



DIPLOMARBEIT
(MASTER'S THESIS)

**Integrale Brücken –
Ein Kostenvergleich über den
Lebenszyklus mit konventionellen
Brücken**

(Integral bridges – A life cycle costs analysis in comparison with
conventional bridges)

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

O.Univ.Prof. DI Dr.techn. Hans Georg JODL

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

Univ.Ass. DI Andreas JURECKA

am

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Florian RESCH

Matrikelnummer 0326474

Desselbrunn 7

A - 4693 DESSELBRUNN

Wien, im April 2010

.....
(Florian Resch)

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mich über die lange Zeit meiner Ausbildung unterstützt und gefördert haben, sowie bei jenen Personen, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben!

Mein besonderer Dank gilt O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hans Georg JODL, der mir das Erstellen dieser Arbeit ermöglicht hat, sowie meinem betreuenden Assistenten Univ.Ass. Dipl.-Ing. Andreas JURECKA, der sich stets Zeit für mich genommen hat und mir bei allen Problemen immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Weiters möchte ich mich bei allen Personen aus der Wirtschaft bedanken, die mir Datenmaterial zur Verfügung gestellt haben und mir mit wertvollen Informationen und Tipps weitergeholfen haben. Namentlich erwähnen möchte ich an dieser Stelle meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Norbert LIEFKE, STRABAG AG, Herrn Dir.Rat Univ.Prof. Dr. Johann GLATZL und Herrn Dipl.-Ing. Thomas SIMANDL, ÖBB Infrastruktur Bau bzw. Betrieb AG, Herrn Dipl.-Ing. Dr. Roman GEIER, Schimetta Consult ZT GmbH, sowie Herrn Dipl.-Ing. Hubert REITER vom Amt der OÖ. Landesregierung.

Ein großer Dank gebührt all meinen Studienkollegen, Freunden, Bekannten und Verwandten, die mich während meiner Studienzeit begleitet haben und mit denen ich viele unterhaltsame Stunden in den letzten Jahren verbrachte. Sie sorgten dafür, dass die Studienzeit abwechslungsreich verlief und ich in schwierigeren Zeiten wieder Abstand gewinnen und neue Motivation sammeln konnte.

Der weitaus größte Dank gilt meinen Eltern Mag. Franz und Ingrid RESCH, die mir dieses Studium erst ermöglicht haben, mir stets den nötigen Rückhalt gegeben haben und mich in allen Lebenslagen unterstützt haben. Weiters möchte ich noch meinen Schwestern Franziska, sowie Eva-Maria für die sprachliche Korrektur dieser Arbeit danken.

Kurzfassung

Integrale Brücken sind Brücken, bei denen auf den Einbau von Lagern und Fahrbahnübergängen verzichtet wird. Das Brückentragwerk ist mit dem Unterbau monolithisch verbunden. Im Gegensatz dazu bezeichnet man eine Brücke, bei der das Tragwerk nach herkömmlicher Bauweise auf Lagern gelagert ist, als konventionelle Brücke.

Beide Konstruktionsarten besitzen Vor- und Nachteile. Durch die monolithische Verbindung von Über- und Unterbau vermeidet man Fugen im Tragwerk, die die Brücke anfällig auf Witterungseinflüsse und andere Einwirkungen machen. Die integrale Brücke ist damit erhaltungsfreundlicher als eine konventionelle Brücke. Weiters erspart sich der Brückeneigentümer die in periodischen Zyklen von 20–30 Jahren anfallenden Kosten für den Austausch der Brückenlager und Fahrbahnübergänge, welche einem hohen Verschleiß ausgesetzt sind. Durch die Einspannung des Tragwerks in den Unterbau kommt es bei der integralen Bauweise zur Entstehung von Zwangsspannungen. Diese müssen konstruktiv aufgenommen werden und verursachen deshalb in der Errichtung üblicherweise höhere Herstellkosten.

Im Zuge dieser Arbeit wurden Brückenpaare einfeldriger und mehrfeldriger Tragwerke sowohl für die Straße als auch für die Schiene untersucht. Nach einer Auswertung der hauptkostenverursachenden Anteile wurden die Brücken mit Hilfe einer Software auf die Kostenentstehung über einen Lebenszyklus von 70 Jahren untersucht. Dabei flossen Erfahrungswerte für jährliche Instandhaltungskosten sowie für die durchschnittlichen zu erwartenden Lebensdauern der Ausrüstungsbestandteile mit ein.

Die integrale Brücke stellt im Vergleich zur konventionellen Brücke vor allem im geringen Spannweitenbereich sowohl in der Errichtung als auch über den Lebenszyklus betrachtet die wirtschaftlichere Variante dar.

Je länger die Brücke wird, umso höher werden die Zwangsschnittgrößen, die aufgenommen werden müssen. Dadurch wird die konventionelle Brücke im mittleren Spannweitenbereich von 50 – 60 m in der Errichtung günstiger. Über den Lebenszyklus betrachtet ist die integrale Brücke jedoch die rentablere Variante.

Als Endresümee lässt sich sagen, dass die integrale Bauweise bis zu einer Spannweite von rund 60 m die wirtschaftlichere Konstruktionsart darstellt. Für Brücken mit größeren Spannweiten stellt sie hingegen keine rentable Alternative mehr dar, da die entstehenden Zwangsspannungen konstruktiv und wirtschaftlich nicht mehr vertretbar abgetragen werden können.

Abstract

Integral bridges are bridges without bearings and expansion joints. The superstructure and the substructure are in a monolithic connection. In contrast a bridge built in conventional mode with expansion joints – situated on bearings – is called a *conventional bridge*.

Both construction types have advantages and disadvantages. Joints are susceptible to moisture and humidity and high traffic loads damage them periodically and raise the maintenance costs. In contrast the integral bridge is a more resistant structure because of its jointlessness but in exchange tensions caused by temperature variations occur and may raise the construction costs.

Due to this several bridges of both construction types are analyzed in this thesis. Both single span and multispan bridges between 10 – 60 m of total span are analyzed, railway bridges as well as road bridges. After an evaluation of the parts which raise the main costs in the construction period a life cycle costs analysis is held. The bridges are analyzed over a life cycle period of 70 years using a software developed by Vienna University of Technology. The data for the life periods of the several construction parts of the bridges and the data for annual maintenance costs are estimated by experience knowledge.

In conclusion the integral solution is an outstanding alternative especially for single span bridges. Both construction costs as well as maintenance costs are below the costs raised by a conventional design.

Due to raising spans and total length of the bridges, the conventional bridge gets cheaper in erection than the integral solution because of the need for a more resistant construction to handle the higher temperature tensions. Considering the life cycle costs the integral bridge beats the conventional solution up to a total length of approximately 60 m and spans up to three fields.

For higher spans and longer total bridge length the integral solution is in most cases no economical alternative because tensions raised by temperature movements are getting too high.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Problemstellung	1
2	Technische Grundlagen und Definitionen	3
2.1	Bestandteile einer Brücke	3
2.2	Definition – Konventionelle Brücke	4
2.3	Definition – Integrale Brücke	4
2.4	Von der konventionellen zur integralen Brücke	4
2.4.1	Systemwandel – Reduktion der Fugen	4
2.4.2	Statische Parameterstudie	7
2.5	Vor- und Nachteile integraler gegenüber konventionellen Brücken	16
2.5.1	Vorteile integraler Brücken	16
2.5.2	Nachteile integraler Brücken	20
2.6	(Spezielle) Anwendungsbeispiele der integralen Brückenbauweise	22
2.6.1	Die Sunnibergbrücke	22
2.6.2	Der La-Ferté-Steg, Stuttgart-Zuffenhausen	23
3	Wirtschaftliche Grundlagen und Begriffe	25
3.1	Definition – Lebenszykluskosten	25
3.2	Einführung in die Finanzmathematik	27
3.2.1	Zinseszinsrechnung	28
3.2.2	Aufzinsung und Aufzinsungsfaktor q^n	28
3.2.3	Abzinsung und Abzinsungsfaktor $1/q^n$	29
3.2.4	Barwert- und Endwertmethode	29
3.2.5	Barwertmethode	29
3.2.6	Endwertmethode	29
3.3	Kostenbegriffe	31
4	Gegenüberstellung der Bauarten – Analyse der Errichtungskosten	34
4.1	Einfeldrige Brücken im Vergleich	34

4.1.1	Kurzbeschreibung und Brückenhauptdaten	34
4.1.2	Zeichnungen und Planausschnitte	36
4.1.3	Analyse der statischen Unterschiede	41
4.1.4	Kostenermittlung für die Hauptpositionen der Brücken .	46
4.1.5	Analyse der Preiszusammensetzung	50
4.1.6	Unterschiede im baubetrieblichen Ablauf	53
4.2	Mehrfeldrige Brücken im Vergleich	55
4.2.1	Kurzbeschreibung und Brückenhauptdaten	55
4.2.2	Fotos und Planausschnitte der Brücken	55
4.2.3	Analyse der statischen Unterschiede	60
4.2.4	Kostenermittlung für die Hauptpositionen der Brücken .	67
4.2.5	Analyse der Preiszusammensetzung	70
4.2.6	Reale Errichtungskosten aus Quelle Auftraggeber	76
4.2.7	Vergleich Kalkulation – Reale Errichtungskosten	80
4.2.8	Unterschiede im baubetrieblichen Ablauf	82
5	Lebenszykluskostenanalyse	84
5.1	Einführung in das LZKB-Programm	84
5.1.1	Berechnungsmodelle	85
5.1.2	Eingangsparameter	89
5.2	Auswertung und Ergebnisse – Einfeldrige Brücken	90
5.2.1	Brücke konventionell (Plattenbrücke)	90
5.2.2	Brücke integral (Rahmenbrücke)	93
5.3	Auswertung und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücken	97
5.3.1	Auswertungen nach eigener Kalkulation	97
5.3.2	Auswertungen nach Quelle AG	104
6	Zusammenfassung und Ausblick	110
6.1	Resümee LZKB-Programm und Faktoren	111
6.2	Potential einfeldriger Tragwerke	112
6.3	Potential mehrfeldriger Tragwerke	112
6.4	Potential längerer Tragwerke	113
	Literaturverzeichnis	115
	Abbildungsverzeichnis	117
	Tabellenverzeichnis	121

Kapitel 1

Einführung

1.1 Problemstellung

In der heutigen Zeit, in der viele Staaten durch die globale Wirtschaftskrise finanziell geschwächt sind, wird es immer wichtiger, öffentliches Gut und Geld möglichst effektiv und nachhaltig zu verwenden. Fehlinvestitionen und Verschleuderung von Steuergeld sind nicht selten ein gefundenes Fressen für die Medien.

Auch wird in Zeiten des Klimawandels immer mehr Wert darauf gelegt, Ressourcen möglichst nachhaltig einzusetzen. Ein Posten des Staatshaushalts, der besonders hohe Ausgaben verursacht, ist die Infrastruktur eines Landes. Nicht nur Neubauten, auch Wartungen, Sanierungen, Kapazitätserweiterungen und Vergrößerungen bestehender Bauwerke verursachen laufend Kosten. Es sollte daher im Interesse des öffentlichen Auftraggebers liegen, diese Kosten so gering wie möglich zu halten.

Speziell komplexe Ingenieurbauwerke wie Brücken verschlingen hohe Geldbeträge, es ist daher anzustreben, sowohl die Errichtungskosten, als auch die über den Lebenszyklus der Brücke anfallenden Kosten aus Wartung und Instandhaltung so gering wie möglich zu halten und weiters eine möglichst lange Lebensdauer der Brücke zu gewährleisten.

Nicht nur von Seiten der öffentlichen Hand ist diese Problematik ein Thema. In Zeiten, in denen PPP-Modelle immer häufiger zur Realisierung von Infrastrukturprojekten herangezogen werden, sollte es auch im Interesse des Auftragnehmers (i.d.R. gleichzusetzen mit dem Konzessionär) liegen, nicht nur die reinen Baukosten eines Objektes zu betrachten, sondern vielmehr das Objekt ganzheitlich über den Lebenszyklus zu analysieren und zu kalkulieren.

Im Lebenszyklus einer Brücke herkömmlicher Bauweise gibt es einige Haupteinflussfaktoren, die immer wiederkehrende Kosten verursachen. Einbauteile, die einem erhöhten Verschleiß ausgesetzt sind und dadurch in einem gewissen Zyklus ausgetauscht werden müssen, sind etwa die Brückenlager und Fahrbahnübergänge. Vor allem kürzere Brücken werden daher schon seit geraumer Zeit ohne den Einbau von Lagern und Fahrbahnübergängen ausgeführt, was natürlich zu gewissen Änderungen in der Konstruktion und der Bauausführung führt.

Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, welche Bauweise über den Lebenszyklus einer Brücke betrachtet die wirtschaftlichere ist.

Kapitel 2

Technische Grundlagen und Definitionen

In diesem Kapitel werden allgemeine Begriffe und Definitionen des Ingenieurbaus erläutert, die dem besseren Verständnis der weiteren Kapitel dieser Arbeit dienen sollen.

2.1 Bestandteile einer Brücke

Der Aufbau einer Brücke lässt sich grob in drei Bereiche gliedern [19]:

- **Unterbau** Zum Unterbau zählen üblicherweise die Gründungen (Bohrpfähle und Pfahlkopfplatten), Pfeiler und Pfeilerköpfe, Stützen, Pylone, Widerlager inkl. Schleppplatten sowie die Flügelwände des Widerlagers.
- **Überbau (Rohtragwerk)** Der Überbau bzw. das Rohtragwerk umfasst sämtliche Bestandteile einer Brücke, die die eigentliche Tragkonstruktion bilden und die auf dem Unterbau gelagert sind. Hierzu zählen beispielsweise Balken, Platten, Kastenquerschnitte und Bögen. Ist der Unterbau in die Tragkonstruktion inkludiert bzw. mit ihr monolithisch verbunden, (z.B. bei rahmenartigen Tragwerken oder Gewölben), spricht man übergeordnet ebenfalls vom Rohtragwerk.
- **Brückenausrüstung** Sämtliche weitere Bestandteile, die keine direkt tragende Funktion besitzen, werden der Brückenausrüstung zugeordnet. Dazu gehören unter anderem Lager, Dehnfugen (Fahrbahnübergänge),

Randbalken, Leitschienen und Geländer, die Abdichtung des Rohtragwerks mit Schutzschicht und Belag, Brückenentwässerung und sonstige Ausrüstungsbestandteile.

2.2 Definition – Konventionelle Brücke

Unter einer *konventionellen Brücke* versteht man eine Brücke gebaut im *herkömmlichen - üblichen* Sinn. Die heute übliche Bauart bedingt eine Trennung des Bauwerks in Überbau und Unterbau. Das Rohtragwerk wird vom Unterbau durch die Anordnung von Lagern und eventuell Fahrbahnübergängen an den Widerlagern sowie durch Anordnung von Lagern auf den Pfeilern getrennt.

2.3 Definition – Integrale Brücke

Im Zuge dieser Arbeit wird unter dem Begriff *integrale Brücke* ein Brückenbauwerk ohne Lager und Fugen verstanden. Synonym werden neben dem Begriff *integral* weiters die Begriffe *fugen- und lagerlos* bzw. *monolithisch* verwendet. Bei einer integralen Brücke ist der gesamte Überbau monolithisch mit dem Unterbau verbunden, das Tragwerk läuft fugen- und lagerlos über die gesamte Brückenlänge durch.

2.4 Von der konventionellen zur integralen Brücke

2.4.1 Systemwandel – Reduktion der Fugen

Fugenlose Brückenbauwerke werden immer seltener gebaut, obwohl sich diese Bauart über Jahrtausende hinweg bewährt hat. Als im Altertum damit begonnen wurde, Steinbrücken zu bauen, waren Lager und Fahrbahnübergänge noch gänzlich unbekannt. Trotzdem konnten bereits damals große Täler überbrückt werden. Als Hauptbaustoff diente Naturstein, da dieser einerseits leicht zu verarbeiten war und andererseits in großem Maße vorhanden war. Der Naturstein wurde üblicherweise ohne hydraulisches Bindemittel eingesetzt, lediglich beim Bau von Wasserleitungen griffen die Römer auf die Verwendung von Mörtel zurück. Viele noch heute existierende Steinbrücken und Aquädukte belegen die Leistungsfähigkeit der römischen monolithischen Baukunst. Als eines der bekanntesten und größten heute noch existierenden Aquädukte sei hier das Aquädukt von Segovia in der Nähe von Madrid (siehe Abbildung 2.1) erwähnt. [14]



Abbildung 2.1: Aquädukt von Segovia [4], [5]

Die Anordnung von Lagern und Fugen im Brückenbau hat einerseits physikalische Gründe, andererseits Gründe, die durch das Bauverfahren bestimmt sind. Durch die Trennung von Pfeilern und Überbau werden statisch bestimmte Tragwerke gebildet und es wird eine zwangungsfreie Beherrschung der Formänderungen des Tragwerks aus Temperaturschwankungen ermöglicht. Bei fugenlosen Konstruktionen wird diese Formänderung behindert, was zu Zwangsspannungen in der Konstruktion führt.

Ein weiterer Grund für die Herstellung eines Bauwerkes aus Einzelteilen können wirtschaftliche Vorteile sein. Durch Fugen getrennte Überbauten führen oft zur Ausbildung von statisch bestimmten Einfeldträgersystemen, welche sogar von manchen öffentlichen Auftraggebern wie z.B. der Deutschen Bahn zwingend vom Planer gefordert werden (siehe Abbildung 2.2). Als Vorteil wird die rasche und modulare Möglichkeit des Tragwerksaustausches gesehen. Einfeldträgersysteme werfen jedoch auch eine Vielzahl an Nachteilen auf. Durch das gewählte statische System werden meist auch die Gliederung und das spätere äußere Erscheinungsbild des Bauwerkes maßgeblich beeinflusst, außerdem können bei Einfeldträgersystemen keine statischen Reserven mehr aktiviert werden, was zu unwirtschaftlichen Querschnitten führt.

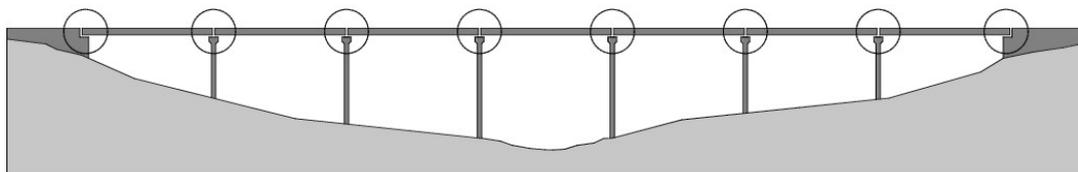


Abbildung 2.2: Brücke aus aneinander gereihten Einfeld-Trägern, Fugen und Lager in großer Zahl vorhanden

Will man nun die Anzahl der Fugen im Gesamttragwerk vermindern, so kommt es in erster Linie zur fugenlosen Ausbildung des Überbaus. Der Überbau läuft vom linken zum rechten Widerlager durch, Fahrbahnübergänge an den Pfeilern entfallen, die Brücke ist jedoch nach wie vor auf herkömmlichen Lagern an Pfeilern und Widerlagern aufgelagert und vom Unterbau getrennt. Das dadurch entstehende statische System ist der Durchlaufträger, die Quer-

schnittshöhen können im Vergleich zum Einfeldträgersystem deutlich reduziert werden (siehe Abbildung 2.3). Durch die statische Unbestimmtheit entstehen außerdem Tragreserven nach der Fließgelenktheorie. Dieses System ist das in Mitteleuropa am häufigsten zur Anwendung kommende System für mehrfeldrige Straßenbrücken und wird ebenfalls als konventionelle Brücke bezeichnet, da Lager und Fahrbahnübergänge noch vorhanden sind.

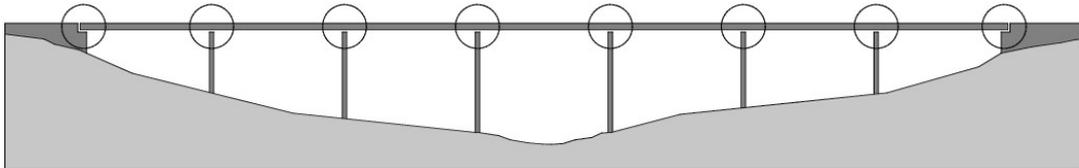


Abbildung 2.3: Überbau fugenlos durchlaufend, Unterbau durch Fugen und Lager davon getrennt

Wird nun das durchlaufende Tragwerk mit den Pfeilern monolithisch verbunden, kommt man dem integralen Bauwerk einen großen Schritt näher. Fahrbahnübergänge an den Überbauenden sowie verschiebliche Lager an den Widerlagern bleiben jedoch noch erhalten. Durch die monolithische Verbindung des Überbaus mit den Pfeilern kommt es bei Temperatur- und Feuchteänderungen zu Pfeilerkopfverschiebungen. Diese Zwangsbeanspruchungen müssen durch entsprechende Ausbildung der Pfeilerköpfe aufgenommen werden können. Man spricht in diesem Fall auch von der semi-integralen Bauweise (siehe Abbildung 2.4).

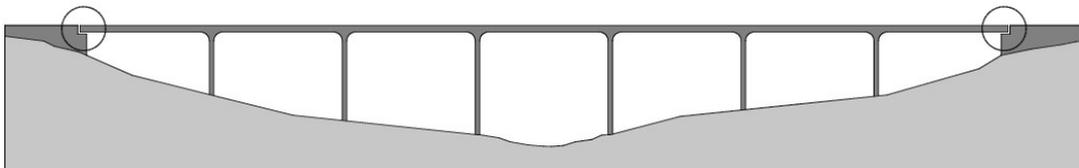


Abbildung 2.4: Semi-integrale Bauweise – Pfeiler monolithisch mit Oberbau verbunden, Lager und Fahrbahnübergänge an Überbauenden noch vorhanden

Werden nun auch die Widerlager monolithisch mit dem Tragwerk verbunden, spricht man von einem vollkommen fugen- und lagerlosen Bauwerk, einer vollintegralen Brücke (siehe Abbildung 2.5).

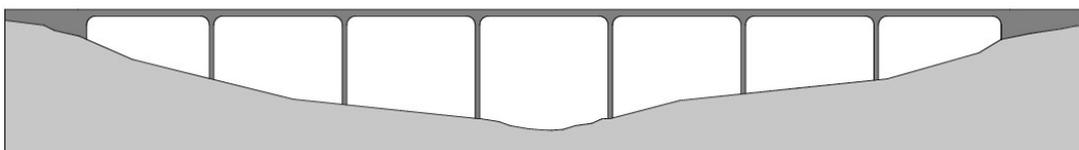


Abbildung 2.5: Vollintegrale Brücke ohne Lager und Dehnfugen

Die integrale Bauweise eignet sich in erster Linie für Brücken mit kurzer Spannweite und geringer Dehnsteifigkeit. So sind die Hälfte aller integralen Brücken nicht länger als 30 m und ca. 80% nicht länger als 50 m. [18]

Es wurden jedoch auch schon Tragwerke mit bedeutend größerer Spannweite in integraler Bauweise ausgeführt. Spannweiten um 500 m Länge sind unter Ausnutzung gewisser Gelände- und Tragwerksformen durchaus möglich, wie am Beispiel der Sunnibergbrücke in der Schweiz gezeigt werden kann (siehe dazu auch Kapitel 2.6).

2.4.2 Statische Parameterstudie

Um die Unterschiede in den Verformungen und Schnittgrößen der beschriebenen Systeme besser zu veranschaulichen, wurde eine statische Parameterstudie für eine 7-feldrige Talbrücke, wie sie in den Abbildungen in Abschnitt 2.4.1 dargestellt ist, durchgeführt. Dies darf in keinem Fall als vollwertige Statik angesehen werden, es wurde lediglich ein stark vereinfachtes statisches Modell für die verschiedenen Varianten erstellt, um qualitativ die Dimensionsänderungen der Schnittgrößen aufzuzeigen. Als Belastung wurde eine Gleichlast angesetzt, was beispielsweise eine Brücke unter Vollstau simuliert. Auf das Ansetzen von weiteren Lastmodellen und das Durchrechnen verschiedenster Lastkombinationen, wie es für die Erstellung einer ordentlichen Statik nach Norm erforderlich ist, wurde bewusst verzichtet, da dies den Rahmen sprengen würde und nicht Thema dieser Arbeit ist. Die Talbrücke besitzt sieben Felder zu je 20 m Spannweite. Als einheitlicher Querschnitt wurde eine 120 cm starke Stahlbetonplatte mit Betongüte $C35/45$ angesetzt. Da es sich um ein ebenes statisches Modell handelt, wird in Querausdehnung ein 1 m breiter Plattenstreifen betrachtet.

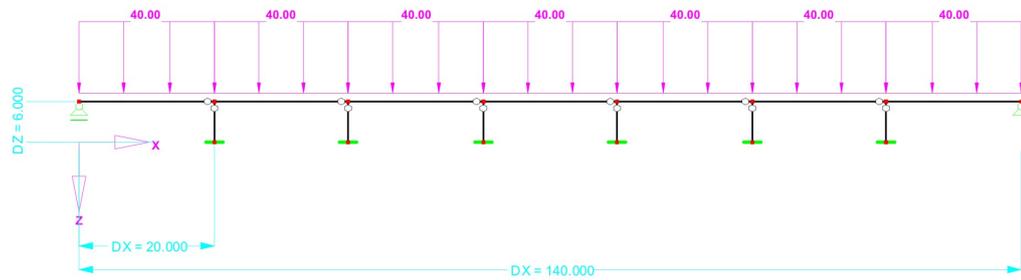
Die Pfeiler besitzen der Einfachheit halber dieselbe Geometrie und dasselbe Material wie der Oberbau-Querschnitt.

Als Belastung wurden einheitlich 40 kN/m^2 angesetzt (siehe Abbildung 2.6). Sie setzen sich zusammen aus dem Eigengewicht der Betonplatte $25\text{ kN/m}^3 \cdot 1,20\text{ m} \cdot 1,00\text{ m} = 30\text{ kN/m}$, einer Nutzlast von $9\text{ kN/m}^2 \cdot 1,00\text{ m} = 9\text{ kN/m}$ und 1 kN/m für etwaige Ausbaulasten bzw. als Aufrundungswert. Die Höhe der Nutzlast bezieht sich dabei größenordnungsmäßig auf das *Lastmodell 1* nach *ÖNORM EN 1991-2:2003 – Einwirkungen auf Brücken*, Tabelle 4.2 [1], das für den meistbelasteten Fahrstreifen eine gleichmäßig verteilte Last von 9 kN/m^2 vorsieht.

Bei der integralen Bauweise wurde auf die Widerlagerrückwände weiters ein mit der Tiefe linear ansteigender aktiver Erddruck angesetzt, der in der Tiefe von 6 m 30 kN/m^2 beträgt. Dies entspricht größenordnungsmäßig dem Wert eines durchschnittlichen sandig-kiesigen Bodens (siehe Abbildung 2.7). Bei allen anderen Bauformen ist das Widerlager nicht monolithisch mit dem Tragwerk verbunden, sondern als gesondertes statisches Bauteil zu betrachten.

In Abbildung 2.8 sind die resultierenden Momentenverläufe und Auflagerkräfte der vier Konstruktionstypen dargestellt. Beim Übergang von der konventionellen Bauweise zum Durchlaufträger reduziert sich das Feldmoment zufolge

Belastung:



Temperaturbeanspruchung:

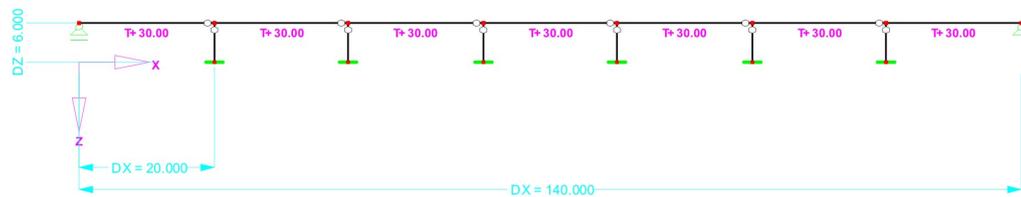
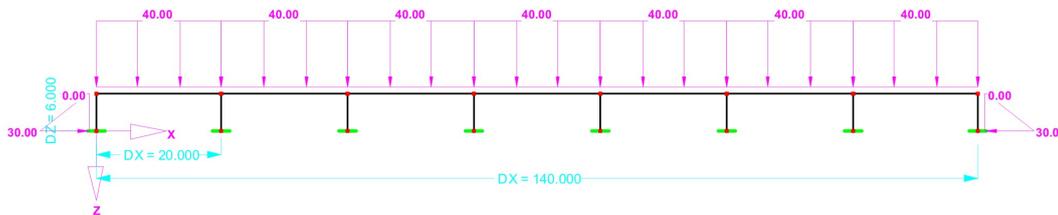


Abbildung 2.6: Konventionelle Bauweise – Statisches System und Einwirkungen

Belastung:



Temperaturbeanspruchung:

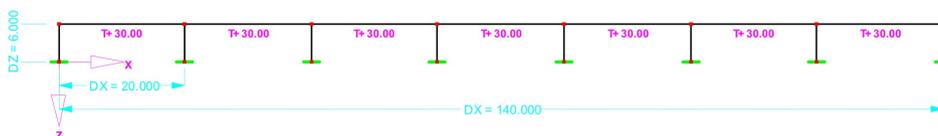


Abbildung 2.7: Integrale Bauweise – Statisches System und Einwirkungen

der Ausbildung von Stützmomenten in den Innenfeldern um rund 60%, in den Randfeldern um knapp 40%. Beim Übergang vom Durchlaufträger auf die semi-integrale Bauweise bleiben die Momentenverläufe und Auflagerkräfte größen-

ordnungsmäßig in etwa gleich, durch die Einspannung der Pfeiler ins Tragwerk kommt es jedoch zur Übertragung von Biegemomenten in die Pfeiler. Die Größe des Feldmoments im Randfeld wird zwar durch die semi-integrale Ausbildung im Vergleich zum Durchlaufträger etwas reduziert, beträgt aber immer noch fast das Doppelte verglichen mit den Innenfeldern. Durch die monolithische Verbindung der Widerlager mit dem Tragwerk bei der vollintegralen Variante kommt es zur Übertragung von Biegemomenten an den Auflagern. Dadurch wird das Feldmoment im Randfeld nochmals deutlich reduziert und beträgt mit 764 kNm nur mehr knapp 15% mehr als die Innenfelder mit rund 665 kNm . Der Momentenverlauf über das Gesamttragwerk ist unter allen vier Varianten der ausgeglichene und ermöglicht daher am ehesten, die Querschnittshöhe und die Stützweiten über das Gesamttragwerk konstant zu halten.

Im nächsten Schritt wurde ein höherer Talübergang simuliert und die Pfeilerhöhen der Brücke wurden vergrößert (siehe Abbildung 2.9). Bei der konventionellen Bauweise und der Ausführung als Durchlaufträger besteht fast kein Unterschied, die Momente sind annähernd gleich groß wie bei der Variante mit konstanten Pfeilerhöhen. Auch bei der semi-integralen und der integralen Variante sind die Überbaubeanspruchungen fast ident, betrachtet man jedoch die Pfeiler, so erkennt man, dass die Pfeiler geringer durch Momente beansprucht werden. Durch die größeren Höhen werden die Pfeiler im statisch unbestimmten Gesamtsystem betrachtet weicher und nehmen dadurch die Schnittgrößen weniger stark auf.

In Abbildung 2.10 sind die Momentenbeanspruchungen, die durch eine Einwirkung aus Temperaturänderung von 30°C entstehen, dargestellt. Da sich bei der konventionellen Bauweise und beim Durchlaufträger das Tragwerk in Längsrichtung frei verformen kann, entstehen keine Momentenbeanspruchungen aus Temperatur. Sie sind deshalb nicht dargestellt. Bei den vier dargestellten Bildern der semi-integralen und integralen Ausführungen erkennt man, dass vor allem zu den Endfeldern hin extrem hohe Momentenbeanspruchungen der Pfeiler und Widerlager entstehen.

Abbildung 2.11 stellt die Durchbiegungen aus Belastung dar. Sie sind affin zu den Momentenverläufen und betragen zwischen $17,65\text{ mm}$ beim Einfeldträger und $4,58\text{ mm}$ bei der vollintegralen Ausführung.

In Abbildung 2.12 sieht man die entstehenden Verschiebungen durch Temperaturbeanspruchung. Die konventionelle Bauweise besteht aus einer Serie aneinandergereihter, voneinander unabhängiger Einfeldträger. Die Längsausdehnung bei 30°C Temperaturunterschied beträgt 6 mm . Beim Durchlaufträger beträgt der Wert den sieben Feldern nach das 7-fache. Bei der semi-integralen Bauweise werden gewisse Anteile der Dehnungen von den eingespannten Pfeilern übernommen und abgebaut, die Verschiebung an beiden Tragwerksenden beträgt nur mehr knapp 18 mm . Bei der vollintegralen Bauweise ist das Tragwerk vollkommen an seiner Ausdehnung behindert, durch die enormen Kräfte, die an den Auflagern bei der Ausführung dieses Systems entstehen würden,

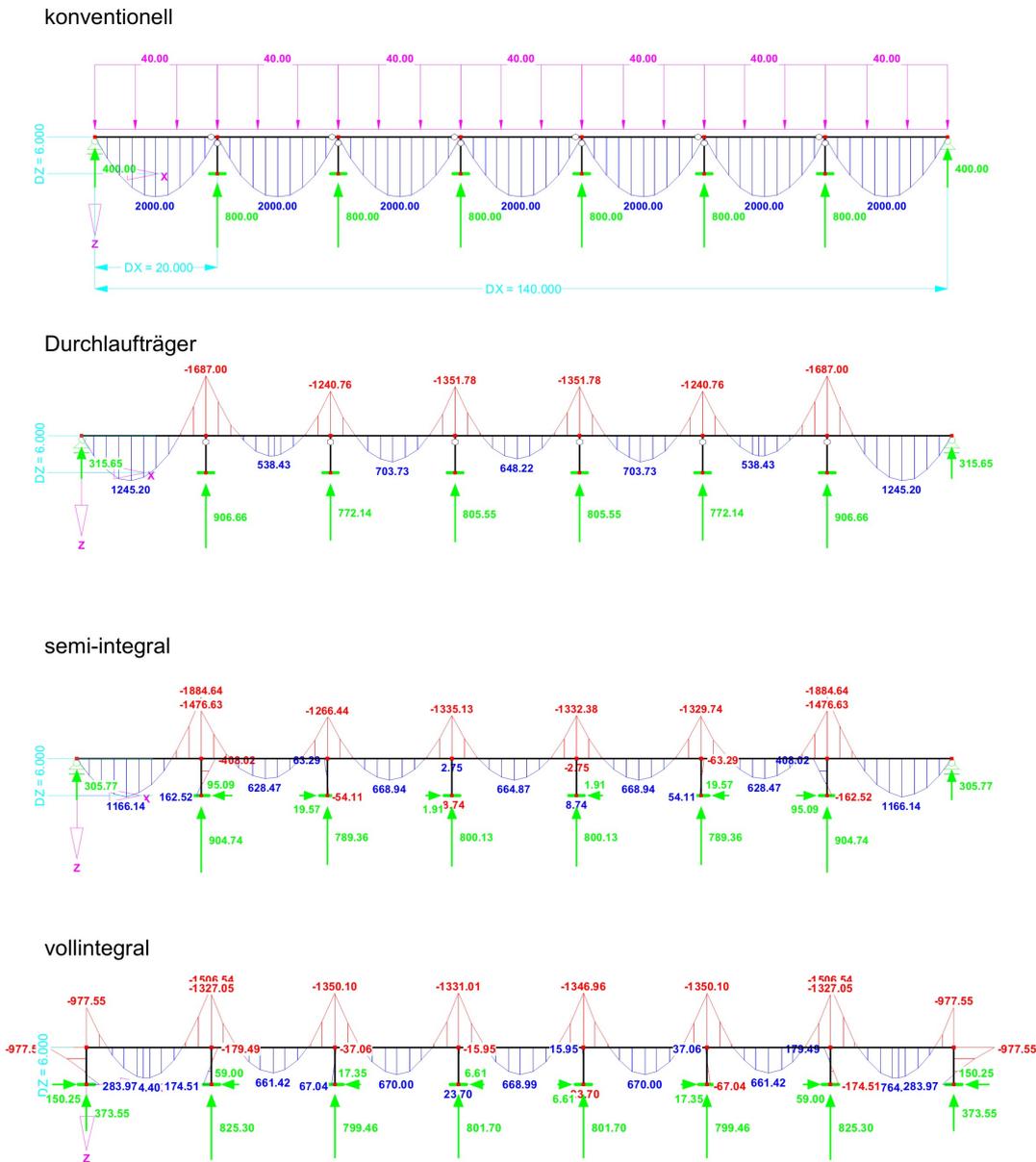
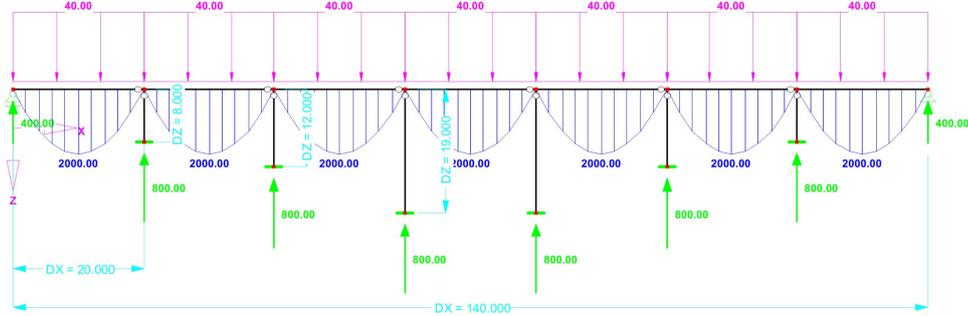


Abbildung 2.8: Momentenverläufe und Auflagerkräfte aus Belastung, Pfeilerhöhe $h = \text{const}$

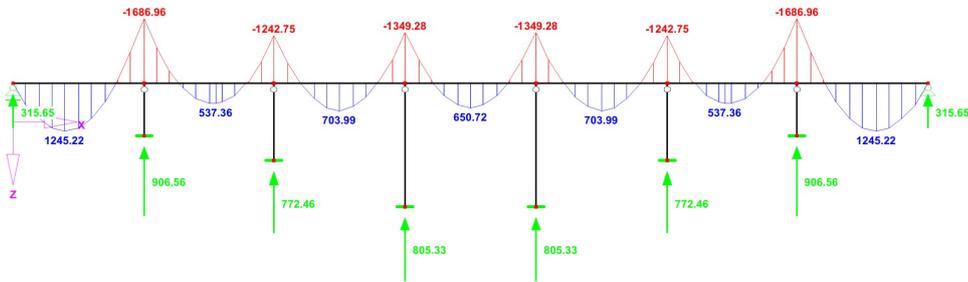
kommt es zu Tragwerksverformungen von ca. 15 mm im auflagnahen Feldbereich.

