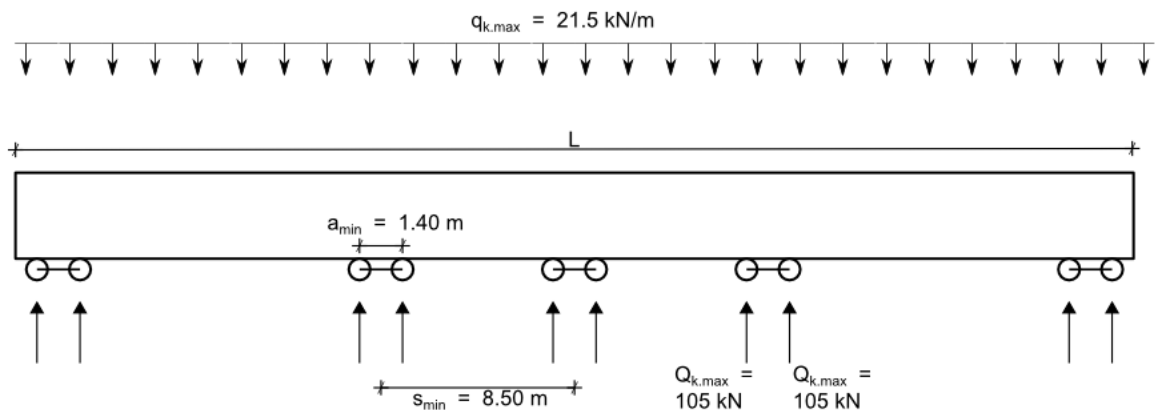


Abbildung 10: Zulässige Abmessungen und Lasten der Tramfahrzeuge

Für dieses Lastmodell gelten folgende Lastfaktoren:

$\gamma_G$ : s. oben

$\gamma_Q$ : analog aktuellem Verkehrsmodell, s. Abb. 9, d.h.

Mit Nutzlast 2 Pers./ m<sup>2</sup> = Total 170 Personen  $\gamma_Q = 1,1 \cdot 1,4 = 1,54$   
 $170 \times 0.7 \text{ kN/Pers.} = 119 \text{ kN}$

Mit Nutzlast 4 Pers./ m<sup>2</sup> = Total 340 Personen  $\gamma_Q = 1,1 \cdot 1,2 = 1,32$   
 $340 \times 0.7 \text{ kN/Pers.} = 238 \text{ kN}$

Mit Nutzlast 8 Pers./ m<sup>2</sup> = Total 680 Personen  $\gamma_Q = 1,1 \cdot 1,0 = 1,10$   
 $680 \times 0.7 \text{ kN/Pers.} = 476 \text{ kN}$

D. h.:

$$(G + Q)_d \text{ 2 Pers./ m}^2 = 574 \times 1.21 + 1.54 \times 119 = 877.8 \text{ kN}$$

$$(G + Q)_d \text{ 4 Pers./ m}^2 = 574 \times 1.21 + 1.32 \times 238 = 1008.7 \text{ kN}$$

$$(G + Q)_d \text{ 8 Pers./ m}^2 = 574 \times 1.21 + 1.10 \times 476 = 1218.14 \text{ kN}$$

Die für den Grenzzustand Typ 2 massgebenden Bemessungslasten von  $F_d = \gamma_F \cdot F_{rep}$  der Spezialfahrzeuge (Feuerwehr, Abfallentsorgung, Polizei, Sanität) werden mit den folgenden Lastfaktoren  $\gamma_F = \gamma_s \cdot \gamma_f$  bestimmt:

	Eigengewicht	Nutzlast	Gewicht/Achse + Gewicht/m'
Maximale Belastung	$\gamma_G = 1,1 \cdot 1,1 = 1,21$	$\gamma_Q = 1,1 \cdot 1,2 = 1,32$	siehe Anhang 1

Die für die Bemessung massgebenden Gewichte und Achslasten der Tram- und Busfahrzeuge von Bernmobil und RBS, sowie von Spezialfahrzeugen (Feuerwehr, TAB Betrieb und Unterhalt, SNB Geldtransporter) sind in der Tragwerksanalyse vom Dez. 2008, Tabellen 4.1.1 bis 4.1.3 aufgelistet.

Aus den vorstehenden Feststellungen ergeben sich die folgenden Gefährdungsbilder mit den zugehörigen Leiteinwirkungen und Lastfaktoren  $\gamma_G, \gamma_Q, \psi_{0i}$ :

Nr	Leiteinwirkung	Eigenlast Stahl+Beton	Auf- Lasten	Tram, Bus oder Spez. Fahrzeug	Individ.- Verkehr	Fussgän- gerGehweg	Wind
1	Öffentl. Verkehr	1.35	1.35	1.0 <sup>1) 2) 3)</sup>	-	0.4	0.6
2	Individ.-Verkehr	1.35	1.35	-	1.5 <sup>2) 3)</sup>	0.4	0.6
3	Wind	1.35	1.35	0.50	-	0.4	1.5
4	Wind	1.35	1.35	-	0.75	0.4	1.5
5	Ermüdung	Siehe Abschnitt 6.1 Einwirkungen für den Ermüdungsnachweis					
6	Entgleisung	1.0	1.0	1.0	-	-	-
7	Anprall	Auf Leitschranken, siehe Abschnitt 5.2 akzeptierte Risiken					
8	Erdbeben	Konstruktive Massnahmen					
9	Erhaltungs- arbeiten	In einer weiteren Bearbeitungsphase werden die evtl. erforderlichen Verkehrseinschränkungen ermittelt					

1) Bemessungslasten gemäss den vorstehenden Tabellen

2) Anordnung auf der Fahrbahn siehe Anhang 3

3) Tram oder Bus oder Spezial-Fahrzeuge auf der einen und Individual-Verkehr auf der anderen Fahrbahnhälfte

## 5.2 Akzeptierte Risiken

Es wird angenommen, dass die Massivpfeiler, Bogenfundamente und Endwiderlager nach über 100 Betriebsjahren keine zusätzlichen Deformationen erleiden.

Entgleisung, Abirren von Motorfahrzeugen: Die Leitschranken am Fahrbahnrand sind nach dem Bericht "Richtlinien für konstruktive Einzelheiten von Brücken, Bundesamt für Strassenbau, 1990" ausgebildet. Sie können schwere Fahrzeuge nicht in allen Fällen zurückhalten. Das entsprechende Restrisiko muss akzeptiert werden.

Brand, Explosion, Terrorakte: Das Ergreifen von Massnahmen, welche den Zugang zu den Widerlagern und Kontrollstegen erschweren, vermindern gewisse dieser Risiken.

