

Glattalbahn

Feste Gleis-Fahrbahn auf langen Brücken

Erfahrungen in Projektierung, Ausführung und Betrieb am Beispiel des Viadukts Glattzentrum



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Veranlassung und Zielsetzung	3
2. Gesamtsystem	4
2.1. Die Glattalbahn	4
2.2. Organisation	6
3. Fahrbahnprojekt	8
3.1. Randbedingungen und Vorgaben	8
3.1.1. Anforderungen an die Fahrbahn	8
3.1.2. Besondere Bedingungen der langen Brücken	8
3.1.3. Ermittelte Einwirkungen	10
3.2. Konzept Fahrbahn	10
3.3. Schienenauszüge Viadukt Glattzentrum	11
3.3.1. Erfahrungen aus dem Viadukt Balsberg	11
3.3.2. Allgemeine Bemessung der Schienenauszüge, mit Zahlenbeispielen des Viadukts Glattzentrum	12
3.3.3. Konstruktion	13
4. Brückenprojekt	14
4.1. Randbedingungen und Vorgaben Fahrbahn Technik	14
4.1.1. Anforderungen an die Brückenkonstruktion	14
4.1.2. Besondere Bedingungen der Fahrbahn	14
4.2. Tragwerkskonzept Viadukt Glattzentrum	15
4.3. Brückendilatationen	17
5. Ausführung	19
5.1. Brücken	19
5.2. Fahrbahn	19
5.2.1. Ausführungsprojektierung	19
5.2.2. Bauausführung	20
6. Betriebsphase	21
6.1. Betrieb und Unterhalt	21
6.2. Messungen Schienenauszüge	22
6.2.1. Messwerte	22
6.2.2. Interpretation	23
7. Empfehlungen für zukünftige Projekte	25
Anhänge	26
Impressum	33

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1:	Schienenauszüge Viadukt Balsberg (links) und Viadukt Glattzentrum (rechts)	2
Abbildung 2:	Besteller-/Ersteller-Modell Projekt Glattalbahn	5
Abbildung 3:	Organigramm 3. Bauetappe Glattalbahn	6
Tabelle 4:	Längen zwischen den Brücken-Dilatationen beim Viadukt Glattzentrum	9
Tabelle 5:	Technische Anforderungen an die feste Fahrbahn im Werkvertrag	10
Tabelle 6:	Neutraltemperatur Brücke und Extremwerte am Beispiel des Viadukts Glattzentrum	12
Tabelle 7:	Längsverschiebungen ab Einbau Fahrbahn für Viadukt Glattzentrum	12
Tabelle 8:	Gewählte Schienenauszüge Viadukt Glattzentrum	13
Abbildung 9:	Schienenauszug Viadukt Glattzentrum mit besonderen Schienenbefestigungen	13
Abbildung 10:	Brückenabschnitte des Viadukts Glattzentrum	15
Abbildung 11:	Verbindung der benachbarten Randstützen	16
Abbildung 12:	Brückenquerschnitt	17
Abbildung 13:	Dilatationsvorrichtung mit Lamellenfugen	18
Tabelle 14:	Tabelle mit Verschiebungen (Langzeitverformungen berücksichtigt ab Einbauzeitpunkt)	18
Abbildung 15:	Gleis auf dem Viadukt Glattzentrum vor dem Betonieren der Gleistragplatte in Top-Down-Bauweise	20
Tabelle 16:	Überwachungs- und Erhaltungsarbeiten auf den Viadukten der Glattalbahn	21
Tabelle 17:	Maximale und minimale Auszugswerte der Schienenauszüge auf dem Viadukt Glattzentrum seit Inbetriebnahme im Dezember 2010 (Messungen berücksichtigt bis März 2012)	22
Abbildung 18:	Gemessene Längsverschiebungen des Schienenauszugs 13 im Jahr 2011	22
Abbildung 19:	Vergleich zwischen Prognosewert und Nennwert der Schienenauszüge	23
Abbildung 20:	Vergleich zwischen Messwert, angepasstem Messwert und Prognosewert der Schienenauszüge	24

Verzeichnis der Anhänge

Anhang 1	Höhenkontrolle am Viadukt Glattzentrum	27
Anhang 2	Fahrbahn auf Viadukt Glattzentrum, Querschnitt	28
Anhang 3	Ermittlung der Einwirkungskräfte Fahrbahn – Brücke	29

Zusammenfassung

Einleitung

Die Glattalbahn – die neue Stadtbahn zwischen Bahnhof Stettbach, Zürich Flughafen und Stadt Zürich – ist als Gesamtsystem seit Dezember 2010 in Betrieb. Die Erfahrungen in Planung, Bau und Betrieb sind durchwegs positiv. Die VBG Verkehrsbetriebe Glattal AG hat es sich zum Ziel gesetzt, diese Erfahrungen aus der Realisierung der Glattalbahn anderen Projekten zugänglich zu machen.

Zu den speziellen Bauwerken der Glattalbahn gehören die beiden Viadukte Balsberg (860 m) und Glattzentrum (1210 m). Deren Ausführung mit einer festen Fahrbahn – als Alternative zur Schotter-Fahrbahn – basierte auf den Vorgaben der Linienführung mit minimaler Bauhöhe, dem Anspruch auf innovative und über den gesamten Lebenszyklus optimale Bauformen sowie den Gestaltungsansprüchen.

Eine grosse Herausforderung in der Planung und Realisierung war die Interaktion zwischen Brückentragwerk und fester Fahrbahn. Es hat sich gezeigt, dass die Planung dieser beiden Ingenieurdisziplinen am besten bereits ab Stufe Vorprojekt koordiniert erfolgt. Beim anspruchsvollsten Bauwerk, dem 1210 m langen Viadukt Glattzentrum über eine stark befahrene SBB-Strecke und die Autobahn A1, konnten dann jedoch erstens die gemachten Erfahrungen des zwei Jahre zuvor gebauten Viadukts Balsberg einfließen und zweitens aufgrund des konventionellen Vergabemodells beim Brückenbau Optimierungen für das Gesamtsystem ohne aussergewöhnlich hohe finanzielle Folgen ins Ausführungsprojekt einfließen.

Beim Viadukt Balsberg waren sehr aufwendige Lösungen bei den Schienenauszügen notwendig, um nicht nur die Deformationen des Tragwerks in Längsrichtung, sondern auch solche in vertikaler und seitlich horizontaler Richtung aufzunehmen. Solche Schwierigkeiten konnten beim Viadukt Glattzentrum durch geschickte Tragwerkskonzeption vermieden werden, so dass die Schienenauszüge einfacher zu konstruieren und einzubauen waren und für den Betrieb weniger Aufwand anfällt.

Lehren für zukünftige ähnliche Projekte

Die beiden Ingenieurdisziplinen Brückenbau und Gleis-Fahrbahn sind für sich gesehen komplex. Das Zusammenbringen dieser beiden Materien erhöht diese Komplexität und erfordert eine hohe fachliche und terminliche Abstimmung sowie gegenseitiges Verständnis. Zulässige und technisch beherrschbare Deformationen und Verschiebungen unter allen relevanten Umwelt- und Betriebsbedingungen sind sehr sorgfältig und in einem iterativen Prozess zu ermitteln. Dabei sind beide Disziplinen, Brückenbau und Gleis-Fahrbahn, gleichermaßen beteiligt.

Die Abstimmung muss frühzeitig, bereits im Stadium des Vorprojektes, einsetzen. Gleis und Brücke sollten dabei immer als Gesamtheit betrachtet werden. Eine einseitige Optimierung der Brücke oder der Gleis-Fahrbahn ist nicht zielführend. Es ist Sache der Bauherrschaft, diese Koordination zu führen oder über treuhänderische Expertenmandate sicherzustellen.

Schieneauszüge

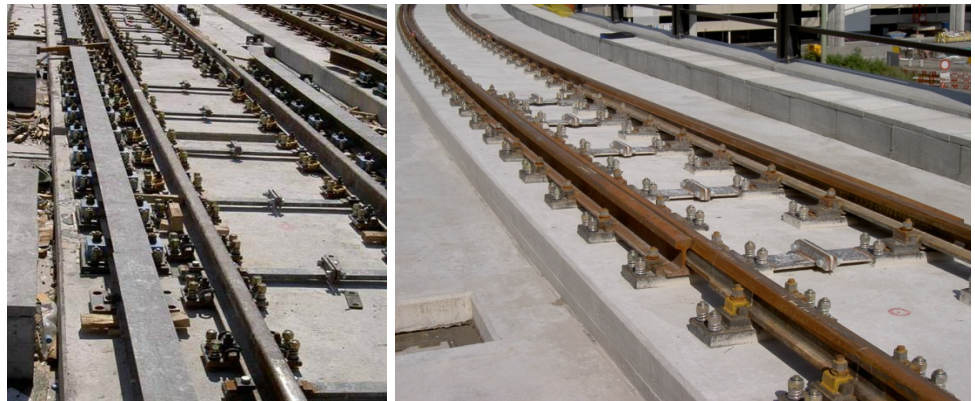


Abbildung 1: Schieneauszüge Viadukt Balsberg (links) und Viadukt Glattzentrum (rechts)

1. Veranlassung und Zielsetzung

Erfahrungen nach
2 Jahren Betrieb

Die Glattalbahnen sind als Gesamtsystem seit gut zwei Jahren erfolgreich in Betrieb. Erfolgreich bezüglich Kundennachfrage wie auch hinsichtlich der Technik. Die Fahrgastzahlen liegen über den Erwartungen und die neu gebaute Infrastruktur weist eine Zuverlässigkeit von über 99,8% auf. Diese hohe Zuverlässigkeit darf zwar erwartet werden, sie ist jedoch keineswegs selbstverständlich. Erstens aufgrund von Erfahrungen aus anderen Projekten und zweitens wegen der Geschichte besonderer technischer Lösungen. Ein solches Spezialthema ist der Gleisoberbau, insbesondere das schotterlose Gleis (nachfolgend als feste Fahrbahn bezeichnet) auf langen Brücken, welche vom Vorprojekt bis zur Inbetriebnahme fast über die gesamte Projektdauer eine besondere Herausforderung darstellte und in den internen wie auch externen Diskussionen, insbesondere mit dem Bundesamt für Verkehr, ein Schwerpunktthema darstellte.

Die Gesamtprojektleitung Glattalbahnen ist deshalb zum Schluss gekommen, die Erfahrungen mit der festen Fahrbahn auf langen Brücken bei der Glattalbahnen der Nachwelt zugänglich zu machen. Diese Bauart der festen Fahrbahn ist bekanntlich nicht alltäglich, schon gar nicht auf langen Brücken. Das Endresultat ist dieser Bericht, welcher nach folgenden methodischen Schritten entstanden ist:

- Zusammenstellen der schriftlichen Grundlagen (Daten und Fakten) aus Bau und Betrieb der festen Fahrbahn
- Autoren-Workshop: Analyse der Grundlagen, Einbringen des vorhandenen Wissens und Diskussion von möglichen Hypothesen
- Verfassen eines Berichtes zur Wissenskonservierung
- Publikation dieses Berichtes unter www.glattalbahnen.ch, zusammenfassender Bericht im Bahn-Jahrbuch Schweiz 2013, weitere Publikationen offen

Ziel ist es, die Erfahrungen bei der Glattalbahnen anderen Projekten zugänglich zu machen. Es soll diesen Projekten mit gleichen oder ähnlichen Fragestellungen helfen, sei es im lernenden oder bestätigenden Sinn. Rein technisch fokussiert der Bericht auf den Viadukt Glattzentrum. Organisatorisch wird auch der Viadukt Balsberg beleuchtet.