In Abbildung 2.13 sieht man die entstehenden Normalkräfte aus Temperaturbeanspruchung für die semi-integrale und integrale Variante. Sie sind bei der vollintegralen Variante mit geringen konstanten Pfeilerhöhen am größten, da das Gesamtsystem am steifsten ist. Die semi-integrale Bauweise mit großen Pfeilerhöhen kommt mit der Normalkraftbeanspruchung noch am besten zurecht, da sich die Brücke an den Enden doch frei bewegen kann, was einiges an

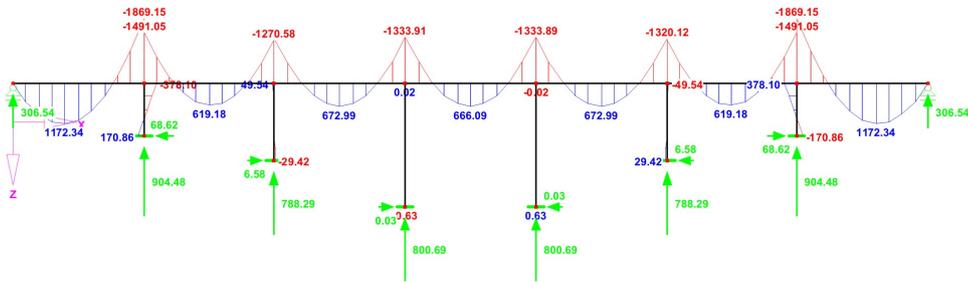
konventionell



Durchlaufträger



semi-integral



vollintegral

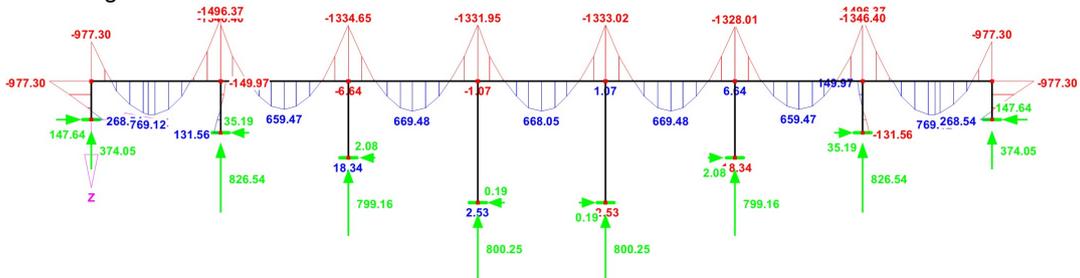
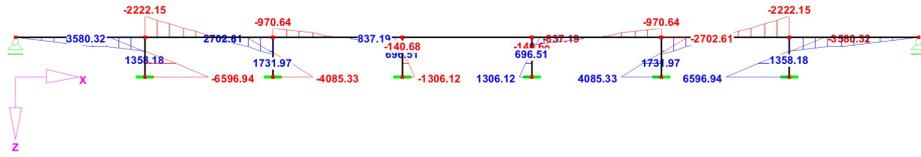
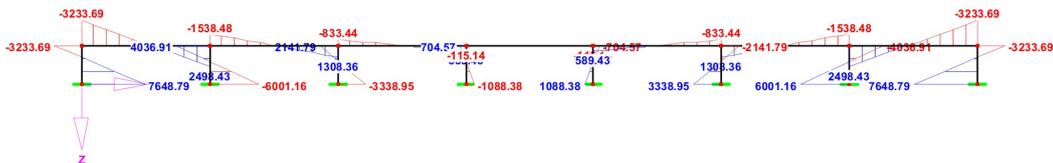


Abbildung 2.9: Momentenverläufe und Auflagerkräfte aus Belastung, Pfeilerhöhe $h =$ veränderlich

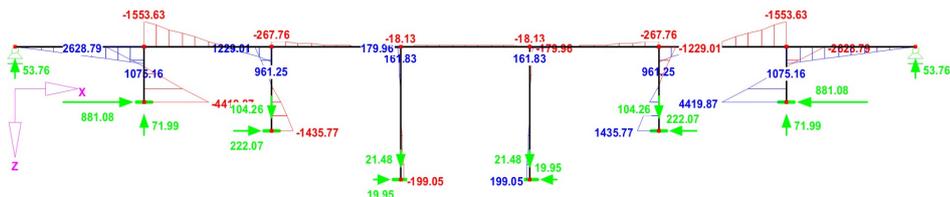
konstante Pfeilerhöhe - semi-integral



konstante Pfeilerhöhe – vollintegral



veränderliche Pfeilerhöhe - semi-integral



veränderliche Pfeilerhöhe - vollintegral

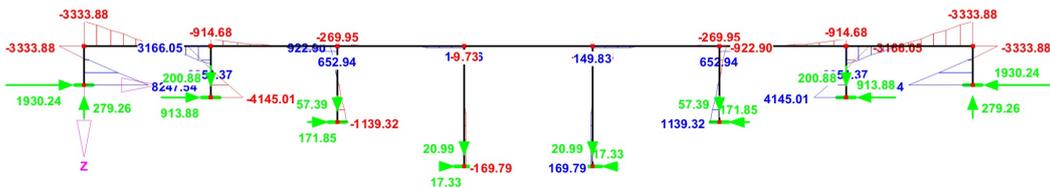
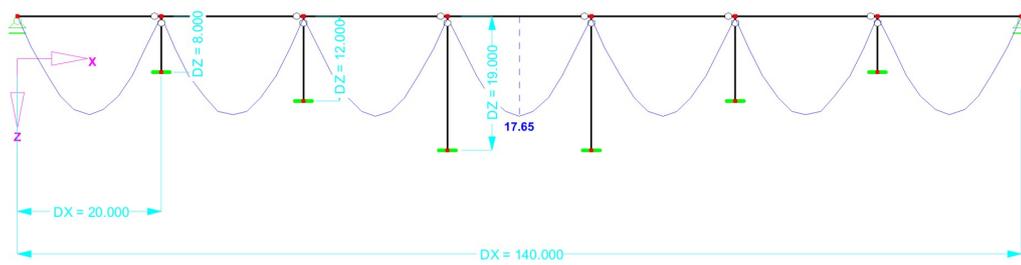


Abbildung 2.10: Momentenverläufe aus Temperaturbeanspruchung

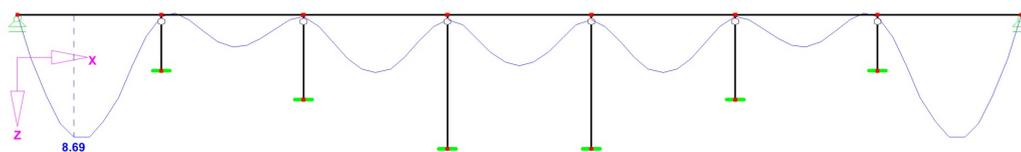
Zwängungen abbaut, und die Pfeiler durch die größere Höhe in den Innenfeldern biegeweicher sind und dadurch nicht so hohe Schnittkräfte aufnehmen.

Die integrale Bauweise stößt also ab einer gewissen Brückengesamtlänge an ihre Grenzen, da die Zwängungen aus Temperaturdehnung sehr hohe Schnittgrößen erzeugen. Diese sind konstruktiv kaum mehr aufzunehmen und lassen die Konstruktion wirtschaftlich betrachtet in höchstem Maße unrentabel werden. Man wird daher nur in Sonderfällen integrale Brücken mit einer Gesamtlänge von mehr als 80 m finden. Ein Beispiel eines solchen Sonderfalls stellt die Sunnibergbrücke dar, welche in Abschnitt 2.6 kurz beschrieben wird.

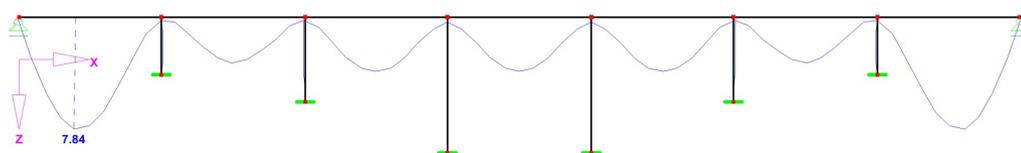
konventionell



Durchlaufträger



semi-integral



vollintegral

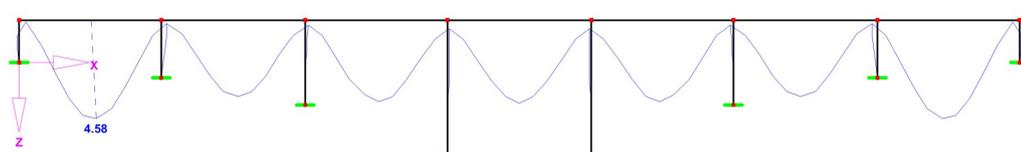
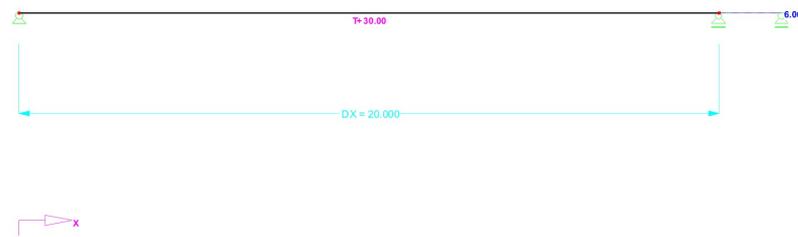
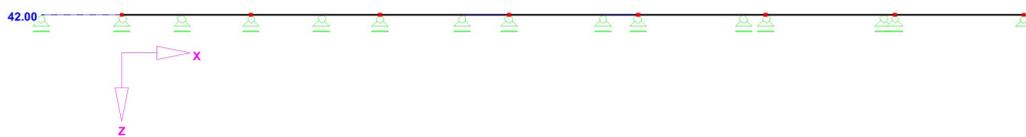


Abbildung 2.11: Durchbiegungen aus Belastung

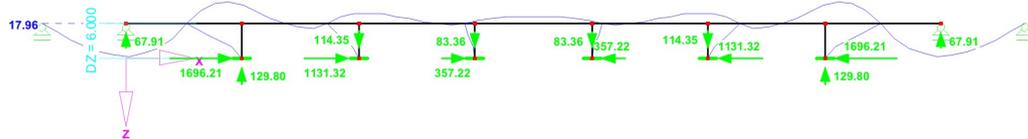
Konventionell - Einfeldträger



Durchlaufträger



Semi-integral



Vollintegral

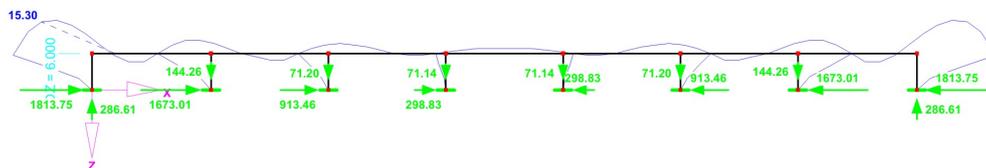
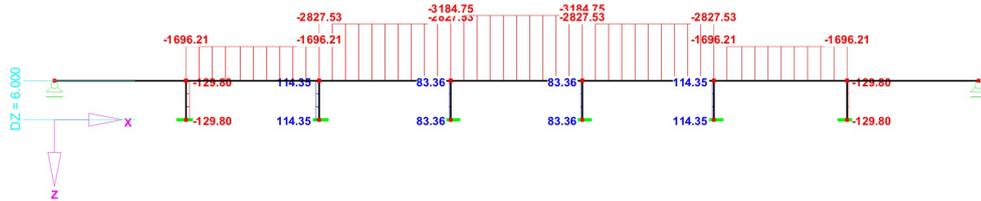
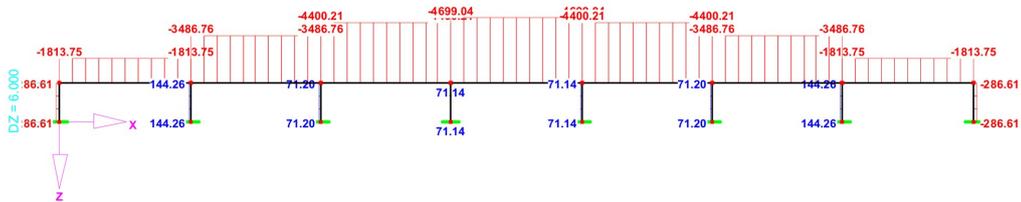


Abbildung 2.12: Tragwerksverschiebungen aus Temperaturbeanspruchung

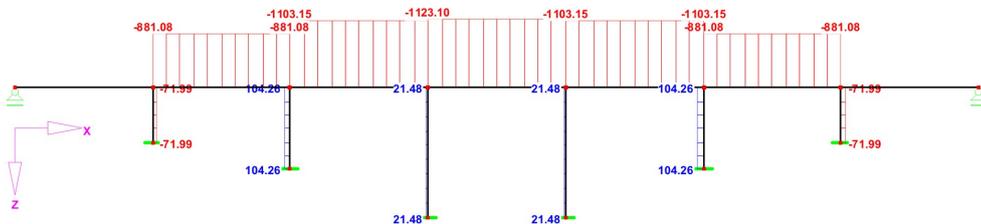
konstante Pfeilerhöhe - semi-integral



konstante Pfeilerhöhe - vollintegral



veränderliche Pfeilerhöhe - semi-integral



veränderliche Pfeilerhöhe - vollintegral

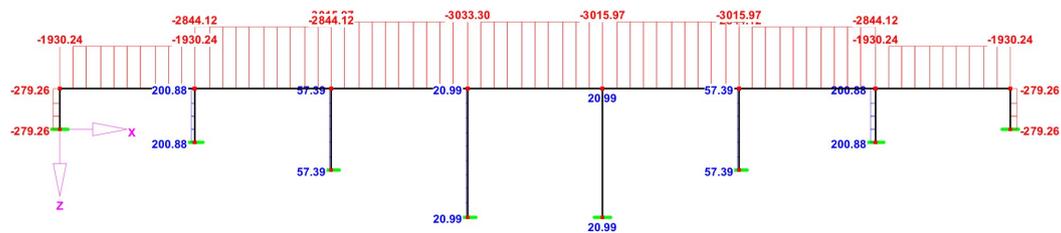


Abbildung 2.13: Normalkraft aus Temperaturbeanspruchung

2.5 Vor- und Nachteile integraler gegenüber konventionellen Brücken

Wie schon in den vorangegangenen Abschnitten kurz erwähnt, bringt die integrale Bauweise sowohl Vorteile als auch Nachteile mit sich. In den folgenden beiden Unterkapiteln werden diese zusammengefasst und näher erläutert.

2.5.1 Vorteile integraler Brücken

- **Keine Kosten für Lager und Dehnfugen**

Lager und Fahrbahnübergänge sind heutzutage oft hochtechnologische Einbauteile, die erhebliche Kosten verursachen können. Durch deren Entfall reduzieren sich sowohl die Baukosten als auch die Instandhaltungskosten, da Lager und vor allem Dehnfugen durchaus mehrmals im Lebenszyklus einer Brücke ausgetauscht werden müssen. [18]

- **Geringerer Wartungsaufwand und Verschleiß**

Je mehr ein Tragwerk durch Fugen zerlegt ist, umso größer ist seine Anfälligkeit gegenüber konstruktionsgefährdenden Umwelteinflüssen wie physikalischem und chemischem Angriff. Unter physikalischem Angriff leiden bei herkömmlicher Bauart in erster Linie die Fahrbahnübergänge, die vor allem durch den Schwerverkehr stark belastet werden. Weiters können Dehnfugen, die unter Versuchsbedingungen üblicherweise sehr gut funktionieren, durch Geschiebe schnell funktionsuntüchtig werden. Durch Kies verschlossene Dehnfugen behindern die Überbaubewegungen, wodurch erst recht Beanspruchungen entstehen, für die das Tragwerk nicht bemessen ist. [16]

Chemischer Angriff erfolgt vor allem durch das Eindringen von Feuchtigkeit, chloridhaltigen Wässern durch Tausalz sowie verschmutzten Straßenabwässern, die ebenfalls die korrosionsempfindlichen Lager und Fahrbahnübergänge angreifen.

Dies führt zu einer durchschnittlichen Lebensdauer von 20–30 Jahren für Dehnfugen, sowie 30–40 Jahren für moderne Lager.

Integrale Brücken hingegen sind bei sorgfältiger Bauausführung dauerhafte und unterhaltungsarme Bauwerke, was vor allem in abgelegenen Regionen und unterentwickelten Staaten ohne funktionierendes Brückensystem ein besonders wichtiger und sicherheitsrelevanter Vorteil ist. [18]

- **Geringerer volkswirtschaftlicher Gesamtschaden**

Als Folge des vorangegangenen Punktes kann es durch Reparatur- und Wartungsarbeiten an konventionellen Brücken leicht zu Behinderungen

des fließenden Verkehrs kommen, was Staus und damit erheblichen volkswirtschaftlichen Schaden verursachen kann, der in der Regel höher als die Reparaturkosten an sich ausfällt. [18]

- **Einfachere Konstruktion – rascherer Bauablauf**

Bei konventionellen Brücken müssen die Widerlager für Inspektion und Wartung begehbar sein, was zu komplizierten Konstruktionen führt. Weiters müssen die Pfeilerköpfe größer sein, um beim Lagerwechsel Platz für die dazu benötigten Pressen zu bieten. Auch die Schalung der Pfeilerköpfe und die Verlegung der Bewehrung wird durch die konsolartigen Formen komplizierter. Vor allem bei Architekturbrücken können diese besonders extravagante Formen annehmen. Die Konsolen führen in weiterer Folge zu exzentrischer Beanspruchung der Pfeiler, was breitere Pfeilerschäfte und einen erhöhten Bewehrungsgehalt verursacht. [18]

- **Schlankere Konstruktion**

Durch die Durchlaufträgerwirkung des Überbaus und die zusätzliche Einspannung in die Widerlager bei einer vollintegralen Ausführung kommt es im Vergleich zu Einfeldträgersystemen zu schlankeren Überbauquerschnitten und durch die geringere Konstruktionslast mitunter auch zu schlankeren Pfeilerquerschnitten und geringeren Fundamentdimensionen. Auch der Lastfall *Biegebeanspruchung des Pfeilers beim Lagertausch* existiert bei der integralen Bauweise nicht. Es kommt jedoch zu Biegebeanspruchungen im Tragwerk durch Rahmenwirkung. Eine Erhöhung der Biegesteifigkeit der Pfeiler würde in statisch unbestimmten Systemen wiederum die Schnittgrößen erhöhen, was nicht zielführend ist. Vielmehr nützt man durch kluge Konstruktionsweise die Verformungsfähigkeit der Stützen. [18]

- **Niedrigere Rampen**

Vorgegebene Lichtraumprofile bei Überführungen führen oft zu langen Rampen vor den Brücken, was vor allem im innerstädtischen und dicht bebauten Gebiet Probleme darstellen kann und außerdem Mehrmassen erfordert. Durch die geringere Bauhöhe einer integralen Brücke kommt es zu kürzeren und schmälere Dämmen, bei Unterführungen sind geringere Einschnitte erforderlich. [18]

- **Höhere Tragsicherheitsreserven**

Durch statisch unbestimmte Durchlaufträgersysteme bzw. rahmenartige Tragwerke ist bei entsprechender Duktilität ein hohes Potential an Tragsicherheitsreserven vorhanden. Vor allem in erdbebengefährdeten Zonen können solche Tragsicherheitsreserven lebenswichtig sein, außerdem ist das Schwingungsverhalten bei fugenlosen Bauwerken günstiger.

Mechanische Einwirkungen durch Schiffs- und Fahrzeuganprall oder sonstiger Natur werden vom Tragwerk besser aufgenommen. Auch unerlaubt überschwere Transporte, die das Tragwerk stärker belasten als seine Bemessungslast und dadurch schwere Tragwerksschäden hervorrufen können, werden vom Tragwerk leichter verziehen. [18]

- **Spannweitenverhältnis Endfeld / Innenfeld**

Bei konventionell gelagerten Durchlaufträgerbrücken ist das Verhältnis zwischen Endfeld und Innenfeld nach unten hin begrenzt, da es ansonsten zu abhebenden Kräften an den Widerlagern kommen kann, was die Lagerung der Brücke kompliziert und teuer macht (siehe Abbildung 2.14). Bei vollintegralen Brücken hingegen können die abhebenden Kräfte vom Widerlager aufgenommen werden, da zusätzlich zum Brückengewicht auch noch das Widerlagergewicht und die Verankerung des Widerlagers im Baugrund einem Abheben des Tragwerkes entgegenwirkt. Das Verhältnis zwischen Endfeld und Innenfeld kann – falls topographisch notwendig – ungleichmäßiger ausfallen (siehe Abbildung 2.15). Außerdem kommt es bei der integralen Ausführung zu geringeren Verformungen des Überbaus. [18]

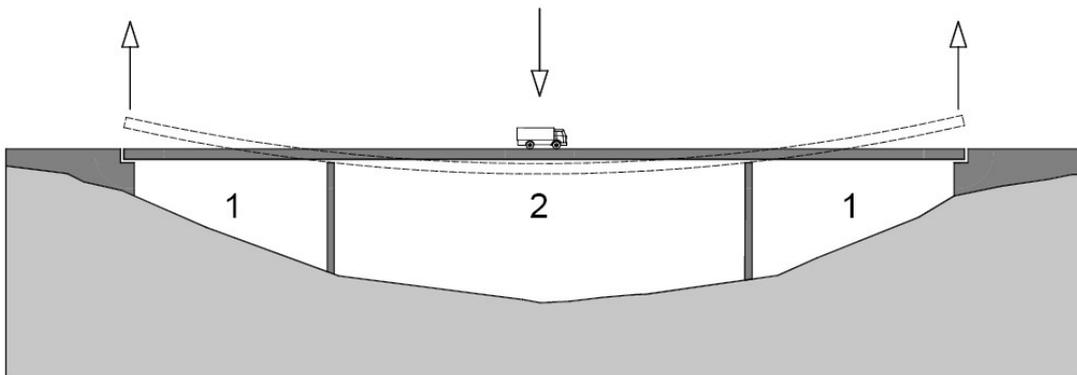


Abbildung 2.14: Abhebende Lagerkräfte bei zu großen Spannweitenverhältnissen Endfeld / Innenfeld

- **Vermeidung von Spannungskonzentrationen**

Durch die konzentrierte punktuelle Einleitung der Kräfte bei herkömmlich gelagerten Brücken kommt es zu hohen örtlichen Spannungskonzentrationen. Dies bedingt höhere Bewehrungsgehalte und eine komplizierte Bewehrungsführung, was wiederum höhere Kosten verursacht.

Schon bei einer zweidimensionalen Scheibenberechnung der konventionell gelagerten Brücke kommt es zu sehr hohen Spannungskonzentrationen, würde eine räumliche Spannungsermittlung erfolgen, so wäre die Spannungskonzentration noch viel höher, da sich die Lastpfade auch in Querrichtung auf die Lager einschnüren müssten. Bei Trägern mit Ausklinkun-

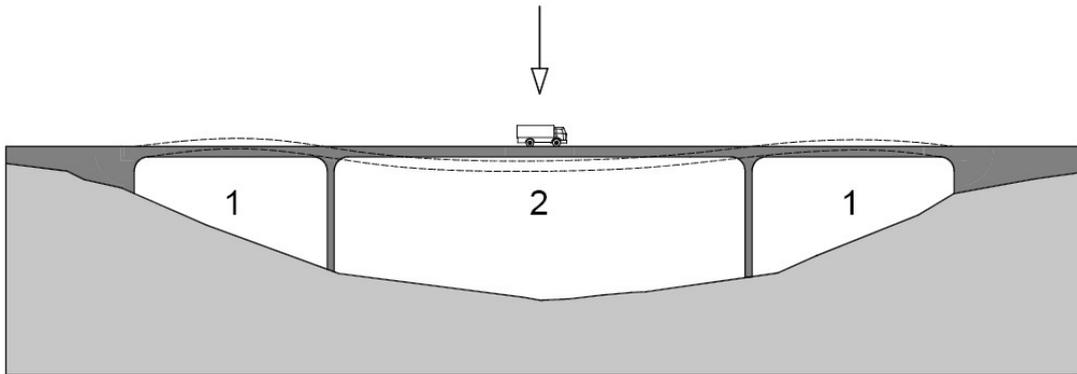


Abbildung 2.15: Vollintegrale Brücke – geringere Verformungen, kein Abheben an Lagern, größere Spannweitenverhältnisse möglich!

gen wird dieser Effekt nochmal zusätzlich verstärkt (siehe Graphik 2.16). [18]

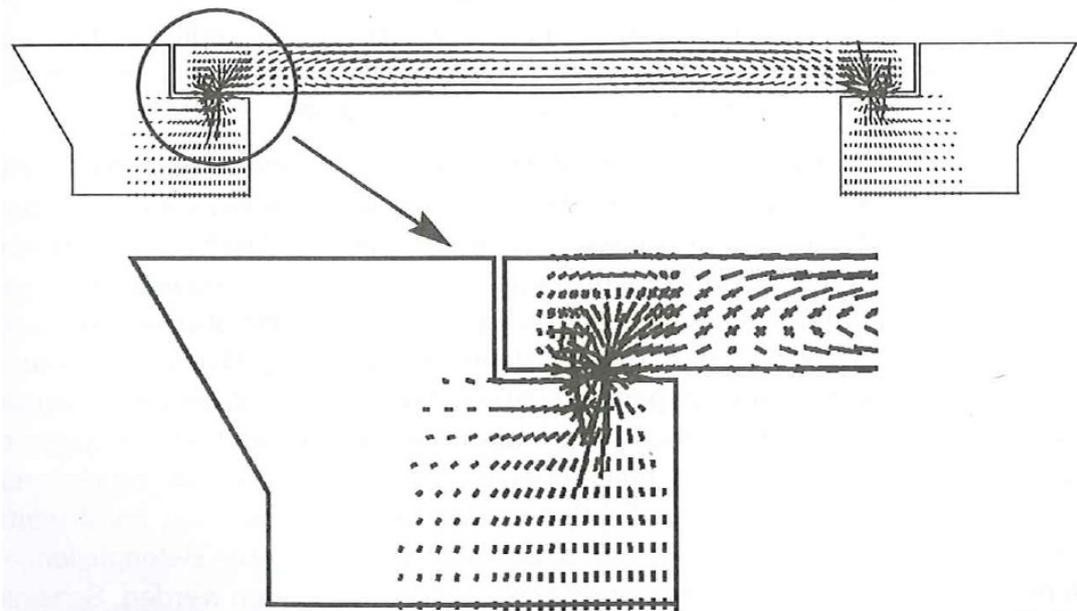


Abbildung 2.16: Hohe Spannungskonzentration bei konventioneller Brücke

Bei integralen Brücken verlaufen die Hauptspannungstrajektorien hingegen viel gleichförmiger, da mehr Platz für den Abfluss der Kräfte vorhanden ist. Durch entsprechende Ausformung der Übergangsbereiche, worauf beim Entwurf integraler Brücken stets geachtet werden soll, kann dies noch zusätzlich verbessert werden (siehe Abbildung 2.17). [18]

- **Geringere Lärmemissionen**

Die stoßartige Beanspruchung der Betonbauteile an den Fahrbahnübergängen durch den Verkehr reduziert nicht nur den Fahrkomfort, sie führt

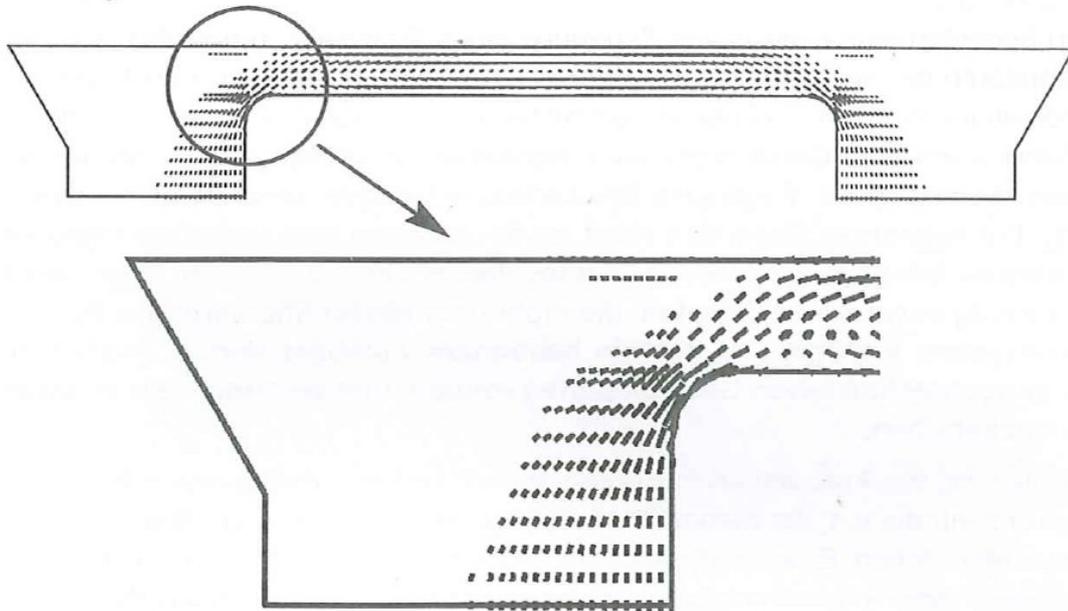


Abbildung 2.17: Gleichförmiger Spannungsverlauf bei integraler Brücke

auch zu erhöhten Lärmemissionen und kann in bebauten Gebieten die Lebensqualität der Anrainer erheblich beeinträchtigen. [18]

2.5.2 Nachteile integraler Brücken

- **Zwangsspannungen**

Durch den Verzicht auf Lager und Dehnfugen kommt es im integralen Tragwerk zu Zwangsspannungen, da eine horizontale Ausdehnung des Tragwerks behindert wird. Je nach Ausmaß dieser Spannungen muss der Planer Maßnahmen treffen, um die Zwangsbeanspruchungen aufnehmen zu können, ohne dass die Konstruktion Schaden nimmt. [18]

- **Integrale Betrachtungsweise des Gesamtsystems**

Die einzelnen Bauteile können nicht mehr wie bei der konventionellen Brücke unabhängig voneinander betrachtet werden. Vielmehr bildet das integrale Bauwerk ein komplexes Gesamtsystem mit interaktiven Wechselwirkungen zwischen Überbau, Unterbau, Baugrund und Verkehrsweg. Die einzelnen Komponenten müssen über Verträglichkeitsbedingungen optimal miteinander verknüpft sein, um Schäden vorzubeugen. Dies bedingt eine aufwändigere Bemessung, die mit größeren Unsicherheiten verbunden ist, als eine Bemessung für eine vergleichbare konventionelle Brücke. [14]

- **Erhöhte Bewehrung für Rissbreitenbeschränkung**

Da es bei Tragwerksverkürzungen durch die monolithische Verbindung des Tragwerks mit Unterbau und Baugrund zu zugerzeugendem Zwang kommen kann, kann unter Umständen ein erhöhter Bewehrungsgehalt notwendig sein, um die erforderliche Rissbreitenbeschränkung einzuhalten. Weiters ist eine stärkere Längsbewehrung und – falls die Brücke als Spannbetonbrücke ausgeführt wird – eine größere Vorspannkraft erforderlich, um die entstehenden Zwangsnormalkräfte aufnehmen zu können. Die Kosten des Überbaus sind bei der integralen Brücke daher in der Regel etwas höher. [14]

- **Übergang Brücke – Verkehrsweg**

Durch zyklische Temperaturwechsel entsteht ein erhöhter resultierender Erddruck an den Widerlagern, die dafür entsprechend bemessen werden müssen [14]. Durch die Temperaturschwankungen kann es zu Schäden am Übergang zwischen Brücke und Verkehrsweg kommen. Diese Schäden treten jedoch meist erst nach Zeiträumen auf, die der Lebensdauer der Brücke ähnlich sind [18] und die Sanierungskosten hierfür sind meist geringer als die Instandhaltungskosten für Lager und Fahrbahnübergänge.

- **Höhere Setzungsempfindlichkeit**

Durch die zyklischen Horizontalbewegungen kann es bei Pfahlgründungen in schlechtem Untergrund zu einer Verringerung der Mantelreibung im oberen Pfahlabschnitt kommen, was insbesondere bei schwimmenden Pfählen zu größeren Setzungen führen kann. [14]

- **Eingeschränkte Anwendbarkeit bestimmter Bauverfahren**

Manche automatisierte Bauverfahren wie beispielsweise das Taktschiebeverfahren sind für integrale Brücken in der Regel nicht anwendbar. Da solche Verfahren aber ohnehin erst ab einer gewissen Brückenlänge wirtschaftlich interessant werden (> 200 m), in der die integrale Bauweise nur mehr in Ausnahmefällen zur Anwendung kommt, kann dies nicht als direkter Nachteil gesehen werden. [14]

- **Fehlende Normen und Richtlinien**

Durch das Fehlen von Normen, Richtlinien und Bemessungsbehelfen stellt es für den Ingenieur stets eine große Herausforderung dar, eine integrale Brücke zu planen. Dies erfordert ein hohes Maß an Erfahrung, Mut und Ingenieurgeist. [14]

2.6 (Spezielle) Anwendungsbeispiele der integralen Brückenbauweise

2.6.1 Die Sunnibergbrücke

Ein Paradebeispiel einer innovativen integralen Brückenlösung stellt die *Sunnibergbrücke* in der Schweiz dar. Sie wurde im Zuge der Umfahrung Klosters errichtet und im Jahre 1998 eröffnet. Bei ihr wurden spezielle Voraussetzungen perfekt zum konstruktiven Vorteil ausgenutzt. Das 526 m lange Tragwerk ist ein Spezialfall einer Schrägkabelbrücke. Die Brücke besitzt vier Pylone, welche das Bauwerk in drei große Hauptfelder und zwei kleine Randfelder teilen (siehe auch Abbildung 2.18). Die starke Krümmung im Grundriss ermöglicht es, das Brückendeck fest in die Widerlager einzuspannen. Zwangsspannungen aus Temperaturdehnungen können durch Horizontalverformungen in Brückenquerrichtung abgebaut werden.

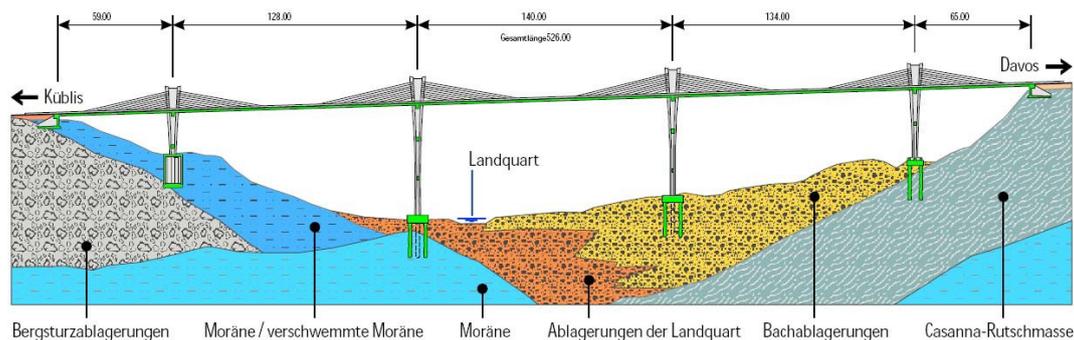


Abbildung 2.18: Sunnibergbrücke - Längsschnitt und geologische Verhältnisse [14]

Das Brückendeck der Sunnibergbrücke besteht aus einer in Querrichtung schlaff bewehrten Betonplatte mit zwei Randträgern. Im mittleren Feldbereich ist das Tragwerk in Längsrichtung durch Zusatzkabel vorgespannt, alle übrigen Bereiche erzielen die Vorspannwirkung durch die Horizontalkraft aus den Schrägkabeln. Durch die Aufweitung der Pylone nach außen gelingt es, das Tragwerk äußerst wirkungsvoll in die Widerlager einzuspannen und die Pfeilerköpfe in Brückenlängs- und Querrichtung zu stabilisieren. [14]



Abbildung 2.19: Luftaufnahme der Sunnibergbrücke [14]



Abbildung 2.20: Sunnibergbrücke – Pylonaufweitung [14]

2.6.2 Der La-Ferté-Steg, Stuttgart-Zuffenhausen

Der La-Ferté-Steg stellt eine fugen- und lagerlose Fuß- und Radwegbrücke aus Stahlbeton über die Haldenrainstraße in Stuttgart-Zuffenhausen dar. Die 118,50 m lange Brücke ist im Grundriss gleichmäßig gekrümmt und folgt einem Kreisbogen mit 54 m Radius. Das Tragwerk besteht aus einem schlaff bewehrten Plattenbalken variabler Konstruktionshöhe, der von sechs äußerst schlanken Stahlstützen entlang seiner Schwerachse gestützt wird. Die maximale Spannweite beträgt 28 m (siehe Abbildung 2.21 und 2.22). [6]

Die Stahlstützen der Brücke sind als Pendelstützen ausgeführt und ermöglichen es dadurch, Zwänge durch Temperaturdifferenzen gering zu halten. Das seitliche Ausweichen des Überbaus wird dadurch nicht behindert (siehe Abbildung 2.22 – rechtes Bild). [14]

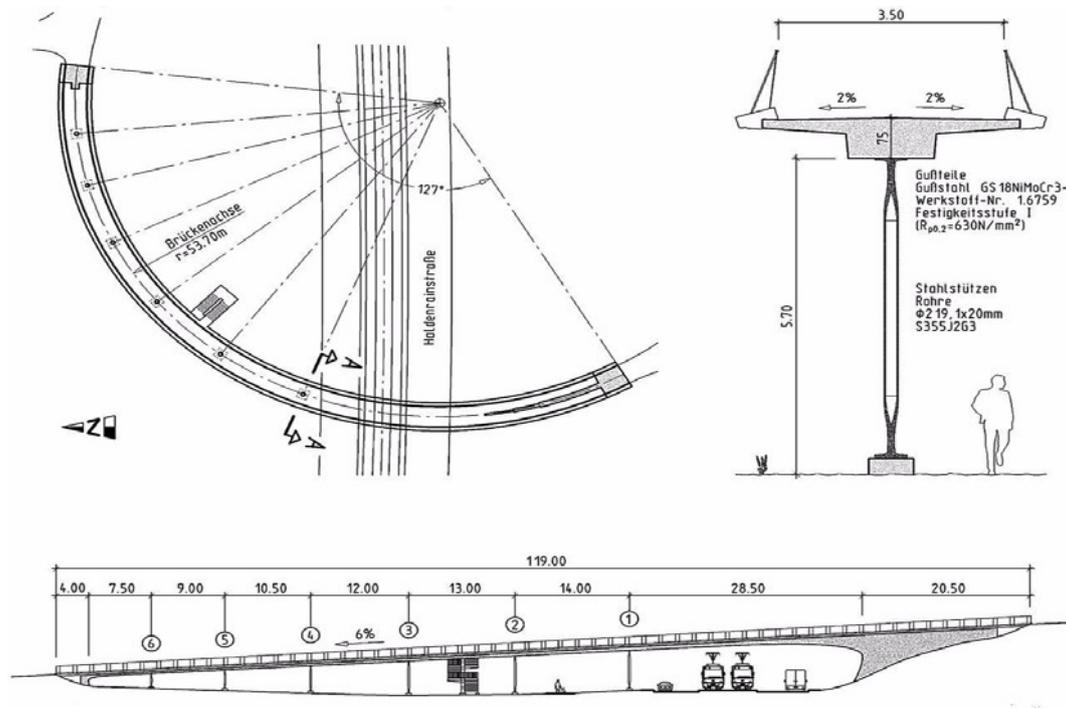


Abbildung 2.21: Grundriss, Ansicht und Schnitt des La-Ferté-Stegs [14]



Abbildung 2.22: links: monolithische Einbindung ins Widerlager, rechts: Stahlstütze als Pendelstab ausgeführt [6]

Kapitel 3

Wirtschaftliche Grundlagen und Begriffe

3.1 Definition – Lebenszykluskosten

Mit dem Begriff *Lebenszykluskosten* definiert man im Bauwesen die Kosten, die ein Bauobjekt – ganzheitlich über den Lebenszyklus betrachtet – verursacht. Der kostenverursachende Lebenszyklus eines Bauwerks beinhaltet dabei grob

- die Planungskosten
- die Errichtungskosten
- die Instandhaltungs- und Wartungskosten
- mögliche unerwartete Zusatzkosten, sowie die
- Abbruchkosten

am Ende des Lebenszyklus [12], [15].

Die jährlichen Instandhaltungskosten werden üblicherweise als Prozentsatz der Errichtungskosten angegeben. Dieser Wert kann laut Literaturangaben je nach Konstruktionsart und Bauteil der Brücke 0,4–2,0% betragen (siehe auch Tabelle 3.1).

Geht man von einer erwarteten Lebensdauer der Brücke von 100 Jahren bei einem Instandhaltungsprozentsatz von 1,5% p.a. aus, so betragen die Instandhaltungskosten bereits 150% der Errichtungskosten der Brücke. Zuzüglich eines auf Erfahrungswerten beruhenden Abbruchkosten-Prozentsatzes von 30%

Tabelle 3.1: Theoretische Nutzungsdauer und Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten für Unterbau und Rohtragwerk (vgl. [8])

Bauliche Anlagen	m [a]	p [%]
1 Unterbau		
Widerlager, Flügelwände, Pfeiler, Stützen, Pylone (jeweils inkl. Gründung)		
1.1 aus Mauerwerk, Beton, Stahlbeton	110	0,5
1.2 aus Pfahlwänden, Schlitzwänden	90	0,5
1.3 aus Stahlspundwänden		
aus Stahlspundwänden ohne Korrosionsschutz	50	0,6
aus Stahlspundwänden mit Korrosionsschutz	70	0,5
1.4 aus Stahl	100	0,8
1.5 aus Holz	50	2,0
2 Überbau: Tragkonstruktionen (Balken, Platten, Bögen, Kastenquerschnitte)		
2.1 aus Stahlbeton	70	0,8
2.2 aus Spannbeton		
aus Spannbeton mit internen Spanngliedern	70	1,3
aus Spannbeton mit externen Spanngliedern	70	1,1
2.3 aus Stahl	100	1,5
2.4 aus Stahl-Beton-Verbundkonstruktion		
Stahltragwerke mit Betonplatte	70	1,2
Walzträger in Beton	100	0,8
Stahlträger in Beton mit Doppelverband (z.B. Preflexträger)	100	0,5
2.5 aus Holz		
für Geh- und Radwege ohne Schutzdach	40	2,5
für Geh- und Radwege mit Schutzdach	50	2,0
für Straßen	40	2,5
3 Rahmenartige Tragwerke (einschl. Gründung)		
Geschlossene Rahmen, unten offene Rahmen, vergleichbare Rahmenkonstruktionen		
3.1 aus Stahlbeton	70	0,8
3.2 aus Spannbeton	70	1,2
3.3 aus Stahl	100	1,5
4 Gewölbe (einschl. Gründung)		
4.1 Mauerwerk, Beton	130	0,6
4.2 Stahlbeton	110	0,5
5 Wellstahlrohre einschl. Flügelwände und Gründungen	70	0,8
6 Ausrüstung		
6.1 Ausrüstung C1: umfasst 30 % der gesamten Ausrüstungskosten	20	1,5
6.2 Ausrüstung C2: umfasst 70 % der gesamten Ausrüstungskosten	30	1,2

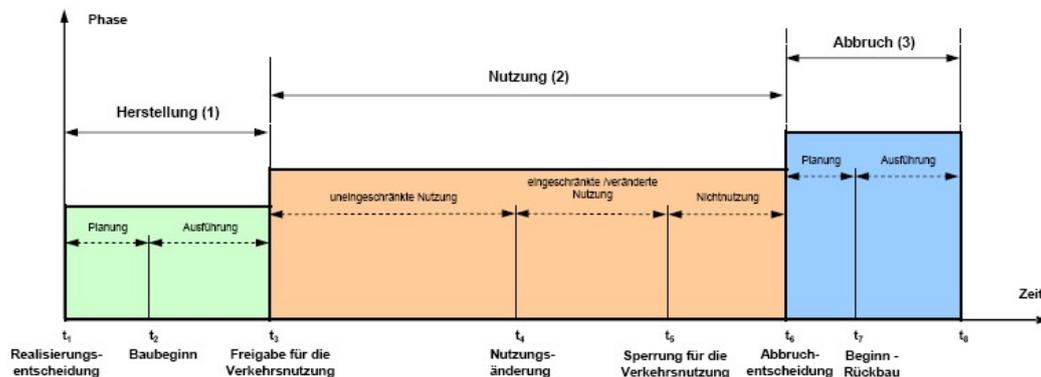


Abbildung 3.1: Lebenszyklusphasen eines Bauwerks (vgl. [17], S.345)

kommt man somit auf eine Lebenszykluskostensumme von 280% der Errichtungskosten (siehe auch Abbildung 3.2).

