

Diplomarbeit

Zum Potenzial der Festen Fahrbahn bei Schmalspurbahnen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieurin

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

On the Potential of Slab Track in Narrow-Gauge Railways

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieurin

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Agnes Forstinger, BSc

Matr.Nr.: 01426025

Betreuung: Univ.-Ass. Dipl.-Ing. **Markus Lagler**, BA BSc
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für spurgebundene Verkehrssysteme
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Juni 2023



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Seit einigen Jahrzehnten kommen vor allem auf den stark befahrenen Hauptstrecken des normalspurigen europäischen Schienennetzes bei Neubauten und Sanierungen zunehmend Feste Fahrbahnen zum Einsatz. Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Frage, ob und wenn ja, inwiefern die Schmalspurbahnen des Alpenraums von den Vorteilen von Festen Fahrbahnen profitieren können.

Zu diesem Zweck werden zunächst spurweitenabhängige Unterschiede in der Entwicklung der Gleislagequalität erörtert. Ein weiterer grundlegender Teil der Arbeit befasst sich mit den in Europa verbreiteten Systemen von Fester Fahrbahn, deren Charakteristika und Unterschieden sowie der Frage ihrer Anpassbarkeit an geringere Spurweiten. Den letzten Teil der Grundlagenrecherche bildet ein Kapitel über die bisher von Eisenbahninfrastrukturunternehmen angewendeten Kriterien zur Entscheidung für oder gegen den Bau einer Fester Fahrbahn.

Im Zuge der Arbeit werden darüber hinaus Beispiele von Tunnelsanierungen in Kombination mit dem Einbau einer Fester Fahrbahn sowie eine Sonderanwendung der Fester Fahrbahn bei der Pinzgauer Lokalbahn vorgestellt.

Das Fazit aus der weit gefassten Recherche und den vorgestellten Anwendungsbeispielen ist, dass die Errichtung von Festen Fahrbahnen bei Schmalspurbahnen vor allem in Tunneln zweckmäßig ist. Für andere Fälle werden Empfehlungen für die Entscheidungsfindung gesammelt. Diese beziehen sich vor allem auf die zweckmäßige Ausgestaltung eines Lebenszykluskostenvergleichs, der vor derartigen Entscheidungen bei großen Eisenbahninfrastrukturunternehmen durchgeführt wird.

Auf diesen Teil folgt ein Kapitel, in dem auf bestehende Probleme der niederösterreichischen Mariazellerbahn eingegangen wird. Unter Verwendung der in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse werden Lösungen und Verbesserungsmaßnahmen insbesondere bezüglich der Situation im Gösingtunnel vorgeschlagen.

Im abschließenden Kapitel werden im Anschluss an eine Reflexion der Arbeit weiterführende Forschungsmöglichkeiten aufgezeigt.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

On the intensively frequented main lines of the European standard gauge railway network the use of slab track has become increasingly popular during the last decades both for the construction of new sections and renovation purposes. The master thesis at hand deals with the question if and, if yes, how the narrow-gauge secondary railways of the Alpine region can profit from the advantages of slab track.

For this purpose, the differences in the development of track quality that are dependent on track gauge are discussed at first. The ensuing chapter deals with the slab track systems common in Europe, their characteristics, differences and adaptability to narrow track gauges. The last part of the foundational research of this thesis consists of a chapter on the documented decision-making criteria used so far by railway infrastructure companies contemplating building a slab track or a ballasted track.

A further chapter presents examples of tunnel restoration works making use of slab track as well as a special application of slab track on the Austrian Pinzgauer Lokalbahn.

The conclusion of the previous reflections is that the use of slab track on narrow-gauge railway lines is mainly advisable in tunnel situations. As regards other cases, the thesis lists recommendations for the decision-making process, especially concerning the comparative life cycle cost analysis usually carried out prior to decisions of that kind by big railway infrastructure companies.

This part is followed by a chapter in which current problems of the Austrian Mariazellerbahn are discussed. Applying the insight gained in writing this thesis, solutions and improvement measures are proposed especially concerning the situation in the Gösingtunnel.

The last chapter consists of a reflexion on the thesis and the definition of further research questions.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Ich möchte mich bei meinem Betreuer Markus Lagler bedanken, der mir eine Vertiefung in ein sehr spannendes bautechnisches Thema ermöglicht hat, obwohl dies nicht der Schwerpunktsetzung des Forschungsbereichs für spurgebundene Verkehrssysteme entspricht.

Für den fachlichen Austausch, die Bereitstellung von Unterlagen und den ein oder anderen Hinweis oder Kontakt bedanke ich mich bei:

Nina Avramovic Trninic (BMK, Wien)
Stefan Pavlicek (FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, Wien)
Ehrenfried Lepuschitz (FSV, Wien)
Andreas Oberhauser (Global Rail Group, Wien)
Philipp Weis (Amt der Salzburger Landesregierung, Salzburg)
Markus Schreilechner (NÖVOG, St. Pölten)
Christian Postl (NÖVOG, St. Pölten)
Peter Tauschitz (ÖBB Infrastruktur AG, Wien)
Christian Florin (Rhätische Bahn AG, Chur)
Thomas Gasner (Rhätische Bahn AG, Chur)
Urs Tanner (Rhätische Bahn AG, Chur)
Tino Christoffel (Schneider Ingenieure AG, Chur)
Rudolf Kutschera (VSP Stolzka & Partner Ziviltechniker GmbH, Wien)
Patrick Schwalbe (VSP Stolzka & Partner Ziviltechniker GmbH, Wien)

Mein persönlicher Dank gilt meinen Eltern Eva und Martin Forstinger, meinen Großeltern Hermine und Leopold Stöger und natürlich Katrin Zierler – ohne eure vielfältige Unterstützung hätte ich es niemals an diesen Punkt geschafft.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Zielsetzung und Aufbau	11
1.2	Methodik	12
1.3	Thematische Abgrenzung	12
2	Begriffsdefinitionen	13
2.1	Technische Begriffe aus dem Eisenbahnwesen	13
2.2	Wirtschaftliche und organisatorische Begriffe	15
3	Besonderheiten der Gleislage bei Schmalspurbahnen	16
3.1	Problemstellung	16
3.2	Unterschiede zwischen Normalspur und Schmalspur	17
3.2.1	Innere Parameter der Gleislagestabilität	17
3.2.2	Äußere Parameter der Gleislagestabilität	19
3.3	Die Fallstudie von Marchetta et al.	19
3.3.1	Beschreibung der Studie	19
3.3.2	Ergebnisse der Studie	20
3.4	Das Phänomen der Bogenatmung	22
3.4.1	Einflussfaktoren	23
3.4.2	Resultierende Probleme	25
3.5	Relevanz für das Potenzial der Festen Fahrbahn	25
3.5.1	Studienergebnisse von Marchetta et al. [15]	25
3.5.2	Weitere Überlegungen	26
4	Gängige Systeme von Fester Fahrbahn und ihre Anpassbarkeit auf geringere Spurweiten	27
4.1	Geschichte	27
4.2	Wahl der Systematik	28
4.3	Beschreibung der bestehenden Bauarten	30
4.3.1	Kompakte Bauarten	30
4.3.2	Elastische Schwellenlagerung	37
4.3.3	Aufgelagerte Bauarten	42
4.3.4	Monolithische Bauarten	49
4.3.5	Bauarten mit Fertigteilplatten	54
4.3.6	Kontinuierliche Lagerung	60
4.4	Eignung der verfügbaren Bauarten für Schmalspurbahnen	63
4.4.1	RHEDA	65
4.4.2	RHEDA 2000	65
4.4.3	LVT	65
4.4.4	GETRAC	65
4.4.5	IVES	66

4.4.6	Pinzgauer Lokalbahn	66
4.4.7	BÖGL und ÖBB-PORR	66
4.4.8	RhB	66
4.4.9	EDILON	67
4.5	Regionale Spezifika	67
4.6	Dauerhaftigkeitsaspekte	67
4.6.1	Untersuchungen an Betonfahrbahnen	68
4.6.2	Alterung von Asphaltssystemen	69
5	Entscheidungskriterien zwischen Schotteroberbau und Fester Fahrbahn	71
5.1	Grundlagen	74
5.1.1	Ausgangslage und Ziele	74
5.1.2	Szenarienbildung	74
5.2	Definition der Anforderungen	75
5.3	Ausarbeitung der Entscheidungsgrundlagen	77
5.3.1	Vergleich der Lebenszykluskosten	77
5.3.2	Einbeziehung von Trassierungseigenschaften, Erd- und Ingenieurbauwerken	86
5.3.3	Weitere Potenziale aus dem Umfeld	87
5.4	Entwicklung des Entscheidungsbaums	89
5.4.1	Empfehlungen für die Gleiserneuerung	89
5.4.2	Empfehlungen für den Neubau	91
5.4.3	Empfehlungen für die Leistungserhöhung	91
5.4.4	Detailanalyse	92
5.5	Projektfazit	92
5.6	Noch nicht berücksichtigte Aspekte	93
5.6.1	Tunnel	93
5.6.2	Brücken	95
5.6.3	Baukostenzuschüsse	96
5.6.4	Bauzeitunterschiede	96
5.6.5	Trassierung	96
5.6.6	Schienenverschleiß	99
5.6.7	Setzungen	99
5.6.8	Reparatur und Havarie	100
5.6.9	Körperschall und Erschütterungen	101
5.6.10	Luftschall	101
5.6.11	Amphibienquerung	102
5.6.12	Vegetationskontrolle	102
5.6.13	Rückbau, Recycling und Entsorgung	102
5.6.14	Vertragliche Aspekte	102
5.7	Internationaler Vergleich	102
6	Gebaute Beispiele und dokumentierte Erfahrungen	104
6.1	Tunnelsanierungen	104
6.1.1	Profilaufweitung meterspuriger Tunnel in der Schweiz mit der „Normalbauweise Tunnel“	104
6.1.2	Neubau des Bahntunnels und Umnutzung des Bestandstunnels als Rettungsstollen in der Schweiz	107
6.1.3	Tunnelsanierungen mit dem System ÖBB-PORR	108
6.1.4	Normalspurige Tunnel der DB	109

6.2	Pinzgauer Lokalbahn	113
6.2.1	Problemstellung	113
6.2.2	Entwicklung einer Lösung	113
6.2.3	Laufende Baumaßnahmen	114
7	Ergebnisse	117
7.1	Gibt es bezüglich der Gleislage Unterschiede zwischen Schmalspur und Normalspur? 117	117
7.2	Wo ist Feste Fahrbahn sinnvoll?	117
7.2.1	Anwendung in Tunneln	117
7.2.2	Andere Anwendungsfälle	118
7.3	Welche ist die bestgeeignete Feste Fahrbahn?	119
8	Betrachtung der Mariazellerbahn	120
8.1	Geschichte der Strecke und ihrer Tunnel	120
8.2	Aktuelle Situation im Gösingtunnel	120
8.2.1	Entwässerung	121
8.2.2	Querschnittsabmessungen	122
8.3	Empfehlung	122
8.3.1	Planung und Voruntersuchungen	122
8.3.2	Geeignete Bauarten der Festen Fahrbahn	123
8.3.3	Sonstige Empfehlungen	123
9	Reflexion und weiterführender Forschungsbedarf	125
9.1	Reflexion	125
9.2	Weiterer Forschungsbedarf	126
9.2.1	Gleislagequalität	126
9.2.2	Trassierung	127
9.2.3	Verschleiß und Gebrechen	127
9.2.4	Errichtung und Abbruch	128
9.2.5	Allgemeines	129
	Abbildungsverzeichnis	130
	Tabellenverzeichnis	132
	Abkürzungsverzeichnis	133
	Literatur	135

Kapitel 1

Einleitung

Bei normalspurigen Bahnen wird die Feste Fahrbahn (FF) als Alternative zum herkömmlichen Schotteroberbau seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich eingebaut und betrieben. Der klassische Anwendungsbereich dieser Oberbauform sind einerseits Strecken für den Hochgeschwindigkeitsverkehr sowie andererseits Bereiche mit langen Tunneln (z. B. tiefliegende U-Bahnen), wo die FF gegenüber einem Schotteroberbau mit ähnlichen Eigenschaften mit einem kleineren Tunnelquerschnitt das Auslangen findet. Für diese Verwendungszwecke liegen Erfahrungsberichte und wissenschaftliche Studien zu den verschiedensten Aspekten in großem Umfang vor.

Bei Schmalspurbahnen, die sich nicht nur durch die namensgebende geringere Spurweite, sondern auch durch ihre Verwendung und Trassierung als Nebenstrecken in oft unwegsamem Gelände stark von den eingangs erwähnten Streckentypen unterscheiden, kommt diese neue Oberbauform noch kaum zum Einsatz. Da auch diese Bahnen von den vielfältigen Vorteilen der Festen Fahrbahn gegenüber dem Schotteroberbau (z. B. höhere Flexibilität bei den Trassierungsparametern, stabilere Gleislage, geringerer Instandhaltungsaufwand, geringere Aufbauhöhe, ...) profitieren können, wird in dieser Diplomarbeit analysiert, unter welchen Umständen die Feste Fahrbahn auch bei Schmalspurbahnen zweckmäßig eingesetzt werden kann.

1.1 Zielsetzung und Aufbau

Ziel dieser Arbeit ist in einem ersten Schritt die Beantwortung der folgenden Fragen:

- Inwiefern unterscheidet sich die Entwicklung der Gleislagequalität bei Schmalspurbahnen von der bei normalspurigen Bahnen?
- Gibt es Unterschiede bezüglich der relevanten Einflussfaktoren?
- Welche Arten von Fester Fahrbahn gibt es aktuell im europäischen Raum und wie unterscheiden sich diese voneinander?
- Inwiefern sind die einzelnen Bauarten an den Einbau bei verringerter Spurweite anpassbar?
- Welche Voraussetzungen sind zu erfüllen, damit der Einbau einer Festen Fahrbahn auf einer Schmalspurstrecke sinnvoll ist?

Die Erörterung dieser Fragestellungen erfolgt in den Kapiteln 3 bis 5. Eine Beschreibung gebauter Beispiele von unter Verwendung einer Festen Fahrbahn durchgeführten Tunnelanierungen sowie einer Spezialanwendung von Fester Fahrbahn bei einer hochwassergeplagten österreichischen Schmalspurbahn in Kapitel 6 vervollständigt den Grundlagenteil dieser Diplomarbeit.

Unter Verfolgung des Ziels, auf möglichst wirtschaftliche Art und Weise die Nutzbarkeit der Infrastruktur durch nachhaltige Investitionen zu erhalten und die Betriebssicherheit zu erhöhen, werden aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen in einem zweiten Schritt in Kapitel 7 Handlungsempfehlungen abgeleitet. Den dritten Schritt bildet die Besprechung von aktuell an

den Anlagen der österreichischen Mariazellerbahn bestehenden Problemen und die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen mittels der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse in Kapitel 8.

Den Abschluss der vorliegenden Diplomarbeit bildet Kapitel 9 mit einer Reflexion sowie der Definition von vertiefendem Forschungsbedarf.

1.2 Methodik

Die vorliegende Diplomarbeit basiert auf umfassender Literaturrecherche und verwendet als Quellen Fachbücher, Hochschulschriften sowie Artikel aus Fachzeitschriften. Ergänzend wurden vor allem zum Thema der gebauten Beispiele auch sonstige Online-Quellen (z. B. Pressemeldungen von Eisenbahninfrastrukturunternehmen und Informationen aus Referenzen von ausführenden Unternehmen) herangezogen. Vor allem zu Bauabläufen sowie einzelnen Entwicklungsschritten von konkreten Bauverfahren oder Systemen von Fester Fahrbahn sind detaillierte Informationen jedoch oft nicht in schriftlicher Form verfügbar. Bezüglich der angestellten Überlegungen für die Pinzgauer Lokalbahn (vgl. Abschnitt 4.3.4.7 und Kapitel 6.2) sowie der umfangreichen Projekte der Rhätischen Bahn (vgl. Abschnitte 4.3.2.2, 4.3.5.6, 6.1.1 und 6.1.2.2) bedanke ich mich bei Philipp Weis (Referatsleiter im Referat 6/12 Öffentlicher Verkehr und Verkehrsplanung, Abteilung 6 Infrastruktur und Verkehr, Amt der Salzburger Landesregierung), Urs Tanner (Projektleiter Tunnelerneuerung, Rhätische Bahn AG), Thomas Gasner (Leiter Bahndienst Süd, Rhätische Bahn AG) und Tino Christoffel (Schneider Ingenieure AG, schweizerisch „Bauleiter“ und österreichisch „Leiter der örtlichen Bauaufsicht“ für die Feste Fahrbahn im Albulatunnel) für die mir mündlich oder per E-Mail zur Verfügung gestellten Informationen. Die Rhätische Bahn AG ermöglichte mir auch einen Vor-Ort-Besuch im Gletscherastunnel sowie auf der Baustelle des Albulatunnels. Markus Schreilechner (Leiter Unternehmensentwicklung, Niederösterreichische Verkehrsorganisationsges. m. b. H.) und Christian Postl (Leiter Infrastruktur Projekte, Niederösterreichische Verkehrsorganisationsges. m. b. H.) stellten mir dankenswerter Weise ihr Wissen über die Mariazellerbahn und den Gösingtunnel für Kapitel 8 zur Verfügung.

Wo immer verfügbar wurden die von den genannten Personen erhaltenen Informationen mit nach Möglichkeit öffentlich zugänglichen schriftlichen Quellen belegt.

1.3 Thematische Abgrenzung

Der Fokus dieser Diplomarbeit liegt auf Schmalspurbahnen mit Vollbahn-Querschnitt des Bahnkörpers bzw. Abschnitten von Schmalspurbahnen, die dieses Kriterium erfüllen. Straßenbahnen bzw. städtische Abschnitte von Schmalspurbahnen mit straßenbahnähnlicher Infrastruktur sind nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit, da dort gänzlich andere Überlegungen bzw. Kriterien für den Einbau von Festen Fahrbahnen anzuwenden sind. Auch die angebotenen Systeme von Fester Fahrbahn für Straßenbahnen unterscheiden sich zum Teil grundsätzlich von solchen für Vollbahnen.

Kapitel 2

Begriffsdefinitionen

In diesem Kapitel erfolgt eine Zusammenstellung der Begriffsdefinitionen inklusive allfälliger Abkürzungen, wie sie im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet werden.

2.1 Technische Begriffe aus dem Eisenbahnwesen

Schmalspur

Der Begriff Schmalspur bezieht sich auf alle Spurweiten von weniger als 1435 mm (Normalspur) [1]. Konkret werden in dieser Diplomarbeit Bahnen mit den Spurweiten gemäß Tabelle 2.1 betrachtet.

Spurweite [mm]	Bezeichnung	Vorkommen (u. a.)
1067	Kapspur	Japan, Süd- u. Zentralafrika
1000	Meterspur	Schweiz
950	-	Italien
760	bosnische Spur	ehemalige Donaumonarchie (v. a. Österreich, Ungarn und Tschechien)

Tab. 2.1: In dieser Diplomarbeit betrachtete Spurweiten

Oberbau

Der Oberbau ist der Teil des Bahnkörpers, der sich oberhalb des Planums befindet [2]. Er setzt sich aus Gleis- bzw. Weichenkonstruktion sowie Bettung bzw. unterer gebundener Tragschicht zusammen, je nachdem ob die Ausführung als Schotteroberbau oder als Feste Fahrbahn erfolgt [3].

Zwischen der Unterkante des Oberbaus (Planum) und der Oberkante des Unterbaus (Erdplanum) liegen gemäß der Definition von Lichtberger [2] von oben nach unten zuerst die Planumschutzschicht (PSS) und die Frostschutzschicht (FSS), die mit dem Überbegriff „ungebundene Tragschichten“ bezeichnet werden können [4]. In der Regel entfällt bei Festen Fahrbahnen die PSS, stattdessen kommt oft eine hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT) zum Einsatz. Diese wird jedoch als Teil des Oberbaus betrachtet und befindet sich somit oberhalb des Planums [2–4].

Schotteroberbau (SchO)

Der Schotteroberbau ist die bei Vollbahnen am weitesten verbreitete Oberbauform. Die Schienen werden hierbei auf Querschwellen in einem Schotterbett schwimmend verlegt [2, 3].

Die Bestandteile des Schotteroberbaus sind Schienen, Schwellen, Schienenbefestigungsmittel (auch „Kleineisen“ genannt [3]) sowie Gleisschotter [4].

Feste Fahrbahn (FF)

Die folgende Definition einer Festen Fahrbahn von Darr und Fiebig [4] wurde auch von M. Mach in seiner Dissertation 2011 [5] an ebendiesem Forschungsbereich zitiert:

„Unter dem Begriff *Feste Fahrbahn* wird eine *instandhaltungsarme Oberbaukonstruktion verstanden, bei der die lastabtragende Funktion des Gleisschotter durch gebundene Materialien ersetzt wird.*“

Zum Einsatz kommen meist Beton- und Asphalttragschichten, die auf hydraulisch gebundene Tragschichten aufgelagert werden. Ebenfalls gebräuchlich ist die Bezeichnung als schotterloser Oberbau, die jedoch in Abhängigkeit von der Bauart nicht immer zutrifft [4].

Je nach gewähltem System setzt sich der Oberbau bei der Festen Fahrbahn aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Schiene
- Schienenbefestigung
- Schwelle, Einzelstütze bzw. Gleistragplatte
- Betontragschicht (BTS) bzw. Asphalttragschicht (ATS)
- ggf. hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT) [4].

Neutraltemperatur

Die Neutraltemperatur ist die Schientemperatur, bei der ein lückenlos verschweißtes Gleis ohne temperaturbedingte Zug- oder Druckspannungen liegt. Sie wird nach den im Gebiet des Netzes vorliegenden klimatischen Bedingungen festgelegt und auch als Neutralisierungstemperatur bezeichnet [6, 7]. Um das spätere Auftreten von Gleisverwerfungen durch erwärmungsbedingte Druckspannungen sowie die Entstehung von Schienenbrüchen durch kältebedingte Zugspannungen zu vermeiden, ist das Verschweißen der Schienen bei der Neutraltemperatur durchzuführen. Bei zu kühler Witterung kann der entsprechende Zustand des Gleises durch Erwärmung oder Schienenspannen herbeigeführt werden [7].

Überhöhung

Die **Überhöhung** beschreibt die Querneigung der Verbindungslinie zwischen den beiden Schienenoberkanten eines Gleises [3]. Die Ausführung einer Überhöhung in Bögen (äußere Schiene liegt höher als die innere Schiene) erlaubt höhere Fahrgeschwindigkeiten, da sie die auf Fahrzeug und Fahrgäste bzw. Ladung wirkenden Radialkräfte und -beschleunigungen (auch als Fliehkräfte bekannt) reduziert [3, 8]. Die zulässige Überhöhung ist unter anderem aus Gründen der Kippsicherheit und Ladungssicherung zu begrenzen [3, 9].

Die ausgleichende oder ausgeglichene Überhöhung ist die theoretische Querneigung, bei der die Resultierende aus Erdbeschleunigung und Radialbeschleunigung genau in der Fahrzeugachse wirkt. Die Anteile von Erd- und Radialbeschleunigung sind hierbei betragsmäßig genau gleich groß. Die ausgleichende Überhöhung ist abhängig von Bogenradius und Fahrgeschwindigkeit [3].

Der **Überhöhungsfehlbetrag** ist die Differenz zwischen tatsächlich ausgeführter Überhöhung und ausgeglichener Überhöhung. Er ist somit ebenfalls abhängig von Bogenradius und Fahrgeschwindigkeit und kann ein positives oder negatives Vorzeichen haben. Der Betrag von negativen Überhöhungsfehlbeträgen, bei denen die freie Seitenbeschleunigung zur Bogeninnenseite gerichtet ist, wird auch als Überhöhungsüberschuss bezeichnet [3]. Die zulässigen Werte des Überhöhungsfehlbetrags sind aus Gründen der Entgleisungssicherheit und vor allem zur Gewährleistung des Fahrkomforts begrenzt [3, 9].

Der Bereich, in dem der Wechsel zwischen zwei verschiedenen Werten der Überhöhung durchgeführt wird, ist die **Überhöhungsrampe**. Um eine gleichmäßige Änderung der Kraftkomponenten der Erdanziehungskraft und der Fliehkraft zu erreichen, werden Überhöhungsrampe und Übergangsbogen (Trassierungselement im Grundriss mit kontinuierlicher Krümmungsänderung für

den Übergang von der Geraden auf den Kreisbogen) in der Regel mit identischen Längen im selben Abschnitt angeordnet [3].

Eisenbahnkreuzung (EK)

Eisenbahnkreuzung ist die offizielle österreichische Bezeichnung für einen schienengleichen Eisenbahnübergang zwischen einer Straße oder einem Weg mit öffentlichem Verkehr und einer Bahnlinie (vgl. § 1 Abs. 1 und § 2 S. 1 EiskrV Österreich). In Deutschland und der Schweiz sowie in der österreichischen Umgangssprache ist hierfür der Begriff Bahnübergang gebräuchlich (vgl. [10, 11] sowie § 11 ESBO Deutschland).

2.2 Wirtschaftliche und organisatorische Begriffe

Lebenszykluskosten (LCC)

Die Lebenszykluskosten eines Produktes beinhalten alle Kosten, die im Zusammenhang mit einem Produkt während dessen gesamter Lebensdauer auftreten. Gemäß *Gabler Kompakt-Lexikon Wirtschaft : 4.500 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden* [12] wird dabei „das zu untersuchende Objekt [...] im zeitlichen Ablauf seines Existierens von der ‚Wiege bis zur Bahre‘ erfasst“. Die Berechnung von Lebenszykluskosten für verschiedene Produkte ermöglicht einen Wirtschaftlichkeitsvergleich bereits in einem Vorstadium des Lebenszyklus des jeweiligen Produktes und ist ein Instrument zur Sicherstellung der Effektivität zu treffenden Maßnahmen bzw. Entscheidungen [13]. In dieser Diplomarbeit wird die Lebenszykluskostenanalyse als Instrument zur Entscheidungsfindung bezüglich der für einen Streckenabschnitt bestgeeigneten Oberbauart vorgestellt.

Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU)

Eisenbahninfrastrukturunternehmen besorgen die Errichtung und Erhaltung von Schienenwegen, erstellen Fahrpläne und betreiben die für den sicheren Bahnbetrieb erforderlichen Leit- und Sicherungssysteme [3, 14].

Kapitel 3

Besonderheiten der Gleislage bei Schmalspurbahnen

Schmalspurbahnen wurden in der Vergangenheit vor allem dort als Nebenstrecken errichtet, wo normalspurige Strecken zu hohe Kosten verursacht hätten oder ihre Trassierung durch die vorherrschende Geländesituation an ihre Grenzen gestoßen bzw. schlicht nicht möglich gewesen wäre. Daraus resultieren zusätzlich zur verringerten Spurweite bestimmte Eigenschaften von typischen Schmalspurbahnen [7, 15], wie

- geringe Bogenradien,
- kürzere Schwellen,
- leichtere Schienenprofile und
- geringere Achslasten.

Die aus ihrer Lage im Gebirge resultierenden starken Neigungen und extrem geringen Bogenradien (in der Schweiz bis zu 45 m) sowie die großen Temperaturschwankungen im Jahresverlauf sind bezüglich der Gleislage von Schmalspurbahnen im Alpenraum besonders herausfordernd. Diese Spezifika führen auch dazu, dass gewonnene Erkenntnisse anderer Schmalspurnetze wie z. B. der Kapspurnetze auf anderen Kontinenten (mit Radien über 150 m und Neutraltemperaturen bis 45°C) bei den Alpenbahnen nur bedingt anwendbar sind [7].

3.1 Problemstellung

Knoll [16] nennt in seiner Dissertation mit dem Titel „*Die Möglichkeit einer Gleisverwerfung bei Schmalspurbahnen in engen Bögen*“ die folgenden fünf Punkte unabhängig von der Spurweite als wichtigste Einflussfaktoren auf die Gleislagestabilität:

- Querverschiebewiderstand des Schotterbettes
- Verdrehwiderstand zwischen Schiene und Schwelle
- Längsverschiebewiderstand im Schotterbett
- Biegung der Schiene
- Entspannung der Schiene bei Ausbiegung

Die bereits zu Beginn dieses Kapitels angeführten Charakteristika von Schmalspurbahnen bezüglich Bogenradien, Neigungen und Schienenprofilen nehmen unter anderem über diese fünf Faktoren relevanten Einfluss auf die Gleislagequalität. Dies führt dazu, dass unter Verwendung

von für die Normalspur entwickelten empirischen oder mechanischen Vorhersagemodellen keine verlässlichen Aussagen zum erwarteten Instandhaltungsaufwand getroffen werden können. Im Rahmen seiner Detailuntersuchung zu meterspurigen Bahnen analysiert Rangosch [7], dass eine „lineare, aus den Unterschieden zwischen Normal- und Meterspur in Spurweite und Belastung abgeleitete rechnerische Erfassung des Tragverhaltens des Meterspuroberbaues nicht in allen Bereichen möglich“ ist und dass diesbezügliche Schwierigkeiten vor allem bei Berechnungen zur Lagestabilität in Bögen mit deutlich kleineren Radien, als sie bei normalspurigen Bahnen gebaut werden, auftreten.

Ferreira und Murray [17] stellen in ihren Untersuchungen fest, dass die Eigenschaften von Strecke und verkehrenden Fahrzeugen Schlüsselparameter für die Gleislagequalität sind. Auch bei identischer Spurweite kann die Übernahme von Modellen aus anderen Ländern bzw. von anderen Kontinenten daher zu Problemen führen.

Zum spezifischen Thema der Gleislagequalität bei Regionalbahnen mit geringerer Spurweite als 1435 mm gibt es zum gegenständlichen Zeitpunkt nur wenige Publikationen. Diese Einschätzung wird auch von Marchetta et al. [15] geteilt, die in der Veröffentlichung „*Railway degradation behaviour analysis in narrow-gauge railways: A local-railway case study*“ 2022 davon berichteten, dass ihre Literaturrecherche nach bestehenden Studien zur Verschlechterung der Gleislagequalität bei derartigen „*local railways*“ erfolglos blieb. Laut dem Forschungsteam besteht sowohl im Bereich der vorhandenen wissenschaftlichen Erkenntnisse als auch im Bereich von Normung und sonstigen Regularien eine erhebliche Lücke zwischen dem Stand der Technik bei normalspurigen Bahnen und dem bei Schmalspurbahnen.

3.2 Unterschiede zwischen Normalspur und Schmalspur

In seiner 1995 veröffentlichten Dissertation „*Lagestabilität lückenloser Meterspurgleise in kleinen Bogenradien*“ [7] fasst Rangosch die grundsätzlichen Unterschiede zwischen normalspurigen und meterspurigen Bahnen hinsichtlich der Gleislagestabilität zusammen. Qualitativ sind die Überlegungen für alle Spurweiten, die zur Kategorie „Schmalspur“ gehören, anwendbar.

Bezüglich der Parameter, die die Gleislage beeinflussen, unterscheidet der Autor zwischen „*inneren Parametern*“, die innerhalb des Fahrzeug-Fahrweg-Systems (FFS; zusammengesetzt aus Fahrzeug, Schiene, Befestigung, Schwelle, Schotter und Untergrund) entstehen und wirken, und „*äußeren Parametern*“, deren Ursprung oder Wirkung außerhalb des Fahrzeug-Fahrweg-Systems zu finden ist und wozu auch die sichtbare Erscheinungsform des FFS in Form von Gleisgeometrie und Gleislage gehört. Einige dieser sich mit der Spurweite verändernden Parameter wurden im einleitenden Teil dieses Kapitels bereits genannt, in Abschnitt folgen diesbezügliche Ergänzungen und Erläuterungen.

3.2.1 Innere Parameter der Gleislagestabilität

Zu den inneren Parametern der Gleislagestabilität gehören unter anderem sämtliche Eigenschaften des Gleisrosts, die zusammenfassend gerne als „*leichtere Bauweise*“ der Schmalspurbahnen bezeichnet werden [7].

3.2.1.1 Schienenprofile

Bei Schmalspurbahnen kommen meist Schienenprofile mit einer längenbezogenen Masse von 30 bis 46 kg/m zum Einsatz, während die SBB auf ihren normalspurigen Strecken Schienen mit 46 bis 60 kg/m verwendet. Die leichteren Profile der Schmalspurbahnen verfügen über ein

kleineres Flächenträgheitsmoment, das sich in einer geringeren horizontalen Rahmensteifigkeit des Gleisrosts niederschlägt [7].

Lyngby [18] stellt in seiner Fallstudie am normalspurigen norwegischen Eisenbahnnetz ebenfalls fest, dass die Verwendung von leichteren Schienenprofilen zu einer schnelleren Verschlechterung der Gleislagequalität beitragen.

3.2.1.2 Schwellen

Die Schwellen von Schmalspurstrecken sind in der Regel gleich hoch und im selben Abstand verlegt wie vergleichbare Schwellen der Normalspur. Maßgebliche Unterschiede bestehen bei der Länge und Breite. Dieser Größenunterschied hat drei wesentliche Folgen [7]:

- Die reduzierte Auflagerfläche führt zu einer schlechteren vertikalen Lastverteilung.
- Die kleinere Reibfläche zwischen Schwellensole und Schotterbett führt zu einem verringerten Querverschiebewiderstand.
- Die kleinere Kontaktfläche der Schwelle zum Vorkopfschotter wirkt sich zusätzlich negativ auf den Querverschiebewiderstand aus.

Die Lastabtragungsfähigkeit von Schmalspurgleisen ist also jedenfalls geringer als die von normalspurigen Gleisen [7].

3.2.1.3 Achslasten

Auf Schmalspurbahnen gelten im Allgemeinen niedrigere Grenzen für die zulässigen Betriebslasten. In der Schweiz sind Achslasten bei der Meterspur auf 16 t begrenzt, während auf der Normalspur 22,5 t einzuhalten sind. Es wäre nun naheliegend, dass auf Grund der geringeren Achslasten die im vorhergehenden Unterabschnitt erläuterte geringere Lastabtragungsfähigkeit vollkommen ausreicht [7].

Beim Vergleich von verschiedenen in der Schweiz verbreiteten Formen des Schotteroberbaus für Meterspur und Normalspur kam Rangosch [7] jedoch zu der Erkenntnis, dass die Flächenpressung zwischen Schwelle und Schotter bei der Meterspur in allen Fällen höher ist als bei der Normalspur – der diesbezügliche Unterschied beträgt bis zu +50 %. Dies bedeutet, dass die Abmessungen der Schwellen beim gedanklichen Übergang von Normalspur auf Meterspur im Vergleich zu den Achslasten übermäßig stark schrumpfen und somit bei den Schmalspurbahnen eine viel höhere Beanspruchung von Schwellensole und Schotterbett auftritt.

Diesem Problem kann jedoch nicht mit einer einfachen Schwellenverlängerung begegnet werden. Erstens käme es dabei bedingt durch die geringere Spurweite in der Schwellenmitte zu einer zu starken Überschneidung der Lastabtragungsbereiche der beiden Auflagerflächen. Das hieraus resultierende Aufreiten der Schwelle würde zu einer jedenfalls zu vermeidenden Biegebeanspruchung der Schwellen führen. Zweitens wäre für die ausreichende Einschotterung der Schwellenvorköpfe eine Trassenverbreiterung notwendig [7].

Auch Ferreira und Murray [17] sowie Lyngby [18] identifizieren die Achslasten als wichtigen Einflussfaktor auf die Entwicklung der Gleislagequalität. Höhere Achslasten verursachen eine stärkere Abnutzung von Schienen und Radreifen, rufen stärkere Biegespannungen in Schienen und Schwellen hervor und erhöhen die Flächenpressung im Schotter und den darunter liegenden Schichten [17]. Zwischen der Achslast und der Abnahme der Gleislagequalität besteht eine nichtlineare Beziehung: Größere Achslasten verursachen pro Tonne eine stärkere Gleislageverschlechterung als dies bei kleineren Achslasten der Fall ist [18].

3.2.2 Äußere Parameter der Gleislagestabilität

3.2.2.1 Minimalradien

Für durchgehend verschweißte Hauptgleise gilt bei meterspurigen Bahnen in der Schweiz ein Mindestradius von 100 m. Für normalspurige Bahnen liegt diese Grenze je nach Art des Schotteroberbaus zwischen 300 und 450 m. Nach den schweizerischen Trassierungsvorschriften für Meterspur befindet sich bei einem Radius von 350 m jedoch schon die Grenze, ob der Gleisabschnitt noch als Bogen zu betrachten ist oder bereits mit ausreichender Genauigkeit als „Gerade“ betrachtet werden kann [7].