Dieser Bericht wurde durch folgende Personen verfasst:

- Gérard Rutishauser, Dipl. Bau-Ing. ETH, Experte Gleisoberbau im Projekt Glattalbahnen (federführend)
- Mathis Grenacher, Dr. sc. Techn., Dipl. Bau-Ing. ETH, Prüflingenieur Kunstbauten im Projekt Glattalbahnen
- Beat Meier, Dipl. Bau-Ing. ETH, Projektleiter (Projektverfasser) Viadukt Glattzentrum
- Hannes Schneebeli, Dipl. Geomatik-Ing. ETH/SVI, Exec. MBA, Leiter Infrastruktur VBG und Gesamtprojektleiter Glattalbahnen (seit 1.1.2013)

2. Gesamtsystem

2.1. Die Glattalbahn

Verknüpfung und
Vernetzung im
Glattal

Zur Vernetzung und nachhaltigen Erschliessung der wachsenden Siedlungszentren im Glattal beauftragte der Zürcher Regierungsrat 1998 die VBG Verkehrsbetriebe Glattal AG mit der Projektierung und Erstellung der Glattalbahn. Die VBG ist im Auftrag des Zürcher Verkehrsverbundes (ZVV) für den öffentlichen Nahverkehr im nördlichen Zürcher Agglomerationsgebiet (Räume Glattal/Flughafen Zürich, Furttal sowie Effretikon/Volketswil) verantwortlich. Die VBG führt und betreibt ein leistungsfähiges öffentliches Nahverkehrsnetz. In der Zeit vor der Glattalbahn bestand das Netz ausschliesslich aus Buslinien. Das heisst, dass bei der VBG keine Erfahrung im Umgang mit bahntechnischen Anlagen vorhanden war; sie wurde erstmals Eigentümerin von einer Stadtbahn-Infrastruktur. Diese Ausgangslage bildeten Chancen und Risiken zugleich. Risiken waren sicher fehlendes betriebsinternes Know-how und wenig Erfahrungen in Bau und Betrieb einer Stadtbahn. Die Chancen boten sich im unvoreingenommenen Blick auf den Stand der Technik und dem fehlenden Zwang, auf bestehende Anlagen und Standards Rücksicht nehmen zu müssen.

Die Glattalbahn verknüpft die einzelnen Zentren und Quartiere der Region. Gleichzeitig bindet sie die Region optimal in das übergeordnete Verkehrsnetz ein (S-Bahn, Bahnfernverkehr, Luftverkehr). Das 12,7 km lange Gesamtnetz entstand in drei Etappen. Die einzelnen Teilstrecken wurden im Zweijahresrhythmus in Betrieb genommen. Die erste Etappe, die Verlängerung der Tramlinie 11 Messe/Hallenstadion – Auzelg, ging im Dezember 2006 in Betrieb. Die Inbetriebnahme der zweiten Etappe, welche die Glattalbahn bis zum Flughafen Zürich erweiterte, erfolgte im Dezember 2008. Die Fertigstellung der dritten Etappe von Auzelg bis Bahnhof Stettbach erfolgte im Dezember 2010.

Prozess führen
und gestalten

Die VBG ist Prozessgestalterin. Sie kauft zeit- und bedürfnisgerechte Leistungen bei ausgewählten Unternehmen ein. Dieses Modell fand auch bei der Planung und Realisierung der Glattalbahn Anwendung. Die Gesamtprojektleitung Glattalbahn umfasste zu den strengsten Zeiten gerade einmal vier Personen. Sämtliche weitere Leistungen wurden am Markt beschafft. Das Besteller-/Ersteller-Modell ist in Abbildung 2 dargestellt.

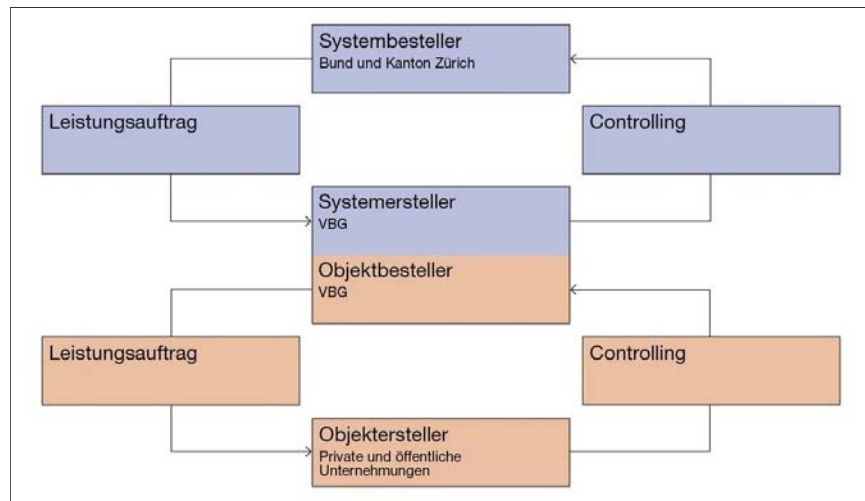


Abbildung 2: Besteller-/Ersteller-Modell Projekt Glattalbahn

Innovation

Der Besteller, ursprünglich nur der Kanton Zürich, verlangte von der VBG eine Stadtbahn nach neusten Gesichtspunkten zu bauen und nicht einfach bestehende Bauarten zu kopieren. Die Vorgabe nach Innovation war gegeben, was im Verlaufe der Projektentwicklung immer wieder zu neuen Ansätzen und innovativen Lösungen geführt hat. Nebst dem hier behandelten Thema seien folgende Themen erwähnt: Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Strassennetzes bei 96% Eigentrassee der Glattalbahn, durchgehende einheitliche Gestaltung aller Anlagen mit einem roten Faden, Vermeidung erheblicher Lärm- und Erschütterungsemissionen durch Massnahmen an der Quelle, Gleisoberbau im Schotterrasen auf fester Fahrbahn mit Top-Down-Bauweise.

Hauptmerkmale der Glattalbahn

Die technischen Hauptmerkmale der Glattalbahn sind die folgenden:

- Spurweite: 1 m (Meterspur)
- Zugelassene Achslast: 10 t
- Höchstgeschwindigkeit: 60 km/h
- Fahrstrom: 600 Volt Gleichstrom
- Durchschnittlicher Haltestellenabstand: 600 m
- Baulich abgetrenntes Eigentrassee: 96%
- Betriebsart: Fahrt auf vortrittsberechtigte Sicht (ausgenommen Margarethentunnel)
- Beförderungsgeschwindigkeit: 26 km/h
- Betriebszeiten und Takt: 5.00 bis 1.00 Uhr/7,5- resp. 15-Minuten-Takt

Die grössten Kunstbauten sind der Margarethentunnel (400 m) sowie die folgenden Brücken:

- Viadukt Balsberg (860 m), erstellt 2007: vorgespannte Hohlkastenbrücke in Beton
- Viadukt Glattzentrum (1210 m), erstellt 2009: vorgespannte Hohlkastenbrücke in Beton
- Viadukt Giessen (260 m), erstellt 2010: Plattenbalkenbrücke in Beton, im Bereich der Glattquerung vorgespannt

Bei diesen vier Ingenieurbauwerken wurde das Gleis als feste Fahrbahn ausgeführt.

Daneben gibt es sieben kleinere Brücken (Katzenbach, Glatt in Glattbrugg, Leutschenbach, Glatt beim Auzelg, Weststrasse Chriesbach in Dübendorf, Glatt in Dübendorf) und zwei Unterführungen (SBB in Oerlikon und A1 in Wallisellen). Das Gleis wurde bei diesen Objekten in einem Fall als konventioneller Schotteroberbau oder ebenfalls als feste Fahrbahn, aber ohne besondere Vorkehrungen, ausgeführt.

2.2. Organisation

Organisationsstruktur mit bedeutender Eigenverantwortung und Vernetzung

Die Gesamtprojektleitung Glattalbahnhof mit all ihren Beauftragten – zur Spitzenzeit rund 1'000 Personen – verstand sich als lernende Organisation. Dieser Begriff der lernenden Organisation war die Übersetzung des heute vielerorts angewendeten kontinuierlichen Verbesserungsprozesses, welcher bei der VBG im Tagesgeschäft ebenfalls Anwendung findet. Es war eine wesentliche Aufgabe der Gesamtprojektleitung, Erkenntnisse aus der/den Voretappe/n nutzbringend für die aktuellen Fragestellungen zu übertragen. Aufgrund der Vorgaben des öffentlichen Beschaffungswesens und der Objekteinteilung war es nicht möglich, Planer- und Bauleitungsmandate bei den Tief-/Kunstabauten direkt an bisherige Leistungsträger zu übertragen. Das Know-how der ersten und zweiten Etappen floss dennoch über die etappenübergreifenden Experten- und Prüfmandate in die dritte Etappe ein. Bei den bahntechnischen Anlagen wurden vier Totalunternehmer-Aufträge für die erste Etappe – mit Optionen für die zweite und dritte Etappe sowie die Erhaltung der gebauten Anlagen – vergeben.

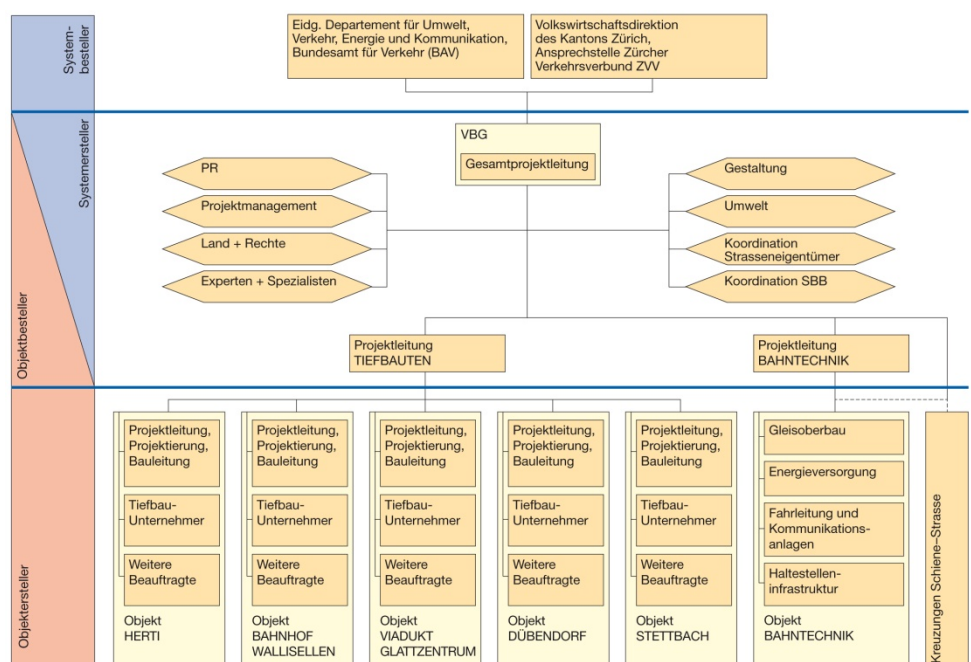


Abbildung 3: Organigramm 3. Bauetappe Glattalbahnhof

So flossen wichtige Erkenntnisse aus der Realisierung des Viadukts Balsberg im Jahre 2007 direkt in die Planung und Realisierung des Viadukts Glattzentrum ein. Nicht bezüglich des Grundsystems der festen Fahrbahn auf einer langen Brücke, aber bezüglich des Zusammenspiels von Brücke und Fahrbahn. Nur schon formell tritt auch ein "Philosophiewechsel" klar zu Tage: Wurde der Viadukt Balsberg als Totalunternehmermandat realisiert, wurde beim Viadukt Glattzentrum auf das konventionelle Modell mit separaten Leistungsvergaben für Projektierung/Bauleitung und Bau zurückgegriffen.