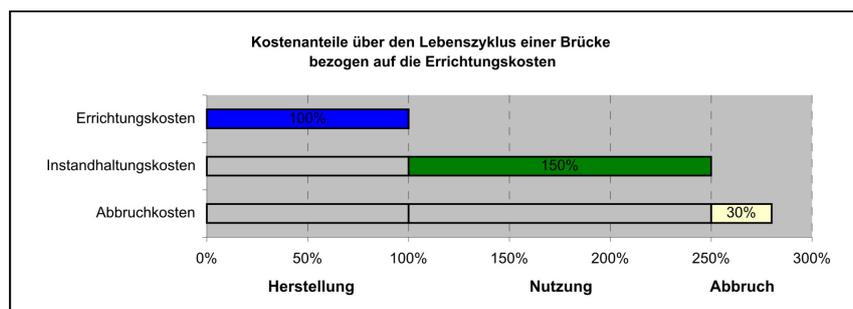


Abbildung 3.2: Kostenentstehung über den Lebenszyklus einer Brücke

Ein Großteil der notwendigen Investitionen fällt also erst nach der Errichtung des Bauwerkes an, während eine Kostenoptimierung jedoch meist nur für die Errichtung stattfindet, da nur hierfür relativ verlässliche Kosten vorliegen.

3.2 Einführung in die Finanzmathematik

Da sich die Investitionen in die Brücke über einen Zeitraum von vielen Jahrzehnten erstrecken, bedient man sich Methoden der Finanzmathematik, genauer gesagt der Investitionsrechnung, um den Wertverzehr festzustellen, den eine Brücke über ihren Lebenszyklus verursacht hat. In der Investitionsrechnungstheorie unterscheidet man zwischen *analytischen* und *synthetischen* Investitionsrechnungsverfahren, wobei erstere die *klassischen* Verfahren der Investitionstheorie darstellen. Die analytischen Investitionsrechnungsverfahren unterscheidet man wiederum in *statische* und *dynamische* Verfahren [11]. Im Zuge der Untersuchungen dieser Arbeit kommen nur dynamische Verfahren zur Anwendung, welche in den folgenden Abschnitten kurz erläutert werden.

Das Problem bei allen statischen Verfahren besteht darin, dass der Zeitfaktor keine ausreichende Berücksichtigung findet. Es macht also in der Berechnung keinen Unterschied, ob bestimmte Kosten (bzw. Ausgaben) oder Erträge (bzw. Einnahmen) zu Beginn der Nutzung eines Objektes oder am Ende der Nutzungsdauer eines Objektes anfallen. In der Realität macht dies jedoch sehr wohl einen Unterschied, da beispielsweise Geld, das erst später in ein Objekt investiert werden muss, bis zu diesem Zeitpunkt für andere Investitionen zur Verfügung steht, ertragbringend angelegt werden kann, oder die Liquidität des Investors höher hält. Dynamische Investitionsrechnungsverfahren berücksichtigen daher die unterschiedlichen Zeitpunkte des Anfalls von Ausgaben und Einnahmen, indem für alle Ausgaben und Einnahmen eines Investitionsobjektes eine zinseszinsmäßige Abzinsung oder Aufzinsung auf einen bestimmten Bezugspunkt erfolgt. Je nach Wahl des Bezugspunktes spricht man von der Barwertmethode (auch Kapitalwertmethode genannt) oder der Endwertmethode.

Bevor auf Barwert- und Endwertmethode näher eingegangen wird, werden in den anschließenden Unterabschnitten wichtige Grundbegriffe der dynamischen Verfahren kurz erläutert.

3.2.1 Zinseszinsrechnung

Die Zinseszinsrechnung kommt im Alltag vor allem bei Sparbüchern zum Einsatz. Zinsen werden normalerweise als Prozentsatz pro Jahr definiert. Somit erhöht sich beispielsweise ein Kapital von €100,- bei einem Zinssatz von 5% nach einem Jahr auf €105,-. Nach dem zweiten Jahr kommt die Zinseszinsrechnung zu tragen, da sich das Grundkapital von €100,- auf €105,- geändert hat. Das Kapital nach zwei Jahren beträgt somit inkl. Zinsen und Zinseszinsen €110,25. Diese rekursive Berechnung lässt sich nun bis zum gewünschten Jahr weiterführen. Die direkte Berechnungsformel um aus einem Grundkapital \mathbf{G} ein Endkapital \mathbf{E} zu erhalten lautet:

$$E = G \cdot q^n \quad \text{mit } q = \left(1 + \frac{p}{100}\right) \quad (3.1)$$

Dabei ist \mathbf{E} das Endkapital, \mathbf{G} das Grundkapital, \mathbf{p} der Zinssatz in % und \mathbf{n} die Anzahl an Jahre, in denen das Kapital verzinst wird. [8]

3.2.2 Aufzinsung und Aufzinsungsfaktor q^n

Der Faktor $q^n = \left(1 + p/100\right)^n$ in 3.2.1 wird *Aufzinsungsfaktor* genannt. Es ist dies jener Faktor, mit dem ein Anfangskapital K^{bar} multipliziert werden muss, um daraus den Endwert K^{end} einer Investition unter Berücksichtigung von Zinsen und Zinseszinsen nach n Jahren zu erhalten.

3.2.3 Abzinsung und Abzinsungsfaktor $1/q^n$

Mit Abzinsung oder Diskontierung beschreibt man in der Zinseszinsrechnung die Ermittlung des Anfangskapitals K^{bar} (Bar-, Gegenwartswert, Ausgangskapital, Kapitalwert), das ein gegebenes Kapital K^{end} (Zeitwert, Endkapital) zu einem früheren Bezugszeitpunkt haben würde. Durch Abzinsung kann man also beispielsweise berechnen, wieviel Kapital n Jahre vor einer Investition angelegt werden muss, um im Investitionsjahr die entsprechende Investitionssumme K^{end} zur Verfügung zu haben. Der Faktor, mit dem ein Endkapital K^{end} multipliziert werden muss, um auf das Ausgangskapital K^{bar} zu kommen, wird *Abzinsungsfaktor* $(1/q)^n$ genannt. Er stellt den Kehrwert des Aufzinsungsfaktors dar.

3.2.4 Barwert- und Endwertmethode

3.2.5 Barwertmethode

Die Barwertmethode (auch Kapitalwertmethode genannt) wird als das klassische dynamische Investitionsrechnungsverfahren bezeichnet. Dabei werden alle zukünftig über die Lebensdauer eines Investitionsobjektes anfallenden Ausgaben und Einnahmen, die einem Investitionsobjekt zuzurechnen sind, auf den Beginn der Lebensdauer eines Investitionsobjektes abgezinst. Anschließend wird von der Summe der Barwerte der Nutzungseinnahmen die Summe der Nutzungsausgaben abgezogen und man erhält dadurch den Barwert des Investitionsobjektes. [11]

Der Kapitalwert kann über den Endwert durch Multiplikation mit dem Abzinsungsfaktor berechnet werden:

$$K^{bar} = K^{end} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^n \quad (3.2)$$

3.2.6 Endwertmethode

Die Endwertmethode ist das Pendant zur Barwertmethode. Dabei werden alle über den Lebenszyklus anfallenden Kosten durch Aufzinsung auf das Ende der Lebensdauer hochgerechnet.

$$K^{end} = K^{bar} \cdot q^n \quad (3.3)$$

Investitionsrechnungen nach der Bar- oder Endwertmethode werden üblicherweise angestellt, um festzustellen, ob eine Investition mit sämtlichen über den Lebenszyklus anfallenden Ausgaben und Einnahmen wirtschaftlich erscheint. Eine Investition erscheint dabei vorteilhaft, sobald sich der durch Abzinsung errechnete Barwert mit dem Kapitaleinsatz der Investition deckt. Ist

der Barwert geringer als der beabsichtigte Kapitaleinsatz, so erscheint die Vor-
nahme der Investition im Vorfeld nicht zweckmäßig. [11]

Für einen Investor ist eine Investition also umso vorteilhafter, je höher der
Kapitalwert bzw. der Endwert ausfällt, da dieser Wert die Höhe seines voraus-
sichtlichen Gewinns darstellt.

Wendet man die vorgestellten Investitionsrechnungsverfahren nun aber für
eine Lebenszykluskostenberechnung an, so müssen diese neu interpretiert wer-
den. Da der Eigentümer einer Brücke in der Regel keine Einnahmen durch
die Brücke erzielt, werden nur Kosten betrachtet, die über den Lebenszyklus
entstehen. Die Kosten sind dabei in der Methodik vergleichbar mit den Ein-
nahmen, die der Investor aus seinem Objekt beziehen würde. Alle Kosten die
während der Lebensdauer der Brücke entstehen, werden vom Entstehungszeit-
punkt bis zum Lebensende verzinst, da man davon ausgeht, dass das Kapital,
das dadurch gebunden wird, zu eben diesem Zinssatz angelegt werden könnte.
Je später also eine Investition in die Brücke wie beispielsweise eine Instandset-
zung anfällt, umso kürzer ist die Zeit, in der Zinsen anfallen, was sich umso
positiver auf den Kostenendwert auswirkt.

Beispiel 1 Die Errichtungskosten einer Brücke betragen € 1.000.000,-. Die
Brücke hat eine prognostizierte Lebensdauer von 80 Jahren. Im 30. Jahr fal-
len für die Erneuerung von Lagern und Fahrbahnübergängen € 20.000,- an In-
standsetzungskosten an. Die Errichtungskosten werden über einen vorgegebe-
nen Zinssatz von 4% nach der Zinseszinsformel in Kapitel 3.2.1 über 80 Jahre
verzinst. Weiters müssen die im 30. Jahr entstandenen Kosten noch für die rest-
lichen 50 Jahre bis zum Ableben der Brücke verzinst werden. Die Berechnung
des Endwerts aus diesen beiden Kostenkomponenten sieht daher folgenderma-
ßen aus:

$$K^{end} = 1.000.000 \cdot 1,04^{80} + 20.000 \cdot 1,04^{50} = 23.191.933, - \quad (3.4)$$

Die Errechnung des Barwerts über den Endwert ergibt weiters:

$$K^{bar} = K^{end} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^n = 23.191.933 \cdot \left(\frac{1}{1,04}\right)^{80} = 1.006.166, - \quad (3.5)$$

Interpretation des Barwerts: Der Brückeneigentümer muss € 1.000.000,- für
die Errichtung der Brücke bereitstellen und weiters zu Beginn der Lebensdauer
der Brücke € 6.166,- anlegen, um im 30. Jahr das nötige Kapital für die Instand-
haltung bereitstellen zu können.

Fallen die Instandsetzungskosten nun erst im 40. Jahr an, so ergibt sich:

$$K^{end} = 1.000.000 \cdot 1,04^{80} + 20.000 \cdot 1,04^{40} = 23.145.819, - \quad (3.6)$$

Die Errechnung des Barwerts über den Endwert ergibt wiederum:

$$K^{bar} = K^{end} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^n = 23.145.819 \cdot \left(\frac{1}{1,04}\right)^{80} = 1.004.165, - \quad (3.7)$$

Die Kosten über den Endwert sind für die Brücke, die schon nach 30 Jahren instandgesetzt werden muss, also um

$$\text{€ } 23.191.933 - \text{€ } 23.145.819 = \text{€ } 46.114,-$$

höher. Weiters müssten für die zweite Brücke zu Beginn des Lebenszyklus um

$$\text{€ } 1.006.166 - \text{€ } 1.004.165 = \text{€ } 2.001,-$$

weniger angelegt werden, um nach 40 Jahren das entsprechende Kapital für die Instandsetzung bereitstellen zu können.

Auf die hier erläuterten Grundlagen wird im Zuge der Lebenszykluskostenanalyse im Abschnitt 5.1.1 nochmals näher eingegangen.

3.3 Kostenbegriffe

- **Reine Baukosten** K_B Die reinen Baukosten sind die Summe der Kosten, die zu Beginn der Lebenszeit zur Herstellung des Brückenbestandteils anfallen. Dazu zählen auch die Planung, die Berechnung, Kosten für Bauprovisorien und Baugrubensicherung, Erdbauarbeiten, jedoch nicht die Grunderwerbskosten. [8]
- **Einmalige Verwaltungskosten** K_V Die einmaligen Verwaltungskosten werden in der Höhe von 10% der reinen Baukosten angesetzt und beinhalten Vorentwürfe, Vorarbeiten, die Bearbeitung des vergabereifen Bauentwurfs, die Vergabe der Bauarbeiten, die Prüfung der statischen Berechnungen und der Ausführungspläne, die örtliche Bauaufsicht und Bauleitung, ferner die Stellung von Prüf- und Messgeräten, Messfahrzeugen, Hilfsfahrzeugen für die Bauaufsicht und die Bauleitung und von Fahrzeugen für die Probelastung sowie sonstige Verwaltungstätigkeiten einschließlich des Rechnungs- und Kassendienstes. Diese Kosten fallen ebenso wie die reinen Baukosten zu Beginn der Lebenszeit der Brücke oder des Brückenbestandteils an. [8]

- **Errichtungskosten** K_{er} Die Errichtungskosten ergeben sich aus der Summe der reinen Baukosten und der einmaligen Verwaltungskosten. [8]

$$K_{er} = K_B + K_V = 1,1 \cdot K_B \quad (3.8)$$

- **Abbruchkosten** K_A Die Abbruchkosten sind die Kosten für den Abbruch des Brückenbestandteils und fallen am Ende der Lebenszeit des Brückenbestandteils an. Sie werden mit 20% der reinen Baukosten angenommen. [8]

$$K_A = 0,2 \cdot K_{er} \quad (3.9)$$

- **Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten** p Der Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten beschreibt, wieviel Prozent der Errichtungskosten jährlich als Instandhaltungskosten des Brückenbestandteils fällig werden. [8]
- **Jährliche Instandhaltungskosten** K_{jI} Die jährlichen Instandhaltungskosten sind die tatsächlichen Kosten, die sich aus dem Produkt des Prozentsatzes der jährlichen Instandhaltungskosten und der Errichtungskosten ergeben. [8]

$$K_{jI} = p \cdot K_{er} \quad (3.10)$$

- **Anlagebetrag** AB Der Anlagebetrag ist der Betrag, der beim Ablösmodell (siehe Abschnitt 5.1.1) angelegt werden muss, um mit den daraus entstehenden Zinsen die Kosten abdecken zu können. [8]
- **Erneuerungskosten** K_{ern} Die Erneuerungskosten sind die Kosten, die zur Erneuerung des Brückenbestandteils bzw. der ganzen Brücke notwendig sind, um ihn bzw. sie neu zu bauen. Sie setzen sich aus der Summe der reinen Baukosten, den Abbruchkosten und den Verwaltungskosten zusammen. [8]

$$K_{ern} = K_B + K_V + K_A = K_B + 1,1 \cdot K_B + 1,2 \cdot K_B \quad (3.11)$$

- **Erhaltungskosten für Erneuerungen** E_{ern} Die Erhaltungskosten sind die fortlaufenden Kosten für die Erhaltung der Brücke. Sie setzen sich aus der Summe des Anlagebetrags AB und den Erneuerungskosten K_{ern} zusammen. [8]

$$E_{ern} = AB + K_{ern} \quad (3.12)$$

- **Kapitalisierte Erhaltungskosten** *AE* Die kapitalisierten Erhaltungskosten enthalten die kapitalisierten Kosten für Instandhaltung und Erneuerungen der Brücke und beschreiben die Erhaltungskosten in einem bestimmten Betrachtungsjahr. Dies ist jener Betrag, der sich aus der Verzinsung des Anlagebetrags seit der letzten Erneuerung bis zum Betrachtungsjahr ergeben hat. [8]

Kapitel 4

Gegenüberstellung der Bauarten – Analyse der Errichtungskosten

Für den Vergleich der integralen mit der konventionellen Bauweise wurden je zwei einfeldrige Tragwerke und zwei mehrfeldrige Tragwerke ähnlicher Spannweite und Typografie herangezogen. Bei den einfeldrigen Tragwerken handelt es sich um Eisenbahnbrücken, die mehrfeldrigen Tragwerke wurden als Straßenbrücken ausgeführt. Die betrachteten Brückenpaare werden in den folgenden Abschnitten erläutert und im Detail analysiert.

4.1 Einfeldrige Brücken im Vergleich

4.1.1 Kurzbeschreibung und Brückenhauptdaten

Die Österreichischen Bundesbahnen sind im Besitz einer Vielzahl von Brückenbauwerken in ganz Österreich. Ein Großteil dieser Brücken hat Spannweiten bis 15 m. In diesem Spannweitenbereich gibt es im Grunde nur zwei wesentliche Konstruktionstypen, nämlich die konventionelle Ausführung als Platte auf Lagern oder die integrale Ausführung als offenen oder geschlossenen Rahmen. Vom offenen Rahmen spricht man, wenn die Rahmenkonstruktion aus Stielen und Riegel gelenkig mit dem Fundament verbunden ist, vom geschlossenen Rahmen spricht man, wenn der Rahmen aus Riegel und Stielen biegesteif in eine Fundamentplatte eingespannt ist.

Um die Unterschiede in den Errichtungskosten und Lebenszykluskosten der beiden Brückentypen analysieren zu können, wurden zwei Brücken ähnlicher

Spannweite aus dem Streckennetz der ÖBB ausgewählt. Beide Brücken befinden sich an der Westbahn in Niederösterreich im Großraum Amstetten und wurden im Zuge des Westbahnausbaus zur 4-gleisigen HL-Strecke Wien - Salzburg errichtet.

Plattenbrücke Als Beispiel einer Brücke konventioneller Bauweise (Platte) wurde die Brücke bei Bahnkilometer 133 der Westbahnstrecke (siehe Abbildung 4.1) herangezogen. Sie befindet sich im Abschnitt Aschbach - Krenstetten (Bezirk Amstetten) und wurde im Jahr 1993 errichtet. Die Brücke dient einer zweispurigen Straße als Unterführung und hat eine lichte Weite von 8,29 m.



Abbildung 4.1: Ansicht der Brücke *km 133* (Plattenbrücke)

Rahmenbrücke Die Kumpfmühlbachbrücke als Exemplar einer integralen Bauweise (Abbildung 4.2) befindet sich nur unweit der konventionellen Brücke bei km 136,6. Die lichte Weite der Brücke beträgt 8 m und führt die Bahn über den Kumpfmühlbach.

Die wichtigsten Daten der beiden Brücken sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

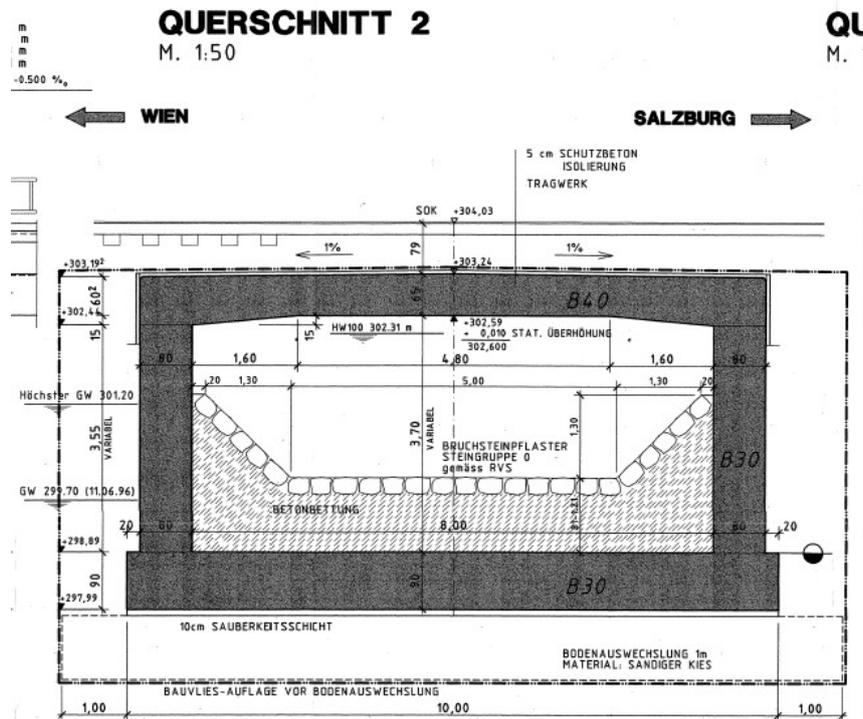


Abbildung 4.2: Längsschnitt durch die Kumpfmühlbachbrücke (Rahmenbrücke)

Tabelle 4.1: Vergleich der Brückenhauptdaten

Brückename	Brücke km 133 (Platte)	Kumpfmühlbachbrücke (Rahmen)
Baujahr	1993	1998
Typ	Platte	Rahmenbauwerk
Anzahl Gleise	2-gleisig	2-gleisig (Tragwerk 1 - Gleise 1+2)
Stützweite	9,25 m	8,80 m
lichte Weite	8,29 m	8,00 m
Breite (inkl.Randbalken)	13,10 m	11,31 m
Fläche	121,18 m ²	99,53 m ²
Querschnittshöhe	0,50 - 0,60 m	0,65 m
Felder	1	1
Gründung	Großbohrpfähle DN 90, 3+3+3+3	Flachgründung, geschlossener Rahmen, Fundamentplatte d = 0,90 m

4.1.2 Zeichnungen und Planausschnitte

Auf den folgenden Seiten befinden sich einige wesentliche Planausschnitte der beiden Brücken, um dem Leser einen groben allgemeinen Überblick über die Objekte zu verschaffen.

Plattenbrücke Die Plattenbrücke wurde als Ersatztragwerk auf der alten 2-gleisigen Trasse errichtet. Sowohl Überbau als auch Unterbau wurden neu errichtet, da im Zuge einer Verbreiterung der zu überbrückenden Straße die

Spannweite der Brücke vergrößert werden musste.

Die Widerlager der Plattenbrücke bestehen aus einer Bohrpfahlwand mit vorgesetzter 30 cm dicker Stahlbetonwand. Ein Widerlager besteht aus acht Bohrpfählen, welche von Niveau -2.34 m unter der neuen Schwellenoberkante hinter die bestehende Widerlagerwand gebohrt wurden. Anschließend wurden die alten Widerlagerwände abgerissen und die neue Vorsatzwand betoniert. In Abbildung 4.5 sind die Bohrpfähle, die das neue Widerlager bilden, dargestellt, dazwischen erkennt man strichliert die abgetragenen Widerlager des alten Tragwerks. Die Bohrpfähle münden in einen Pfahlkopfbalken mit Querschnitt $90 \times 100\text{ cm}$, auf dem die Platten des neuen Tragwerks gelagert sind. Das neue Tragwerk besteht dabei aus vier Platten (eine Platte pro Gleis, sowie zwei Randbalkenplatten), die alle getrennt voneinander gelagert sind (siehe Abbildung 4.4).

Rahmenbrücke In den Abbildungen 4.7 und 4.8 sind ein Grundriss sowie ein Querschnitt der Rahmenbrücke zu sehen. Aus den Plänen ist ersichtlich, dass die Brücke 4-gleisig ausgeführt wurde, wobei die Rahmenwände unter allen vier Gleisen durchgehen, die Rahmendecken jedoch getrennt für je zwei Gleise mit jeweils zwei Randbalken ausgeführt wurden. Für die weiteren Analysen in Abschnitt 4.2.5 wurden jedoch nur die Massen des halben Gesamttragwerks – also für eine 2-gleisige Überbrückung – herangezogen, da auch die Vergleichsbrücke nur aus zwei Gleisen besteht.

Eine Abbildung des Brückenlängsschnitts befindet sich in Abbildung 4.2.

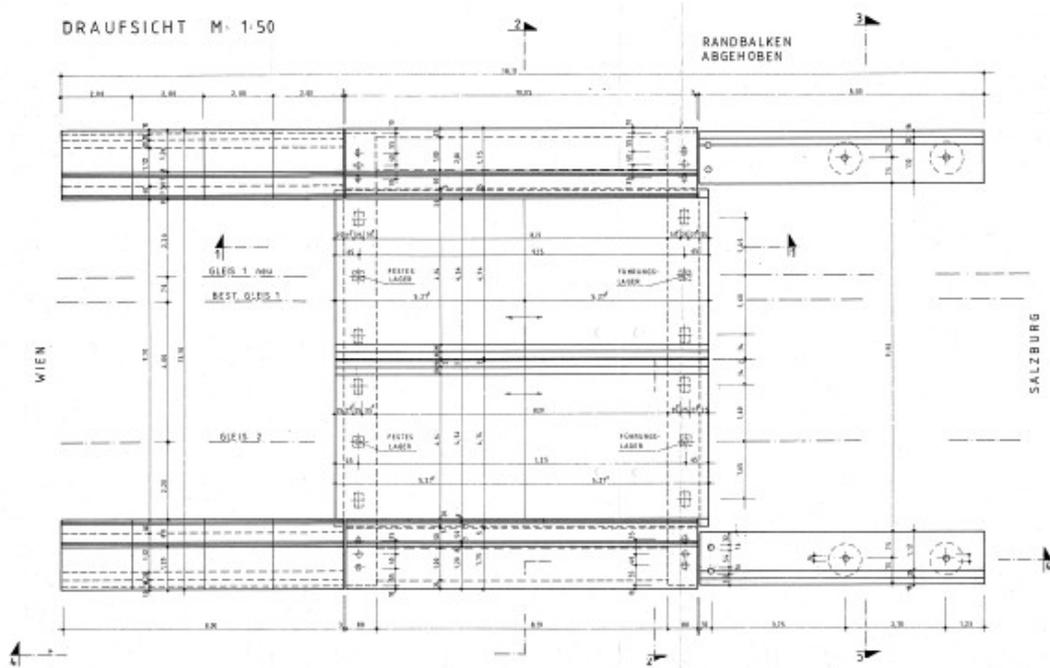


Abbildung 4.3: Draufsicht – Plattenbrücke

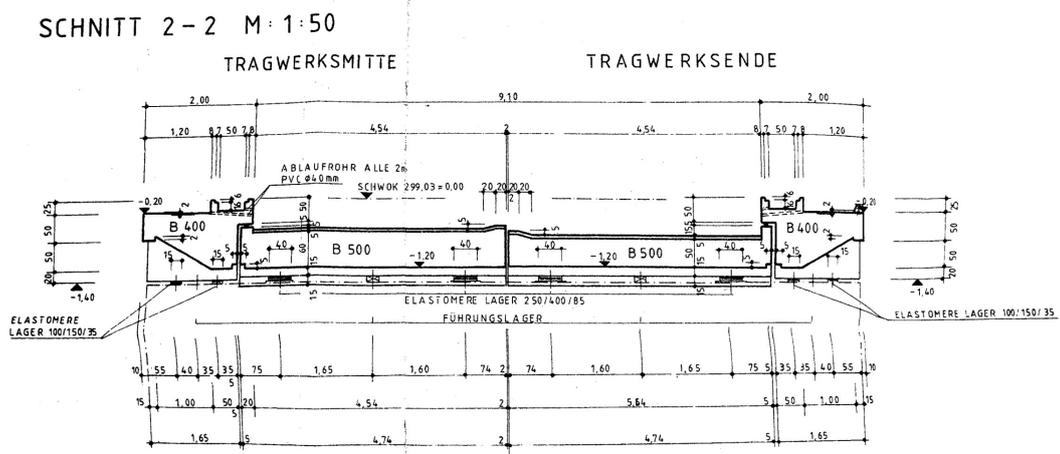


Abbildung 4.4: Überbau-Querschnitt – Plattenbrücke

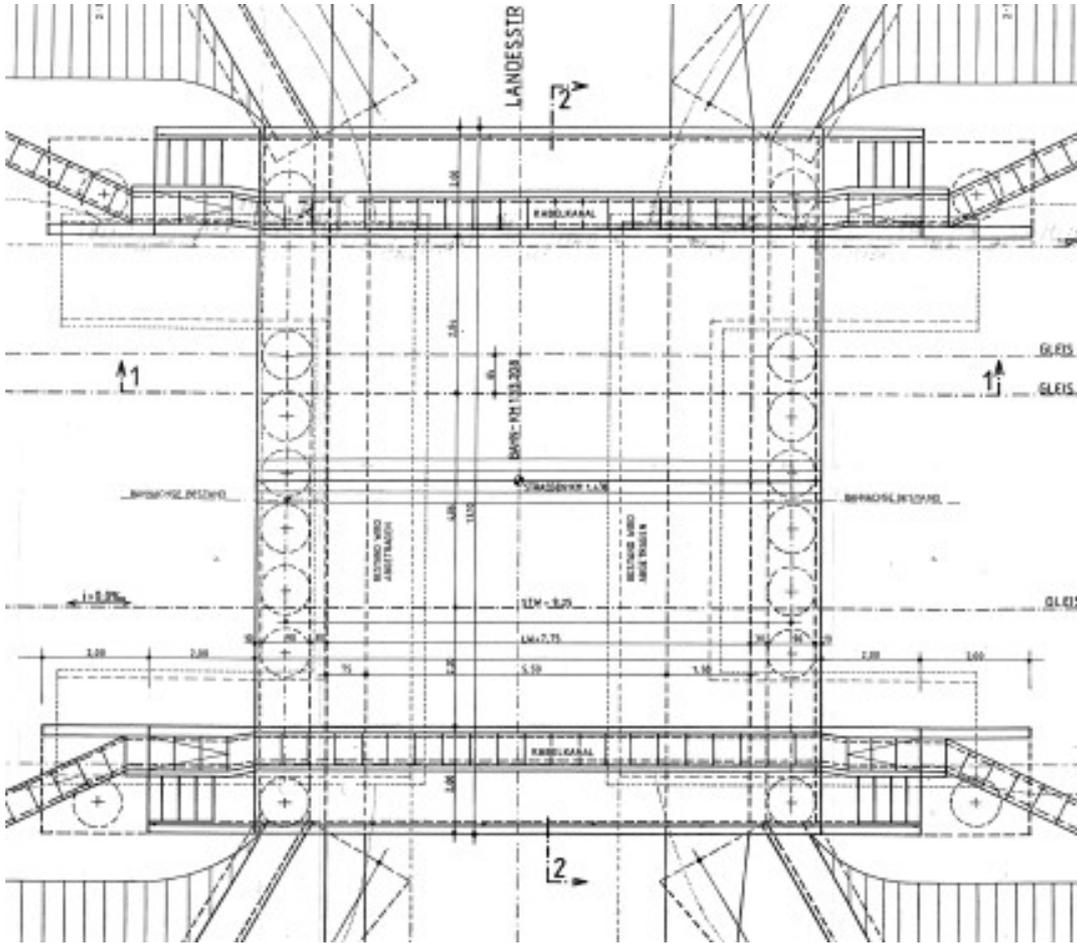


Abbildung 4.5: Bohrpfähle und Bestand – Plattenbrücke

SCHNITT 1-1 M: 1:50

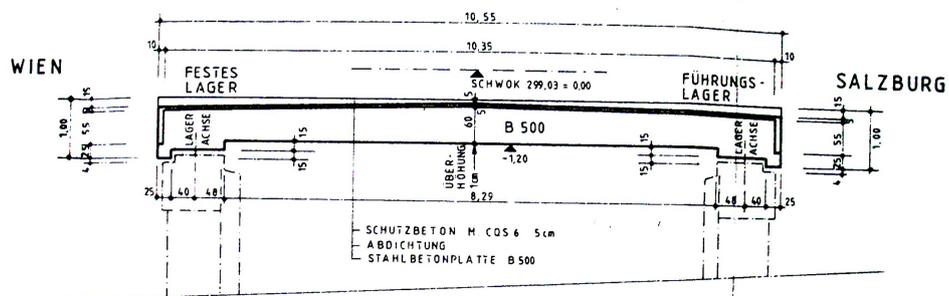


Abbildung 4.6: Längsschnitt – Plattenbrücke

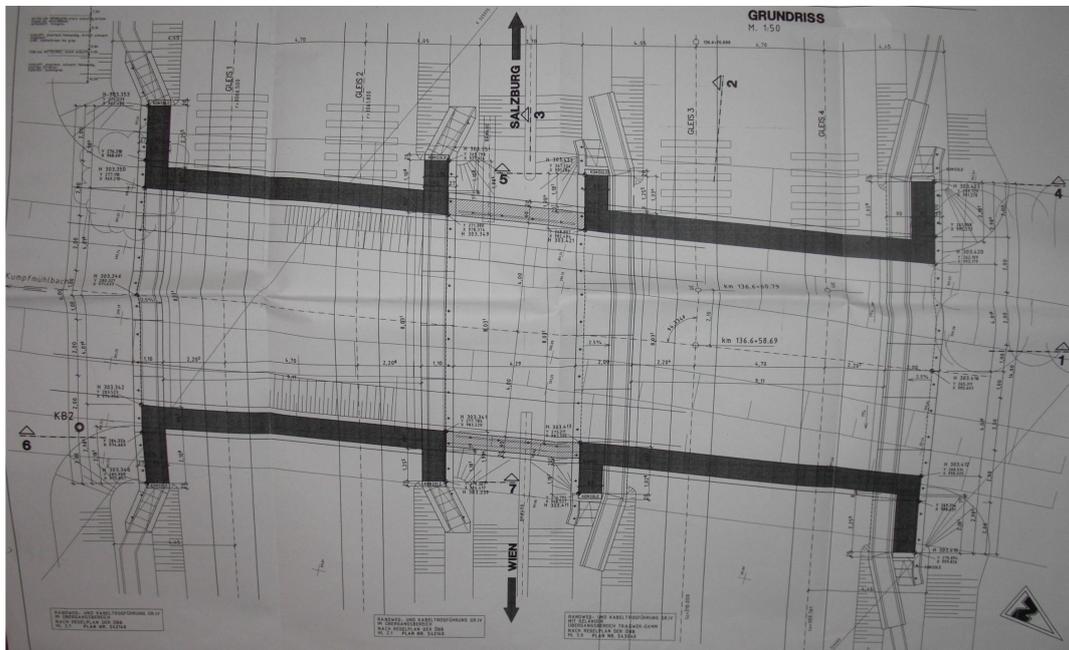


Abbildung 4.7: Grundriss – Rahmenbrücke

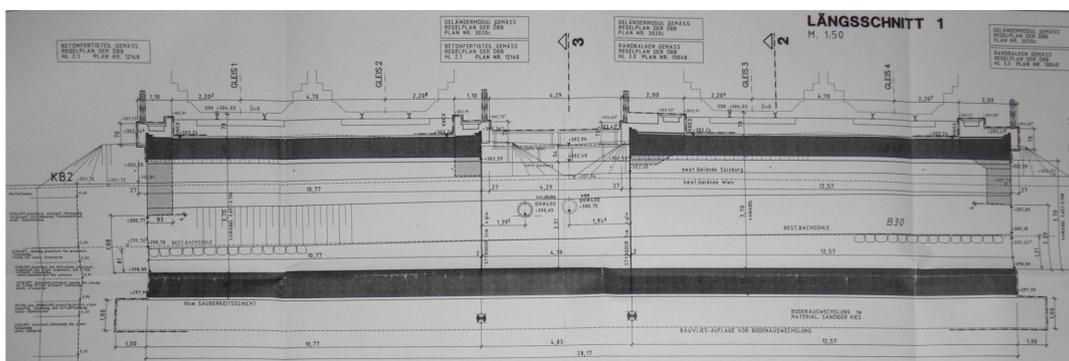


Abbildung 4.8: Querschnitt – Rahmenbrücke

4.1.3 Analyse der statischen Unterschiede

Statisches System und Belastung

Um die statischen Unterschiede der beiden Systeme aufzuzeigen, wurde ähnlich wie in Abschnitt 2.4.2 für beide Brücken ein statisches Modell gleicher Geometrie, gleicher Belastung und gleicher Baustoffe erstellt (siehe Abbildung 4.9). Betrachtet wird wieder ein $1,00\text{ m}$ breiter Plattenstreifen, der als ebenes statisches System modelliert ist. Als Material wurde Stahlbeton der Güte $C35/45$ herangezogen, die Stützweite beträgt $9,00\text{ m}$ und die Höhe des Rahmens $5,00\text{ m}$. Sowohl der Einfeldträger bei der Plattenvariante als auch Riegel und Stiel beim Rahmen haben eine Querschnittsdicke von 60 cm . Bei diesen Werten handelt es sich um gerundete Mittelwerte der repräsentativ ausgewählten Brücken.

Da es sich nur um ein äußerst grobes statisches Modell handelt, wurde keine Trennung in ständige und veränderliche Lasten vollzogen, auch Teilsicherheitsbeiwerte fließen nicht in die Berechnung mit ein. Weiters handelt es sich um ein rein statisches Modell, dynamische Einflüsse werden ebenfalls vernachlässigt. Als vertikale Belastung aus Eigengewicht und Nutzlast wurden wie in der Parameterstudie in Abschnitt 2.4.2 der Einfachheit halber wieder 40 kN/m angesetzt. Weiters wurde auf die Rahmenwände ein mit der Tiefe linear ansteigender aktiver Erddruck angesetzt, der in der Tiefe von 5 m 25 kN/m^2 beträgt. Dies entspricht größenordnungsmäßig dem Wert eines durchschnittlichen sandig-kiesigen Bodens.

Als zweiter Lastfall wurde wie schon in Abschnitt 2.4.2 eine Beanspruchung des Oberbaus aus Temperaturdifferenz von 30°C angesetzt!

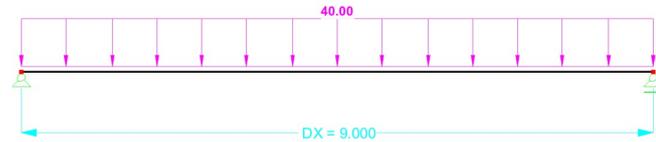
Vergleich der statischen Ergebnisse

In Abbildung 4.10 sind die Momentenverläufe und Auflagerkräfte zufolge Belastung durch Eigengewicht und Nutzlast sowie beim Rahmen zusätzlich durch den Erddruck dargestellt. Das Moment beim Einfeldträger ist im Vergleich zum Feldmoment beim Rahmen mehr als doppelt so groß. Beim Rahmen kommt es zur Übertragung von Momenten an den biegesteifen Ecken und zu positiven Momenten an den Einspannstellen durch die zusätzliche horizontale Belastung durch den Erddruck.

In Abbildung 4.11 sind die Momentenverläufe aus Temperaturbeanspruchung für den Rahmen dargestellt. Da es sich um ein Tragwerk mit sehr geringer Spannweite handelt, hält sich die Momentenbeanspruchung infolge Temperatur in Grenzen und kann vom System problemlos aufgenommen werden.

Der statisch bestimmte Einfeldträger ist nicht dargestellt, es werden durch Temperaturbeanspruchung keine Schnittgrößen erzeugt, da er sich in Horizontalrichtung frei verformen kann.

Konventionelle Bauweise (Platte)



Integrale Bauweise (Rahmen)

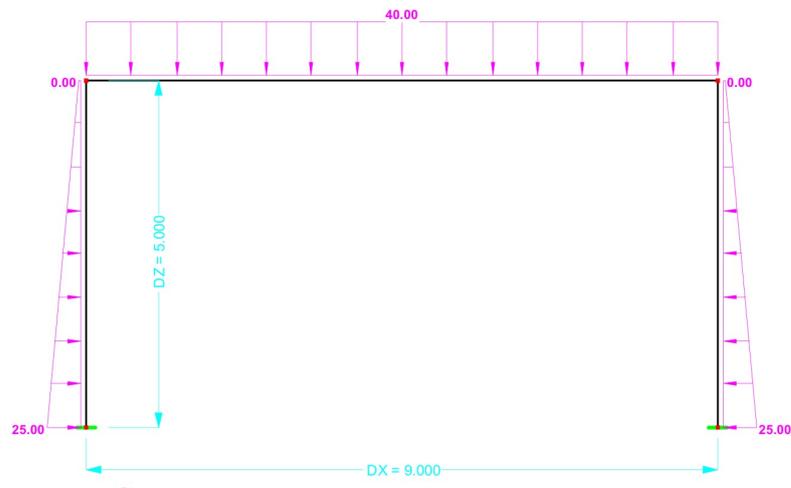


Abbildung 4.9: Brücke einfeldrig – System und Belastung

Die Normkraftverläufe aus Belastung und Temperaturbeanspruchung für den Rahmen sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Durch die kleine Spannweite entsteht nur eine geringe zusätzliche Normkraftbeanspruchung infolge Temperatur die vom System problemlos aufgenommen werden kann.