Für weitere aus den unterschiedlichen Minimalradien resultierende Konsequenzen wird auf Kapitel 3.4 verwiesen.

3.2.2.2 Steigungen und Gefälle

Die Trassierung der Schmalspurbahnen im Alpenraum durch teilweise extreme Gebirgstopographien führt zu größerer Gleisbeanspruchung durch Anfahr- und Bremskräfte sowie Hangabtrieb als bei Bahnen in flacherem Gelände. Durch Messungen und Untersuchungen konnte jedoch bewiesen werden, dass die aus diesen Beanspruchungen resultierenden Längskräfte im Vergleich zu den maßgeblichen Längskräften aus Temperaturschwankungen sehr gering sind und somit vernachlässigt werden können [7].

3.2.2.3 Neutraltemperatur

Je nach Höhenlage und Exponiertheit der Gleise kann sich die bei Schmalspurbahnen angewendete Neutraltemperatur deutlich von der für normalspurige Bahnen in Tallage passenden Standardtemperatur unterscheiden. Direkt im Anschluss an die Gleisdurcharbeitung bzw. den Stopfvorgang ist der Längsverschiebewiderstand des Gleises erhöht. Die Wahl einer korrekt angepassten Neutraltemperatur für Schweißarbeiten beugt im Zeitraum bis zum Abklingen der Erhöhung des Längsverschiebewiderstands durch Betriebsbelastung dem Entstehen von Brüchen oder Verwerfungen vor [7].

3.3 Die Fallstudie von Marchetta et al.

Als Ergänzung zur bisher erfolgten Diskussion der Grundlagen und Einflussfaktoren auf die Gleislagequalität bei Schmalspurbahnen wird in diesem Abschnitt näher auf die bereits zitierte Fallstudie „*Railway degradation behaviour analysis in narrow-gauge railways: A local-railway case study*“ von Marchetta et al. [15] und die daraus auf andere Bahnen dieses Typs übertragbaren Erkenntnisse eingegangen.

3.3.1 Beschreibung der Studie

Eine Gruppe von Wissenschaftern um Vincenzo Marchetta untersuchte anhand einer in Italien gelegenen, eingleisigen, 110 km langen Strecke mit 950 mm Spurweite und einer Neigung von bis zu 40 ‰, welche Schmalspur-spezifischen geometrischen und betrieblichen Charakteristika die Wahrscheinlichkeit einer niedrigen Gleislagequalität erhöhen. Zu diesem Zweck wurden vier der fünf maßgebenden Parameter der Gleisgeometrie gemäß *EN 13848-1* [19] untersucht: Spurweite, Längshöhe, Richtung und Verwindung. Die in der Normung definierten Grenzwerte für die verschiedenen Parameter bei normalspurigen Bahnen sind laut den Autoren zwar nicht direkt auf

Schmalspurbahnen anwendbar, werden jedoch als ausreichend solide Referenz für eine derartige Grundlagenstudie eingeschätzt.

Im Rahmen der Studie wurde die untersuchte Strecke abschnittsweise nach den Parametern Radien, Neigung, Oberbauart und Anzahl der Züge in 3 Klassen eingeteilt (vgl. Tabelle 3.1), wobei Klasse 3 als sehr typisch für Schmalspur-Regionalbahnen sowie als besonders anspruchsvoll bezüglich der Sicherung der Gleislage charakterisiert wurde.

Klasse	1	2	3
Radien	$R \geq 650$ m	$650 \text{ m} > R > 150$ m	$150 \text{ m} \geq R$
Steigung [%]	≤ 10	10-30	≥ 30
Schwellentyp	Beton	Beton	Holz und Beton
Schienenprofil	50 UNI	36 UNI	36 UNI
Züge/Jahr	3000	9500	19000

Tab. 3.1: Klasseneinteilung der Studie von Marchetta et al. [15]

Tabelle 3.2 „übersetzt“ die von Marchetta et al. [15] verwendeten Schienenprofilbezeichnungen in gängige europäische Bezeichnungen gemäß Norm *EN 13674*.

Bezeichnung gem. Marchetta et al. [15]	europäische Bezeichnung	längenbezogene Masse	Quelle
36 UNI	36E1	36,35 kg/m	<i>DIN EN 13674-4:2020 02</i> [20] Tabelle A.1 bzw. Bild A.6
50 UNI	50E5	49,90 kg/m	<i>DIN EN 13674-1:2017 07</i> [21] Tabelle A.1 bzw. Bild A.12

Tab. 3.2: Schienenprofile in der Studie von Marchetta et al. [15]

3.3.2 Ergebnisse der Studie

3.3.2.1 Betrachtung der einzelnen Parameter

Mit Bezug auf die Gleislageparameter gemäß *DIN EN 13848-1:2019 06* [19] und die dort definierten verschiedenen Grenzwerte konnten aus der Fallstudie die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden:

Spurweite

In Streckenabschnitten, die bezüglich Neigung und Bogenradien in Klasse 3 fielen, wurden durch die stärkere Beanspruchung des Schienenkopfes höhere Abweichungen der Spurweite registriert als in Streckenabschnitten der Klassen 1 und 2. Darüber hinaus konnte auch ein Beitrag der Oberbauart zur Qualität der Spurweite festgestellt werden: In den Bereichen mit Oberbau der Klasse 3 wurden signifikant schlechtere Werte gemessen als in jenen der Klassen 1 und 2.

Längshöhe

Die Längshöhe ist die Höhenabweichung der Schienenlauffläche von ihrer geglätteten vertikalen Position (Bezugslinie), wobei die Glättung über verschiedene Wellenlängenbereiche durchzuführen ist. Die Bezugslinie und die Längshöhe werden aus aufeinanderfolgenden Messungen ermittelt [19]. Mit Hilfe dieses Parameters kann die Ebenheit bzw. „Welligkeit“ der Gleislage beurteilt werden.

Gemäß den Ergebnissen der Studie von Marchetta et al. [15] wird die Qualität der Längshöhe vor allem von starken Neigungen negativ beeinflusst. Für die Einhaltung des zugehörigen Qualitätskriteriums konnte eine besondere Bedeutung der Steifigkeit des Oberbaus nachgewiesen werden.

Richtung

Die Richtung ist die horizontale seitliche Abweichung von der Bezugslinie (geglättete horizontale Position). Auch bei diesem Parameter sind verschiedene Wellenlängenbereiche zu betrachten und die Berechnung von Bezugslinie und Richtung erfolgt aus aufeinanderfolgenden Messungen [19].

Höhere Zentrifugalkräfte in Abschnitten kleiner Bogenradien führen klar zu einem schnelleren Qualitätsverlust bei den gemessenen Parametern der Richtung. Auffällig zeigten sich in diesem Zusammenhang auch die negativen Effekte der Verwendung von Holzschwellen [15]. Mit den Eigenschaften von verschiedenen Schwellentypen beschäftigt sich Abschnitt 3.3.2.2 dieser Arbeit.

Verwindung

Die Verwindung ist die Differenz zwischen zwei Werten der Überhöhung dividiert durch den dazwischenliegenden Abstand. Sie kann entweder aus zwei aufeinanderfolgenden Überhöhmessungen errechnet oder direkt über eine feste Entfernung gemessen werden [19].

Verschlechterungen bezüglich der Verwindung waren vor allem in Bereichen starker Längsneigung festzustellen. Auch hier spielt die Steifigkeit des Oberbaus eine relevante Rolle: Je steifer die Oberbauart, desto besser waren die gemessenen Ergebnisse [15].

3.3.2.2 Holz- und Betonschwellen im Vergleich

Knoll [16] kam 1997 im Rahmen seiner Versuche an der Strecke der niederösterreichischen Mariazellerbahn (Spurweite 760 mm) zum Ergebnis, dass Holzschwellen im Bogen einen um rund 20 % höheren Querverschiebewiderstand aufweisen als Betonschwellen. Dazu stellte er die Theorie auf, dass die aus den Fliehkräften im Bogen resultierende Radlasterhöhung zu einer stärkeren Einpressung der Holzschwelle in das Schotterbett führt und so ein höherer Widerstand erreicht werden kann. In ihrer Fallstudie schreiben Marchetta et al. [15] der Holzschwelle jedoch eine schlechte Performance bezüglich der Sicherung der Gleislage in kleinen Bogenradien zu. Ihre schlechteren Messergebnisse der Gleislageparameter der Richtung widersprechen grundsätzlich den Messergebnissen von Knoll [16].

In den Jahren 2020 und 2021 wurden an der Mariazellerbahn erneut Messungen von Querverschiebewiderständen durchgeführt. Im Zuge dieser Versuchsreihe im Bahnhof Puchenstuben wurden Betonschwellen mit zwei verschiedenen Besohlungen sowie ohne Besohlung und 13 Jahre alte Holzschwellen, in deren Bereich zum Zeitpunkt der Neuverlegung der Betonschwellen eine Durcharbeitung erfolgte, miteinander verglichen. Zu diesem Zweck wurden zu drei Zeitpunkten Messungen durchgeführt: Das erste Mal direkt nach der Gleisneulage bzw. der Durcharbeitung, das zweite Mal nach dreieinhalb Monaten Betrieb (entspricht ca. 150.000 Gesamtbruttotonnen) und das dritte Mal nach einem Jahr Betriebsbelastung (entspricht ca. 500.000 Gesamtbruttotonnen). Die Ergebnisse zeigten, dass vor allem durch den Einsatz von geeigneten Besohlungsmaterialien der Querverschiebewiderstand in engen Bögen (in diesem Fall 89,0 m Radius mit 60 mm Überhöhung) deutlich erhöht werden kann. Ein Vergleich der Ergebnisse von Holzschwellen und unbesohlenen Betonschwellen ist anhand der Versuchsergebnisse nur bedingt möglich, da die gemessenen Holzschwellen bereits über eine längere Liegedauer verfügten und sich teilweise in einer anderen Einbausituation (Gerade, mehr Vorkopfschotter) befanden [22].

In der Geraden sieht Knoll [16] die Betonschwelle mit Messergebnissen, die 15 % über denen der Holzschwelle liegen, im Vorteil. Rangosch [7] geht auf Grund des höheren Eigengewicht-

tes unabhängig von der Linienführung bei Betonschwellen sogar von einem doppelt so hohen Querverschiebewiderstand wie dem von Holzschwellen aus.

Da die hier beschriebene Thematik für die Feste Fahrbahn nicht relevant ist, wird im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit nicht weiter darauf eingegangen. Dieser Abschnitt dient lediglich dazu, die Unterschiede, die auch zwischen verschiedenen Arten des Schotteroberbaus bestehen, exemplarisch zu erläutern und diesbezüglich vorhandenen weiteren Forschungsbedarf aufzuzeigen.

3.3.2.3 Gesamtfazit

In der Conclusio ihrer Studie halten die Autoren fest, dass Streckenabschnitte mit typischen Schmalspurbahn-Eigenschaften in der Untersuchung eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine schlechte Gleislage hatten und dass herkömmliche, für normalspurige Strecken entwickelte und kalibrierte Prognosemodelle daher dazu neigen, die Gleislagequalität auf solchen Streckenabschnitten als zu hoch einzuschätzen. Diese Fehleinschätzung kann dazu führen, dass teurere Reperaturmaßnahmen nötig werden, da noch weniger ausgeprägte Problemstellen nicht früh genug behoben werden.

3.4 Das Phänomen der Bogenatmung

Nicht nur auf regelspurigen Bahnstrecken, sondern auch bei den Schmalspurbahnen hat sich im Laufe der letzten Jahrzehnte das lückenlos verschweißte Gleis auf Grund des daraus resultierenden höheren Fahrkomforts sowie der verringerten Instandhaltungskosten gegenüber dem Stoßlückengleis durchgesetzt [22]. Die damit einher gehende Anfälligkeit für Trennbrüche und Gleisverwerfungen, die aus temperaturbedingten Längenänderungen der Schiene resultieren, entsteht grundsätzlich unabhängig von der Spurweite [23].

In seiner Dissertation identifiziert Knoll [16] jedoch Kreis- und Übergangsbögen mit geringen Radien, wie sie für Schmalspurbahnen typisch sind, als besonders verwerfungsgefährdete Bereiche. Auch Rangosch [7] nennt enge Bögen mit lückenlos verschweißten Schienen als besonders anfällig für den Verlust der Lagegenauigkeit durch Temperaturschwankungen und fügt hinzu, dass in diesen Bereichen „auch verlaschte Schienen [...] keine Garantie für eine stabile Gleislage“ bieten.

Während bei größeren Radien eher ein abruptes Knicken der Schiene auftritt, ist unterhalb eines gewissen Grenzdiameters infolge der Wölbwirkung des Gleisrosts die sogenannte Bogenatmung (auch Radialatmung genannt) vorherrschend [23]. Dieses wichtige Phänomen im Bereich des Themenkomplexes Querverschiebewiderstand wird unter anderem von Rangosch [7] und Knoll [16] im Rahmen ihrer Dissertationen ausführlich beschrieben. Mit den Begriffen Bogenatmung oder Radialatmung wird die laterale Bewegung des Gleisrostes im Bogen bezeichnet, die durch temperaturbedingte Längenänderungen der Schienen im Verlauf der Jahreszeiten hervorgerufen wird.

Aus der Verlängerung der Schiene bei Erhitzung durch warme Außentemperaturen in Kombination mit Sonneneinstrahlung entstehen in Richtung Bogenaußenseite wirkende Radialkräfte (auch als Axialkräfte bezeichnet). Um diese Kräfte aufnehmen zu können, wandert der Gleisrost um eine Querverschiebung ΔR in Richtung Bogenaußenseite. Dabei kommt es zu Umlagerungen im Schotterbett, das den horizontalen Druckkräften nachgibt. Im Winter zieht sich der Gleisrost wieder zurück in Richtung der Bogeninnenseite, der Schotter an der Bogenaußenseite bleibt jedoch in seiner neu gefundenen Position. Als direkte Folge kommt es zu einer permanenten Verringerung des Querverschiebewiderstandes. Eine volle Aktivierung kann nur mehr bei Verschiebungen erreicht werden, die größer als die Bogenatmung im entsprechenden Gleisabschnitt sind [7, 16].

Im Normalspurbereich ist die Bogenatmung relativ unbedeutend, da sie ihre axialkraftmindernde Wirkung erst bei kleinen Radien (geringe Effekte < 500 m, maßgebliche Auswirkungen

< 300 m) zu entfalten beginnt und derart geringe Bogenhalbmesser in normalspurigen Hauptgleisen kaum anzutreffen sind. Bei Schmalspurbahnen treten Radien von weniger als 300 m häufig auf, die aus der Bogenatmung resultierende Reduktion der temperaturbedingten Radialkraft im Gleis kann demnach nicht mehr vernachlässigt werden [7].

3.4.1 Einflussfaktoren

Das Ausmaß der Bogenatmung wird durch den Bogenradius, den Bogenöffnungswinkel, den Temperaturanstieg und den vorhandenen Querverschiebewiderstand bestimmt [16].

Bei der niederösterreichischen Mariazellerbahn wurden im Sommer 2021 erfolgreiche Versuche unternommen, die temperaturbedingte Bewegung des Gleisrosts durch Absenkung der Schienentemperatur zu bekämpfen. Zu diesem Zweck wurden auf ausgewählten Streckenabschnitten die Schienen weiß lackiert, wodurch die Schienentemperatur während sommerlichen Hitzewellen (Lufttemperaturen > 30°C) um vier bis sechs Grad reduziert werden konnte. Nach Angaben der Betreibergesellschaft handelte es sich bei der Temperaturreduktion von bis zu 60°C auf nur mehr 55°C „um die entscheidenden Grade, die Verformungen und somit Betriebseinschränkungen verhindern“ [24]. Auch so können die Bogenatmung und aus ihr resultierende Probleme wirksam bekämpft werden.

Durch den geringeren Querverschiebewiderstand des Schotterbetts im Anschluss an den Stopfvorgang ist bis zur erneuten Normalisierung des Schottergefüges eine verstärkte Bogenatmung zu beobachten [7]. Der Grenzradius, unterhalb dessen die Bogenatmung als vorherrschend betrachtet werden kann, nimmt mit größer werdendem Querverschiebewiderstand ab. Auch die Gleiskonstruktion beeinflusst die Größe des Grenzradius [23].

Grundsätzlich bedingen die bei Schmalspurbahnen vorherrschenden kleineren Radien kleinere temperaturbedingte Längenänderungen und damit geringere laterale Verschiebungskräfte als sie bei Bahnen mit größeren Bogenhalbmessern auftreten. Bis zur Aktivierung des Querverschiebewiderstandes in einer Größenordnung, die eine weitere Bewegung in die selbe Richtung verhindert, kann sich das Gleis unabhängig vom Bogenradius jedoch nur über ein gewisse Wegstrecke verschieben. Dies führt dazu, dass bei großen Radien ein prozentuell kleinerer Anteil der entstehenden Axialkräfte abgebaut werden kann als dies bei kleinen Radien der Fall ist, wo ein Kraftabbau von bis zu 100 % möglich ist. Aus diesem Grund hat die Bogenatmung in Streckenbereichen mit kleinen Radien die größten Auswirkungen auf die vorherrschende Spannungssituation im Gleis [7]. Aus der grundsätzlichen Forderung nach einem lagestabilen Gleis ohne horizontale Bewegungen kann ein Minimalradius abgeleitet werden, bei dem ein lückenloses Verschweißen des Gleises noch zulässig ist [23].

Darüber hinaus ergeben sich bei der typischen Linienführung von Schmalspurbahnen vor allem in den stark zerklüfteten Ostalpen durch die Anordnung von Kehrschleifen und das Ausfahren von Seitentälern im Vergleich zu Bahnstrecken im Flach- und Hügelland ungewöhnlich große Bogenöffnungswinkel, die wiederum zu einer verstärkten Bogenatmung führen. Abbildung 3.1 zeigt als Beispiel hierfür eine Skizze des Streckenverlaufs der Nordrampe der Mariazellerbahn (Streckenabschnitt zwischen Laubenbachmühle und Gösingtunnel). Zwischen Unter Buchberg und Ober Buchberg befindet sich im Natterstal zuerst die sogenannte „Talschleife“, nach der Haltestelle Ober Buchberg folgt auf eine Kehrschleife im Stockgraben die „Bergschleife“, bevor die Haltestelle Winterbach erreicht wird [25]. Im abgebildeten Streckenabschnitt zwischen Laubenbachmühle und dem Gösingtunnel (Scheiteltunnel der Gesamtstrecke) wird auf 15 km eine Höhendifferenz von 337 m überwunden [26].

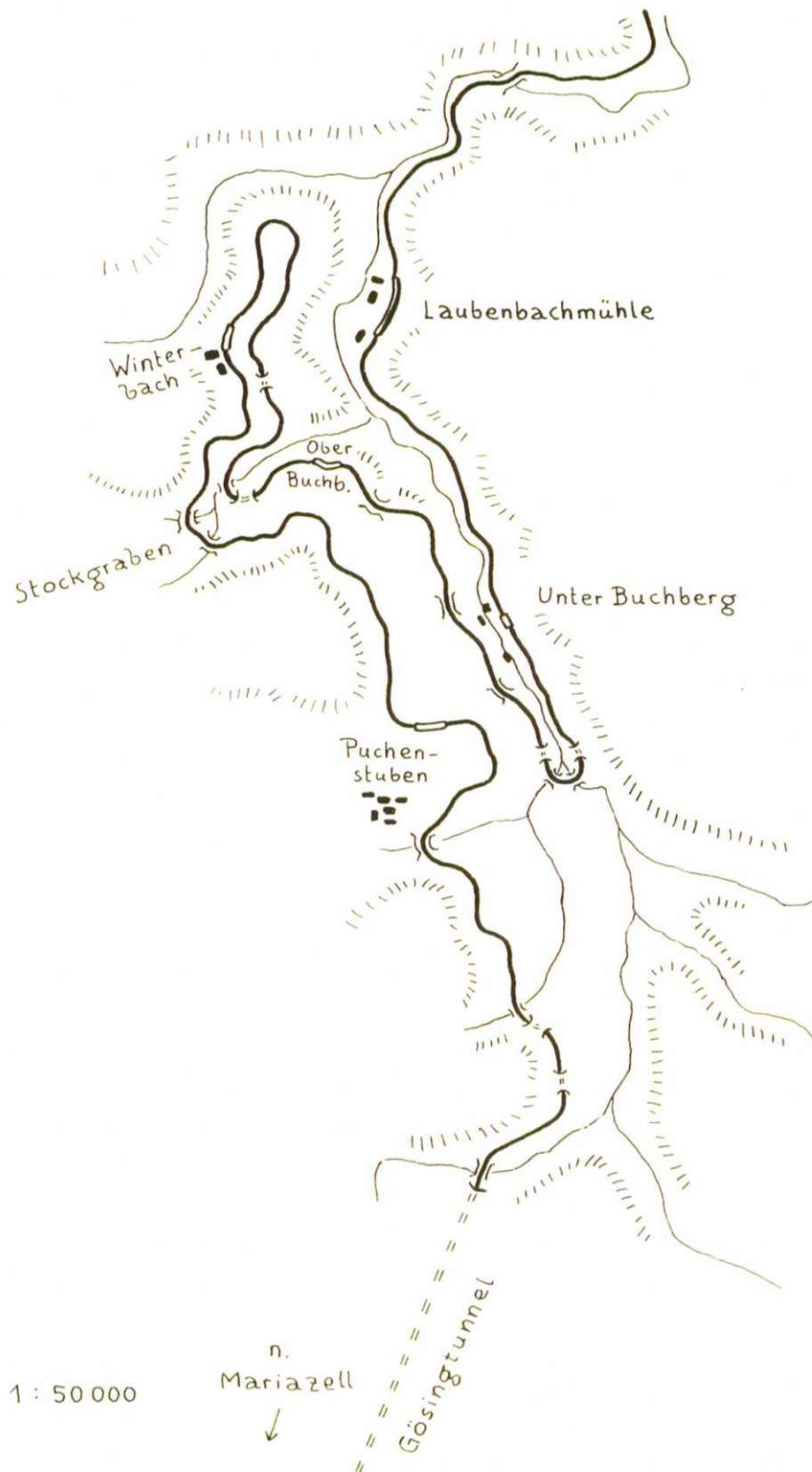


Abb. 3.1: Streckenverlauf der Nordrampe der Mariazellerbahn (nicht maßstäblich) [25, S. 11]

3.4.2 Resultierende Probleme

Die von der Bogenatmung hervorgerufene Reduktion des Querverschiebewiderstandes führt zwar zu einer instabileren Gleislage, aber es kommt durch sie nur selten zu Änderungen der Gleislage, die die Befahrbarkeit beeinträchtigen [16]. Das entsprechende nationale Regelwerk [27] erlaubt schweizerischen Schmalspurbahnen etwa das lückenlose Verschweißen der Gleise unabhängig vom Bogenradius, sofern „die Beträge der seitlichen Gleislageveränderungen kleiner als 20 mm sind und die Befahrbarkeit der Gleise mit der vorgegebenen Geschwindigkeit nicht beeinträchtigt ist“ [23].

Die aus der Bogenatmung resultierende Reduktion der Axialkraft wirkt sich positiv auf die Gleislagestabilität aus, das heißt die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Verwerfungen auf Grund von Stabilitätsverlust wird reduziert [7].

Eine Gefährdung des Zugsbetriebes als Folge der Bogenatmung entsteht meist nur beim Auftreten von

- ungleichmäßigen Temperaturspannungen in der Schiene (z. B. durch Schattenwurf, Verschweißungen bei unterschiedlichen Neutraltemperaturen oder sonstige Fehler beim Neutralisieren),
- ungleichmäßigem Querverschiebewiderstand (z. B. durch punktuellen händischen Nachstopfen oder Kabelarbeiten nach dem Stopfvorgang) oder
- einer ungleichmäßigen Ausgangsform des Bogens im Grundriss (z. B. aus Dreipunktbiegung der Schienen resultierende fast gerade Endstücke an den Schweißstellen, die zu „Flachstellen“ im Bogen führen) [7, 16].

Aus diesen Faktoren resultiert eine ungleichmäßige laterale Verschiebung des Gleisrostes und somit eine Gleisfehlerwelle, deren Amplitude mit steigender Temperatur wächst. Eine derartige Gleisfehlerwelle kann so ausgeprägt sein, dass Entgleisungsgefahr besteht [7, 16].

3.5 Relevanz für das Potenzial der Festen Fahrbahn

3.5.1 Studienergebnisse von Marchetta et al. [15]

Qualitativ konnten im Rahmen der Studie von Marchetta et al. [15] zwar ähnliche Problemquellen festgestellt werden wie bei den normalspurigen Bahnen. Die Gewichtung der Einflussfaktoren ist jedoch eine gänzlich andere. Bei normalspurigen Bahnen sind über weite Strecken nicht die Trassierungsparameter, sondern hohe Geschwindigkeiten an sich [9, 17, 28], stark variierende Fahrgeschwindigkeiten zwischen verschiedenen Zügen [9, 18], verschlissene Schienen [9, 17] sowie die Anzahl der Lastwechsel [29] die bestimmenden Parameter für die Entwicklung der Gleislage. Seine Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Trassierung, Gleislagequalität und Oberbauart führten Pospischil [9] 1991 zur folgenden Einschätzung bezüglich der Wahl Trassierungsparameter: „Sowohl die FF als auch der Einsatz von Spannbetonschwellen mit vergrößerter Auflagerfläche führen jedoch dazu, daß die Gleislagebeständigkeit als begrenzendes Kriterium keine maßgebende Rolle mehr spielt.“

Während bei normalspurigen Strecken Gleislageverschlechterungen also tendenziell nur an einzelnen Stellen auf die Trassierung zurückzuführen sind, liegt der Grund für eine schnelle Verschlechterung der Gleislage bei Schmalspurbahnen laut Marchetta et al. [15] überwiegend in der Oberbauqualität sowie den gewählten Trassierungsparametern bzw. dem durchquerten Gelände.

Da das durchquerte Gelände gar nicht und die Trassierung nur mit erheblichem Aufwand angepasst werden kann, scheint die Qualität und Steifigkeit des Oberbaus ein geeigneter Ansatzpunkt für eine Verbesserung der Betriebssituation auf den im Alpenraum verbreiteten schmalspurigen Regionalbahnen darzustellen.

3.5.2 Weitere Überlegungen

Sofern die Ursache für aus Bogenatmung resultierenden Fehlern in der Gleislage nicht in den Temperaturspannungen in der Schiene, sondern in den unregelmäßigen Eigenschaften des Schotterbettes liegt, sind Feste-Fahrbahn-Systeme in betroffenen Bereichen eine Möglichkeit, eine gleichmäßigere Bettung und einen gleichmäßigen Querverschiebewiderstand mit geringeren Schwankungen als beim Schotteroberbau sicherzustellen. Gemäß den Überlegungen von Knoll [16], der einen „*abschnittsweise gestörten Querverschiebewiderstand*“ neben Gleislagefehlern als bestimmenden Einflussfaktor auf die Entstehung von Gleisverwerfungen identifiziert, könnte so auch das diesbezügliche Risiko in hierfür anfälligen Bereichen gesenkt werden können.

Knoll [16] geht in seiner Dissertation auch auf die spurweitenunabhängige Problematik, dass bei der Durcharbeitung eines Schottergleises dessen Querverschiebewiderstand um bis zu 50 % abnimmt und erst nach einer Betriebsbelastung von 1000 bis 1500 MN wieder Ergebnisse nahe am Ursprungswert erreicht, ein. Auch der so entstehenden paradoxen Situation, dass direkt nach einer Korrektur mitunter das größte Risiko für eine direkte erneute Verschlechterung der Gleislage besteht, und den daraus resultierenden Problemen könnte mit einer Festen Fahrbahn begegnet werden.

Kapitel 4

Gängige Systeme von Fester Fahrbahn und ihre Anpassbarkeit auf geringere Spurweiten

Nach einem kurzen Abriss der Geschichte der Feste Fahrbahn werden in diesem Kapitel die verschiedenen in Europa verbreiteten Bauarten kategorisiert und erläutert sowie deren Anpassbarkeit an Schmalspurstrecken diskutiert.

Für bessere Nachvollziehbarkeit der Entwicklungsschritte sowie zur Vermittlung eines tieferen Verständnisses der verschiedenen Konzepte und ihrer Unterschiede enthält diese Diplomarbeit in Abbildung 4.1 und im die Bauarten beschreibenden Kapitel 4.3 auch Systeme, die nur als Versuchsabschnitte ausgeführt wurden, veraltet sind, inzwischen unter neuer Bezeichnung weiterentwickelt wurden oder es nie über das Entwicklungsstadium hinaus geschafft haben. Die Erklärung der Bauarten im erwähnten Kapitel 4.3 erfolgt gegliedert nach der in Kapitel 4.2 und Abbildung 4.1 beschriebenen Systematik.

Die aktuell angebotenen Bauarten sind in Abbildung 4.1 fett hervorgehoben und werden in Kapitel 4.4 hinsichtlich ihrer Eignung für die Anwendung auf Schmalspurstrecken besprochen.

Den Abschluss bilden eine Betrachtung von länderspezifischen Unterschieden bezüglich des Einsatzes der verschiedenen vorgestellten Bauarten in Kapitel 4.5 sowie eine Diskussion der Themen Dauerhaftigkeit und Materialalterung in Kapitel 4.6.

4.1 Geschichte

Die Feste Fahrbahn wurde mit dem Ziel entwickelt, einen wartungsarmen Oberbau für mit hoher Geschwindigkeit befahrene Strecken herzustellen, da die Einführung des Hochgeschwindigkeitsverkehrs ab den 1960er-Jahren den Schotteroberbau trotz beständiger Weiterentwicklung der einzelnen Bestandteile an seine Grenzen brachte [4, 30].

Der über kurze Versuchsabschnitte hinausgehende Einbau von Feste Fahrbahnssystemen begann in Japan [4] und der Schweiz [29] ab den 1960er-Jahren in aufgeständerter Form sowie in Tunnelabschnitten. Als nächstes folgten Strecken in Frankreich und Deutschland, wo ab den 1970er-Jahren auch auf Erdbauwerken Feste Fahrbahnen ausgeführt wurden [4]. Die älteste noch bestehende Feste Fahrbahn in Österreich befindet sich im Türkenschanztunnel in Wien und stammt aus dem Jahr 1982 [5]. Im Laufe der Zeit gab es viele Versuche, die Feste Fahrbahn mittels höherem Vorfertigungsgrad zu optimieren, als obere Schichten kamen sowohl Asphalt als auch Beton zum Einsatz [4]. Wurde in den 1980er-Jahren für die Feste Fahrbahn noch eine Liegedauer von 60 Jahren ausgegangen [31], kann nach der von Mach [5] im Jahr 2011 angefertigten Nutzungsdauerprognose für das Netz der ÖBB inzwischen eine Lebenserwartung von 80 Jahren angenommen werden.

4.2 Wahl der Systematik

Für den Aufbau einer Festen Fahrbahn gibt es verschiedene Konzepte, denen die Bauarten der einzelnen Anbieter zugeordnet werden können. Abbildung 4.1 zeigt die in dieser Arbeit angewandte, auf Basis von Darr und Fiebig [4] sowie *Systementscheidung Schotteroberbau oder Feste Fahrbahn* [32] aufgebaute Systematik.

Hierbei kann zunächst in eine Stützpunktlagerung der Schienen, wie sie auch beim Schotteroberbau vorliegt, und in eine kontinuierliche Lagerung, die ohne Schienenstützpunkte auskommt, unterschieden werden. Bei den Systemen mit kontinuierlicher Lagerung konnten sich im Vollbahnbereich nur eingegossene Systeme etablieren, auch diese werden vor allem für Spezialzwecke (z. B. Brücken) eingesetzt.

Eine Stützpunktlagerung der Schienen ist sowohl ohne als auch mit Schwellen möglich. Bei den Systemen ohne Schwelle werden entweder Fertigteilplatten verwendet oder die Tragschichten werden zur Gänze vor Ort hergestellt.

Die Bauarten mit Schwellen kommen dem Aufbau des herkömmlichen Schotteroberbaus am nächsten, gedanklich wird lediglich der Gleisschotter durch ein anderes Material ersetzt. Die schwellenbasierten Systeme können weiter unterschieden werden in aufgelagerte und eingelagerte Bauarten. Bei den aufgelagerten Systemen ist die oberste Tragschicht bereits mit einer sehr hohen Genauigkeit herzustellen. Die Höhenlage der Oberkante des Gleisrosts, der direkt auf diese Schicht aufgelegt wird, kann im Anschluss nur mehr in der Schienenbefestigung korrigiert werden. Bei den eingelagerten Bauarten wird der Gleisrost hingegen über der entsprechenden Tragschicht z. B. unter Verwendung von Spindelsystemen in seine Solllage gebracht. Die oberste Tragschicht wird im Anschluss durch Vergießen des Gleisrosts zur Fixierung seiner Position hergestellt.

Eine Sonderstellung unter den eingelagerten Bauarten nehmen die Systeme mit elastischer Schwellenlagerung ein: Bei diesen dient ein sogenannter Gummischuh als Trennlage zwischen Schwelle und Tragschicht, sodass ein Austausch von Einzelteilen ohne Abbruch des Gesamtsystems möglich wird.

Die in Abbildung 4.1 fett gedruckten Bauarten entsprechen, entweder als Neuentwicklungen der letzten Jahre oder durch ihre Bewährung in den vergangenen Jahrzehnten, dem aktuellen Stand der Technik. Kapitel 4.4 diskutiert die Eignung dieser Bauarten für Schmalspurbahnen.

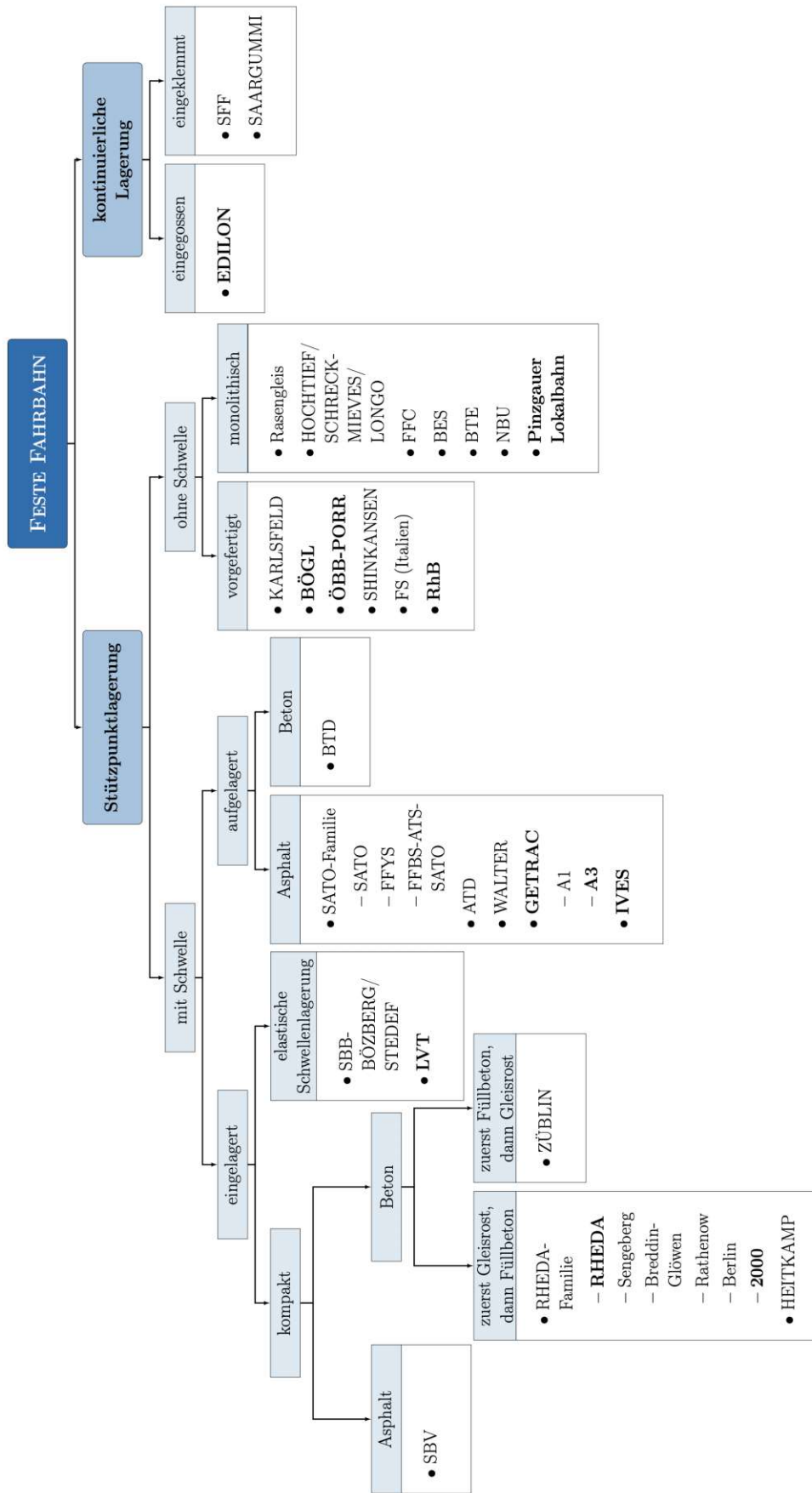


Abb. 4.1: Übersicht über die Bauarten der Festen Fahrbahn

4.3 Beschreibung der bestehenden Bauarten

In diesem Kapitel werden die verschiedenen bestehenden Bauarten bezüglich Konzeption, Bestandteilen und Verbreitung erläutert sowie charakteristische Eigenschaften bzw. Vor- und Nachteile diskutiert. Die meisten Bauarten tragen den Namen der Entwicklerfirmen oder des ersten Einbauortes, verbreitete Bezeichnungen sind auch Akronyme, die das zugrundeliegende Konzept der Bauart beschreiben.