3. Fahrbahnprojekt

3.1. Randbedingungen und Vorgaben

3.1.1. Anforderungen an die Fahrbahn

Grundanforderungen
Fahrbahn
Glattalbahn

Die besonderen Anforderungen an die Fahrbahn der Glattalbahn sind:

- Spurweite: 1000 mm (Meterspur, Kompatibilität mit VBZ)
- Max. Achslast 100 kN +20% (Es muss eine Erhöhung der Achslast um 20% ohne grundsätzliche Veränderung der Hauptkomponenten der Fahrbahn möglich sein.)
- Belastung pro Tag und Gleis mindestens 3400 BRT (Ohne grundsätzliche Veränderung der Hauptkomponenten Fahrbahn muss eine Erhöhung der Belastung um 50% möglich sein.)
- Schweizer Norm SN 505261 (Einwirkungen auf Tragwerke), Lastmodell 4 (für Dimensionierung Betontragplatte)
- Schiene S49, Neigung 1:40
- Einwandfreie Entwässerung, ohne stehendes Wasser an der Oberfläche
- Der ästhetischen Gestaltung ist grosse Bedeutung beizumessen.
- Es ist eine intensive Koordination zwischen Brückenbau und Gleisoberbau erforderlich und sicherzustellen.

Feste Fahrbahn
auf Brücken

Für alle drei Viadukte ist auch die Forderung nach einem System mit möglichst geringer Bauhöhe zu berücksichtigen. Diese ergibt sich aus den Zwängen der Linienführung und aus den Ansprüchen der guten Gestaltung. Die Brückenplatte muss im Stadtbild möglichst schlank wirken. Da die Brücken aus dem Stadtraum einsehbar sind, wird eine passende, möglichst gleichmässige Oberfläche gefordert. Für alle Viadukte wurde deshalb eine so genannte feste Fahrbahn gewählt.

3.1.2. Besondere Bedingungen der langen Brücken

Hauptprobleme
bei langen
Brücken

Für eine optimale Interaktion von Brückenbauwerk und Gleis-Fahrbahn ist die Lösung folgender Punkte ausschlaggebend:

- Kraftübertragung Fahrbahn – Brückenbauwerk und Schutz der Brückenisolierung
- Verformungen der Brückenüberbauten und deren Einfluss auf die Fahrbahn
- Gebrauchstaugliche Ausführung der Dilatationen und Schienenauszüge
- Schnittstelle Brückentragwerk – Schienenfahrbahn mit Entwässerung

Horizontalkräfte

Die Längskräfte aus Anfahren und Bremsen werden durch Schub von der Gleis-tragplatte über eine elastische Zwischenlage direkt in das Brückenbauwerk eingeleitet. Die resultierende Schubspannung beträgt 0,013 N/mm² im Maximum. Die Querkräfte aus Fliehkraft und Temperaturspannung in den Schienen, welche in kleinen Kurvenradien ein Maximum erreichen, werden über plattenförmige Betonfüllkörper von den Gleis-tragplatten auf die Brückenkonsole übertragen. Es ergeben sich maximale Querkräfte von gegen 50 kN pro Laufmeter Brücke.

Abschnittslängen
der Fahrbahn

Die beiden Viadukte Balsberg und Glattzentrum weisen bedingt durch die Brückenkonstruktion grosse Abschnittslängen zwischen den Dilatationen von bis zu 235 m auf. Demzufolge sind Schienenauszüge unerlässlich, um die Längsverschiebungen der Brücken aufzunehmen. Deformationen in vertikaler und lateraler Richtung sollten aber vermieden werden, weil solche Deformationen vom Gleis in der Regel nicht aufgenommen werden können. Beim Viadukt Balsberg ist diese Bedingung nicht erfüllt, was aufwendige Sonderkonstruktionen zur Folge hatte.

Fahrbahnabschnitte auf dem Viadukt Glattzentrum:

von	bis	Länge im Metern
Widerlager Nord	Dilatation 8	68,90 m
Dilatation 8	Dilatation 13	179,94 m
Dilatation 13	Dilatation 23	241,43 m
Dilatation 23	Dilatation 29	196,05 m
Dilatation 29	Dilatation 37	103,93 m
Dilatation 37	Dilatation 38	5,50 m
Dilatation 38	Widerlager Süd	228,30 m

Tabelle 4: Längen zwischen den Brücken-Dilatationen beim Viadukt Glattzentrum

Besondere Anforderungen an die
Brückenfahrbahn

Das Gleis auf langen Brücken muss besonderen Anforderungen genügen. Für eine feste Fahrbahn ist es angebracht, sich am Anforderungskatalog zum Bau der festen Fahrbahn der Deutschen Bahn (3. Auflage 1995; Entwurf 4. Auflage 1999) zu orientieren. Die konkreten technischen Anforderungen sind im Anforderungskatalog in Tabelle 5 angegeben. Bei der Glattalbahn wurde das Zusammenspiel zwischen Tragkonstruktion der Brücke und Fahrbahnkonstruktion als Gesamtkonzept behandelt und im Rahmen des Bauprojektes stufengerecht gelöst. Stichworte dazu sind:

- Brückenisolation nicht verletzbar und risikoarm
- Brückentragwerk mit möglichst wenigen Dilatationen
- Übergänge zwischen Damm und Brücke so, dass keine Setzungen oder grosse Steifigkeitssprünge auftreten
- Entgleisungsschutz

Wesentliche technische Anforderungen gemäss Werkvertrag Totalunternehmer
Gleisoberbau:

Betreff	Anforderung
Oberbauhöhe	anzustreben ≤ 45 cm
Durchschubwiderstand	≥ 30 kN/m unbelastetes Gleis reduziert: ≤ 15 kN/m
Reduzierter Durchschubwiderstand	≥ 2.5 kN/Stützpunkt Im Bereich von Systemwechseln kann der Durchschubwiderstand durch Verwendung einer modifizierten Spannklemme auf begrenzte Länge reduziert werden (Nachweis erforderlich)
Konstruktion der Übergänge an andere Bauart	Stetigkeit der Bettung, Vermeidung von Relativverschiebungen zwischen Gleis und Brückentragwerk
Schienauszüge	Erforderlich, wenn längsbewegliches Tragwerk $L > 90$ m (bei Kurven gelten besondere Bedingungen mit geringeren zulässigen Längen)
Ausbildung der Dilatationsfuge	Unterhaltsfreundlich, einfache Kontrollierbarkeit
Entwässerung und Ableitung	kein stehendes Wasser, Frostsicherheit, Anordnung der Entwässerung in Brückenmitte
Anforderungen an konstruktive Gestaltung	Betondeckung, Mindestbewehrung
Endtangentialwinkel	Der Endtangential- bzw. Drehwinkel bei Querfugen der Tragplatte muss kleiner sein als 2 ‰.
Schleppplatte	Übergang Brücke – Damm Schleppplatte Länge > 5 m
Abheben der Schiene	Nachweis, dass abhebende Kräfte aufgenommen werden

Tabelle 5: Technische Anforderungen an die feste Fahrbahn im Werkvertrag

3.1.3. Ermittelte Einwirkungen

Die Einwirkungen wurden durch die Experten vorgegeben und mit dem Bundesamt für Verkehr abgestimmt. Sie entsprechen im Ansatz den Vorgaben der Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung des Bundes (AB-EBV). Ausführliche Angaben sind im Anhang 3 zu finden.

3.2. Konzept Fahrbahn

Fahrbahnaufbau

Die geforderte geringe Bauhöhe lässt manche Standardbauarten für Brücken, namentlich Lösungen mit einbetonierten Schwellen (System RHEDA und deren Weiterentwicklungen) nicht zu. Solche Bauarten benötigen anstatt 45 cm eine Bauhöhe von 55 bis 60 cm. Für die Viadukte wurde deshalb eine Konstruktionsart mit besonders geringer Bauhöhe und direkter Befestigung der Schienen auf der Gleistragplatte gewählt.

Der ausgeführte Gleisoberbautyp (Anhang 2) beruht auf einer betonierten Fahrbahnplatte, auf welcher die Schienen direkt montiert werden. Die Fahrbahnplatte selber ist auf der Brücke elastisch auf einer Elastomermatte gelagert. Die Fahrbahnplatte ist alle 7 bis 10 m mit Trennfugen versehen und ist nur indirekt mit dem Brückentragwerk verbunden. Die Tragplatte besteht also aus einzelnen Plattensegmenten von 1,5 m Breite. Der auf der Brücke angebrachte Schutzmörtel beziehungsweise Gussasphalt wird gegenüber der Tragplatte durch eine Elastomermatte von gut 2 cm Dicke getrennt. Durch diese Massnahme lassen sich die durch Temperaturspannungen hervorgerufenen Zwängungen und Verschiebungen verhindern.

In den Bereichen der Standardgleisstragplatten wurde das Gleis in "Top-Down-Bauweise" erstellt. Es kam der isolierte Einzelstützpunkt Vossloh W-Tram zur Anwendung. In den Bereichen der Schienenauszüge musste in "Bottom-Up-Bauweise" gebaut werden. Dort kam der Einzelstützpunkt Hilti Railanker mit Ico-sit-Verguss zum Einsatz.

Unmittelbar vor und nach einem Schienenauszug werden die im Gleis auftretenden Horizontalkräfte von der Fahrbahnplatte aufgenommen und mittels Horizontalkraftverankerungen (Schubnocken) in das Brückenbauwerk eingeleitet. Die Tragplatten sind dadurch in Längs- und Querrichtung fixiert. Die Tragplatte wird gegenüber der Horizontalverankerung zwecks Verhinderung von Körperschallbrücken durch elastische Zwischenlagen getrennt.

3.3. Schienenauszüge Viadukt Glattzentrum

3.3.1. Erfahrungen aus dem Viadukt Balsberg

Totalunternehmer
für Brücke und
Fahrbahn

Planung und Realisierung des Viadukts Balsberg wurden mit je einem Totalunternehmer für den Brückenbau und den Gleisoberbau durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass das Brückenprojekt von den Randbedingungen der Bahntechnik, insbesondere der Schienenauszüge für die feste Fahrbahn, wesentlich beeinflusst wurde. Andererseits hat das Brückenkonzept in Bezug auf die Geometrie, Spannweiten und Lagerung einen wesentlich Einfluss auf die Anforderungen an die Schienenauszüge. Der unterschiedliche Projektierungsstand der beiden Totalunternehmer hat zu Handlungsbedarf an den Schnittstellen geführt, welche mit angepassten Konstruktionen in der Fahrbahn jedoch aufgefangen werden konnten.

Diskussionen und Probleme ergaben die Anforderungen an die maximal zulässigen Bewegungen der Schienenauszüge. Die Möglichkeiten für die Ermittlung der Verformungen sind naturgemäss für die Projektverfasser der Brücke andere als für die Planer der Schienenauszüge. Die einen sprechen von cm, die anderen von 1/10 mm.

3.3.2. Allgemeine Bemessung der Schienenauszüge, mit Zahlenbeispielen des Viadukts Glattzentrum

Lastmodell

Für die Dimensionierung der Fahrbahnübergänge der Brücke ist der Tragsicherheitsnachweis massgebend, bei welchem die Temperatur mit dem Faktor 1,5 und die Verkehrslast gemäss SN 505261, Lastmodell 4 mit dem Faktor 1,0 einfließen. Die ungünstigste Lastfallkombination resultiert, wenn Anfahren/Bremsen mit dem Faktor 1,0 und die Zentrifugal-/Schlingerkräfte mit dem Faktor 0,5 berücksichtigt werden (Lastfallkombination gemäss SN 505261).

Um die spezifischen Anforderungen der Konstruktion und der Funktionalität der Schienenauszüge zu berücksichtigen, wurden zu deren Bemessung folgende Annahmen getroffen:

Temperaturen Brückenbau		Norm	Effektiv	Extremwerte	
		[°C]	[°C]	oben [°C]	unten [°C]
Jahresmittel	To	8			
Temperatur bei Einbau Fahrbahnübergang			8		
Schwankung max. (±)	0T	20			
	0T min.		-20		
	0T max.		20		
Temperaturgradient Brückenplatte				10	-4
0 = 1	Tmin	-12		-12	-16
0 = 1	Tmax	28		38	28

Tabelle 6: Neutraltemperatur Brücke und Extremwerte am Beispiel des Viadukts Glattzentrum

Um die durch den Brückenbau berechneten Verformungen auf Gebrauchsniveau zu bestimmen, wurde das Lastmodell „GTB-Cobra“ beigezogen.