### 5.3 Nachweiskonzept

#### 5.3.1 Zugstäbe:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

Stäbe aus Flusstahl der kleinere der beiden Werte:

$$N_{Rd} = f_y A_{brutto} / \gamma_{M1} \quad f_y = 240 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M1} = 1.10$$

$$N_{Rd} = 0.9 f_u A_{netto} / \gamma_{M2} \quad f_u = 360 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M2} = 1.25$$

Stäbe aus modernem Baustahl (eingebaut 1997) der kleinere der beiden Werte:

$$N_{Rd} = f_y A_{brutto} / \gamma_{M1} \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M1} = 1.05$$

$$N_{Rd} = 0.9 f_u A_{netto} / \gamma_{M2} \quad f_u = 360 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M2} = 1.25$$

Die Biegemomente  $M_{Ed}$  infolge von Exzentrizitäten ( $e_y$  aus der Fachwerkebene) können bei Diagonalen vernachlässigt werden.

Bei den Bogenpfosten mit I-Querschnitt ist für  $A_{netto}$  der reduzierte Querschnittswert  $A_{eff}$  (abhängig von der Niet-Anschlusslänge) einzusetzen.

#### 5.3.2 Druckstäbe:

$$N_{Ed} \leq N_{K,Rd}$$

Knicken ist normalerweise nicht verhindert → Stabilitätsnachweis

Stäbe aus Flusstahl:

$$N_{K,Rd} = \chi_K f_y A_{eff} / \gamma_{M1} \quad f_y = 240 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M1} = 1.10$$

$\chi_K$  für zusammengesetzte Querschnitte nach Kurve a,  
 $\chi_K$  für Einzelquerschnitte nach Kurven a – d je nach Profil-Form  
 $A_{eff}$  = reduzierte Fläche für Querschnittsklasse 4, für QS-Klassen 1 bis 3  $A_{eff} = A$

Stäbe aus modernem Baustahl (eingebaut 1997):

$$N_{K,Rd} = \chi_K f_y A_{eff} / \gamma_{M1} \quad f_y = 235 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M1} = 1.05$$

$\chi_K$  für Einzelquerschnitte nach Kurven a – d je nach Profil-Form

#### 5.3.3 Druckstäbe mit Biegung:

$$N_{Ed} / N_{K,Rd} + [1 / (1 - N_{Ed}/N_{cr})] \cdot (\omega M_{Ed} / M_{Rd}) \leq 1.0$$

Interaktion Normalkraft mit Biegung gemäss Formel (19) in der Norm SIA 263.

$$\omega = 0,6 + 0,4 (M_{Ed,min} / M_{Ed,max}) \geq 0,4 \quad \text{mit } |M_{Ed,min}| \leq |M_{Ed,max}|$$

$M_{Rd}$  wird bezogen auf den Druckflansch.

Bei einseitig (exzentrisch) angeschlossenen Profilen (Druck-Diagonalen und Pfosten) berechnet sich  $M_{Ed} = e_{y,red} N_{Ed}$  mit der reduzierten Exzentrizität  $e_{y,red} = 0,50 e_y$  aus der Fachwerkebene und  $\omega = 1$  (Angabe des Experten). Allenfalls muss in diesem Fall auch Knicken um die schwachen Achsen  $u$  und  $v$  berücksichtigt werden.

Bei Querschnitten der QS-Klasse 4 (EER) muss eine Beuluntersuchung gemäss Norm SIA 263, Tabellen 5a bzw. 5b durchgeführt werden. Die evtl. erforderliche Querschnittsreduktion  $\rho$  berechnet sich nach Norm SIA 263, 4.5.4 mit

$$\sigma_E = 0,9 E (t/b)^2 \rightarrow \sigma_{cr,P} = k \sigma_E \rightarrow \lambda_P = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,P}} \rightarrow \rho$$

Dabei kann anstelle von  $f_y$  die maximale Druckspannung  $\max |\sigma_{Ed}|$  verwendet werden (Angabe des Experten). Für kleinere Druckspannungen  $\sigma_{Ed}$  darf für den Abminderungsfaktor näherungsweise  $\rho = 0,9 / \lambda_P$  benützt werden.

**5.3.4 Biegestäbe mit Querkraft (Zwischenlängsträger ZLT):**

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad \text{und} \quad V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

Biegung: Stäbe aus Flussstahl:

$$M_{Rd} = W \cdot f_y / \gamma_{M1} \quad f_y = 240 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M1} = 1.10$$

- Querschnittsklasse 1, 2:  $W = W_{pl}$
- Querschnittsklasse 3:  $W = W_{el}$
- Querschnittsklasse 4:  $W = W_{eff+}$

Querkraft: Stäbe aus Flussstahl:

$$V_{Rd} = A_w \tau_y / \gamma_{M1} \quad \tau_y = 140 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M1} = 1.10$$

$A_w$  berechnet am Bruttoquerschnitt

Dabei gilt gemäss Norm SIA 263, 4.4 bzw. 5.1.5.2 die Bedingung der Stegslankheit  $(h-t_f)/t_w \leq \sqrt{(4E/f_y)}$ .

Bei genieteten oder geschraubten Anschlüssen ist gemäss Norm SIA 263, 5.1.4.3 auch ein Nachweis gegen Scherversagen im Netto-QS (Norm SIA 263, 6.2.4) zu führen:

$$V_{eff,Rd} = 0,9 f_u A_{v,netto} / (\gamma_{M2} \sqrt{3}) \quad \gamma_{M2} = 1.25$$

Bei Interaktion Biegung / Querkraft siehe Formeln in Norm SIA 263, 4.4 bzw. 5.1.5.2.

**5.3.5 Knotenbleche:**

$$N_{Ed} \leq F_{Kn,Rd}$$

Die Füllstäbe sind immer an den Stegblechen der Gurte angeschlossen. Ausnahme: die 1997 angebrachten zusätzlichen Knotenbleche bei den Querträgern des Überbaus.