Für herstellerübergreifende, konzeptionsbedingte Eigenschaften bezüglich Instandhaltung sowie Sanierungs- und Instandsetzungsmöglichkeiten nach dem Auftreten von Schäden wird auch auf die Kapitel 5.3.1.3 und 5.6.8 verwiesen.

4.3.1 Kompakte Bauarten

Die kompakten Bauarten bestehen oberhalb der ungebundenen oder hydraulisch gebundenen Tragschicht aus einer Betontragschicht, in die die Schwellen des Gleisrostes eingebettet sind. Der Verbund zwischen Fertigteil-Schwelle und Ort beton kann auf verschiedene Arten hergestellt werden, es gibt keine Trennlage zwischen den Betonteilen [4]. Dadurch besteht eine nahezu unlösbare Verbindung zwischen Schwellen und Tragplatte, die dazu führt, dass eine Gleiserneuerung nur durch Abbruch der kompletten Konstruktion zu bewerkstelligen ist. Gleislagekorrekturen sind somit nur im von den Schienenbefestigungen aufnehmbaren Ausmaß durchführbar [31].

4.3.1.1 Die RHEDA-Familie

Die diversen Bauarten der RHEDA-Familie sind nach dem Bahnhof Rheda-Wiedenbrück in Nordrhein-Westfalen benannt, wo eine derartige Konstruktion im Jahr 1972 erstmals zum Einsatz kam [4, 33]. Bei den RHEDA-Bauarten wird der fertige Gleisrost aufgespindelt und danach mit Füllbeton vergossen. Das Aufspindeln des Gleisrosts ist ein sehr aufwändiger Vorgang, beim Ausbetonieren müssen Verschiebungen vermieden werden. Da das aufgespindelte Gleis auch während des Betoniervorganges nicht befahren werden kann, muss der Beton über ein Nachbargleis, einen Begleitweg oder mittels Pumpen durch Rohrleitungen eingebracht werden [4].

Da die Bauart RHEDA frei von Schutzrechten ist, hat sich je nach ausführendem Bauunternehmen eine Vielzahl von Versionen entwickelt [2]. Die wichtigsten davon sollen in diesem Kapitel erläutert werden.

Mit den Bauarten der RHEDA-Familie bestehen vor allem in Deutschland umfangreiche (Langzeit-) Erfahrungen. Stand 1998 verfügte das Streckennetz der DB bereits über mehr als 150 Gleiskilometer verschiedener RHEDA-Systeme, während alle anderen bis zu diesem Zeitpunkt errichteten Bauarten sich auf Längen unter 40 km beschränkten. Die RHEDA-Strecken konnten zwar im Betrieb überzeugen, die auch im Vergleich mit anderen Festen Fahrbahnssystemen sehr hohen Errichtungskosten sowie der große Aufwand und die ausgedehnten Gleissperren, die für Reparaturen und Erneuerungen erforderlich sind, kristallisierten sich im Laufe der Zeit als die großen Nachteile des Systems heraus [2].

RHEDA

Bei der in Abbildung 4.2 dargestellten ursprünglichen Konstruktion wurde die bewehrte ebene Betontragschicht (BTS), auf der das Aufspindeln des Gleisrosts erfolgte, auf eine Styroporbetonplatte hergestellt. Die Trageigenschaften des darunter befindlichen Bodens wurden durch Zementstabilisierung verbessert. Der Verbund zwischen den verwendeten Spannbeton-Monoblockschwällen, dem Füllbeton und der Betontragschicht wurde mittels Längseisen, die durch vorgefertigte Öffnungen in Schwellen einzufädeln waren, in Kombination mit Ankerbewehrung sichergestellt. Die Schwellen sind bei dieser Bauart bis zur Oberkante in den Füllbeton eingebunden. Bis 1988

wurden in Deutschland ca. 15 Gleiskilometer auf diese Weise errichtet, wobei der Großteil der Errichtungsabschnitte unter 1 km Länge besaß [4]. Auch in Österreich wurden zwischen 1982 und 1994 etwas mehr als 12 km RHEDA errichtet. Hierzu zählt auch die erste Feste Fahrbahn Österreichs im Wiener Türkenschanztunnel [5]. Leykauf [34] lobte 1999 das Langzeitverhalten dieser Bauart, da im Bahnhof Rheda nach 27 Betriebsjahren noch keine Instandhaltungstätigkeiten außer Schienenschleifen notwendig geworden waren. In den Jahren 2002 und 2003 wurden nochmals 8 km RHEDA im Eggetunnel sowie im Neuen Mainzer Tunnel hergestellt [4].

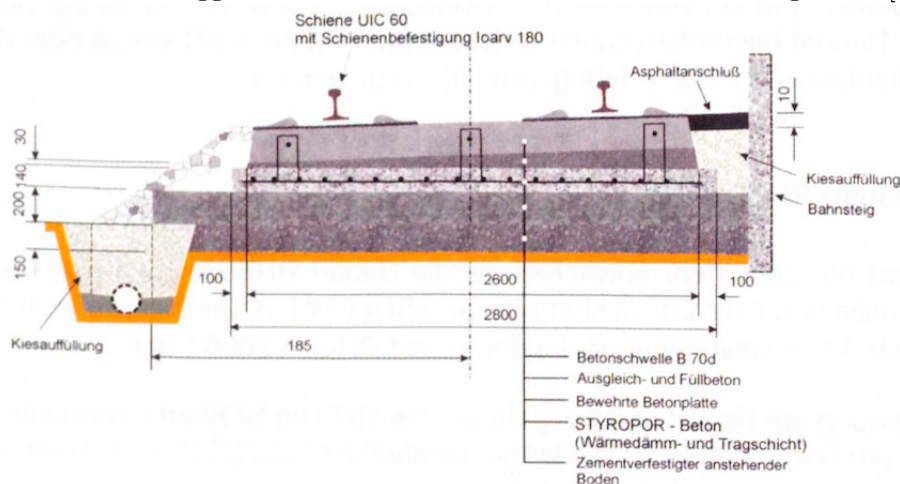


Abb. 4.2: Querschnitt des Gleises im Bahnhof Rheda-Wiedenbrück [4, Abb. 5.3]

Da die Gewährleistung der seitlichen Gleislage im Zeitraum zwischen dem Aufspindeln des Gleises und dem Abbinden des Füllbetons bei dieser Konstruktion Schwierigkeiten verursachte, kam es zu einer Weiterentwicklung:

RHEDA-Sengeberg und RHEDA-Breddin-Glöwen

Bei diesen Bauarten wurde statt der ebenen Betontragplatte ein Trogquerschnitt betoniert, um die Spindeln für die horizontale Positionierung des Gleisrosts an den Trogwangen abstützen zu können (vgl. Abbildung 4.3 und 4.4). Der Unterschied liegt in der jeweiligen Methode, mit der das direkte Aufliegen des Mittelbereiches der Spannbeton-Monoblockschwellen auf dem Trogboden verhindert wurde: Bei der Bauart RHEDA-Sengeberg, die erstmals 1989 im Sengebergertunnel auf der Strecke Hannover-Würzburg eingesetzt wurde, geschieht dies durch eine Vertiefung in der Mitte des Betontroges (vgl. Abbildung 4.3). Bei der Bauart RHEDA-Breddin-Glöwen, die erstmals auf einem Abschnitt zwischen den namensgebenden Bahnhöfen auf der Strecke Berlin Spandau – Hamburg Altona errichtet wurde, wird der Trog mit zwei geringfügig erhöhten Längsleisten in einem Abstand etwas größer als die Spurweite hergestellt (vgl. Abbildung 4.4). Wie bei der Vorgängerversion reicht der Füllbeton bei beiden Bauarten bis zur Oberkante der Schwellen.

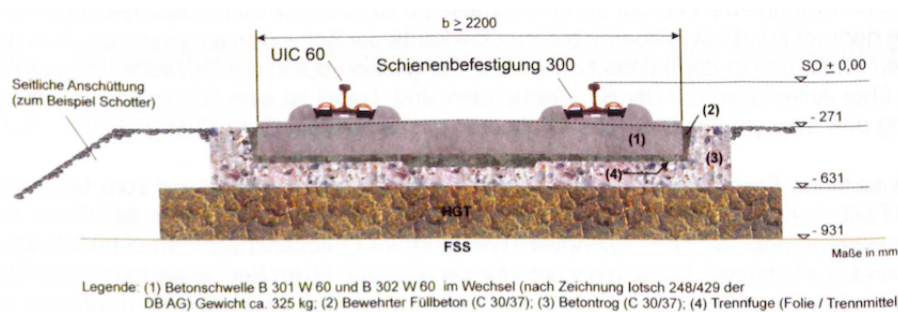


Abb. 4.3: Querschnitt der Bauart RHEDA-Sengeberg [4, Abb. 5.4]

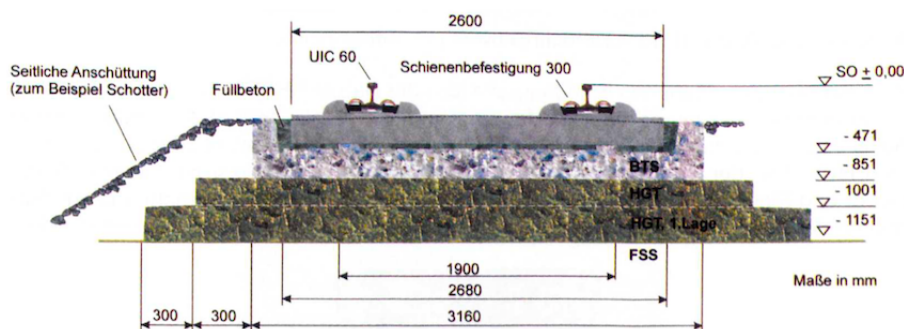


Abb. 4.4: Querschnitt der Bauart RHEDA-Breddin-Glöwen [4, Abbildung 5.7]

Um den aufwändigen Spindelvorgang zu vereinfachen, wurden verschiedene Konzepte getestet, unter anderem das Einrichten des Gleisrostes mit den Mess-, Hebe- und Richtaggregaten einer Gleisbaumaschine, während die Befahrbarkeit des Gleises durch Wagenheber-ähnliche temporäre Einbauten in jedem zweiten Schwellenfach sichergestellt wurde. Auf anderen Abschnitten kamen seitliche Regulierungshilfen, die sich auf Stirnseiten und Wangen des Betontröges abstützen zum Einsatz.

Zwischen 1989 und der Jahrtausendwende wurden in Deutschland etwa 82 km Gleis dieser Bauarten errichtet, wobei mit der Ausnahme des oben genannten Abschnitts zwischen Breddin und Glöwen ausschließlich RHEDA-Sengeberg zum Einsatz kam [4].

RHEDA-Rathenow

Bei der in Abbildung 4.5 dargestellten Bauart RHEDA-Rathenow wird auf die trogförmige Betontragschicht verzichtet. Die verwendeten Spannbeton-Monoblockschwelle verfügen auf der Unterseite über eine herausstehende Bügelbewehrung, durch die auch die Längsbewehrung der BTS geführt wird. Auf die darunterliegende hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT) werden sogenannte Justierleisten höhengenaue hergestellt, auf die der Gleisrost direkt aufgesetzt werden kann. Die gesamte Betontragschicht wird im Anschluss in einem Arbeitsgang hergestellt. Bei dieser Bauform sind die Schwelle wie in Abbildung 4.5 ersichtlich nicht bis zur Oberkante in die sie umgebende Betontragschicht eingebunden. Auf der Strecke zwischen Berlin und Hannover wurden 1998 ca. 56 km in dieser Bauweise errichtet. Teilweise wird diese Bauart nach der ausführenden Firma auch RHEDA-W&F genannt [4].

3. lagegenaues Einrütteln der Schwellen in den noch nicht erhärteten Beton
4. Aushärten der Betontragschicht ohne äußere Zwangseinflüsse (noch keine Schienen vorhanden)
5. Schienenmontage und Verschweißung

Der erste Einsatz der Bauart ZÜBLIN erfolgte 1988 auf der Strecke Stuttgart – Ulm nahe Oberesslingen. Die Entwicklung der verwendeten Schwellen verlief wie bei RHEDA von der Monoblockschwelle über die Biblockschwelle mit verbindendem Stahlwinkel (in Abbildung 4.10 dargestellt) bis zur Biblockschwelle mit Gitterträger zwischen den Schwellenblöcken.

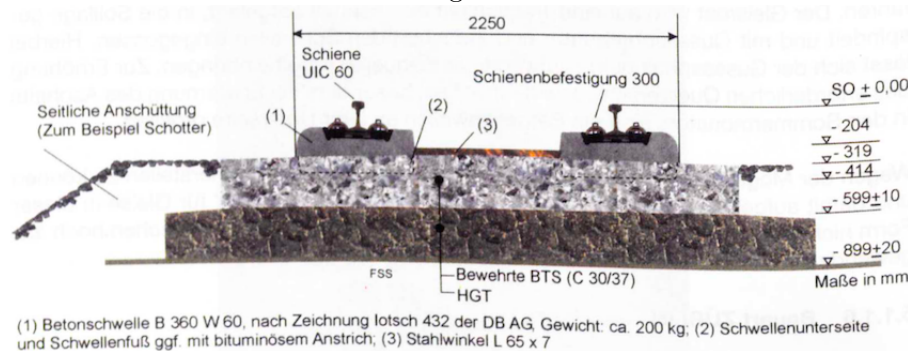


Abb. 4.10: Querschnitt der Bauart ZÜBLIN [4, Abb. 5.27]

Da unter anderem durch Absacken oder Wegschwimmen der Schwellen wiederholt Probleme bezüglich der Lagegenauigkeit auftraten, wurde bei der Errichtung der deutschen Neubaustrecke Köln – Rhein/Main ab 1998 eine neue Verlegetechnik entwickelt: Auf der hydraulisch gebundenen Tragschicht wurden außerhalb der zukünftigen Betontragschicht vor der Einbringung des Frischbetons in regelmäßigen Abständen lagegenau sogenannte Stützböcke errichtet. Für den Schwelleneinbau wurden zunächst fünf Schwellen an einen Verlegerahmen befestigt, der nach dem Verdichten der Betontragschicht bis zum Aufliegen auf den Stützböcken in den Frischbeton eingerüttelt wurde. Die Verlegerahmen verbleiben bei dieser Technik zur Lagesicherung so lange an den Schwellen, bis der Beton ausreichend erhärtet ist, um diese Aufgabe zu übernehmen. Aus diesem Grund wird bei umfangreicheren Projekten eine sehr große Zahl von Verlegerahmen benötigt, was diese Bauweise tendenziell unwirtschaftlich macht. Im weiteren Verlauf der Errichtung der Neubaustrecke Köln – Rhein/Main wurde daher zum Vergießen der Schwellen analog zur Bauart RHEDA 2000 übergegangen.

Von der klassischen Bauart ZÜBLIN mit eingerüttelten Schwellen wurden in den Jahren von 1988 bis 1998 in Deutschland knapp 50 km errichtet [4]. In Österreich wurden zwei Tunnel mit einer Gesamtlänge von knapp 2 km auf diese Art und Weise ausgestattet [5].

4.3.1.4 SBV

Die Bezeichnung SBV steht für **S**chwellen mit **B**itumen**v**erguss. Der Gleisrost wird auf einer Asphalttragschicht aufgespindelt und durch Vergießen mit Gussasphalt in seiner Lage fixiert. Die verwendeten Schwellen verfügen über profilierte Unterseiten, um auch bei heißen Außentemperaturen einen ausreichenden Querverschiebewiderstand zu gewährleisten. Da das Einbringen des Gussasphalts eine aufwändige manuelle Tätigkeit ist und Asphalttragschichten ausreichend genau für aufgelagerte Bauarten hergestellt werden können, wurde diese Technik nur für kurze Zeit angewendet [4].

4.3.2 Elastische Schwellenlagerung

Bei den Bauarten, die sich das Konzept der elastischen Schwellenlagerung zu Nutze machen, handelt es sich um leichte Masse-Feder-Systeme, die bezüglich Konstruktionsprinzip und Wirkungsweise durchaus Ähnlichkeiten mit dem klassischen Schotteroberbau aufweisen [4, 5]. Verschiedene Arten von Biblockschwellen werden mit sogenannten „Schwellenschuhen“ versehen, die zur Steuerung der elastischen Eigenschaften mit unterschiedlichen Einlagen ausgestattet werden können. Derartige Systeme sind sehr reparaturfreundlich, da die Gummischuhe als Trennschicht zwischen Schwelle und BTS fungieren und die Schwellenblöcke somit einzeln entnommen bzw. getauscht werden können. Diese Eigenschaft führt jedoch dazu, dass sich diese Systeme hauptsächlich für Anwendungen im Tunnelbereich eignen, da auf der freien Strecke Probleme mit eindringendem Wasser zwischen den Schwellenblöcken und der BTS entstehen können [4].

Gemäß Mach [5] werden derartige Systeme in Österreich standardmäßig in Weichen- und Kreuzungsbereichen angewendet, da sie den Einbau von Standardweichen für den Schotteroberbau in Feste Fahrbahnen erlauben. Zu diesem Zweck werden unter der Bezeichnung ÖBB-Phönix auch herkömmliche Monoblock-Weichenschwellen verwendet.

4.3.2.1 SBB-BÖZBERG/STEDEF

Diese Bauart wurde von den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und der Firma Roger Sonnevile/STEDEF unter der Prämisse der Konformität zum bestehenden Schotteroberbau der SBB entwickelt, das heißt es sollten für eine einfache Instandhaltung möglichst nur Bauteile verwendet werden, die bei den SBB bereits im Einsatz waren. Zu diesem Zweck wurden bei den SBB auch im Schotterbett verwendete Biblockschwellen (Stahlwinkel als Spurstange) mit Gummischuhen versehen und der so konstruierte Gleisrost mittels Montagehilfen unter den Schienen auf dem Ausgleichsbeton der Tunnelsohle in Sollage gebracht. Der Einbau ist je nach statischer Erfordernis alternativ auch in eine vorgefertigte bewehrte Bodenplatte möglich, wobei die Schwellenblöcke mittels Füllbeton in vorbereiteten Aussparungen fixiert werden. Diese Version ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Die Schienenneigung von 1:40 wird durch die entsprechende Neigung der Schwellenblockoberfläche realisiert [4].

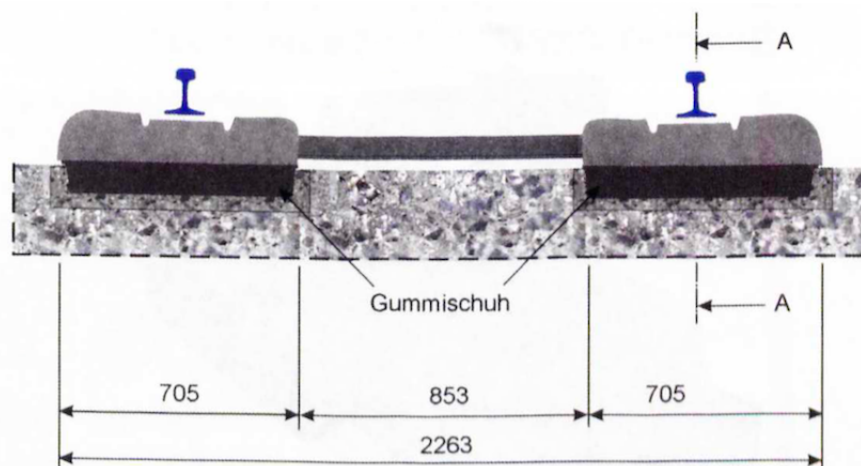


Abb. 4.11: Querschnitt der Bauart SBB-BÖZBERG-STEDEF [4, Abb. 5.36]

Ein erster Versuchsabschnitt mit 210 m Länge wurde 1966 im (alten) Bözbergtunnel errichtet [4, 38, 39], ab 1974 wurde im zweigleisigen 4,8 km langen Heitersbergtunnel ein Großversuch durchgeführt. Da das System unter anderem bei Messungen mit Geschwindigkeiten bis 200 km/h sowohl in technischen Belangen als auch bezüglich seiner Wirtschaftlichkeit überzeugte, kam es

bei weiteren Tunneln in der Schweiz zum Einsatz. 2014 wurden nach 40 Jahren Nutzungsdauer bei einem Gleis im Heitersbergtunnel sämtliche Schwellen getauscht und das Gleis auf das Schienenprofil UIC60 umgerüstet. Pro Nacht konnte dabei ein durchschnittlicher Baufortschritt von 100 m erreicht werden, es waren keine Betonarbeiten erforderlich. Das Gleis war direkt im Anschluss ohne Gleislagekorrekturen wieder mit der Streckengeschwindigkeit von 140 km/h befahrbar [38].

4.3.2.2 LVT

Die Bauart LVT (**L**ow **V**ibration **T**rack) ist eine Nachfolgeentwicklung der Bauart SBB-BÖZBERG/ STEDEF und wurde im Eurotunnel sowie ab 2003 bei vielen großen Tunnelbauprojekten in der Schweiz (u. a. Zimmerbergtunnel, Lötschbergbasistunnel, Gotthardbasistunnel) mit Streckengeschwindigkeiten bis 250 km/h angewendet [4, 38]. Die Unterschiede zur Vorgängerbauart sind

- die fehlenden Spurstangen (es werden temporäre Montagespurstangen verwendet) und
- die nicht geneigte Schwellenblockoberfläche (die Schienenneigung wird durch das geneigte Einbetonieren der Schwellenblöcke realisiert) [4].

Die Gesamtelastizität der Konstruktion verteilt sich auf die Schienenbefestigung (etwa 10-20 %) und die Schwellenauflagerung (etwa 80-90 %) [32]. Durch die bis zu 50 % größere Einbindetiefe der Schwellenblöcke im Vergleich zur Bauart SBB-BÖZBERG/STEDEF wurden Verbesserungen bezüglich der Konstanz der Spurweite sowie der lateralen Gleislagestabilität erzielt. Die Herstellung ohne Spurstangen führt zu besseren Eigenschaften bezüglich des Erschütterungsschutzes in bebauten Gebieten, bringt durch den höheren elektrischen Widerstand signalisierungstechnische Vorteile und verbessert die Begehrbarkeit der Fahrbahn im Rahmen der Gleisinspektion.

Vor dem Einbau des Systems LVT im Gotthardbasistunnel, der 2013 fertiggestellt wurde, wurden umfangreiche Tests und Überprüfungen vor allem bezüglich des Langzeitverhaltens der einzelnen Bauteile durchgeführt. Deren Ergebnisse stellten die SBB zufrieden, die Bauart LVT wird in der Schweiz inzwischen auch auf Brücken erfolgreich eingesetzt [38].

Abbildung 4.12 zeigt den Querschnitt des Systems im meterspurigen Albulatunnel der Rätischen Bahn (vgl. Kapitel 6.1.2.2), deren Einbau auf den folgenden Seiten anhand von Fotos beschrieben wird. Die grau dargestellten Teile des Querschnitts wurden vom Auftragnehmer für den Tunnelbau errichtet. Die Feste Fahrbahn wird nach Fertigstellung der Tunnelarbeiten in den vorbereiteten Betontrog eingebaut. Zu diesem Zweck wird zuerst die in etwas dunklerem rot dargestellte Grundtragplatte betoniert. In dieser Schicht, die an ihrer Oberfläche mit Besenstrich versehen ist, wird die Überhöhung hergestellt.

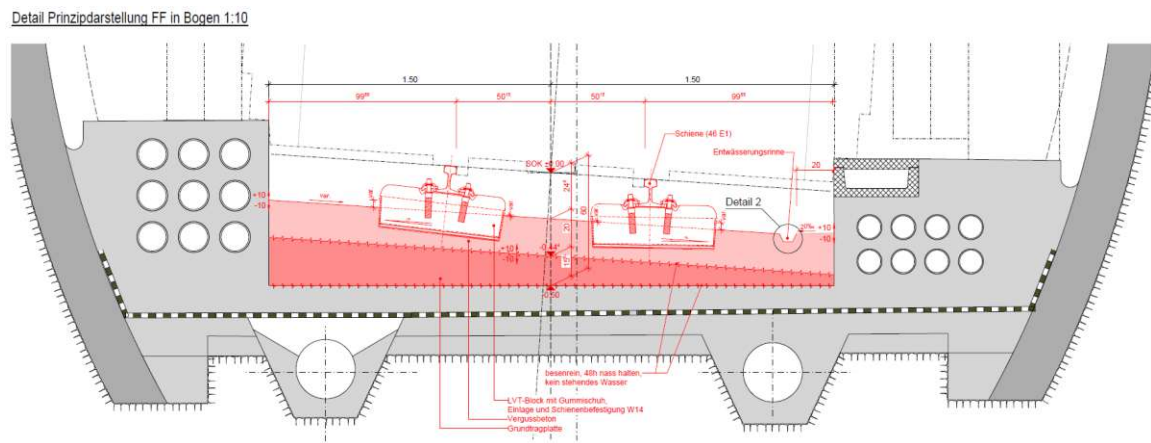


Abb. 4.12: Bauart LVT im Albulatunnel (nicht maßstäblich) [40]

Auf die ausgehärtete Grundtragplatte werden die Schwellenblöcke aufgelegt, mit Schienen versehen und der Gleisrost verschraubt. Diese Arbeitsschritte sind in den Abbildungen 4.13 bis 4.15 zu sehen.



Abb. 4.13: Auflegen der Schwellen im Albulatunnel [eigene Aufnahme]



Abb. 4.14: Auflegen der Schwellen im Albulatunnel [eigene Aufnahme]



Abb. 4.15: Montage der Schienen im Albulatunnel [eigene Aufnahme]

Nach dem Zusammenbau des Gleisrosts wird dieser in zwei Schritten in die richtige Lage gebracht: Zunächst wird die ungefähre Einstellung der Gleislage mit dem in Abbildung 4.16a sichtbaren Gerät durchgeführt. Dieses greift unter die Schienenköpfe, stützt sich auf der Grundtragplatte ab und hebt somit den Gleisrost in seine ungefähre Position. Die Lage wird mit einem Grobrichtsystem (vgl. ebenfalls Abbildung 4.16a) fixiert.



(a) Grobrichten des Gleisrosts



(b) Fixierter Gleisrost vor der Betonage



(c) Einbringen des Betons



(d) Noch nicht ausgehärtete Feste Fahrbahn

Abb. 4.16: Herstellung der Festen Fahrbahn im Albulatunnel [eigene Aufnahmen]

Im Anschluss an die erste Positionierung des Gleises wird die exakte Sollgleislage mit einem Feinrichtsystem, wie es in Abbildung 4.16b sichtbar ist, eingestellt. Dieses verfügt über mehr Justiermöglichkeiten als das im ersten Schritt eingesetzte Grobrichtsystem. Nach der Feinjustierung werden auch seitliche Abstützungen eingebaut, um eine horizontale Verschiebung des Gleisrosts während des Betoniervorgangs zu verhindern. Die sich auf die Grundtragplatte abstützenden Stangen des Feinrichtsystems sind eingefettet, um sie nach Erhärten des Füllbetons nach oben herausziehen und wiederverwenden zu können.

Die durch ihre Entfernung entstehenden Löcher werden danach vergossen bzw. verpresst. In der Gleisachse ist in Abbildung 4.16b die Schalung für die in der Geraden mittig angeordnete Entwässerungsrinne sichtbar, die vom Feinrichtsystem abgehängt wird. Der auf diese Art und Weise fixierte Gleisrost ist stabil genug, um während des Betoniervorgangs mit geringen Achslasten befahren zu werden.

Abbildung 4.16c zeigt das Einbringen des Frischbetons. Der abgebildete weiße Betonkübel wird von einem Zweiradlaster bewegt, die Befüllung erfolgt vor dem Tunnelportal. Der eingebrachte Frischbeton wird mit Rüttelflaschen verdichtet und im Anschluss geglättet.

Auf Abbildung 4.16d ist die geglättete und nachbehandelte Feste Fahrbahn während der Erhärtung zu sehen.

4.3.3 Aufgelagerte Bauarten

Von den aufgelagerten Bauarten erhoffte man sich durch bewusste Anordnung einer Fuge zwischen Gleisrost und Tragplatte die vielversprechende Kombination aus der Flexibilität des Schotteroberbaus und der Wartungsarmut von Festen Fahrbahnen [31]. Die Entwicklung erfolgte zunächst aus der Bauart SBV (vgl. Abschnitt 4.3.1.4), um auf das Aufspindeln des Gleisrosts und das manuelle Einbringen des Gussasphalts verzichten zu können [4].

Der Gleisrost wird bei den aufgelagerten Bauarten auf eine möglichst höhengenaue (± 2 mm) hergestellte Asphalttragschicht (ATS) aufgelegt. Allfällige Abweichungen von der Sollhöhe der Tragschicht können nur im Rahmen der Regulierungsmöglichkeit der Schienenbefestigung ausgeglichen werden. Aus diesem Grund werden hohe Anforderungen an die Herstellungsgenauigkeit der Tragschicht gestellt [4]. Wenzel et al. [41] nennen als Voraussetzung für die Erreichung der angestrebten Höhengenaugigkeit eine „sehr gute Einbautechnik“, die „dazugehörige Asphaltmaterialkenntnis“ sowie ein „gut eingespieltes Vermessungsteam“. Auch für die Abmessungen der eingesetzten Schwellen gelten höhere Anforderungen bezüglich der Produktionsgenauigkeit, um die Auswirkungen einer ungünstigen Überlagerung der Höhenabweichungen von Tragschicht und Schwelle abzumindern [30].

Die Konzepte für die Übertragung von Querkräften unterscheiden sich je nach Bauart – diese ist etwa durch Profilierung, Verzahnung oder den Einsatz von Dübelsteinen möglich [31]. Mit der Bauart BTD wurde auch ein System mit Direktauflagerung auf eine Betontragschicht entwickelt, das sich jedoch nicht durchsetzen konnte [4].

Die Verwendung von asphaltbasierten Systemen mit Direktauflagerung bringt wesentliche Vorteile in der Bauausführung mit sich:

- Asphalttragschichten können nur wenige Stunden nach ihrer Herstellung bereits von Baufahrzeugen befahren werden [4].
- Der Gleisrost kann mit üblichen Gleisbaumaschinen auf den Asphalt verlegt sowie in seine horizontale Sollage gebracht werden [2, 4].
- Eine Befahrung mit Arbeitszügen ist sofort nach dem Verlegen des Gleises möglich [4].

- Im Gegensatz zu Beton kann Asphalt weitgehend witterungsunabhängig eingebaut werden - bei Vorheizungen des Asphaltuntergrundes sowie Beimengung von entsprechenden Additiven können Asphalttragschichten bei bis zu -5°C hergestellt werden, was die Ausführung von FF-Baustellen im Winter erleichtert bzw. erst ermöglicht [41].

Asphalttragschichten haben gegenüber Betontragschichten bei den aufgelagerten Bauarten den Vorteil, dass allfällige Höhenkorrekturen durch Abfräsen grundsätzlich möglich sind [4]. Diese Nacharbeiten sind jedoch äußerst zeitaufwändig, weswegen Wenzel et al. [41] als Erfahrung aus einem Projekt mit sehr straffem Zeitplan für zukünftige Anwendungen empfehlen, ein Probefeld herzustellen, um die verwendete Technik sowie die eingesetzten Produkte bereits im Vorfeld aufeinander abstimmen zu können.

Die Schwellenfächer werden bei aufgelagerten Bauarten in der Regel mit Gleisschotter ausgefüllt, um die Asphalttragschicht vor zu großer Erwärmung und schädlichen UV-Strahlen durch Sonneneinstrahlung zu schützen. Der Gleisschotter erfüllt darüber hinaus eine stützende Funktion und sichert die Schwellen gegen Verkanten bzw. Verdrehen bei Schienenbrüchen oder großen temperaturbedingten Längenänderungen [4]. Die Einschotterung verbessert durch eine Verminderung der Schallabstrahlung auch die lärmtechnischen Eigenschaften [30].

Abgesehen vom System FFYS wurden von der DB mit Asphalt-Systemen gute Erfahrungen vor allem bzgl. ihrer Wartungsfreundlichkeit und Lagestabilität gemacht [41]. Nachteile der aufgelagerten Bauarten sind Verdrückungsgefahr sowie die Möglichkeit des Entstehens von Frostschäden als Konsequenz des Eindringens von Wasser zwischen Schwellenauflegerfläche und Asphalttragschicht. Besonderes Augenmerk ist auf Grund des plastischen Verhaltens von bituminösen Baustoffen auf die Langzeitstabilität zu legen [2].

4.3.3.1 SATO-Bauarten

SATO

Bei der ursprünglichen Bauart SATO der Studiengesellschaft Asphalt-Oberbau e.V. wurden die verwendeten Y-Stahlschwellen zur Lagesicherung auf die Asphalttragschicht aufgeklebt. In weiterer Folge ging man dazu über, in die Asphalttragschicht etwas außerhalb der zukünftigen Position der Schienen Flachstähle mit aufgeschweißten Ankerbolzen, auch Nelson-Anker genannt, einzubauen. Nach der Verlegung des Gleises wurden die Y-Stahlschwellen zur Abtragung von Quer- und Längskräften mit den herausstehenden Bolzen verschraubt. Abbildung 4.17 zeigt diese Version der Bauart SATO. Von 1986 bis 1990 wurden im Netz der DB knappe 5 km SATO errichtet [4]. Der 1987 erbaute 935 m lange Abschnitt im Linderhauser-Tunnel auf der Strecke Schwelm – Witten nahe Wuppertal war im Jahr 2010 noch ohne zwischenzeitliche Reparatur- oder Korrekturmaßnahmen in Betrieb Darr und Fiebig [4] und Jö. Frenzel und Jü. Frenzel [42].

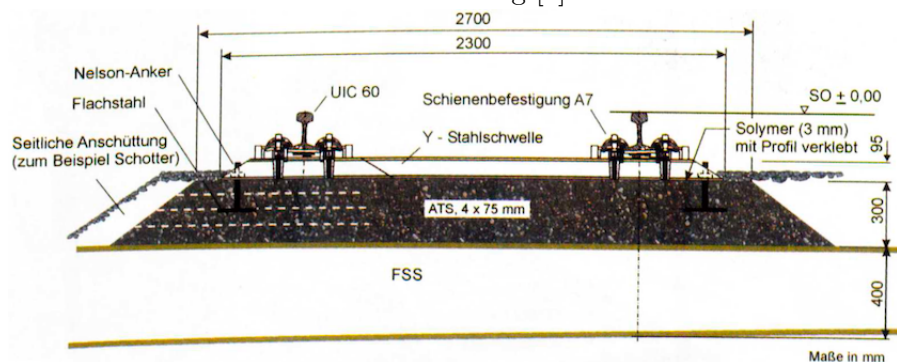


Abb. 4.17: Querschnitt der Bauart SATO [4, Abb. 5.45]

Da die beschriebene Vorgehensweise aufwändig und kostenintensiv war, wurde die Bauart weiterentwickelt:

FFYS

Bei der Bauart FFYS (**F**este **F**ahrbahn **Y**-Stahlschwelle, vgl. Abbildung 4.18) werden pro Gleis zwei längs laufende Nuten im Abstand der zu verlegenden Schienen in die ATS gefräst. In diese Nuten greifen zur Querkraftübertragung zwei an der Schwellenunterseite befestigte Bleche, die auch als Querriegel bezeichnet werden. Die Nuten werden im Anschluss mit elastischer Vergussmasse gefüllt.