Längenänderungen des Viaduktes

Die Berechnungen ergaben für den Viadukt Glattzentrum folgende Verformungen in Längsrichtung:

Dilatation	Tragsicherheit Brücke (inkl. Schwinden/Kriechen) ($\gamma_T=1.5$, LM4 SN 505261)		Gebrauchstauglichkeit Oberbau (inkl. Schwinden/Kriechen) ($\gamma_T=1.0$, LM4 SN 505261 x 0.65)		Schwinden, Kriechen Brücke (ab Juni 2011)
	Δx (öffnend)	$-\Delta x$ (schliessend)	Δx	$-\Delta x$	Δx
	[mm]	[‰]	[mm]	[mm]	[mm]
8	123	-93	104	-74	19
13	153	-118	130	-95	24
23	154	-98	133	-77	31
29	67	-45	60	-38	15
37	39	-24	34	-20	14
38	149	-92	123	-66	41

Tabelle 7: Längsverschiebungen ab Einbau Fahrbahn für Viadukt Glattzentrum

Diese für die Fahrbahn massgebenden Ergebnisse sind nicht direkt vergleichbar mit den Angaben für die Brückendilatationen in Tabelle 146. Dies hängt damit zusammen, dass die Berechnungen nicht exakt dem gleichen Stand der Projektierung entsprechen und die getroffenen Belastungsannahmen einzelne Unterschiede aufweisen. Die hier dargestellten Werte waren massgebend für die Festlegung der Konstruktion der Schienenauszüge.

Bestimmung der
Schienenauszüge

Für die maximalen Verformungen in Brückenlängsrichtung müssen die öffnenden und schliessenden Werte addiert werden. Massgebend für das Viadukt Glattzentrum sind die Dilatationen 37/38 (wurden mit einem einzigen Schienenauszug ausgerüstet) mit einer Fugenöffnungsweite von 304 mm. Unter Berücksichtigung von ± 20 mm Schienenatmung in der Schienenauszugskonstruktion resultieren 344 mm, welche mit einem Schienenauszug von ± 200 mm aufgenommen werden können. Für die einzelnen Dilatationen wurden aufgrund der maximalen Längsverformungen folgende Schienenauszüge gewählt:

Dilatation	Fugenöffnungsweite	Schienenatmung	Gesamtöffnungsweite	Wahl SAZ
8	216	30	246	± 150 mm
13	271	30	301	± 200 mm
23	252	30	282	± 200 mm
29	112	30	142	± 150 mm
37/38	304	40	344	± 200 mm

Tabelle 8: Gewählte Schienenauszüge Viadukt Glattzentrum

Für die Dilatation 29 auf dem Viadukt Glattzentrum würde auch ein Schienenauszug ± 100 mm ausreichen. Aus Gründen der Einheitlichkeit bezüglich Engineering und Erhaltung wurde ebenfalls ein Schienenauszug ± 150 mm gewählt.

3.3.3. Konstruktion

Fahrbahn bei
Schienenaus-
zügen

Die Fahrbahnkonstruktion weist im Bereich der Schienenauszüge viele Besonderheiten auf. Wesentlich sind die besonderen Schienenbefestigungssysteme, welche den auftretenden Kräften und Verformungen Rechnung tragen. Das nachstehende Bild verleiht einen Eindruck.



Abbildung 9: Schienenauszug Viadukt Glattzentrum mit besonderen Schienenbefestigungen

4. Brückenprojekt

4.1. Randbedingungen und Vorgaben Fahrbahntechnik

4.1.1. Anforderungen an die Brückenkonstruktion

Hohe Anforderungen hinsichtlich Verformungen

Die Funktionstüchtigkeit einer Bahnbrücke ist vor allem auch abhängig von den unvermeidbaren Verformungen (Kurz- und Langzeit). Die zulässigen Verformungen sind in der Norm SIA 260 (Grundlagen für die Projektierung von Tragwerken) vorgegeben und gelten als Richtwerte für eine Fahrbahn mit Schotteroberbau. Die Gebrauchsgrenzen für feste Fahrbahnen sind speziell festzulegen. Dabei verlangen die Schienenauszüge höhere Anforderungen an die Verformungen. Diese beeinflussen auch das Tragkonzept und an gewissen Stellen angepasste konstruktive Ausgestaltungen der Brücke.

Die bei konventionellen Schienenauszügen möglichen maximalen Schienenauszugslängen von +/- 200 mm beschränken die maximal möglichen Spannweiten bzw. die maximalen Gesamtlängen eines Brückenabschnittes. Zudem soll angestrebt werden, dass sich die Dilatationen möglichst in den Geraden der Brücke befinden (Längs- und Vertikalprofil), was eine einfachere Schienenauszugskonstruktion erlaubt. Die Längen der Spannweiten bzw. der Brückenabschnitte wiederum haben grossen Einfluss auf die Spannglieder. Vor allem die Anzahl der Kupplungen sollte bei elektrisch isolierten, überprüfbaren Spannkabeln der Spanngliedkategorie c minimiert werden.

Die lateralen Verschiebungen bei den Dilatationen sind auf +/- 1 mm zu beschränken, damit die Funktionstüchtigkeit der Schienenauszüge gewährleistet ist. Diese Anforderung hat Konsequenzen auf die Ausgestaltung der Pfeiler bei den Dilatationen.

Die vertikalen Verschiebungen (Höhenversatz) bei den Dilatationen sind auf +/- 3 mm zu beschränken. Diese Anforderung ist eine massgebliche Randbedingung für die Festlegung der Überstände (Distanzen zwischen Lagerachsen und Achsen der Fahrbahnübergänge) und das Lagerkonzept der Brücke (Auflagerverdrehungen).

Die Anzahl der Brückenlager soll zugunsten geringerer Unterhaltskosten auf ein Minimum beschränkt sein. Ein Ersatz der Lager muss mit wenig Aufwand und geringen Betriebsstörungen der Bahn möglich sein.

4.1.2. Besondere Bedingungen der Fahrbahn

Wechselspiel zwischen Brücke und Fahrbahn

Das Nivellement der Fahrbahn ist vorgegeben und ist mit grosser Genauigkeit einzuhalten, da durch die Gleistragplatte von geringer Stärke nur kleine Toleranzen aufgenommen werden können. Den Durchbiegungen der Brücke infolge Langzeiteinwirkungen wie Schwinden, Kriechen, Vorspannung, Temperatur und Einwirkungen der Verkehrslasten muss besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Die schwimmend gelagerten Gleistragplatten müssen sowohl für laterale Einwirkungen (Zentrifugal- und Schlingerkräfte) wie auch für Einwirkungen in Längsrichtung (Brems- und Anfahrkräfte) stabilisiert werden. Die Längskräfte können über

den Schubwiderstand der Elastomermatten auf die Brückenplatte abgetragen werden. Bei den Dilatationen sind Endverankerungen der Längskräfte aus Temperatur mittels Schubdornen, Betonnocken oder Querrippen erforderlich. Die lateralen Kräfte müssen über eine zweckmässige konstruktive Ausgestaltung auf die Konsolköpfe der Brücke abgegeben werden.

4.2. Tragwerkskonzept Viadukt Glattzentrum

Neue Linienführung

Das Projektierungsteam, welches ab Phase 41 (Submission) für den Viadukt Glattzentrum verantwortlich war, wurde zusätzlich mit der Aufgabe der Aktualisierung und Optimierung des Auflageprojektes beauftragt. Nachdem das Auflageprojekt im Jahr 2001 abgeschlossen wurde, veränderten sich bis in das Jahr 2007 verschiedene Randbedingungen. Einerseits waren dies geänderte Anforderungen der Anstösser (z.B. Parzelle Areal Richti), andererseits wurde per 1.1.2004 das Behindertengleichstellungsgesetz (BehiG) eingeführt, welches Auswirkungen auf das Bauwerk hatte (u.a. die Forderung nach einer geraden Haltekante). Im Rahmen dieser Aktualisierung des Projektes bot sich die Chance, die Erkenntnisse des zwischenzeitlich gebauten Viadukts Balsberg in die Überarbeitung einfließen zu lassen. Die horizontale Linienführung konnte insbesondere im Bereich der Haltestelle und im Bereich des Grundstückes Areal Richti begradigt und damit wesentlich vereinfacht werden. Es ergaben sich in der Folge neue Stützenstandorte und Feldeinteilungen. Mit einer geschickten Anordnung der Dilatationen konnte deren Anzahl von ursprünglich 7 auf 5 reduziert werden. Brückenanfang und -ende wurden jeweils in die anschliessenden Widerlagerkonstruktionen eingespannt, womit an dieser Stelle auf Dilatationen verzichtet werden konnte. Zudem konnten die Dilatationen neu entweder in der Geraden oder zumindest in Bereichen mit grossen Radien positioniert werden.



Abbildung 10: Brückenabschnitte des Viadukts Glattzentrum

Die Anzahl der Brückenlager wurde – wie beim Viadukt Balsberg – minimiert. Allerdings wurden – anders als beim Viadukt Balsberg – im Bereich der Brückendilatation die Endfelder auf den Stützen zwängungsfrei mittels Topflagern aufgelegt. Damit wurde eine kraftschlüssige Verbindung beider benachbarten Randstützen möglich. Die hohen Anforderungen an die lateralen und vertikalen Verschiebungen im Bereich der Schienendilatation konnten so eingehalten werden.



Abbildung 11: Verbindung der benachbarten Randstützen

Lagerkonzeption
bei Randstützen

Im Weiteren wurde darauf geachtet, dass die Lager parallel zum Brückenlängsgefälle und nicht wie üblich horizontal angeordnet wurden. Ein Vertikalversatz im Bereich der Schienendilatation infolge Längenänderung der Brückenträger konnte so ausgeschlossen werden. Die zusätzliche Horizontalkraftkomponente auf die Stützen musste entsprechend berücksichtigt werden.

Befahrbarkeit im Bauzustand

Querschnitt und Abdichtungs- bzw. Schutzschichtaufbau wurden derart ausgestaltet, dass für die Arbeiten des Gleisoberbaus ein uneingeschränktes Befahren der Brücke mit 40-Tonnen-Fahrzeugen möglich war. Insbesondere die Anlieferung der Schienen mit Tiefladern konnte damit in einfacher Weise erfolgen.

Die Kragplattenstärke wurde gegenüber dem Viadukt Balsberg erhöht. Wesentlich war zudem der Wechsel des Schutzschichtsystems von Mörtel zu Gussasphalt. Neben dem bedeutend höheren Widerstand bei grossen Lasten waren weitere Gründe wie grosse Einbauleistungen sowie höhere Frostsicherheit beim Gussasphalt ebenfalls entscheidend für den Systemwechsel.

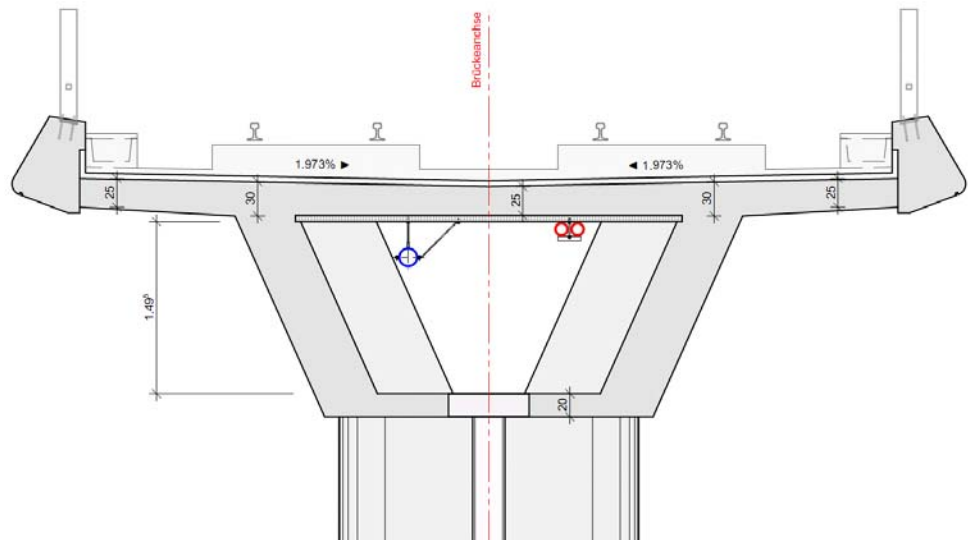


Abbildung 12: Brückenquerschnitt

Entwässerung

Die Entwässerungsebene ist grundsätzlich mit der PBD-Abdichtung (PBD: Bitumen- und Polymerbitumen-Dichtungsbahnen) definiert, auch wenn die Gussasphaltschutzschicht zusätzlich eine abdichtende Funktion aufweist. Die Randfugen des Gussasphaltes wurden nicht abdichtend ausgeführt, weshalb davon ausgegangen werden muss, dass Wasser unter der Gussasphaltschicht vorhanden sein kann.