Nachweis als Kontrolle des Versagens infolge ungenügender Kraftausbreitung:

Stäbe aus Flussstahl der kleinere der beiden Werte:

$$N_{Kn,Rd} = b_{r,brutto} t f_y / \gamma_{M1} \quad f_y = 240 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M1} = 1.10$$

$$N_{Kn,Rd} = 0,9 b_{r,netto} t f_u / \gamma_{M2} \quad f_u = 360 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M2} = 1.25$$

$b_r = p_2 + 2 (\sum p_1) \tan 30^\circ$  (Kraftausbreitung unter  $30^\circ$ ),  $p_1$  und  $p_2$  gemäss Norm SIA 263, 6.1  
 $t$  = Knotenblechstärke

**5.3.6 Lochleibung:**

$$N_{Ed} \leq F_{b,Rd}$$

(bei  $e_1 \geq 2 d_0$ )

Bei einer Verbindung aus Flussstahl (genietet) ist nach I-AM 08/02:

$$F_{b,Rd} = \sigma_R d t / \gamma_R \quad \sigma_R = 480 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_R = 1.25$$

Bei einer Verbindung aus Flussstahl (geschraubt) ist nach Formel (76) SIA 263:

$$F_{b,Rd} = 0.85 (e_1 f_u / d_0 \gamma_{M2}) d t \quad f_u = 360 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M2} = 1.25$$

Bei einer Verbindung aus modernem Baustahl (geschraubt) gilt Formel (76) SIA 263.

**5.3.7 Abscheren:**

$$N_{Ed} \leq F_{v,Rd}$$

Bei einer Niete aus Flussstahl ist nach I-AM 08/02:

$$F_{v,Rd} = \tau_{Rb} A_{Loch} / \gamma_{M2} \quad \tau_{Rb} = 210 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M2} = 1.25$$

Bei einer Schraube gilt nach den Formeln (73) – (75) SIA 263:

$$F_{v,Rd} = 0.60 f_{ub} A / \gamma_{M2} \quad A = \text{Schaftquerschnittsfläche} \quad \gamma_{M2} = 1.25$$

$$F_{v,Rd} = 0.50 f_{ub} A_s / \gamma_{M2} \quad A_s = \text{Spannungsquerschnittsfläche} \quad \gamma_{M2} = 1.25$$

$f_{ub} = 400 \text{ N/mm}^2$  für Schrauben der Festigkeitsklasse 4.6  
 $f_{ub} = 1000 \text{ N/mm}^2$  für Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9

Bei einschenkigen Winkelanschlüssen ist das kombinierte Scher- und Abreissversagen gemäss Norm SIA 263, 6.2.4.4 nachzuweisen.

### 5.3.8 Schweissverbindungen:

Nur an modernem Stahl S235J0, Nachweise gemäss Norm SIA 263.

### 5.3.9 Sekundäre Bauteile:

Stossverbindungen (Überlappungsstösse): bei Zug ist ein Nachweis am Netto-QS erforderlich.

Windverbände des Unter- und Überbaus müssen überprüft werden, inkl. Stabilität der Einzelprofile und der Gesamtstabilität des vergitterten Verbands.

## 5.4 Fahrbahnplatte

Die massgebenden Bewehrungsmomente  $m_{x,d}$  und  $m_{y,d}$  werden an einer speziell definierten Platte (siehe Abschnitt 2.5) ermittelt. Die Nachweise können auf die Berechnung der maximalen Spannungen  $\sigma_d$  der Bewehrung beschränkt werden:

$$\sigma_d = m_d / 0,9 d A_{s,vorh} \leq f_{sd} = 435 \text{ N/mm}^2$$

Die Betonspannungen sind nicht relevant, da es sich um eine volle Platte handelt.

## 6. Nachweis der Ermüdungssicherheit

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

### 6.1 Einwirkungen

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

Der Wert der maximalen Belastung wird mit dem Lastmodell der künftigen Trambeschaffung definiert.

Für den Fall mit Kreuzen wird für das zweite Gleis mit einem reduzierten Wert der Belastung gerechnet (ca. 30 % der Fahrgäste in der anderen Richtung).

Lastfaktor  $\gamma_{Ff} = 1.0$

Lastwechsel: Für den Zeitraum von 1901 bis 2085 werden pro Richtung ca. 22'300'000 Tram- und Busdurchfahrten erwartet, siehe Anhänge 1 und 3.

Die für die Bemessung massgebenden Gewichte und Achslasten der Tram- und Busfahrzeuge von Bernmobil und RBS sind in der Tragwerksanalyse vom Dez. 2008, Tabellen 4.1.1 und 4.1.2 aufgelistet.

## 6.2 Nachweiskonzept Ermüdungssicherheit

Vorgehen: Nachweis in 2 Stufen

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

$$E_d = \Delta\sigma(Q_{fat}) \leq R_d = \Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}$$

$\Delta\sigma(Q_{fat})$  wird berechnet als Differenz aus der maximalen und minimalen Spannung infolge der ständigen Last und dem seltenen Wert der Ermüdungslast in ungünstigster Stellung inkl. dynamischem Beiwert  $\Phi$  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:   | $\sigma_{min} < \sigma_{max} < 0$         | $\Delta\sigma(Q_{fat}) = 0,6 [\sigma_{max}(Q_{fat}) - \sigma_{min}(Q_{fat})]$ |

Widerstandsbeiwert:  $\gamma_{Mf} = 1,00$  bis  $1,35$  je nach Schadensfolge (Tabelle 11 in Norm SIA 263), wird in der statischen Berechnung für jeden Bauteil gemäss seiner Bedeutung und Inspektionsmöglichkeit festgelegt. Die entsprechenden Massnahmen sind im Überwachungs- und Unterhaltsplan festgehalten, z.B. Überwachung mit der MT-Methode (Magnetoskopie). Wenn dieser Nachweis erbracht werden kann, ist die Ermüdungssicherheit des Bauteils für eine unbeschränkte Lebensdauer gewährleistet.

Bei Bauteilen, wo dieser Nachweis nicht erbracht werden kann, müssen in einer zweiten Stufe verfeinerte Verfahren angewendet werden, bevor sie verstärkt oder ersetzt werden.

### Stufe II:

Als verfeinerte Verfahren kommen die folgenden Möglichkeiten in Frage:

- Es kann untersucht werden, was bei einem Ausfall von einzelnen Stäben geschieht, und zwar sowohl bezüglich Ermüdung wie auch bezüglich Tragsicherheit und Stabilität.
- Messungen an ausgewählten kritischen Bauteilen (insbesondere bezüglich des dynamischen Beiwertes  $\Phi$ , bezüglich der Exzentrizität  $e_y$  aus der Fachwerkebene von einseitig angeschlossenen Diagonalen, und bezüglich evtl. Tragreserven ( $\rightarrow$  Modellfaktor  $r$ )).
- Verfahren der Schadensakkumulations-Berechnung, wobei die bisherigen und zukünftigen effektiven Lasten und Durchfahrten berücksichtigt werden müssen (Zeitfestigkeit):  
 $D_{tot} \leq 1.0 / (\gamma_{Mf} \gamma_{Ff})$        $\gamma_{Ff} = \text{Lastfaktor} = 1.0$   
 Dieses Verfahren wird von den Experten geleitet, wobei Belastungsgeschichte und Einflusslinien der betroffenen Bauteile vom projektierenden Ingenieur bereitgestellt werden.