Diese Variante der Festen Fahrbahn zeichnet sich durch ihre besonders geringe Aufbauhöhe aus, die durch die Verwendung der Y-Stahlschwellen erreicht wird: Die erforderliche Höhe zwischen Schienenunterkante und Oberkante der ATS beträgt lediglich 137 mm, die darunterliegende 30 cm starke ATS kann im Tunnel bei entsprechender Sohlqualität auf 15 cm reduziert werden [4, 42]. Bei Verwendung des Schienenprofils UIC 60 kann somit eine Schienenoberkante 46 cm oberhalb der Tunnelsohle realisiert werden.

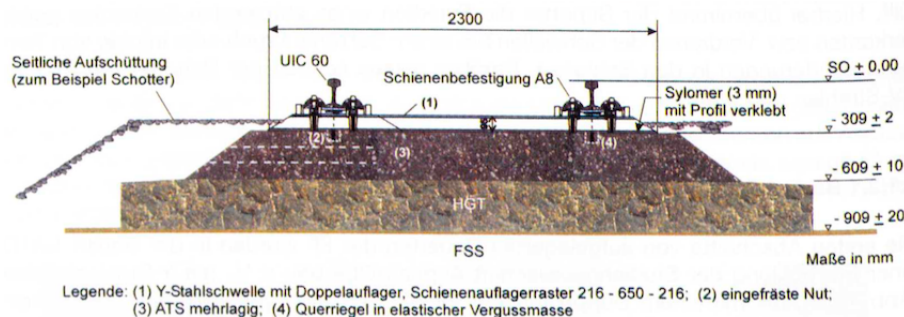


Abb. 4.18: Querschnitt der Bauart FFYS [4, Abb. 5.46]

Auf diese Art und Weise wurden 1994 etwa 30 Gleiskilometer errichtet: der Abschnitt Bitterfeld – Hohenthurm der zweigleisigen Strecke zwischen Berlin Anhalter Bahnhof und Halle an der Saale mit 13 Weichen sowie die Verkehrstunnel I und II am Leipziger Hauptbahnhof. 1996 kam die Bauart nochmals für 1,4 km in der Nähe von Halle an der Saale zum Einsatz, 2001 wurde der Rappensteintunnel mit der Bauart FFYS ausgerüstet (vgl. Kapitel 6.1.4.2) [4].

Am 1. August 2012 wurde der 14,9 km lange FFYS-Abschnitt zwischen Bitterfeld und Hohenthurm wegen die Betriebssicherheit gefährdender Instabilitäten in der Gleislage durch das zuständige Eisenbahn-Bundesamt für den Verkehr gesperrt. Der gesamte Bereich wurde innerhalb eines Jahres abgebrochen und durch die Systeme BÖGL (vgl. Kapitel 4.3.5.2) sowie RHEDA 2000 (in den Weichenbereichen, vgl. Kapitel 4.3.1.1) ersetzt [41, 43].

FFBS-ATS-SATO

Beim System FFBS-ATS-SATO (vgl. Abbildung 4.19) kommen statt der Stahlschwellen Spannbeton-Monoblockschwellen zum Einsatz. Von dieser Bauart wurden 1996 auf der deutschen Versuchsstrecke Waghäusel 390 m errichtet, die 2010 noch im Originalzustand in Betrieb waren [4, 42]. Weitere Einbauorte sowie aktuellere Informationen zum Zustand des Versuchsabschnittes sind nicht bekannt.

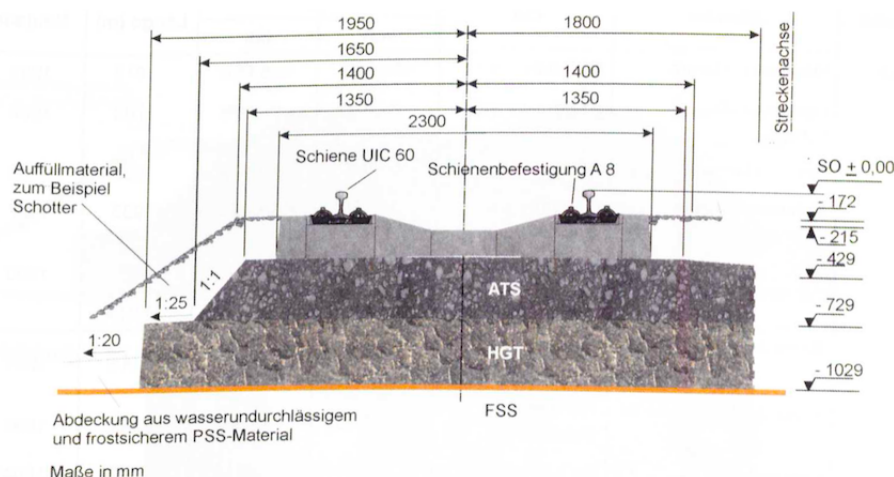


Abb. 4.19: Querschnitt der Bauart FFBS-ATS-SATO [4, Abb. 5.48]

4.3.3.2 ATD

Abbildung 4.20 zeigt den Querschnitt der Bauart ATD (Asphalttragschicht mit Direktauftragung), die eine direkte Weiterentwicklung der Bauart SBV (vgl. Kapitel 4.3.1.4) ist. Gemeinsam mit der Asphalttragschicht wird in der Gleisachse ein ca. 60 cm breiter Querkraftsockel errichtet. Nach der horizontalen Ausrichtung des Gleisrosts wird der Spalt zwischen dem Querkraftsockel und den Blöcken der Stahlbeton-Biblockschwellen mit Kunststoff vergossen. In weiterer Folge wurden auch Spannbeton-Monoblockschwellen mit Aussparung in der Sohle für die Aufnahme des Querkraftsockels eingesetzt. In den Jahren 1993 bis 1997 wurden in Deutschland etwas mehr als 27 km dieser Bauart errichtet [4]. Nach den Angaben von Wenzel et al. [41] lag der erste in dieser Bauweise errichtete Streckenabschnitt, die 1993/1994 errichtete Nantenbacher Kurve (Abschnitt Rohrbach-Abzw Nantenbach der Strecke Würzburg – Aschaffenburg [4]) im Jahr 2018 nach 25 Betriebsjahren noch unverändert.

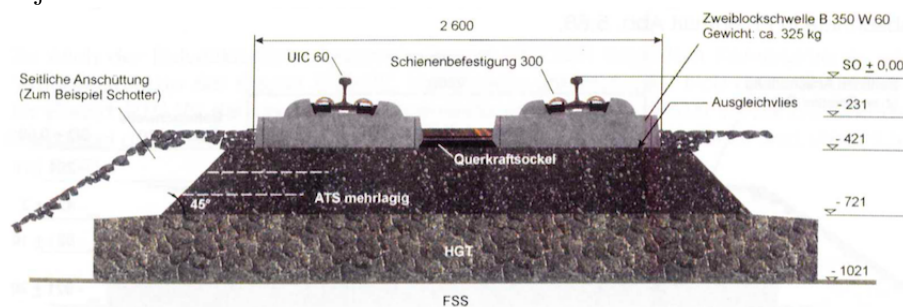


Abb. 4.20: Querschnitt der Bauart ATD [4, Abb. 5.51]

4.3.3.3 BTD

Das System BTD (Betontragschicht mit Direktauftragung) wurde von der Fa. Heilit + Woerner entwickelt und ist die einzige Bauart von Festen Fahrbahnen, bei der eine Direktauftragung auf eine Betontragplatte erfolgt. Zu diesem Zweck werden Spannbeton-Monoblockschwellen verwendet.

Bei der ursprünglichen Version der Bauart BTD wurde die Betontragschicht mit einer Führungsnut in der Gleisachse hergestellt. Durch eine Öffnung in der Schwellenmitte wird jede zweite Schwelle mit einem Spannbügel in der Führungsnut fixiert. Diese Version ist in Abbildung 4.21 zu sehen.

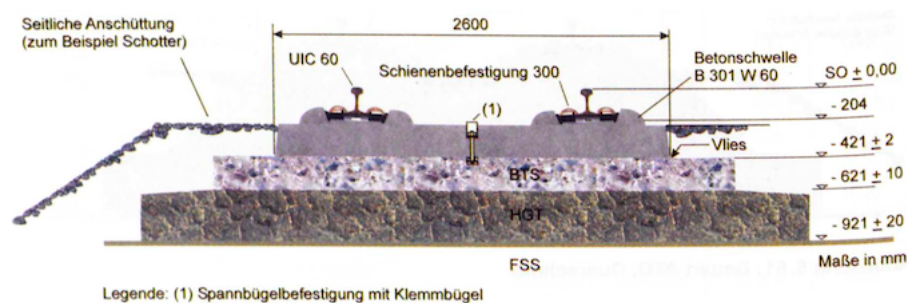


Abb. 4.21: Querschnitt der Bauart BTD mit Spannbügelbefestigung [4, Abb. 5.53]

Eine Weiterentwicklung erfolgte noch im Rahmen des ersten Einsatzes der Bauart (1994, knapp 500 m auf dem Streckenabschnitt Breddin-Glöwen direkt im Anschluss an den im selben Jahr errichteten dortigen RHEDA-Abschnitt): Die Führungsnut entfiel, stattdessen wurde nach der horizontalen Ausrichtung des Gleisrosts durch die Öffnung in der Mitte jeder 2. Schwelle ein Loch in die Betontragschicht gebohrt. Über einen Stahldübel mit Schraubenfeder und Mutter konnte die Schwelle nun auf der Betontragschicht fixiert werden. Abbildung 4.22 zeigt die Bauart BTD mit dieser Befestigungsart.

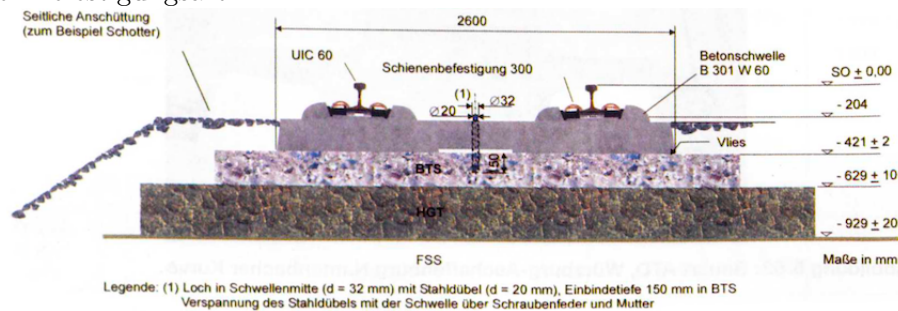


Abb. 4.22: Querschnitt der Bauart BTD mit Stahldübel-Befestigung [4, Abb. 5.54]

1997 wurden auf der Schnellfahrstrecke Hannover-Berlin 31 Gleiskilometer inkl. 6 Weichen unter Verwendung des weiterentwickelten Systems errichtet. Eine darüber hinausgehende Verwendung oder Weiterentwicklung der Bauart BTD ist nicht bekannt.

4.3.3.4 WALTER

Von der Bauart WALTER (vgl. Abbildung 4.23), die nach ihrer Entwicklerfirma benannt ist, wurden 1994 zwischen Hohenthurm und Rabbatz 9 Gleiskilometer errichtet. Das Prinzip dieser Bauart entspricht dem der weiterentwickelten Bauart BTD mit Stahldübeln, anstelle der Betontragschicht wird jedoch eine 30 cm starke mehrlagige Asphalttragschicht eingesetzt [4].

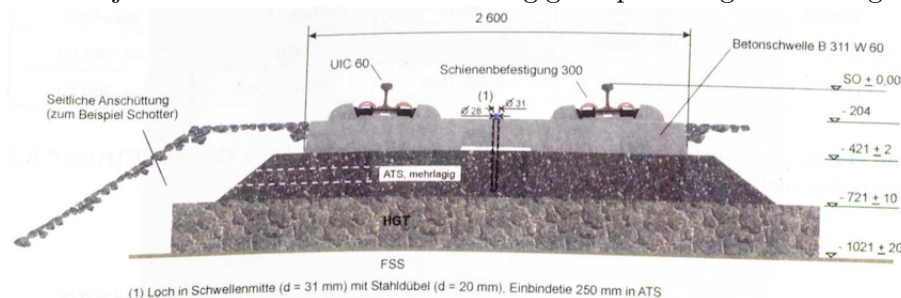


Abb. 4.23: Querschnitt der Bauart WALTER [4, Abb. 5.56]

Nach dem Auftreten von Schäden (Verbundprobleme zwischen den einzelnen Asphaltsschichten, Mängel im Gefüge der Einzelschichten) sowie einer geplanten Geschwindigkeitserhöhung von 160 auf 200 km/h empfahl ein Gutachten den Abbruch des gesamten Abschnittes zwischen Hohenthurm und Rabbatz, der 2018 durchgeführt wurde. Im Laufe des Rückbaus stellte sich heraus, dass grundsätzlich nur lokale Schadstellen auf wenigen hundert Metern vorlagen und eine kostengünstigere Sanierung des als „*durchaus dauerhaft*“ beschriebenen Systems WALTER mit hoher Wahrscheinlichkeit möglich gewesen wäre. Der Rückbau der vertikalen Verankerungselemente erwies sich dabei als sehr aufwändig. Da keine Setzungen o. ä. aufgetreten waren, entschied man sich, die unbeschädigten Asphalttragschichten zu erhalten und nur die beiden Deckschichten sowie den Gleisrost zu erneuern. Hierfür wurde das ebenfalls auf Asphalt aufgelagerte System GETRAC A3 (vgl. Kapitel 4.3.3.5) angewendet [41, 44].

Weitere Verwendungen der Bauart WALTER sind nicht bekannt, es existieren somit keine Streckenabschnitte dieser Bauart mehr.

4.3.3.5 GETRAC

Die Bezeichnung GETRAC ist eine Abkürzung für **German Track Corporation**. Beim System GETRAC wird jede zweite der verwendeten Beton-Monoblockschwellen über einen an ihrer Unterseite in einem Neoprenlager angebrachten Dübelstein schubfest mit der höhengengenau hergestellten Asphalttragschicht verbunden. Zu diesem Zweck werden Löcher in der obersten Asphaltsschicht vorbereitet, in denen die Dübelsteine mittels Vergießen fixiert werden. Je nach Eigenschaften der frostsicheren Tragschicht gibt es verschiedene Aufbauvarianten mit und ohne hydraulisch gebundene Tragschicht sowie mit unterschiedlich starken bzw. breiten Asphalttragschichten [4]. Die Bauarten GETRAC A1 und A3 unterscheiden sich hinsichtlich des verwendeten Schwellentyps sowie des vorgesehenen Geschwindigkeitsbereiches [4, 32]:

GETRAC A1

Für die Bauart A1 (vgl. Abbildung 4.24) wird eine 2,6 m lange Schwelle mit gewöhnlicher Breite und einem Gewicht von ca. 360 kg verwendet (B 316 W-60/54). Das System kam erstmals im Jahr 1995 auf einem 3,5 km langen zweigleisigen Streckenabschnitt zwischen den Berliner Bahnhöfen Westkreuz und Ruhleben zum Einsatz [4]. Nach Herstellerangaben wird das System für Geschwindigkeiten bis 230 km/h empfohlen [32].

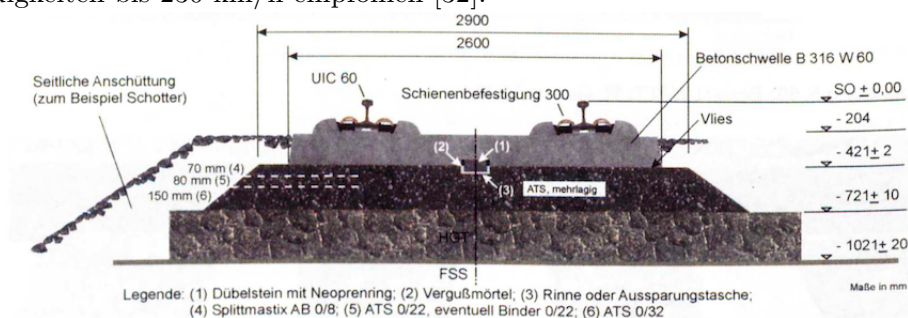


Abb. 4.24: Querschnitt der Bauart GETRAC A1 [4, Abb. 5.58]

Zehn Jahre nach der Inbetriebnahme wurde von DB Systemtechnik eine umfangreiche technische Analyse zu diesem Abschnitt angefertigt, die durchwegs positiv ausfiel [45]. Zu den Untersuchungsinhalten sowie für das Langzeitverhalten von Asphaltssystemen im Allgemeinen wird auf Abschnitt 4.6.2 verwiesen.

Zu den weiteren Einbauorten zählen ein 700 m langer Streckenabschnitt bei Frutigen in der Schweiz [4], 650 m auf der deutschen Lossetalbahn nahe Kassel und Anwendungen in Nürnberg sowie in Spanien nahe Las Palmas [46].

GETRAC A3

Bei der Bauart A3 handelt es sich um den mit Stand 2018 letzten Entwicklungsschritt der GETRAC-Asphaltssysteme [41]. Hierbei kommt eine sogenannte Breitschwelle mit 2,4 m Länge, 560 kg Eigengewicht und vergrößerter Auflagerfläche zum Einsatz. Abbildung 4.25 zeigt eine Detailaufnahme dieser Sonderform einer Schwelle.



Abb. 4.25: Probeaufbau der Bauart GETRAC A3 ohne Einschotterung [44, Abb. 2]

Bei identischen Untergrundbedingungen ist bei Anwendung von GETRAC A3 gegenüber GETRAC A1 eine Verringerung der Asphaltstärke um 4 bis 5 cm möglich, aus diesem Grund eignet sich die Variante A3 besonders für den Einbau in Tunneln zum Zweck der Vergrößerung des Lichtraumprofils [4].

Von 2001 bis 2015 wurden in mehreren deutschen Tunneln etwa 25 Gleiskilometer GETRAC A3 errichtet [4, 46]. Die Bauart kam auch bei der Erneuerung des 4,7 km langen zweigleisigen FF-Abschnittes zwischen Hohenthurm und Rabbatz zum Einsatz [41, 46] und ist laut Hersteller auch für Geschwindigkeiten über 230 km/h geeignet [32]. Ein weiterer Einsatzort (280 m, errichtet 2015/16) befindet sich zwischen Stolberg und Herzogenrath [46]. Darüber hinaus sind zum gegenständlichen Zeitpunkt keine Verwendungen bekannt.

4.3.3.6 IVES

Die Bauart IVES (**I**ntelligent, **V**ielseitig, **E**ffizient und **S**olide) wurde 2010 von der Rhomberg Sersa Rail Group entwickelt und nimmt durch ihre Konzeption eine Sonderstellung unter den aufgelagerten Bauarten ein. Im Rahmen der Entwicklung wurde versucht, die hohe Baugeschwindigkeit der aufgelagerten Bauarten mit der hohen Herstellungsgenauigkeit der Systeme, bei denen der Gleisrost durch Aufspindeln in Position gebracht wird, zu vereinen.

Der Grundaufbau ähnelt dem System GETRAC A3 – auf eine mehrlagige höhengenaue hergestellte Asphalttragschicht werden alle 65 cm sogenannte Quertragelemente aus Beton aufgelegt, die durchaus mit einer Breitschwelle vergleichbar sind (vgl. Abbildung 4.25). Zwischen den Quertragelementen und der Asphalttragschicht wird ein Kunstfaservlies aus Polypropylenfasern aufgelegt, um ggf. vorhandene Unebenheiten der Asphalttragschicht auszugleichen. Durch die breite Auflagefläche ist die Flächenpressung zwischen Betonfertigteile und Asphalt reduziert.

Die Quertragelemente sind wie herkömmliche Monoblockschwellen für den Schotteroberbau quer zur Fahrtrichtung vorgespannt und tragen je ein Stützpunktpaar. Während des Verlegens sind die Quertragelemente jedoch noch nicht mit Stützpunkten und Schienenbefestigungsmitteln ausgerüstet: Diese sind an den Schienen montiert und werden im nächsten Herstellungsschritt

zusammen mit den Schienen in den Aussparungen der Quertragelemente in ihre vertikale und horizontale Solllage gebracht. Nach dem Einrichten der Schienen und der Stützpunkte werden die Aussparungen der Quertragelemente durch Vergussöffnungen in den Unterlagsplatten der Schienenstützpunkte mit hochfestem Spezialmörtel ausgegossen.

Die Übertragung der Querkraft in die Asphalttragschicht erfolgt durch Stahlrohre, die vor dem Verlegen der Quertragelemente in ausgefräste Öffnungen der ATS geschlagen werden. Die eingeschlagenen Stahlrohre ragen als Dorn in mittige Öffnungen der Betonelemente, die zur Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung vergossen werden. Abbildung 4.26 zeigt diese Verdornung in orange. Am Beginn bzw. Ende des Gleisabschnittes, auf dem das System IVES zur Anwendung kommt, wird auf einer Länge von 50 m jedes Quertragelement mit einer derartigen Konstruktion gesichert. Im dazwischenliegenden Bereich sind die Abstände zwischen den Dornen von Örtlichkeit und Fahrgeschwindigkeit abhängig.



Abb. 4.26: Isometrie der Bauart IVES [47, Abb. 2]

Laut dem entwickelnden Unternehmen können mit dem System IVES auch extreme Überhöhungen stabil ausgeführt werden. Die Betonelemente sind direkt nach dem Verlegen belastbar, was den Bauablauf auf Baustellen mit eingeschränkten Platzverhältnissen vereinfacht. Die Quertragelemente können von herkömmlichen Zweibegebaggern verlegt werden, was auch in engen Tunneln wie dem Bruggwaldtunnel (normalspuriger eingleisiger Eisenbahntunnel in der Schweiz) bereits erfolgreich durchgeführt wurde. Die Herstellung der Asphalttragschicht erfolgt wie bei den anderen aufgelagerten Bauarten mit Geräten aus dem Straßenbau, wobei durch das nachträgliche Vergießen der Schienenstützpunkte höhere Herstellungstoleranzen bei der Asphalttragschicht möglich sind.

Das System IVES wird seit 2013 international eingebaut und ist unter anderem in Deutschland, Österreich, der Schweiz, dem Vereinigten Königreich und Australien (Schwerlastbereich) im Einsatz [47].

4.3.4 Monolithische Bauarten

Bei den monolithischen Bauarten kommen keine Schwellen zum Einsatz, die Schienenstützpunkte werden direkt in die aus Ortbeton hergestellte Betontragschicht eingesetzt. Da die Verankerung von Einzelstützpunkten in Asphalt auf Grund seiner mangelnden Festigkeit nicht möglich ist, kommen hierfür ausschließlich Betontragschichten zum Einsatz [2, 30].

Anfang der 1990er-Jahre konzentrierte sich die Entwicklung in Deutschland stark auf derartige Bauweisen. Im Jahr 1996 wurde bei der DB AG der „Versuchsabschnitt Waghäusel“ errichtet, in dem fünf monolithische Bauarten in Abschnitten von 250 bis 390 m Länge getestet wurden.

Darüber hinaus wurden auch zwei Abschnitte mit Bauarten mit Schwellen errichtet (FFBS-ATS-SATO, vgl. Kapitel 4.3.3.1 sowie HEITKAMP, vgl. Kapitel 4.3.1.2).

Bei monolithischen Systemen ist besonders auf die Rissbildung zu achten: Um das Auftreten von Rissen direkt durch die Schienenstützpunkte zu vermeiden, werden wie im Betonstraßenbau zur Steuerung der Rissbildung meist Kerben im noch nicht erhärteten Beton hergestellt [4].

4.3.4.1 RASENGLEIS

Auf diesem Abschnitt der Versuchsstrecke wurde von der Fa. Heilit + Woerner eine für Vollbahnerfordernisse angepasste Version des bekannten Grüngleises mit tiefliegender Vegetationsebene für ÖPNV und Straßenbahnen gebaut [4, 48]. Abbildung 4.27 zeigt den ausgeführten Querschnitt. Auf einer 30 cm starken bewehrten Drainbetonschicht wurden zwei ebenfalls bewehrte, jedoch nicht miteinander verbundene Beton-Längsbalken errichtet, die Schubübertragung in den Drainbeton wurde durch die Verwendung von Ankereisen sichergestellt [4]. Eine wichtige Rolle kommt bei dieser Bauart der Querbewehrung im Drainbeton zu, deren Aufgabe es ist, die Öffnung von ggf. entstehenden Längsrissen zu verhindern und somit eine konstante Spurweite zu gewährleisten. Im Bereich des Drainbetons ist aufgrund seiner Wasserdurchlässigkeit ein spezieller Korrosionsschutz der Bewehrung erforderlich [49].

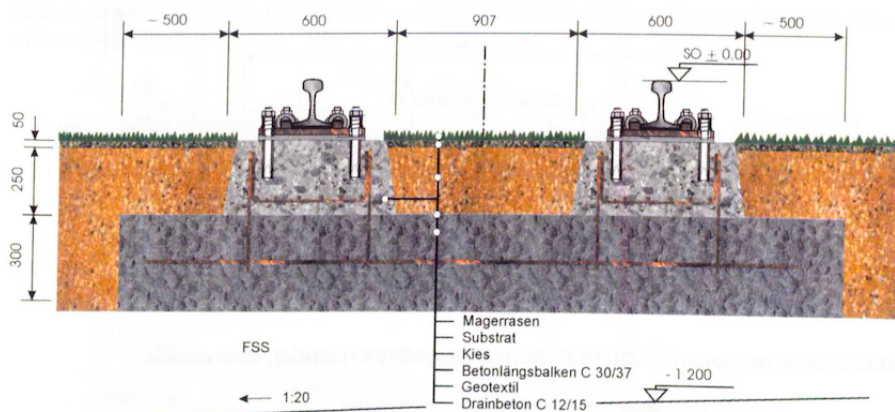


Abb. 4.27: Querschnitt der Bauart RASENGLEIS [4, Abb. 5.68]

Die Schienenstützpunkte wurden in vorgebohrte Löcher eingebracht und vergossen. Im Anschluss wurde der Bereich zwischen den und außerhalb der Längsbalken mit Substrat und Magerrasen begrünt [4]. Der Rasen hat hierbei eine lärmindernde Wirkung, ohne die Versickerung von Oberflächenwasser zu beeinträchtigen [50].

Dem System wurde nach der positiven Betriebserprobung in Waghäusel zwar die Zulassung erteilt [50], es scheint sich jedoch unter anderem bedingt durch Veränderungen der Spurweite, die Sanierungsmaßnahmen erforderlich machten [4], nicht bewährt zu haben – es sind keine weiteren Einbauorte bekannt.

4.3.4.2 HOCHTIEF/SCHRECK-MIEVES/LONGO

Bei dieser Bauart, die in Abbildung 4.28 dargestellt ist, werden die einzelnen Schienenstützpunkte im Nachhinein unter Verwendung von Fixier- und Justierrahmen mit stahlfaserbewehrten Ortbetonsockeln auf die bewehrte BTS betoniert. Zur Sicherstellung des Verbunds zwischen Stützpunkten und Betontragschicht werden in die noch nicht erhärtete BTS zuvor im Stützpunktabstand Bügel eingerüttelt. Auf einem Teilabschnitt kam für die Betontragschicht ebenfalls

Stahlfaserbeton zum Einsatz, was sich günstig auf das Rissbild sowie erhöhend auf die Plattensteifigkeit und somit positiv auf das Gebrauchsverhalten auswirkte [4, 51, 52].

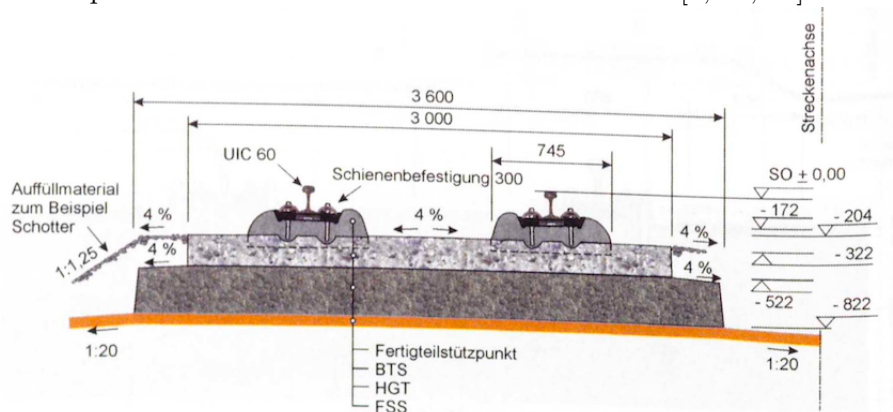


Abb. 4.28: Querschnitt der Bauart HOCHTIEF/SCHRECK-MIEVES/LONGO [4, Abb. 5.70]

Dickhut und Richter [51] berichten von einer schnellen Reparaturfähigkeit des Systems, gemäß Kočan [53] traten jedoch Probleme mit dem Ankersystem auf. Zu beiden Aspekten sowie zu weiteren Entwicklungen bezüglich dieser Bauart sind keine darüber hinausgehenden Informationen auffindbar.

4.3.4.3 FFC

Die Bezeichnung FFC steht für „Feste Fahrbahn Crailsheim“. Abbildung 4.29 zeigt den Aufbau dieser Bauart, bei der die Oberseite der Betontragschicht durchgehend mit dem Profil einer Schwelle hergestellt wird. Hierfür ist eine äußerst präzise Bauausführung erforderlich. Die Dübel für die Schienenbefestigung werden entweder in den Frischbeton eingerüttelt oder in gebohrte Löcher geklebt. Eine Kerbe nach jedem 3. Stützpunktpaar steuert die Rissbildung und ermöglicht das Abfließen von Oberflächenwasser.

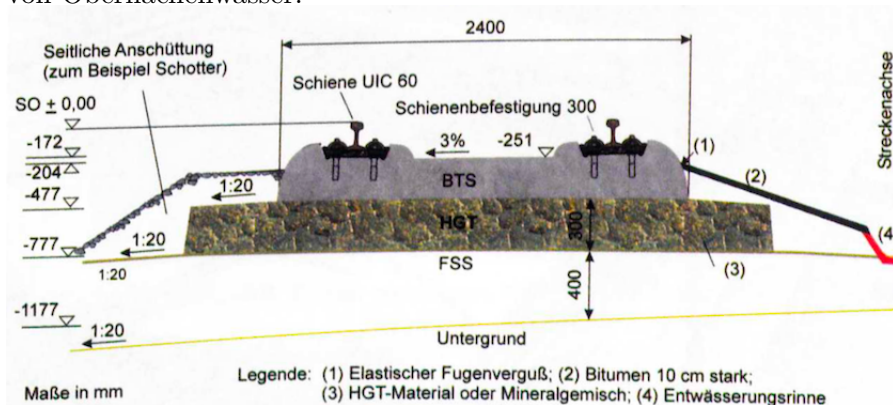


Abb. 4.29: Querschnitt der Bauart FFC [4, Abb. 5.72]

Das System FFC kam nach dem Einbau auf der Versuchsstrecke Waghäusel im Jahr 1996 nochmals auf 580 m Länge der Hochgeschwindigkeitsstrecke Berlin – Hannover nahe Groß Behnitz zur Anwendung (1998). Beide Bauabschnitte wurden durch die Fa. SBI (System Bahnbau International) errichtet.

Auf Grund von Schäden in der Betontragschicht wurde der Abschnitt im Bereich Waghäusel 2001 abgetragen und durch die Bauart INFUNDO (vgl. Kapitel 4.3.6.1) ersetzt. Das System FFC wird nicht mehr verfolgt, es entstand daraus jedoch die Bauart INPLACE, die nur bei Straßen-

und Stadtbahnen angewendet wird [4]. Zum Zustand des Streckenabschnitts bei Groß Behnitz sind keine Informationen verfügbar.

4.3.4.4 BES

Die Bauart BES (**B**etontragschicht mit **E**inzelstützpunkten) verfügt über den selben Aufbau wie das System FFC (vgl. Abschnitt 4.3.4.3). Die einzigen Unterschiede sind die errichtende Firma (hier Fa. Heilit + Woerner) sowie die detaillierte Formgebung der Betontragschicht (vgl. Abbildungen 4.29 und 4.30) [4]. Gemäß Mattner und Freystein [52] wurden in den Jahren 2000 und 2002 vom deutschen Eisenbahn-Bundesamt zwei Weiterentwicklungen („BES IV“ und „BES auf ToB“) zur Betriebserprobung zugelassen. Weitere Einbauorte oder Informationen zum Zustand des betreffenden Streckenabschnittes in Waghäusel sind jedoch nicht bekannt.

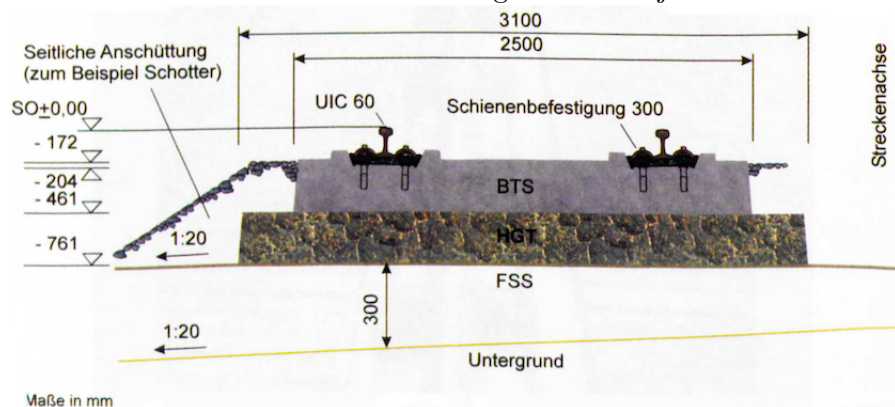


Abb. 4.30: Querschnitt der Bauart BES [4, Abb. 5.78]

4.3.4.5 BTE

Die Bezeichnung BTE leitet sich ebenfalls aus „**B**etontragschicht mit **E**inzelstützpunkten“ ab. Der Abschnitt auf der Versuchsstrecke Waghäusel wurde von der Fa. ZÜBLIN errichtet, den entsprechenden Systemquerschnitt zeigt Abbildung 4.31. Die Betontragschicht wird bei dieser Bauart im Bereich der Schienenbefestigungen bis auf Unterbrechungen zur Ableitung von Oberflächenwasser zunächst verstärkt hergestellt. Vor dem Einbohren und Einkleben der Schienenbefestigungen werden die Auflagerflächen durch Abfräsen begradigt und höhenkorrigiert – dies kann entweder vor oder nach Abschluss des Aushärtungsvorganges erfolgen [4, 54]. Weitere Einbauorte oder Informationen zum Zustand des betreffenden Streckenabschnittes in Waghäusel sind nicht bekannt.

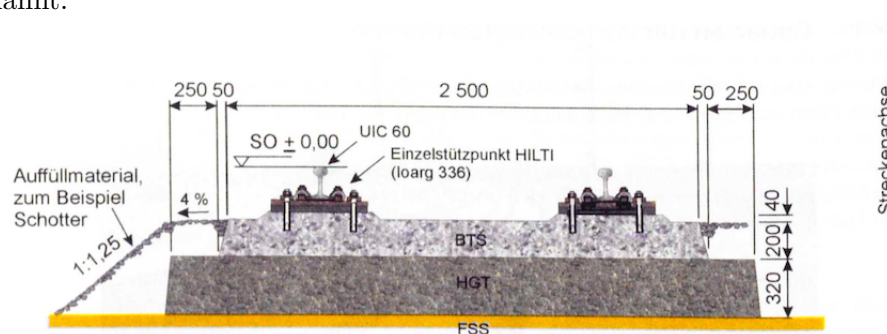


Abb. 4.31: Querschnitt der Bauart BTE [4, Abb. 5.80]

4.3.4.6 NBU

Die Bauart NBU (vgl. Abbildung 4.32) wurde von der Naumberger Bauunion GmbH & Co in Kooperation mit der ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH entwickelt. Auch hierbei kommen Einzelstützpunkte auf einer fugenlosen Betontragschicht zum Einsatz.