Die Gleistragplatte in Beton wurde auf einer durchlässigen Elastomermatte erstellt, welche das Oberflächenwasser zu den Entwässerungsschächten hin ableitet. Alle ca. 15 m ist die Gleistragplatte mit einer Querrinne unterbrochen. Bei jeder Querrinne kann das Wasser in zentrisch angeordnete Entwässerungsschächte ablaufen.

4.3. Brückendilatationen

Lammellenfugen

Die Konstruktion der Brückendilatation wurde in Anlehnung an Strassenbrücken gewählt. Es kamen mehrzellige Lammellenfugen (System mageba Bameco RB) zum Einsatz. Die eher aufwendigen und platzbeanspruchenden Lammellenfugen wurden aus Gründen der Robustheit (Dauerhaftigkeit) und Dichtigkeit einem Mattenfugensystem vorgezogen. Die Dilatation wurde auf der Höhe des Konstruktionsbetons bzw. der Schutzschicht, welche als Entwässerungsebene gilt, eingebaut. Die Gleistragplatte wurde daher im Bereich der Dilatation ausgespart. Aufgrund der Rinnenwirkung dieses Gleistragplattenunterbruchs musste jeweils unmittelbar nach der Dilatation ein Entwässerungsschacht angeordnet werden.

Die regelmässige Anordnung der Dilatationen über den gesamten Viadukt ergab ähnliche Bewegungslängen. Generell kamen zwei- oder dreizellige Lammellenfugen zum Einsatz.

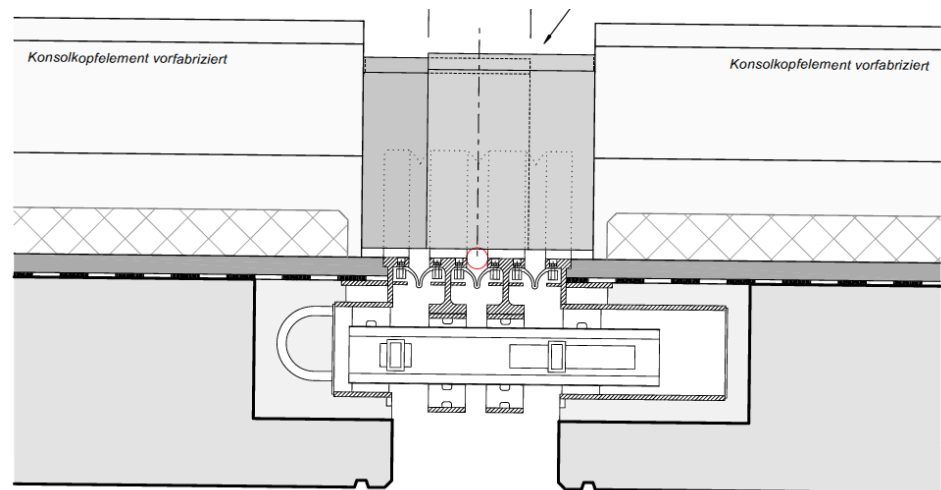


Abbildung 13: Dilatationsvorrichtung mit Lamellenfugen

Zwei Brücken-
dilatationen – eine
Schienendilatation

Eine Ausnahme bildete die Dilatation zwischen Abschnitt VI und VII. Aufgrund der Disposition des dazwischen liegenden Widerlagers wurden die beiden Brückenabschnitte unabhängig voneinander zum festen Widerlager hin dilatiert. Dabei war für den kurzen Abschnitt VI lediglich eine einzellige Fuge erforderlich, während für den Abschnitt VII eine dreizellige Fuge benötigt wurde. Diese beiden Brückendilatationen konnten in einer einzigen Schienendilatation vereinigt werden. Zu diesem Zweck wurden zusätzliche Verankerungsnocken zwischen den beiden Dilatationen platziert und der Bereich mit verringertem Schienendurchschubwiderstand angepasst.

FÜ-Achse	Tragsicherheit ($\gamma_{Temp} = 1.5$)		Gebrauchstauglichkeit ($\gamma_{Temp} = 1.0$)	
	Δx_d (FÜ öffnend) [mm]	$-\Delta x_d$ (FÜ schliessend) [mm]	Δx (FÜ öffnend) [mm]	$-\Delta x$ (FÜ schliessend) [mm]
8	141	-66	118	-45
13	169	-80	140	-55
23	153	-67	127	-46
29	85	-24	63	-16
37	51	-17	45	-12
38	183	-84	152	-56

Tabelle 14: Tabelle mit Verschiebungen (Langzeitverformungen berücksichtigt ab Einbaupunkt)

5. Ausführung

5.1. Brücken

Oberflächen-
genauigkeit

Die erwähnten hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Betonkonstruktion stellten die ausführende Unternehmung, aber auch die Planer vor grosse Herausforderungen. Die Genauigkeit der Betonoberfläche wurde für den Unternehmer auf +/- 1 cm verschärft, während normgemäss +/- 2 cm zugelassen würden. Die Einhaltung dieser Anforderung wurde umfassend mittels einer systematischen Schalungskontrolle durch die Bauleitung bzw. durch ein separat beauftragtes Vermessungsbüro überprüft.

Selbst wenn die Anforderungen an die Genauigkeit durch den Unternehmer eingehalten werden konnten, bedeutete dies noch nicht, dass die Endlage bzw. Endkote der Oberfläche bei Übergabe an den Fahrbahnersteller den Anforderungen genügte. Einflüsse wie Lehrgerüstüberhöhungen, elastische Verformung durch das Vorspannen, elastische Einsenkung beim Ablassen des Lehrgerüsts, Kriechen des jungen Betons und nicht zuletzt Temperatureinflüsse mussten mittels Modellannahmen antizipiert werden.

Insgesamt konnten die Verformungsanforderungen sehr gut eingehalten werden (siehe Messergebnisse im Anhang 1). Eine einzige Ausnahme bildete die Querung des SBB-Areals mit der grössten Spannweite von 46,20 m, wo die Einsenkungen zu konservativ angenommen wurden und schlussendlich eine zu starke Überhöhung resultierte. Mit einer leichten Korrektur der Gleisgeometrie im Aufriss konnte das Mindermass in der Gleistragplatte jedoch aufgefangen werden.

Temperatur-
bedingte Ver-
schiebungen

Eine weitere Besonderheit während der Ausführung ergab sich im Einmass der Gleislage. Infolge temperaturbedingter Längenänderung veränderte sich die Brückengeometrie ständig. Die Referenz für die Gleislage gestaltete sich dadurch anfänglich schwierig. Schliesslich wurde jeder Brückenabschnitt in sich referenziert, wodurch der Temperatureffekt eliminiert werden konnte.

5.2. Fahrbahn

5.2.1. Ausführungsprojektierung

Fachkompetenz
und Erfahrung

Der Totalunternehmer Gleisoberbau hat eine erfahrene Ingenieurunternehmung mit der Ausführungsprojektierung beauftragt. Dank der Fachkompetenz und dem Engagement der verantwortlichen Sachbearbeiter konnte die Projektierung ohne wesentliche Schwierigkeiten abgewickelt werden. Einer der grossen Vorteile war, dass ein sehr direkter Austausch mit dem Experten Gleisoberbau als Treuhänder der Bauherrschaft möglich war, der u.a. auch die Erfahrungen der ersten und zweiten Etappe (Viadukt Balsberg) einbrachte. So konnten die anstehenden Probleme auf Fachebene frühzeitig analysiert und entsprechend gelöst werden.

5.2.2. Bauausführung

Die Ausführung der festen Fahrbahn auf dem Viadukt Glattzentrum war eine besondere Herausforderung für die Logistik. Die beschränkten Möglichkeiten bezüglich Zufahrt und Anlieferung bedingten besondere Massnahmen (Kran, Betonpumpen, Just in Time-Anlieferung etc.). Diese Probleme wurden durch den Totalunternehmer mit innovativen Lösungen gut gemeistert. Die Bauleistung entsprach den Vorgaben und alle Termine konnten eingehalten werden.

Die folgende Abbildung zeigt den Bau der festen Fahrbahn in Top-Down-Bauweise. Die Bereiche mit Schienenauszügen wurden vorgängig erstellt, indem zuerst die Gleistragplatte betoniert und dann die Auszugsvorrichtungen montiert, exakt gerichtet und mittels Bohrankern darauf befestigt wurden.



Abbildung 15: Gleis auf dem Viadukt Glattzentrum vor dem Betonieren der Gleistragplatte in Top-Down-Bauweise

Gemäss Organisation des Totalunternehmers war ein ebenfalls spezialisiertes Büro mit der Qualitätskontrolle beauftragt. Dabei hat die Erfahrung gezeigt, wie wichtig es ist, dass der Qualitätsbeauftragte völlig unabhängig vom Baustellenleiter ist, und dass er der Funktion entsprechend hohe Durchsetzungskraft hat. In vereinzelt Fällen wurden Abweichungen von den werkvertraglichen Anforderungen erst auf Intervention des Experten Gleisoberbau (im Auftrag der VBG) bei dessen Stichproben erkannt. Dann aber wurden entsprechende Korrekturvorschläge ohne Verzug entgegengenommen und die erforderlichen Massnahmen umgesetzt.

Der Einbau der festen Fahrbahn auf dem langen Viadukt Glattzentrum wurde sehr gut vorbereitet. Aufgrund der Erfahrungen vom Viadukt Balsberg konnten wesentliche einbautechnische Optimierungen vorgenommen werden. So wurde ein sehr hoher Standard bezüglich Effizienz und Qualität erreicht.

6. Betriebsphase

6.1. Betrieb und Unterhalt

Erfüllung funktio-
naler Anforderun-
gen

Die VBG betreibt und unterhält die Eisenbahnanlagen der Glattalbahnen weiterhin in ihrer schlanken Aufbauorganisation als Managementgesellschaft. Die Schweizerische Gesetzgebung und das Bundesamt für Verkehr geben die einzuhaltenden Rahmenbedingungen vor. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es für eine Managementgesellschaft möglich ist, eine bahntechnische Infrastruktur zu betreiben und zu erhalten. Die Gesetzgebung äussert sich in funktionalen Anforderungen und gibt operativ die Ernennung mindestens einer verantwortlichen Person für Betrieb und Instandhaltung sowie eine Stellvertretung vor. Die Verantwortung über die Infrastruktur kann nicht ausgelagert werden, operative Tätigkeiten jedoch schon.

Das Bundesamt für Verkehr überprüft als Aufsichtsbehörde periodisch, ob die VBG

- den betriebssicheren Zustand der Infrastruktur und einen dauerhaften Betrieb gewährleisten kann,
- den Zustand der Infrastruktur jederzeit überblicken kann,
- die Dokumentation sauber führt und den Prozessen wie vorgesehen nachlebt,
- die Führungsinstrumente auf die Zielvorgaben ausrichtet.