Beim Einfeldträger entstehen weder aus Belastung noch aus Temperaturbeanspruchung Normkräfte.

Die Durchbiegungen infolge Belastung und die Tragwerksverformungen infolge Temperaturbeanspruchung sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Aufgrund der massiven Ausbildung und der geringen Spannweite sind sie mit $5,67\text{ mm}$ Durchbiegung für die Platte bzw. $2,10\text{ mm}$ Durchbiegung für den Rahmen sowie $2,70\text{ mm}$ Horizontalverschiebung für die Platte bzw. $1,34\text{ mm}$ für den Rahmen vernachlässigbar.

Konventionelle Bauweise (Platte)



Integrale Bauweise (Rahmen)

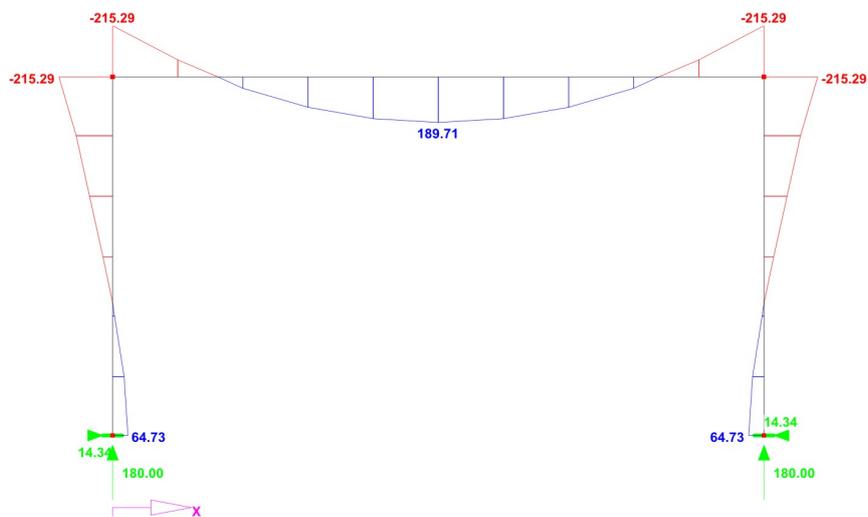


Abbildung 4.10: Brücke einfeldrig – Momente und Auflagerkräfte aus Belastung

Integrale Bauweise (Rahmen)

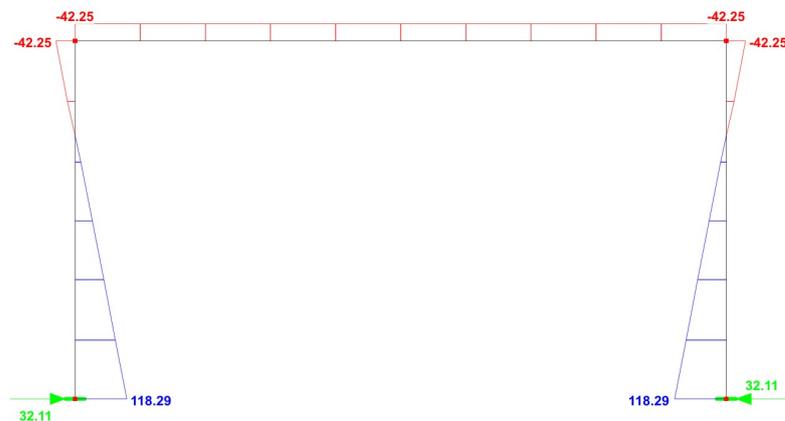
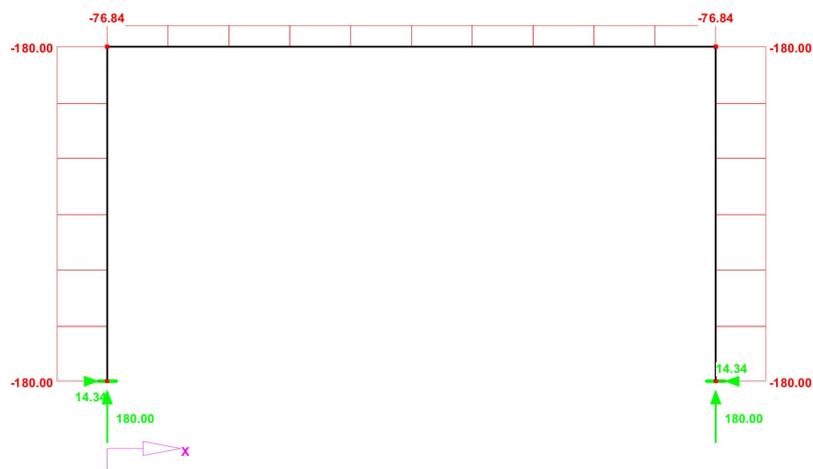


Abbildung 4.11: Brücke einfeldrig – Momente und Auflagerkräfte aus Temperaturbeanspruchung

Normalkraft aus Belastung

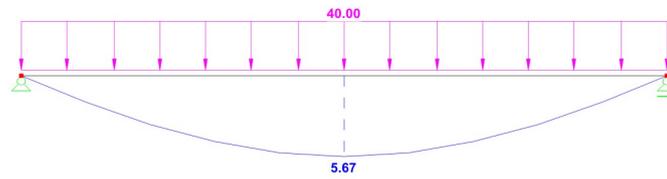


Normalkraft aus Temperaturbeanspruchung



Abbildung 4.12: Brücke einfeldrig – Normalkräfte aus Belastung und Temperaturbeanspruchung

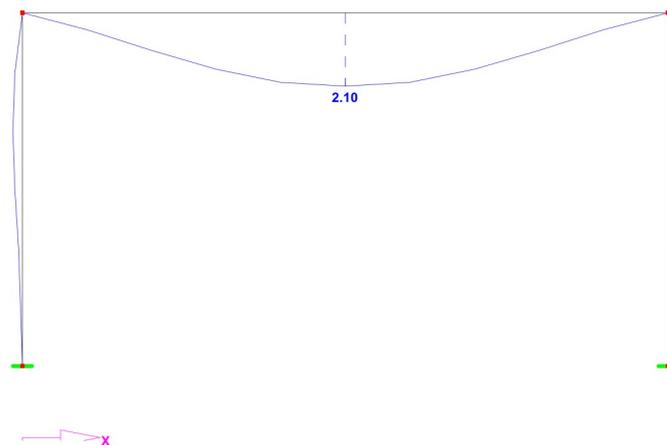
Platte - Durchbiegungen aus Belastung



Platte - Verschiebungen aus Temperaturdehnung



Rahmen - Durchbiegungen aus Belastung



Rahmen - Verschiebungen aus Temperaturdehnung

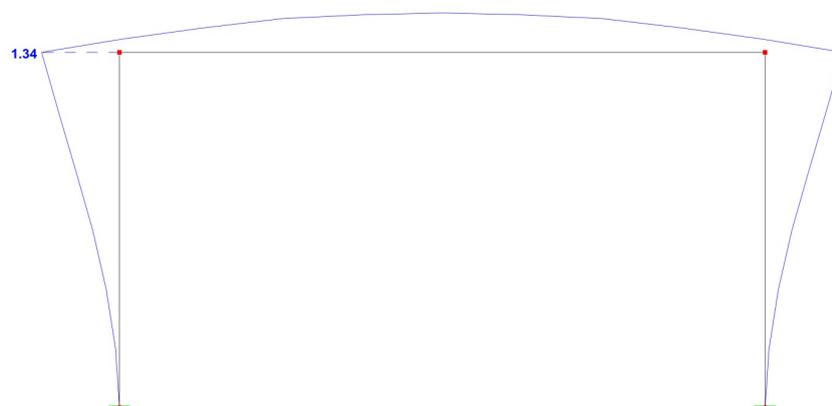


Abbildung 4.13: Brücke einfeldrig – Durchbiegungen aus Belastung und Verschiebungen aus Temperaturdehnung

4.1.4 Kostenermittlung für die Hauptpositionen der Brücken

Um die Brücken hinsichtlich der Kosten der einzelnen Gewerke, ihrer Anteile, sowie ihres Einflusses auf die Entstehung der Lebenszykluskosten analysieren zu können, wurde zu allererst ein Leistungsverzeichnis mit den wichtigsten Positionen erstellt und eine Massenermittlung anhand der vorhandenen Pläne durchgeführt. Für die Plattenbrücke existierten Bewehrungspläne, woraus die verbauten Stahlmengen entnommen werden konnten. Von der Rahmenbrücke (Kumpfmühlbachbrücke) konnten keine Bewehrungspläne mehr erhoben werden, die Stahlmengen wurden daher anhand von Erfahrungswerten mit Hilfe eines erfahrenen Kalkulanten größenordnungsmäßig abgeschätzt (siehe Anmerkungen für Leistungsgruppe 6 in Tabelle 4.4).

Nach der Massenermittlung erfolgte eine Kostenermittlung für die Brücken. Die Einheitskosten wurden dabei jedoch nur größenordnungsmäßig angesetzt und keiner scharfen Kalkulation unterworfen. Da für beide Brücken die gleichen Ansätze für die Kostenermittlung herangezogen wurden, ist dies auch nebensächlich, da in erster Linie der relative Kostenunterschied in den Lebenszykluskosten der beiden Bauarten ermittelt werden soll.

Die Kosten für den Auftraggeber stellt der Herstellpreis dar, den der Auftragnehmer für das Errichten der Brücke verlangt. Nach der *Grundformel der Baukalkulation* aus *Kropik – Kalkulation und Kostenrechnung* [7] (siehe auch Tabelle 4.2) kommt der Herstellpreis zustande aus der Summe der Einzelkosten der Teilleistungen (EKT), worauf dann ein *Zuschlag für Baustellengemeinkosten* erfolgt. Die Baustellengemeinkosten umfassen einerseits einmalige Kosten der Baustelle, wie die Baustelleneinrichtung und -räumung und Gerätetransporte, andererseits zeitgebundene Kosten der Baustelle, welche in den einzelnen Positionskosten noch nicht enthalten sind. Dies sind vor allem Gehaltskosten der leitenden Angestellten, Lohnkosten des unproduktiven Personals, Kosten für Vorhaltegeräte und sonstige Kosten. Die Höhe des Zuschlags variiert je nach Art und Aufwand der Baustelle, in diesem Fall wurde ein Zuschlag von 25% angesetzt.

EKT und Zuschlag für Baustellengemeinkosten bilden die sogenannten *Herstellkosten*. Auf die Herstellkosten wird noch ein *Zuschlag für Geschäftsgemeinkosten* (auch Allgemeine Geschäftskosten (AGK) genannt) draufgeschlagen. Die Geschäftsgemeinkosten umfassen dabei alle Gemeinkosten des Unternehmens, die mit der Bauproduktion in keinem nennenswerten Zusammenhang stehen, wie etwa Gehaltskosten der Geschäftsführung und Verwaltung, Bürokosten in der Verwaltung, Mieten und Pachten, Versicherungen, Mitgliedsbeiträge, Kosten für Rechts- und Steuerberatung usw. Als Zuschlag für die Abdeckung der Geschäftsgemeinkosten werden üblicherweise 10–15% der Herstellkosten draufgeschlagen.

Herstellkosten und Geschäftsgemeinkosten stellen die sogenannten *Selbstkosten* des Unternehmers dar. Da jeder Unternehmer üblicherweise darauf bedacht ist, einen Gewinn zu erwirtschaften und er außerdem das Unternehmerisiko zu tragen hat, werden auf die Selbstkosten je nach Marktsituation noch 1–10% für unternehmerisches Wagnis und Gewinn draufgeschlagen. In dieser Kalkulation wurde ein Gesamtzuschlag für GGK, Wagnis und Gewinn von 10% angesetzt.

Selbstkosten zuzüglich Zuschlag für Wagnis und Gewinn stellen nun den *Herstellpreis* dar, den der Unternehmer vom Auftraggeber für die Erstellung der Bauleistung verlangt.

Tabelle 4.2: Grundformel der Baukalkulation (vgl. [7])

GRUNDFORMEL DER BAUKALKULATION	
PRODUKTIONS MITTEL	ARBEITER >>> Einheitsarbeitskosten (€/Std)
	GERÄT >>> Einheitsgerätekosten (€/Std)
	MATERIAL >>> Einheitsmaterialkosten (€/MEh)
	FREMDLEISTUNGEN
EINZELKOSTEN der TEILLEISTUNG (EKT) für jede Position im LV + Zuschlag für Baustellengemeinkosten (BGK) ~ 25%	
HERSTELLKOSTEN + Zuschlag für Geschäftsgemeinkosten (GGK) ~ 6-12%	
SELBSTKOSTEN + Zuschlag für Wagnis und Gewinn ~ 1-12%	
HERSTELLPREIS	

Für die Plattenbrücke ergibt sich aus der Kalkulation ein Netto-Herstellpreis von knapp € 298.000,- bzw. ein Quadratmeterpreis von € 2.456,-. Die Rahmenbrücke kommt bedeutend günstiger und kostet netto gut € 144.000,-, was auf den Quadratmeter Brückenfläche umgelegt € 1.448,- ausmacht.

Zu beachten ist, dass in diesen Kalkulationen keine vollständigen Leistungsverzeichnisse, sondern nur Leistungsverzeichnisse mit ausgewählten Positionen erstellt wurden. Speziell die Fundierungsarbeiten wurden nach dem Vergleich mehrerer Varianten sowohl bei der konventionellen als auch bei der integralen Variante gänzlich weggelassen, da sie zu stark von den örtlichen Verhältnissen abhängig sind und ansonsten das Ergebnis verfälschen würden. Bei der konventionellen Brücke wurde außerdem laut Plan eine teurere Sonderkonstruktion eines Randbalkens eingebaut, die üblicherweise jedoch nur selten verwendet wird. Es wurde daher für beide Brücken einheitlich der Standardrandbalken nach ÖBB-Regelplanung HL. 3.0 kalkuliert.

Tabelle 4.3: Kostenermittlung für die Plattenbrücke

LEISTUNGSVERZEICHNIS MIT AUSGEWÄHLTEN POSITIONEN					PLATTENBRÜCKE (km 133)		
LV-Nr.	ZU O	LV-Position	Anmerkung	Einheitskosten	VA-Menge	Einzelkosten d. Teilleistung	EKT / m ² [€/m ²]
1. BAUSTELLEINRICHTUNG							
1.1		Einrichten d. Baustelle	10% >>> siehe Zuschlag BGK + BE!		1,00 PA		
1.2		Zeitgebundene Kosten der Baustelle (BGK)	15% >>> siehe Zuschlag BGK + BE!		1,00 PA		
						€ 202,09	€ 1,67
2. ERDARBEITEN							
2.1	U	Mutterboden abtragen und Wegschaffen 20 cm		€ 3,00 /m ³	67,36 m ³	€ 202,09	€ 1,67
2.2	U	Bodenausschüttung sandiger Kies 1 m	vernachlässigt!	€ 22,00 /m		€ -	€ -
2.3	U	Dammschüttkörper herstellen inkl. Material	vernachlässigt, bzw. vorh. aus alter Streckenführung!	€ 15,00 /m ³		€ -	€ -
2.4	U	Baugrubenaushub inkl. Wegschaffen	vernachlässigt, bzw. nicht ersichtlich!	€ 15,00 /m ³		€ -	€ -
							€ -
3. BOHRPFAHLARBEITEN vernachlässigt!							
3.1	U	Leerbohrung Bohrpfahl		€ 100,00 /m	15,00 m		€ -
3.2	U	Bohrpfähle herstellen, Ø 90, vollverroht		€ 212,00 /m	336,00 m		€ -
3.3	U	Pfahlköpfe abschremmen		€ 98,00 /Stk	24,00 Stk		€ -
						€ 89.399,48	€ 737,77
4. BETONARBEITEN							
4.1	U	Sauberkeitsschicht herstellen für Fundamente		€ 7,20 /m ²	26,32 m ²	€ 189,50	€ 1,56
4.2	U	Magerbetonauffüllungen		€ 95,00 /m ³	12,00 m ³	€ 1.140,00	€ 9,41
4.3	U	Beton Fundamentplatten Vorsatzwände C20/25		€ 116,00 /m ³	21,38 m ³	€ 2.480,54	€ 20,47
4.4	U	Beton Vorsatzwand-Flügel C25/30 (4x)		€ 160,00 /m ³	30,28 m ³	€ 4.844,16	€ 39,98
4.5	U	Beton Vorsatzwand-Rückwand C25/30 (2x)		€ 160,00 /m ³	33,21 m ³	€ 5.313,60	€ 43,85
4.6	U	Beton Auflagerbank C25/30		€ 160,00 /m ³	22,19 m ³	€ 3.550,00	€ 29,30
4.7	O	Beton Tragwerk (Platte) C40/50		€ 170,00 /m ³	55,33 m ³	€ 9.405,65	€ 77,62
4.8	U	Beton Kopfbalken - Flügelwände C25/30		€ 144,00 /m ³	43,20 m ³	€ 6.220,80	€ 51,34
4.9	A	Beton Randbalken C35/45 (siehe Pos. 4.10!)		€ 164,00 /m ³		€ -	€ -
4.10	A	Randbalkenfertigteile Tragwerk u. Flügelwände	all inkl! lt. Regelplan HL 3.0!	€ 1.000,00 /m	52,00 m	€ 52.000,00	€ 429,13
4.11	U	Spritzbeton 10 cm		€ 35,00 /m ²	121,58 m ²	€ 4.255,23	€ 35,12
						€ 79.327,34	€ 654,65
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN							
5.1	U	Schalung Fundamentplatten-Vorsatzwände		€ 54,00 /m ²	79,92 m ²	€ 4.315,68	€ 35,62
5.2	U	Schalung Vorsatzwand-Flügel (4x)		€ 78,00 /m ²	217,92 m ²	€ 16.997,76	€ 140,27
5.3	U	Schalung Vorsatzwand-Rückwand (2x)		€ 78,00 /m ²	221,40 m ²	€ 17.269,20	€ 142,51
5.4	U	Schalung Auflagerbank		€ 78,00 /m ²	48,55 m ²	€ 3.786,90	€ 31,25
5.5	O	Schalung Platte		€ 120,00 /m ²	131,94 m ²	€ 15.832,80	€ 130,66
5.6	O	Rüstung Platte		€ 100,00 /m ²	129,17 m ²	€ 12.917,00	€ 106,60
5.7	U	Schalung Kopfbalken - Flügelwände		€ 120,00 /m ²	68,40 m ²	€ 8.208,00	€ 67,74
5.8	A	Schalung Randbalken - Tragwerk	in Pos. 4.10 inkludiert!	€ 160,00 /m ²		€ -	€ -
5.9	A	Schalung Randbalkenfertigteil auf Flügelwänden	in Pos. 4.10 inkludiert!			€ -	€ -
						€ 15.492,55	€ 127,85
6. BEWEHRUNGSARBEITEN							
6.1	U	Bewehrung Vorsatzwand		€ 830,00 /t	4,01 t	€ 3.328,30	€ 27,47
6.2	U	Bewehrung Auflagerbank		€ 815,00 /t	3,79 t	€ 3.088,85	€ 25,49
6.3	O	Bewehrung Platte		€ 800,00 /t	6,12 t	€ 4.896,80	€ 40,41
6.4	U	Bewehrung Flügelwände inkl. Fundierung+Kopfbalken		€ 820,00 /t	4,13 t	€ 3.386,60	€ 27,95
6.5	A	Bewehrung Randbalken - Tragwerk	in Pos. 4.10 inkludiert!	€ 820,00 /t		€ -	€ -
6.6	A	Bewehrung Randbalkenfertigteil auf Flügelwänden	in Pos. 4.10 inkludiert!	€ 820,00 /t		€ -	€ -
6.7	U	Stahldolle DN 60mm, lg = 1100 mm		€ 33,00 /Stk	24,00 Stk	€ 792,00	€ 6,54
						€ 32.000,00	€ 264,08
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (ausgewählte Positionen)							
7.1	A	Elastomerlager (je 8 pro Auflager)		€ 1.600,00 /Stk	16,00 Stk	€ 25.600,00	€ 211,26
7.2	A	2 Führungs- u. 2 Festlager		€ 1.600,00 /Stk	4,00 Stk	€ 6.400,00	€ 52,82
						€ 216.421,47	€ 1.786,02
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN						€ 216.421,47	€ 1.786,02
		Zuschlag Baustellengemeinkosten + Baustelleneinrichtung		25 %		€ 54.105,37	€ 446,51
HERSTELLKOSTEN und KOSTEN / m² BRÜCKENFLÄCHE						€ 270.526,83	€ 2.232,53
		Zuschlag Geschäftsgemeinkosten, Wagnis, Gewinn		10 %		€ 27.052,68	€ 223,25
HERSTELLPREIS NETTO und PREIS / m² BRÜCKENFLÄCHE						€ 297.579,52	€ 2.455,78

Tabelle 4.4: Kostenermittlung für die Rahmenbrücke

LEISTUNGSVERZEICHNIS MIT AUSGEWÄHLTEN POSITIONEN					RAHMENBRÜCKE (Kumpfmühlbachbrücke)		
LV-Nr.	ZU O	LV-Position	Anmerkung	Einheitskosten	VA-Menge	Einzelkosten d. Teilleistung	EKT / m ² [€/m ²]
1. BAUSTELLENEINRICHTUNG							
1.1		Einrichten d. Baustelle	10% >>> siehe Zuschlag BGK + BE!		1,00 PA		
1.2		Zeitgebundene Kosten der Baustelle (BGK)	15% >>> siehe Zuschlag BGK + BE!		1,00 PA		
						€ 107,27	€ 1,08
2. ERDARBEITEN							
2.1	U	Mutterboden abtragen und Wegschaffen 20 cm		€ 3,00 /m ³	35,76 m ³	€ 107,27	€ 1,08
2.2	U	Bodenauswechslung sandiger Kies 1 m	vernachlässigt!	€ 22,00 /m	178,78 m ³	€ -	€ -
2.3	U	Dammschüttkörper herstellen inkl. Material	vernachlässigt, bzw. vorh. aus alter Streckenführung!	€ 15,00 /m ³		€ -	€ -
2.4	U	Baugrubenaushub inkl. Wegschaffen	vernachlässigt, bzw. nicht ersichtlich!	€ 15,00 /m ³		€ -	€ -
						€ -	€ -
3. BOHRPFÄHLARBEITEN							
3.0		keine Bohrpfähle vorhanden!					
						€ 49.923,95	€ 501,61
4. BETONARBEITEN							
4.1	U	Sauberkeitsschicht herstellen für Fundamente	vernachlässigt!	€ 7,20 /m ²		€ -	€ -
4.2	U	Filterbeton unbewehrt		€ 95,00 /m ³	7,77 m ³	€ 737,86	€ 7,41
4.3	U	Beton Fundamentplatte C25/30	vernachlässigt!	€ 120,00 /m ³		€ -	€ -
4.4	U	Beton Flügelwand C25/30 (4x)		€ 160,00 /m ³	10,44 m ³	€ 1.670,21	€ 16,78
4.5	O	Beton Rahmenwand C25/30 (2x)		€ 160,00 /m ³	61,17 m ³	€ 9.787,78	€ 98,34
4.6	O	Beton Tragwerk (Decke d. Rahmens) C35/45		€ 164,00 /m ³	71,51 m ³	€ 11.728,10	€ 117,84
4.7	A	Beton Randbalken C35/45	in Pos. 4.8 inkludiert!	€ 164,00 /m ³		€ -	€ -
4.8	A	Randbalkenfertigteile Tragwerk u. Flügelwände	all inkl! lt. Regelplan HL 3.0!	€ 1.000,00 /m	26,00 m	€ 26.000,00	€ 261,23
						€ 38.626,43	€ 388,10
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN							
5.1	U	Schalung Filterbeton	vernachlässigt!	€ 54,00 /m ²	25,33 m ²	€ 1.367,72	€ 13,74
5.2	U	Schalung Fundamentplatte	vernachlässigt!	€ 54,00 /m ²		€ -	€ -
5.3	U	Schalung Flügelwand (4x)		€ 78,00 /m ²	29,63 m ²	€ 2.310,86	€ 23,22
5.4	O	Schalung Rahmenwand (2x)		€ 78,00 /m ²	164,29 m ²	€ 12.814,93	€ 128,76
5.5	O	Schalung Decke des Rahmens		€ 120,00 /m ²	112,64 m ²	€ 13.516,92	€ 135,81
5.6	O	Rüstung Decke des Rahmens		€ 100,00 /m ²	86,16 m ²	€ 8.616,00	€ 86,57
5.7	A	Schalung Randbalken	in Pos. 4.8 inkludiert!	€ 160,00 /m ²		€ -	€ -
						€ 16.144,99	€ 162,22
6. BEWEHRUNGSARBEITEN							
6.1	U	Bewehrung Fundamentplatte	vernachlässigt!	€ 800,00 /t		€ -	€ -
6.2	U	Bewehrung Flügelwände	Ann. 120 kg/m ³	€ 820,00 /t	1,25 t	€ 1.027,18	€ 10,32
6.3	O	Bewehrung Rahmenwand	Ann. 140 kg/m ³	€ 830,00 /t	8,56 t	€ 7.108,37	€ 71,42
6.4	O	Bewehrung Rahmendecke	Ann. 140 kg/m ³	€ 800,00 /t	10,01 t	€ 8.009,43	€ 80,47
6.5	U	Bewehrung Randbalken	in Pos. 4.8 inkludiert!	€ 820,00 /t		€ -	€ -
						€ -	€ -
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (ausgewählte Positionen)							
7.1	A	Elastomerlager	nicht vorhanden!	€ 1.600,00 /Stk	0,00 Stk	€ -	€ -
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN						€ 104.802,64	€ 1.053,00
		Zuschlag BGK + BE		25 %		€ 26.200,66	€ 263,25
HERSTELLKOSTEN						€ 131.003,30	€ 1.316,25
		Zuschlag GGK, Wagnis, Gewinn		10 %		€ 13.100,33	€ 131,62
HERSTELLPREIS NETTO						€ 144.103,63	€ 1.447,87

4.1.5 Analyse der Preiszusammensetzung

Normierung und Kostenanteile Um die beiden Brücken besser miteinander vergleichen zu können, wurden diese auf eine *Normbrückenfläche* hochgerechnet. Als *Normbrückenfläche* wurde eine Fläche von 110 m^2 gewählt, was in etwa dem Mittelwert der beiden Brückenflächen entspricht.

Tabelle 4.5: Kostenanteile der LV-Positionen und Differenz

LEISTUNGSVERZEICHNIS MIT AUSGEWÄHLTEN POSITIONEN				PLATTENBRÜCKE		Diff. d. LG bezogen auf Platte	LEISTUNGSVERZEICHNIS MIT AUSGEWÄHLTEN POSITIONEN				RAHMENBRÜCKE	
LV-Nr.	ZU O	LV-Position	Kosten für 110 m ²	% d. Σ EKT			LV-Nr.	ZU O	LV-Position	Kosten für 110 m ²	% d. Σ EKT	
1. BAUSTELLENEINRICHTUNG							1. BAUSTELLENEINRICHTUNG					
1.1		Einrichten d. Baustelle				1.1		Einrichten d. Baustelle				
1.2		Zeitgebundene Kosten der Baustelle (BGK)				1.2		Zeitgebundene Kosten der Baustelle (BGK)				
2. ERDARBEITEN				€ 183,45	0,1%	-35,4%	2. ERDARBEITEN				€ 118,55	0,1%
2.1	U	Mutterboden abtragen und Wegschaffen 20 cm	€ 183,45	0,1%		2.1	U	Mutterboden abtragen und Wegschaffen 20 cm	€ 118,55	0,1%		
2.2	U	Bodenauswechslung sandiger Kies 1 m	€ -	0,0%		2.2	U	Bodenauswechslung sandiger Kies 1 m	€ -	0,0%		
2.3	U	Dammschüttkörper herstellen inkl. Material	€ -	0,0%		2.3	U	Dammschüttkörper herstellen inkl. Material	€ -	0,0%		
2.4	U	Baugrubenaushub inkl. Wegschaffen	€ -	0,0%		2.4	U	Baugrubenaushub inkl. Wegschaffen	€ -	0,0%		
3. BOHRPFÄHLARBEITEN				€ -	0,0%		3. BOHRPFÄHLARBEITEN				€ -	0,0%
3.1	U	Leerböhrung Bohrspfahl	€ -	0,0%		3.0		keine Bohrspfähle vorhanden!				
3.2	U	Bohrpfähle herstellen, Ø 90, vollverrohrt	€ -	0,0%								
3.3	U	Pfahlköpfe abschremmen	€ -	0,0%								
4. BETONARBEITEN				€ 81.154,89	41,3%	-32,0%	4. BETONARBEITEN				€ 55.176,78	47,6%
4.1	U	Sauberkeitsschicht herstellen für Fundamente	€ 172,02	0,1%		4.1	U	Sauberkeitsschicht herstellen für Fundamente	€ -	0,0%		
4.2	U	Magerbetonauffüllungen	€ 1.034,87	0,5%		4.2	U	Filterbeton unbewehrt	€ 815,50	0,7%		
4.3	U	Beton Fundamentplatten Vorsatzwände C20/25	€ 2.251,78	1,1%		4.3	U	Beton Fundamentplatte C25/30	€ -	0,0%		
4.4	U	Beton Vorsatzwand-Flügel C25/30 (4x)	€ 4.397,42	2,2%		4.4	U	Beton Flügelwand C25/30 (4x)	€ 1.845,95	1,6%		
4.5	U	Beton Vorsatzwand-Rückwand C25/30 (2x)	€ 4.823,57	2,5%		4.5	O	Beton Rahmenwand C25/30 (2x)	€ 10.817,61	9,3%		
4.6	U	Beton Auflagerbank C25/30	€ 3.222,61	1,6%		4.6	O	Beton Tragwerk (Decke d. Rahmens) C35/45	€ 12.962,09	11,2%		
4.7	O	Beton Tragwerk (Platte) C40/50	€ 8.538,24	4,3%		4.7	A	Beton Randbalken C35/45	€ -	0,0%		
4.8	U	Beton Kopfbalken - Flügelwände C25/30	€ 5.647,11	2,9%		4.8	A	Randbalkenfertigteile Tragwerk u. Flügelwände	€ 28.735,63	24,8%		
4.9	A	Beton Randbalken C35/45 (siehe Pos. 4.10!)	€ -	0,0%								
4.10	A	Randbalkenfertigteile Tragwerk u. Flügelwände	€ 47.204,46	24,0%								
4.11	U	Spritzbeton 10 cm	€ 3.862,80	2,0%								
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN				€ 72.011,61	36,7%	-40,7%	5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN				€ 42.690,58	36,9%
5.1	U	Schalung Fundamentplatten-Vorsatzwände	€ 3.917,68	2,0%		5.1	U	Schalung Filterbeton	€ 1.511,63	1,3%		
5.2	U	Schalung Vorsatzwand-Flügel (4x)	€ 15.430,19	7,9%		5.2	U	Schalung Fundamentplatte	€ -	0,0%		
5.3	U	Schalung Vorsatzwand-Rückwand (2x)	€ 15.676,60	8,0%		5.3	U	Schalung Flügelwand (4x)	€ 2.554,00	2,2%		
5.4	U	Schalung Auflagerbank	€ 3.437,66	1,7%		5.4	O	Schalung Rahmenwand (2x)	€ 14.163,28	12,2%		
5.5	O	Schalung Platte	€ 14.372,67	7,3%		5.5	O	Schalung Decke des Rahmens	€ 14.939,12	12,9%		
5.6	O	Rüstung Platte	€ 11.725,77	6,0%		5.6	O	Rüstung Decke des Rahmens	€ 9.522,55	8,2%		
5.7	U	Schalung Kopfbalken - Flügelwände	€ 7.451,04	3,8%		5.7	A	Schalung Randbalken	€ -	0,0%		
5.8	A	Schalung Randbalken - Tragwerk	€ -	0,0%								
5.9	A	Schalung Randbalkenfertigteil auf Flügelwänden	€ -	0,0%								
6. BEWEHRUNGSARBEITEN				€ 14.063,80	7,2%	26,9%	6. BEWEHRUNGSARBEITEN				€ 17.843,71	15,4%
6.1	U	Bewehrung Vorsatzwand	€ 3.021,36	1,5%		6.1	U	Bewehrung Fundamentplatte	€ -	0,0%		
6.2	U	Bewehrung Auflagerbank	€ 2.803,99	1,4%		6.2	U	Bewehrung Flügelwände	€ 1.135,26	1,0%		
6.3	O	Bewehrung Platte	€ 4.445,21	2,3%		6.3	O	Bewehrung Rahmenwand	€ 7.856,29	6,8%		
6.4	U	Bewehrung Flügelwände inkl. Fundierung+Kopfbalken	€ 3.074,28	1,6%		6.4	O	Bewehrung Rahmendecke	€ 8.852,16	7,6%		
6.5	A	Bewehrung Randbalken - Tragwerk	€ -	0,0%		6.5	U	Bewehrung Randbalken	€ -	0,0%		
6.6	A	Bewehrung Randbalkenfertigteil auf Flügelwänden	€ -	0,0%								
6.7	U	Stahldolle DN 60mm, lg = 1100 mm	€ 718,96	0,4%								
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (ausgewählte Positionen)				€ 29.048,90	14,8%	-100,0%	7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (ausgewählte Positionen)				€ -	0,0%
7.1	A	Elastomerlager (je 8 pro Auflager)	€ 23.239,12	11,8%		7.1	A	Elastomerlager	€ -	0,0%		
7.2	A	2 Führungs- u. 2 Festlager	€ 5.809,78	3,0%								
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN				€ 196.462,65	100,0%	-41,0%	SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN				€ 115.829,62	100,0%
		Zuschlag BGK + BE	€ 49.115,66	25,0%				Zuschlag BGK + BE	€ 28.957,40	25,0%		
HERSTELLKOSTEN				€ 245.578,31	125,0%	-41,0%	HERSTELLKOSTEN				€ 144.787,02	125,0%
		Zuschlag GKG, Wagnis, Gewinn	€ 24.557,83	12,5%				Zuschlag GKG, Wagnis, Gewinn	€ 14.478,70	12,5%		
HERSTELLPREIS NETTO				€ 270.136,14	137,5%	-41,0%	HERSTELLPREIS NETTO				€ 159.265,73	137,5%

Die hochgerechneten Kosten der einzelnen LV-Positionen, die für eine Fläche von 110 m^2 anfallen würden, sind in Tabelle 4.5 dargestellt. In der nächsten Spalte können die prozentuellen Anteile an der Summe der Einzelkosten

der Teilleistungen abgelesen werden. Die relativen Kostendifferenzen der beiden Brücken in % – bezogen auf die Plattenbrücke – wurden nur für ganze Leistungsgruppen dargestellt, da die beiden Brücken sehr unterschiedlich in den einzelnen Positionen sind, und eine Veranschaulichung für jede einzelne Position nicht zielführend wäre.

Weiters ist zu erkennen, dass die Rahmenbrücke um 41,0% günstiger errichtet werden kann. Die gelb markierten Felder in der Tabelle stellen die ausschlaggebenden Positionen dar. Vor allem der Randbalken schlägt sich maßgebend auf die Herstellkosten nieder. Bei der konventionellen Brücke ist der Absolutbetrag, der aufgewendet werden muss, trotz quasi-gleicher Brückenlänge fast doppelt so groß wie bei der Rahmenvariante. Dies liegt in den – in diesem Fall – überdurchschnittlich langen Flügelwänden der Plattenbrücke begründet. Weiters machen die Lager der Plattenvariante einen Anteil von fast 15% der EKT aus. Bei der Rahmenbrücke ist zu erkennen, dass die Beton- Schalungs- und Bewehrungspositionen für die Rahmenwände und die Rahmendecke einen maßgebenden Anteil an der Summe der EKT tragen. Betrachtet man ganze Leistungsgruppen, so steigt lediglich bei den Bewehrungsarbeiten die Plattenbrücke besser aus als die Rahmenvariante.

Auswertung nach Leistungsgruppen Als nächster Schritt wurde für die beiden Einfeldbrücken eine Auswertung nach Leistungsgruppen – zugeordnet zu den einzelnen Hauptbrückenbestandteilen – durchgeführt.

Tabelle 4.6: Auswertung nach LG – Plattenbrücke

BRÜCKENTYP	PLATTENBRÜCKE			
	UNTERBAU	ÜBERBAU	AUSRÜSTUNG	GESAMT
LEISTUNGSGRUPPE				
1. BAUSTELLENEINRICHTUNG	>>> anteilig 25 %, siehe Zuschlag BGK + BE!			
2. ERDARBEITEN	€ 183,45			€ 183,45
3. BOHRPFÄHLARBEITEN	€ -			€ -
4. BETONARBEITEN	€ 25.412,19	€ 8.538,24	€ 47.204,46	€ 81.154,89
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN	€ 45.913,18	€ 26.098,44	€ -	€ 72.011,61
6. BEWEHRUNGSARBEITEN	€ 9.618,59	€ 4.445,21	€ -	€ 14.063,80
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (ausgewählte Positionen)			€ 29.048,90	€ 29.048,90
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN	€ 81.127,41	€ 39.081,89	€ 76.253,35	€ 196.462,65
Zuschlag BGK + BE (25 %)	€ 20.281,85	€ 9.770,47	€ 19.063,34	€ 49.115,66
HERSTELLKOSTEN	€ 101.409,26	€ 48.852,36	€ 95.316,69	€ 245.578,31
Zuschlag Geschäftsgemeinkosten, Wagnis, Gewinn (10%)	€ 10.140,93	€ 4.885,24	€ 9.531,67	€ 24.557,83
HERSTELLPREIS NETTO	€ 111.550,19	€ 53.737,59	€ 104.848,36	€ 270.136,14
Anteile in %	41%	20%	39%	100%

In Tabelle 4.6 ist ersichtlich, dass der Unterbau und die Brückenausrüstung jeweils rund 40% der Kosten ausmachen. Die Unterbaukosten liegen (die Fundierung wurde wie erwähnt vernachlässigt) deshalb so hoch, da die Flügelwände große Massen und dadurch auch große Kosten in sich tragen. Der hohe

Anteil der Brückenausrüstung kommt durch die Lager und die großen Anteile des Randbalkens zustande.

Tabelle 4.7: Auswertung nach LG – Rahmenbrücke

BRÜCKENTYP	RAHMENBRÜCKE			
	UNTERBAU	ÜBERBAU	AUSRÜSTUNG	GESAMT
LEISTUNGSGRUPPE				
1. BAUSTELLENEINRICHTUNG	>>> anteilig 25 %, siehe Zuschlag BGK + BE!			
2. ERDARBEITEN	€ 118,55			€ 118,55
3. BOHRPFÄHLARBEITEN	€ -			€ -
4. BETONARBEITEN	€ 2.661,44	€ 23.779,70	€ 28.735,63	€ 55.176,78
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN	€ 4.065,63	€ 38.624,95	€ -	€ 42.690,58
6. BEWEHRUNGSARBEITEN	€ 1.135,26	€ 16.708,45		€ 17.843,71
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (ausgewählte Positionen)	€ -			€ -
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN	€ 7.980,89	€ 79.113,10	€ 28.735,63	€ 115.829,62
Zuschlag BGK + BE (25 %)	€ 1.995,22	€ 19.778,28	€ 7.183,91	€ 28.957,40
HERSTELLKOSTEN	€ 9.976,11	€ 98.891,38	€ 35.919,54	€ 144.787,02
Zuschlag Geschäftsgemeinkosten, Wagnis, Gewinn (10%)	€ 997,61	€ 9.889,14	€ 3.591,95	€ 14.478,70
HERSTELLPREIS NETTO	€ 10.973,72	€ 108.780,51	€ 39.511,49	€ 159.265,73
Anteile in %	7%	68%	25%	100%

In der Auswertung für die Rahmenbrücke (Tabelle 4.7) ist ersichtlich, dass der Überbau mit 68% den Großteil der Kosten verursacht. Dies kommt dadurch zustande, dass der Überbau bei der integralen Variante auch die Rahmenwände – und damit die Widerlagerrückwände – beinhaltet. Diese müssen aufgrund der Momentenbeanspruchung massiver ausgebildet und stärker bewehrt werden und sie tragen somit auch den Hauptkostenanteil. Da beim Rahmentragwerk die Brückenlager entfallen, ist in den Kosten der Brückenausrüstung nur der Randbalken enthalten. Sein Anteil an den Gesamtkosten beträgt ca. 25%.

Graphisch sind die Ergebnisse aus Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7 nochmals im Diagramm in Abbildung 4.14 anschaulich dargestellt. Die einzelnen Leistungsgruppen wurden hier in die drei Hauptbrückenbestandteile (Unterbau, Überbau und Ausrüstung) aufgesplittet. Wie auch schon aus der vorangehenden Betrachtung festgestellt, erkennt man, dass die Leistungsgruppen, die die Hauptanteile der Kosten verursachen, sehr stark divergieren!