Auf einer hydraulisch gebundenen Tragschicht oder der Sohle des Tunnels oder Trogbauwerks wird mit einem modifizierten Gleitschalungsfertiger die Betontragschicht mit zwei 9 cm breiten und 11 cm tiefen Längskanälen pro Schiene hergestellt [55]. Die Betontragschicht verfügt über durchgehende Längs- und Querbewehrung, die unkontrollierte Bildung von Rissen wird darüber hinaus durch die Anordnung von Scheinfugen vermieden [55, 56].

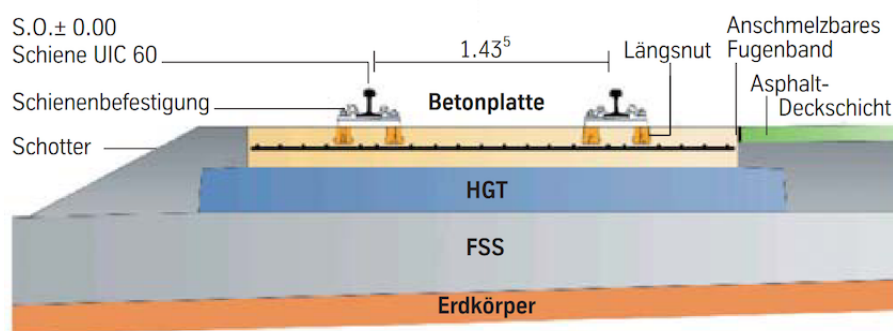


Abb. 4.32: Querschnitt der Bauart NBU [56, S. 2]

Nach dem Aushärten der Betontragschicht werden die bereits mit dem Befestigungssystem ausgerüsteten Schienen unter der Verwendung von temporären Spurstangen, Hebe- und Richtkeilen in Position gebracht und fixiert. Im Anschluss werden die Ankerschrauben der Schienenbefestigungen mit einem zementbasierten Mörtel in den Längskanälen, die in Abbildung 4.32 in dunklem gelb dargestellt sind, vergossen. In Bögen wird die Lage der Schienen bis zum Aushärten mit zusätzlichen Haltevorrichtungen zwischen Schienenfuß und BTS-Außenkante gesichert [55].

Durch den bewusst vereinfachten Systemaufbau, den linearen Baufortschritt und die Verwendung von Standardtechnik für alle Arbeitsschritte kommt es bei der Errichtung des Systems NBU gegenüber Bauarten mit einbetonierten Schwellen nahezu zu einer „Halbierung der Anzahl von [...] Arbeitsschritten“ [55].

2008 wurde eine Versuchsabschnitt im Netz der DB AG errichtet und eröffnet. Aufgrund der beengten Verhältnisse am Einbauort kam statt des Gleitschalungsfertigers jedoch eine Ausführung mittels Pumpbeton zum Einsatz [56]. Die Zulassung zur Betriebserprobung wurde bis 2014 verlängert [57], zum weiteren Schicksal der Teststrecke sind keine Informationen verfügbar. Im Juni 2017 wurden vom deutschen Eisenbahn-Bundesamt Zulassungen für die Betriebserprobung verschiedener Versionen des Systems „NBU 2012“ erteilt [58–60], die Ausführung von weiteren Versuchsabschnitten ist jedoch nicht dokumentiert.

4.3.4.7 Pinzgauer Lokalbahn

Auf der Strecke der österreichischen Pinzgauer Lokalbahn (Salzburg) wird aktuell auf mehreren kurzen Abschnitten eine Feste Fahrbahn aus Ortbeton mit Einzelstützpunkten ausgeführt. Die Schienen inklusive Schienenbefestigungen werden hierbei über einer Lastverteilplatte aus Filterbeton in Sollage gebracht, anschließend wird die Betontragschicht hergestellt. Wo dies erforderlich ist, kann nach dem Aushärten ein hochfester Mörtelunterguss ergänzt werden. Bezüglich der zu dieser Entwicklung führenden Überlegungen sowie für eine Querschnittsabbildung wird auf Kapitel 6.2 verwiesen. Bei dieser Bauart ist keine Anordnung von Kerben vorgesehen,

die Rissöffnung wird durch Ausführung eines entsprechenden Bewehrungsgrads auf maximal 0,3 mm begrenzt.

4.3.5 Bauarten mit Fertigteilplatten

Nach durchwachsenen Erfahrungen mit der 1967 hergestellten Versuchsstrecke Hirschaid hatten erlebten die Bauarten mit Fertigteilplatten ihren ersten erfolgreichen Einsatz in Deutschland im Jahr 1977 auf der Strecke Dachau-Karlsfeld [34]. Bedingt durch die hohen Investitionskosten bei Plattensystemen lag der Fokus bei der Festen Fahrbahn danach vor allem in Deutschland lange auf der Verwendung von Schwellen und/oder Ortbeton, während in Asien bereits früher im großen Stil auf Systeme mit Fertigteilplatten gesetzt wurde (z. B. in Japan, vgl. Kapitel 4.3.5.4) [30]. Nach technischen Fortschritten in der Fertigteilproduktion und damit im Zusammenhang stehenden Verbesserungen bzgl. deren Wirtschaftlichkeit kam es in Mitteleuropa erst vergleichsweise spät (1989 in Österreich mit dem System ÖBB-PORR, ab 1999 auch in Deutschland) zu Weiterentwicklungen von Systemen mit Fertigteilplatten [4, 34, 37].

4.3.5.1 KARLSFELD

In der Nähe des gleichnamigen Bahnhofs auf der Strecke München – Treuchtlingen begann 1977 ein 400 m langer Großversuch der Bauart KARLSFELD unter Verwendung von Gleistragplatten. Die Fertigteilplatten wurden hierbei direkt auf der hydraulisch gebundenen Tragschicht verlegt, mit Schienen versehen und unter Verwendung von Winden horizontal ausgerichtet. Zur Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung zwischen den Platten wurde die in den Fugen herausstehende Längsbewehrung verschweißt. Im nächsten Schritt werden die bereits gekoppelten Platten mittels Spindeln in ihre vertikale Solllage gebracht [4]. Die Fixierung der Platten erfolgte mittels Unterguss aus frostsicherem Bitumen-Zement-Mörtel, der durch Füllöffnungen in den Platten eingebracht wurde [4, 37]. Abbildung 4.33 zeigt den auf diese Art und Weise hergestellten Querschnitt.

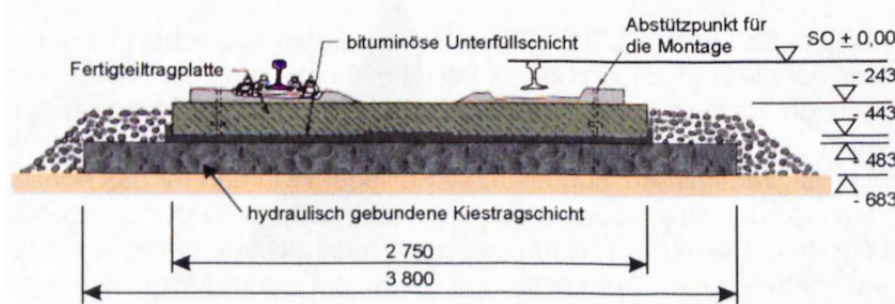


Abb. 4.33: Querschnitt der Bauart KARLSFELD [4, Abb. 5.84]

Bis zum Jahr 2006 hatte die so errichtete Fahrbahn einer Belastung von über 550 Mio. Lasttonnen ohne Auftreten von Schäden standgehalten [4].

Auf der Versuchsstrecke Karlsfeld wurden 1977 noch vier weitere Bauarten (alle mit vorgefertigten Tragplatten bzw. Tragrosten) getestet, Weiterentwicklungen der angewendeten Systeme kamen bei der Versuchsstrecke Hößbach 1988 zum Einsatz. Dort gelangte man zu der Erkenntnis, dass die Systeme mit FT-Tragrosten auf Grund ihrer hohen Kosten nicht konkurrenzfähig sind [34].

1999 wurde nach dem erfolgreichen Einbau eines Fertigteilplatten-Systems im Bahnhof Rot-Malsch der Versuch unternommen, die Bauart auf der Strecke Hattstedt-Husum im Bogen anzuwenden. Hierbei ergaben sich jedoch Probleme bei der Gleisgeometrie, die die Eignung der

Bauart für Hochgeschwindigkeitsstrecken fraglich erschienen ließen [37]. Die beiden Abschnitte in Rot-Malsch (1999) sowie auf der Strecke Hattstedt-Husum markieren den Übergang von der Bauart KARLSFELD zur Bauart BÖGL, je nach Quelle werden diese Einbauorte noch der Bauart KARLSFELD zugeordnet bzw. mit den früheren Anwendungsfällen gemeinsam als Bauart FTP bezeichnet oder bereits als Premiere der Bauart BÖGL gesehen, die als „*Renaissance*“ der Bauart KARLSFELD gilt [4, 37].

4.3.5.2 BÖGL

Die Bauart BÖGL stellt eine Weiterentwicklung der Bauart KARLSFELD dar. Abbildung 4.34 zeigt einen Querschnitt des Aufbaus sowie eine isometrische Darstellung der verwendeten 6,45 m langen Fertigteileplatten. Diese bestehen aus Stahlfaserbeton, sind in Querrichtung vorgespannt und können für verschiedene Spurweiten hergestellt werden. Auf einer Fertigteileplatte befinden sich 10 Stützpunktpaare, wobei sich zwischen 2 Paaren jeweils eine 4 cm tiefe Kerbe als Sollbruchstelle befindet, um eine Rissbildung durch die Schienenstützpunkte zu vermeiden [4]. Durch die Ausbildung der Risse in den Sollbruchstellen funktioniert der Gleisrost als System aus Breitschwellen, die in Längsrichtung miteinander gekoppelt sind [2].

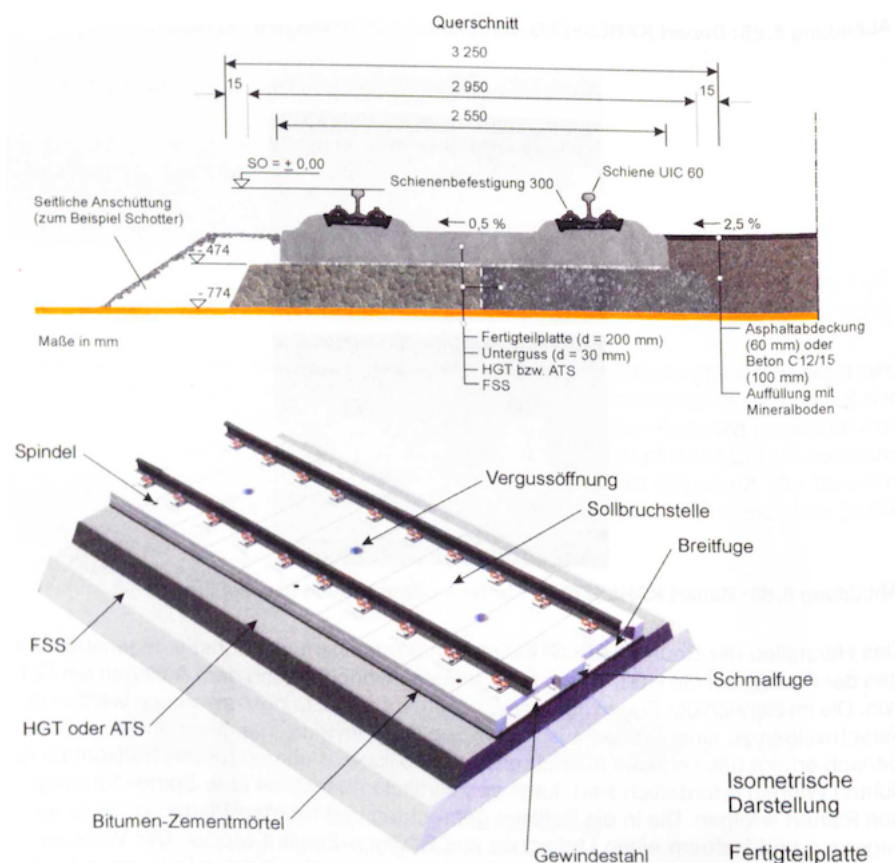


Abb. 4.34: Querschnitt und Plattenisometrie der Bauart BÖGL [4, Abb. 5.87]

Bogenradien, Überhöhungen und Überhöhungsrampen werden bei der Plattenfertigung berücksichtigt. Für die Verwendung in Masse-Feder-Systemen ist eine verstärkte Ausführung der Gleistragplatten möglich. Für leichte Masse-Feder-Systeme können die Fertigteileplatten an der Unterseite ab Werk mit Elastormatten ausgestattet werden [4]. Das Gewicht einer Platte ohne

Schienenbefestigungen beträgt ca. 9 Tonnen [2].

Der Errichtungsprozess setzt sich aus den folgenden Schritten zusammen, wobei der letzte Schritt bei der Ausbildung von schweren Masse-Feder-Systemen entfällt:

1. Auslegen der Platten auf einer hydraulisch gebundenen Tragschicht oder Asphalttragschicht
2. Anbringen der Schienen
3. Verbindung der Einzelplatten mit Spannschlössern an den im Fugenbereich herausstehenden Gewindestäben
4. horizontale und vertikale Ausrichtung der Platten mittels Spindeln und temporärer, von außen angreifender Justiereinrichtungen
5. Fixierung der Platten durch Einbringen eines Bitumen-Zement-Mörtels durch 3 Vergussöffnungen pro Platte
6. nach dem Aushärten des Mörtels: Verspannen der Platten mit den Spannschlössern, Ausgießen der Fugen zwischen benachbarten Platten mit Beton

Beim Auftreten von Setzungen über 76 mm, die mit der Schienenbefestigung nicht mehr ausgeglichen werden können, kann die Platte mit einer Seilsäge vom Unterguss getrennt und erneut in Solllage gespindelt und untergossen werden [2, 4].

Der erste große Einsatz der Bauart BÖGL erfolgte 2005 auf der Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt im Umfang von 70 Gleiskilometern [4]. Die Bauweise fand sowohl in Deutschland (z. B. Stadtbahn Berlin [4], Bitterfeld-Hohenthurm [41] sowie Erfurt-Illmenau [61]), als auch international Verbreitung und wurde unter anderem in China (über 1000 km Streckenlänge) [35] und Israel [62] angewendet.

4.3.5.3 ÖBB-PORR

Das System ÖBB-PORR wurde von seinen Namensgebern ÖBB sowie PORR AG gemeinsam entwickelt und erstmals 1989 auf einem 264 m langen Abschnitt der Franz-Josefs-Bahn bei Langenleobarn eingebaut. Abbildung 4.35 zeigt einen möglichen Querschnitt bei Ausführung der Bauart ÖBB-PORR sowie eine Isometrie der Fertigteilplatte.

Die Gleistragplatten fallen mit 5,16 m etwas kürzer und einem Gewicht von ca. 5 Tonnen (ohne Schienenbefestigungsmittel) deutlich leichter aus als bei der Bauart BÖGL und können schlaff bewehrt oder unbewehrt ausgeführt werden. Bogenradien von unter 3000 m müssen bei der Plattenherstellung berücksichtigt werden, während Übergangsbögen sowie Anrampungen durch Ausgleichsplatten in den Schienenbefestigungen realisiert werden. Auch bei der Bauart ÖBB-PORR ist eine Anpassung der Platten an verschiedene Spurweiten möglich [4].

In der Gleisachse verfügen die Platten über zwei ca. 60 x 80 cm große [32], rechteckige Vergussöffnungen. Die konische Form dieser Öffnungen (unten kleiner als oben) trägt zur kraftschlüssigen Verbindung zwischen Fertigteil und Vergussbeton bei. Die Plattenunterseite sowie die Wände der Vergussöffnungen sind mit einer PU-Gummigranulat-Mischung beschichtet, was der Bauart ÖBB-PORR bezüglich des Entkopplungsverhaltens die Eigenschaften eines leichten Masse-Feder-Systems verleiht [32]. Darüber hinaus trägt das Gummigranulat zur Verteilung von Lastspitzen aus der Verkehrslast bei und wirkt als Trennschicht zwischen Platte und Vergussbeton, wodurch beim Auftreten von Schäden das Ablösen der Fertigteilplatte im Anschluss an das Wegstemmen des Schubsockels aus Vergussbeton erleichtert wird [5, 32].

Nach der Herstellung der Unterkonstruktion (hydraulisch gebundene Tragschicht, Beton-Lastverteilerplatte oder Tunnelsohle) werden die Platten auf Abstandhaltern ausgelegt und mit Schienen versehen. Im Anschluss an das horizontale Ausrichten wird die Platten-Schienen-Konstruktion unter Verwendung Justiereinrichtungen in den Platten in die vertikale Solllage gespindelt. Die nächsten Schritte sind das Aufstellen einer seitlichen Schalung sowie die Montage der Bewehrung in den Vergussöffnungen. Vor dem Einbringen des selbstverdichtenden Vergussbetons werden die Platten und Schienen rund um die Vergussöffnung zum Schutz vor Verschmutzungen für die Dauer des Betoniervorgangs abgedeckt. Die Vergussbetonschicht kann unbewehrt (4 cm stark, höhere Betongüte, Anwendung in Tunneln und auf Brücken) oder bewehrt (8 cm stark, geringere Betonfestigkeit ausreichend) ausgeführt werden. In letzterem Fall sind vor dem Ablegen der Fertigteilplatten auf der Unterkonstruktion spezialangefertigte Bewehrungsmatten zur Rissbreitenbeschränkung auszulegen [2, 4].

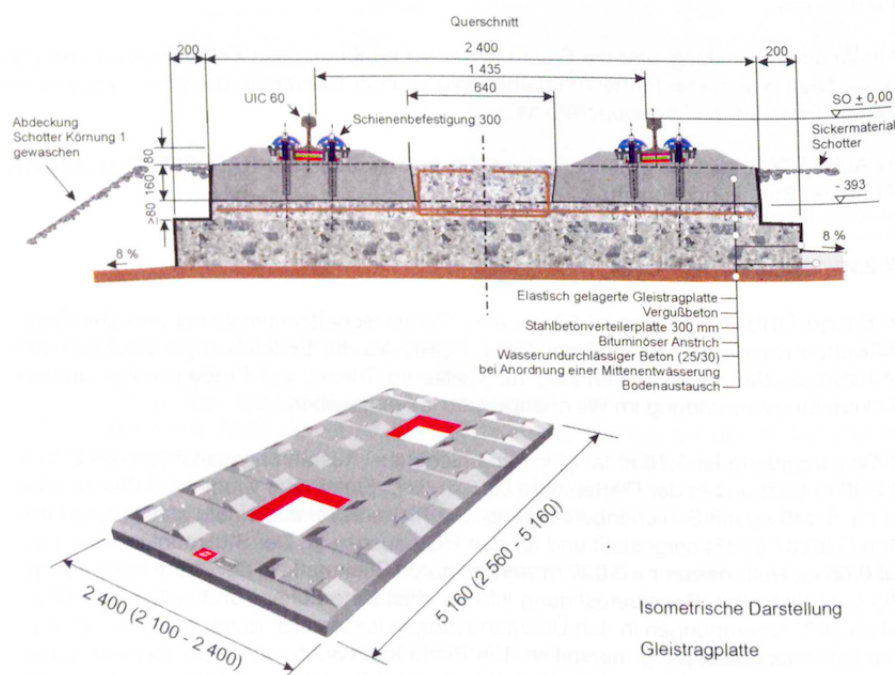


Abb. 4.35: Querschnitt und Plattenisometrie der Bauart ÖBB-PORR [4, Abb. 5.92]

Mit der Dissertation „Zustandsbewertung und Nutzungsdauerprognose von Festen Fahrbahn Systemen im Netz der ÖBB“ von Mach [5] liegen vor allem zur Bauart ÖBB-PORR umfangreiche Untersuchungen zu ihrem Alterungs- und Langzeitverhalten vor. Da die in dieser Quelle präsentierten Erkenntnisse auch auf andere FF-Systeme anwendbar sind, wird diesbezüglich auf Abschnitt 4.6.1 der vorliegenden Diplomarbeit verwiesen.

4.3.5.4 SHINKANSEN

Auf den Strecken des japanischen Hochgeschwindigkeitsverkehrs (Shinkansen) werden seit 1972 Fertigteilplatten mit geringer Vorspannung in beiden Achsrichtungen verwendet. Diese sind ca. 5 m lang und werden an den Plattenübergängen von runden Betondübeln mit 40 cm Durchmesser, die fest mit der darunterliegenden Betontragschicht verbunden sind, in Position gehalten (vgl. Abbildung 4.36). Der Unterguss erfolgt mit einer etwa 40 mm dicken Schicht aus Bitumen-Zement-Mörtel, in lärmsensiblen Bereichen besteht die Möglichkeit, unterhalb der Platten eine 25 mm starke Gummimatte anzuordnen. In der Regel kommen Schienenbefestigungssysteme mit vergleichsweise geringer Elastizität zum Einsatz [2, 31, 32, 63].

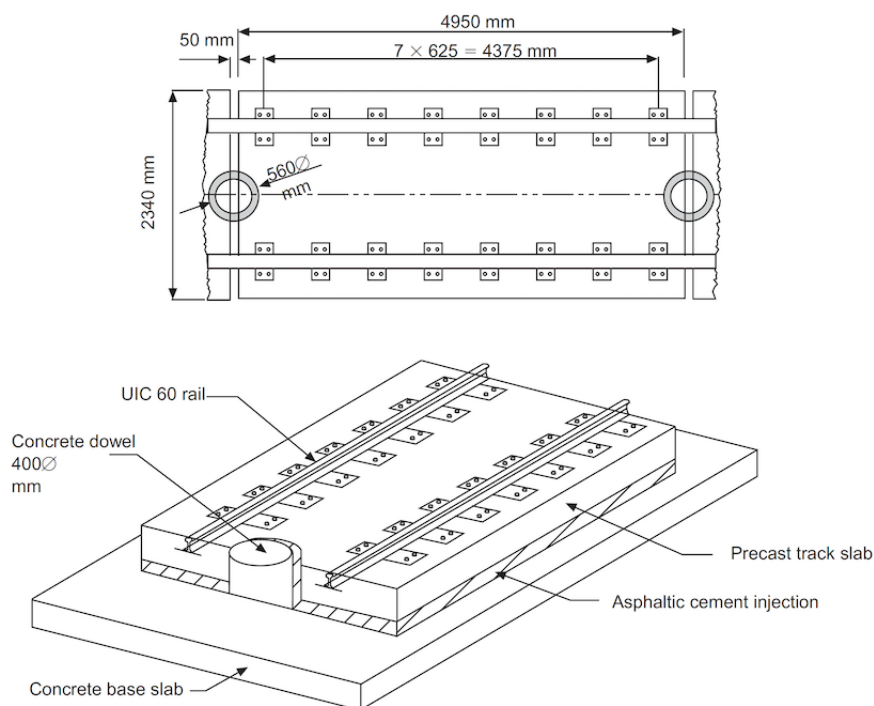


Abb. 4.36: Grundriss und Isometrie des japanischen Shinkansen-Systems [63, Abb. 3]

Die ursprünglich verwendeten Platten waren mit 190 mm dünn ausgeführt und wogen etwa fünf Tonnen. Neuere Versionen der Platten sind mit 220 mm etwas dicker und verfügen in der Mitte über eine knapp 1 x 3 m große Öffnung, um eine bessere Vergussqualität zu erreichen [2, 31, 32, 63].

Diese Oberbauform wird nur auf Kunstbauwerken angewendet, auf denen die japanischen Strecken zum überwiegenden Teil verlaufen, da beim Einsatz auf Erdbauwerken Aufwölbungen der Plattenränder auftraten. Streckenabschnitte auf Erdbauwerken werden daher in Japan meist mit Schotteroberbau ausgerüstet.

Auftretende Probleme betrafen die Schienenbefestigungen, die Frostbeständigkeit des Untergusses sowie Aufwölbungen im Bereich der Plattenfugen in Tunnelbereichen und machten teilweise die Sanierung von mehreren hundert Streckenkilometern erforderlich [2, 31, 32].

4.3.5.5 FS (Italien)

Das in Italien zum Einsatz kommende Feste Fahrbahnssystem weist große Ähnlichkeit zur japanischen Standardbauweise auf. Die Fixierung der Fertigteilplatten erfolgt jedoch durch an den Platten angebrachte „Stopper“, die in vorbereitete Aussparungen in der Betontragschicht eingreifen. Die Aussparungen werden im Anschluss mit Mörtel ausgegossen. Im Gegensatz zu Japan werden vorwiegend Schienenbefestigungen mit hoher Elastizität eingesetzt [32].

Auch beim italienischen Plattensystem kam es zu Problemen mit der Frostbeständigkeit des verwendeten Mörtels [31].

4.3.5.6 RhB

Die **R**hätische **B**ahn AG entwickelte in Zusammenarbeit mit der Ingenieurbureau Heierli AG die Bauart RhB für den Einsatz auf Meterspurstrecken in Kombination mit der „Normalbauweise Tunnel“ (vgl. Kapitel 6.1.1). Das hierbei verfolgte Ziel war, einen temperaturunabhängigen,

schnellen Einbau in möglichst nur wenige Tage andauernden Totalsperren zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde in Abstimmung mit in dieser hoch gelegenen Region erfahrenen Baufirmen auf Untergussmaterialien und vor Ort hergestellte Tragschichten aus Asphalt oder Beton verzichtet. Die weiteren Besonderheiten dieser Bauweise sind die Beschränkung auf zwei Standard-Plattentypen (vgl. Tabelle 4.1), die im Vergleich zu anderen Systemen über sehr geringe Längen verfügen und bei denen keine werkseitige Anpassung der Plattengeometrie an die Trassierung erforderlich ist, sowie die gleichzeitige Wirkung der Fertigteilplatten als Sohlspanner der Tunnelkonstruktion (vgl. Abbildung 4.37) [64, 65].

Bezeichnung	Anzahl der Stützpunkte	Länge	Gewicht ohne Stützpunkte	Einsatzgebiet
RhB-1	4	1,05 m	1,90 t	$R < 250 \text{ m}$
RhB-2	6	1,65 m	2,95 t	$R \geq 250 \text{ m}$

Tab. 4.1: Vorgefertigte Gleistragplatten der Bauart RhB [64]

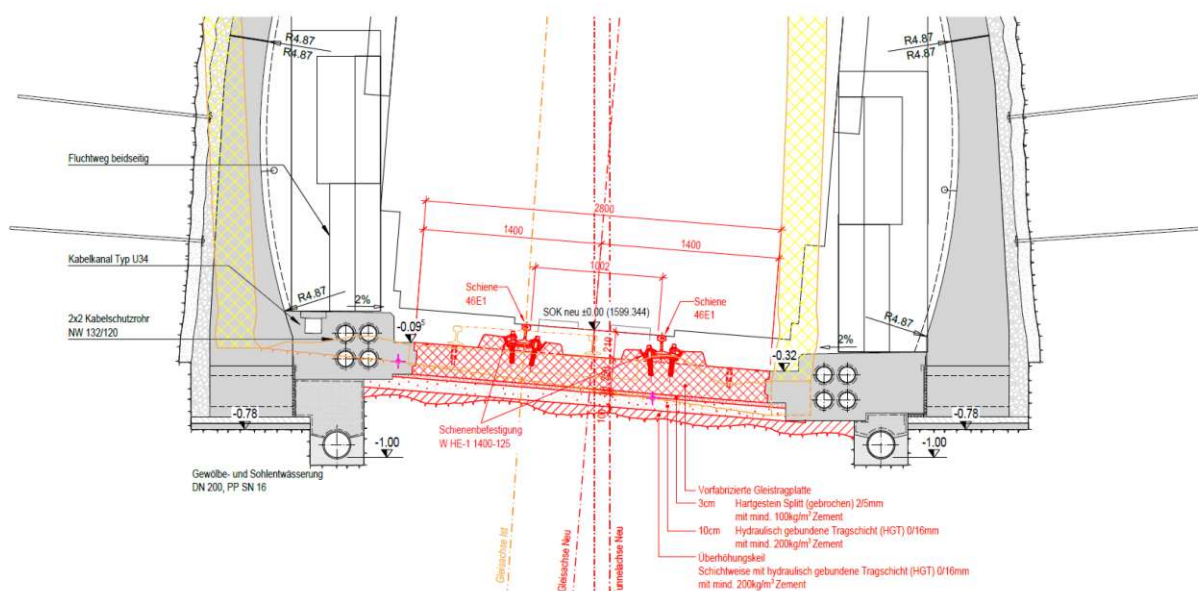


Abb. 4.37: Querschnitt Bauart RhB [65]

Der Plattentyp RhB-2 mit drei Stützpunktpaaren wird für eine höhere Verlegeleistung in der Geraden sowie in größeren Bogenradien verwendet. Die Platte RhB-1 mit ihren zwei Stützpunktpaaren kommt in Bögen kleinem Radius zum Einsatz, um das Auftreten von Zwängungen an den Stützpunkten zu verhindern.

Die Fertigteilplatten verfügen jeweils über eine Breite von 2,80 m, die Schienenneigung von 1:20 wird durch die Form der Fertigteile sichergestellt [64]. Die Unterseite wird bei der Plattenproduktion mit Besenstrich aufgeraut, die seitlichen Flächen werden nach dem Aushärten sandgestrahlt [66, 67].

Nach der schichtweisen Aufbringung von HGT-Material (0/16 mm, mind. 200 kg/m³ Zementgehalt) zum Ausgleich der Ausbruchsunebenheiten im Fels sowie zur Herstellung des erforderlichen Überhöhungskeils wird eine 10 cm starke hydraulisch gebundene Tragschicht aus dem selben Material eingebaut. Auf einer 3 cm dicken Zwischenschicht aus gebrochenem Hartgestein (Splitt, 2/5 mm, mind. 100 kg/m³ Zementgehalt) werden im Anschluss die vorgefertigten bewehrten Gleistragplatten verlegt [65]. Durch die geringen Plattenabmessungen ist der Einbau mit einem

Die Schiene wird hierbei in einer Aussparung mit rechteckigem Querschnitt in der Betontragschicht auf elastischen Unterlagsschichten (verschiedene Stärken sowie Härten verfügbar) positioniert und mit Hilfe eines sich auf der Oberfläche der Betontragschicht abstützenden Hilfssystems ausgerichtet. Im Anschluss wird die Schiene mit einer Masse aus Polyurethan und Korkanteilen eingegossen, in der Vergussmasse ist auch die Führung von Kabelrohren möglich (vgl. Abbildung 4.38) [4].

Die Konstruktionsart ist spurweitenunabhängig, erfordert eine Entwässerung in der Gleisachse und verfügt über sehr gute schall- und schwingungsdämpfende Eigenschaften sowie über einen sehr hohen Durchschubwiderstand (Faktor 7 ggü. klassischen Schienenbefestigungsmitteln) [2, 4]. Der Gesamtquerschnitt mit Entwässerung ist in Abbildung 4.39 dargestellt.

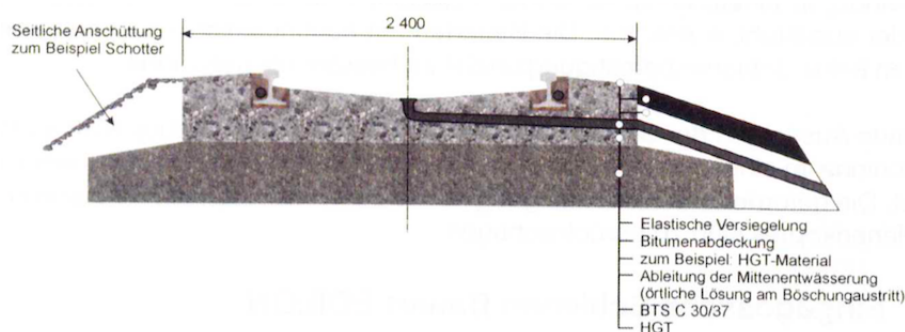


Abb. 4.39: Querschnitt der Bauart EDILON [4, Abb. 5.98]

Bei Anwendung einer durchgehenden Betontragschicht ist das Gleis von Straßenfahrzeugen befahrbar, die Ausführung ist jedoch auch als Grüngleis mit zwei Stahlbetonlängsbalken oder auf Brücken in stählernen U-Profilen möglich.

Ab 1976 wurde das System in den Niederlanden im Bereich von Bahnübergängen und Tunneln sowie auf dem Erdkörper angewendet, 1996 erfolgte die Zulassung in Deutschland unter den Namen INFUNDO (für Hochgeschwindigkeitsverkehr) sowie STELFUNDO (für Bahnübergänge). Im Jahr 2001 wurde das System INFUNDO im Tausch gegen die Bauart FFC (vgl. Kapitel 4.3.4.3) auf der Versuchsstrecke Waghäusel eingebaut [4].

Darr und Fiebig [4] nennen zahlreiche Weiterentwicklungen, unter anderem speziell für Brücken („Silent Bridges System“) und verschiedene schienenengebundene ÖPNV-Systeme. Dazu gehört auch das EDILON Corkelast Block-System (EBS), das Lärm und Erschütterungen in Tunneln vermindert und große Ähnlichkeit zum System LVT (vgl. Kapitel 4.3.2.2) aufweist – die Schwellenblöcke werden hierbei auf elastischen Unterlagen aus Kork gelagert.

Die EDILON-Familie fand unter anderem Verbreitung in den Niederlanden, Deutschland, der Schweiz, Österreich und Spanien [4].

4.3.6.2 Versuche mit eingeklemmten Schienen

Bei Systemen dieses Typs wird die Schiene in Gummielemente eingebettet und im Anschluss in ein Stahl- oder Betonprofil eingeklemmt [4]. Im Bereich der Vollbahn ist keine Anwendung dieser Technik dokumentiert.

Die von Darr und Fiebig [4] sowie Lichtberger [2] erläuterte Bauart SFF (Schwingungsgedämpfte Feste Fahrbahn) ist in Abbildung 4.40 dargestellt. Bei diesem System wurde die Schiene nur am Schienenkopf gestützt und schwebte frei über dem Boden der Trogschwelle. Die Bauart wurde von der anbietenden Fa. Ortec weiterentwickelt, aktuell befindet sich etwa das System VIBREX auf dem Markt [68], das bei verschiedenen Straßen- und U-Bahnen in Deutschland zum Einsatz

kommt [69]. Bei dieser Bauart wird die Schiene jedoch im Gegensatz zur Bauart SFF auch unter dem Schienenfuß unterstützt (vgl. Abbildung 4.41) [68].

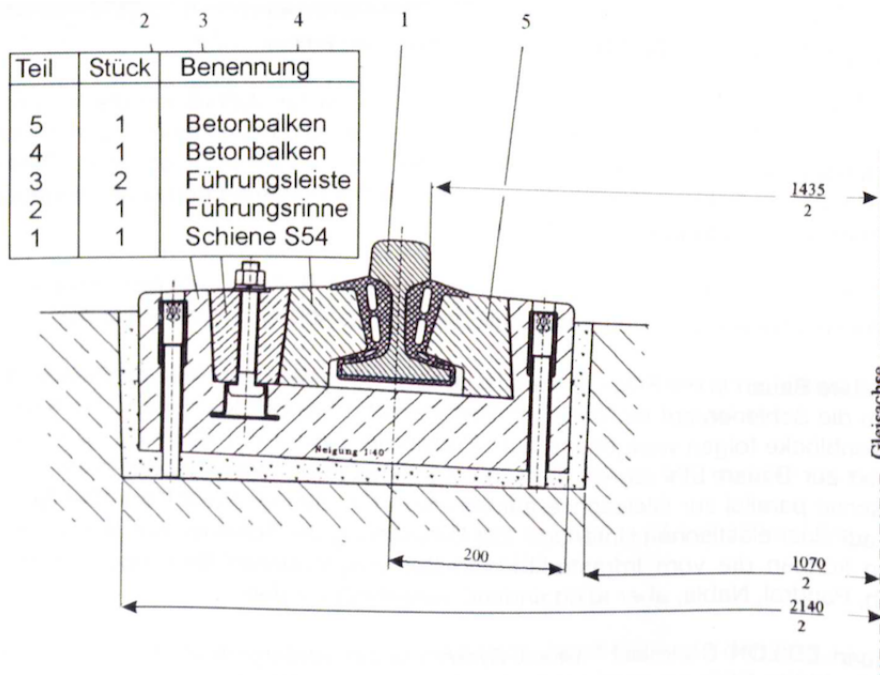


Abb. 4.40: Querschnitt der Bauart SFF [4, Abb. 5.103]



Abb. 4.41: Querschnitt der Bauart VIBREX [68]

Die ebenfalls von Darr und Fiebig [4] sowie Lichtberger [2] beschriebene Bauart SAARGUMMI (vgl. Abbildung 4.42) erhielt in Deutschland zwar eine Zulassung für die Betriebserprobung in Tunneln und auf Erdbauwerken, wurde jedoch soweit bekannt nie realisiert.