Die VBG als Infrastrukturkonzessionärin führt in diesem gesteckten Rahmen folgende Arbeiten bezüglich der festen Fahrbahn auf langen Brücken durch:

Tätigkeit	Häufigkeit	Beauftragter
Hauptinspektion der (Beton-) Kunstbauten	Alle 5 Jahre	Privates Ingenieurbüro
Widerstandsmessungen Spannglieder	Alle 3 Jahre	SGK
Zustandskontrolle Gleisanlage generell inkl. Inspektionsbericht	2x pro Jahr	EHB GOB
Inspektion Schienenauszüge	1x/2x pro Jahr	EHB GOB
Messung Schienenauszüge inkl. Protokollierung	jeden Monat	EHB GOB
Instandhaltung Schienenauszüge (Schmieren, Reinigen und Abschmirlen)	2x pro Jahr	EHB GOB
Reinigung Gleisanlagen	4x pro Jahr	EHB GOB
Brückenreinigung inkl. Spülen Entwässerungen	1x pro Jahr	EHB GOB

SGK: Schweiz. Gesellschaft für Korrosionsschutz

EHB GOB: Erhaltungsbeauftragter Gleisoberbau c/o Walo Bertschinger AG Gleisbau

Tabelle 16: Überwachungs- und Erhaltungsarbeiten auf den Viadukten der Glattalbahnen

Die Vorgaben für diese Tätigkeiten und deren Häufigkeiten stammen aus SIA-Normen, Empfehlungen der SGK und dem Reglement Einbau, Überwachung und Unterhalt Schienenauszüge der VBG. Die jährlichen Kosten für diese Tätigkeiten auf allen Viadukten der Glattalbahnen (totale Länge 2,3 km, 11 Schienenauszüge) belaufen sich auf gut CHF 200'000.-, davon rund 50% für die Schienenauszüge.

6.2. Messungen Schienenauszüge

6.2.1. Messwerte

Gemessene
Längsverschie-
bungen

Die monatlichen Messwerte der Schienenauszüge zeigen, dass der maximal mögliche Dehnwert (siehe Tabelle 8) nur zu rund einem Drittel erreicht wird. In der Tabelle 17 sind die bisherigen Maximalwerte zusammengestellt.

Viadukt Glattzentrum (VIGLA)					
Auszug	Extremwert 1	Datum/Wetter	Extremwert 2	Datum/Wetter	Dilatationsmass ausgenutzt:
8 (links)	-62	6.2.2012: -9°, schön	17	28.6.2011: 30°, sonnig	26.3%
+/-150mm	-62	6.2.2012: -9°, schön	16	28.6.2011: 30°, sonnig	26.0%
8 (rechts)	-68	6.2.2012: -9°, schön	15	28.6.2011: 30°, sonnig	27.7%
+/-150mm	-68	6.2.2012: -9°, schön	16	28.6.2011: 30°, sonnig	28.0%
13 (links)	-83	6.2.2012: -9°, schön	12	28.6.2011: 30°, sonnig	31.7%
+/-150mm	-85	6.2.2012: -9°, schön	13	28.6.2011: 30°, sonnig	32.7%
13 (rechts)	-81	6.2.2012: -9°, schön	11	28.6.2011: 30°, sonnig	30.7%
+/-150mm	-82	6.2.2012: -9°, schön	12	28.6.2011: 30°, sonnig	31.3%
23 (links)	-60	6.2.2012: -9°, schön	25	28.6.2011: 30°, sonnig	28.3%
+/-150mm	-58	6.2.2012: -9°, schön	25	28.6.2011: 30°, sonnig	27.7%
23 (rechts)	-54	6.2.2012: -9°, schön	30	28.6.2011: 30°, sonnig	28.0%
+/-150mm	-55	6.2.2012: -9°, schön	30	28.6.2011: 30°, sonnig	28.3%
29 (links)	-34	6.2.2012: -9°, schön	9	28.6.2011: 30°, sonnig	14.3%
+/-150mm	-32	6.2.2012: -9°, schön	8	28.6.2011: 30°, sonnig	13.3%
29 (rechts)	-36	6.2.2012: -9°, schön	8	28.6.2011: 30°, sonnig	14.7%
+/-150mm	-36	6.2.2012: -9°, schön	7	28.6.2011: 30°, sonnig	14.3%
37/38 (links)	-91	6.2.2012: -9°, schön	29	28.6.2011: 30°, sonnig	30.0%
+/-200mm	-90	6.2.2012: -9°, schön	28	28.6.2011: 30°, sonnig	29.5%
37/38 (rechts)	-96	6.2.2012: -9°, schön	22	28.6.2011: 30°, sonnig	29.5%
+/-200mm	-96	6.2.2012: -9°, schön	23	28.6.2011: 30°, sonnig	29.8%

Tabelle 17: Maximale und minimale Auszugswerte der Schienenauszüge auf dem Viadukt Glattzentrum seit Inbetriebnahme im Dezember 2010 (Messungen berücksichtigt bis März 2012)

Detaillierter dargestellt ist Abbildung 18 für den Schienenauszug 13, links mit dem höchsten ausgenutzten Dilatationsmass.

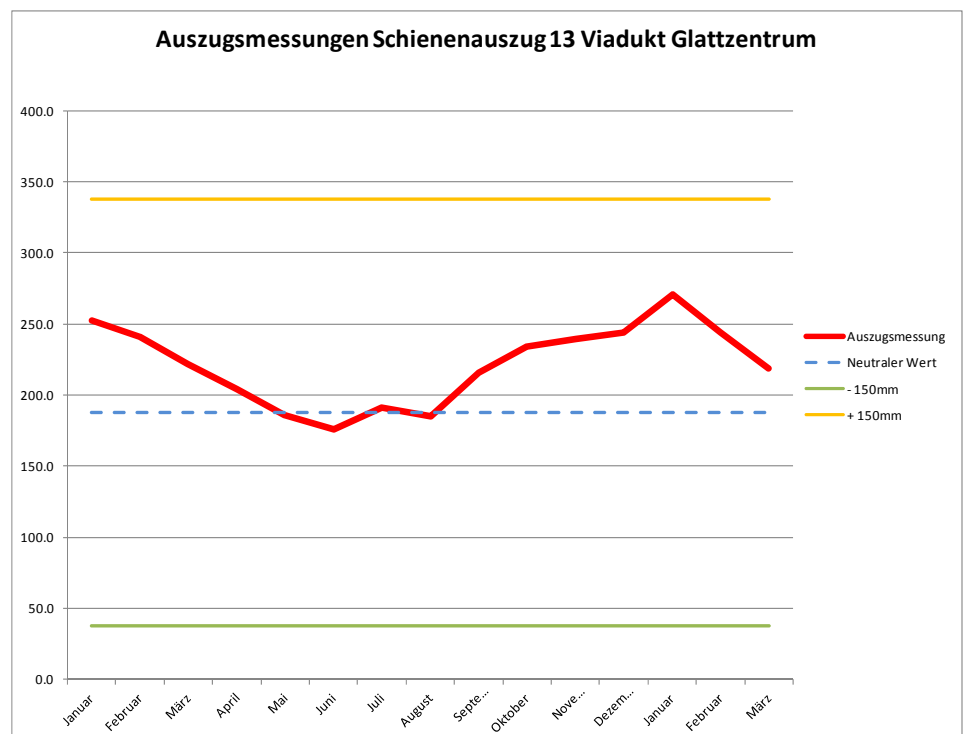


Abbildung 18: Gemessene Längsverschiebungen des Schienenauszugs 13 im Jahr 2011

Vorhersage und
Messung müssen
abgestimmt sein

6.2.2. Interpretation

Bei einem Vergleich zwischen Vorhersage und Messung ist stets darauf zu achten, dass bei der Messung alle Einflussfaktoren zum Tragen kommen. Dies ist hier nicht der Fall. Vergleichen wir Nennweiten (zulässige Auszugweite) oder die vorhergesagten Längs-Deformationen der einzelnen Schienenauszüge mit den gemessenen Längsverschiebungen, dann zeigen sich folgende Verhältnisse:

1. Verhältnis der prognostizierten Deformationen zu den Nennweiten der Schienenauszüge

Schienenauszüge sind Produkte, die in bestimmten Regel-Größen gebaut werden. Die Grösse wird aufgrund der prognostizierten Gesamtdeformationen (Brücke und Schiene) bestimmt. Es liegt in der Natur der Sache, dass jeweils passende Auszüge so gewählt werden, dass deren Nennwert über den Prognosewerten liegt. Angesichts der hohen Risiken im Falle einer Überschreitung der maximal möglichen Verschiebungswege sind entsprechende Reserven und Sicherheitsmargen zu berücksichtigen.

Im vorliegenden Fall wurde für den Auszug 29 zudem der gleiche Typ wie in anderen Auszügen eingesetzt, obwohl auch ein etwas kleinerer Typ hätte gewählt werden können. Gründe dafür waren die Kosten für die Erhaltung sowie die werkvertragliche Regelung und damit verbundenen Kosten und Termine.

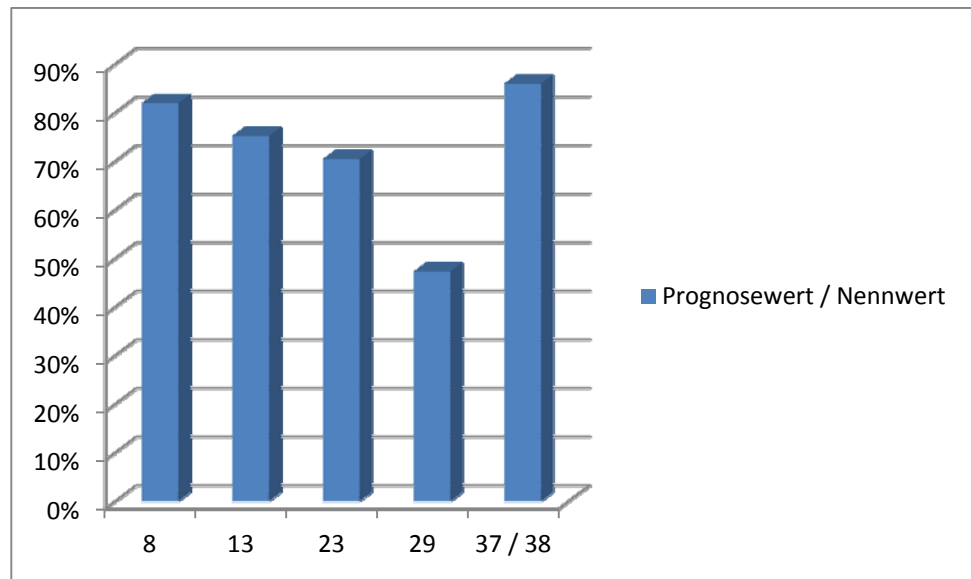


Abbildung 19: Vergleich zwischen Prognosewert und Nennwert der Schienenauszüge

2. Einflüsse, die in den Messwerten nicht enthalten sind

Solche Einflüsse sind:

- Geringere Temperaturdifferenz zwischen Messwerten und Bemessung
- Fehlende Verkehrslasten, namentlich Brems- und Anfahrlast der Züge
- Schwinden und Kriechen, was zu einer langfristigen, nicht gemessenen Deformation führt

3. Einstellung des Mittelwertes beim Einbau

Je nach Schienenauszug ist auch damit zu rechnen, dass der mittlere Einstellwert beim Einbau nicht genau dem mittleren Wert der jährlichen Deformationen entspricht (siehe Diagramm Abbildung 20). Der Grund dafür ist, dass die Stellung der Brücke im Verhältnis zu diesem mittleren Jahreswert zum Zeitpunkt des Einbaus nicht genau genug ermittelt werden kann. Dies muss bei der Wahl der Nennweite des Auszuges mitberücksichtigt werden.

Eine Abschätzung der Verhältnisse ohne und mit Berücksichtigung der Faktoren 1 und 2, nicht aber des Faktors 3, zeigt das nächste Diagramm.