## 7. Gebrauchstauglichkeit

Voraussetzung für die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit ist die Anwendung der Überwachungs- und Unterhaltspläne.

Für die bestehende Stahlstruktur gelten die Grenzwerte der SIA-Norm 260 nur "soweit bautechnisch möglich". Abweichungen sind zu begründen.



**8. Genehmigung**

Änderungen an der Projektbasis erfolgen während der Tragwerksanalyse laufend.

Unter diesem Vorbehalt wird die vorliegende Projektbasis mit den Anhängen genehmigt:

Die Experten:

(EPFL):

Lausanne, den .....

.....

(EPFL):

.....

Der Objektingenieur:

ingenta ag:

Bern, den .....

.....

Der Projektingenieur:

(.....):

....., den .....

.....

**Anhang 1 Betriebslasten des öffentlichen Verkehrs**

Diese Tabellen werden laufend überprüft und nötigenfalls ergänzt (*letzte Nachführung Dez. 2008*)

Bezeichnung	Serie- Nummer	Gesamt- länge [m]	Gesamt- gewicht [t]	Laufmeter- gewicht [t/m]	Anzahl Achsen	Max. Achslast [t]	Bemerkungen:
-------------	------------------	-------------------------	---------------------------	--------------------------------	------------------	-------------------------	--------------

<b>Bernmobil</b> (ehemals SVB Städtische Verkehrsbetriebe Bern)							
Gelenktrolleybus	1-20	17.91	28.04	1.57	3	11.12	1) 3)
Gelenktrolleybus	30-61	18.00	26.74	1.49	3	12.00	1) 3)
Gelenktrolleybus	62-66	18.00	26.20	1.46	3	11.86	1) 3)
Autobus	101-117	11.98	16.80	1.40	2	10.99	1) 2)
Autobus	121-133	12.10	18.00	1.49	2	11.50	1) 2)
Autobus	181-195	11.85	17.44	1.47	2	10.47	1) 2)
Gelenkautobus	201-207	17.94	25.00	1.39	3	10.51	1)
Gelenkautobus	211-240	17.94	27.00	1.50	3	10.82	1)
Gelenkautobus	241-249	17.98	27.41	1.52	3	11.98	1)
Gelenkautobus	251-272	17.99	27.69	1.54	3	11.50	1) 5)
Gelenkautobus	284-293	18.00	25.00	1.39	3	10.74	1)
Gelenkautobus	801-832	18.04	28.00	1.55	3	12.00	1)
Midibus	401-404	9.67	13.55	1.40	2	7.80	1) 2)
Midibus	451-456	9.00	11.59	1.29	2	7.42	1) 2)
Midibus	457	8.61	11.50	1.34	2	7.50	1) 2)
Midibus	459	9.00	11.73	1.30	2	7.51	1) 2)
Historische Fahrzq.	Dampftr.	5.70	16.00	2.81	3	5.33	Nicht relevant
Tram Be8/8	711-726	26.20	47.64	1.82	8	6.13	4)
Anhängewagen B4	321-330	14.05	17.28	1.23	4	4.32	4)
Tram Be4/8	731-742	31.03	49.00	1.58	8	6.44	4)
Combino Be4/6	753-759	31.48	54.22	1.72	6	9.60	4) nach Sanierung
Combino VL Be6/8	751,752, 760-765	41.29	73.07	1.77	8	9.39	4) verlängert
Combino XL Be6/8	651-671	41.45	73.62	1.78	8	9.59	4) mit Schiebetritten
Fahrleitungs-Fzq		8.30	18.00	2.17	2	11.50	6)
Schienenreiniq-Fzq		8.30	18.00	2.17	2	11.50	6)

Per Ende 2008 ausgeschiedene Fahrzeuge von Bernmobil							
Gelenktrolleybus	21-29	16.04	25.82	1.61	3	11.02	Ausgeschieden
Autobus	136-170	12.50	19.30	1.54	2	12.20	Ausgeschieden
Autobus	171	11.15	16.00	1.44	2	10.00	Ausgeschieden
Gelenkautobus	252-270	16.79	25.32	1.51	3	10.70	Ausgeschieden
Gelenkautobus	277-283	18.00	25.50	1.42	3	11.06	Ausgeschieden
Gelenkautobus	297-299	17.40	24.72	1.42	3	10.50	Ausgeschieden
Tram Be 4/4	401	20.80	37.19	1.79	4	9.91	Ausgeschieden
Tram Be4/4	621-630	14.00	25.65	1.83	4	6.41	Ausgeschieden
Anhängewag. B4	331-340	14.00	18.15	1.30	4	4.54	Ausgeschieden

<b>RBS Murilinie G</b>							
Tram 2000 Be4/8	81-89	32.00	53.64	1.68	8	7.06	4) alle verlängert
Tram Be4/8 verläng.	81-89	40.60	69.20	1.70	10	7.77	4)

**Bemerkungen:**

- 1) Belastung mit 8 Fahrgästen pro m<sup>2</sup> Stehplatzfläche, bei Ausnützung der Stehplatzfläche zu 100 %.
- 2) Verkehren nur in Ausnahmesituationen über die Hochbrücken.
- 3) Verkehren nicht über die Hochbrücken.
- 4) Belastung mit 8 Fahrgästen pro m<sup>2</sup> Stehplatzfläche, bei Ausnützung der Stehplatzfläche zu 85 %.
- 5) Ersatz für alte Nr. 252-270, welche ausgeschieden sind.
- 6) siehe nachfolgende Seite mit \*)

**Zusammenstellung** über die bisherigen und die zukünftigen Verkehrsfrequenzen (Überfahrten):

in beiden Richtungen:	total bis 1997	pro Jahr ab 1998	pro Jahr ab 2020	total bis 2085
- Bernmobil Tramdurchfahrten	13'400'000	117'300	250'700	32'300'000
- Bernmobil Busdurchfahrten	7'100'000	155'400	27'600	12'300'000
- RBS Zugsdurchfahrten	ca. 500'000	0	0	500'000
- Total Anzahl Überfahrten 1898 bis 2085 in beiden Richtungen (Grössenordnung)				45'100'000

**Anhang 1 Betriebslasten des öffentlichen Verkehrs (Fortsetzung)**

Bezeichnung	Serie-Nummer	Gesamtlänge [m]	Leergewicht [t]	Gesamtgewicht [t]	Laufmetergewicht [t/m]	Anzahl Achsen	Max. Achslast [t]	Bemerkungen
-------------	--------------	-----------------	-----------------	-------------------	------------------------	---------------	-------------------	-------------