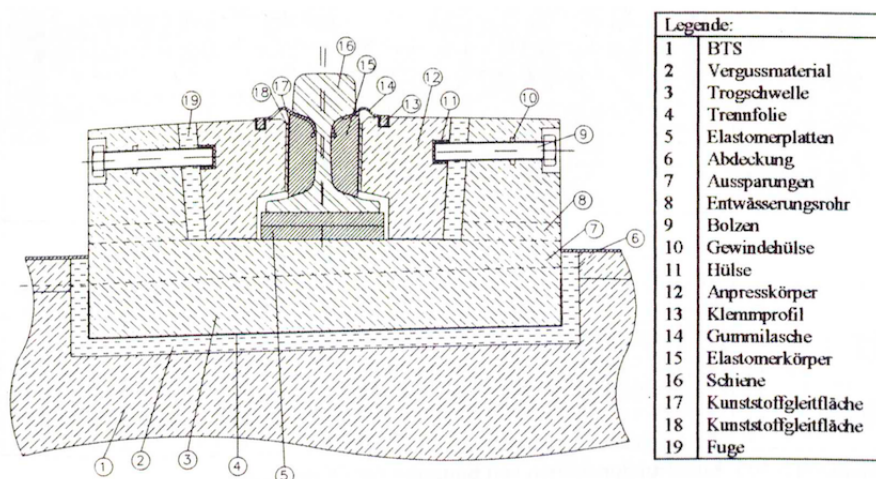


Abb. 4.42: Querschnitt der Bauart SAARGUMMI [4, Abb. 5.104]

4.4 Eignung der verfügbaren Bauarten für Schmalspurbahnen

Die folgende Auswahl der im vorangegangenen Kapitel 4.3 beschriebenen Bauarten entspricht noch dem aktuellen Stand der Technik bzw. wird zum gegenständlichen Zeitpunkt in Mitteleuropa angeboten und wird daher im Folgenden im Bezug auf ihre Eignung für den Einsatz bei Schmalspurbahnen im Alpenraum besprochen:

- RHEDA bzw. RHEDA 2000
- LVT
- GETRAC
- IVES
- Pinzgauer Lokalbahn
- BÖGL
- ÖBB-PORR
- RhB
- EDILON

Abbildung 4.43 zeigt einen Vergleich der Aufbauhöhen der angeführten Bauarten. Die Höhen-darstellung wurde auf verschiedenen Quellen aufbauend erstellt und ist nur für die Vermittlung eines groben Überblicks geeignet, da sie Systeme für verschiedenen Einsatzzwecke einander direkt gegenüberstellt. Die Höhen der Bauarten RHEDA, RHEDA 2000, GETRAC A3 und EDILON wurden von Darr und Fiebig [4, Abb. 5.105] übernommen, auch die Darstellungen der Systeme BÖGL und ÖBB-PORR wurden basierend auf der zitierten Abbildung entwickelt. Die angeführten Werte entsprechen daher einer Ausführung für hoch belastete normalspurige Strecken. Der dargestellte Schotteroberbau der Pinzgauer Lokalbahn sowie die für den dortigen Einsatz entwickelte Feste Fahrbahn sind für den Einbau des Schienenprofils 49E1 konzipiert [70] und wurden für die Darstellung unter Verwendung der *DIN EN 13674-1:2017 07* [21] an die Höhe des von Darr und Fiebig [4] für ihre Abbildung genutzten Profils 60E1 angepasst.

angepasst. Da die beiden Bauarten in dieser Form für den Einbau in Tunneln vorgesehen sind, sind sie mit ihrer Unterkante (in Abbildung 4.43 auf -627 bzw. -617 mm und mit (B) bezeichnet) auf eine Tunnelsohle aufzusetzen, die die Rolle einer setzungsfreien Lastverteilplatte einnimmt. Diese Lastverteilplatte bzw. Tunnelsohle ist in den Darstellungen des Systems ÖBB-PORR als die mit (D) bezeichnete Schicht enthalten. Außer den Bauarten LVT und RhB sind die abgebildeten Aufbauten für das Aufsetzen auf ggf. verbessertes Boden- oder Dammschüttmaterial geeignet.

4.4.1 RHEDA

Bei der Bauart RHEDA werden Monoblockschwellen aus Spannbeton verwendet, die sich von herkömmlichen Schwellen nur durch einige Öffnungen für den Einbau der durchgehenden Längsbewehrung unterscheiden. Daher ist die Bauart RHEDA grundsätzlich ohne hohe Entwicklungskosten auch für andere Spurweiten anpassbar. Der geringe Automatisierungsgrad des Errichtungsprozesses führt zwar zu hohen Baukosten, ermöglicht jedoch den Einbau auch in einem Umfeld, in dem wenig Spezialmaschinen zur Verfügung stehen.

Das System RHEDA hat sich sowohl in Tunneln als auch auf der freien Strecke bewährt und ist somit auch eine Möglichkeit für Infrastrukturunternehmen, die die Frage nach der Sinnhaftigkeit des zukünftigen Einbaus von Fester Fahrbahn in ihrem Netz außerhalb von Tunnelbereichen noch nicht abschließend geklärt haben. Vor der Entscheidung für diese Bauart sollte das betroffene EIU sich jedoch eingehend mit der bekannten Problematik der mangelnden Reparaturfreundlichkeit dieses Systems auseinandersetzen.

4.4.2 RHEDA 2000

Die Bauart RHEDA 2000 verfügt in Betrieb und Instandhaltung über ähnliche Eigenschaften wie das ursprüngliche System RHEDA und ist durch die Herstellung der BTS „aus einem Guss“ bezüglich allfälligen Problemen mit der Fugenbildung leicht im Vorteil.

Die speziellen höhenreduzierten und somit leichteren Biblockschwellen vereinfachen die Errichtung, für geringere Spurweiten müssten diese jedoch erst entwickelt bzw. angepasst werden. Die Frage nach der Wirtschaftlichkeit dieser Entwicklung ist nur im Zusammenhang mit dem Umfang des geplanten Projektes zu beantworten.

4.4.3 LVT

Das System LVT punktet durch seine komplette Spurweitenunabhängigkeit sowie seine Wartungsfreundlichkeit und ist eine gute und bewährte Wahl für den Einsatz in Tunnelsituationen. Infrastrukturunternehmen, die in Zukunft ggf. auch die Errichtung von Fester Fahrbahn auf Abschnitten der freien Strecke in Erwägung ziehen, kann eine voreilige Entscheidung für diese Bauart jedoch zum Nachteil geraten: Beim Einbau der dann „bereits erprobten“ Bauart LVT im Freien können Probleme mit dem Eindringen von Regenwasser entstehen, die Entscheidung für ein anderes FF-System erweitert und verkompliziert das Instandhaltungsportfolio.

In der Schweiz wird die Bauart LVT bei meterspurigen Bahnen seit 2018 erfolgreich angewendet – der erste Einbauort war der etwa 700 m lange Ruckhaldetunnel der Appenzeller Bahnen [71, 72], aktuell läuft der Einbau im fast sechs Kilometer langen neuen Albulatunnel der Rhätischen Bahn (vgl. Abschnitt 4.3.2.2 und 6.1.2.2) [40, 73].

4.4.4 GETRAC

Der größte Vorteil der Bauart GETRAC (vor allem der Version A3) ist die geringe Bauhöhe. In beengten Tunnelsituationen, in denen eine Vergrößerung des Lichtraums angestrebt wird, kann

der Einsatz dieses Systems den entscheidenden Unterschied machen. Wie bei der Bauart RHEDA 2000 ist die Entwicklung bzw. Anpassung der Spezialschwellen auf geringere Spurweiten jedoch noch ausstehend.

Bei den angesprochenen beengten Platzverhältnissen ist außerdem vorab zu prüfen, ob der Einsatz eines Asphaltfertigers mit der geforderten hohen Präzision möglich ist oder ob beispielsweise der Tunnelquerschnitt zu schmal dafür ist.

Die GETRAC-Systeme sind für Tunnel und freie Strecke gleichermaßen geeignet.

4.4.5 IVES

Wie die GETRAC-Systeme kann auch die Bauart IVES im Tunnel und im Freien angewendet werden. Auch wenn diese Bauart auf eine vergleichsweise kurze Geschichte zurückblickt, hat sie sich für die Anwendung bei beengten Platzverhältnissen bereits bewährt. Eine Anpassung der Quertragelemente für Schmalspurbahnen ist bedingt durch die einfachere quaderförmige Formgebung der Quertragelemente erwartungsgemäß mit weniger Aufwand verbunden als dies bei den GETRAC-Systemen der Fall wäre.

Ein weiterer Vorteil des Systems IVES ist, dass Höhenabweichungen bei der Herstellung der Asphalttragschichten durch das nachträgliche Vergießen der Stützpunkte leichter korrigiert werden können als bei anderen aufgelagerten Systemen.

4.4.6 Pinzgauer Lokalbahn

Ein System mit Einzelstützpunkten auf einer Betontragschicht wie das aktuell bei der Pinzgauer Lokalbahn in Errichtung befindliche bietet im Hinblick auf Logistik und Platzbedarf große Vorteile bei der Baustellenabwicklung. Diese Oberbauart ist zu hundert Prozent spurweitenunabhängig und im Tunnel wie auch auf der freien Strecke gleichermaßen einsetzbar. Ob sie sich auf der schmalspurigen Regionalbahn im Gegensatz zu den in Deutschland auf Normalspur getesteten Varianten bewähren kann, werden die nächsten Jahre zeigen.

4.4.7 BÖGL und ÖBB-PORR

Die Fertigteilplatten-basierten Systeme BÖGL und ÖBB-PORR sind spurweitenunabhängig verwendbar, sofern das Platzangebot und die dadurch bedingt einsetzbaren Maschinen und Geräte in der Lage sind, das Einheben der Platten zu bewerkstelligen. Bezüglich Betrieb und Instandhaltung bestehen mit beiden Bauarten positive Erfahrungen sowohl in Tunnelbereichen als auch außerhalb davon.

4.4.8 RhB

Die für die Doppelverwendung als Sohlsprenger bei der Tunnelanierung sowie als Tragplatten für eine Feste Fahrbahn entwickelten Fertigteilplatten durch ihre geringen Abmessungen und den dadurch gegenüber anderen Fertigteilssystemen erleichterten Einbau. Durch den Verzicht auf Asphalt- und Ortbetontragschichten ist eine hohe Baugeschwindigkeit bei Umbauten erreichbar. Unter Einhaltung der entsprechenden Nachweise sollte eine Anpassung an andere Spurweiten keine Probleme bereiten.

Zur Eignung des Systems für die Anwendung abseits von Tunnelanierungen sowie zu seiner Langzeitstabilität liegen zum aktuellen Zeitpunkt jedoch noch keine Erfahrungen vor.

4.4.9 EDILON

Die Herstellung von eingegossenen Edilon-Systemen ist bei jeder Spurweite und grundsätzlich auch bei beengten Platzverhältnissen möglich.

Wenn der erhöhte Schienenverschleiß auf einem Streckenabschnitt ein Resultat der angewendeten extremen Trassierungsparameten ist, muss damit gerechnet werden, dass dieser auch nach dem Einbau einer Festen Fahrbahn erhöht bleibt. In diesen Fällen ist die Verwendung von eingegossenen Systemen keine optimale Lösung, da der Verguss bei jedem Schientausch komplett erneuert werden muss.

4.5 Regionale Spezifika

In verschiedenen Ländern haben sich verschiedene Bauarten der Festen Fahrbahn vermehrt durchgesetzt. Teilweise liegt dies am Einsatzzweck, hauptsächlich aber daran, dass die Weiterentwicklung und Optimierung der Bauarten meist in Zusammenarbeit zwischen Bahninfrastrukturbetreibern und Bauindustrie erfolgt, wobei die einzelnen Eisenbahninfrastrukturunternehmen im Anschluss in der Regel die von ihnen mitentwickelte Bauart gegenüber anderen Anbietern bevorzugen.

In Deutschland sind die kompakten Bauarten der RHEDA-Familie sehr verbreitet [37], auch aufgelagerte Bauarten auf Asphalt haben sich bei der DB bewährt [47]. Der Großteil des österreichischen FF-Bestandes ist wiederum der Bauart ÖBB-Porr zuzuordnen [5]. Auf den Strecken der ÖBB können auch einige bis Mitte der 1990er-Jahre errichtete Abschnitte mit Bauarten der RHEDA-Familie angetroffen werden, es wurden jedoch nie Systeme mit Asphalttragschichten ausgeführt [5].

In der Schweiz, wo die Feste Fahrbahn fast ausschließlich in Tunneln zum Einsatz kommt, wird sehr stark auf Blockschwellen, die in Gummischuhen in eine Betontragplatte eingebunden sind, gesetzt. Bis in die 1990er Jahre kam hierfür das von der SBB federführend mitentwickelte System SBB-BÖZBERG/STEDEF zum Einsatz, danach wurde die Bauart LVT verwendet. Im Artikel *„Systementscheidung Feste Fahrbahn versus Schotteroberbau für die Schweizerische Bundesbahn“* stellen Steinegger et al. in Aussicht, dass *„für die wenigen zu erwartenden Anwendungen der FF im Freien [...] das bereits eingeführte und bewährte System LVT/STEDEF/Grauholz zum Einsatz kommen“* wird, um die Instandhaltung nicht durch die Verwendung zu vieler verschiedener Bauarten zu komplizieren. Inzwischen wurden im normalspurigen Netz der Schweiz jedoch auch einige Abschnitte mit anderen Systemen wie GETRAC oder IVES errichtet (vgl. Kapitel 4.3.3.5 sowie 4.3.3.6).

4.6 Dauerhaftigkeitsaspekte

Um das Jahr 2010 führte Mach [5] für seine Dissertation *„Zustandsbewertung und Nutzungsdauerprognose von Festen Fahrbahn Systemen im Netz der ÖBB“* vielfältige Analysen am österreichischen FF-Bestand durch. Auch wenn die Untersuchungen vorwiegend am System ÖBB-PORR erfolgten, lassen sich ihre allgemeinen Aussagen auf andere Beton-basierte Bauarten übertragen.

Seit der Jahrtausendwende stammen in Fachzeitschriften veröffentlichte Artikel zu Asphalt-systemen fast ausschließlich von Firmenvertretern, die die Vorteile ihrer Produkte beschreiben. Kritische Auseinandersetzungen oder Prüfberichte zum Langzeitverhalten der Konstruktionen sind rar – diesbezüglich konnte lediglich eine Quelle, die sich mit einer 2005 durchgeführten Untersuchung beschäftigt, identifiziert werden [45]. Diese Überprüfung wurde im Auftrag der DB Systemtechnik und der Herstellerfirma an einem zum damaligen Zeitpunkt seit 10 Jahren in

Betrieb befindlichen Abschnitt der Bauart GETRAC A1 durchgeführt [45]. Im Gegensatz zur vorgestellten Untersuchung von Beton-Systemen erlauben die hierbei gewonnenen Erkenntnisse jedoch nur bedingt Rückschlüsse auf das Verhalten von Asphalt-Bauarten im Allgemeinen. Informationen über das Alterungsverhalten von Festen Fahrbahnen mit Asphalttragschichten finden sich ansonsten in älteren Publikationen, etwa in einem Artikel von Leykauf und Mattner [30] aus den 1990er-Jahren. Auch wenn die Entwicklungen der Asphalttechnologie in den vergangenen 25 Jahren nicht unterschätzt werden sollten, sind die den beobachteten Phänomenen zu Grunde liegenden Materialeigenschaften von Bitumen und Asphalt prinzipiell unverändert und die darauf bezogenen Aussagen somit nach wie vor gültig.

4.6.1 Untersuchungen an Betonfahrbahnen

Für die eingangs angeführte Dissertation wurden Messungen und Versuche an verschiedenen Abschnitten der Bauarten ÖBB-PORR und RHEDA im Netz der ÖBB durchgeführt, die älteste untersuchte Feste Fahrbahn war zum Untersuchungszeitpunkt seit 29 Jahren in Betrieb [5].

4.6.1.1 Chemische Einflüsse

Als maßgebender chemischer Einflussfaktor für die Dauerhaftigkeit konnte die Karbonatisierung des Betons identifiziert werden. Die hohe Luftfeuchtigkeit in Tunneln kombiniert mit dem von Fahrzeugen eingebrachten Schleppwasser begünstigt deren Fortschreiten. Auch die abmindernde Wirkung von Schlagregen, der den Porenwassergehalt im Beton auf hohem Niveau hält und somit das Eindringen von CO₂ und die damit einher gehende Karbonatisierung behindert, entfällt im Tunnel. Durch den im Vergleich zum Rest der Tunnelröhre erhöhten Schleppwassereintrag sind Portalbereiche besonders von diesem Phänomen betroffen. Da die industrielle Fertigung von Fertigteilen diesen eine höhere Dichtigkeit verleiht, ist diese Art der Verwitterung vor allem bei Ort betonbauteilen in den beschriebenen Bereichen relevant [5].

Für eine Betondeckung von 3 cm errechnet Mach [5] aus seiner Versuchsreihe jedoch auch für diese Bereiche ein Auftreten von Schäden erst nach frühestens 71 Jahren mit einem Mittelwert von 123 Jahren. Die größten Karbonatisierungstiefen wurden am Vergussbeton der Bauart RHEDA festgestellt. Bedingt durch die hohen vorgeschriebenen Betondeckungen waren diese jedoch als unproblematisch einzustufen. Gemäß Mach [5] ist von chemischen Veränderungen somit „*kein nennenswerter Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit des Stahlbetons innerhalb von 80 Jahren*“ zu erwarten.

Die diesbezüglich festgestellten Unterschiede zwischen den bei den ÖBB verwendeten Bauarten (RHEDA, ZÜBLIN, ÖBB-PORR) sind darüber hinaus zu gering, um daraus eine Empfehlung für oder gegen einzelne Bauarten abzuleiten [5].

4.6.1.2 Ermüdung

Im Rahmen der oben angeführten Dissertation [5] wurde für die Bauart ÖBB-PORR ein Ermüdungsnachweis nach Eurocode für Beton und Stahl geführt. Zu diesem Zweck wurden die Materialspannungen vor Ort gemessen.

Nach 20 Jahren Betriebsbelastung traten beim System ÖBB-PORR abschnittsweise zwar erhöhte Einsenkungen der Fertigteilplatten und Versteifungen der Schienenstützpunkte auf, die daraus resultierenden Spannungserhöhungen in Beton und Bewehrung haben jedoch keinen Einfluss auf die Dauerfestigkeiten der Materialien, da das jeweils kritische Spannungsniveau nicht erreicht wird.

Die bei den ÖBB zulässigen Achslasten und Geschwindigkeiten führen somit zu keiner Verminderung der Lebensdauer des Systems ÖBB-PORR bezüglich Materialermüdung und Lagesicherheit [5].

4.6.1.3 Rissbildung

Ortbeton

Ausgeprägte Rissbilder bestehen hauptsächlich am Füllbeton der RHEDA-Bestände der ÖBB. Diese nehmen ihren Ausgang als Schwindrisse im Herstellungsprozess und treten vor allem im Bereich der Schwellenvorköpfe mit einer Breite von bis zu 0,5 mm auf. Eine dauerhafte Versinterung liegt bei diesen Rissen nicht vor. Fallweise kam es nach Eindringen von Regenwasser und Eisbildung in Schwindrissen zwischen Schwelle und Füllbeton auch zu Ablösungen von Schwellen. Dieses Problem tritt jedoch nur auf Freistrecken und nicht in Tunnelbereichen auf, womit der diesbezügliche Witterungseinfluss belegbar ist [5].

Ähnliche Probleme bei der Bauart RHEDA sind nach Ausführungsmängeln auch aus anderen Ländern dokumentiert. Die weiterentwickelte Bauart RHEDA 2000 verfügt unter anderem aus diesem Grund über einen höheren Bewehrungsgrad in der Kontaktfläche zwischen Schwelle und Ortbeton [2].

Fertigteilplatten

Die bei den Untersuchungen angetroffenen Risse in den Gleistragplatten der Bauart ÖBB-PORR waren ausnahmslos zugewintert und mit Breiten von meist weniger als 0,15 mm vernachlässigbar [5].

Empfehlungen

Die meisten Bauarten der Festen Fahrbahn bestehen aus einer Kombination von Fertigteilen (Schwellen, Platten) und Ortbeton. Die in der Fuge zwischen diesen Bauteilen entstehenden Schwindrisse bilden vor allem im Freien die größte Schwachstelle der betroffenen FF-Systeme. Die Herstellung einer qualitativen und dauerhaften Verbindung zwischen den genannten Teilen ist eine Herausforderung, der am besten durch eine sorgfältige Bauausführung sowie einen ausreichenden Bewehrungsgrad zu begegnen ist.

4.6.1.4 Gleislage

Bei starrer Bettung der Festen Fahrbahn (etwa in Tunneln) konnten auf dem Netz der ÖBB keine Gleislageveränderungen durch Betriebsbelastung festgestellt werden. Bei vorliegen von elastischer Bettung (etwa auf Erdbauwerken) traten vor allem im Zusammenhang mit partiellen Setzungen im Bereich von Unstetigkeitsstellen des Untergrundes marginale Veränderungen auf [5].

4.6.2 Alterung von Asphaltssystemen

Im Gegensatz zu Beton verfügt Asphalt über ein sehr stark temperaturabhängiges Materialverhalten. Bis 20°C kann von einem nahezu elastischen Verformungsverhalten ausgegangen werden, während bei darüber liegenden Temperaturen die elasto-plastischen Eigenschaften des Bitumens in den Vordergrund treten. Um bleibende Verdrückungen zu vermeiden, ist eine ausreichende Standfestigkeit der Asphalttragschicht erforderlich. Diese ist unabhängig von der Schichtdicke und kann über die Mischgutzusammensetzung beeinflusst werden [30].

Im Vergleich zum Asphaltstraßenbau ist bei FF-Asphaltssystemen durch die fehlende „Walkeinwirkung“ des gummibereiften Straßenverkehrs ein verstärkter Alterungsprozess zu beobachten. Die Alterung macht das Material spröde und bringt die Gefahr der thermischen Rissbildung

bei starker Abkühlung mit sich. Auch diesem Problem ist mit einer geeigneten Mischgutzusammensetzung zu begegnen: Ein gegenüber dem Straßenasphalt reduzierter Hohlraum- und erhöhter Bindemittelgehalt sowie die Wahl eines geeigneten Bindemittels mit entsprechend großer Plastizitätsspanne (PmB, Polymermodifizierte Bitumen) wirken diesbezüglich vorbeugend [30].

Typisch für Asphaltssysteme ist auch die Einarbeitung der Schwellen in die oberste Tragschicht – bei einer Untersuchung im Jahr 1997 wurden nach 8 Jahren Betriebsbelastung von Betonschwellen auf einer Asphalttragschicht Einsenkungen von bis zu 8 mm gemessen. Gemäß den auch im Straßenbau gesammelten Erfahrungen neigt Asphalt am Anfang zu größeren Verformungen, während sich nach der damit einher gehenden Nachverdichtung nach einer gewissen Zeit kaum mehr Zuwächse einstellen [30].

Von Freudenstein und Ripke [45] wurden auf dem von ihnen untersuchten normalspurigen Streckenabschnitt mit dem System GETRAC A1 im Jahr 2005 nach einer Betriebsbelastung mit etwa 170 bis 180 Mio. Lasttonnen lediglich zwei Auffälligkeiten identifiziert:

- Die eingesetzten Schallabsorber aus Blähton waren instabil und wiesen zum Teil Schäden auf.
- In den engeren Bögen des Abschnitts (minimaler Radius 485 m) traten geringe Änderungen der Spurweite auf. Diese kamen zwischen dem SR_A -Wert und dem SR_{100} -Wert zu liegen und blieben somit folgenlos. Gemäß [74] entspricht der in der DB Richtlinie 821 definierte SR_A -Wert der Aufmerksamkeitsschwelle bzw. dem alert limit AL und der SR_{100} -Wert der Eingriffsschwelle bzw. dem intervention limit IL gemäß *DIN EN 13848-5:2017 10* [75] und TSI Infrastruktur [76, 77]. Die Entstehung der Spurweitenänderungen konnte auf die verwendeten Schienenbefestigungen zurückgeführt werden und war somit unabhängig von der Bauart.

Im Allgemeinen wurde die Gleislage in der Untersuchung als „*sehr gut und stabil*“ bewertet. An Neoprenlagern, Schwellenverankerungen und Dübelsteinverguss wurden keine Schäden bzw. Alterungserscheinungen festgestellt. Als erwartete systemspezifische Instandhaltungstätigkeiten wurden der Tausch der Zwischenplatten in den Stützpunkten im Rahmen der Schienenerneuerung sowie unter Umständen die Erneuerung der Winkelführungsplatten in engen Bogenradien identifiziert [45].

Kapitel 5

Entscheidungskriterien zwischen Schotteroberbau und Fester Fahrbahn

Die ideale Fahrbahn sollte über die folgenden Eigenschaften verfügen (unter anderem nach [78]):

- geringe Errichtungskosten
- geringer Erhaltungsaufwand
- hohe Verfügbarkeit
- lange Lebensdauer

Mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit ihres Schienennetzes zu steigern und die zugehörigen Lebenszykluskosten zu senken, haben sich im Laufe der vergangenen Jahrzehnte viele große Eisenbahninfrastrukturunternehmen intensiv damit auseinandergesetzt, wie eine fundierte Entscheidung zwischen Schotteroberbau und Fester Fahrbahn zu treffen sei. Bedingt durch die lange Lebensdauer von Schieneninfrastrukturanlagen sind Investitionen in diesem Bereich stets sehr langfristig und fast irreversibel [79] und sollten daher auf einer soliden Entscheidungsgrundlage aufbauend getätigt werden.

In den allermeisten Fällen ist aus technischer Sicht sowohl eine Ausführung als Feste Fahrbahn als auch als Schotteroberbau möglich. Nur in Spezialfällen scheidet eine Oberbauart wegen technischer Kriterien aus. Aus diesem Grund ist die Entscheidung meist aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen zu treffen [79], denen dadurch im Rahmen der Analyse ein hoher Stellenwert einzuräumen ist. Die Tabellen 5.1 bis 5.3 auf den Seiten 72 bis 73 geben einen Überblick über die Vor- und Nachteile von Fester Fahrbahn und Schotteroberbau im Vergleich.

Aufbau des Kapitels

Da die intensivste Auseinandersetzung und die detailliertesten Veröffentlichungen zu diesem Thema im deutschen Sprachraum von der Deutschen Bahn AG (DB) stammen, ist die Struktur des vorliegenden Kapitels an die Gliederung ihres Projektberichtes *Systementscheidung Schotteroberbau oder Feste Fahrbahn* [32] angelehnt. Bei der Schweizerischen Bundesbahnen AG (SBB) wurde unter Beteiligung desselben Unternehmensberaters, der auch von der DB beauftragt wurde (vgl. Autoren von [29] und [79]), ebenfalls ein Kriterienkatalog für die Systementscheidung zwischen verschiedenen Oberbausystemen entwickelt. Die SBB bezieht sich hierbei auf „umfangreiche Erfahrungen im Ausland [...], insbesondere in Deutschland“ [29] und zitiert dabei auch den DB-Projektbericht [32]. Ergänzende Überlegungen aus anderen Quellen bzw. von anderen Eisenbahninfrastrukturunternehmen wurden an den thematisch passenden Stellen dieses Kapitels eingearbeitet. Für den Vergleich der diesbezüglichen Unterschiede zwischen verschiedenen Ländern wird auf Kapitel 5.7 verwiesen.

Konstruktion		
	SchO	FF
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • ausreichend genaue und stabile Gleislage • geringere Luftschallabstrahlung 	<ul style="list-style-type: none"> • sehr gleichmäßige und dauerhafte Gleislage • bessere Lastverteilung • homogene Elastizität • geringere Erschütterungsemission • keine Schotterwirbel^a • hoher Quer- und Längsverschiebewiderstand (Gleisverdrückungen und -verwerfungen sind ausgeschlossen) • geringere Bauhöhe • Befahrbarkeit durch Straßenfahrzeuge herstellbar • geringere Erschütterungen und Sekundärluftschall
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Ungleichmäßigkeit durch Kornumlagerungen • begrenzter Querverschiebewiderstand • geringe Dämpfung gegen Schwingungsübertragung • eingeschränkte Gleislagestabilität hinsichtlich Einsatz der Wirbelstrombremse als Betriebsbremse^a • ungleichmäßige Elastizität insbesondere bei Hohllagen von Schwellen kann zu Lastspitzen in den Bereichen der benachbarten Schwellen führen • auf Brücken zusätzlicher Einbau von Unterschottermatten erforderlich • geringere Sicherheit gegen Gleisverdrückung und -verwerfung auf Brücken, insbesondere bei Hohllagen von Schwellen 	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Luftschallabstrahlung bei niedrigen Geschwindigkeiten • in Bögen u. U. Mehraufwand für Oberflächenentwässerung^b

^a auf Grund der geringeren Fahrgeschwindigkeiten in der Regel für Schmalspurbahnen nicht relevant

^b auf Grund von Eingleisigkeit in der Regel für Schmalspurbahnen nicht relevant

Tab. 5.1: Vor- und Nachteile von Fester Fahrbahn und Schotteroberbau bzgl. Konstruktion (nach [32], Tabellen 2-1 und 2-2)

Herstellung		
	SchO	FF
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • bekannte und erprobte Technik bis 200 km/h • hochmechanisierte Herstellung^c • geringere Empfindlichkeit gegenüber Fertigungsfehlern bzw. einfache Behebung von Herstellungsfehlern 	<ul style="list-style-type: none"> • Inselbaustellen ohne Anbindung an vorhandene Gleise sind möglich (u. U. Bauzeitverkürzung) • geringer Arbeitszugverkehr
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Gleisvorbau nur „Überkopf“ möglich, Anbindung an vorhandene Gleise erforderlich • hohe Zahl schienengebundener Fahrten von Maschinen und Arbeitszügen^c 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Anforderungen an Stabilität und Homogenität von Erdbauwerken (Setzungsgefahr)

^c auf Grund des dort vorherrschenden geringeren Mechanisierungsgrades im Gleisbau für Schmalspurbahnen oft nicht relevant (Ausnahme: Meterspurnetze in der Schweiz)

Tab. 5.2: Vor- und Nachteile von Fester Fahrbahn und Schotteroberbau bzgl. Herstellung (nach [32], Tabelle 2-3)

Instandhaltung		
	SchO	FF
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • hochmechanisierte und einfache Instandhaltungsmaßnahmen^d • hohe Anpassungsfähigkeit bei Setzungen 	<ul style="list-style-type: none"> • dauerhafte gute Gleisgeometrie • geringe Instandhaltung • gutes Langzeitverhalten der Einzelteile
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Instandhaltung erforderlich • geringe Langzeitstabilität der Gleisgeometrie • Materialverschleiß (Schotter) • hohe Bedeutung von Überwachung und Kontrolle • unebene Schienenoberfläche führt zu schneller Verschlechterung der Gleislage • verringerter Querverschiebewiderstand nach Durcharbeitung (Geschwindigkeitsreduzierung erforderlich) 	<ul style="list-style-type: none"> • bisher wenig automatisierte Erneuerung • u. U. lange Gleissperren bei Erneuerung erforderlich (abhängig vom Schädigungsgrad und der Bauart)

^d auf Grund des dort vorherrschenden geringeren Mechanisierungsgrades bei Schmalspurbahnen oft nicht relevant (Ausnahmen: Stopfmaschinen, weitere Geräte für Meterspurnetze in der Schweiz)

Tab. 5.3: Vor- und Nachteile von Fester Fahrbahn und Schotteroberbau bzgl. Instandhaltung (nach [32], Tabelle 2-4)

5.1 Grundlagen

In den Nullerjahren des aktuellen Jahrtausends erarbeitete die DB unter Beiziehung von internen und externen Experten ihre „*Fahrbahnstrategie*“, die nicht nur das gesamte Technikportfolio des Unternehmens konsolidieren, sondern auch einheitliche Entscheidungskriterien im Hinblick auf die auszuführende Oberbauart beinhalten sollte. Durch die Einbeziehung von Experten aus möglichst vielen verschiedenen Fachbereichen erhoffte man sich eine vielseitige Sichtweise und ein vertieftes Verständnis für die komplexen Aufgabe. Unter der Leitung von Holger Koriath wurde eine Entscheidungssystematik entwickelt, die in Form des Projektberichtes *Systementscheidung Schotteroberbau oder Feste Fahrbahn* [32] veröffentlicht wurde. Die Kernaussagen erschienen zusammengefasst als Fachartikel [79].

5.1.1 Ausgangslage und Ziele

Das Projektteam der DB stand vor der Ausgangssituation, dass bestehende wirtschaftliche Analysen und Vergleiche von Festen Fahrbahnen und Schotteroberbau insofern unvollständig waren, als dass sie die Auswirkungen von Trassierungsvorteilen durch die Entscheidung für eine Festen Fahrbahn oder auch Betriebserschwerungskosten durch unterschiedliche Trassenverfügbarkeiten nicht berücksichtigt. Die durchaus umfangreichen Ziele des Projekts waren somit

- die Definition eines Anforderungsprofils für die ideale Fahrbahn,
- die Erstellung einer Shortlist bestehender Bauarten von Festen Fahrbahnen zur Bereinigung der Variantenvielfalt,
- die Erarbeitung eines Kriterienkatalogs für die Systementscheidung,
- die Umsetzung dieses Kriterienkatalogs in einen Entscheidungsbaum sowie
- die Ableitung von prinzipiellen Handlungsempfehlungen.

5.1.2 Szenarienbildung

Für die weitere Betrachtung wurde im Rahmen des DB-Projektes in eine Vielzahl von Fällen unterschieden, unter anderem durch eine Kategorisierung in drei Bauszenarien (Neubau, Leistungserhöhung oder reine Gleiserneuerung) und sechs verschiedene Streckenbelastungsprofile (abhängig von von Höchstgeschwindigkeit, Achslasten, Zugdichte und Verkehrsart). Fahrbahnen für Belastungsszenarien mit einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von über 160 km/h wurden im Rahmen des gesamten Projektes „*mit hoher Priorität betrachtet*“ [32].

Die definierten Streckenbelastungsprofile können als Überkategorien für die Streckenstandards, die die DB in ihrer Richtlinie 413 [80] festlegt, interpretiert werden. Die Streckenstandards in der Richtlinie 413 wurden inzwischen angepasst, um den Streckenklassen und Verkehrscodes der TSI Infrastruktur [76, 77] zu entsprechen.

Keines der sechs Streckenbelastungsprofile aus dem Projekt ist wirklich passend für Schmalspurstrecken, am ehesten sind diese der Kategorie „*Regionalverkehrsfahrbahn*“ zuzuordnen. Diese wird durch eine Höchstgeschwindigkeit zwischen 50 und 120 km/h, Radsatzlasten bis 22,5 Tonnen, das Vorhandensein von engen Radien unter 700 m sowie durch niedrige bis durchschnittliche Streckenbelastung charakterisiert [80]. Dieses Belastungsprofil wurde von DB-Projektteam bedingt durch den Fokus auf höherwertige Streckenkategorien jedoch nicht näher beleuchtet [32].

Im Projekt der SBB [29] war die erste Dimension der Betrachtung die „*Art der Investition*“. Hierbei wurde analog zu den Bauszenarien bei der DB in „*Neubau, Ausbau und Umbau*“ unterschieden. Als weitere Dimensionen der Szenarienbetrachtung nennen Steinegger et al. [29]

die „*Erhaltungsverhältnisse*“ sowie den „*Verkehrsmix*“. Mit dem Begriff „*Erhaltungsverhältnisse*“ wurden die durch Verkehrsaufkommen und Fahrplangestaltung bestimmten Möglichkeiten für Gleissperren verschiedener Längen zusammengefasst. Die Dimension „*Verkehrsmix*“ dient zur Unterscheidung der Strecken nach ihrer Verkehrsbelastung (Achslasten, Zuganzahl, Anteil von Reisezug- und Güterverkehr, ...) und erfüllt somit den Zweck der Streckenkategorien im DB-Projekt.