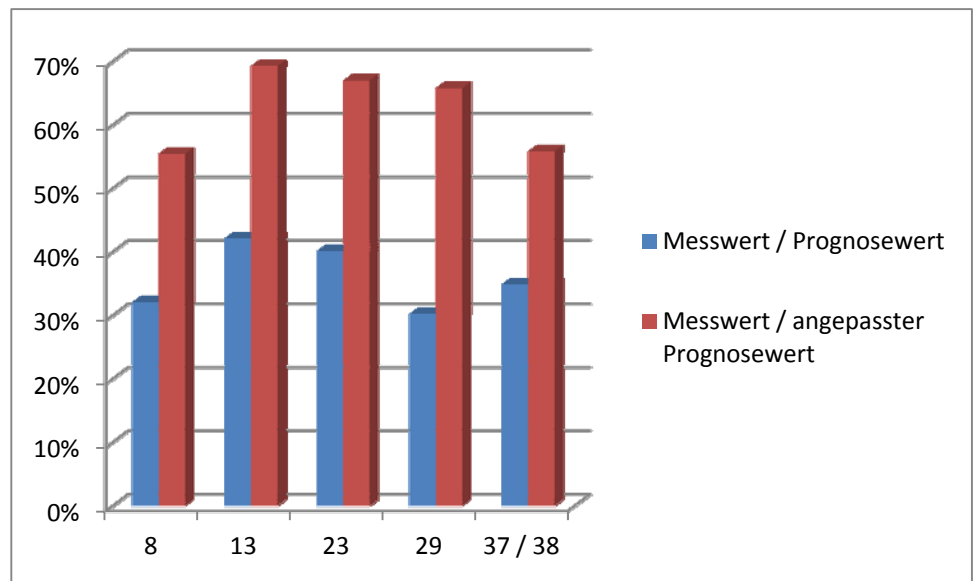


Abbildung 20: Vergleich zwischen Messwert, angepasstem Messwert und Prognosewert der Schienenauszüge

Ausreichende und
angemessene
Sicherheitsreserve

So betrachtet zeigt es sich, dass das Ergebnis der Messungen 50 bis 70% der Prognosewerte erreicht. Oder anders ausgedrückt, die Reserve beträgt noch ca. 30 bis 50% des maximal möglichen Dehnweges. Dies ist unter den gegebenen Umständen und Risiken und unter ingenieurmässigen Gesichtspunkten zwar eine erhebliche, aber durchaus angemessene Sicherheitsreserve.

7. Empfehlungen für zukünftige Projekte

Empfehlung
aus Erfahrung

Die Erfahrungen der Glattalbahnen können für ähnliche zukünftige Projekte von Nutzen sein. Es können folgende Feststellungen und Empfehlungen weitergegeben werden:

Feste Fahrbahn auf Brücken ist keine Standardbauweise

Aufgrund dieser Feststellung sollte grosses Gewicht auf das Fachwissen und die einschlägige Erfahrung aller am Projekt und Bau beteiligten Schlüsselpersonen gelegt werden. Und dies auf allen Stufen (Bauherrschaft resp. deren Treuhänder, Projektverfasser, Unternehmer).

Frühe Zusammenarbeit ist von zentraler Bedeutung

Es wäre falsch, zuerst die Brücken und dann den Gleisoberbau zu planen und zu optimieren. Nur wenn Brückenbauwerk und Gleisoberbau als eine Einheit aufgefasst werden, sind technisch, wirtschaftlich und gestalterisch optimale Lösungen möglich. Die enge Zusammenarbeit sollte möglichst früh, am besten ab dem Vorprojekt, erfolgen. Unerlässlich ist die intensive Koordination und Zusammenwirkung ab der Phase Bauprojekt und bei der Ausschreibung.

Früher Zeitpunkt des Systementscheids für den Gleisoberbau

Ob auf einem Ingenieurbauwerk eine feste Fahrbahn oder ein konventionelles Schottergleis errichtet wird, ist für den Brückenbau von zentraler Bedeutung. Deshalb muss der Systementscheid zu einem frühen Zeitpunkt, spätestens vor der Festlegung des Brücken-Tragkonzeptes und der Ausschreibung des Brückenbaus, erfolgen. Dies unabhängig davon, ob für die Brücke eine konventionelle oder eine Totalunternehmer-Ausschreibung erfolgt.

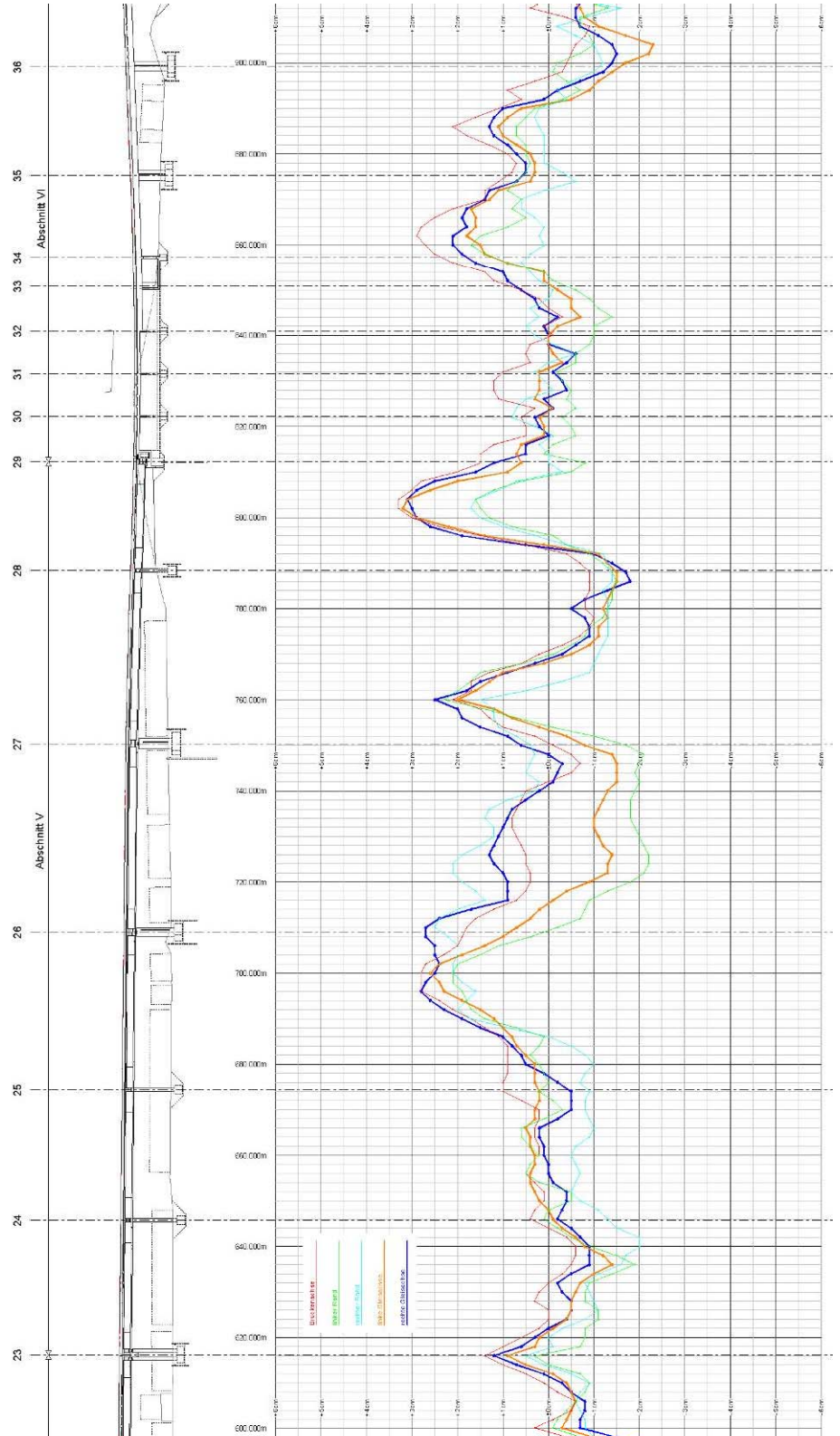
Lernende Organisation

Wenn es möglich ist, innerhalb eines grösseren Gesamtprojekts in mehreren Etappen Erfahrungen zu sammeln, so ist es von grossem Nutzen, wenn Erfahrungen von frühen Etappen in spätere Etappen einfließen. Die lernende Organisation macht dies möglich. Dabei geht es darum, Erfahrungen – auch Fehler – laufend zu sammeln, zu analysieren und durch geeignete Umsetzung weiter zu tragen.

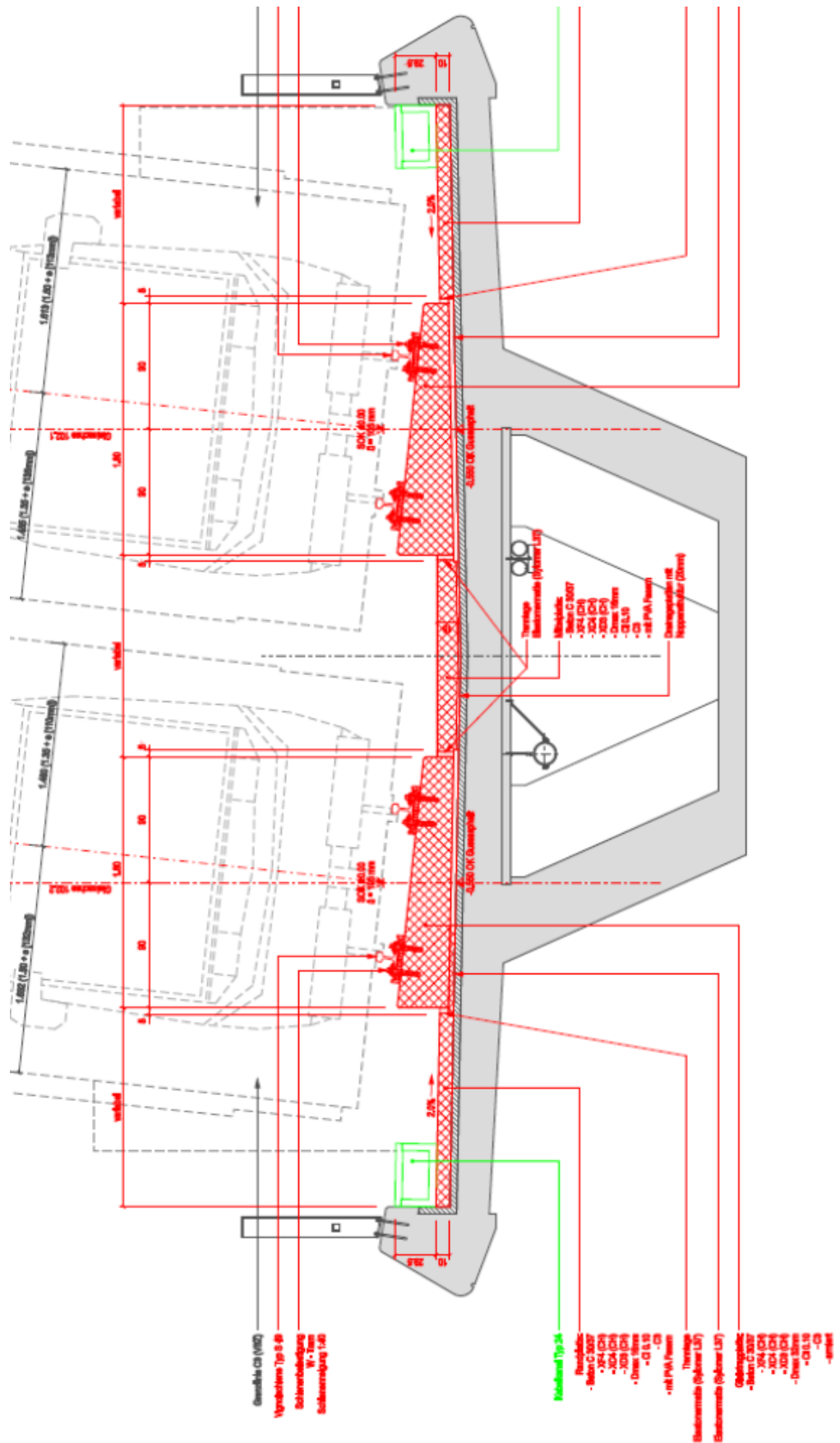
Anhänge

Anhang 1 Höhenkontrolle am Viadukt Glattzentrum

Detaillierte Höhenkontrolle vor Übergabe an die Bahntechnik



Anhang 2 Fahrbahn auf Viadukt Glattzentrum, Querschnitt



Anhang 3 Ermittlung der Einwirkungskräfte Fahrbahn – Brücke¹

1. Brücken allgemein

1.1. Kräftefluss horizontal quer

In horizontaler Richtung quer zur Gleisachse wirken die Zentrifugalkräfte aus gekrümmter Streckenführung und Seitenstösse, die durch Schlingerbewegungen der Fahrzeuge verursacht werden.