**Feuerwehr**

Tanklöschfahrzq.	10	7.10	11.50	11.50	1.62	2	ca. 8.00	*)
Tanklöschfahrzq.	11	8.00	15.50	15.50	1.94	2	ca. 10.00	*)
Tanklöschfahrzq.	13	7.00	12.10	12.10	1.73	2	ca. 8.00	*)
Tanklöschfahrzq.	14	7.10	14.00	14.00	1.97	2	ca. 8.00	*)
Tanklöschfahrzq.	82	6.50	11.60	11.60	1.78	2	ca. 8.00	*)
Tanklöschfahrzq.	83	6.60	11.30	11.30	1.71	2	ca. 8.00	*)
Tanklöschfahrzq.	84	6.50	12.00	12.00	1.85	2	ca. 8.00	*)
Autodrehleiter	18	9.80	14.90	14.90	1.52	2	ca. 9.00	*)
Autodrehleiter	19	10.10	15.50	15.50	1.53	2	ca. 9.00	*)
Kranwagen	40	7.15	6.00	12.60	1.76	2	ca. 8.00	*)
Pionierfahrzeug	41	7.00	12.00	12.00	1.71	2	ca. 8.00	*)
Transportkranwq.	43	8.20	13.00	13.00	1.59	2	ca. 8.20	*)
A-Tanklöschfzq.	31	8.60	20.70	20.70	2.41	3	ca. 8.00	*)
A-Zubringerfzq.	32	8.50	17.00	17.00	2.00	2	ca. 11.00	*)
A-Pulverlöschfzq.	33	8.40	14.30	14.30	1.70	2	ca. 9.00	*)
A-Oelwehrrfahrzq.	34	8.60	15.10	15.10	1.76	2	ca. 10.00	*)
Chemo Fahrzeug	39	7.50	12.50	12.50	1.67	2	ca. 8.00	*)
Chemo+Anhänger	39	12.00	14.70	14.70	1.23	2 + 1	ca. 9.00	*)

**Tiefbauamt und Abfallentsorgung**

Kehrriechtswagen 2		9.70	12.80	21.00	2.16	3	10.50	*)
Kehrriechtswagen	Neu	9.50	14.50	28.00	2.74	3	11.50	*)
LKW Hakenfzq.	Neu	10.00	17.00	32.00	3.20	4	11.50	*)
LW+Schneepflug		9.50	17.00	17.00	1.79	2	10.00	*)
Waschwagen		7.15	8.05	16.00	2.24	2	9.81	*)
Saugwagen	Neu	9.20	16.00	26.00	2.83	3	10.50	*)
Saugwagen	Alt	7.80	12.25	22.00	2.82	3	9.50	*)
Lastwagen	Bau	7.17	13.50	24.00	3.21	3	11.50	*)
Kehrriechtswagen	Reini-	8.40	10.90	16.00	1.90	2	10.75	*)
Jeep / Puch		4.60	2.57	3.50	0.76	2	2.00	**)

**Polizei**

Lastwagen	1 – 6	6.36	3.90	6.60	1.04	2	4.70	**)
Car	A 252	11.00	9.20	13.26	1.21	2	8.06	*)
Wasserwerfer	A 13	7.90	18.00	18.00	2.28	2	12.00	*)

**Sanität**

Rettungswagen	27	5.59	-	3.50	0.63	2	2.24	**)
Einsatzambulanz	21	5.10	-	2.80	0.55	2	1.49	**)
Krankenwagen	15	5.55	-	2.60	0.47	2	1.45	**)
MTW Vito	20	4.66	-	2.70	0.58	2	1.42	**)
Gelände-Ambul.	35	4.59	-	2.81	0.61	2	1.60	**)

**Diverse**

LKW Nationalbank	1 – 2	8.60	11.70	26.00	3.02	3	12.00	*)
Panoramabus	---	ca. 12.00	ca. 8.00	12.02	ca. 1.00	2	ca. 10.00	*)

\*) Das Laufmetergewicht des Einzelfahrzeuges ist nicht massgebend, da Kolonnenbildung und Kreuzen nicht gleichzeitig vorkommen können! Massgebend für die Tragsicherheit bleibt das Laufmetergewicht des Trams Be 8/8 711-726 von 1,82 t/m bzw. das Fahrgestellgewicht des Trams Be 4/6 Combino von 19,2 t oder die Achslast des Gelenkautobus 801-832 von 12,0 t

\*\*) Nicht relevant, weil unter 10 t Gesamtgewicht

## Anhang 2 Belastungsgeschichte der bisherigen und zukünftigen Tramüberfahrten

Diese Tabellen werden laufend überprüft und nötigenfalls ergänzt (*letzte Nachführung März 2021*)