Bei der Plattenvariante sind die hauptkostenverursachenden Leistungsgruppen dem Unterbau und der Ausrüstung zugeordnet (grüne Balken), bei der Rahmenbrücke bestehend aus Stielen und Riegel hingegen tragen (mit Ausnahme des Randbalkens) die Leistungsgruppen des Überbaus die Hauptkosten (blaue Balken).

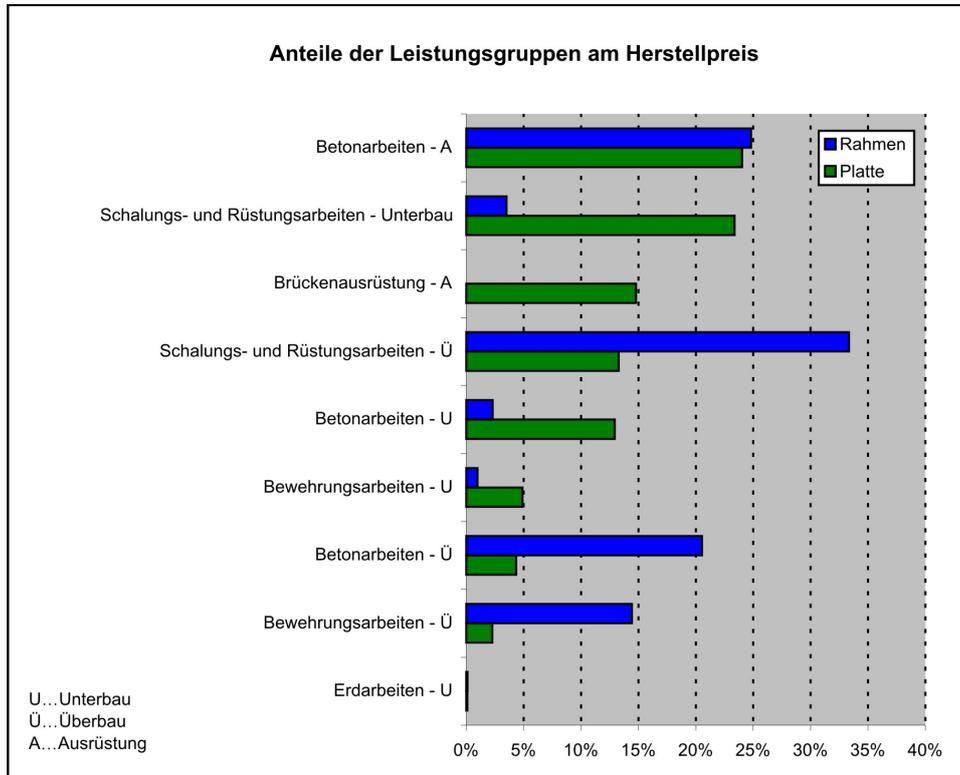


Abbildung 4.14: Anteile der LG – getrennt nach Brückenbestandteil

4.1.6 Unterschiede im baubetrieblichen Ablauf

Plattenbrücke

Naturgemäß bringen zwei verschiedene Bauweisen auch Unterschiede im baubetrieblichen Ablauf mit sich. Die beiden Tragwerke unterscheiden sich in erster Linie durch die Trennung des Überbaus vom Unterbau bei der Plattenvariante. Dies bringt mit sich, dass der Überbau in jedem Fall einen neuen Betonierabschnitt darstellen muss, da nach der Betonage der Widerlager diese erst aushärten müssen, um anschließend die Lager darauf zu installieren. Im Zuge der Schalung des Überbaus muss die Untersichtschalung an den Lagern ausgenommen werden, um das im Überbau vergossene Gleitstück des Lagers einbauen zu können. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass die Begrenzung der Schalung um die Lager sorgfältig abgedichtet ist und es im Zuge der Betonage zu keinen Verunreinigungen der Lagerflächen durch Beton oder Zementschlempe kommt.

Alternativ dazu kann der Überbau an den Widerlagern auch ganz normal gerüstet und geschalt werden. Die Untersicht des Überbaus wird dabei auch an den Lagern durchgeschalt, das Gleitstück des Lagers wird auf der Schalfäche befestigt und mit dem Überbau vergossen. Nach Aushärtung des Rohtragwerks wird die Schalung um die Lagergleitplatten demontiert. Im Anschluss daran

werden die Lager eingebaut und die Schalung mit der Rüstung abgesenkt.

Die Ausbildung des Widerlagers bei der konventionellen Brücke bringt außerdem mitunter etwas kompliziertere Schalungsflächen mit sich. Bei Straßenbrücken ist im Zuge der Brückenausrüstung weiters noch der Einbau der Fahrbahnübergangskonstruktionen notwendig.

Rahmenbrücke

Nachdem bei der Rahmenbrücke der Überbau monolithisch mit dem Unterbau verbunden ist, könnte dieser prinzipiell in einem Arbeitsgang mit dem Unterbau vergossen werden. Bei größeren Kubaturen wird jedoch in der Regel eine Arbeitsfuge unterhalb des Rahmenknotens vorgesehen. Dies ist oft notwendig, da die Rahmenbrücke – vor allem im Eckbereich – sehr stark bewehrt werden muss und bei vollständiger Vorverlegung von Wand- und Deckenbewehrung unter Umständen keine ausreichende Verdichtung mehr möglich ist.

Der Einbau von Fahrbahnübergangskonstruktionen entfällt bei der Rahmenbrücke.

Unterschiede – Straße / Schiene

Während im Straßenbau die Rahmenvariante problemlos zur Ausführung kommen kann, ist dies im Eisenbahnbau teilweise mit betrieblichen Problemen verbunden. Im Straßenbau kann man meist – je nach Straßenrang und Verkehrsaufkommen – relativ einfach eine Umfahrungsstraße oder ein Fly-over errichten, den Verkehr umleiten oder die Straße ganz sperren, um das Tragwerk zu errichten.

Im Eisenbahnbau ist dies nur sehr schwer möglich, da bei Brückenneubauten im Zuge von Sanierungen an bestehenden Strecken diese meist unter vollem oder nur leicht eingeschränktem Betrieb errichtet werden müssen. Hier hat die Plattenvariante gewisse Vorteile. Unter einer Hilfsbrücke kann zuerst der Unterbau einschließlich der Lager vom Betrieb unabhängig errichtet werden, anschließend wird über Nacht oder im Zuge einer temporären Sperre das Hilfstragwerk ausgehoben und die Platten (in der Regel ein eigenes Tragwerk je Gleis) als Fertigteil eingehoben. Da für die Eisenbahn die Möglichkeit eines Fly-overs nicht gegeben ist, stößt diese Methode bei der Rahmenvariante aufgrund der Bauhöhe an ihre Grenzen.

Eine Sonderlösung stellt das zuweilen angewandte Einschieben des gesamten neben der Strecke errichteten Rahmens während einer 5–6-stündigen Betriebspause – inkl. Widerlagerhinterfüllung und Verlegen der Gleisanlagen – dar. Dies stellt jedoch durch den Zeitdruck eine enorme Herausforderung an die Ausführenden dar und bedarf einer exakten, perfekt abgestimmten Ablaufplanung.

4.2 Mehrfeldrige Brücken im Vergleich

4.2.1 Kurzbeschreibung und Brückenhauptdaten

Repräsentativ für den Vergleich mehrfeldriger Tragwerke wurden die *Naarnbrücke* und die *Achebrücke Pirath* in Oberösterreich ausgewählt. Beide Brücken sind Straßenbrücken, haben in etwa die gleiche Länge und Breite, je drei Felder ähnlicher Spannweite und sind in etwa gleich gegründet. Die Naarnbrücke als Beispiel konventioneller Bauweise ist in die Landesstraße 1423 – Münzbacher Straße eingebettet und wurde im Zuge des Bauloses *Zubringer Münzbach* der Umfahrung Perg im Jahr 2001 projektiert und ausgeführt. Die Achebrücke Pirath wurde im Zuge der Umfahrung Altheim im Innviertel im Jahr 2003 projektiert und errichtet und führt die Bundesstraße 148 – Altheimer Straße über den bestehenden Bachlauf der Mühlheimer Ache. Beide Brücken befinden sich in der Verwaltung des Landes Oberösterreich. Die Hauptbrückendaten im Vergleich sind in Tabelle 4.8 zusammengefasst.

Tabelle 4.8: Vergleich der Brückenhauptdaten

Brückename	Naarnbrücke	Achebrücke Pirath
Typ	konventionell (semi-integral)	integral
Länge	56,70 m	52,80 m
Breite	10,00 m	variabel, ca. 12,60 m
Fläche	567,00 m ²	665,28 m ²
Querschnittshöhe	1,30 m	1,20 m
Felder	3	3
Stützweiten	17,60 - 21,50 - 17,60 m	15,15 - 22,50 - 15,15 m
Querschnittsart	Balkenbrücke	Balkenbrücke
Gründung	Großbohrpfähle DN 120, 3+3+3+3 Stk	Großbohrpfähle DN 120, 3+6+6+4 Stk

4.2.2 Fotos und Planausschnitte der Brücken

Auf den folgenden Seiten befinden sich einige Fotos, Übersichten und Planausschnitte der beiden Brücken, um dem Leser einen raschen allgemeinen Überblick über die Objekte zu verschaffen.

Naarnbrücke – Semi-integrale Bauweise



Abbildung 4.15: Ansicht – Semi-integrale Brücke

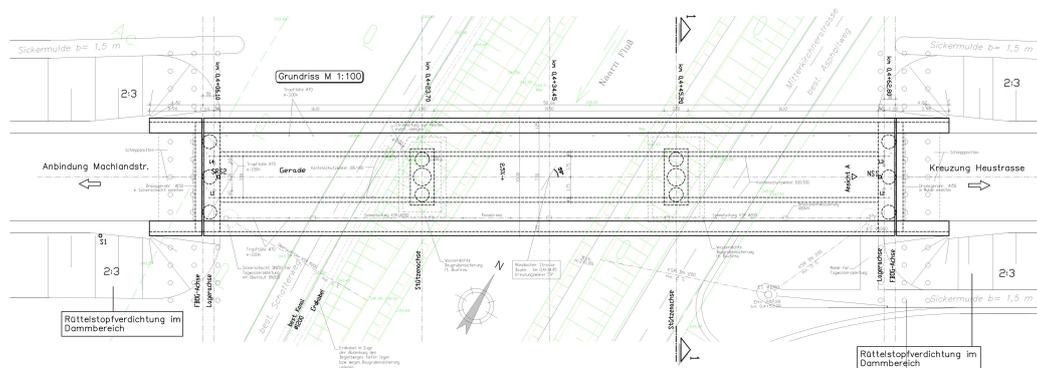


Abbildung 4.16: Übersichtsplan

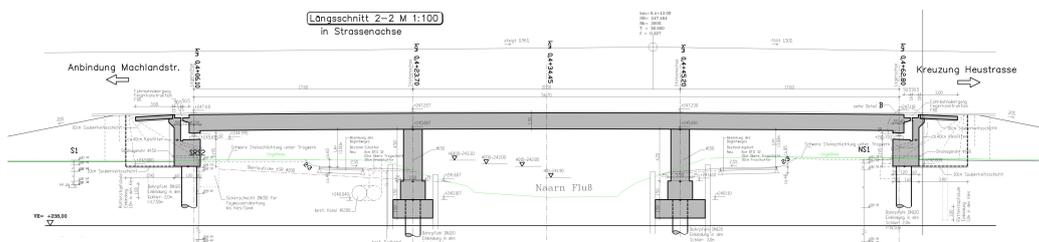


Abbildung 4.17: Längsschnitt

Achebrücke Pirath – Integrale Bauweise



Abbildung 4.19: Ansicht – Integrale Brücke

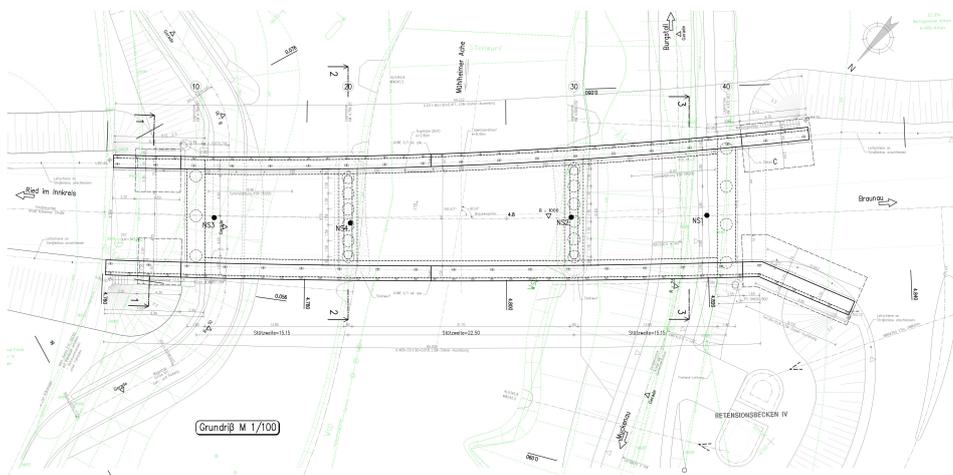


Abbildung 4.20: Übersichtsplan

4.2.3 Analyse der statischen Unterschiede

Die Unterschiede zwischen dem statischen System einer integralen Brücke und dem einer konventionellen Brücke wurden in Abschnitt 2.4 schon ausführlich beschrieben.

Da man nur mehr wenige mehrfeldrige Brücken findet, die als Einfeldträgerkette mit Fugen an jedem Pfeiler ausgebildet werden, erfolgt in diesem Fall ein Vergleich zwischen einer *semi-integralen Brücke* und einer (*voll-*)*integralen Brücke*. Das heißt, die Pfeiler sind bei beiden Brücken biegesteif mit dem Tragwerk verbunden und daher *integriert*, an den Brückenenden ist das Tragwerk der semi-integralen Brücke jedoch vom Unterbau getrennt und dort auf konventionellen Elastomerlagern gelagert. Der Fahrbahnübergang zum festen Untergrund bzw. der Schlepplatte erfolgt über eine sogenannte Fingerkonstruktion. Bei der integralen Variante sind die Widerlager mit dem Brückentragwerk verbunden und das ganze Bauwerk muss als ein Gesamtsystem betrachtet werden, in dem sowohl Einflüsse aus Eigengewicht und Nutzlast als auch Temperatur und Erddruck interagieren.

Statisches System und Belastung

Um die Unterschiede der Systeme speziell für diese beiden dreifeldrigen Brücken zu veranschaulichen, wurde wieder ein stark vereinfachtes ebenes statisches Modell mit den gleichen geometrischen Abmessungen erstellt, welches einmal als integrales und einmal als semi-integrales Bauwerk berechnet wurde (siehe Abbildung 4.23).

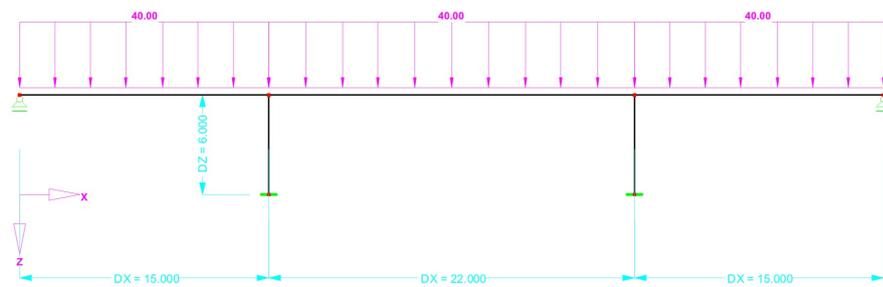
Auch hier wird wieder ein $1,00\text{ m}$ breiter Stahlbetonquerschnitt der Betongüte C35/45 verwendet, die Querschnittsdicke beträgt angelehnt an die Ausführungspläne jedoch 120 cm , da die Spannweiten größer sind ($15\text{ m} - 22\text{ m} - 15\text{ m}$).

Für die Höhe der beiden Mittelpfeiler und die Höhe der eingeschütteten Rückwand der Widerlager wurde eine einheitliche Höhe von $6,00\text{ m}$ gewählt. Die Pfeiler und Widerlager sind bei beiden Varianten mit Großbohrpfählen DN 120 cm tiefgegründet und können daher im Modell als eingespannt angenommen werden.

Die Belastungsannahmen sind gleich wie bei der Modellierung der einfeldrigen Brücken, der einzige Unterschied liegt im Erddruck, der in diesem Fall aufgrund der tieferen Widerlagereinbindung an der tiefsten Stelle 30 KN/m^2 beträgt!

Als zweiter Lastfall wurde wieder eine Beanspruchung durch Temperaturerhöhung um $+30^\circ\text{C}$ angesetzt.

Semi-integrale Bauweise



Integrale Bauweise

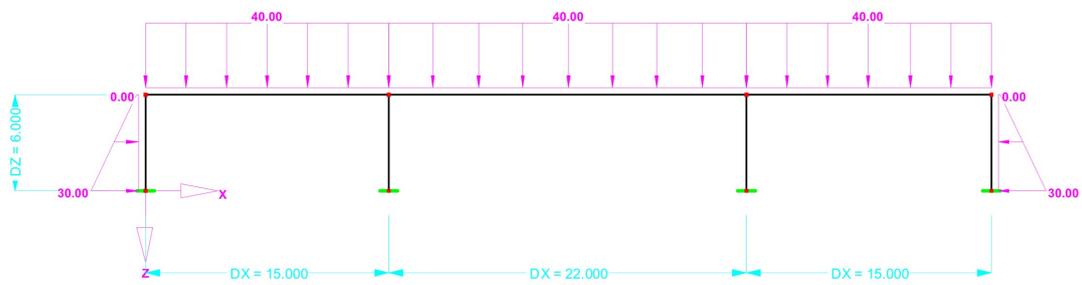
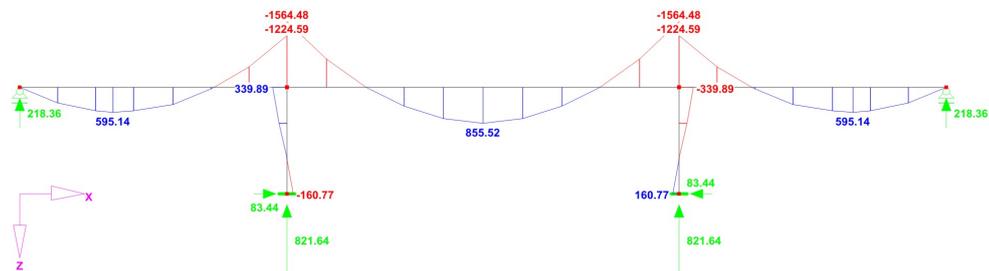


Abbildung 4.23: Mehrfeldrige Brücke – System und Belastung

Vergleich der statischen Ergebnisse

In Abbildung 4.24 sind die Momentenlinien zufolge Belastung ersichtlich. Da eine semi-integrale mit einer integralen Brücke verglichen wird, sind die Unterschiede marginal. Die vertikale Belastung ist bei beiden Systemen gleich, folglich entstehen in Summe auch die gleichen Auflagerkräfte. Bei der vollintegralen Brücke sind diese jedoch etwas besser verteilt, es wandern Anteile von den Pfeilern zu den Widerlagern. Durch den biegesteifen Anschluss der Pfeiler kommt es bei beiden Brücken zur Einleitung von Biegemomenten in die Pfeiler, die von diesen aufgenommen werden müssen. Sie sind bei der vollintegralen Brücke etwas höher. Durch den biegesteifen Anschluss des Brückentragwerks an die Widerlager kommt es an den Brückenenden zum Aufbau von Momenten, die durch eine massivere Ausbildung des Widerlagers und entsprechender Bewehrung aufgenommen werden müssen. Dadurch reduziert sich das Moment in den Endfeldern deutlich. Betrachtet man die Momente im Innenfeld und an den Stützen, so steigt die semi-integrale Brücke bei diesen geometrischen Verhältnissen sogar eine Spur besser aus.

Semi-integrale Bauweise



Integrale Bauweise

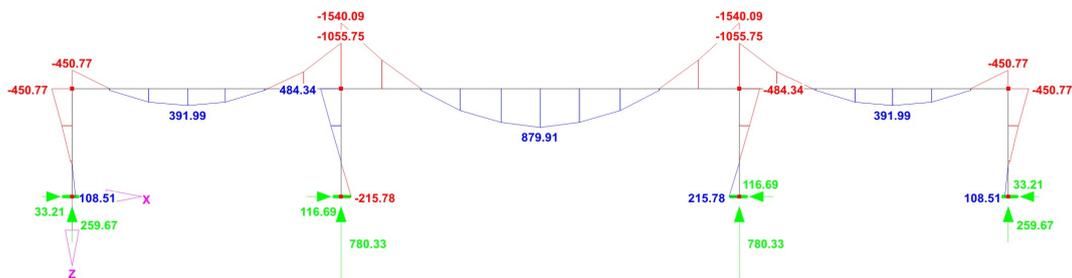


Abbildung 4.24: Momente und Auflagerkräfte aus Belastung

Betrachtet man die Momentenlinien zufolge Temperaturbeanspruchung, so erkennt man, dass bei der integralen Bauweise an den Tragwerksenden relativ hohe Zwangsmomente entstehen, die vom Widerlager konstruktiv aufgenommen werden müssen (siehe Abbildung 4.25). Dies wird sich später auch in der Kostenbetrachtung widerspiegeln. Auch die Beanspruchung der Pfeiler ist etwas höher als bei der semi-integralen Brücke.

Semi-integrale Bauweise



Integrale Bauweise

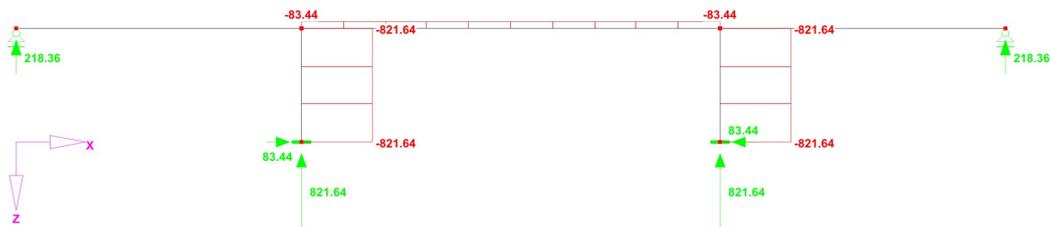


Abbildung 4.25: Momente und Auflagerkräfte aus Temperaturbeanspruchung

In den Abbildungen 4.26 und 4.27 sind die Normalkraftbeanspruchungen beider Tragwerke – einerseits aus Belastung, andererseits aus Temperaturbeanspruchung – dargestellt. Auch hier muss die integrale Brücke durch die Verhinderung jeglicher Verschiebungen mit größeren Kräften fertig werden.

Semi-integrale Bauweise

Normalkraft aus Belastung



Normalkraft aus Temperaturbeanspruchung

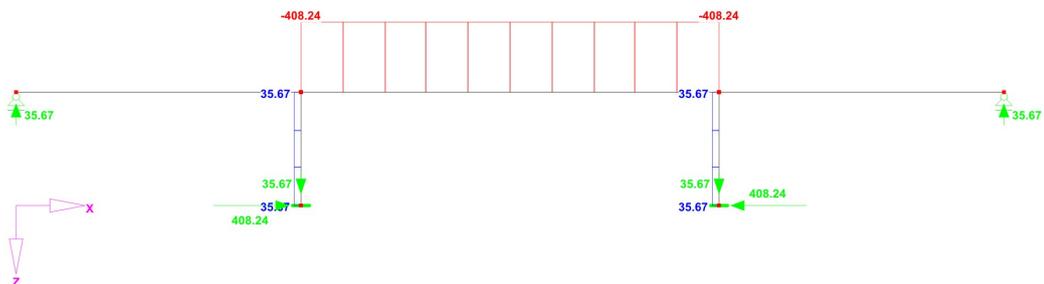
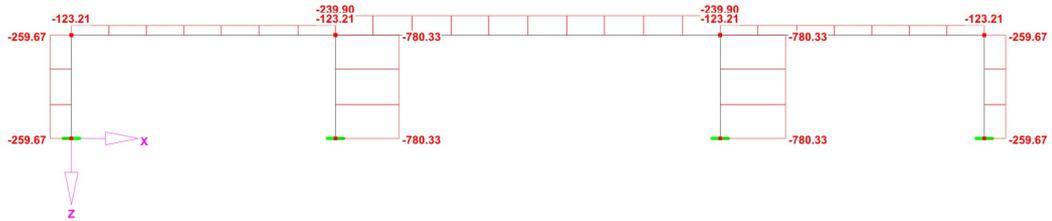


Abbildung 4.26: Normalkraftbeanspruchung – Semi-integrales Tragwerk

Integrale Bauweise

Normalkraft aus Belastung



Normalkraft aus Temperaturbeanspruchung

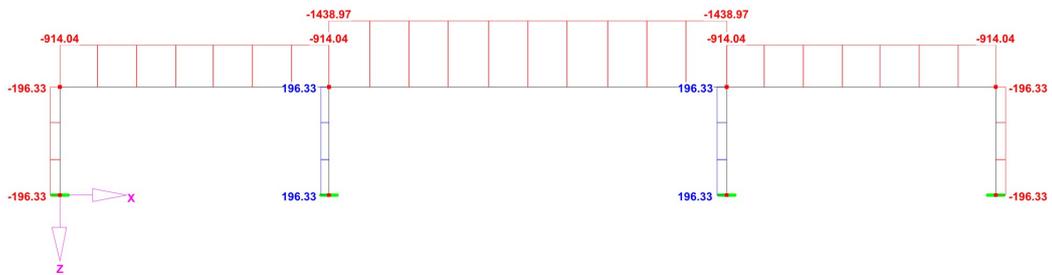
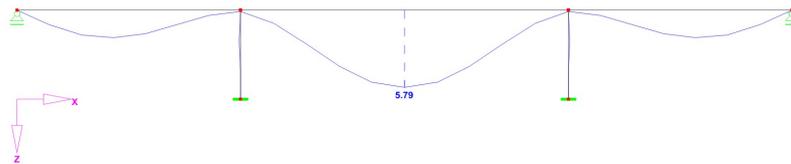


Abbildung 4.27: Normalkraftbeanspruchung – Integrales Tragwerk

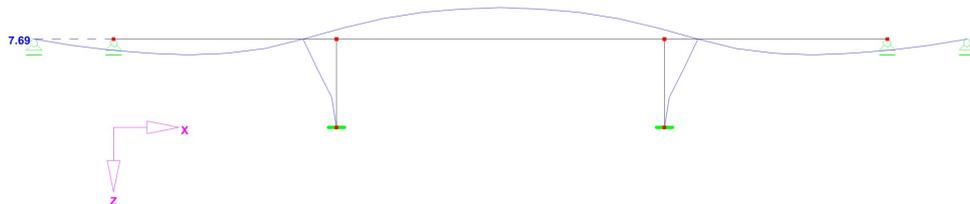
Die Durchbiegungen zufolge Belastung sowie die Verschiebungen und Tragwerksverformungen aus der Temperaturbeanspruchung korrelieren wie erwartet mit den Momentenverläufen (siehe Abbildung 4.28).

Semi-integrale Bauweise

Durchbiegungen aus Belastung

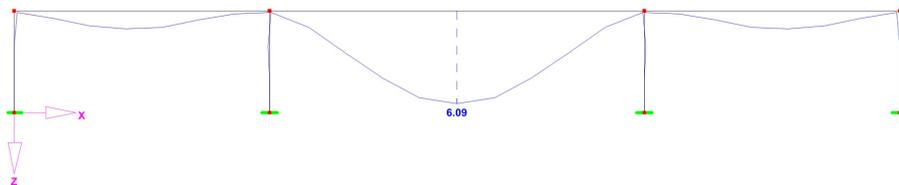


Verschiebungen aus Temperaturdehnung



Integrale Bauweise

Durchbiegungen aus Belastung



Verschiebungen aus Temperaturdehnung

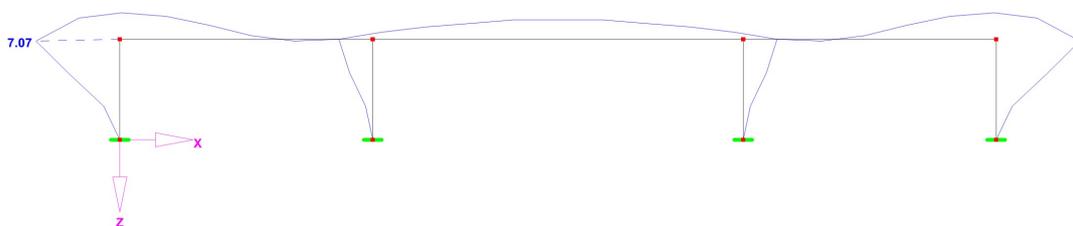


Abbildung 4.28: Durchbiegungen und Verschiebungen

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die vollintegrale Ausführung sowohl statische Vorteile als auch Nachteile gegenüber der semi-integralen Variante mit sich bringt. Die integrale Brücke wird in jedem Fall höher bewehrt und massiver ausgebildet werden müssen. Ob diese Material- und damit

Errichtungs-Mehrkosten durch den Wegfall der Lager und Fahrbahnübergänge über die Lebensdauer der Brücke kompensiert werden können, werden die folgenden Abschnitte und Kapitel zeigen.

4.2.4 Kostenermittlung für die Hauptpositionen der Brücken

Wie für die einfeldrigen Brücken wurde auch für die mehrfeldrigen Brücken eine Kostenermittlung erstellt. Da in diesem Fall vom Planer eine Massenermittlung für beide Brücken vorlag, wurde dies erleichtert und als Basis dafür genommen. Nebenpositionen wie z.B. Entwässerungsleitungen oder Pflasterungen wurden jedoch vernachlässigt und nicht ins LV aufgenommen. Die Stahlmengen wurden den vorliegenden Bewehrungsplänen des Planers entnommen.

Die Preisermittlung ergibt für die semi-integrale Brücke einen Herstellpreis von gut € 780.000,- bzw. einen Herstellpreis je Quadratmeter Brückenfläche von rund € 1.376,-. Für die integrale Brücke ergibt sich ein Gesamtpreis von rund € 960.000,- bzw. ein Herstellpreis je Quadratmeter Brückenfläche von rund € 1.444,-. Die integrale Brücke kostet also nach dieser Kalkulation rein in der Errichtung um € 68,- je Quadratmeter mehr, dies entspricht in etwa 4,9%.

Tabelle 4.9: Mengen- und Preisermittlung ausgewählter Positionen

LEISTUNGSVERZEICHNIS MIT AUSGEWÄHLTEN POSITIONEN				NAARNBRÜCKE (SEMI-INTEGRAL)		
LV-Nr.	LV-Position	Anmerkung	Einheitskosten	VA-Menge	Einzelkosten d. Teilleistung	EKT / m ² [€/m ²]
1. BAUSTELLENEINRICHTUNG						
1.1	Einrichten und Räumen der Baustelle	10% >>> siehe Zuschlag BGK + BE!		1,00 PA		
1.2	Zeitgebundene Kosten der Baustelle (BGK)	15% >>> siehe Zuschlag BGK + BE!		1,00 PA		
2. ERDARBEITEN					€ 21.660,00	€ 38,20
2.1	Mutterboden abtragen und wegschaffen		€ 3,00 /m ³	220,00 m ³	€ 660,00	€ 1,16
2.2	Rüttelstopfverdichtung Dammbereich	21 €/m, vernachläss.	/m	2000,00 m	€ -	€ -
2.3	Dammschüttkörper herstellen inkl. Material	10 € f Material	€ 15,00 /m ³	1100,00 m ³	€ 16.500,00	€ 29,10
2.4	Baugrubenaushub inkl. wegschaffen		€ 15,00 /m ³	300,00 m ³	€ 4.500,00	€ 7,94
3. BOHRPFÄHLARBEITEN					€ 65.480,00	€ 115,49
3.1	Leerbohrung Bohrpfahl		€ 100,00 /m	15,00 m	€ 1.500,00	€ 2,65
3.2	Bohrpfähle herstellen DN 120 cm, vollverroht		€ 350,00 /m	180,00 m	€ 63.000,00	€ 111,11
3.3	Pfahlköpfe abschremmen		€ 98,00 /Stk	10,00 Stk	€ 980,00	€ 1,73
4. BETONARBEITEN					€ 116.400,00	€ 205,29
4.1	Sauberkeitsschicht herstellen für Fundamente		€ 7,20 /m ²	110,00 m ²	€ 792,00	€ 1,40
4.2	Unterwasserbeton C20/25 unbewehrt		€ 96,00 /m ³	82,00 m ³	€ 7.872,00	€ 13,88
4.3	Beton Pfahlkopfplatte C35/45		€ 120,00 /m ³	28,80 m ³	€ 3.456,00	€ 6,10
4.4	Beton Widerlager C25/30		€ 160,00 /m ³	165,00 m ³	€ 26.400,00	€ 46,56
4.5	Beton Pfeiler C35/45		€ 160,00 /m ³	16,00 m ³	€ 2.560,00	€ 4,51
4.6	Beton Tragwerk C35/45		€ 164,00 /m ³	400,00 m ³	€ 65.600,00	€ 115,70
4.7	Beton Randbalken C25/30		€ 144,00 /m ²	55,00 m ²	€ 7.920,00	€ 13,97
4.8	Filterbetonschicht an Widerlagern	vernachläss.!	€ 22,00 /m ²	0,00 m ²	€ -	€ -
4.9a	Beton Schleppplatte C25/30		€ 120,00 /m ³	15,00 m ³	€ 1.800,00	€ 3,17
4.9b	Beton Magerbetonkeil		€ 95,00 /m ³	0,00 m ³	€ -	€ -
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN					€ 219.946,98	€ 387,91
5.1	Schalung Pfahlkopfplatte		€ 54,00 /m ²	40,80 m ²	€ 2.203,20	€ 3,89
5.2	Schalung Widerlager	130 €/m ² (semi-int.) / 78 €/m ² (integral)		357,37 m ²	€ 46.458,46	€ 81,94
5.3	Schalung Pfeiler		€ 98,00 /m ²	40,00 m ²	€ 3.920,00	€ 6,91
5.4	Schalung Tragwerk		€ 120,00 /m ²	634,23 m ²	€ 76.107,84	€ 134,23
5.5	Rüstung Tragwerk	Lehrgerüst / m ² Brü.fl.	€ 100,00 /m ²	567,00 m ²	€ 56.700,00	€ 100,00
5.6	Schalung Randbalken		€ 180,00 /m ²	188,21 m ²	€ 33.877,08	€ 59,75
5.7	Schalung Schlepppl		€ 54,00 /m ²	12,60 m ²	€ 680,40	€ 1,20
6. BEWEHRUNGSARBEITEN					€ 64.790,00	€ 114,27
6.1	Bewehrung Pfahlkopfplatte		€ 800,00 /t	4,00 t	€ 3.200,00	€ 5,64
6.2	Bewehrung Widerlager		€ 820,00 /t	13,60 t	€ 11.152,00	€ 19,67
6.3	Bewehrung Pfeiler		€ 850,00 /t	4,00 t	€ 3.400,00	€ 6,00
6.4	Bewehrung Tragwerk		€ 800,00 /t	51,50 t	€ 41.200,00	€ 72,66
6.5	Bewehrung Randbalken		€ 820,00 /t	5,90 t	€ 4.838,00	€ 8,53
6.6	Bewehrung Schlepppl		€ 800,00 /t	1,25 t	€ 1.000,00	€ 1,76
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (nur ausgewählte Positionen)					€ 59.500,00	€ 104,94
7.1	Fahrbahnübergang - Fingerkonstruktion F80		€ 1.500,00 /m	20,00 m	€ 30.000,00	€ 52,91
7.2	Elastomerlager (je 2 pro Auflager)		€ 1.600,00 /Stk	4,00 Stk	€ 6.400,00	€ 11,29
7.3	Geländer Stahl		€ 120,00 /m	140,00 m	€ 16.800,00	€ 29,63
7.4	Leitschiene		€ 45,00 /m	140,00 m	€ 6.300,00	€ 11,11
8. ABDICHTUNGS- und BELAGSARBEITEN (nur ausgewählte Positionen)					€ 19.740,00	€ 34,81
8.1	Kunststoffgrund 600 g/m ²	gesamte Oberfl Trw	€ 6,00 /m ²	550,00 m ²	€ 3.300,00	€ 5,82
8.2	Abdichtung OGR KVI	8.1 u über Kanten drüber	€ 20,00 /m ²	630,00 m ²	€ 12.600,00	€ 22,22
8.3	Schutzschicht AB 8,2 cm		€ 8,00 /m ²	480,00 m ²	€ 3.840,00	€ 6,77
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN					€ 567.516,98	€ 1.000,91
	Zuschlag Baustellengemeinkosten + Baustelleneinrichtung		25 %		€ 141.879,25	€ 250,23
HERSTELLKOSTEN und KOSTEN / m² BRÜCKENFLÄCHE					€ 709.396,23	€ 1.251,14
	Zuschlag Geschäftsgemeinkosten, Wagnis, Gewinn		10 %		€ 70.939,62	€ 125,11
HERSTELLPREIS NETTO und PREIS / m² BRÜCKENFLÄCHE					€ 780.335,85	€ 1.376,25

Tabelle 4.10: Mengen- und Preisermittlung ausgewählter Positionen

LEISTUNGSVERZEICHNIS MIT AUSGEWÄHLTEN POSITIONEN				ACHEBRÜCKE PIRATH (INTEGRAL)		
LV-Nr.	LV-Position	Anmerkung	Einheitskosten	VA-Menge	Einzelkosten d. Teilleistung	EKT / m ² [€/m ²]
1. BAUSTELLENEINRICHTUNG						
1.1	Einrichten und Räumen der Baustelle	10% >>> siehe Zuschlag BGK + BE!		1,00 PA		
1.2	Zeitgebundene Kosten der Baustelle (BGK)	15% >>> siehe Zuschlag BGK + BE!		1,00 PA		
2. ERDARBEITEN					€ 28.410,00	€ 42,70
2.1	Mutterboden abtragen und wegschaffen		€ 3,00 /m ³	220,00 m ³	€ 660,00	€ 0,99
2.2	Rüttelstopfverdichtung Dammbereich	21 €/m, vernachläss.	/m	0,00 m	€ -	€ -
2.3	Dammschüttkörper herstellen inkl. Material	10 € f Material	€ 15,00 /m ³	1200,00 m ³	€ 18.000,00	€ 27,06
2.4	Baugrubenaushub inkl. wegschaffen		€ 15,00 /m ³	650,00 m ³	€ 9.750,00	€ 14,66
3. BOHRPFÄHLARBEITEN					€ 38.362,00	€ 57,66
3.1	Leerbohrung Bohrfahl		€ 100,00 /m	15,00 m	€ 1.500,00	€ 2,25
3.2	Bohrpfähle herstellen DN 120 cm, vollverroht		€ 350,00 /m	100,00 m	€ 35.000,00	€ 52,61
3.3	Pfahlköpfe abschremmen		€ 98,00 /Stk	19,00 Stk	€ 1.862,00	€ 2,80
4. BETONARBEITEN					€ 219.060,94	€ 329,28
4.1	Sauberkeitsschicht herstellen für Fundamente		€ 7,20 /m ²	250,00 m ²	€ 1.800,00	€ 2,71
4.2	Unterwasserbeton C20/25 unbewehrt		€ 96,00 /m ³	0,00 m ³	€ -	€ -
4.3	Beton Pfahlkopfplatte C35/45		€ 120,00 /m ³	47,00 m ³	€ 5.640,00	€ 8,48
4.4	Beton Widerlager C25/30		€ 160,00 /m ³	535,00 m ³	€ 85.600,00	€ 128,67
4.5	Beton Pfeiler C35/45		€ 160,00 /m ³	61,00 m ³	€ 9.760,00	€ 14,67
4.6	Beton Tragwerk C35/45		€ 164,00 /m ³	614,00 m ³	€ 100.696,00	€ 151,36
4.7	Beton Randbalken C25/30		€ 144,00 /m ²	62,00 m ³	€ 8.928,00	€ 13,42
4.8	Filterbetonschicht an Widerlagern	vernachläss.!	€ 22,00 /m ²	0,00 m ³	€ -	€ -
4.9a	Beton Schleppplatte C25/30		€ 120,00 /m ³	0,00 m ³	€ -	€ -
4.9b	Beton Magerbetonkeil		€ 95,00 /m ³	69,86 m ³	€ 6.636,94	€ 9,98
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN					€ 266.418,30	€ 400,46
5.1	Schalung Pfahlkopfplatte		€ 54,00 /m ²	47,80 m ²	€ 2.581,20	€ 3,88
5.2	Schalung Widerlager	130 €/m ² (semi-int.) / 78 €/m ² (integral)		673,00 m ²	€ 52.494,00	€ 78,91
5.3	Schalung Pfeiler		€ 98,00 /m ²	176,35 m ²	€ 17.282,50	€ 25,98
5.4	Schalung Tragwerk		€ 120,00 /m ²	771,00 m ²	€ 92.520,00	€ 139,07
5.5	Rüstung Tragwerk	Lehrgerüst / m ² Brü.fl.	€ 100,00 /m ²	665,00 m ²	€ 66.500,00	€ 99,96
5.6	Schalung Randbalken		€ 180,00 /m ²	194,67 m ²	€ 35.040,60	€ 52,67
5.7	Schalung Schlepppl		€ 54,00 /m ²	0,00 m ²	€ -	€ -
6. BEWEHRUNGSARBEITEN					€ 96.812,99	€ 145,52
6.1	Bewehrung Pfahlkopfplatte		€ 800,00 /t	3,96 t	€ 3.168,15	€ 4,76
6.2	Bewehrung Widerlager		€ 820,00 /t	36,30 t	€ 29.766,00	€ 44,74
6.3	Bewehrung Pfeiler		€ 850,00 /t	5,14 t	€ 4.368,84	€ 6,57
6.4	Bewehrung Tragwerk		€ 800,00 /t	66,70 t	€ 53.360,00	€ 80,21
6.5	Bewehrung Randbalken		€ 820,00 /t	7,50 t	€ 6.150,00	€ 9,24
6.6	Bewehrung Schlepppl		€ 800,00 /t	0,00 t	€ -	€ -
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (nur ausgewählte Positionen)					€ 24.750,00	€ 37,20
7.1	Fahrbahnübergang - Fingerkonstruktion F80		€ 1.500,00 /m	0,00 m	€ -	€ -
7.2	Elastomerlager (je 2 pro Auflager)		€ 1.600,00 /Stk	0,00 Stk	€ -	€ -
7.3	Geländer Stahl		€ 120,00 /m	150,00 m	€ 18.000,00	€ 27,06
7.4	Leitschiene		€ 45,00 /m	150,00 m	€ 6.750,00	€ 10,15
8. ABDICHTUNGS- und BELAGSARBEITEN (nur ausgewählte Positionen)					€ 24.680,00	€ 37,10
8.1	Kunststoffgrund 600 g/m ²	gesamte Oberfl Trw	€ 6,00 /m ²	780,00 m ²	€ 4.680,00	€ 7,03
8.2	Abdichtung OGR KVI	8.1 u über Kanten drüber	€ 20,00 /m ²	780,00 m ²	€ 15.600,00	€ 23,45
8.3	Schutzschicht AB 8,2 cm		€ 8,00 /m ²	550,00 m ²	€ 4.400,00	€ 6,61
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN					€ 698.494,22	€ 1.049,93
	Zuschlag Baustellengemeinkosten + Baustelleneinrichtung		25 %		€ 174.623,56	€ 262,48
HERSTELLKOSTEN und KOSTEN / m² BRÜCKENFLÄCHE					€ 873.117,78	€ 1.312,41
	Zuschlag Geschäftsgemeinkosten, Wagnis, Gewinn		10 %		€ 87.311,78	€ 131,24
HERSTELLPREIS NETTO und PREIS / m² BRÜCKENFLÄCHE					€ 960.429,56	€ 1.443,65

4.2.5 Analyse der Preiszusammensetzung

Um die unterschiedlichen Brückenflächen auszugleichen, wurden die Kosten der beiden Brücken wieder auf eine einheitliche Brückengesamtfläche normiert. Als Normbrückenfläche wurden 600 m^2 gewählt. Dieser Wert entspricht in etwa dem Mittelwert der Flächen der betrachteten Brücken (siehe auch Tabelle 4.11).