Das DB-Projektteam identifizierte vier gängige Systeme der Festen Fahrbahn und wählte für jedes System eine repräsentative Bauart aus. Die Bezeichnungen bzw. Hersteller der ausgewählten Bauarten wurden aus Vertraulichkeitsgründen nicht veröffentlicht, nur die jeweiligen Hersteller erfuhren die entsprechende Kennung ihrer Bauart. Die weiteren Analysen wurden somit für die folgenden vier Arten von Fester Fahrbahn durchgeführt:

- A) ein Vertreter der Kompakten Bauarten (vgl. Abschnitt 4.3.1)
- B) ein Vertreter aus der Kategorie Fertigteilplatten (vgl. Abschnitt 4.3.5)
- C) ein Vertreter der aufgelagerten Bauarten (vgl. Abschnitt 4.3.3)
- D) ein Vertreter aus der Kategorie elastische Schwellenlagerung (vgl. Abschnitt 4.3.2)

Sonderbauarten für Spezialanwendungen wie z. B. Masse-Feder-Systeme wurden im Rahmen der grundsätzlich angelegten Vergleiche nicht weiter berücksichtigt.

5.2 Definition der Anforderungen

Im nächsten Schritt des Projektes Fahrbahnstrategie der DB wurden die Kriterien, für die eine präzise Berechnung der Lebenszykluskosten durchgeführt werden sollte, ermittelt. Zu diesem Zweck wurde durch externe Experten und solche der DB zunächst eine allgemeine Sammlung von Anforderungen an eine Fahrbahn erstellt. Durch Eliminierung der Kriterien, bei denen aufgrund von Vorschriften und Regelwerken kein Entscheidungsspielraum gegeben war („*Festforderungen*“, „*Muss-Kriterien*“), oder eine detaillierte Bewertung nicht möglich war („*Nebforderungen*“), und anschließende Sortierung der verbleibenden „*tolerierten Forderungen*“ bzw. „*Kann-Kriterien*“ nach ihrem geschätzten Einfluss auf die Systementscheidung sowie der erwartbaren Genauigkeit bei der Ermittlung der zugehörigen Lebenszykluskosten wurde diese Sammlung auf **sechs Schlüsselkriterien** eingengt [79]:

- Investitionskosten Fahrbahn
- Trassierung und Gestaltung der Erd- und Ingenieurbauwerke
- Instandhaltungsaufwand
- Betriebserschwerungskosten durch geplante Nicht-Verfügbarkeit
- Körper- und Luftschall
- Betrieblicher Nutzen aus der Trassierung

Für diese Kriterien ist eine möglichst präzise Berechnung der Lebenszykluskosten anzustreben [79].

Im Fall von bestehenden Schmalspurbahnen steht die Trassierung überwiegend fest und die Erd- und Ingenieurbauwerke sind bereits vorhanden (Ausnahme: Trassenoptimierungen und Streckenverlängerungen). Die wichtigsten verbleibenden Punkte sind somit die **Investitionskosten**,

der **Instandhaltungsaufwand**, die **Betrieberschwerniskosten** und die Kosten für allfällige **Schallisierungsmaßnahmen**. Wenn eine Geschwindigkeitserhöhung durch Linienverbesserungen angestrebt wird, sollte auch der allfällige betriebliche Nutzen aus Trassierungsvorteilen der Festen Fahrbahn berücksichtigt werden.

Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle auch noch kurz auf die ermittelten „**Festforderungen**“ eingegangen und ihre Relevanz für bzw. Anwendbarkeit auf Schmalspurbahnen erläutert. Dies sind jene Anforderungen, bei deren Erfüllung kein Spielraum besteht und die im Systemvergleich immer erfüllt sein müssen. In diese Kategorie fallen die folgenden sechs Kriterien [32]:

- Die Fahrbahn muss die im Betriebskonzept vorgesehenen Lasten und Geschwindigkeiten aufnehmen und ableiten können.
- Regelwerke und sonstige verbindliche Vorgaben und Standards des betroffenen Eisenbahninfrastrukturunternehmens sind jedenfalls einzuhalten.
- Sämtliche Luft- und Körperschallemissionen müssen die geltenden behördlichen Grenzwerte einhalten.

Diese ersten drei Kriterien sind grundsätzlicher Natur und damit vollumfänglich auch für Schmalspurbahnen gültig.

- Die Komponentenversorgung für das gewählte Oberbausystem muss sichergestellt sein. Für kleine Eisenbahninfrastrukturunternehmen bedeutet dies bei der Systemwahl einen verstärkten Fokus auf bereits in Mitteleuropa verbreitete Systeme, um eine kosteneffiziente Ersatzteilversorgung zu gewährleisten .
- Laut Projektbericht ist in Deutschland gemäß Vorgaben des Eisenbahn-Bundesamts (EBA) insbesondere bei Neubaustrecken die Befahrbarkeit in Tunneln durch Rettungsfahrzeuge zu gewährleisten.

Gemäß der Richtlinie *Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln* [81] des deutschen Eisenbahn-Bundesamts (EBA) ist die Tunnelbahn befahrbar für Straßenfahrzeuge auszuführen, wenn bei parallel verlaufenden Tunnelröhren die Rettung über die jeweils benachbarte Röhre vorgesehen ist. Bei Tunneln mit zwei Gleisen in einer Röhre stellt die Befahrbarkeit für Straßenfahrzeuge die Erreichbarkeit der Unfallstelle nicht sicher, da die Einfahrt z. B. durch starke Rauchentwicklung verunmöglicht sein kann. Die Bestimmungen der Richtlinie sind nur für Tunnel über 500 m Länge gültig und aus Gründen der Verhältnismäßigkeit nicht auf Bestandsbauwerke anzuwenden. Wenn „*im Rahmen einer umfassenden Erneuerung wesentliche Elemente der Tunnelkonstruktion verändert werden*“, ist jedoch zu „*prüfen, inwieweit eine Annäherung an die Anforderungen dieser Richtlinie möglich ist*“ (vgl. [81], Erläuterungen auf S. 11). Eine Verpflichtung zum Einbau einer mit Befahrbarkeitsplatten ausgerüsteten Festen Fahrbahn in den Tunneln von Schmalspurbahnen ist aus der deutschen Rechtslage demnach auch bei größeren Umbaumaßnahmen nicht abzuleiten, da es bei den vorwiegend eingleisigen Strecken keine parallel verlaufenden Tunnelröhren gibt.

Im diesbezüglichen *ÖBB Regelwerk 10.01.09: Tunnelsicherheit* [82] wird lediglich festgelegt, dass die Feste Fahrbahn im Tunnel für gummiereifte Fahrzeuge befahrbar auszuführen ist, wenn das Tunnelsicherheitskonzept den Einsatz dieser Fahrzeuge vorsieht.

- Eine ausreichende Entwässerung muss sichergestellt sein. Bei stehendem Wasser auf der Oberfläche einer Festen Fahrbahn kann sich Eis bilden, das sich bei Zugüberfahrt ablösen und Schäden am Fahrzeug verursachen kann. Aufgrund niedriger Fahrgeschwindigkeiten im Schmalspurbereich ist die Gefahr von Fahrzeugschäden in diesem Bereich im Vergleich zu Hochgeschwindigkeitsstrecken mit Sicherheit geringer einzuschätzen. Ein permanentes Unterwasserstehen der Betonoberfläche sollte jedoch auch aus Dauerhaftigkeitsgründen vermieden werden.

Der von der SBB für die Systementscheidung zwischen verschiedenen Oberbausystemen ausgearbeitete Kriterienkatalog wurde nicht detailliert veröffentlicht [29].

5.3 Ausarbeitung der Entscheidungsgrundlagen

Aufbauend auf den bisher angestellten Überlegungen und den definierten Schlüsselkriterien erfolgte die weitere Aufbereitung der Entscheidungsgrundlagen bei der DB in einem 3-Schichten-Modell. Den innersten Kreis bildet ein Vergleich der Lebenszykluskosten des Oberbaus im engeren Sinn. In einem zweiten Schritt werden auch die Trassierungseigenschaften und ihre Auswirkungen auf die gesamte Infrastruktur inkl. Erd- und Ingenieurbauwerken berücksichtigt. Für Fälle, in denen damit noch keine fundierte Entscheidung möglich ist, werden im dritten und letzten Schritt auch weitere Potenziale aus dem Umfeld, bei denen eine quantitative Analyse zum Zeitpunkt des DB-Projektes noch nicht möglich war, qualitativ in die Entscheidungsfindung miteinbezogen [32].

Bei der SBB wurde analog dazu „für die Kategorisierung und Gewichtung der Anforderungen, aber auch für deren Bewertung und für Interpretation der Ergebnisse“ ein „Schalenmodell“ mit sehr ähnlichem Aufbau entwickelt [29].

5.3.1 Vergleich der Lebenszykluskosten

Im Rahmen des DB-Projektes wurde für die interne Verwendung ein Excel-Tool entwickelt, das mit wenigen Eingangsdaten einen ersten Vergleich der Lebenszykluskosten von verschiedenen Oberbauarten ermöglicht. Das Tool umfasst den klassischen Schotteroberbau sowie die vier in Kapitel 5.1 aufgelisteten Typen von Fester Fahrbahn A bis D. Für Schotteroberbau sowie für die aufgelagerte Feste Fahrbahn (Typ C) wird in zwei Kategorien der Streckenhöchstgeschwindigkeit unterschieden, der Schwellenwert liegt bei 230 km/h. Um eine umfassende Anwendbarkeit des entwickelten Tools unabhängig von den Streckencharakteristika zu gewährleisten, finden in die Berechnungen nur solche Parameter Eingang, die für unterschiedliche Strecken als vergleichbar angenommen werden können.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes werden die vom Projektteam bei der Entwicklung des Tools getroffenen Überlegungen diskutiert und auf ihre Relevanz für Lebenszykluskostenberechnungen bei Schmalspurbahnen untersucht. Da im Bereich von Regional- und Schmalspurbahnen nur selten Neubauten ausgeführt werden und ggf. angestrebte Leistungserhöhungen von zu vielen projektspezifischen Faktoren bestimmt werden, als dass eine allgemeine Betrachtung zu sinnvollen Ergebnissen führen könnte, liegt der Fokus dabei auf der Gleiserneuerung.

5.3.1.1 Grundsätzliche Annahmen

Für das Bauszenario Gleiserneuerung wurden im DB-Projekt die folgenden Annahmen getroffen [32]:

- *Allfällige Untergrundertüchtigungsmaßnahmen sind unabhängig von der Wahl der Oberbauart in gleichem Umfang durchzuführen und nehmen somit keinen Einfluss auf die Systementscheidung.*

Für Bahnstrecken, bei denen in den letzten Jahrzehnten bereits eine maschinelle Untergrundsanie rung durchgeführt wurde, mag diese stark vereinfachende Annahme berechtigt sein. Die meisten Schmalspurbahnen entstanden jedoch noch im ausgehenden 19. Jahrhundert oder bis zum Beginn des Ersten Weltkriegs sind somit über 100 Jahre alt [83–85]. Aufgrund ihrer Unwirtschaftlichkeit erhielten sie im an den Zweiten Weltkrieg anschließenden Zeitalter der Motorisierung bezüglich Instandhaltung und Modernisierung über Jahrzehnte wenig Aufmerksamkeit von ihren Betreibergesellschaften, die oft ohnehin mit ihrer baldigen Einstellung rechneten. Abseits von Bereichen, die etwa aufgrund von Schäden nach Naturkatastrophen neu hergestellt werden mussten, ist der Unterbau von noch bestehenden Schmalspurbahnen meist noch im Originalzustand erhalten. Die vor mehr als 100 Jahren angewandten Bauverfahren sowie die verwendeten Baumaterialien erreichen bei weitem keine den heutigen Standards entsprechende Homogenität und Festigkeit. Auch wenn die Eisenbahninfrastrukturunternehmen sich für die Instandhaltung des bestehenden Schotteroberbaus mit dem vorhandenen Unterbau zu arrangieren gelernt haben, wird dieser nur in seltenen Fällen ausreichende Qualität für die Errichtung einer Festen Fahrbahn aufweisen. Im besten Fall kann mit einer Stabilisierung des vorhandenen Untergrundes das Auslangen gefunden werden. Vor allem in Dammlagen besteht jedoch stets die Gefahr, dass beim Antreffen von für die weitere Verwendung ungeeigneten Schüttmaterialien ein aufwändiger und kostspieliger Bodenaustausch erforderlich wird.

- *Der vorhandene Oberbauschotter kann beim Umbau auf eine Feste Fahrbahn als ungebundene oder hydraulisch gebundene Tragschicht recycelt werden.*

Bei Vorhandensein entsprechender Flächen für die Aufbereitung ist diese Form des Recyclings unabhängig von der Spurweite anwendbar. Bei Bergstrecken von Schmalspurbahnen können schlechte Zugänglichkeit und beschränkte Platzverhältnisse diesbezüglich erschwerend wirken und sollten bei der Erstellung von Logistikkonzepten jedenfalls berücksichtigt werden.

- *Die Feste Fahrbahn kann direkt auf die Planumsoberkante des bestehenden Schotteroberbaus gesetzt werden, eine Anhebung der Gradienten ist problemlos möglich.*

Um Mehrkosten durch vermeidbaren Ausbruch zu vermeiden, ist in Tunneln die Höhenlage der Schienenoberkante meist auf einen sehr kleinen Korridor festgelegt. Da sich der Schichtaufbau der Festen Fahrbahn in Tunnelabschnitten jedoch meist grundsätzlich von dem für die freie Strecke unterscheidet, wird für das Thema Tunnel an dieser Stelle auf das zugehörige Kapitel 5.6.1 verwiesen.

Die angeführte Annahme ist vor allem in Fällen relevant, wo auf der freien Strecke bei einem Umbau von einer ausreichenden Untergrund- bzw. Unterbauqualität ausgegangen wird. Hier kann der Gleisschotter wie bereits beschrieben abgetragen und nach entsprechender Bearbeitung als Tragschicht auf die bestehende Planumsschutzschicht aufgebracht werden. Je nach gewählter Bauart der Festen Fahrbahn und der erforderlichen Stärke der neuen Tragschicht ergibt sich dadurch eine andere Absoluthöhe der Schienenoberkante, die jedoch auch bei den Bauarten mit geringer Konstruktionshöhe in der Regel über der Höhe beim zuvor bestehenden Schotteroberbau zu liegen kommt [4]. Wenn diese Gradientenanhebung aufgrund von Beschränkungen des zur Verfügung stehenden Lichtraums (z. B. unter Brücken) oder bedingt durch andere Fixpunkte in der Höhe (z. B. Anschluss an

Tunnelfahrbahn) nicht möglich ist, sind Umbauarbeiten an Schutzschichten und Entwässerung vorzunehmen, die unweigerlich Mehrkosten verursachen. Als direkte Folge der bereits erläuterten problematischen Unterbauqualität bei Schmalspurbahnen ist die vorgestellte Höhenthematik für diese Bahnen nur in geringem Maße relevant.

- *Die Feste Fahrbahn verfügt über einen gleichbleibenden Querschnitt, der eine hohe Standardisierung und Mechanisierung in der Herstellung erlaubt. Es wird eine konstante Umbauleistung von 50 km pro Jahr über einen Zeitraum von 10 Jahren angenommen.*

Bei den meisten Schmalspurbahnen ist bereits die Herstellung des Schotteroberbaus weit weniger mechanisiert als dies im normalspurigen Gleisbau mit seinen Untergrundsanieungsmaschinen und Schnellumbauzügen der Fall ist, da sich die Entwicklung und/oder Anschaffung derartiger Maschinen für Eisenbahninfrastrukturunternehmen und Bahnbauunternehmen aufgrund der begrenzten Einsatzmöglichkeiten nicht rechnet. Eine Ausnahme hiervon bildet etwa das Schweizer Meterspurnetz, für das ein Maschinenpark zur Verfügung steht, der in Art und Größe durchaus mit dem der Normalspur vergleichbar ist.

Das beschriebene Phänomen lässt sich dem Grunde nach direkt umlegen auf die Feste Fahrbahn: Auch hier ist bei Schmalspurbahnen im Allgemeinen mit kürzeren Bauabschnitten, geringeren Bauvolumina mit unregelmäßiger Auftragslage sowie geringerer EIU-übergreifender Standardisierung zu rechnen. All diese Aspekte führen dazu, dass Einsparungspotenziale nicht im gleichen Ausmaß wie bei den normalspurigen Strecken genutzt werden können und höhere Baukosten entstehen.

- *Brücken über 25 m Länge, Weichen und Übergangsbereiche zwischen Fester Fahrbahn und Schotteroberbau machen maximal 3 % der Streckenlänge aus.*

Aufgrund der herausfordernden Trassierungssituation ist bei Schmalspurbahnen in Gebirgslage grundsätzlich von einem höheren Anteil der genannten Streckenelemente auszugehen. Das Streckennetz der schweizerischen Rhätischen Bahn verläuft beispielsweise zu 15 % seiner Gesamtlänge im Tunnel [86], bei der österreichischen Mariazellerbahn sind es etwa 5 % (eigene Berechnungen gemäß der Angaben von Felsing und Schober [25]). Wird von der Mariazellerbahn nur die sogenannte „Bergstrecke“ zwischen den Bahnhöfen Laubenbachmühle und Mariazell betrachtet, ergibt sich ein Wert von 11 %. Dazu kommt bei beiden Bahnen noch eine stattliche Anzahl von Brücken. Bei Schmalspurbahnen in Tallage wie der Murtalbahn, der Pinzgauer Lokalbahn oder der Zillertalbahn unterscheiden sich die Werte weniger stark von der Annahme für normalspurige Bahnen. Da eventuelle die Umrüstungen wohl kaum bei einer kompletten schmalspurigen Bahnlinie auf einmal durchgeführt würden, sind diesbezügliche Betrachtungen jedoch nur projektspezifisch sinnvoll. Je nach Wahl des Streckenabschnitts kann die oben genannte Annahme zwar zutreffen, sollte jedoch stets einer genaueren Überprüfung unterzogen werden.

- *Die Ver- und Entsorgung kann über ein parallel verlaufendes Baugleis abgewickelt werden.*

Bedingt durch die überwiegende Eingleisigkeit von schmalspurigen Bahnstrecken ist die Abwicklung der Baustellenlogistik über ein parallel verlaufendes Gleis bei derartigen Bahnen eher die Ausnahme als die Regel. Bei schwer zugänglichen Streckenabschnitten in Gebirgslage sollten bereits zu Projektbeginn detailliertere Überlegungen zur logistischen Machbarkeit des Bauvorhabens angestellt werden.

Aufgrund der weitgehenden Nicht-Anwendbarkeit der getroffenen Grundannahmen auf Schmalspurbahnen ist bereits an dieser Stelle ableitbar, dass das DB-Tool für den Lebenszykluskostenvergleich verschiedener Oberbauformen nicht für den Einsatz bei schmalspurigen Bahnen geeignet

ist. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden trotzdem die dokumentierten weitergehenden Überlegungen aus dem DB-Projekt analysiert, um daraus Erkenntnisse für die zweckmäßige Ermittlung von Oberbau-Lebenszykluskosten bei Schmalspurbahnen ohne Verwendung des entwickelten LCC-Tools gewinnen zu können.

5.3.1.2 Weitere Überlegungen zur Kostenermittlung

In der zusammenfassenden Publikation des Projektes [32] werden weitere Punkte diskutiert, die nach Ansicht der Autoren für die Kostenabschätzung von Festen Fahrbahnen von Relevanz sind. Da das abgewinkelte Bauvolumen von Festen Fahrbahnen nicht über mehrere Jahre hinweg konstant verteilt ist und die eingesetzten Bauarten einer ständigen Anpassung und Weiterentwicklung unterliegen, handelt es sich bei jeder Baustelle um einen Prototyp mit allen damit verbundenen Kosten und Risiken – vor allem die Anlaufphasen sind diesbezüglich entscheidend. Bei normalspurigen Strecken konnte in der Branche in den letzten Jahrzehnten umfassende Baupraxis gesammelt werden. Gemäß Mach [5] (vgl. dortige Tabellen 2-1 und 2-2) wurden beispielsweise von den ÖBB in den 10 Jahren vor der Veröffentlichung der Dissertation 2011 knapp 200 km des Feste-Fahrbahn-Systems ÖBB-Pörr errichtet bzw. befanden sich zum Veröffentlichungszeitpunkt gerade in Bau. Noch nicht miteinbezogen sind in diese Zahl Projekte wie die inzwischen realisierte Güterzugumfahrung St. Pölten (ca. 13 km) und der Koralmtunnel (ca. 65 km). Bei Ausführung einer bereits derart bewährten und oft angewendeten Bauart hat das Risiko des Prototypen somit an Relevanz eingebüßt. Im Bereich der Schmalspurbahnen ist das diesbezügliche Risiko jedoch noch höher zu bewerten, da abseits von städtischen Bereichen kaum Erfahrungen mit Fester Fahrbahn bei geringeren Spurweiten vorliegen.

Laut den Projektergebnissen müssen beim Bau von Festen Fahrbahnen mangels eines entsprechenden Marktes alle erforderlichen Investitionen (z. B. spezielle Baumaschinen) in der Regel auf eine einzelne Baustelle abgeschrieben werden, was die Herstellungskosten in die Höhe treibt. Bei bewährten Regelbauarten für normalspurige Strecken (vgl. Beispiel der Bauart ÖBB-PÖRR im vorherigen Absatz) trifft diese Aussage kaum mehr zu. Bei Umbauarbeiten an Schmalspurstrecken ist diese Tatsache sehr wohl noch als Hindernis bzw. bestimmender Kostenfaktor zu sehen. Ohne entsprechende Gleiskilometer für die Anwendung von neu entwickelten Techniken und Geräten sind diesbezügliche Investitionen für Eisenbahninfrastrukturunternehmen kaum zu stemmen. Es gibt jedoch Beispiele für die erfolgreiche Umsetzung von großvolumigen Sanierungs- und Modernisierungsprojekten von Schmalspurbahnen, bei dem eigens entwickelte Bauweisen und Geräte zum Einsatz kamen. Eines davon ist die „Normalbauweise Tunnel“ der Rhätischen Bahn, die in Kapitel 6.1.1 detaillierter beschrieben wird. Wenn benötigte Spezialgeräte unverhältnismäßig teuer sind und eine überwiegend händische Ausführung der erforderlichen Arbeiten nicht möglich oder sehr aufwändig ist, kann dies etwaige Umbaumaßnahmen für Betreibergesellschaften von kleineren Schmalspur-Netzen stark verteuern oder gar verunmöglichen.

Auch aus Gründen der Vertragsgestaltung und -abwicklung sowie des Bauablaufs ist die korrekte Einschätzung der Kosten für eine Feste Fahrbahn schwierig: Die Neu- und Ausbaustrecken, bei denen in Deutschland Feste Fahrbahn zum Einsatz kommt, werden in der Regel mit Generalunternehmerverträgen abgewickelt. Die Feste Fahrbahn wird dabei von einem Subunternehmer errichtet, ihr Preis enthält somit nicht nur die Geschäftskosten des errichtenden Unternehmens, sondern auch die von ggf. mehreren übergeordneten Akteuren. Da die Feste Fahrbahn erst gegen Ende eines Bauprojekts errichtet wird, erhöhen sich ihre Kosten auch durch indirekte Nachträge aus vorangegangenen Bauphasen und die Überbindung von Erschwerniskosten für verspätete Übergaben, parallel auszuführende Arbeiten, ggf. aufgetretene Abweichungen oder andere auf Baustellen auftretende Unannehmlichkeiten [32]. Da derart umfangreiche Bauprojekte selten ohne Verzögerungen ablaufen und Bauzeiten im Bahninfrastrukturbau aufgrund von weitrei-

chenden Sperrzeitenplanungen kaum flexibel gehandhabt werden können, ist der Einbau von Festen Fahrbahnen unter teuren Forcierungsmaßnahmen wie Nacht- und Wochenendarbeit eher der Regelfall als die Ausnahme. Bei Bauarbeiten im Bereich von Schmalspurbahnen, wo mit geringeren Projektvolumina gearbeitet wird als bei Neubauten von Hochgeschwindigkeitsstrecken mit nationaler und internationaler Netzwirkung, ist zu erwarten, dass sich die genannten Faktoren weniger stark auf die Preisbildung auswirken. Beim Versuch der Übertragung von Kosten von bereits fertiggestellten Projekten auf in der Zukunft geplante Vorhaben sollte jedoch in Betracht gezogen werden, dass die Kosten des abgeschlossenen Projektes von diesen Effekten verzerrt worden sein könnten.

Die im LCC-Tool hinterlegten Vergleichszahlen für Schotteroberbau gehen von einem hohen Mechanisierungsgrad und eingespielten Bauabläufen aus. Wie bereits an anderer Stelle angesprochen ist der Mechanisierungsgrad im Schmalspur-Schotteroberbau nicht vergleichbar mit dem der Normalspur, weil die meisten Arbeiten beim Schmalspur-Oberbau in Ermangelung von geeigneten Großgeräten händisch oder mit Zweibegebaggern durchgeführt werden müssen. Da sich die preislichen Effekte von höherem Arbeitsaufwand und geringerem Materialverbrauch (kleinere Schwellen, schmälere Bahnkörper, geringere Aufbauhöhen) in etwa die Waage halten, sind Arbeiten am Schotteroberbau von Schmalspurbahnen kostentechnisch vergleichbar mit denen bei normalspurigen Bahnen. Bei Baustellen mit entsprechender Längsausdehnung außerhalb von Bahnhöfen führt der geringere Mechanisierungsgrad jedoch zu wesentlich längeren Baudauern und somit zu ausgedehnteren Gleissperren. Das Resultat eines detaillierteren Vergleiches der erforderlichen Bauzeit und somit der Betriebserschwerungskosten (vgl. Kapitel 5.3.1.4) für eine Gleisneulage unter Verwendung von Schotteroberbau oder verschiedenen Bauarten der Festen Fahrbahn könnte sich für Schmalspurbahnen daher grundsätzlich von den Ergebnissen für normalspurige Strecken unterscheiden.

5.3.1.3 Instandhaltung

Allgemeines

In Übereinstimmung mit den Definitionen der *DIN 31051:2019 06* [87] wurden im DB-Projekt im Kostenblock Instandhaltung alle Ausgaben für planmäßig erforderliche Maßnahmen für Wartung, Inspektion und Instandsetzung berücksichtigt. Darüber hinaus finden hier auch notwendige Ersatzinvestitionen am Ende der Lebensdauer von einzelnen Bauteilen oder der Gesamtkonstruktion Eingang. Die Höhe der Kosten, die erforderlichen Intervalle für die einzelnen Instandhaltungstätigkeiten sowie die aus den Instandhaltungsarbeiten resultierenden Betriebsbehinderungen wurden gemäß DB-intern erhobenen Erfahrungswerten berücksichtigt [32]. Die Häufigkeit von verschiedenen Instandhaltungsarbeiten kann stark von Beanspruchungsintensität, Streckencharakteristik und klimatischen Bedingungen abhängen. Bei Schmalspurbahnen, die in gebirgrigeren Lagen anzutreffen sind und unter Umständen extreme Trassierungseigenschaften aufweisen, sollten die diesbezüglichen Annahmen daher für jedes Projekt mit Daten des Infrastrukturbetreibers abgeglichen werden. Schmalspurbahnen wurden aufgrund ihrer größeren Flexibilität in der Trassierung oft in besonders ausgesetzten Lagen errichtet, sodass sie ein höheres Risiko für Schäden durch Naturgefahren wie Muren oder Lawinen aufweisen als normalspurige Strecken. Derartige Probleme könnten in naher Zukunft an Relevanz gewinnen, da durch den Klimawandel auch im europäischen Zentralraum mit häufigeren Extremwetterereignissen in einer infrastrukturegefährdenden Intensität zu rechnen ist [88]. Eine seriöse Berücksichtigung derartiger Gefahren in den Lebenszykluskosten ist zum jetzigen Zeitpunkt nur bedingt möglich. Trotzdem können diesbezügliche Gründe ausschlaggebend für die Wahl der Oberbauart sein: Aktuell wird etwa bei der Pinzgauer Lokalbahn die Errichtung von mit Fester Fahrbahn ausgestatteten Überflutungsbereichen angedacht, um bei künftigen Hochwässern eine höhere Widerstandsfähigkeit

der Schieneninfrastruktur vorweisen zu können [89]. In anderem Zusammenhang (Eintrag von Streusalz in Tunnel durch Autoverladung im Winter) wurde auch bei der Rhätischen Bahn bereits festgestellt, dass Feste Fahrbahnen leichter von Verschmutzungen befreit werden können als dies beim Schotteroberbau der Fall ist.

Annahmen und Berechnungen

Bezüglich der erwarteten Instandsetzungstätigkeiten gibt es konstruktionsbedingte Unterschiede zwischen den verschiedenen Bauarten. Vom Projektteam der DB wurden diesbezüglich folgende Annahmen getroffen [32]:

- Der Tausch der elastischen Komponenten wird bei allen Bauarten gleichzeitig mit der Schienenerneuerung durchgeführt. Bei elastischer Schwellenlagerung (Bauart D) wird zusätzlich von einem Tausch von 50 % der elastischen Einlagen und Schwellenschuhe im Rahmen des Schientauschs ausgegangen.
- Bei den aufgelagerten Bauarten (C) ist durch die unterschiedliche Stärke der Zwischenlagen zum Zweck des Höhenausgleichs im Rahmen der Herstellung bei deren Tausch ein höherer Arbeitsaufwand einzukalkulieren als bei den anderen Bauarten.

Für die Vergleichsberechnungen wurde von der Notwendigkeit einer Ersatzinvestition nach 60 Jahren ausgegangen, auch wenn die Einschätzung der Projektbeteiligten nach den zu Beginn der 2000er vorliegenden Erfahrungen aus Rheda und Dachau-Karlsfeld lautete, dass bei qualitativer Bauausführung wohl auch nach sechs Jahrzehnten noch kein Totalaustausch einer Festen Fahrbahn erforderlich sein würde [32]. Diese Annahme wurde 10 Jahre später durch Mach [5] bestätigt und sogar erweitert - gemäß den Angaben in seiner Dissertation rechneten die ÖBB um 2010 bei Festen Fahrbahnen mit einer Lebensdauer von 80 Jahren. Die vom DB-Projektteam angenommenen Ersatzinvestitionen sind in Tabelle 5.4 zusammengestellt.

FF-System	kompakt (A)	FT-Platten (B)	aufgelagert (C)	elastische Schwellenlagerung (D)
Tausch Schienenbefestigung	50 %	75 %	-	-
Tausch Schwellen/Platte	50 %	25 %	100 %	100 %
Tausch Tragplatte	50 %	25 %	100 %	-

Tab. 5.4: Ersatzinvestitionen nach 60 Jahren (gem. [32], Tabelle 5-4)

Bei Bauarten bzw. in Bereichen mit Schwellendübeln ist deren Erneuerung hierbei im Tausch der Schienenbefestigung inkludiert. Bei den aufgelagerten Asphalt-Bauarten ist eine Sanierung der Tragplatte durch Abfräsen der obersten Schicht und Aufbringung einer neuen Deckschicht möglich.

5.3.1.4 Betriebserschwerniskosten

Von der DB wurden nur die Betriebserschwerniskosten aus geplanten Nichtverfügbarkeiten berücksichtigt. Der Einfluss von ungeplanten Nichtverfügbarkeiten konnte aufgrund mangelnder Störungsdaten nicht miteinbezogen werden [32]. Durch die grundsätzlichen Unterschiede in Konzeption und Aufbau der verschiedenen Systeme von Fester Fahrbahn wäre es interessant, ob bestimmte Bauarten mehr zum Auftreten unvorhergesehener Gebrechen neigen als andere und Art, Ausmaß und Häufigkeit der Schäden mit den Daten des Schotteroberbaus zu vergleichen.

Eine diesbezügliche Vergleichsstudie wurde zum gegenständlichen Zeitpunkt jedoch noch nicht durchgeführt.

Allfällige baustellenbedingte Langsamfahrstellen konnten wegen fehlender Datenbasis nicht berücksichtigt werden. Vom Projektteam wurden jedoch Sensitivitätsrechnungen durchgeführt, die deren angenommenen geringen Einfluss auf die Lebenszykluskosten bestätigten [32].

5.3.1.5 Mehraufwendungen durch den Einsatz der FF

Abhängig vom gewählten Oberbausystem ist bezüglich einiger Kostenblöcke mit Einsparungen bzw. Mehraufwendungen zu rechnen. Die diesbezüglichen Ansätze des DB-Projektteams [32] werden in diesem Abschnitt erläutert.

Schallschutz

Bezüglich bei Einbau einer Festen Fahrbahn erforderlicher Schallschutzmaßnahmen wurde für die Lebenszykluskostenermittlung von der Ausstattung eines Drittels der Streckenlänge mit Schallabsorbern oder vergleichbaren Maßnahmen ausgegangen [32]. Weitere Überlegungen zum Thema Luftschall werden in Kapitel 5.6.10 angestellt.

Setzungen

Auf Grund der eingeschränkten Möglichkeiten zur Höhenkorrektur sind bei Planung einer Festen Fahrbahn gegenüber dem Schotteroberbau zusätzliche Erkundungen und Messungen bezüglich des zu erwartenden Setzungsverhaltens erforderlich. Für die Kostenermittlung wurden im Rahmen des DB-Projektes je nach Bauart der Festen Fahrbahn zwei Ansätze unterschieden [32]:

- Bei den Bauarten **A** (kompakt) und **D** (elastische Schwellenlagerung) ist eine Höhenkorrektur nur in den Schienenbefestigungen möglich. Darüber hinausgehende Maßnahmen sind sehr aufwändig und nur mit großen Betriebsbehinderungen möglich. Aus diesem Grund ist vor allem bei Dammlagen auf eine entsprechende Unterbauqualität zu achten. Unter der Annahme, dass sich 20 % der Strecke in Dammlage befinden und somit besondere diesbezügliche Maßnahmen erfordern, wird der erwartete Zusatzaufwand für diese Bereiche bei Neubaustrecken mit 100 % und bei Ausbaustrecken mit 50 % angesetzt.
- Für die Bauarten **B** (FT-Platten) und **C** (aufgelagert) gibt es Verfahren zur Höhenkorrektur, mit denen etwa 100 m Gleis in einer Nachtsperre ohne anschließende Einrichtung einer Langsamfahrstelle saniert werden können. Unter Beibehaltung der Annahme von 20 % Dammlage, von denen wiederum 10 % nach der Herstellung von relevanten Setzungen betroffen sind, ergibt sich ein Anteil von 2 % der Streckenlänge, bei dem die Höhenlage nach Fertigstellung der Festen Fahrbahn zu korrigieren ist. Die daraus resultierenden Baukosten und Betriebserschwerungskosten werden in der Lebenszykluskostenermittlung berücksichtigt. Im Gegenzug dafür wird angenommen, dass für diese Bauarten eine Untergrundqualität wie für den Schotteroberbau ausreicht, da einerseits eine Korrekturmöglichkeit besteht und andererseits Feste Fahrbahnen bei gleicher Belastung zu einer geringeren Untergrundbelastung führen, als sie beim Schotteroberbau auftreten würde.

Die möglichen Sanierungsverfahren für setzungsbedingte Schäden werden in Kapitel 5.6.8 detaillierter vorgestellt.

Entwässerung

Die Ausbildung der Oberflächenentwässerung wurde für alle Bauarten der Festen Fahrbahn gleich angenommen: In Geraden sowie in Bögen mit Pultprofil wurde eine Mittenabdeckung angenommen, in Bögen mit Sägezahnprofil auf Erdbauwerken wird von der Ausführung einer

Mittentwässerung mit Einlaufschächten und Querungen ausgegangen. Für die Kostenberechnungen wurde angenommen, dass sich die untersuchte Strecke zur Hälfte aus Bögen und zur Hälfte aus geraden Abschnitten zusammensetzt [32].

Die Mittentwässerung mit ihren kostspieligen und wartungsintensiven Querungen zur Ausleitung des anfallenden Wassers ist bei Festen Fahrbahnen ein wesentlicher Kostenfaktor. Diesbezüglich haben Schmalspurbahnen durch ihre überwiegende Eingleisigkeit einen wesentlichen Vorteil: Die Herstellung der Entwässerungsanlagen ist in diesem Fall auf die Randbereiche beschränkt, die Fahrbahn entwässert über ihre Oberfläche in den Bahngraben oder den seitlichen Tunnel- bzw. Brückenbereich. Es gibt kaum Abschnitte, in denen die Notwendigkeit zur Errichtung einer Mittentwässerung besteht. Auch die Unterscheidung in Sägezahn- und Pultprofile ist somit hinfällig und wird daher nicht näher erläutert. Diesbezügliche Überlegungen für zweigleisige Strecken werden in *Systementscheidung Schotteroberbau oder Feste Fahrbahn* [32] ausführlich behandelt.