Fahrten/Jahr von bis = Periode		Anzahl Jahre	Mittelwert pro Periode interpoliert	Total pro Periode	Linie	Fahrzeugtypen	%	Gewicht einzeln [ to ]	Gesamt Gewicht [ to ]	Total Fahrten Gew. Anteil	Grundlage
1898	1900	3.5				keine Tramüberfahrten					
1901	1908	7.5	171'704	1'287'780	L3	Be2/2 1 - 24	10	12.8	12.8	1'287'780	Jahresber. 1906-08 Inbetriebn.1.07.1902
1909	1911	3	150'221	450'663	L3	Be2/2 1 - 24	65	12.8	12.8	292'931	Jahresbericht
						Be2/2 1 - 24 + B4 301 - 309	35	12.8 + 11.2	24.0	157'732	1909-1911
1912	1919	8	162'004	1'296'032	LW	Be2/2 1 - 24	62	12.8	12.8	803'540	Jahresbericht
						Be2/2 1 - 24 + B4 301 - 309	38	12.8 + 11.2	24.0	492'492	1912-1917
1920	1923	4	166'964	667'856	LW	Be2/2 1 - 24	40	12.8	12.8	267'142	Jahresbericht
						Be2/2 1 - 24 + B4 301 - 309	33	12.8 + 11.2	24.0	220'392	1921-1923
						Be2/2 25 - 53	17	16.0	16.0	113'536	
						Be2/2 25 - 53 + B2 201 - 257	10	16 + 8.4	24.4	66'786	
1924	1929	6	162'879	977'274	LW	Be2/2 1 - 24	45	12.8	12.8	439'773	Jahresbericht
						Be2/2 1 - 24 + B4 301 - 309	30	12.8 + 11.2	24.0	293'182	1924-1929
						Be2/2 25 - 53	15	16.0	16.0	146'591	
						Be2/2 25 - 53 + B2 201 - 257	10	16 + 8.4	24.4	97'727	
1930	1939	10	150'110	1'501'100	LW	Be2/2 1 - 24	43	12.8	12.8	645'473	Jahresbericht
						Be2/2 1 - 24 + B4 301 - 309	24	12.8 + 11.2	24.0	360'264	1930-1939
						Be4/4 144 - 150	21	22.0	22.0	315'231	
						Be4/4 144-150 + B2 201-257	12	22.0 + 8.4	30.4	180'132	
1940	1949	10	60'100	601'000	LO	Autobus	10	19.9	19.9	601'000	Fahrplan
			110'301	1'103'010	L9	Be2/2 1-24	33	12.8	12.8	363'993	Jg. 1945/46, 1947
						Be2/2 1 - 24 + B4 301 - 309	22	12.8 + 11.2	24.0	242'662	(nicht vollständig)
						Be2/2 25 - 53	20	16.0	16.0	220'602	
						Be2/2 25 - 53 + B2 201 - 257	14	16.0+8.4	24.4	154'421	
						Be4/4 144 - 150	6	22.0	22.0	66'181	
						Be4/4 144-150 + B2 201-257	5	22.0 + 8.4	30.4	55'151	
1950	1959	10	95'676	956'760	LO	Autobus	10	19.9	19.9	956'760	Fahrplan
			123'392	1'233'920	L9	Be4/4 601 - 615	25	24.6	24.6	308'480	Jg. 1950, 1959
						Be4/4 601-615 + B4 321-340	16	24.6 + 18	42.6	197'427	(nicht vollständig)
						Be2/2 25 - 53	30	16.0	16.0	370'176	
						Be2/2 25 - 53 + B2 201 - 257	21	16.0 + 8.4	24.4	259'123	
						Be4/4 144 - 150	5	22.0	22.0	61'696	
						Be4/4 144-150 + B2 201-257	3	22.0 + 8.4	30.4	37'018	
1960	1969	10	146'440	1'464'400	L15	Autobus FBW	95	19.9	19.9	1'391'180	Fahrplan
						Gelenkautobus FBW 251	5	26.2	26.2	73'220	Jg. 1965/66, 1968
			123'504	1'235'040	L9	Be4/4 601 - 615	21	24.6	24.6	259'358	(nicht vollständig)
						Be4/4 601-615 + B4 321-340	14	24.6 + 18	42.6	172'906	
						Be2/2 25 - 53	28	16.0	16.0	345'811	
						Be2/2 25 - 53 + B2 201 - 257	18	16.0 + 8.4	24.4	222'307	
						Be4/4 621 - 630	12	22.0	22.0	148'205	
						Be4/4 621-630 + B4 321-340	7	22.0 + 8.4	30.4	86'453	
1970	1975	6	164'400	986'400	L15	Autobus Volvo	30	17.5	17.5	295'920	Fahrplan
						Gelenkautobus FBW 251	5	26.2	26.2	49'320	Jg. 1970, 1973
						Gelenkautobus FBW	65	25.3	25.3	641'160	(nicht vollständig)
			147'493	884'958	L9	Be8/8 711 - 726	44	49.6	49.6	389'382	
						Be2/2 25 - 53	28	16.0	16.0	247'788	
						Be2/2 25 - 53 + B2 201 - 257	18	16.0 + 8.4	24.4	159'292	
						Be4/4 621 - 630	6	22.0	22.0	53'097	
						Be4/4 621-630 + B4 321-340	4	22.0 + 8.4	30.4	35'398	
1976	1982	7	123'270	862'890	L15	Autobus Volvo	30	17.5	17.5	258'867	Fahrplan
						Gelenkautobus FBW	35	26.2	26.2	302'012	Jg. 1976/77
						Gelenkautobus Mercedes	35	25.3	25.3	302'012	(nicht vollständig)
			145'410	1'017'870	L9	Be8/8 711 - 726	70	49.6	49.6	712'509	
						Be4/4 601-630 + B4 321-340	30	24.6 + 8.4	33.0	305'361	
1983	1986	4	138'237	552'948	L15	Autobus Volvo	20	17.5	17.5	110'590	Fahrplan
						Gelenkautobus FBW	50	26.2	26.2	276'474	Jg.1983, 1985/86
						Gelenkautobus Mercedes	15	25.3	25.3	82'942	(nicht vollständig)
						Gelenkautobus Volvo	15	25.0	25.0	82'942	
			123'128	492'512	L9	Be8/8 711 - 726	70	49.6	49.6	344'758	
						Be4/4 601-630 + B4 321-340	30	24.6 + 8.4	33.0	147'754	
1987	1987	1	132'826	132'826	L15	Autobus Volvo	20	17.5	17.5	26'565	Fahrplan
						Gelenkautobus FBW	50	26.2	26.2	66'413	Jg. 1987
						Gelenkautobus Mercedes	15	25.3	25.3	19'924	
						Gelenkautobus Volvo	15	25.0	25.0	19'924	
			106'544	106'544	L9	Be8/8 711 - 726	70	49.6	49.6	74'581	
						Be4/4 601-630 + B4 321-340	30	24.6 + 8.4	33.0	31'963	