Außerdem erfolgte eine Ermittlung der Kostenanteile der einzelnen LV-Positionen an der Gesamtsumme der Einzelkosten der Teilleistungen in Prozent. Die Einzelkosten der Teilleistungen stellen nicht den Preis dar, den der Auftraggeber für die Brücken zu zahlen hat, da, wie in Tabelle 4.11 ersichtlich ist, darauf noch Kosten für die Baustelleneinrichtung und die Baustellengemeinkosten in der Höhe von 25% aufgeschlagen werden und auf die Herstellkosten vom Auftragnehmer weiters noch 10% für Geschäftsgemeinkosten, unternehmerisches Wagnis und Gewinn aufgeschlagen werden. Da diese Aufschläge jedoch anteilmäßig auf alle Positionen aufgeteilt werden und daher den relativen Vergleich der beiden Brücken nicht beeinflussen, wurden diese beiden Aufschläge in diesem Vergleich vernachlässigt. Weiters wurde ermittelt, um wieviel die integrale Brücke relativ zur konventionellen Brücke teurer ist. Als 100%-Basis wurden die Positionspreise für 600 m^2 der semi-integralen Brücke herangezogen. *Bohrpfähle herstellen - vollverrohrt* (Position 3.2) ist für die integrale Brücke ausgehend von der semi-integralen beispielsweise um 52,7% billiger, während z.B. die Position 4.3 *Beton Pfahlkopfplatte C35/45* für die integrale Brücke um 39,1% teurer kommt (siehe Tabelle 4.11).

Um die LV-Positionen herauszufiltern, die den Hauptanteil an den Kosten tragen, wurden die LV-Positionen nach der Höhe ihrer Anteile sortiert und zur besseren Veranschaulichung in Form eines Diagrammes dargestellt (siehe Abbildung 4.29). Daraus lässt sich nun sehr gut ablesen, welche Positionen bei beiden Brücken die Hauptkosten verursachen. Durch die Darstellung der Anteile bei der Brücken in einem Diagramm werden auch jene Positionen gut ersichtlich, bei denen die beiden Brücken in den anteiligen Kosten stärker voneinander abweichen.

Tabelle 4.11: Vergleich der Positionspreise

LEISTUNGSVERZEICHNIS MIT AUSGEWÄHLTEN POSITIONEN		BRÜCKE SEMI-INTEGRAL		BRÜCKE INTEGRAL		Preisdiff. in % bez. auf Brücke semi-integral
LV-Nr.	LV-Position	Kosten für 600 m ²	% d. Σ EKT	Kosten für 600 m ²	% d. Σ EKT	
1. BAUSTELLENEINRICHTUNG						
1.1	Einrichten und Räumen der Baustelle					
1.2	Zeitgebundene Kosten der Baustelle (BGK)					
2. ERDARBEITEN		€ 22.920,63	3,8%	€ 25.622,29	4,1%	11,8%
2.1	Mutterboden abtragen und wegschaffen	€ 698,41	0,1%	€ 595,24	0,1%	-14,8%
2.2	Rüttelstopfverdichtung Dammbereich	€ -	0,0%	€ -	0,0%	
2.3	Dammschüttkörper herstellen inkl. Material	€ 17.460,32	2,9%	€ 16.233,77	2,6%	-7,0%
2.4	Baugrubenaushub inkl. wegschaffen	€ 4.761,90	0,8%	€ 8.793,29	1,4%	84,7%
3. BOHRPFÄHLARBEITEN		€ 69.291,01	11,5%	€ 34.597,76	5,5%	-50,1%
3.1	Leerbohrung Bohrpfahl	€ 1.587,30	0,3%	€ 1.352,81	0,2%	-14,8%
3.2	Bohrpfähle herstellen DN 120 cm, vollverroht	€ 66.666,67	11,1%	€ 31.565,66	5,0%	-52,7%
3.3	Pfahlköpfe abschremmen	€ 1.037,04	0,2%	€ 1.679,29	0,3%	61,9%
4. BETONARBEITEN		€ 123.174,60	20,5%	€ 197.565,78	31,4%	60,4%
4.1	Sauberkeitsschicht herstellen für Fundamente	€ 838,10	0,1%	€ 1.623,38	0,3%	93,7%
4.2	Unterwasserbeton C20/25 unbewehrt	€ 8.330,16	1,4%	€ -	0,0%	-100,0%
4.3	Beton Pfahlkopfplatte C35/45	€ 3.657,14	0,6%	€ 5.086,58	0,8%	39,1%
4.4	Beton Widerlager C25/30	€ 27.936,51	4,7%	€ 77.200,58	12,3%	176,3%
4.5	Beton Pfeiler C35/45	€ 2.708,99	0,5%	€ 8.802,31	1,4%	224,9%
4.6	Beton Tragwerk C35/45	€ 69.417,99	11,6%	€ 90.815,30	14,4%	30,8%
4.7	Beton Randbalken C25/30	€ 8.380,95	1,4%	€ 8.051,95	1,3%	-3,9%
4.8	Filterbetonschicht an Widerlagern	€ -	0,0%	€ -	0,0%	
4.9a	Beton Schleppplatte C25/30	€ 1.904,76	0,3%	€ -	0,0%	-100,0%
4.9b	Beton Magerbetonkeil	€ -	0,0%	€ 5.985,69	1,0%	
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN		€ 232.748,13	38,8%	€ 240.276,24	38,1%	3,2%
5.1	Schalung Pfahlkopfplatte	€ 2.331,43	0,4%	€ 2.327,92	0,4%	-0,2%
5.2	Schalung Widerlager	€ 49.162,40	8,2%	€ 47.343,07	7,5%	-3,7%
5.3	Schalung Pfeiler	€ 4.148,15	0,7%	€ 15.586,67	2,5%	275,8%
5.4	Schalung Tragwerk	€ 80.537,40	13,4%	€ 83.441,56	13,2%	3,6%
5.5	Rüstung Tragwerk	€ 60.000,00	10,0%	€ 59.974,75	9,5%	0,0%
5.6	Schalung Randbalken	€ 35.848,76	6,0%	€ 31.602,27	5,0%	-11,8%
5.7	Schalung Schlepppl	€ 720,00	0,1%	€ -	0,0%	-100,0%
6. BEWEHRUNGSARBEITEN		€ 68.560,85	11,4%	€ 87.313,30	13,9%	27,4%
6.1	Bewehrung Pfahlkopfplatte	€ 3.386,24	0,6%	€ 2.857,28	0,5%	-15,6%
6.2	Bewehrung Widerlager	€ 11.801,06	2,0%	€ 26.845,24	4,3%	127,5%
6.3	Bewehrung Pfeiler	€ 3.597,88	0,6%	€ 3.940,15	0,6%	9,5%
6.4	Bewehrung Tragwerk	€ 43.597,88	7,3%	€ 48.124,10	7,6%	10,4%
6.5	Bewehrung Randbalken	€ 5.119,58	0,9%	€ 5.546,54	0,9%	8,3%
6.6	Bewehrung Schlepppl	€ 1.058,20	0,2%	€ -	0,0%	-100,0%
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (nur ausgewählte Positionen)		€ 62.962,96	10,5%	€ 22.321,43	3,5%	-64,5%
7.1	Fahrbahnübergang - Fingerkonstruktion F80	€ 31.746,03	5,3%	€ -	0,0%	-100,0%
7.2	Elastomerlager (je 2 pro Auflager)	€ 6.772,49	1,1%	€ -	0,0%	-100,0%
7.3	Geländer Stahl	€ 17.777,78	3,0%	€ 16.233,77	2,6%	-8,7%
7.4	Leitschiene	€ 6.666,67	1,1%	€ 6.087,66	1,0%	-8,7%
8. ABDICHTUNGS- und BELAGSARBEITEN (nur ausgewählte Pos.)		€ 20.888,89	3,5%	€ 22.258,30	3,5%	6,6%
8.1	Kunststoffgrund 600 g/m ²	€ 3.492,06	0,6%	€ 4.220,78	0,7%	20,9%
8.2	Abdichtung OGR KVI	€ 13.333,33	2,2%	€ 14.069,26	2,2%	5,5%
8.3	Schutzschichte AB 8,2 cm	€ 4.063,49	0,7%	€ 3.968,25	0,6%	-2,3%
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN		€ 600.547,07	100,0%	€ 629.955,11	100,0%	4,9%
	Zuschlag Baustellengemeinkosten + Baustelleneinrichtung	€ 150.136,77	25,0%	€ 157.488,78	25,0%	4,9%
HERSTELLKOSTEN und KOSTEN / m² BRÜCKENFLÄCHE		€ 750.683,84	125,0%	€ 787.443,89	125,0%	4,9%
	Zuschlag Geschäftsgemeinkosten, Wagnis, Gewinn	€ 75.068,38	12,5%	€ 78.744,39	12,5%	4,9%
HERSTELLPREIS NETTO und PREIS / m² BRÜCKENFLÄCHE		€ 825.752,23	137,5%	€ 866.188,27	137,5%	4,9%

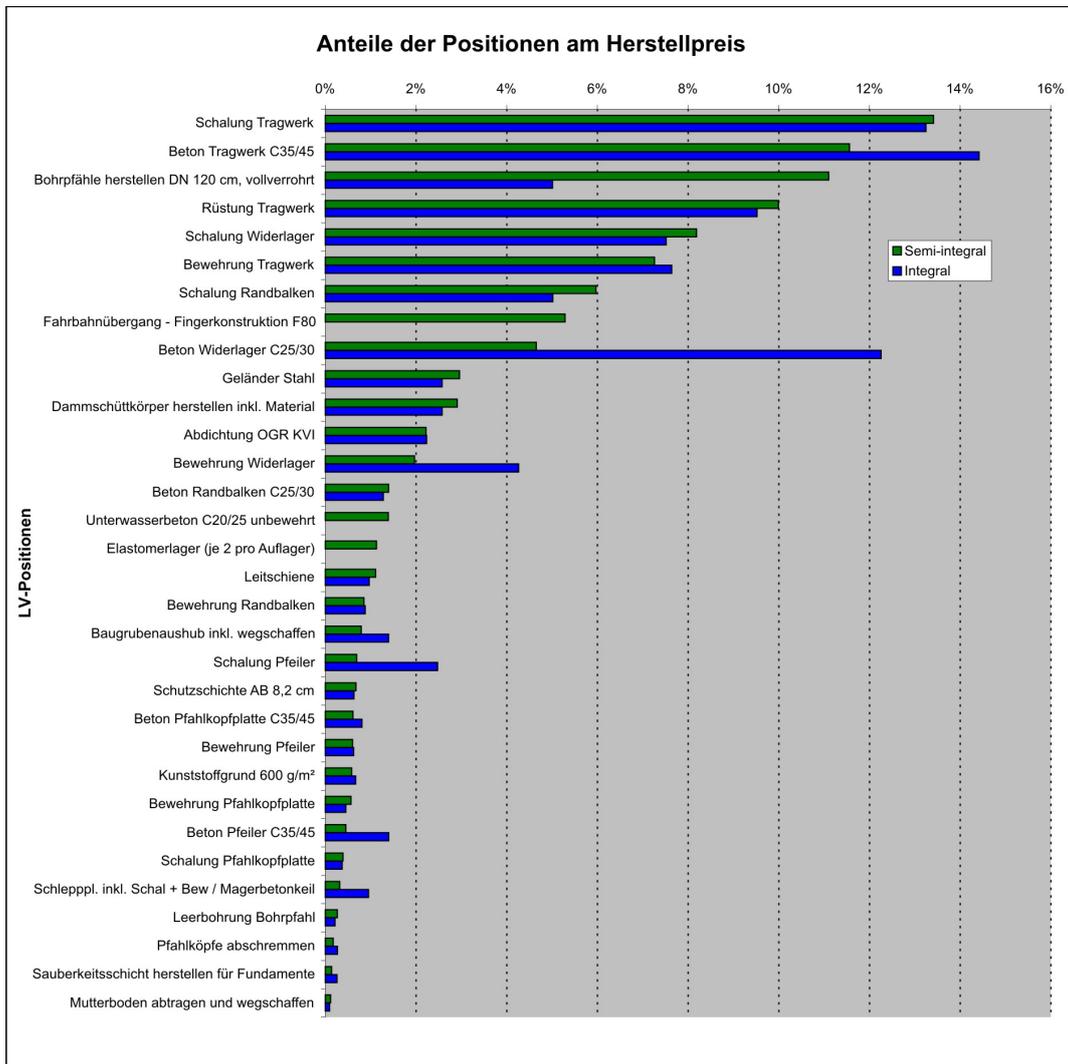


Abbildung 4.29: Anteile der einzelnen LV-Positionen am Herstellpreis

Analyse der maßgebenden Positionen

Hauptkostenfaktor Tragwerk Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Tragwerksschalung bei der semi-integralen Brücke (grüner Balken) mit gut 13% den Hauptanteil der Kosten verursacht. Der Anteil bei der integralen Brücke ist annähernd gleich, den Hauptanteil der Kosten trägt bei der integralen Brücke jedoch die Position *Beton Tragwerk C35/45* mit 14,4%. Dies kommt vor allem dadurch zustande, dass das Tragwerk bei der integralen Brücke über eine größere Breite massiv ausgebildet ist und die seitlichen Kragarme nur ca. 1,50 m betragen (Abbildung 4.31), während beim Querschnitt der semi-integralen Brücke nur 4,30 m massiv ausgeführt sind und die Kragarme 2,50 m betragen (Abbildung 4.30). Es ist zu hinterfragen, ob dies statisch unbedingt notwendig ist, oder ob hier noch Einsparungspotential für die integrale Brücke vorhanden wäre.

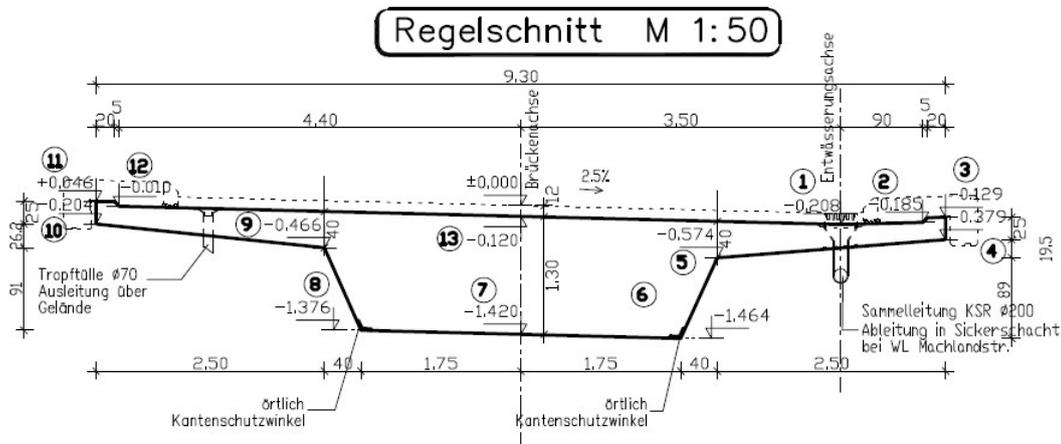


Abbildung 4.30: Regelquerschnitt der semi-integralen Bauweise

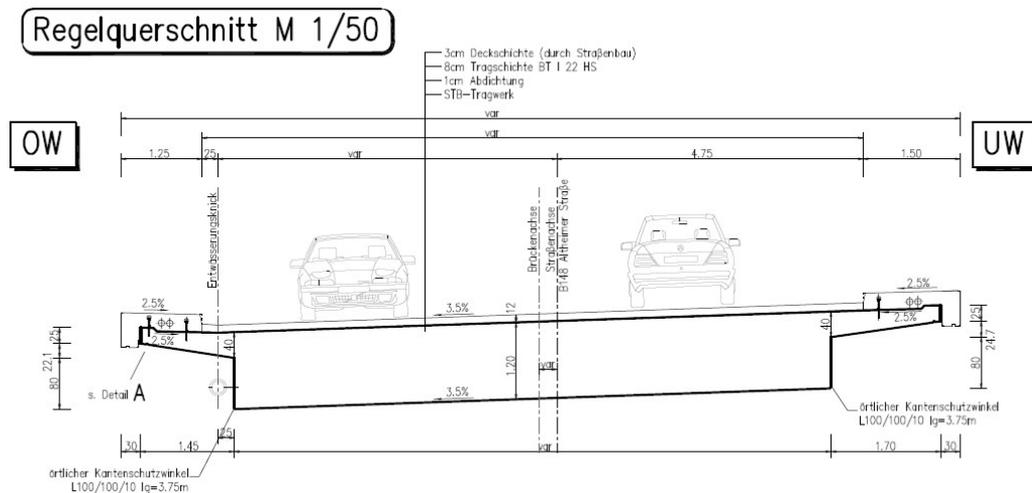


Abbildung 4.31: Regelquerschnitt der integralen Brücke

Kostenfaktor Bohrpfähle In der nächsten Position *Bohrpfähle herstellen DN 120 cm vollverrohrt* weichen die Kostenanteile ebenfalls stark voneinander ab, da die Bohrpfähle der semi-integralen Brücke viel länger sind. Dies darf jedoch nicht überbewertet werden, da möglicherweise die Gründungsverhältnisse bei der semi-integralen Brücke weitaus schlechter sind.

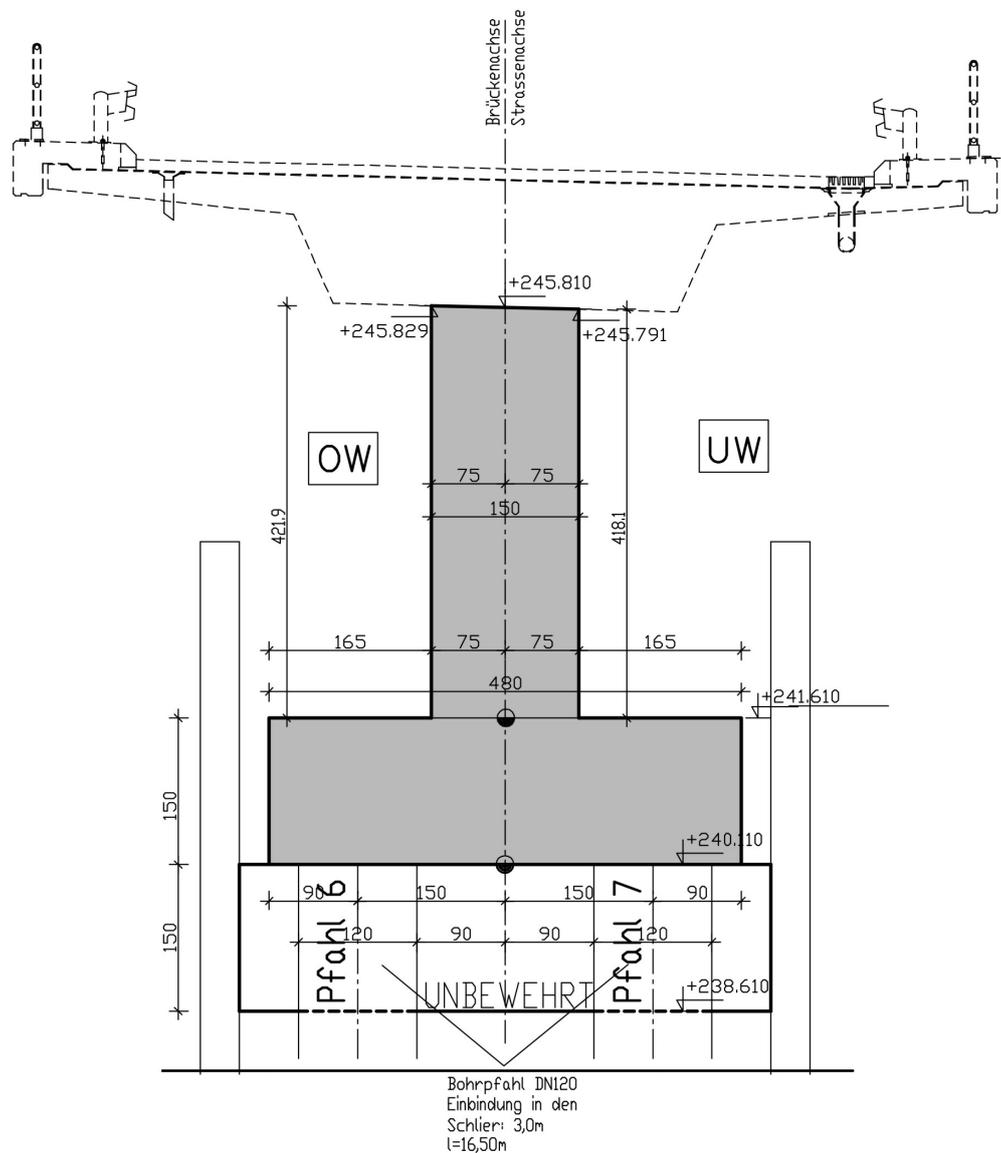
Kostenfaktor Widerlager Große Abweichungen treten als Nächstes in den Positionen *Beton Widerlager C25/30* und *Bewehrung Widerlager* auf. Diese Diskrepanz war zu erwarten, da durch den biegesteifen Anschluss des Überbaus in die Widerlager hohe Biegemomente übertragen werden und das Widerlager dementsprechend massiv ausgebildet und bewehrt werden muss und dadurch höhere Massen verursacht. Die Position *Schalung Widerlager* verursacht hingegen bei beiden Brücken einen etwa gleich großen Kostenanteil von rund 8%.

Die Schalungsfläche ist bei der integralen Brücke zwar um rund 40% höher, da jedoch das Widerlager der semi-integralen Brücke aufgrund der Geometrie aufwendiger einzuschalen ist und höhere Lohnkosten verursacht, wurden für diese höhere Einheitskosten angesetzt (siehe Position 5.2 in Tabelle 4.9 und Tabelle 4.10). Dadurch gleicht sich der hohe Massenunterschied in der Kostenbetrachtung wieder aus.

Kostenfaktor Pfeiler Einer genaueren Betrachtung sollten außerdem die Positionen *Schalung Pfeiler*, *Beton Pfeiler* und *Bewehrung Pfeiler* unterzogen werden. Die Anteile der Kosten für Schalung und Beton machen für die integrale Brücke im Vergleich zur konventionellen Brücke über 200% mehr aus. Dies resultiert aus der Geometrie der Pfeiler. Die Pfeiler sind bei der integralen Brücke als massive 80 cm dicke Scheiben über die ganze Brückenbreite (ausgenommen der Kragarme am Rand) ausgeführt, während bei der semi-integralen Brücke mit runden Pfeilern mit einem Durchmesser von 150 cm das Auslangen gefunden wird. Die Pfeiler sind sowohl bei der semi-integralen als auch bei der integralen Brücke in das Tragwerk eingespannt und ergeben daher nur geringe Unterschiede in den statischen Ergebnissen (siehe Abschnitt 4.2.3. Dies spiegelt sich auch in den Anteilen der Bewehrung wieder, die kaum voneinander abweichen. Bezogen auf eine Normbrückenfläche von 600 m² beträgt die Pfeilerbewehrung für die semi-integrale Brücke 4,23 t und für die integrale Brücke 4,64 t, was in etwa einer um 10% höheren Bewehrung entspricht. Die Rundstützen der semi-integralen Brücke sind also bezogen auf den Kubikmeter Beton bedeutend stärker bewehrt (250 kg/m³ bei der semi-integralen Brücke, 84 kg/m³ bei der integralen Brücke).

Es ist zu hinterfragen, ob die massiven Scheiben der integralen Brücke zwingend notwendig sind, oder ob hier noch Massen und damit Kosten eingespart werden können.

Kostenfaktor Brückenausrüstung Der Kostenfaktor Brückenausrüstung stellt im Zuge dieser Arbeit den interessantesten Faktor dar, da die Brückenausrüstung der Hauptverursacher von Kosten im Lebenszyklus der Brücke ist. Im Zuge dieser reduzierten Kalkulation wurden viele Ausrüstungsteile wie Ver- und Entsorgungsleitungen, Pflasterungen oder auch der bituminöse Straßenaufbau vernachlässigt, da diese Ausrüstungsteile bei beiden Brückentypen gleichermaßen anfallen bzw. der jeweiligen Situation angepasst werden müssen. Vielmehr erfolgte eine Konzentration auf den Hauptunterschied zwischen der semi-integralen und der voll-integralen Bauweise – nämlich, dass bei Letzterer auf den Einbau von Lagern und Fahrbahnübergängen verzichtet wird. Vor allem die Fahrbahnübergänge sind einem hohen Verschleiß ausgesetzt und haben viele Nachteile, wie auch in Abschnitt 2.5.1 schon ausführlich beschrieben wurde. In Abbildung 4.11 und Abbildung 4.29 ist ersichtlich, dass die Kosten für die Fahrbahnübergänge mit 5,3% und die Kosten für die Lager

Abbildung 4.32: Pfeiler – semi-integral (Rundstütze, $d = 150$ cm)

mit 1,1% der Herstellkosten zu Buche schlagen. Inwiefern sich das später auf entstehende Lebenszykluskosten der Brücke auswirkt, wird in Kapitel 5 detailliert behandelt.

Bei allen übrigen Positionen sind keine größeren Differenzen in den anteiligen Kosten zu erkennen. Sie bedürfen daher keiner gesonderten Analyse.

Tabelle 4.12: Kostenzusammenstellung – Brücke semi-integral

Kostenzusammenstellung - Errichtungskosten Naarnbrücke Perg (Quelle: Amt d. OÖ Landesregierung, Auftraggeber)					
Brückenobjekt: Baulos "Münzbacher Zubringer" - Naarnbrücke Perg (SEMI-INTEGRALE BAUWEISE)					
Preisbasis (in ATS = S): 2001 (Preisangaben netto)					
Nr.	Leistungsgruppe	Unterbau	Überbau	Ausrüstung	Gesamt
2	Baustellenbetrieb	>>> 541.000 S, Aufteilung anteilig, siehe Zuschlag BGK + BE!			
3	Vor- und Abbrucharbeiten	44.000 S			44.000 S
4	Erd- und Entwässerungsarbeiten	235.000 S			235.000 S
5	Gründungsarbeiten	1.351.000 S			1.351.000 S
6	Beton-, Stahlbeton- und Mauerungsarbeiten	1.394.500 S	1.555.950 S	298.550 S	3.249.000 S
7	Oberflächenschutz und Abdichtungsarbeiten			214.000 S	214.000 S
10	Brückenausrüstung			960.000 S	960.000 S
11	Straßenoberbau			287.000 S	287.000 S
12	Wasserbauarbeiten	151.000 S			151.000 S
20	Regieleistungen	15.000 S	15.000 S	15.000 S	45.000 S
	NA	112.667 S	112.667 S	112.667 S	338.000 S
	Summe 3-20+NA	3.303.167 S	1.683.617 S	1.887.217 S	6.874.000 S
	Zuschlag BGK + BE	259.967 S	132.505 S	148.528 S	541.000 S
	ERRICHTUNGSKOSTEN	3.563.134 S	1.816.121 S	2.035.745 S	7.415.000 S
	Anteile in %	48%	24%	27%	100%
<p>>>> Normierung der Brücke auf eine Einheitsfläche von 600 m²</p> <p>1.) Währungsumrechnung: 13,7603 S = 1 €</p> <p>2.) Indexanpassung mittels GHPI >>> Basis: Jahr 2000 = 100,0 Ø 2001 = 101,5 Dez. 2009 = 116,2</p> <p>3.) Hochrechnung der Errichtungskosten auf eine Fläche von 600 m²</p>					
Nr.	Leistungsgruppe	Unterbau	Überbau	Ausrüstung	Gesamt
2	Baustellenbetrieb	>>> siehe Zuschlag BGK + BE!			
3	Vor- und Abbrucharbeiten	3.874 €			3.874 €
4	Erd- und Entwässerungsarbeiten	20.689 €			20.689 €
5	Gründungsarbeiten	118.942 €			118.942 €
6	Beton-, Stahlbeton- und Mauerungsarbeiten	122.772 €	136.986 €	26.284 €	286.042 €
7	Oberflächenschutz und Abdichtungsarbeiten			18.841 €	18.841 €
10	Brückenausrüstung			84.518 €	84.518 €
11	Straßenoberbau			25.267 €	25.267 €
12	Wasserbauarbeiten	13.294 €			13.294 €
20	Regieleistungen	1.321 €	1.321 €	1.321 €	3.962 €
	NA	9.919 €	9.919 €	9.919 €	29.758 €
	Summe 3-20+NA	290.811 €	148.226 €	166.151 €	605.187 €
	Zuschlag BGK + BE	22.888 €	11.666 €	13.076 €	47.630 €
	ERRICHTUNGSKOSTEN für 600 m²	313.699 €	159.891 €	179.227 €	652.817 €
	Anteile in %	48%	24%	27%	100%

1. Währungsumrechnung: öS 1.351.000,- / 13,7603 = €98.181,-
2. Indexanpassung: €98.181,- $\cdot \frac{116,2}{101,5}$ = €112.400,-
3. Hochrechnung auf 600 m²: €112.400,- $\cdot \frac{600\text{ m}^2}{567\text{ m}^2}$ = €118.942,-

Gleiches geschah mit der Brücke in integraler Bauweise, für die jedoch nur zwei Umrechnungsschritte notwendig waren, da sie erst im Jahr 2004 errichtet wurde, wo der Euro bereits eingeführt war (siehe Abbildung 4.13).

4.2.7 Vergleich Kalkulation – Reale Errichtungskosten

Um die Kalkulation mit eigens gewählten Ansätzen mit der Zusammenstellung der Errichtungskosten des Brückeneigentümers vergleichen zu können, wurde die Kalkulation der semi-integralen und der integralen Brücke ebenfalls nach Leistungsgruppen ausgewertet (siehe Tabelle 4.14 und Tabelle 4.15).

Tabelle 4.14: Auswertung nach LG – semi-integral

BRÜCKE	BRÜCKE SEMI-INTEGRAL (600 m ²)			
	Unterbau	Überbau	Ausrüstung	Gesamt
LEISTUNGSGRUPPE				
1. BAUSTELLENEINRICHTUNG & BETRIEB	>>> anteilig 25 %, siehe Zuschlag BGK + BE!			
2. ERDARBEITEN	€ 22.920,63			€ 22.920,63
3. BOHRPFAHLARBEITEN	€ 69.291,01			€ 69.291,01
4. BETONARBEITEN	€ 45.375,66	€ 69.417,99	€ 8.380,95	€ 123.174,60
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN	€ 56.361,97	€ 140.537,40	€ 35.848,76	€ 232.748,13
6. BEWEHRUNGSARBEITEN	€ 19.843,39	€ 43.597,88	€ 5.119,58	€ 68.560,85
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (nur ausgewählte Positionen)			€ 62.962,96	€ 62.962,96
8. ABDICHTUNGS- und BELAGSARBEITEN (nur ausgewählte Positionen)			€ 20.888,89	€ 20.888,89
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN	€ 213.792,66	€ 253.553,27	€ 133.201,14	€ 600.547,07
Zuschlag BGK + BE (25 %)	€ 53.448,17	€ 63.388,32	€ 33.300,29	€ 150.136,77
HERSTELLKOSTEN	€ 267.240,83	€ 316.941,59	€ 166.501,43	€ 750.683,84
Zuschlag Geschäftsgemeinkosten, Wagnis, Gewinn (10%)	€ 26.724,08	€ 31.694,16	€ 16.650,14	€ 75.068,38
HERSTELLPREIS NETTO	€ 293.964,91	€ 348.635,75	€ 183.151,57	€ 825.752,23
Anteile in %	36%	42%	22%	100%

Tabelle 4.15: Auswertung nach LG – integral

BRÜCKE	BRÜCKE INTEGRAL (600 m ²)			
	Unterbau	Überbau	Ausrüstung	Gesamt
LEISTUNGSGRUPPE				
1. BAUSTELLENEINRICHTUNG & BETRIEB	>>> anteilig 25 %, siehe Zuschlag BGK + BE!			
2. ERDARBEITEN	€ 25.622,29			€ 25.622,29
3. BOHRPFAHLARBEITEN	€ 34.597,76			€ 34.597,76
4. BETONARBEITEN	€ 98.698,54	€ 90.815,30	€ 8.051,95	€ 197.565,78
5. SCHALUNGS- und RÜSTUNGSARBEITEN	€ 65.257,66	€ 143.416,31	€ 31.602,27	€ 240.276,24
6. BEWEHRUNGSARBEITEN	€ 33.642,67	€ 48.124,10	€ 5.546,54	€ 87.313,30
7. BRÜCKENAUSRÜSTUNG (nur ausgewählte Positionen)			€ 22.321,43	€ 22.321,43
8. ABDICHTUNGS- und BELAGSARBEITEN (nur ausgewählte Positionen)			€ 22.258,30	€ 22.258,30
SUMME - EINZELKOSTEN DER TEILLEISTUNGEN	€ 257.818,93	€ 282.355,70	€ 89.780,48	€ 629.955,11
Zuschlag BGK + BE (25 %)	€ 64.454,73	€ 70.588,92	€ 22.445,12	€ 157.488,78
HERSTELLKOSTEN	€ 322.273,66	€ 352.944,62	€ 112.225,60	€ 787.443,89
Zuschlag Geschäftsgemeinkosten, Wagnis, Gewinn (10%)	€ 32.227,37	€ 35.294,46	€ 11.222,56	€ 78.744,39
HERSTELLPREIS NETTO	€ 354.501,02	€ 388.239,09	€ 123.448,16	€ 866.188,27
Anteile in %	41%	45%	14%	100%

Anschließend wurden die beiden Kostenermittlungen gegenübergestellt. Die Kosten aus der eigenen Kalkulation beinhalten hier jedoch nicht die in Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 beaufschlagten 10% der Geschäftsgemeinkosten, des Wagnisses und des unternehmerischen Gewinns, da dieser Zuschlag immer starken konjunkturbedingten Schwankungen unterworfen ist und je nach

Marktsituation angepasst werden muss. Das absolute Preisniveau passt bei Betrachtung der Kosten nach Kalkulation exkl. GGK besser zur Kostenzusammenstellung von Brückeneigentümerseite und am Vergleich der Anteile an den einzelnen Brückenbestandteilen würde dies ohnehin nichts verändern, da die GGK anteilmäßig auf alle Positionen verteilt aufgeschlagen werden.

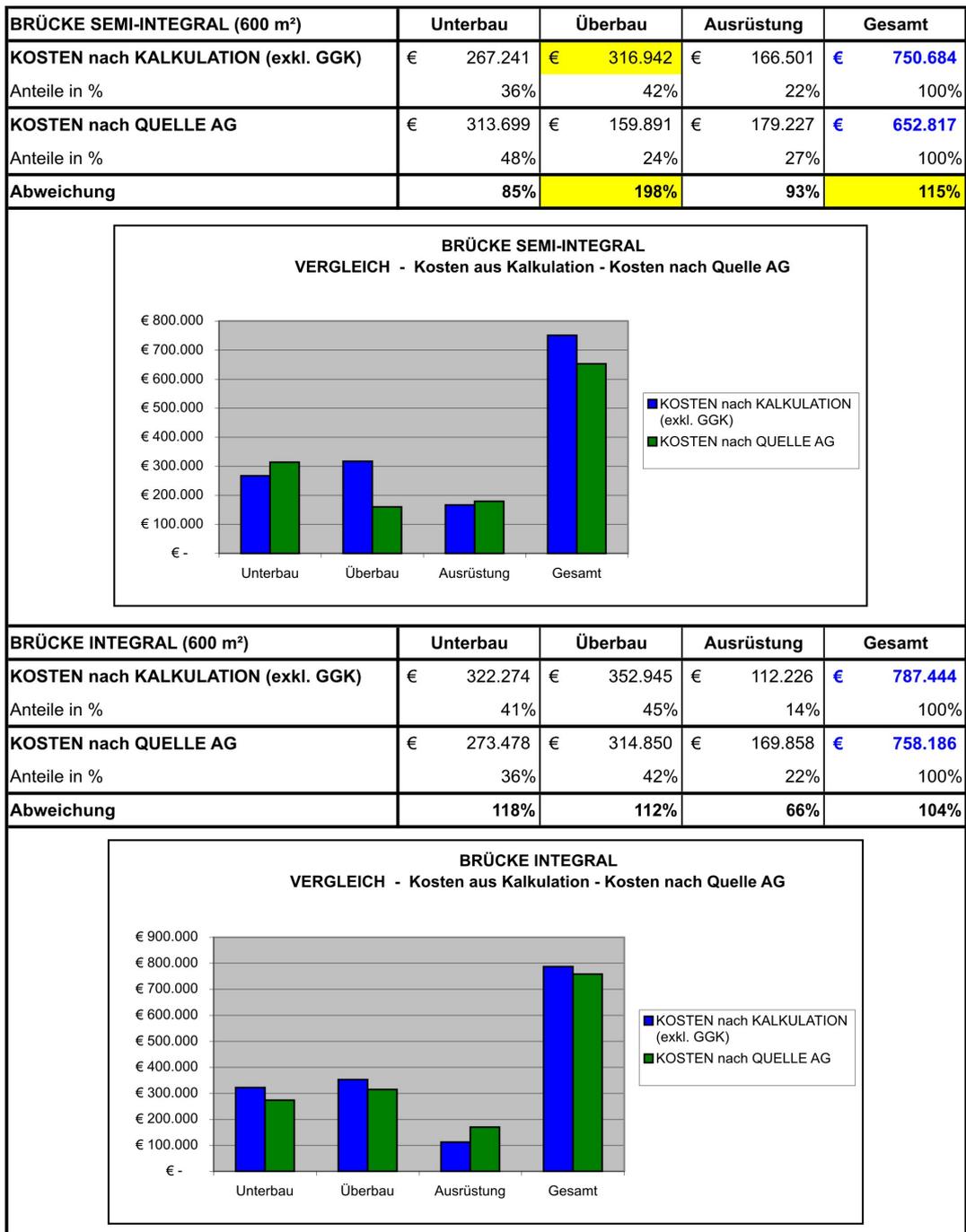


Abbildung 4.34: Vergleich – Kalkulierte Kosten vs. Kosten nach Quelle AG

Bei der integralen Brücke passen die beiden Kostenermittlungen recht gut zusammen, die auftretenden Differenzen ergeben sich hauptsächlich dadurch, dass in der Kalkulation mit eigenen Ansätzen nur die wesentlichen Ausrüstungsbestandteile berücksichtigt wurden. Die Abweichung der beiden Kostenermittlungen beträgt ca. 4%.