1.2. Schlingerkraft

Charakteristischer Wert der Schlingerkraft nach Lastmodell 4 gemäss SIA 261:

$$QS_k = 50 \text{ kN}$$

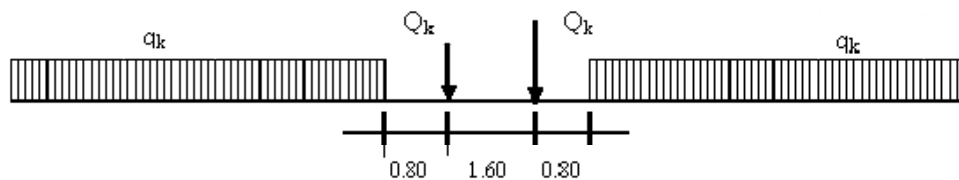
Diese Einzellast wird in ungünstigster Stellung auf der Höhe der Fahrebene angesetzt.

1.3. Zentrifugalkräfte

Allgemeine Laststellung für Bahnverkehrslasten nach Lastmodell 4 für Schmalspurbahnen im Stadt- und Agglomerationsverkehr gemäss SIA 261:

charakteristischer Wert der Einzellasten $Q_k = 130 \text{ kN}$

charakteristischer Wert der verteilten Lasten $q_k = 25 \text{ kN/m}$



Der charakteristische Wert der Zentrifugalkraft ist abhängig von den charakteristischen Werten der Bahnverkehrslasten:

Dabei bezeichnen g die Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$), r den Krümmungsradius (m), v die Ausbaugeschwindigkeit (m/s).

$$QZ_k = \frac{v^2 * Q_k}{r * g}$$

$$qZ_k = \frac{v^2 * q_k}{r * g}$$

¹ Auszug aus Expertenbericht Fahrbahn auf Kunstbauten, 25.02.2004

Der ungünstigste Krümmungsradius wird über die zulässige Geschwindigkeit, Überhöhung und nicht kompensierte Seitenbeschleunigung gerechnet:

$$p = \frac{v^2}{13 * r} - g * \frac{\ddot{u}}{s} \quad \Rightarrow \quad r = 316 \text{ m}$$

mit $p = 0,8 \text{ m/s}^2$ (Grenzwert der Zentrifugalbeschleunigung)

$$v = 70 \text{ km/h}$$

$$\ddot{u} = 40 \text{ mm}$$

$$s = 1000 \text{ mm}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Daraus ergeben sich für die anzusetzenden Zentrifugalkräfte folgende Ergebnisse:

$$QZ_k = 0.122 Q_k$$

$$qZ_k = 0.122 q_k$$

1.4. Seitenkraft aus innerer Temperaturspannung in der Bogenfahrt

Bei durchgehend verschweissten Schienen ist keine Längsbewegung der Schiene möglich, wodurch sich die inneren Längskräfte erhöhen. Bei einer Bogenfahrt wirken diese Kräfte als nach aussen drückende Seitenkräfte.

Berechnungsgrundlagen:

$$\Delta T = 35^\circ\text{C} \quad \text{Differenz zwischen Schiene (T}_{\max}\text{) und Brücke (T}_0\text{)}$$

$$(\Delta T = T_{\max} - T_0 = 60^\circ - 25^\circ)$$

$$\alpha = 1.2 * 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C} \quad \text{Temperaturkoeffizient für Stahl}$$

$$E = 2.1 * 10^5 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Elastizitätsmodul}$$

$$A = 6290 \text{ mm}^2 \quad \text{Querschnittsfläche pro Schiene S49}$$

$$\text{Längskräfte pro Schienenpaar } \triangleq \text{ pro Gleis: } P_{\max} = \alpha * \Delta T * E * A * 2 = 1110 \text{ kN}$$

Resultierende Seitenkraft für Kreisbogen $R = 110 \text{ m}$, $L = 90 \text{ m}$ (Maxima im Projekt)

$$\frac{\pi * \alpha}{2 * 360^\circ} * R^2 = \frac{L * R}{2}$$

$$\Rightarrow \alpha = 23.4^\circ$$

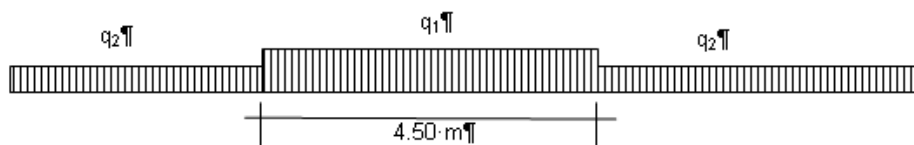
$$S = 2 * P_{\max} * \sin \alpha = 880 \text{ kN}$$

Als verteilte Querkraft über eine Länge von 4,50 m kann näherungsweise (konservative Annahme einer Dreiecksverteilung) angesetzt werden

$$\Rightarrow q_{\text{Temp}} = 19.5 \text{ kN/m.}$$

1.5. Resultierende Laststellung

Die oben berechneten Kräfte werden zu einer Linienlast zusammengefasst. Diese Belastung der Brücke durch den Gleisoberbau ergibt sich für eine Gleistragplatte von 4,5 m Länge, dabei wird angenommen, dass die Platte in Querrichtung biegesteif ist.



$$q_1 = \Sigma QZ_k + \Sigma qZ_k + QS_k/4.5 + q_{\text{Temp}} = 0.122 \cdot (130 \cdot 2 + 25 \cdot 1.30)/4.5 + 50/4.5 + 19.5 = 38.5 \text{ kN/m}$$

$$q_2 = qZ_k = 0.122 \cdot 25 = 3.05 \text{ kN/m}$$

1.6. Kräftefluss horizontal längs

Anfahr- und Bremskräfte wirken in der Gleisachse auf der Höhe der Fahrbene und sind gleichmäßig verteilt anzunehmen.

Temperaturkräfte erzeugen bei einem lückenlosen Gleis nur innere Spannungen und werden daher hier nicht berücksichtigt.

Charakteristische Werte der Anfahr- und Bremskräfte für Schmalspur gemäss SIA 261, Abschnitt 12.2.2:

$$QA_k = 0.30 \cdot Q_k$$

$$QB_k = 0.25 \cdot q_k$$

(Q_k bzw. q_k bezeichnen die Summe der Bahnverkehrslasten)

Da die Bremskräfte stets kleiner als die Anfahrkräfte sind, werden sie hier nicht weiter berücksichtigt.

$$QA = 0.30 \cdot Q_k = 0.3 \cdot (130 \text{ kN} \cdot 2 + 25 \text{ kN/m} \cdot 1.30) = 88 \text{ kN}$$

Verteilt als Linienlast auf einer Gleistragplatte entspricht dies einer Belastung von 19.5 kN/m.

Die Schubspannung zwischen Fahrbahnplatte (Länge 4,5 m, Breite 1,5 m) und Brücke errechnet sich zu:

$$\tau = \frac{QA}{A} = \frac{88 \cdot 10^3 \text{ N}}{4.5 \cdot 1.5 \cdot 10^6 \text{ mm}^2} = 0.013 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bei Verwendung einer Elastomermatte vom Typ Sylomer M12 (Schubmodul $G=0.3 \text{ N/mm}^2$, Dicke $h=12 \text{ mm}$) ergibt sich eine Schubdeformierung von

$$\delta = \frac{\tau \cdot h}{G} = \frac{0.013 \cdot 12}{0.3} = 0.5 \text{ mm}$$

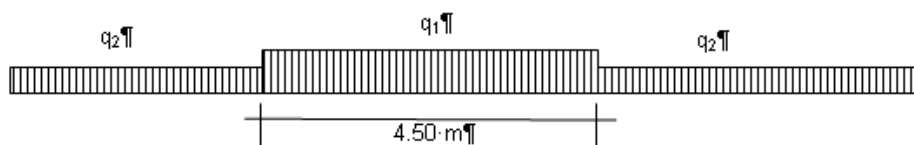
Diese Deformierungen sind so gering, dass die Lasten aus Anfahren durch Schub über die Matten abgetragen werden können.

2. Brücken mit Schienenauszug

2.1. Kräftefluss horizontal quer

In horizontaler Richtung quer zur Gleisachse wirken die Zentrifugalkräfte aus gekrümmter Streckenführung und Seitenstöße, die durch Schlingerbewegungen der Fahrzeuge verursacht werden. Die Seitenkräfte aus Temperaturspannungen entfallen unmittelbar beim Schienenauszug, weil die Schienen getrennt sind. Nach dem Schienenauszug sind die Schienen festgeklemmt und die Radialkräfte entsprechen wieder denjenigen gemäss Kapitel 2.1.3.

Die berechneten Kräfte werden wieder zu einer Linienlast zusammengefasst. Diese Belastung der Brücke durch den Gleisoberbau ergibt sich für eine Gleistragplatte von 4,5 m Länge, dabei wird angenommen, dass die Platte in Querrichtung biegesteif ist.



$$\begin{aligned} q_1 &= \Sigma QZ_k + \Sigma qZ_k + QS_k/4.5 \\ &= 0.122 \cdot (130 \cdot 2 + 25 \cdot 1.30) / 4.5 + 50 / 4.5 \\ &= 19.0 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$q_2 = qZ_k = 0.122 \cdot 25 = 3.05 \text{ kN/m}$$

2.2. Aufnahme der Längskräfte inkl. Längskräfte aus Temperatur

2.2.1. Anfahr- und Bremskräfte

Die detaillierte Berechnung der Längskräfte aus Anfahren und Bremsen ist unter Punkt 1. dargestellt. Es können auch hier die Lasten aus Anfahren durch Schub über die Matten abgetragen werden.

2.2.2. Temperaturkräfte

Im Bereich unmittelbar vor und nach dem Schienenauszug treten Temperaturkräfte auf, die durch den Gleisoberbau aufgenommen werden müssen.

$$\begin{aligned} \Delta T &= 35^\circ && \text{Differenz zwischen Schiene } (T_{\max}) \text{ und Brücke } (T_0) \\ & && (\Delta T = T_{\max} - T_0 = 60^\circ - 25^\circ) \end{aligned}$$

$$\alpha = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C} \quad \text{Temperaturkoeffizient für Stahl}$$

$$E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Elastizitätsmodul}$$

$$A = 6290 \text{ mm}^2 \quad \text{Querschnittsfläche pro Schiene S49}$$

$$\text{Längskräfte pro Schienenpaar } \triangleq \text{ pro Gleis: } P_{\max} = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot A \cdot 2 = 1110 \text{ kN}$$

Die Längskräfte können aufgrund der weiteren Deformation der Elastomermatte und durch Deformationen der Brückenplatte je nach Art der konstruktiven Lösung um ca. 30% abgemindert werden.

Impressum

Verfasser

Dr. Mathias Grenacher

Beat Meier

Gérard Rutishauser

Hannes Schneebeili

Bildnachweis

Simon Vogt, sights

Tres Camenzind

VBG Verkehrsbetriebe Glattal AG

Hinweis zu Literatur und Quellen

Auf Quellenangaben aus dem Projekt Glattalbahn wird angesichts der Fülle von Berichten und Plänen zum Thema verzichtet.

Glattbrugg, Februar 2013

VBG Verkehrsbetriebe Glattal AG

Sägereistrasse 24

8152 Glattbrugg

044 809 56 00

www.vbg.ch

www.glattalbahn.ch