Fahrten/Jahr von bis = Periode		Anzahl Jahre	Mittelwert pro Periode interpoliert	Total pro Periode	Linie	Fahrzeugtypen	An- teil %	Gewichte einzeln [ to ]	Gesamt Gewicht [ to ]	total Fahrten / Gew.anteil	Grundlage	
1988	1990	3	151'178	453'534	L15	Autobus Volvo	20	17.5	17.5	90'707	Fahrplan Jg. 1988/89	
						Gelenkautobus FBW	50	26.2	26.2	226'767		
						Gelenkautobus Mercedes	15	25.3	25.3	68'030		
						Gelenkautobus Volvo	15	25.0	25.0	68'030		
		121'208	363'624	L9	Be8/8 711 - 726	50	49.6	49.6	181'812			
						Be4/4 601-630 + B4 321-340	30	24.6 + 8.4	33.0	109'087		
						Be4/8 Vevey	20	51.0	51.0	72'725		
1991	1994	4	153'360	613'440	L15	Autobus FBW	20	26.2	26.2	122'688	Fahrplan Jg. 1991, 1992/93, 1993/94 (nicht vollständig)	
						Gelenkautobus FBW	10	26.2	26.2	61'344		
						Gelenkautobus Mercedes	10	25.3	25.3	61'344		
						Gelenkautobus Volvo	10	25.0	25.0	61'344		
						Gelenkautobus MAN	50	27.0	27.0	306'720		
		119'332	477'328	L9	Be8/8 711 - 726	50	49.6	49.6	238'664			
						Be4/4 601-630 + B4 321-340	30	24.6 + 8.4	33.0	143'198		
						Be4/8 Vevey	20	51.0	51.0	95'466		
1995	1996	2	154'210	308'420	L10	Gelenkautobus FBW	10	26.2	26.2	30'842	Fahrplan Jg. 1996 (nicht vollständig)	
						Gelenkautobus Mercedes	10	25.3	25.3	30'842		
						Gelenkautobus Volvo	20	25.0	25.0	61'684		
						Gelenkautobus MAN	60	27.0	27.0	185'052		
		115'146	230'292	L9	Be8/8 711 - 726	50	49.6	49.6	115'146			
						Be4/4 + B4 321-340	30	24.6 + 8.4	33.0	69'088		
						Be4/8 Vevey	20	51.0	51.0	46'058		
1997	1997	1	132'826	132'826	L10	Gelenkautobus FBW	10	26.2	26.2	13'283	Fahrplan Jg. 1997 Sanierung der Kornhausbrücke	
						Gelenkautobus Mercedes	10	25.3	25.3	13'283		
						Gelenkautobus Volvo	20	25.0	25.0	26'565		
						Gelenkautobus MAN	60	27.0	27.0	79'696		
		106'544	106'544	L9	Be8/8 711 - 726	50	49.6	49.6	53'272			
						Be4/4 + B4 321-340	30	24.6 + 8.4	33.0	31'963		
						Be4/8 Vevey	20	51.0	51.0	21'309		
1998	1999	2	153'325	306'650	L10	Gelenkautobus FBW	10	26.2	26.2	30'665	Fahrplan Jg. 1998/99 (nicht vollständig)	
						Gelenkautobus Mercedes	10	25.3	25.3	30'665		
						Gelenkautobus Volvo	20	25.0	25.0	61'330		
						Gelenkautobus MAN	60	27.0	27.0	183'990		
		111'252	222'504	L9	Be8/8 711 - 726	50	49.6	49.6	111'252			
						Be4/4 + B4 321-340	30	24.6 + 8.4	33.0	66'751		
						Be4/8 Vevey	20	51.0	51.0	44'501		
2000	2001	2	149'554	299'108	L10	Gelenkautobus FBW	10	26.2	26.2	29'911	Fahrplan Jg. 2000/01	
						Gelenkautobus Mercedes	10	25.3	25.3	29'911		
						Gelenkautobus Volvo	20	25.0	25.0	59'822		
						Gelenkautobus MAN	60	27.0	27.0	179'465		
		108'848	217'696	L9	Be8/8 711 - 726	50	49.6	49.6	108'848			
						Be4/4 + B4 321-340	20	24.6 + 8.4	33.0	43'539		
						Be4/8 Vevey	30	51.0	51.0	65'309		
2002	2006	5	158'270	791'350	L10	Gelenkautobus Volvo Hess	30	27.7	27.7	237'405	Fahrplan Jg. 2003/04, 2004/06	
						Gelenkautobus Volvo	10	25.0	25.0	79'135		
						Gelenkautobus MAN	60	27.0	27.0	474'810		
		114'420	572'100	L9	Be8/8 711 - 726	50	49.6	49.6	286'050			
						Be4/4 + B4 321-340	5	24.6 + 8.4	33.0	28'605		
						Be4/8 Vevey	25	51.0	51.0	143'025		
						Be4/6Combino	20	56.0	56.0	114'420		
2007	2011	5	158'270	791'350	L10	Gelenkautobus	10	28.0	28.0	791'350	Angebotskonzept 2007 - 2012	
		114'420	572'100	L9	Be4/6 Combino	70	56.0	56.0	400'470			
						Be4/8 Vevey	25	51.0	51.0	143'025		
						Be8/8 + B4 321-340	5	49.6 + 8.4	58.0	28'605		
2012	2019	8	2'798	22'384	L6	Be 4/10 RBS verlängert	75	51.0	51.0	16'788	Fahrplan 2019	
					L6	Be 6/8 Combino VL	25	56.0	56.0	5'596		
		4'646	37'168	L7	Be 4/8 Vevey	45	37.9	37.9	16'726			
				L7	Be 4/6 Combino	55	40.9	40.9	20'442			
		6'147	49'176	L8	Be 6/8 Combino VL/XL	100	56.0	56.0	49'176			
		110'979	887'832	L9	Be 6/8 Combino VL/XL	100	56.0	56.0	887'832			
		4'400	35'200	L9	Gelenkbus	100	19.6	19.6	35'200			
		149'422	1'195'376	L10	Gelenkbus	100	19.6	19.6	1'195'376			
2020	2023	4	2'798	11'192	L6	Be 4/10 RBS verlängert	75	51.0	51.0	8'394		Fahrplan 2020 (Stand Mai 2019): Verdichtung L10 zum 2.5'-Takt und Bus- verdichtung L9 in HVZ
					L6	Be 6/8 Combino VL	25	56.0	56.0	2'798		
		4'646	18'584	L7	Be 4/8 Vevey	45	37.9	37.9	8'363			
				L7	Be 4/6 Combino	55	40.9	40.9	10'221			
		6'147	24'588	L8	Be 6/8 Combino VL/XL	100	56.0	56.0	24'588			
		110'979	443'916	L9	Be 6/8 Combino VL/XL	100	56.0	56.0	443'916			
		11'472	45'888	L9	Gelenkbus	100	19.6	19.6	45'888			
		163'830	655'320	L10	Gelenkbus	100	19.6	19.6	655'320			