Der Vergleich der Kostenermittlungen für die semi-integrale Bauart wirft jedoch einige Fragen auf, da die Kosten für den Überbau nach eigener Kalkulation fast das Doppelte der Aufwände des Auftraggebers ergeben. Auch die Gesamtdifferenz ist weitaus höher und beträgt rund 15% (siehe gelb markierte Felder).

Da die Zusammensetzung des Baupreises von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren abhängt, kann über die Gründe hierfür nur gemutmaßt werden. Die Rohstoffpreise – vor allem für Stahl – sind laufend starken Schwankungen unterworfen. Weiters könnte die den Überbau ausführende Firma mit dem Auftrag strategische Interessen verfolgt haben und deshalb ein spekulatives Angebot oder ein Angebot unterhalb der Kostendeckungsgrenze gelegt haben.

Betrachtet man weiters die Leistungsgruppe *Schalungs- und Rüstungsarbeiten* in Tabelle 4.14, so erkennt man, dass diese mit gut €140.000,- bereits mehr ausmacht als die gesamte Leistungsgruppe *Beton-, Stahlbeton- und Mauerwerksarbeiten* für den Überbau nach den Daten des Auftraggebers, in der sowohl Beton als auch Bewehrung enthalten sind (knapp €137.000,-; siehe Tabelle 4.12). Die Rüstung könnte aus verschiedenen Gründen bedeutend kostengünstiger ausgeführt worden sein, als in der Kalkulation angenommen. So war die Rüstung möglicherweise zum Errichtungszeitpunkt schon zur Gänze abgeschlossen oder es wurden alternative kostengünstigere Rüstmethoden angewandt.

4.2.8 Unterschiede im baubetrieblichen Ablauf

Für die mehrfeldrigen Brücken gilt was die Lager betrifft, prinzipiell dasselbe wie für die einfeldrigen Brücken. Anders als bei kurzen Tragwerken muss jedoch ab einer gewissen Spannweite bei der integralen Variante der konstruktiven Durchbildung des Übergangs Brücke – Verkehrsweg besondere Bedeutung beimessen werden. Durch den Entfall der klassischen Fahrbahnübergänge müssen andere Lösungen gefunden werden, um die Tragwerksverschiebungen aus Zwangskräften abzutragen ohne zu hohe Setzungen hinter den Widerlagern zu verursachen oder den Fahrbahnbelag zu beschädigen. Dies erfolgt üblicherweise durch Anordnung einer Schleppplatte, die durch Anschlussbewehrung an das Tragwerk angeschlossen werden kann [9]. Setzungen hinter dem Widerlager, die durch die Bewegungen des Tragwerks im Jahreszyklus entstehen, verlieren dadurch ihren schädigenden Einfluss. Werden die Verformungen am Übergang zu groß, können in den Fahrbahnbelag Dehnfugen eingebaut werden.

Für detailliertere Informationen zur Ausbildung von Widerlagern und Übergängen wird neben [9] auf weitere Fachliteratur wie etwa [16], oder [10] verwiesen.

Kapitel 5

Lebenszykluskostenanalyse

Im Laufe der letzten zehn Jahre haben sich in der Baubranche unabhängig voneinander mehrere Programme zur Analyse der Lebenszykluskosten von Brückenbauwerken entwickelt. Mit Hilfe eines solchen Programmes sollen die in Kapitel 4 beschriebenen Brücken in diesem Kapitel anhand der zuvor ermittelten Daten hinsichtlich der Kostenentstehung über den Lebenszyklus analysiert und verglichen werden.

In den folgenden beiden Abschnitten wird das verwendete Programm kurz vorgestellt und erklärt.

5.1 Einführung in das LZKB-Programm

Im Oktober 2005 wurde von der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik bestehend aus Vertretern der ASFINAG, Stadt Wien (MA29 - Grund- und Brückenbau), ÖBB Infrastruktur, dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und Vertretern der Bauwirtschaft der *Arbeitskreis „Dauerhaftigkeit - Brücke“* gegründet. Ein Ziel dieses Arbeitskreises war es, ein Programm zur Ermittlung der Lebenszykluskosten einer Brücke zu entwickeln, was vom Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement der TU Wien unter der Führung von Institutsvorstand Professor Jodl übernommen wurde. Die Anforderungen, die an das Programm gestellt wurden, waren: leichte Bedienbarkeit sowie die Ausgabe hilfreicher Ergebnisse in Form eines Endberichts [8]. Die computertechnische Umsetzung des Programms wurde im Rahmen einer Diplomarbeit entwickelt und im Oktober 2008 fertiggestellt.

Das Programm soll den Beteiligten an Finanzierung, Bau und Instandhaltung in verschiedenen Fällen als Hilfe dienen:

- in der Ablösung einer Brücke zwischen zwei Vertragspartnern
- zum Vergleich mehrerer Brückenbauvarianten
- bei der Entscheidung über die Instandsetzung einer sanierungsbedürftigen Brücke oder den Neubau dieser Brücke.

Bisher erfolgte diese Entscheidung meist auf Grund der Errichtungskosten, mit Hilfe des LZKB-Programms ist es nun möglich, die Lebenszykluskosten als Entscheidungsgrundlage heranzuziehen.

5.1.1 Berechnungsmodelle

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Berechnungsmodelle, die diesem Programm zugrunde gelegt wurden, kurz beschrieben und erklärt. Für das bessere Verständnis und die genauere Erläuterung der finanzmathematischen Begriffe wird auf Kapitel 3 verwiesen.

Kostenverlauf (unverzinst)

Dieses Berechnungsmodell bietet die Möglichkeit, die reinen Kosten, die über den Lebenszyklus entstehen, zu berechnen und zu veranschaulichen. Die jährliche Verzinsung bleibt dabei unberücksichtigt.

Die Sprünge zu Beginn der einzelnen Verläufe rühren von den Errichtungskosten her, anschließend steigen die Linien durch die jährlichen Instandhaltungskosten linear an. Die weiteren Sprünge entstehen durch Instandsetzungskosten und zum Ende des Lebenszyklus fallen noch die Abbruchkosten an. Für nähere Erläuterungen siehe auch [8] S.15ff.

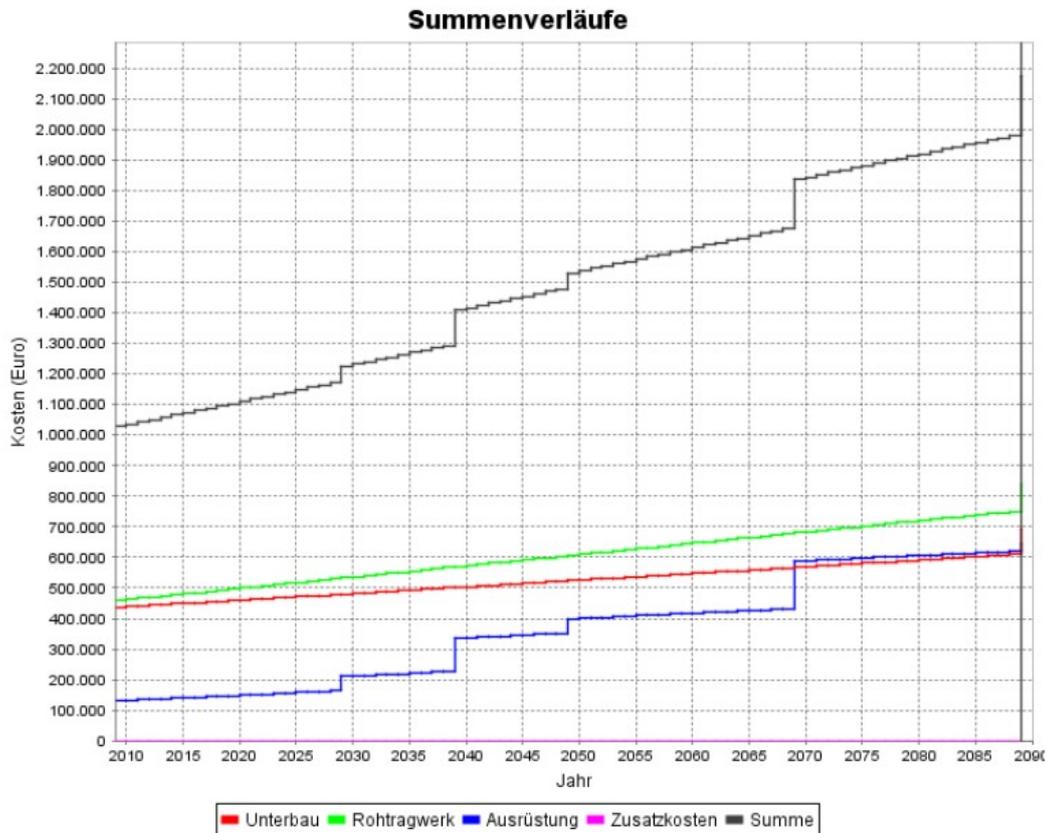


Abbildung 5.1: Kostenverlauf unverzinst

Lebenszyklusmodell

Beim Lebenszyklusmodell werden die Kosten der Brücke für eine vorgegebene Lebensdauer unter Berücksichtigung einer konstanten Verzinsung berechnet. Der Zinsfaktor kann – und wird – sich naturgemäß im Laufe der Brückenlebensdauer ändern, da dies jedoch nicht vorhersehbar ist, haben sich die Initiatoren dieser Software auf einen konstanten Standardverzinsungsfaktor von 4% geeinigt. Dieser Wert kann im Zuge der Berechnungen beliebig verändert werden.

Durch das Anfallen der Zinsen sind Kosten, die zu einem früheren Zeitpunkt anfallen, *teurer* als Kosten, die zu einem späteren Zeitpunkt anfallen (siehe auch Beispiel 1 im Abschnitt 3.2.6), [13].

Das Lebenszyklusmodell berechnet sowohl die Endwerte der Kosten als auch die Barwerte der Kosten. Da jedoch wie in Abschnitt 3.2.5 beschrieben, die Barwerte immer durch Multiplikation mit dem Abzinsungsfaktor $1/q^n$ berechnet werden können, wird hier nur auf die Endwertmethode eingegangen.

Im Laufe des Lebenszyklus der Brücke entstehen einerseits *einmalig anfallende Kosten*, wie beispielsweise die Errichtungskosten zu Beginn der Laufzeit

oder Kosten für den Komplettaustausch eines Bauteils (z.B. Fahrbahnübergang), andererseits *jährlich konstant anfallende Kosten* wie etwa Kosten für die alljährliche Wartung und Instandhaltung der Brücke. In den folgenden beiden Punkten wird die Berechnung beider kurz erläutert.

- **Einmalig anfallende Kosten**

Einmalige Kosten können mit der schon aus Abschnitt 3.2.6 bekannten Formel der Zinseszinsrechnung auf das Ende der Laufzeit aufgezinst und berechnet werden.

$$K^{end} = K^{bar} \cdot q^n \quad (5.1)$$

Hier sind K^{end} der Endwert am Ende der Lebensdauer und K^{bar} der Barwert am Beginn der Lebensdauer. Die Laufzeit der Verzinsung ist normalerweise die Lebensdauer der Brücke, oder die Differenz zwischen dem Betrachtungsjahr und dem Jahr in dem die Kosten anfallen. [13]

- **Jährlich konstant anfallende Kosten**

Kosten, die jährlich gleichmäßig anfallen, müssen ebenfalls auf die Lebensdauer aufgezinst werden. Darunter fallen beispielsweise die Instandhaltungskosten einer Brücke. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe der Formel der nachschüssigen Rentenrechnung.

$$K_I^{end} = K_{jI} \cdot \frac{q^n - 1}{q - 1} \quad (5.2)$$

Dabei sind K_I^{end} der Endwert der Unterhaltungskosten und K_{jI} die jährlichen Instandhaltungskosten. [13]

Ein Beispiel für einen verzinnten Kostenverlauf sieht man in Abbildung 5.2

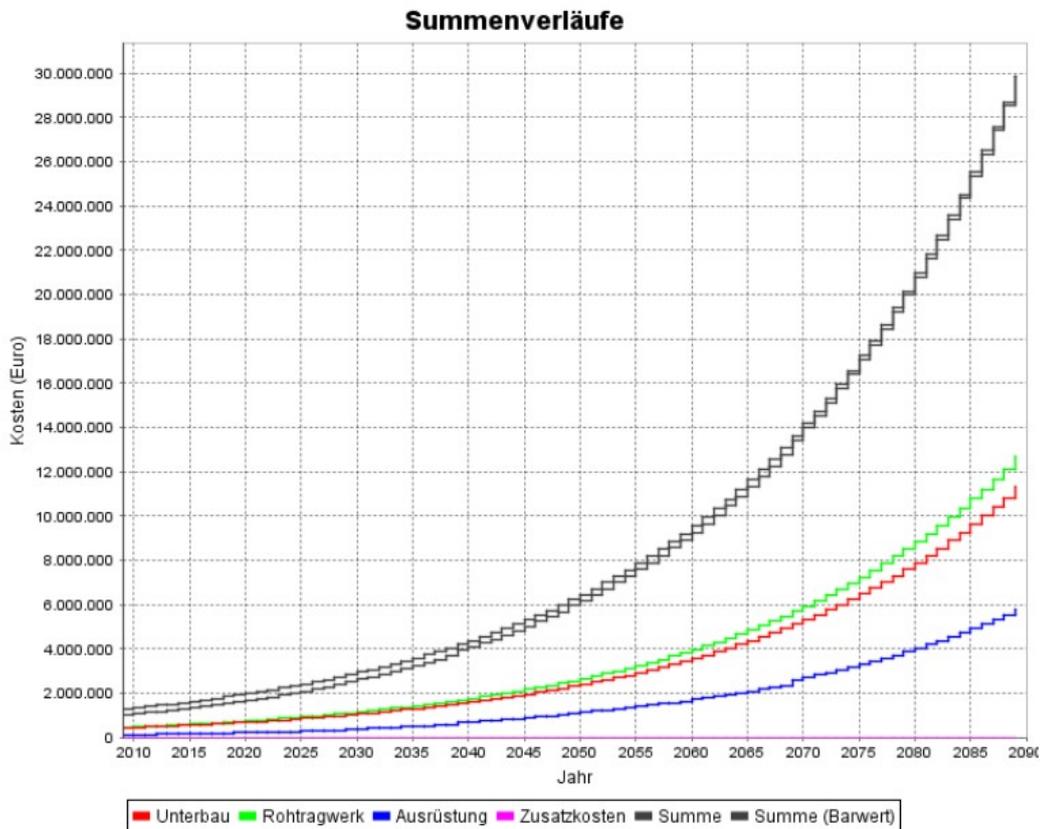


Abbildung 5.2: Kostenverlauf verzinst

Ablösemodell

Da das Ablösemodell im Zuge dieser Arbeit nicht verwendet wird, wird darauf nur kurz eingegangen. Für genauere Erläuterungen wird auf [8] und [13] verwiesen.

Das Ablösemodell wird in der Ablöserichtlinie der ÖBB verwendet. Es wird in diesem Modell von einer zeitlich unbegrenzten Erhaltungsperiode ausgegangen. Es werden die Kosten so berechnet, dass am Ende der Lebensdauer noch genügend Geld vorhanden ist, um das Bauwerk neu zu bauen.

Am Anfang des Brückenlebens wird somit ein Anlagebetrag AB herangezogen, der nach jährlicher Verzinsung und schlussentlichem Abzug der Erneuerungskosten für den nächsten Lebenszyklus der Brücke den gleichen Anlagebetrag zu Verfügung stellt. Die Erhaltungskosten E_{ern} am Ende eines Brückenlebenszyklus setzen sich aus den Erneuerungskosten K_{ern} und dem Anlagebetrag AB zusammen. In Abbildung 5.3 werden der Summenverlauf und die Teilverläufe der kapitalisierten Erhaltungskosten AE einer Brücke veranschaulicht. Die Sprünge in der blauen Kurve, welche die Brückenausrüstung darstellt, ergeben sich aus den 20–30-jährlichen wiederkehrenden Erneuerungen der Ausrüstungsbestandteile. Am Ende der Brückenlebensdauer wird die Brücke abgebrochen

und neu errichtet. Die Erneuerungskosten K_{ern} enthalten dabei sämtliche Kosten für Abbruch und Neubau, der übrig bleibende Differenzbetrag auf die Erhaltungskosten E_{ern} bildet den neuen Anlagebetrag für den Lebenszyklus der neu errichteten Brücke.

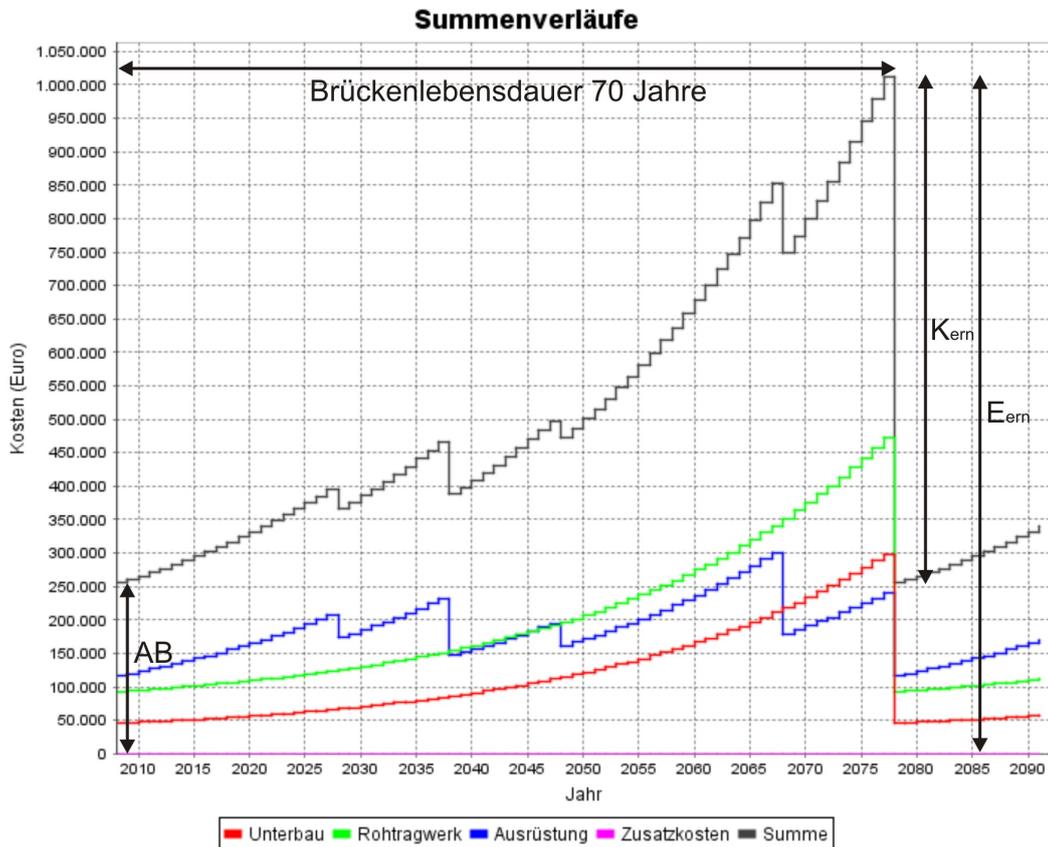


Abbildung 5.3: Ablösemodell – Kapitalisierte Erhaltungskosten

5.1.2 Eingangsparameter

Als Eingangsparameter werden im LZKB-Programm folgende Punkte verwendet:

- **Rohtragwerk**

Beschreibung des Überbaus anhand der Konstruktionsart und des Baustoffes (z.B.: Überbau als Platte aus Stahlbeton); wird als Konstruktionsart ein *Rahmenartiges Tragwerk* oder ein *Gewölbe* gewählt, so werden Überbau und Unterbau als ein monolithisches Bauteil betrachtet und der folgende Eingangsparameter *Unterbau* wird deaktiviert.

- **Unterbau**

Beschreibung des Unterbaus anhand des Baustoffes

- **Errichtungsjahr der Brücke**
- **Betrachtungsjahr**
- **Unterbaukosten**
- **Rohtragwerkskosten**
- **Ausrüstungskosten**
- **Berechnungsmethode**
- **Optionale Aktivierung von Auf- und Abminderungsfaktoren**

Je nach Angabe über die Konstruktionsart und den Baustoff gibt das Programm Werte für die theoretische Nutzungsdauer und den angesetzten Prozentsatz für die jährlichen Unterhaltungskosten vor. Diese Zahlen beruhen auf Tabelle 3.1, welche im Zuge der Erstellung der *ÖBB-Richtlinie zur Berechnung der Erhaltungskosten und Ablösungsbeträge von Ingenieurbauwerken, Straßen und Wegen* [19] im Jahr 2006 von Experten erarbeitet wurden und im Zuge der Erstellung der Diplomarbeit Dejmek [8] erweitert wurde. Dies sind auf Erfahrungswerten beruhende Ansätze die jedoch nicht auf alle Situationen zutreffen müssen. Es besteht darum im Programm die Möglichkeit, diese Werte durch individuell erstellte Auf- oder Abminderungsfaktoren zu modifizieren und an die jeweilige Situation anzupassen. Es können dabei Faktoren für beliebige Einflüsse erstellt werden, auch die Höhe des Zinsfaktors kann dadurch modifiziert werden. Als vom Programm vorgeschlagene Standardbeispiele können beispielsweise folgende Faktoren aktiviert werden:

- Faktor: Dauerhaftigkeit von Widerlager
- Faktor: Betondeckung
- Faktor: linksschiefe Lagerung

5.2 Auswertung und Ergebnisse – Einfeldrige Brücken

Auf Grundlage der in Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7 zusammengefassten Zahlen für die beiden einfeldrigen Eisenbahnbrücken wurden nun verschiedene Berechnungsvarianten mit dem LZKB-Programm durchgeführt.

5.2.1 Brücke konventionell (Plattenbrücke)

In Abbildung 5.4 ist ein Programmauszug aus dem LZKB-Programm mit den Eingangsparametern und Ausgabewerten für die Plattenbrücke zu sehen. Die

Baukosten für Unterbau, Rohtragwerk (Überbau) und Brückenausrüstung beziehen sich dabei auf die Herstellkosten in Tabelle 4.6, der Zuschlag für Geschäftsgemeinkosten, Wagnis und Gewinn wurde unberücksichtigt gelassen, da er – wie schon in Kapitel 4 erwähnt – konjunkturellen Schwankungen unterworfen ist und stark variiert. Außerdem werden die Ergebnisse relativ zueinander nicht verfälscht, da er auf sämtliche Positionen anteilmäßig gleich aufgeschlagen wird. Die *jährlichen Instandhaltungskosten*¹ in der nächsten Spalte ergeben sich aus den prozentuellen Ansätzen der Herstellkosten nach Bauteil und Baustoff aus Tabelle 3.1. Die letzte Spalte gibt die erwartete Lebensdauer des Bauteils in Jahren an und bezieht sich ebenfalls auf die in Tabelle 3.1 festgelegten Werte. Für die Ausrüstung scheint dabei kein Wert in der Spalte auf, die Ansätze für die theoretische Nutzungsdauer und den Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten wurden im Programm vordefiniert.

Folgende Standardwerte wurden hierfür angesetzt:

- 30% der Ausrüstungskosten:
 - theoretische Nutzungsdauer: 20 Jahre
 - Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten: 1,5%
- 70% der Ausrüstungskosten:
 - theoretische Nutzungsdauer: 30 Jahre
 - Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten: 1,2%

Als Berechnungsmethode wurde das Lebenszyklusmodell mit einem jährlich konstanten Standardzinssatz von 4% gewählt, als Lebensdauer der Brücke wurden 70 Jahre angesetzt. In den unteren Zeilen der Abbildung kann man die Ergebnisse der Berechnung ablesen. In Spalte *2010* findet man die über die Barwertmethode berechneten Ergebnisse, in Spalte *2080* die über die Endwertmethode erhaltenen Werte.

In Abbildung 5.5 ist ein Diagramm dargestellt, das die Summenverläufe für die einzelnen Bauteile darstellt.

Interpretation der Ergebnisse

Über den Lebenszyklus gesehen müssen in diese Brücke – den Endwert betrachtet – rund €6,09 Mio. investiert werden um die Brücke zu errichten, jährlich zu warten und die Brückenbestandteile nach Ablauf ihrer theoretischen Lebensdauer letztendlich vollständig abzubauen. Rund €852.000 fließen dabei in die Instandhaltung der Brücke, rund €5,24 Mio. in die Errichtung bzw. die Erneuerung.

¹gleichbedeutender alter Begriff bis 2009: jährliche Unterhaltskosten

Name der Brücke:
Plattenbrücke - einfeldrig

Beschreibung:
Einfeldrige Eisenbahnbrücke konventionell gelagert; Spannweite ca. 9 m; Fundierung (Bohrpfähle) vernachlässigt!

Bauliche Anlagen:
Unterbau: aus Mauerwerk, Beton, Stahlbeton
Rohtragwerk: Überbau: Tragkonstruktionen (Balken, Platten, Bögen, Kastenquerschnitte) aus Stahlbeton

Eingangsparameter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 101.409	€ 507	110
Rohtragwerk	€ 48.852	€ 391	70
Ausrüstung	€ 95.317	€ 1.230	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwernisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-

Berechnungsparameter:	
Summe reiner Baukosten	€ 245.578
Summe Abbruchkosten	€ 49.116
Summe Zusatzkosten	€ 0
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung	€ 24.558

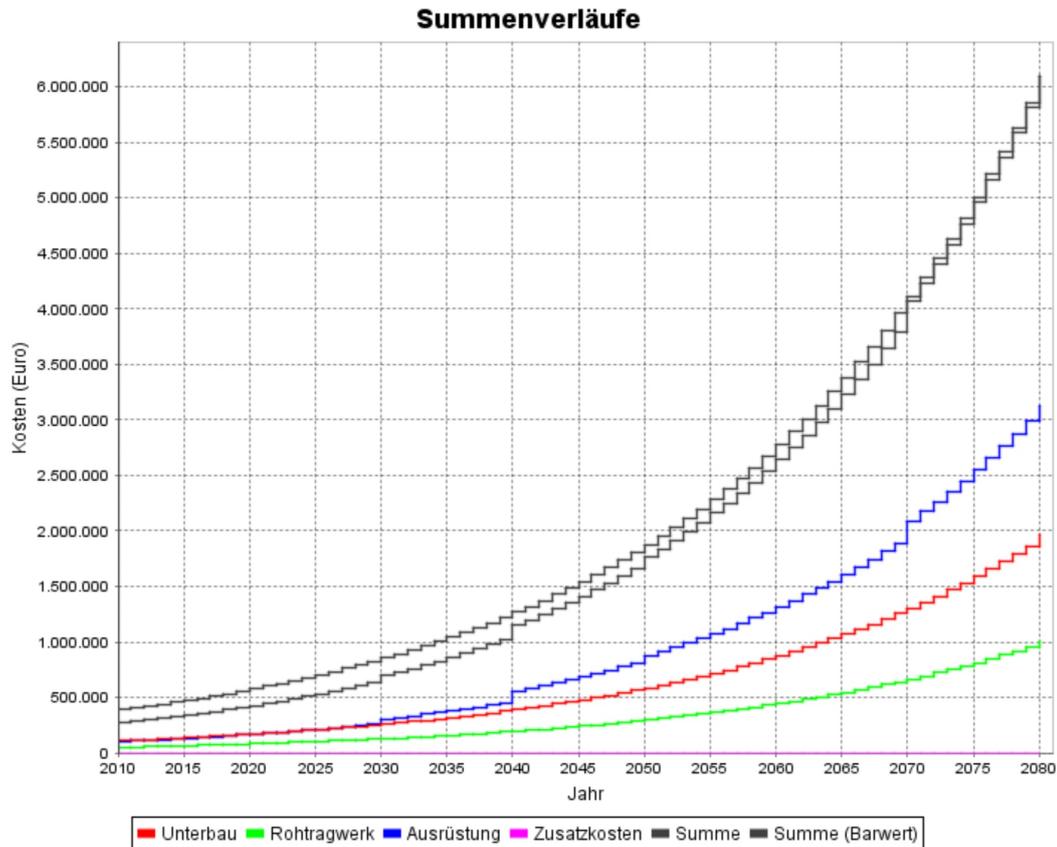
Zinssatz: 4,00%

Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell
Errichtungsjahr: 2010 **Betrachtungsjahr:** 2010 **Endjahr:** 2080

Betrachtungsjahr	2010	2080
Unterbau	€ 125.901	€ 1.960.477
Rohtragwerk	€ 64.422	€ 1.003.153
Ausrüstung	€ 200.946	€ 3.129.051
Zusatzkosten	€ 0	€ 0
Summe	€ 391.268	€ 6.092.681
Unterhaltung	€ 54.748	€ 852.511
Errichtung/Erneuerung	€ 336.521	€ 5.240.171

Abbildung 5.4: Eingangsparameter und Ergebnisse – Plattenbrücke einfeldrig

Besonders anzumerken ist außerdem, dass die Brückenausrüstung, die in Tabelle 4.6 noch 41% der reinen Baukosten ausmachte, über den Lebenszyklus betrachtet einen höheren Kostenanteil verursacht. Durch die mehrmalige Auswechslung der Ausrüstungsteile kommt es im Summenverlauf der Ausrüstung (blaue Kurve in Abbildung 5.5) zu Sprüngen in den Jahren der Erneuerung. Über den Lebenszyklus betrachtet machen die Ausrüstungskosten daher mit rund € 3,13 Mio. bereits mehr als 51% der Gesamtsumme von € 6,09 Mio. aus.



5.2.2 Brücke integral (Rahmenbrücke)

Variante 1 – als monolithisches Bauwerk berechnet

In Abbildung 5.6 ist der Programmauszug aus dem LZKB-Programm mit den Eingangsparametern und Ausgabewerten für die Rahmenbrücke zu sehen. In den Eingangsparametern wurde daher der Bauwerkstyp *Rahmenartiges Bauwerk* gewählt. Der Überbau und der Unterbau werden daher unter dem Begriff *Rohtragwerk* zu einer Baukostensumme zusammengefasst. Für die restlichen Parameter gelten dieselben Bedingungen wie schon in 5.2.1. Schon in der Analyse der Herstellkosten in Kapitel 4 war die Rahmenbrücke bei weitem günstiger als die Plattenbrücke. Es ist daher wenig verwunderlich, dass die Rahmenbrücke über den Lebenszyklus betrachtet noch bedeutend besser aussteigt. Geht man von der Rahmenbrücke aus, so kostet die Plattenvariante nach Herstellkosten (HSK) um 70% mehr, die Lebenszykluskosten (LZK) betragen sogar um 78% mehr als bei der Rahmenvariante (siehe auch Abbildung 5.7).

Name der Brücke:			
Rahmenbrücke - einfeldrig, integral			
Beschreibung:			
Einfeldrige Eisenbahnbrücke als Rahmenbauwerk ausgeführt und berechnet; Spannweite ca. 9 m; Fundierung (Fundamentplatte) vernachlässigt!			
Bauliche Anlagen:			
Rohtragwerk: Rahmenartige Tragwerke (einschl. Gründungen) aus Stahlbeton			
Eingangsparameter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 0	€ 0	0
Rohtragwerk	€ 108.867	€ 871	70
Ausrüstung	€ 35.920	€ 463	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwerisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparameter:			
Summe reiner Baukosten		€ 144.787	
Summe Abbruchkosten		€ 28.957	
Summe Zusatzkosten		€ 0	
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung		€ 14.479	
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
Endjahr: 2080			
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 0	€ 0	
Rohtragwerk	€ 143.565	€ 2.235.533	
Ausrüstung	€ 75.726	€ 1.179.176	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 219.291	€ 3.414.709	
Unterhaltung	€ 34.337	€ 534.682	
Errichtung/Erneuerung	€ 184.954	€ 2.880.028	

Abbildung 5.6: Eingangsparameter und Ergebnisse – Rahmenbrücke einfeldrig, integral berechnet

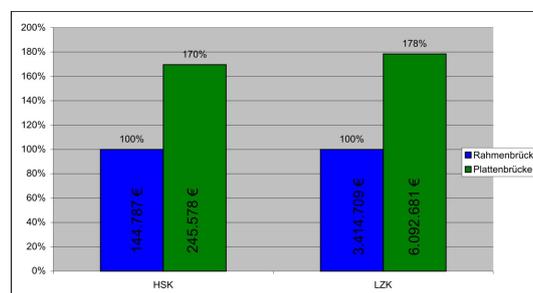


Abbildung 5.7: Rahmen vs. Platte – relativer Unterschied HSK/ LZK

Variante 2 – getrennt nach Über- und Unterbau berechnet

Die integrale Brücke wurde neben der Berechnung als Rahmenbauwerk auch einmal als in Überbau und Unterbau getrenntes Bauwerk berechnet. In Abbil-

dung 5.8 findet sich der Programmauszug aus dem LZKB-Programm mit den Eingangsparametern und Ausgabewerten für die Rahmenbrücke nach Überbau und Unterbau getrennt. Alle übrigen Parameter bleiben gleich wie bei Variante 1. In den Ergebnissen ist ersichtlich, dass Variante 1 mit der vollintegralen Betrachtung als rahmenartiges Bauwerk mit einer Lebenszykluskostensumme von €3.414.709,- um €11.992,- schlechter aussteigt als nach der Berechnung in Variante 2.

Die Ergebnisse resultieren aus den Eingangsparametern, die für ein rahmenartiges Bauwerk aus Stahlbeton standardmäßig eine erwartete Tragwerkslebensdauer von 70 Jahren sowie einen jährlichen Prozentsatz für Instandhaltungskosten von 0,8% vorsehen. Für ein nach Überbau und Unterbau getrenntes Bauwerk sind die Werte für den Überbau mit 70 Jahren Lebensdauer bzw. 0,8% jährlichem Instandhaltungskostenprozentsatz zwar gleich, für den Unterbau wird jedoch eine Lebensdauer von 110 Jahren bei einem jährlichen Prozentsatz für Instandhaltungskosten von nur 0,5% angesetzt (siehe Tabelle 3.1).

Dieses Ergebnis widerspricht allerdings einer grundlegenden Aussage der *RVS 15.01.11 Qualitätskriterien für die Planung von Brücken* [2], Kapitel 4.4.2, (S.35), in der es heißt:

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die beste Fuge mit der besten Übergangskonstruktion weit schlechter ist als ein durchgehender, fugenloser Überbau!

Die Ansatzwerte für Tragwerkslebensdauer und jährliche Instandhaltungskosten in Tabelle 3.1 sollten also hinterfragt werden!

Name der Brücke:			
Rahmenbrücke - einfeldrig			
Beschreibung:			
Einfeldrige Eisenbahnbrücke als Rahmenbauwerk ausgeführt, aber getrennt nach Überbau und Unterbau berechnet; Spannweite ca. 9 m; Fundierung (Fundamentplatte) vernachlässigt!			
Bauliche Anlagen:			
Unterbau: aus Mauerwerk, Beton, Stahlbeton			
Rohtragwerk: Überbau: Tragkonstruktionen (Balken, Platten, Bögen, Kastenquerschnitte) aus Stahlbeton			
Eingangsparameter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 9.976	€ 50	110
Rohtragwerk	€ 98.891	€ 791	70
Ausrüstung	€ 35.920	€ 463	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwerisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparameter:			
Summe reiner Baukosten		€ 144.787	
Summe Abbruchkosten		€ 28.957	
Summe Zusatzkosten		€ 0	
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung		€ 14.479	
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
Endjahr: 2080			
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 12.385	€ 192.860	
Rohtragwerk	€ 130.409	€ 2.030.681	
Ausrüstung	€ 75.726	€ 1.179.176	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 218.520	€ 3.402.717	
Unterhaltung	€ 33.567	€ 522.689	
Errichtung/Erneuerung	€ 184.954	€ 2.880.028	

Abbildung 5.8: Eingangsparameter und Ergebnisse – Rahmenbrücke einfeldrig, getrennt berechnet

5.3 Auswertung und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücken

Die Lebenszykluskostenanalyse der mehrfeldrigen Brücken erfolgte auf Basis von zwei verschiedenen Kostenzusammenstellungen, da für die mehrfeldrigen Brücken neben der eigenen Kalkulation auch Daten von Auftraggeberseite vorhanden waren. In den folgenden Abschnitten erfolgt zuerst eine Analyse nach den eigenen Kalkulationsansätzen und anschließend die Analyse nach den Daten des Auftraggebers. Im Anschluss daran werden die Daten verglichen und die Unterschiede diskutiert.

5.3.1 Auswertungen nach eigener Kalkulation

Semi-integrale Bauweise

Die Eingangsparameter für die semi-integrale Bauweise nach eigener Kalkulation beziehen sich auf die ermittelten Werte in Tabelle 4.14. Betrachtet werden wieder die Herstellkosten ohne Berücksichtigung des Zuschlags für GGK, Wagnis und Gewinn. Im späteren Vergleich mit der Kostenzusammenstellung des Auftraggebers zeigt sich nämlich, dass in absoluten Zahlen betrachtet, die Herstellkosten aus eigener Kalkulation exkl. Zuschlag für GGK, Wagnis und Gewinn näher an den tatsächlichen Errichtungskosten aus der Quelle AG liegen, als der Netto-Herstellpreis.

In Abbildung 5.9 ist der Programmauszug mit den Eingangsparametern und Ergebnissen für die mehrfeldrige Brücke in semi-integraler Bauweise zu sehen. Als Eingangsparameter für den Lebenszyklus wurden die gleichen Ansätze getroffen, wie auch schon für die Analyse der einfeldrigen Brücken: Als Berechnungsmethode dient das Lebenszyklusmodell, der Zinssatz beträgt standardmäßig 4% und die Brücke soll eine fixe Lebensdauer von 70 Jahren haben.

Name der Brücke:			
Brücke mehrfeldrig - semi-integral			
Beschreibung:			
mehrfeldrige Straßenbrücke in semi-integraler Bauweise; Eingangsparemeter für Baukosten aus eigener Kalkulation			
Bauliche Anlagen:			
Unterbau: aus Mauerwerk, Beton, Stahlbeton			
Rohtragwerk: Überbau: Tragkonstruktionen (Balken, Platten, Bögen, Kastenquerschnitte) aus Stahlbeton			
Eingangsparemeter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 267.241	€ 1.336	110
Rohtragwerk	€ 316.942	€ 2.536	70
Ausrüstung	€ 166.501	€ 2.148	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwerisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparemeter:			
Summe reiner Baukosten		€ 750.684	
Summe Abbruchkosten		€ 150.137	
Summe Zusatzkosten		€ 0	
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung		€ 75.068	
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
Endjahr: 2080			
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 331.783	€ 5.166.404	
Rohtragwerk	€ 417.956	€ 6.508.257	
Ausrüstung	€ 351.015	€ 5.465.868	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 1.100.755	€ 17.140.529	
Unterhaltung	€ 154.908	€ 2.412.173	
Errichtung/Erneuerung	€ 945.846	€ 14.728.356	

Abbildung 5.9: Eingangsparemeter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in semi-integraler Bauweise nach eigener Kalkulation

Vollintegrale Bauweise

1. Variante: Berechnung als monolithisches Bauwerk Die Eingabeparemeter für die Baukosten der integralen Brücke beziehen sich auf die anhand der eigenen Kalkulation ermittelten Werte, welche in Tabelle 4.15 zusammengefasst sind. Es wird wieder von den Herstellkosten ausgegangen. Für den Eingabeparemeter *Rohtragwerk* wurde für die integrale Brücke *Rahmenartige Tragwerke aus Stahlbeton* gewählt. Die Kosten für Über- und Unterbau sind hier wieder unter dem Überbegriff *Rohtragwerk* zu einer Zahl zusammengefasst (siehe Abbildung 5.10).

Name der Brücke:			
Brücke mehrfeldrig - integral			
Beschreibung:			
mehrfeldrige Straßenbrücke in vollintegraler Bauweise, als monolithisches Rahmenbauwerk berechnet; Eingangsparameter für Baukosten aus eigener Kalkulation			
Bauliche Anlagen:			
Rohtragwerk: Rahmenartige Tragwerke (einschl. Gründungen) aus Stahlbeton			
Eingangsparameter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 0	€ 0	0
Rohtragwerk	€ 675.219	€ 5.402	70
Ausrüstung	€ 112.226	€ 1.448	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwernisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparameter:			
Summe reiner Baukosten			€ 787.445
Summe Abbruchkosten			€ 157.489
Summe Zusatzkosten			€ 0
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung			€ 78.745
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
		Endjahr: 2080	
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 0	€ 0	
Rohtragwerk	€ 890.422	€ 13.865.309	
Ausrüstung	€ 236.593	€ 3.684.137	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 1.127.015	€ 17.549.446	
Unterhaltung	€ 176.264	€ 2.744.715	
Errichtung/Erneuerung	€ 950.751	€ 14.804.731	

Abbildung 5.10: Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in integraler Bauweise nach eigener Kalkulation

2.Variante: Berechnung getrennt nach Über- und Unterbau In Abbildung 5.11 sind die Eingabeparameter und Ergebnisse einer weiteren LZK-Berechnung zusammengefasst. In dieser wurden für die Baukosten die gleichen Werte wie zuvor bei der Berechnung als monolithisches Bauwerk 5.3.1 angesetzt, der Überbau wurde jedoch vom Unterbau getrennt und als Plattenkonstruktion ausgewiesen. Als Ergebnis erhält man dadurch eine um fast €400.000,- geringere Endwertsumme, obwohl im allgemeinen Expertentenor Übereinstimmung herrscht, dass jedes fugenlose Bauwerk grundsätzlich erhaltungstechnisch günstiger einzustufen ist, was auch in der Praxis belegt ist.