Fahrten/Jahr von bis = Periode	Anzahl Jahre	Mittelwert pro Periode interpoliert	Total pro Periode	Linie	Fahrzeugtypen	%	Gewicht einzeln [ to ]	Gesamt Gewicht [ to ]	Total Fahrten Gew. Anteil	Grundlage	
2024	2027	4	2'798	11'192	L6	Tramlink	100	60.0	60.0	11'192	Annahme: Linie 9 im 5'-Takt
			4'646	18'584	L7	Be 4/6 Combino	100	40.9	40.9	18'584	
			6'147	24'588	L8	Tramlink	37	60.0	60.0	9'098	
					L8	Be 6/8 Combino VL/XL	63	56.0	56.0	15'490	
			122'663	490'652	L9	Tramlink	37	60.0	60.0	181'541	
					L9	Be 6/8 Combino VL/XL	63	56.0	56.0	309'111	
			4'400	17'600	L9	Gelenkbus	100	19.6	19.6	17'600	
			163'830	655'320	L10	Gelenkbus	100	19.6	19.6	655'320	
2028	2035	8	22'911	183'288	L6-8	Tramlink	100	60.0	60.0	183'288	Linie 10 als Tram im 6'-Takt (Tram Bern Oster- mundigen)
			122'663	981'304	L9	Tramlink	45	60.0	60.0	441'587	
					L9	Be 6/8 Combino VL/XL	55	56.0	56.0	539'717	
			110'148	881'184	L10	Tramlink	45	60.0	60.0	396'533	
					L10	Be 6/8 Combino VL/XL	55	56.0	56.0	484'651	
			4'400	35'200	L9	Gelenkbus	100	19.6	19.6	35'200	Annahme: Linie 10 im 5'-Takt
2036	2085	50	22'911	1'145'550	L6-8	Tramlink	100	60.0	60.0	1'145'550	
			122'663	6'133'150	L9	Tramlink	100	60.0	60.0	6'133'150	
			121'832	6'091'600	L10	Tramlink	100	60.0	60.0	6'091'600	
			4'400	220'000	L9	Gelenkbus	100	19.6	19.6	220'000	
1898	2085	188	44'586'486			bis Ende neue Nutzungsdauer (2085)				44'586'486	

## Bemerkungen:

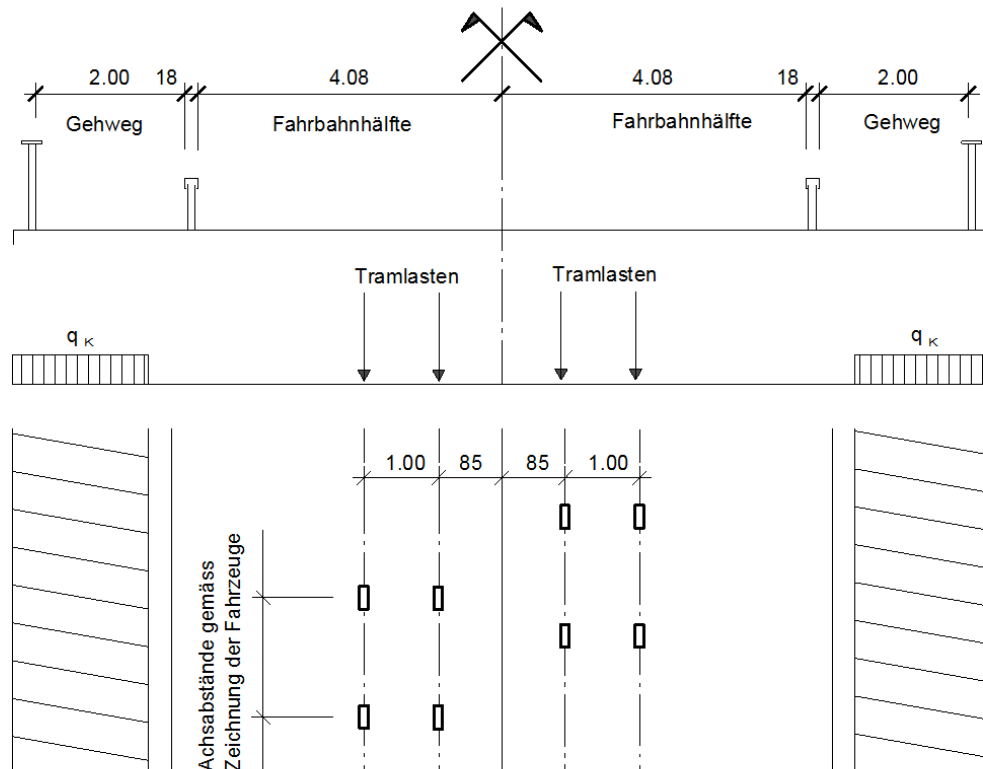
Ganze Tramzüge in beiden Richtungen  
 Berechnung mit Variante Tram Ostermundigen  
 RBS (ehemals VBW) nicht berücksichtigt (Schätzung ca. 500'000)

## Auslastung der Fahrzeuge:

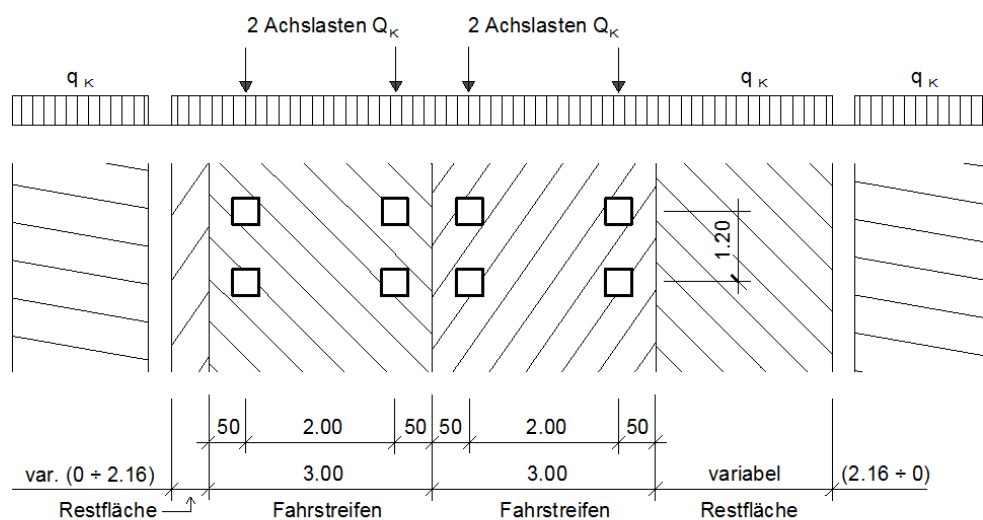
30 % der Fahrten mit 10% Auslastung  
 40 % der Fahrten mit 50% Auslastung  
 30 % der Fahrten mit 90% Auslastung  
 und ca. 0.5 % der Fahrten mit 100% Auslastung (Matchbetrieb)  
 100 % Auslastung nach Bernmobil = 2 Personen/m<sup>2</sup> Stehplatzfläche

**Anhang 3 Lastanordnung** für öffentlichen Verkehr (Tram, Bus) und Individualverkehr.

Anordnung der Lasten in Querrichtung gem. heutigem Zustand (März 2021).



Abmessungen

Gefährdungsbild 1  
öffentlicher Verkehr  
(Tram + Tram)Gefährdungsbild 2  
Individualverkehr2 Achslasten  $Q_K$   
pro Fahrstreifen