Die besseren Ergebnisse für das *programmmäßig getrennte* Bauwerk kommen dadurch zustande, dass bei einer Trennung in Überbau und Unterbau der Unterbau eine um 40 Jahre längere Lebensdauer besitzt (nämlich 110 Jahre)

und auch die standardmäßig im Programm voreingestellten jährlichen Instandhaltungskosten geringer ausfallen (nur 0,5% p.a. im Vergleich zu 0,8% p.a. für ein rahmenartiges Tragwerk, siehe Tabelle 3.1).

Name der Brücke:			
Brücke mehrfeldrig - integral			
Beschreibung:			
mehrfeldrige Straßenbrücke in vollintegraler Bauweise, jedoch nach Ober- und Unterbau getrennt berechnet; Eingangsparameter für Baukosten aus eigener Kalkulation			
Bauliche Anlagen:			
Unterbau: aus Mauerwerk, Beton, Stahlbeton			
Rohtragwerk: Überbau: Tragkonstruktionen (Balken, Platten, Bögen, Kastenquerschnitte) aus Stahlbeton			
Eingangsparameter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 322.274	€ 1.611	110
Rohtragwerk	€ 352.945	€ 2.824	70
Ausrüstung	€ 112.226	€ 1.448	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwerisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparameter:			
Summe reiner Baukosten		€ 787.445	
Summe Abbruchkosten		€ 157.489	
Summe Zusatzkosten		€ 0	
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung		€ 78.745	
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
Endjahr: 2080			
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 400.108	€ 6.230.323	
Rohtragwerk	€ 465.434	€ 7.247.562	
Ausrüstung	€ 236.593	€ 3.684.137	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 1.102.135	€ 17.162.022	
Unterhaltung	€ 151.384	€ 2.357.291	
Errichtung/Erneuerung	€ 950.751	€ 14.804.731	

Abbildung 5.11: Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in integraler Bauweise nach eigener Kalkulation, jedoch getrennt nach Ü+U gerechnet

3.Variante: Berechnung als monolithisches Bauwerk – Instandhaltungskosten abgemindert Unter der Annahme der gleich sorgfältigen Ausführung beider Tragwerke sollte es nach Meinung des Verfassers zu keiner höheren jährlichen Instandhaltungskosten summe des rahmenartigen Bauwerks kommen.

Um die integrale Brücke – als monolithisches Bauwerk berechnet – mit der semi-integralen Brücke unter der Voraussetzung gleicher jährlicher Instandhaltungskosten vergleichen zu können, wurde eine weitere Berechnung durchgeführt.

Um den Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten für das Rohtragwerk auf den Wert des vom Tragwerk getrennten Unterbaus zu bringen, wurde im LZKB-Programm die Auf- und Abminderungsfunktion aktiviert und ein neuer Faktor *geringere jährliche Unterhaltskosten - Rahmen* für den Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten k_p generiert. Um den Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten für den Rahmen auf die Werte des nach Über- und Unterbau getrennten Tragwerks zu bringen, müsste ein Mittelwert zwischen 0,5% (für den Unterbau-getrennt) und 0,8% (für den Überbau-getrennt) gewählt werden.

Beruhend auf der zitierten Aussage aus *RVS 15.01.11 Qualitätskriterien für die Planung von Brücken 4.2* [2], Kapitel 4.4.2, (S.35), in Abschnitt 5.2.2 und beruhend auf der Tatsache, dass ein rahmenartiges Bauwerk monolithisch zu betrachten ist, wurde vom Verfasser jedoch der Wert 0,5% für das Gesamttragwerk gewählt.

Um einen neuen Instandhaltungsprozentsatz von $k_p = 0,5$ zu erhalten, wurde der ursprüngliche Instandhaltungsprozentsatz $k_p = 0,8\%$ mit einem gewählten Abminderungsfaktor von 0,625 multipliziert (siehe Abbildung 5.12).

Als Ergebnis steigt die integrale Brücke nun mit einer Lebenszykluskostensumme von €16.726.903,- um €413.626,- besser aus als die semi-integrale Variante mit einer Summe von €17.140.529,-.

Name der Brücke:			
Brücke mehrfeldrig - integral			
Beschreibung:			
mehrfeldrige Straßenbrücke in vollintegraler Bauweise, als monolithisches Rahmenbauwerk berechnet; Abminderungsfaktoren aktiviert, um die jährlichen Unterhaltskosten auf 0,5 % zu reduzieren; Eingangsparameter für Baukosten aus eigener Kalkulation			
Bauliche Anlagen:			
Rohtragwerk: Rahmenartige Tragwerke (einschl. Gründungen) aus Stahlbeton			
Eingangsparameter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 0	€ 0	0
Rohtragwerk	€ 675.219	€ 3.349	70
Ausrüstung	€ 112.226	€ 1.448	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwerisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparameter:			
Summe reiner Baukosten		€ 787.445	
Summe Abbruchkosten		€ 157.489	
Summe Zusatzkosten		€ 0	
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung		€ 78.745	
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
Endjahr: 2080			
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 0	€ 0	
Rohtragwerk	€ 837.599	€ 13.042.766	
Ausrüstung	€ 236.593	€ 3.684.137	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 1.074.192	€ 16.726.903	
Unterhaltung	€ 123.441	€ 1.922.172	
Errichtung/Erneuerung	€ 950.751	€ 14.804.731	
Faktoren:	A	B	C
geringere jährliche Unterhaltskosten - Rahmen	X	X	
			lin.V.
			km
			kp
			1,00
			0,62

Abbildung 5.12: Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in integraler Bauweise nach eigener Kalkulation, abgemindert

Vergleich der Varianten

Im Diagramm in Abbildung 5.13 sind verschiedene Kostenvergleiche zwischen der semi-integralen und der integralen Bauweise dargestellt. Es wird immer ein relativer Vergleich angestellt, als 100%-Basis wurde die semi-integrale Brücke herangezogen. Im ersten Vergleich werden rein die Herstellkosten verglichen. Wie schon in Abschnitt 4.2.4 dargestellt, ist die integrale Brücke in der Errichtung um 4,9% teurer.

In den folgenden drei Balkenpaaren werden jeweils die in diesem Abschnitt

berechneten Lebenszykluskosten verglichen. Der grüne Balken stellt dabei immer die semi-integrale Variante dar, die blauen Balken stellen die drei simulierten Varianten der integralen Bauweise dar.

Im zweiten Vergleich wird die semi-integrale Bauweise der integralen Bauweise nach den oben beschriebenen Standardeingabeparametern gegenübergestellt. Die Differenz in den Kosten nach 70 Jahren Lebensdauer ist zwar mit 2,4% nicht mehr so groß wie bei Betrachtung der reinen Herstellkosten, die konventionell gelagerte Brücke steigt trotzdem noch günstiger als die integrale Variante aus. Grund dafür ist der in diesem Abschnitt schon erwähnte Unterschied in den Werten für die jährlichen Instandhaltungskosten und die erwartete Lebensdauer.

Der dritte blaue Balken stellt die Variante mit den Baukosten für die monolithische Brücke, jedoch getrennt nach Überbau und Unterbau berechnet, dar. Die Eingangsparameter in diesem Vergleich sind nur eine Annäherung, er sollte lediglich als Parameterstudie dienen, und aufzeigen, dass manche Werte aus Tabelle 3.1 in Frage zu stellen sind.

Die vierte Variante stellt eine Abwandlung der zweiten Variante dar. Die integrale Brücke wurde als monolithisches Bauwerk aus Überbau und Unterbau ins Programm eingegeben, die Aufwandswerte für die jährlichen Instandhaltungskosten wurden jedoch mithilfe der Aktivierung eines Abminderungsfaktors auf die gleichen prozentuellen Werte wie für den Unterbau der semi-integrale Bauweise reduziert (siehe auch Absatz 5.3.2 in diesem Abschnitt). Als Ergebnis dieser Variantenstudie kostet die integrale Brücke – über einen Lebenszyklus von 70 Jahren bei einer fixen jährlichen Verzinsung von 4% betrachtet – um 2,4% bzw. in absoluten Zahlen € 13.626,- weniger als die semi-integrale Bauweise.

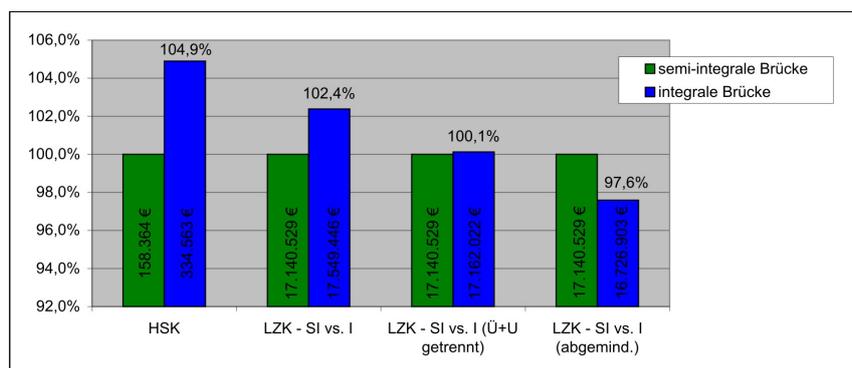


Abbildung 5.13: relativer Kostenvergleich semi-integrale Brücke – integrale Brücke

5.3.2 Auswertungen nach Quelle AG

Für die erhaltenen Werte der Baukosten aus der Quelle – Auftraggeber wurde ebenfalls eine Reihe von Lebenszykluskosten-Auswertungen gemacht. Die Eingangsparameter der durchgespielten Varianten in Bezug auf Lebensdauer, Berechnungsmethode und Verzinsung sind ident mit jenen in Abschnitt 5.3.1, lediglich die einzusetzenden Zahlenwerte für die Baukosten der einzelnen Brückenbestandteile wurden geändert.

In den folgenden Unterabschnitten sind die Eingabewerte und Ergebnisse der fünf Varianten zusammengefasst. Die Eingabewerte für die Baukosten beziehen sich dabei auf die zusammengestellten Errichtungskosten in Tabelle 4.12 und Tabelle 4.13.

Semi-integrale Bauweise

Name der Brücke:			
Brücke mehrfeldrig - semi-integral			
Beschreibung:			
mehrfeldrige Straßenbrücke in semi-integraler Bauweise; Eingangsparemeter für Baukosten aus Quelle AG			
Bauliche Anlagen:			
Unterbau: aus Mauerwerk, Beton, Stahlbeton			
Rohtragwerk: Überbau: Tragkonstruktionen (Balken, Platten, Bögen, Kastenquerschnitte) aus Stahlbeton			
Eingangsparemeter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 313.699	€ 1.568	110
Rohtragwerk	€ 159.891	€ 1.279	70
Ausrüstung	€ 179.227	€ 2.312	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwernisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparemeter:			
Summe reiner Baukosten		€ 652.817	
Summe Abbruchkosten		€ 130.563	
Summe Zusatzkosten		€ 0	
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung		€ 65.282	
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
Endjahr: 2080			
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 389.462	€ 6.064.548	
Rohtragwerk	€ 210.851	€ 3.283.288	
Ausrüstung	€ 377.844	€ 5.883.635	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 978.156	€ 15.231.470	
Unterhaltung	€ 132.778	€ 2.067.573	
Errichtung/Erneuerung	€ 845.378	€ 13.163.897	

Abbildung 5.14: Eingangsparemeter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in semi-integraler Bauweise nach Quelle AG

Vollintegrale Bauweise

1.Variante: Berechnung als monolithisches Bauwerk

Name der Brücke:			
Brücke mehrfeldrig - integral			
Beschreibung:			
mehrfeldrige Straßenbrücke in vollintegraler Bauweise, als monolithisches Rahmenbauwerk berechnet; Eingangsparemeter für Baukosten aus Quelle AG			
Bauliche Anlagen:			
Rohtragwerk: Rahmenartige Tragwerke (einschl. Gründungen) aus Stahlbeton			
Eingangsparemeter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 0	€ 0	0
Rohtragwerk	€ 588.328	€ 4.707	70
Ausrüstung	€ 169.858	€ 2.191	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwernisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparemeter:			
Summe reiner Baukosten			€ 758.186
Summe Abbruchkosten			€ 151.637
Summe Zusatzkosten			€ 0
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung			€ 75.819
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
Endjahr: 2080			
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 0	€ 0	
Rohtragwerk	€ 775.837	€ 12.081.043	
Ausrüstung	€ 358.092	€ 5.576.071	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 1.133.929	€ 17.657.114	
Unterhaltung	€ 177.508	€ 2.764.080	
Errichtung/Erneuerung	€ 956.422	€ 14.893.034	

Abbildung 5.15: Eingangsparemeter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in integraler Bauweise nach Quelle AG

2. Variante: Berechnung getrennt nach Über- und Unterbau

Name der Brücke:			
Brücke mehrfeldrig - integral			
Beschreibung:			
mehrfeldrige Straßenbrücke in vollintegraler Bauweise, jedoch nach Über- und Unterbau getrennt berechnet; Eingangsparemeter für Baukosten aus Quelle AG			
Bauliche Anlagen:			
Unterbau: aus Mauerwerk, Beton, Stahlbeton			
Rohtragwerk: Überbau: Tragkonstruktionen (Balken, Platten, Bögen, Kastenquerschnitte) aus Stahlbeton			
Eingangsparemeter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 273.478	€ 1.367	110
Rohtragwerk	€ 314.850	€ 2.519	70
Ausrüstung	€ 169.858	€ 2.191	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwernisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparemeter:			
Summe reiner Baukosten		€ 758.186	
Summe Abbruchkosten		€ 151.637	
Summe Zusatzkosten		€ 0	
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung		€ 75.819	
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
Endjahr: 2080			
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 339.527	€ 5.286.980	
Rohtragwerk	€ 415.198	€ 6.465.299	
Ausrüstung	€ 358.092	€ 5.576.071	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 1.112.816	€ 17.328.350	
Unterhaltung	€ 156.395	€ 2.435.316	
Errichtung/Erneuerung	€ 956.422	€ 14.893.034	

Abbildung 5.16: Eingangsparemeter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in integraler Bauweise nach Quelle AG, jedoch getrennt nach Ü+U gerechnet

3.Variante: Berechnung als monolithisches Bauwerk – Instandhaltungskosten abgemindert

Name der Brücke:			
Brücke mehrfeldrig - integral			
Beschreibung:			
mehrfeldrige Straßenbrücke in vollintegraler Bauweise, als monolithisches Rahmenbauwerk berechnet; Abminderungsfaktoren aktiviert, um die jährlichen Unterhaltskosten auf 0,5 % zu reduzieren; Eingangsparemeter für Baukosten aus Quelle AG			
Bauliche Anlagen:			
Rohtragwerk: Rahmenartige Tragwerke (einschl. Gründungen) aus Stahlbeton			
Eingangsparemeter:	Baukosten	jährl.U.	m[p]
Unterbau	€ 0	€ 0	0
Rohtragwerk	€ 588.328	€ 2.918	70
Ausrüstung	€ 169.858	€ 2.191	-
Behelfszustände	€ 0	-	-
Betriebserschwerisse	€ 0	-	-
Kosten Dritter	€ 0	-	-
Berechnungsparemeter:			
Summe reiner Baukosten		€ 758.186	
Summe Abbruchkosten		€ 151.637	
Summe Zusatzkosten		€ 0	
Summe Verwaltungskosten Errichtung/Erneuerung		€ 75.819	
Zinssatz: 4,00%			
Berechnungsmethode: Lebenszyklusmodell			
Errichtungsjahr: 2010		Betrachtungsjahr: 2010	
Endjahr: 2080			
Betrachtungsjahr	2010	2080	
Unterbau	€ 0	€ 0	
Rohtragwerk	€ 729.812	€ 11.364.349	
Ausrüstung	€ 358.092	€ 5.576.071	
Zusatzkosten	€ 0	€ 0	
Summe	€ 1.087.904	€ 16.940.420	
Unterhaltung	€ 131.482	€ 2.047.386	
Errichtung/Erneuerung	€ 956.422	€ 14.893.034	
Faktoren:	A	B	C
geringere jährliche Unterhaltskosten - Rahmen	X	X	
	lin.V.	km	kp
		1,00	0,62

Abbildung 5.17: Eingangsparemeter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in integraler Bauweise nach Quelle AG, abgemindert

Vergleich der Varianten nach Quelle AG

Im Diagramm in Abbildung 5.18 finden sich wie schon zuvor die Vergleiche der einzelnen Variantenstudien. Die integrale Brücke verbessert sich zwar im Zuge der Parameterstudien von 16,1% Mehrkosten in der Errichtung auf 11,2% Mehrkosten über den Lebenszyklus von 70 Jahren betrachtet, kommt jedoch trotzdem bei weitem nicht an die semi-integrale Bauweise heran.

Vor allem das Zustandekommen der ungewöhnlich hohen Kosten für die Ausrüstung der integralen Brücke wirft Fragen auf. Sie machen einen außergewöhnlich hohen Prozentanteil von 22% der Errichtungskosten aus und sind im Vergleich zur semi-integralen Brücke nur um rund €10.000,- oder 6% geringer, obwohl dies üblicherweise die große Stärke der integralen Bauweise sein sollte.

Trotz der in Kapitel 4 vorgenommenen Normierungen der Zahlen des Auftraggebers, um diese auf ein annähernd vergleichbares Preisniveau zu bringen, bleiben noch viele Fragen offen, wie die Baupreise zustande gekommen sind, da diese immer der jeweiligen Marktsituation und noch vielen anderen Faktoren strategischer und sonstiger Natur zugrunde gelegt sind.

Es darf also in den Raum gestellt werden, dass die marktbereinigte Betrachtung mit einheitlichen Kalkulationsansätzen ein repräsentativeres Ergebnis darstellt.

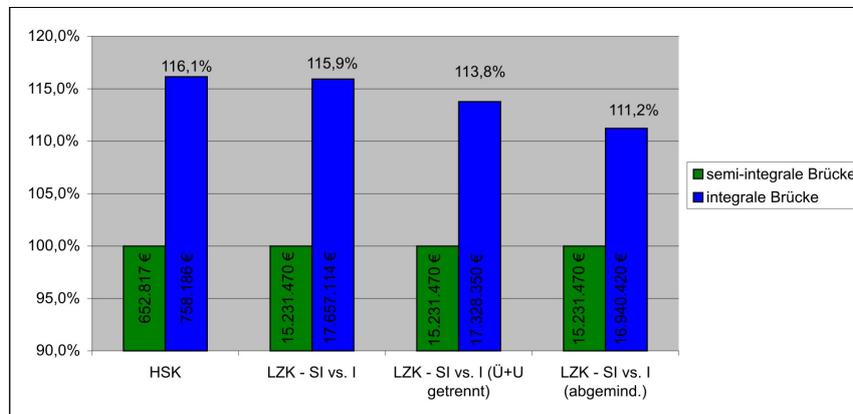


Abbildung 5.18: relativer Kostenvergleich semi-integrale Brücke – integrale Brücke aus Quelle AG

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurde ersichtlich, dass die integrale Bauweise – sinnvoll angewandt – durchaus eine wirtschaftliche Alternative zur herkömmlichen Bauweise darstellt. In einem monolithischen Bauwerk kommt es zu zusätzlichen Belastungen, da die freie Verformung des Tragwerks durch die vielfache statische Unbestimmtheit des Tragwerks behindert wird.

Vor allem Temperaturschwankungen des Tragwerks führen durch die behinderte Verformungsfähigkeit und Ausdehnbarkeit des Querschnitts zur Entstehung enormer Zwangsschnittgrößen. Bis zu einer gewissen Länge können diese Zwangsschnittgrößen mehr oder weniger problemlos und wirtschaftlich vertretbar aufgenommen werden. Eine *sinnvolle Anwendung* der integralen Bauweise ist daher unter normalen Umständen vor allem im niederen bis mittleren Spannweitenbereich (rund 10–60 m) möglich.

Gedankenexperiment In Österreich existieren rund 27.500 Straßenbrücken¹ im Netz der Autobahnen und Schnellstraßen, Bundesstraßen, sowie Landes- und Gemeindestraßen. Im Schienennetz der ÖBB befinden sich weitere 9.500 Brücken². Den Großteil dieser rund 37.000 Objekte machen mittlere, kleine und sehr kleine Brücken, also Brücken im oben definierten *sinnvollen Anwendungsbereich* integraler Brücken aus.

Die durchschnittliche Länge dieser Objekte liegt größenordnungsmäßig bei 10–15 m. Bei einer durchschnittlichen Brückenlebensdauer von 70 Jahren würde jedes dieser Objekte grob abgeschätzt rund €10 Mio. an Lebenszykluskosten verursachen.

¹laut Vortrag DI Neuburg, MA 29, im Rahmen der Brückentagung 2009 in Wien

²nach Auskunft ÖBB Infrastruktur Betrieb AG

Für die Straßenbrücken wird angenommen, dass eine Anwendung der integralen Bauweise in 75% der Fälle möglich wäre. Bei durchschnittlichen Lebenszykluskosten von €10 Mio. für 75% der 27.500 Brücken wäre dies ein Bestandsanlagevolumen von etwas mehr als €206 Mrd.

Da ein Großteil der Eisenbahnbrücken im Sanierungsfall unter laufendem Betrieb errichtet werden muss, was bei der integralen Bauweise oft auf baubetriebliche Probleme stößt, ist die Rahmenbauweise im Bahnbrückenbau nur bedingt anwendbar. Sie wird vor allem bei Neubaustrecken angewandt. Unter der Annahme, dass für 40% der 9.500 Bahnbrücken eine integrale Errichtung möglich wäre, ergibt sich bei durchschnittlichen Lebenszykluskosten von €10 Mio. pro Brücke ein Gesamtanlagevolumen von rund €38 Mrd.

In Summe käme man – Straßenbrücken und Bahnbrücken gemeinsam betrachtet – auf eine Lebenszykluskostensumme von rund €244 Mrd. Unter der Voraussetzung der Gültigkeit der oben getroffenen Annahmen würde bereits eine geringe Lebenszykluskostenersparnis von 2% pro Brücke jährliche Einsparungsbeträge im mehrstelligen Millionenbereich bringen. Die integrale Bauweise kann jedoch auch unter obigen Bedingungen nicht als Allzwecklösung erachtet werden. Oftmals spielen örtliche Gegebenheiten und sonstige Rahmenbedingungen eine wesentliche Rolle, die die Ausführung einer integralen Lösung als bautechnisch nicht sinnvoll erscheinen lassen.

Weiters sollte an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei um ein reines Gedankenexperiment handelt. Keinesfalls können diese Zahlen als Basis für ein realistisches Infrastruktur-Einsparungsmodell hergenommen werden, müsste doch der gesamte österreichische Brückenbestand, für den nach obigen Annahmen die integrale Bauweise in Frage käme, mit sofortiger Wirkung ausgewechselt werden, um die zuvor erwähnten Einsparungen im mehrstelligen Millionenbereich zu lukrieren. Dies ist erstens baubetrieblich nicht möglich und wäre zweitens bauwirtschaftlich betrachtet auch nicht sinnvoll, da natürlich in der vorhandenen Bausubstanz sehr viele gut erhaltene Tragwerke zu finden sind, welche vorzeitig abzureißen auch wieder Mehrkosten verursachen würde!

6.1 Resümee LZKB-Programm und Faktoren

Zur Software, die zur Auswertung der Brücken verwendet wurde, dem LZKB-Programm, ist zu sagen, dass es durchaus ein probates Mittel sowohl für Auftraggeber als auch Auftragnehmer darstellt, um die Lebenszykluskosten verschiedener Brückenkonstruktionstypen abzuschätzen. Die Software ist einfach zu handhaben und basiert auf einigen wenigen grundlegenden Eingabeparametern.

Aufgrund des jungen Alters der Software hat diese natürlich noch einiges an Verbesserungspotential. Neben einigen Dingen, die das Programm anwender-

freundlicher machen würden, sollte jedenfalls Tabelle 3.1 zumindest teilweise hinterfragt werden. Auf dieser Tabelle beruhen die vom Programm standardmäßig angenommenen Werte für die Lebensdauern der Bauteile und deren jährlicher Instandhaltungskosten, die jedoch nicht immer plausibel sind, wie in Kapitel 5 gezeigt werden konnte.

6.2 Potential einfeldriger Tragwerke

Bei einem einfeldrigen Tragwerk, als Rahmen mit rund 10 m Spannweite ausgebildet, ist das Potential der integralen Brücke am größten. Sie kann hier nahezu alle ihre Vorteile ausspielen. Die bei weitem höhere Tragwirkung eines Rahmens im Vergleich zur Platte gleicher Dimension ist unbestritten und hinlänglich bekannt. Das Bauwerk ist weiters einfach zu schalen und schnell herzustellen, wartungsarm und sehr resistent gegenüber jeglichen Witterungseinflüssen.

Auf der eigenen Kalkulation beruhend ist die Plattenbauweise schon in der Errichtung um 70% teurer als die Ausführung als Rahmenbauwerk! Betrachtet man die Brücken über den Lebenszyklus, so baut die Rahmenvariante ihren Vorsprung sogar noch um 8% aus, da die Kosten, die aus dem Lagertausch entstehen, eingespart werden können (siehe Abbildung 5.7).

Leider konnten zu den beiden einfeldrigen Brücken von Auftraggeberseite her keine Zahlen mehr erhoben werden, inwiefern die Kalkulation basierend auf eigenen Ansätzen von den realen Errichtungskosten abweicht, ist daher nicht zu sagen.

Als einziger Nachteil der Rahmenbauweise kann der Umstand angesehen werden, dass im Sanierungsfall die gesamte Brücke für den Verkehr gesperrt werden muss und das gesamte Tragwerk als Ganzes abgetragen werden muss. Ein Tragwerksaustausch nur eines Gleises unter Betrieb wie bei der getrennten Bauweise mit zwei getrennten Platten ist daher nicht möglich. Da die Bahnstrecke in diesem konkreten Fall jedoch ohnehin 4-gleisig ausgebaut ist, ist dies in diesem Fall kein Problem, da für je zwei Gleise ein eigenes Tragwerk existiert. Auf einer zweigleisigen Strecke könnte man alternativ zwei durch eine Fuge in Gleisachse getrennte Rahmen bauen.

6.3 Potential mehrfeldriger Tragwerke

Bei zwei- und dreifeldrigen Tragwerken kann die integrale Bauweise ebenfalls noch fast all ihre Stärken ausspielen. Da vor allem die Randfelder durch die Einspannung ins Widerlager profitieren, wie in Abschnitt 4.2.3 gezeigt wurde, hat speziell das zweifeldrige Tragwerk noch große Vorteile. Bei der Analyse der dreifeldrigen Brücken in Abschnitt 4.2 wird ersichtlich, dass die Zwangsschnittkräfte aus Temperatur teilweise schon beachtlich werden. Dies führt zu

Mehrkosten in der Herstellung, da diese Kräfte durch erhöhte Bewehrung und massivere Bauteilausbildung aufgenommen werden müssen. Diese Mehrkosten in der Errichtungsphase amortisieren sich jedoch über den Lebenszyklus, wie in Kapitel 5 gezeigt werden konnte. Nach den Daten des Auftraggebers amortisiert sich die integrale Brücke über den Lebenszyklus leider nicht, was in den geringen Unterschieden der Ausrüstungskosten begründet liegt. Warum die Ausrüstungskosten der integralen Brücke trotz Wegfalls von Lagern und Fahrbahnübergängen nur um rund € 10.000 weniger ausmachen, muss hinterfragt werden. Als mögliche Gründe hierfür können wieder marktabhängige Faktoren wie spekulative Absichten des Auftragnehmers und Baupreisschwankungen genannt werden.

6.4 Potential längerer Tragwerke

Für die Ausführung längerer Tragwerke ist die integrale Bauweise nur mehr bedingt geeignet, wie die Ergebnisse der statischen Parameterstudie an einer 140 m langen Talbrücke in Abschnitt 2.4.2 erahnen lassen. Durch die vollkommene Verformungsbehinderung entstehen bei einer Brückengesamtlänge ab 90 – 100 m derart hohe Kräfte in den Randfeldern und an den Widerlagern, die technisch kaum mehr abzutragen sind, und wenn man es dennoch versuchen würde, die Brücke in hohem Maße unwirtschaftlich machen würde.

Was jedoch eine brauchbare und wirtschaftliche Alternative zum reinen Durchlaufträger darstellt, ist die semi-integrale Variante mit zumindest teilweiser Einspannung der Pfeiler. Vor allem die höheren Pfeiler im Mittelbereich einer Talbrücke können die entstehenden Zwangskräfte aus der Einspannung ins Tragwerk aufgrund ihrer größeren Biegeweichheit im Vergleich zu den niedrigeren Pfeilern noch fast problemlos aufnehmen und abtragen. Die stärker belasteten Randpfeiler können dann entweder durch Lager vom Überbau getrennt werden oder sie werden durch geschickte Konstruktionsweise etwas weicher ausgeführt, wodurch nicht so hohe Schnittkräfte angezogen werden. Eine Brücke, welche im Zuge der Umfahrung Klosterneuburg errichtet wurde, stellt ein aktuelles Beispiel dieser Variante dar (siehe Abbildung 6.1).

Wie am Beispiel der Sunnibergbrücke in Abschnitt 2.6 gezeigt werden konnte, sind durch Ausnutzung gewisser Randbedingungen und Geländegegebenheiten jedoch auch weitaus längere Bauwerke in integraler Bauweise möglich. Der Kreativität des planenden Ingenieurs für Sonderlösungen und innovative Konstruktionsformen sei hier keine Grenze gesetzt.



Abbildung 6.1: Brücke – Umfahrung Klosterneuburg, mittlere Pfeiler eingespannt, Randpfeiler und Widerlager durch Lager vom Überbau getrennt

Die integrale Brückenbauweise kann abschließend jedenfalls als äußerst zukunfts-trächtige, wirtschaftliche und wartungsarme Alternative zum herkömmlichen Brückenbau des kurzen und mittleren Spannweitensegments betrachtet werden, die durch ihre Charakteristika den entwerfenden Kräften eine Vielzahl an gestalterischen Möglichkeiten bietet.

Literaturverzeichnis

- [1] *EN 1991-2-2003 – Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.*
- [2] *RVS 15.01.11 – Qualitätskriterien für die Planung von Brücken.*
- [3] *Großhandelspreisindex der Statistik Austria für Dezember 2009*, Dezember 2009.
- [4] <http://img.fotocommunity.com/photos/3372019>, 13.März 2010.
- [5] <http://static.panoramio.com/photos/original/10511537>, 13.März 2010.
- [6] <http://www.pul-ingenieure.de/html/deu/referenz/bruecken/la-ferte-steg.htm>, 10.April 2010.
- [7] A. KROPIK: *Skriptum zur Vorlesung “Kalkulation und Kostenrechnung“*. Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, TU Wien, 2008.
- [8] D. DEJMEK: *Programmentwicklung für die Berechnung von Lebenszykluskosten von Brücken*. TU Wien, 2008.
- [9] E. ROMAN, Y. KHODAIR, S. HASSIOTIS: *Design details of integral bridges. 15th Engineering Mechanics Division Conference of the American Society of Civil Engineers*, Columbia University, New York, 2.-5. Juni 2002.
- [10] FCP ZIVILTECHNIKER GMBH: *ÖBB-Forschungsprojekt – Integrale Eisenbahnbrücken – Untersuchung zu den Anwendungsgrenzen integraler Eisenbahnbrücken bei unbewehrter und bewehrter Widerlagerhinterfüllung*. FCP, 2010.
- [11] G. SEICHT: *Investition und Finanzierung*. Industrieverlag Peter Linde Ges.m.b.H. Wien, 1990.
- [12] H.G. JODL, A. JURECKA: *Lebenskosten – Modell Brücke. Vortrag im Rahmen der Brückentagung in Wien*, 2007.
- [13] H.G. JODL, A. JURECKA, C. SCHRANZ, D. DEJMEK: *Forschungsvorhaben Programmentwicklung Lebenszykluskosten von Brücken*. Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, TU Wien, 2009.

-
- [14] L. SEEHAUSER: *Integrale Brücken – Anwendungsbeispiele und Berechnungshinweise*. TU Graz, 2009.
- [15] M. WICKE, P. KIRSCH, W. STRANINGER, B. SCHARITZER: *Kostenmodell für den Funktionserhalt von Straßenbrücken*. Bauingenieur, Vol. 76:86–91, 2000.
- [16] M.P. BURKE: *Steel Bridges Summer/Fall 1993*, Sommer/Herbst 1993.
- [17] R. SCHACH, J. OTTO, H. HÄUPL, M. FRITSCHKE: *Lebenskosten von Brückenbauwerken*. Bauingenieur, Vol. 81:343–350, Juli/August 2006.
- [18] S. ENGELSMANN: *Integrale Betonbrücken – Entwerfen und Bemessen von Brücken ohne Lager und Dehnfugen*. Fakultät für Bauingenieurwesen der Universität Stuttgart, 1998.
- [19] ÖSTERREICHISCHE BUNDESBAHNEN: *Richtlinie zur Berechnung der Erhaltungskosten und Ablösungsbeträge von Ingenieurbauwerken, Straßen und Wegen*. ÖBB, 2006.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aquädukt von Segovia [4], [5]	5
2.2	Brücke aus aneinander gereihten Einfeld-Trägern, Fugen und Lager in großer Zahl vorhanden	5
2.3	Überbau fugenlos durchlaufend, Unterbau durch Fugen und Lager davon getrennt	6
2.4	Semi-integrale Bauweise – Pfeiler monolithisch mit Oberbau verbunden, Lager und Fahrbahnübergänge an Überbauenden noch vorhanden	6
2.5	Vollintegrale Brücke ohne Lager und Dehnfugen	6
2.6	Konventionelle Bauweise – Statisches System und Einwirkungen	8
2.7	Integrale Bauweise – Statisches System und Einwirkungen . . .	8
2.8	Momentenverläufe und Auflagerkräfte aus Belastung, Pfeilerhöhe $h = \text{const}$	10
2.9	Momentenverläufe und Auflagerkräfte aus Belastung, Pfeilerhöhe $h = \text{veränderlich}$	11
2.10	Momentenverläufe aus Temperaturbeanspruchung	12
2.11	Durchbiegungen aus Belastung	13
2.12	Tragwerksverschiebungen aus Temperaturbeanspruchung	14
2.13	Normalkraft aus Temperaturbeanspruchung	15
2.14	Abhebende Lagerkräfte bei zu großen Spannweitenverhältnissen Endfeld / Innenfeld	18
2.15	Vollintegrale Brücke – geringere Verformungen, kein Abheben an Lagern, größere Spannweitenverhältnisse möglich!	19
2.16	Hohe Spannungskonzentration bei konventioneller Brücke	19
2.17	Gleichförmiger Spannungsverlauf bei integraler Brücke	20
2.18	Sunnibergbrücke - Längsschnitt und geologische Verhältnisse [14]	22
2.19	Luftaufnahme der Sunnibergbrücke [14]	23

2.20	Sunnibergbrücke – Pylonaufweitung [14]	23
2.21	Grundriss, Ansicht und Schnitt des La-Ferté-Stegs [14]	24
2.22	links: monolithische Einbindung ins Widerlager, rechts: Stahlstütze als Pendelstab ausgeführt [6]	24
3.1	Lebenszyklusphasen eines Bauwerks (vgl. [17], S.345)	27
3.2	Kostenentstehung über den Lebenszyklus einer Brücke	27
4.1	Ansicht der Brücke <i>km 133</i> (Plattenbrücke)	35
4.2	Längsschnitt durch die Kumpfmühlbachbrücke (Rahmenbrücke)	36
4.3	Draufsicht – Plattenbrücke	38
4.4	Überbau-Querschnitt – Plattenbrücke	38
4.5	Bohrpfähle und Bestand – Plattenbrücke	39
4.6	Längsschnitt – Plattenbrücke	39
4.7	Grundriss – Rahmenbrücke	40
4.8	Querschnitt – Rahmenbrücke	40
4.9	Brücke einfeldrig – System und Belastung	42
4.10	Brücke einfeldrig – Momente und Auflagerkräfte aus Belastung .	43
4.11	Brücke einfeldrig – Momente und Auflagerkräfte aus Temperaturbeanspruchung	43
4.12	Brücke einfeldrig – Normalkräfte aus Belastung und Temperaturbeanspruchung	44
4.13	Brücke einfeldrig – Durchbiegungen aus Belastung und Verschiebungen aus Temperaturdehnung	45
4.14	Anteile der LG – getrennt nach Brückenbestandteil	53
4.15	Ansicht – Semi-integrale Brücke	56
4.16	Übersichtsplan	56
4.17	Längsschnitt	56
4.18	Querschnitt	57
4.19	Ansicht – Integrale Brücke	58
4.20	Übersichtsplan	58
4.21	Längsschnitt	59
4.22	Querschnitt	59
4.23	Mehrfeldrige Brücke – System und Belastung	61
4.24	Momente und Auflagerkräfte aus Belastung	62

4.25	Momente und Auflagerkräfte aus Temperaturbeanspruchung . . .	63
4.26	Normalkraftbeanspruchung – Semi-integrales Tragwerk	64
4.27	Normalkraftbeanspruchung – Integrales Tragwerk	65
4.28	Durchbiegungen und Verschiebungen	66
4.29	Anteile der einzelnen LV-Positionen am Herstellpreis	72
4.30	Regelquerschnitt der semi-integralen Bauweise	73
4.31	Regelquerschnitt der integralen Brücke	73
4.32	Pfeiler – semi-integral (Rundstütze $d = 150$ cm))	75
4.33	Pfeiler – integral (Scheibe, $d = 80$ cm)	76
4.34	Vergleich - Kalkulierte Kosten - Kosten nach Quelle AG	81
5.1	Kostenverlauf unverzinst	86
5.2	Kostenverlauf verzinst	88
5.3	Ablösemodell - Kapitalisierte Erhaltungskosten	89
5.4	Eingangsparameter und Ergebnisse – Plattenbrücke einfeldrig .	92
5.5	Summenverläufe – Plattenbrücke	93
5.6	Eingangsparameter und Ergebnisse – Rahmenbrücke einfeldrig, integral berechnet	94
5.7	Rahmen vs. Platte – relativer Unterschied HSK/ LZK	94
5.8	Eingangsparameter und Ergebnisse – Rahmenbrücke einfeldrig, getrennt berechnet	96
5.9	Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in semi-integraler Bauweise nach eigener Kalkulation	98
5.10	Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in in- tegraler Bauweise nach eigener Kalkulation	99
5.11	Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in integraler Bauweise nach eigener Kalkulation, jedoch getrennt nach $\ddot{U}+U$ gerechnet	100
5.12	Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in in- tegraler Bauweise nach eigener Kalkulation, abgemindert	102
5.13	relativer Kostenvergleich semi-integrale Brücke – integrale Brücke	103
5.14	Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in semi-integraler Bauweise nach Quelle AG	105
5.15	Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in in- tegraler Bauweise nach Quelle AG	106

5.16	Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in integraler Bauweise nach Quelle AG, jedoch getrennt nach $\ddot{U}+U$ gerechnet	107
5.17	Eingangsparameter und Ergebnisse – Mehrfeldrige Brücke in integraler Bauweise nach Quelle AG, abgemindert	108
5.18	relativer Kostenvergleich semi-integrale Brücke – integrale Brücke aus Quelle AG	109
6.1	Brücke – Umfahrung Klosterneuburg, mittlere Pfeiler eingespannt, Randpfeiler und Widerlager durch Lager vom Überbau getrennt	114

Tabellenverzeichnis

3.1	Theoretische Nutzungsdauer und Prozentsatz der jährlichen Instandhaltungskosten für Unterbau und Rohtragwerk (vgl. [8]) . . .	26
4.1	Vergleich der Brückenhauptdaten	36
4.2	Grundformel der Baukalkulation (vgl. [7])	47
4.3	Kostenermittlung für die Plattenbrücke	48
4.4	Kostenermittlung für die Rahmenbrücke	49
4.5	Kostenanteile der LV-Positionen und Differenz	50
4.6	Auswertung nach LG – Plattenbrücke	51
4.7	Auswertung nach LG – Rahmenbrücke	52
4.8	Vergleich der Brückenhauptdaten	55
4.9	Mengen- und Preisermittlung ausgewählter Positionen	68
4.10	Mengen- und Preisermittlung ausgewählter Positionen	69
4.11	Vergleich der Positionspreise	71
4.12	Kostenzusammenstellung – Brücke semi-integral	77
4.13	Kostenzusammenstellung – Brücke integral	79
4.14	Auswertung nach LG – semi-integral	80
4.15	Auswertung nach LG – integral	80