Für das Thema der Entwässerung von Tunnelportalbereichen wird auf Abschnitt 5.6.1 der vorliegenden Arbeit verwiesen.

5.3.1.6 Variantenrechnung

Betrachtete Varianten

Zur Ableitung von allgemeinen Empfehlungen wurde als Teil des DB-Projekts für vier verschiedene Streckenstandards gemäß DB Richtlinie 413 [80], die in Tabelle 5.5 erläutert sind, eine Variantenrechnung durchgeführt. Aufgrund des Projektfokus auf höherwertige Streckenkategorien blieben Regionalverkehrsfahrbahnen hierbei unberücksichtigt.

Belastungsprofil [32]	Streckenstandard [80]		v_{max} [km/h]	Anzahl Züge pro Tag und Richtung		
	alt	Stand 2022		FV	NV	GV
HGF	P300	P1 (F1)	>250	40-120	0	0
SFV	M230	P2/F1	161-250	20-70	20-50	0
SFV	P230	P2 (F1)	161-250	20-50	20-40	20-60
MVF	M160	P3/P4/F1	121-160	12-50	18-40	10-60

HGF Hochgeschwindigkeitsfahrbahn

SVF Schnellverkehrsfahrbahn

MVF Mischverkehrsfahrbahn

v_{max} Streckenhöchstgeschwindigkeit

FV Personenfernverkehr

NV Personennahverkehr

GV Güterverkehr

Tab. 5.5: In der Variantenrechnung [32] untersuchte Streckenstandards bzw. Belastungsprofile

Unter Verwendung der drei in Kapitel 5.1.2 definierten Bauszenarien ergaben sich somit 12 Varianten, wobei für jede Variante eine weitere Unterscheidung in drei verschiedene Belastungsintensitäten („Obergrenze Betriebsprogramm“, „Betriebsprogramm Basis“, „Untergrenze Betriebsprogramm“) vorgenommen wurde.

Der Umbau von Bestandsstrecken (Bauszenarien Ausbau und Gleiserneuerung) wurde vom Projektteam nur mit den Bauarten B (FT-Platten) und C (aufgelagert) weiter verfolgt, da die Bauarten A (kompakt) und D (elastische Schwellenlagerung) durch ihre langen Bauzeiten und die dadurch nötigen umfangreichen Streckensperren ausgeschieden wurden.

Wirtschaftliche Annahmen

Der Kapitalzins wurde im Rahmen der Untersuchungen gemäß Konzernvorgaben zu 8 % und die Teuerungsrate mit 2 % angenommen [79]. Für die Teuerung kann diese Prognose als hinreichend genau bezeichnet werden: Gemäß den Angaben des deutschen Statistischen Bundesamts [90]

schwankte die Inflationsrate in Deutschland in den Jahren von 2000 bis 2021 zwischen 0,3 und 3,1 %. Erst 2022 kam es zu einem Anstieg auf 6,9 %.

Problematischer ist die Annahme des Kapitalzins mit einem Wert von 8 %. Die Österreichische Nationalbank [91] dokumentiert für Deutschland einen von 5,26 % im Jahr 2000 auf -0,51 % im Jahr 2020 fallenden Kapitalmarktzins. Seither stieg der Zins bis auf einen Wert von 1,14 % im Jahr 2022 wieder leicht an.

Die Annahme eines Kapitalzins, der deutlich über den in den folgenden 20 Jahren aufgetretenen Werten liegt, führt zu einer Überschätzung der Kosten für die Bereitstellung des Investitionskapitals. Da die Kosten der Festen Fahrbahn, die kaum Instandhaltung erfordert, fast zur Gänze bei der Errichtung auftreten, wirkt sich dieses Phänomen wesentlich stärker auf die errechneten Lebenszykluskosten der Festen Fahrbahn aus als auf die des Schotteroberbaus. Aus wirtschaftlicher Sicht wurden die Feste Fahrbahnen in der Variantenrechnung also (ungerechtfertigt) schlechter eingeschätzt als der Schotteroberbau. Die Berechnungsergebnisse sind aus diesem Grund mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten.

Untersuchungsergebnisse

Eine positive Barwertdifferenz, also eine Empfehlung für die Feste Fahrbahn aus wirtschaftlichen Überlegungen, wird im Rahmen der Variantenrechnung nur für Streckenneubauten mit Belastungen an der Obergrenze des jeweiligen Betriebsprogrammes erreicht. Mit Abnahme des Streckenstandards und der Belastungsintensität fallen die Werte der normierten Barwertdifferenzen immer weiter ab, von einer Fortsetzung dieses Trends bei Berechnungen für in der Variantenrechnung ausgeklammerte, weniger hochwertige Streckenkategorien ist auszugehen. In allgemeinen Fällen kann demnach trotz der angesprochenen Unzulänglichkeiten bei den wirtschaftlichen Annahmen davon ausgegangen werden, dass der Einbau einer Festen Fahrbahn bei Schmalspurstrecken nicht wirtschaftlich ist. Bei Vorliegen von besonderen Rahmenbedingungen sowie bei der Sanierung von bekannten „Problemstellen“ kann der Einbau einer Festen Fahrbahn jedoch durchaus sinnvoll sein. Diesbezügliche Überlegungen werden im weiteren Verlauf dieser Diplomarbeit angestellt.

5.3.1.7 Das LCC-Tool

Mit Hilfe des entwickelten Excel-Tools ist ein Vergleich der zu erwarteten Lebenszykluskosten zwischen zwei verschiedenen Oberbauformen einfach zu bewerkstelligen. Der Betrachtungszeitraum ist hierbei auf 60 Jahre festgelegt. Die benötigten Eingangsdaten sind Streckenstandard, Bauszenario und die zu vergleichenden Oberbauformen (Schotteroberbau sowie Feste Fahrbahn Typ A, B, C oder D) und können mittels Pull-Down-Menüs ausgewählt werden. Auch die Werte für Inflation und Verzinsung können leicht angepasst werden, um eine flexible Nutzung des Tools zu ermöglichen.

5.3.1.8 Fazit

Das Tool der DB für Lebenszykluskostenvergleiche ist bedingt durch die diskutierten Unterschiede technischer und organisatorischer Natur zwischen höherrangigen Strecken, für die es entwickelt wurde, und Schmalspurstrecken nicht geeignet, um damit Kostenberechnungen für die allfällige Umrüstung von Schmalspurbahnen durchzuführen. Aus den vom Projektteam um DI Holger Koriath angestellten Überlegungen können jedoch viele grundlegende Erkenntnisse für eine an die Charakteristika von Schmalspurbahnen angepasste Berechnung von Oberbau-Lebenszykluskosten gewonnen werden.

5.3.2 Einbeziehung von Trassierungseigenschaften, Erd- und Ingenieurbauwerken

Den zweiten Schritt der standardisierten DB-Vorgehensweise bildet die Analyse von Potenzialen bezüglich der Trassierungseigenschaften bei noch nicht festgelegtem Streckenverlauf. Durch entsprechende Ausnutzung der trassierungsbezogenen Eigenschaften der Festen Fahrbahn können unter Beibehaltung der Entwurfsgeschwindigkeit wesentliche Einsparungen bei den Kosten für Erd- und Ingenieurbauwerke gelingen.

Bei qualitativer Bauausführung gewährleistet eine Feste Fahrbahn auf Grund der nachhaltig stabilen Gleislage über ihre gesamte Liegedauer eine wesentlich ruhigere Fahrt als ein Schottergleis mit identischen Trassierungseigenschaften [92]. Die im Bahnbau angewendeten Trassierungsgrenzwerte wurden im Lauf der Jahrzehnte empirisch am Schotteroberbau ermittelt und mit dem Ziel einer hohen Gleislagebeständigkeit und eines wirtschaftlich vertretbaren Erhaltungsaufwandes festgelegt. Sie beinhalten somit den erwartbaren Unregelmäßigkeiten des Schotteroberbaus entsprechende Sicherheitsreserven [9]. Die stabile Gleislage bei der Festen Fahrbahn macht diese Sicherheitsreserven in der Theorie überflüssig. In der Praxis gibt es durch die aktuell gültigen Normen und Richtlinien für die Trassierung von Festen Fahrbahnen jedoch keine Erleichterungen gegenüber dem Schotteroberbau. Die einzige Ausnahme hierbei bildet die größere zulässige Überhöhung von 170 mm (Feste Fahrbahn) statt 160 mm (Schotteroberbau) bei Strecken mit Güter- und Mischverkehr (vgl. TSI Infrastruktur [76, 77], Tabelle 7). Gemäß der Einschätzung des Bereichs Produktmanagement Technik (NST) der DB AG wäre ohne relevante Sicherheits- und Komforteinbußen bei der normalspurigen Festen Fahrbahn eine Anhebung der maximalen Überhöhung auf 180 mm und eine Anhebung des aktuell für Schotteroberbau und Feste Fahrbahnen einheitlich auf 150 mm festgesetzten Überhöhungsfehlbetrages auf 250 mm möglich [32]. Auch Oberweiler, ehemaliger Leiter des Sachgebiets „Oberbau“ beim deutschen Eisenbahn-Bundesamt, geht 2002 von der Realisierbarkeit von bis zu 25 % größeren Überhöhungen bei der Festen Fahrbahn aus [31]. Die grundsätzlich weniger ausgeprägten Unregelmäßigkeiten der Fahrbahn bei Einbau einer FF und die damit einher gehenden geringeren dynamischen Beanspruchungen ließen Pospischil [9] bereits 1991 eine Ausnutzung der Reserven des Überhöhungsfehlbetrags von bis zu 200 mm überlegen. Mit Versuchsfahrten sowie statistischen Berechnungen inklusive Sensitivitätsanalyse konnte nachgewiesen werden, dass Überhöhungsfehlbeträge von 180 mm bezüglich Fahrkomfort jedenfalls machbar sind, im Artikel werden zur Absicherung „*ggf. lauftechnische Zulassungsfahrten mit den maßgeblichen Fahrzeugen*“ empfohlen [9].

Für normalspurige Bahnen errechnete Pospischil [9] bedingt durch Sicherheitsüberlegungen eine maximale Überhöhung von 160 bis 180 mm, wobei die Verwendung von Schwellenformen mit größerer Auflagefläche auch beim Schotteroberbau größere Überhöhungen ohne Erhöhung der Schotterpressung ermöglicht. In seinem Artikel weist er jedoch auch auf die Gefahr hin, dass die Überhöhung bei Strecken mit Güterverkehr nicht zu hoch gewählt werden sollte, um Probleme bezüglich Ladungsverschiebungen oder Standsicherheit zu vermeiden. Als Grenzwert für Strecken mit Güterverkehr nennt der Autor einen Wert von 160 mm [9], wie er inzwischen auch in der TSI Infrastruktur vorgegeben ist.

Bei seinen Untersuchungen stellte Pospischil darüber hinaus fest, dass eine Beschränkung des zulässigen Überhöhungsfehlbetrages nicht aus Gründen der Sicherheit des Fahrzeuglaufs oder der Fahrwegbeanspruchung nötig ist, sondern lediglich zur Sicherstellung des Fahrkomfortes dient [9]. Dieser Fahrkomfort steht in direktem Zusammenhang mit der auf die Fahrgäste wirkenden Seitenbeschleunigung, die vor allem in den Knickbereichen von geraden Überhöhungsrampen stark zunimmt [93]. Auf dieses Thema wird in Abschnitt 5.6.5 dieser Diplomarbeit näher eingegangen.

Für Bahnen in Normal- und Breitspur würde eine diesbezügliche Anpassung an den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik eine umfassende Änderung von Regelwerken bis hinauf zur den TSI erforderlich machen. Für Schmalspurbahnen gibt es wesentlich weniger international ein-

heitliche Vorgaben, die Meterspur ist sogar ausdrücklich von der TSI Infrastruktur ausgenommen (vgl. [76, 77], Art. 2 Abs. 6). Dieser Umstand kombiniert mit dem Dasein der Schmalspurbahnen als Inselbahnen erleichtert es den einzelnen Eisenbahninfrastrukturunternehmen zumindest in der Theorie, mit entsprechenden Untersuchungen und Begründungen von allfälligen Vorgaben abzuweichen. Da die zuständigen Stellen eine Weiterentwicklung von Regelwerken für die in vielen Ländern über Jahrzehnte hinweg ein Nischendasein fristenden Schmalspurbahnen nicht als sinnvoll erachteten, sind die Trassierungsregelwerke in diesem Bereich jedoch oft grundsätzlich stark veraltet. In Österreich werden entweder die Richtlinie *B 51/P Oberbauvorschrift für Österreichische nicht vom Bunde betriebene Haupt- und Nebenbahnen* [94] aus dem Jahr 1958 oder die ehemaligen ÖBB Dienstvorschriften *B 51 Oberbauvorschrift* (1980) [95] und *B 52 Oberbau - Technische Grundsätze* (1986) [96] angewendet. Der § 6 der deutschen ESBO (Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung für Schmalspurbahnen), der die zulässigen Überhöhungen bei Schmalspurbahnen regelt, wurde seit Inkrafttreten im Jahr 1972 nicht geändert. Die Trassierung erfolgt somit zur Gänze nach Vorgaben, die aus einer Zeit vor der Entwicklung der Festen Fahrbahn stammen.

In der Schweiz sind bei der Trassierung von Bahnen die Vorgaben der *Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung* [10] einzuhalten. Aufgrund der wichtigen verkehrlichen Funktion der meterspurigen Bahnen in der Schweiz wird dieses Dokument als einziges im deutschen Sprachraum auch für gerinere Spurweiten als 1435 mm regelmäßig aktualisiert und fortgeschrieben. Für die Meterspur wird dezidiert auf die Möglichkeit der Ausführung von Überhöhungen oberhalb der Grenzwerte hingewiesen – diese ist „*bei besonderen Verhältnissen und vom BAV festzulegenden Bedingungen zulässig*“. Eine auf die Möglichkeiten und Erfordernisse der Festen Fahrbahn abgestimmte Anpassung von Trassierungsgrenzwerten erfolgt jedoch auch hier nicht.

Aus der erläuterten Situation folgt, dass in diesem Bereich grundsätzliches Optimierungspotenzial besteht. Auch im Rahmen von bei Schmalspurbahnen ohnehin seltenen Gelegenheiten zur Neutrassierung, wie etwa der aktuellen Verlegung der Trasse der Zillertalbahn [97] oder Überlegungen zur Verlängerung der Pinzgauer Lokalbahn [98], können diesbezügliche Vorteile der Festen Fahrbahn unter Einhaltung der aktuellen Regelungen nicht genutzt werden.

Im für die DB entwickelten LCC-Tool werden finanzielle Effekte aus der Trassierung grundsätzlich nicht erfasst, sie finden jedoch im Entscheidungsbaum mittels pauschaler Ansätze Berücksichtigung (vgl. Kapitel 5.4).

5.3.3 Weitere Potenziale aus dem Umfeld

Die Vorteile der Festen Fahrbahn bei bereits festgelegten Trassen fanden in den bisher beschriebenen beiden Schritten bzw. Modell-Schichten des Modells noch keine Beachtung. Diese wurden von den Projektbeteiligten den Potenzialen aus dem Umfeld der Festen Fahrbahn und den betrieblichen Nutzungsvorteilen zugeordnet. Da bei Schmalspurbahnen nur in seltenen Fällen eine Neutrassierung durchgeführt wird, liegt das größte Potenzial der bereits in Kapitel 5.3.2 erläuterten Überarbeitung der Grenzwerte für ausgeführte Überhöhung und/oder Überhöhungsfehlbetrag in der Attraktivierung von Bestandsstrecken. Bei gleichbleibenden Bogenradien könnten so höhere Geschwindigkeiten und damit einher gehende Fahrzeitverkürzungen erreicht werden. Die vom Projektteam der DB für die Normalspur durchgeführten Berechnungen zeigen, dass der Fahrzeitunterschied umso größer ausfällt, je geringer die Radien der Strecke sind. Die Tatsache, dass enge Radien eines der zentralen Charakteristika von Schmalspurbahnen sind, macht den beschriebenen Zusammenhang umso spannender für die Anwendung bei diesen Bahnen. Als resultierende wirtschaftliche Vorteile der Entscheidung für eine Feste Fahrbahn wurden diesbezüglich folgende Punkte identifiziert [32]:

- *Beim Ausbau von bestehenden Trassen sind für ein gleichwertiges Ergebnis weniger Linienverbesserungsmaßnahmen nötig. Dadurch entfallen langwierige Planungs- und Genehmigungsprozesse, es müssen weniger Flächen angekauft werden.*

Die Komplexität der vor Beginn der Umbauarbeiten zu durchlaufenden Verfahren kann eine Hürde darstellen, die sinnvolle Infrastrukturverbesserungen verzögert oder verhindert. Eine Vereinfachung dieser Prozesse ist daher unabhängig von der Spurweite jedenfalls erstrebenswert. Ob die geringere Menge an neu benötigten Flächen auch zu einer Reduzierung des Gesamtflächenbedarfs der Strecke führt oder ob bei einer klassischen Linienverbesserung mit Schotteroberbau dafür alte Flächen freigegeben würden, ist allgemein kaum abschätzbar und daher projektspezifisch zu beurteilen. In den letzten Jahren ist der Flächenverbrauch in vielen europäischen Ländern zu einem Thema mit gesellschaftlicher Relevanz geworden, daher sollten in allfälligen Variantenuntersuchungen auch diesbezügliche Aspekte betrachtet werden. Eine geringere Flächeninanspruchnahme kann zudem zu einer höheren Akzeptanz für Infrastrukturprojekte in der lokalen Bevölkerung beitragen.

- *Durch Umlaufoptimierungen sind bei gleichbleibendem Angebot Einsparungen bei rollendem Material und fahrendem Personal möglich.*

Im Umkehrschluss bedeutet dies auch, dass mit gleichem Ressourcenaufwand nicht nur eine Attraktivierung des Angebots bezüglich der Fahrzeit, sondern ggf. auch im Hinblick auf die Angebotsdichte möglich wird. Ob Umlaufoptimierungen durch Fahrzeitverkürzungen erreichbar sind, hängt immer von den Rahmenbedingungen auf der Strecke und dem Ausmaß der Beschleunigungsmaßnahmen ab und ist projektspezifisch zu beurteilen.

- *Es werden mehr Trassen verfügbar, zu Spitzenzeiten kann die Zuganzahl um 10 bis 15 % erhöht werden.*

Aufgrund der Fokussierung des Gesamtprojektes auf Fahrbahnen mit einer Streckenhöchstgeschwindigkeit von mehr als 160 km/h kann davon ausgegangen werden, dass die angeführten Prozentwerte sich auf zweigleisige Strecken beziehen. Damit sind diese nicht direkt auf Schmalspurbahnen, die in der Regel maximal abschnittsweise über zwei Gleise verfügen, anwendbar. Kürzere Sperrzeiten durch höhere Fahrgeschwindigkeiten können sich jedoch auch auf eingleisigen Strecken äußerst positiv auf die Flexibilität der Fahrplangestaltung auswirken. Dies gilt vor allem, wenn längere Streckenabschnitte betroffen sind, bei denen etwa aus orographischen Gründen die Errichtung einer zusätzlichen Kreuzungsstelle nicht möglich ist.

- *Der Entfall von einzelnen Stellen mit niedriger Geschwindigkeit reduziert Energiebedarf und Verschleiß.*

Das Wegfallen von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen führt zu einem niedrigeren Energieverbrauch, was vor allem im Hinblick auf alternative Antriebssysteme für nicht elektrifizierte Strecken wie z. B. Akku- oder Wasserstoffbetrieb entscheidende Vorteile bringen kann. Auch der Verschleiß und somit der Wartungsaufwand kann dadurch sowohl am rollenden Material als auch den Gleisanlagen reduziert werden.

Da die genannten Punkte entweder gar nicht oder nur projektspezifisch quantifiziert werden können, ist ihre Berücksichtigung wie am Beginn von Kapitel 5.3 bereits angeführt nur in Fällen vorgesehen, in denen auf Grund der Erkenntnisse aus den ersten beiden Schichten des Modells noch keine Entscheidung möglich ist.

5.4 Entwicklung des Entscheidungsbaums

Die oberbautechnische Systementscheidung ist eine äußerst komplexe Thematik mit einer Vielzahl von Einflussparametern. Diese Komplexität sollte im Rahmen des DB-Projektes unter Vermeidung von zu starken Vereinfachungen auf nachvollziehbare Art reduziert werden, um anhand einiger wesentlicher Fragen bereits in frühen Projektphasen eine möglichst stabile Entscheidung ableiten zu können.

Die gesammelten Informationen, Konzepte und Zusammenhänge wurden somit zu einem Entscheidungsbaum (vgl. Abbildung 5.1) verarbeitet, mit dem in fünf Stufen entweder eine eindeutige Entscheidung oder die Empfehlung zur Durchführung einer Detailanalyse erreicht werden kann. In eindeutigen Fällen kann die Endaussage durch die Anwendung von technischen Ausschlusskriterien erreicht werden. Für die Detailanalyse werden Methoden, Kriterien und Grenzwerte ausgearbeitet und empfohlen, auf die in Kapitel 5.4.4 näher eingegangen wird.

In den zunächst folgenden Abschnitten werden die für Schmalspurbahnen relevanten, aus dem Entscheidungsbaum ersichtlichen oder vom Projektteam abgeleiteten und dokumentierten grundsätzlichen Entscheidungsempfehlungen für verschiedene Bauszenarien diskutiert.

5.4.1 Empfehlungen für die Gleiserneuerung

Da die Gleiserneuerung den häufigsten Anwendungsfall im Bereich der Schmalspurbahnen darstellt, wird der Fokus im vorliegenden ersten Abschnitt auf den zugehörigen Ast des Entscheidungsbaumes gelegt. Das Projektteam stellte fest, dass der Einbau einer Festen Fahrbahn auf einer Bestandsstrecke ohne gleichzeitige Umsetzung von leistungssteigernden Maßnahmen im Allgemeinen nicht wirtschaftlich ist. Die grundsätzliche Empfehlung lautet daher, den Schotteroberbau zu erneuern, da in diesem Fall durch den Einsatz von erprobten hochmechanisierten Umbauverfahren eine wesentlich kürzere Bauzeit möglich ist und bei Einbau einer Festen Fahrbahn die höheren Investitionskosten und höheren Betriebserschwerungskosten durch die längere Dauersperrung zu Errichtungszwecken ohne eine eindeutige Nutzwertsteigerung nicht kompensierbar sind.

Nur für den Fall, dass eines der beiden technischen Ausschlusskriterien für den Schotteroberbau zutrifft, wird zu einer Festen Fahrbahn geraten. Schotteroberbau kann bzw. sollte nicht errichtet werden, falls

- die verfügbare Bauhöhe nicht ausreicht oder
- der untersuchte Bereich kürzer als 500 m und zwischen zwei Abschnitten mit Fester Fahrbahn situiert ist [32].

Die 500 m Mindestabschnittslänge werden gefordert, um zu häufige Systemwechsel zu vermeiden, da bedingt durch das sehr unterschiedliche Elastizitäts- und Setzungsverhalten von Fester Fahrbahn und Schotteroberbau die Ausbildung der entsprechenden Übergangspunkte aufwändig ist und die Übergangsbereiche anfälliger für Gleislagefehler sind [4, 5].

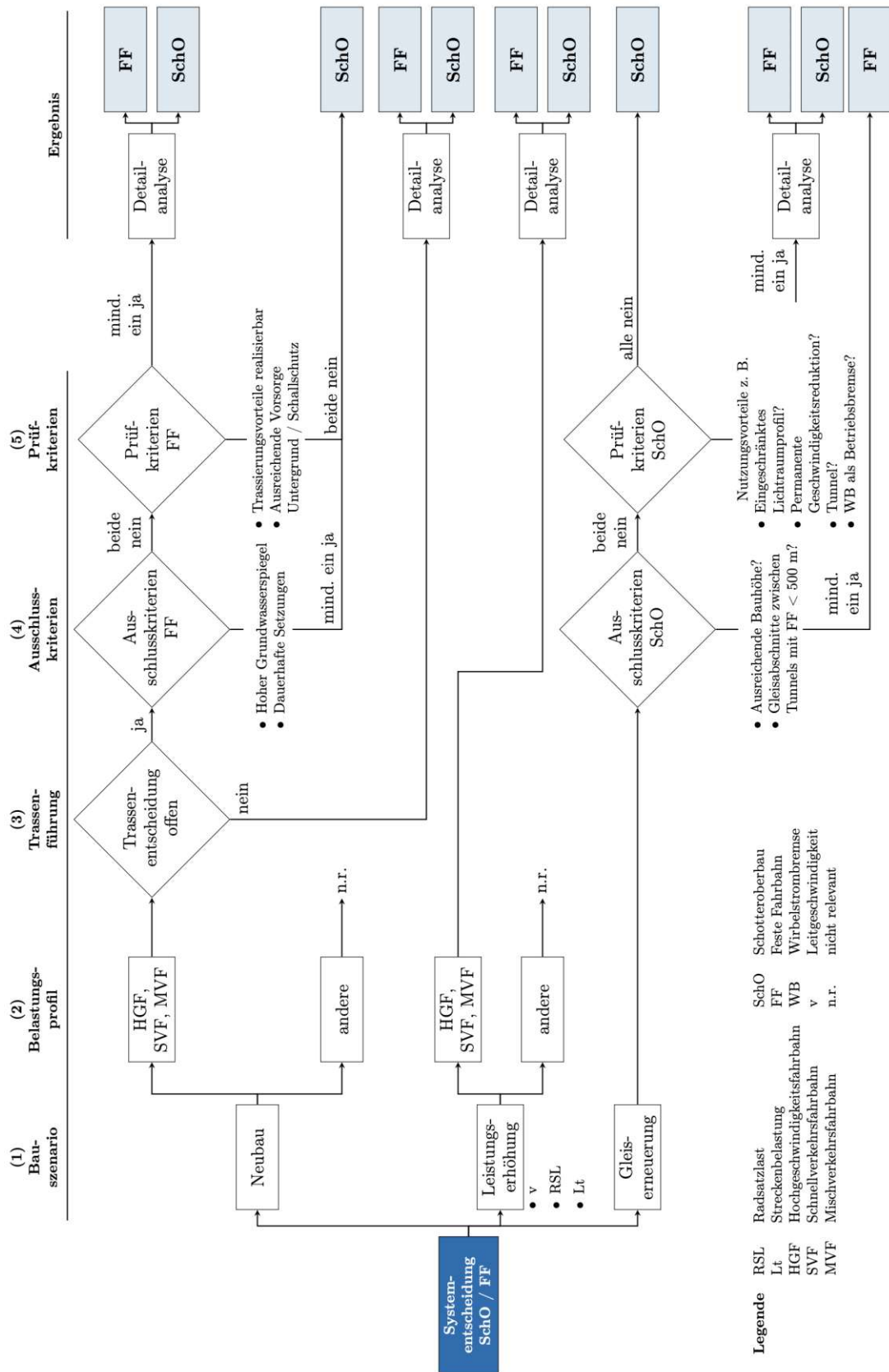


Abb. 5.1: Entscheidungsbaum aus dem Projekt der DB (eigene Darstellung gemäß [32, Abb. 6-1])

Den nächsten Schritt bilden die sogenannten Prüfkriterien. Hier soll geklärt werden, ob eine projektspezifische Detailanalyse erforderlich ist. Dies ist der Fall, wenn durch die Ausführung einer Festen Fahrbahn etwa auf eine der folgenden Arten Nutzwertvorteile erzielt werden können:

- Gewährleistung eines größeren Lichtraumprofils
- Möglichkeit der Nutzung von Wirbelstrombremsen als Betriebsbremsen
- Erreichen einer höheren Streckengeschwindigkeit
- Erzielen von Instandhaltungsvorteilen in Tunnelbereichen

In allen anderen Fällen wird ein Schotteroberbau empfohlen. Als allgemeines Beispiel für die Anwendung der Prüfkriterien wird die Situation angeführt, dass zwar die vorhergehenden Schritte für eine Feste Fahrbahn sprechen, diese jedoch umfangreiche Lärmschutz- sowie Untergrundsaniierungsmaßnahmen erforderlich machen würde. In diesem Fall verweisen die Prüfkriterien den Anwender bzw. die Anwenderin auf eine Detailanalyse.

5.4.2 Empfehlungen für den Neubau

Im Ast „*Neubau*“ werden für Strecken mit höherer Fahrgeschwindigkeit und offener Trassenentscheidung, wo grundsätzlich eher die Verwendung einer Festen Fahrbahn angestrebt wird, auch zwei technische Ausschlusskriterien für die Feste Fahrbahn genannt: Dies sind einerseits ein zu hoher Grundwasserspiegel und andererseits das Erwarten von dauerhaften Setzungen. Auch wenn die hier angenommenen Voraussetzungen für Schmalspurbahnen nicht zutreffend sind, sollten diese Kriterien in den Überlegungen berücksichtigt werden - das Vorhandensein eines von Langzeitsetzungen betroffenen Bereiches zwischen zwei Tunneln kann etwa die Anordnung eines Abschnittes mit Schotteroberbau rechtfertigen, auch wenn dieser über eine geringere Länge als 500 m verfügt.

5.4.3 Empfehlungen für die Leistungserhöhung

Im Rahmen der Planungsmaßnahmen für die Leistungserhöhung einer Bestandsstrecke wird eine Detailanalyse grundsätzlich immer empfohlen. Aufgrund der von Fall zu Fall verschiedenen Rahmenbedingungen und Ziele derartiger Maßnahmen ist basierend auf den vom DB-Projektteam durchgeführten Untersuchungen keine allgemeine Regelfallempfehlung möglich. Die Anwendung der bereits in den Abschnitten Neubau und Leistungserhöhung angeführten Ausschlusskriterien führt jedoch bei vielen Strecken bereits zu einer klaren Aussage. In den ergänzenden Unterlagen [32] werden für den Ast „*Leistungserhöhung*“ noch zwei im Entscheidungsbaum nicht dargestellte Aspekte erläutert:

- Wenn Grund zur Annahme besteht, dass der Untergrund im untersuchten Streckenabschnitt von schlechter Qualität ist, muss davon ausgegangen werden, dass die im entwickelten LCC-Modell pauschal berücksichtigten Kosten zu niedrig angesetzt sind. In diesem Fall sollten genauere diesbezügliche Untersuchungen von entsprechenden Fachdiensten oder externen Experten durchgeführt werden.
- Wenn der Anteil der lärmsensiblen Streckenabschnitte über einem Drittel der Streckenlänge liegt, ist ebenfalls eine genauere Untersuchung erforderlich, da die bei der Entwicklung des LCC-Modells angesetzten Annahmen die damit verbundenen Kosten nicht mehr abdecken.

5.4.4 Detailanalyse

Wenn die Anwendung des Entscheidungsbaumes nicht zu einem klaren Ergebnis führt, wird auf die sogenannte Detailanalyse verwiesen. In dieser projektspezifischen Detailanalyse sind die Barwertdifferenzen der zu vergleichenden Systeme bezüglich der Lebenszykluskosten des Oberbaus, der Aufwendungen für Untergrundsanie rung und Lärmschutz sowie der Trassierungseigenschaften zu ermitteln und aufzusummieren. Falls sich diese Summe außerhalb von im Rahmen des Projektes definierten Grenzwerten befindet, kann eine klare Entscheidung basierend auf wirtschaftlichen Kriterien getroffen werden. Ist die Summe im mittleren Bereich angesiedelt, liegt die Wirtschaftlichkeit der verglichenen Systeme nahe beieinander. Für die Entscheidungsfindung müssen in diesem Fall andere Kriterien in Betracht gezogen werden.

DB-intern kann diese Detailanalyse für Standardfälle mit dem in Kapitel 5.3.1 vorgestellten LCC-Tool erfolgen. Gemäß Projektbericht [32] wurden zu diesem Zweck auch „praktische Anwendungshilfen“ erarbeitet, mit denen „fundierte Abschätzungen“ möglich sein sollen. Das Kapitel, auf das die Verfasser des Berichtes diesbezüglich verweisen, existiert jedoch zumindest in der veröffentlichten Version nicht.

Für andere Eisenbahninfrastrukturunternehmen, die vor dieser Systementscheidung stehen, führt dies zur Notwendigkeit, selbst eine umfassende vergleichende Analyse der Lebenszykluskosten zu erstellen oder selbige extern in Auftrag zu geben.

5.5 Projekt Fazit

In seinen Betrachtungen berücksichtigte das DB-Projektteam technische Kriterien und die abgezinsten Lebenszykluskosten, die aus den Kosten für Errichtung, Instandhaltung und Betriebserschwer nisse aufsummiert wurden. Beim Vergleich mit klassischen Definitionen von Lebenszykluskosten bzw. Life Cycle Costing (vgl. Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit sowie [12, 13]) fällt auf, dass Kosten für Rückbau und Recycling bzw. Entsorgung im Rahmen der Projekte von DB und SBB keine Berücksichtigung fanden. Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 5.6.13 dieser Diplomarbeit eingegangen.

Die im Projekt der DB getroffenen wirtschaftlichen Annahmen haben sich nur bedingt bewahrt, der Einfluss der diesbezüglichen Fehler auf die grundsätzlichen Aussagen des Projektes ist jedoch als gering einzuschätzen. Eine genauere Untersuchung der Entwicklung von Material-, Instandhaltungs- und Entsorgungskosten könnte bedingt durch die unterschiedlichen benötigten Rohstoffe sowie verschiedenen Herstellungsverfahren einen wirtschaftlichen Vor- bzw. Nachteil für gewisse Oberbausysteme ergeben. Auf Grund ihrer Komplexität sowie mangelnder Eingangsdaten konnten diesbezügliche Analysen im Zuge dieser Diplomarbeit jedoch nicht durchgeführt werden.

Im Rahmen einer monetären Betrachtung, die rein auf den Oberbau beschränkt ist, kann die Kompensation der Investitionskosten für eine Feste Fahrbahn nur auf sehr hoch belasteten Strecken und mit sehr hochwertigen Zugklassen gelingen, da der monetär bewertete Instandhaltungs- und Verfügbarkeitsvorteil von Festen Fahrbahnen gegenüber dem Schotteroberbau gering ausfällt [79]. Dies unterstreicht das klassische Einsatzgebiet der Festen Fahrbahn auf Haupt- und Hochgeschwindigkeitsstrecken und spricht gegen den Einbau auf typischen Nebenbahnstrecken.

Die Projektgruppe der DB stellte jedoch auch fest, dass das eigentliche Potenzial der Festen Fahrbahn erst bei Betrachtung der gesamten Fahrbahn einschließlich der erforderlichen Ingenieurbauwerke sichtbar wird: Die höhere Gleislagestabilität erlaubt ein engeres Anschmiegen der Trasse an das Gelände. Bei entsprechender Ausnutzung dieser Eigenschaft ist beispielsweise in der Topographie der Mittelgebirge eine Verkürzung oder zahlenmäßige Reduktion der Kunstbauten möglich [79]. Dieser Vorteil kommt jedoch nur bei Neutrassierungen oder weitreichenden Linien-

verbesserungen zum Zug und ist daher für reine Gleiserneuerungen, die bei Schmalspurbahnen wohl den Regelfall darstellen, nicht relevant.

Zum Projekt der SBB wurden weitaus weniger detaillierte Informationen veröffentlicht. Bezüglich der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Fahrbahnsysteme kam das schweizerische Team zu dem Ergebnis, dass der Schotteroberbau, der als „flexibel“, „gutmütig“ und „risikoarm“ beschrieben wird, der Festen Fahrbahn auf freier Strecke in den meisten Fällen überlegen ist [29]. Zum schlechten Image der Festen Fahrbahn außerhalb von Tunneln tragen vor allem die für deren Errichtung erforderlichen langen Streckensperren bei [29]. Laut Steinegger et al. [29] kommt *„die Feste Fahrbahn [...] deshalb nur dort in Frage, wo Streckensperren mit betrieblichen Anforderungen und politischen Aspekten vereinbar sind“*. In der Schweiz dominieren bei der Trassierung von Eisenbahnstrecken zudem oft politische und raumplanerische Aspekte, sodass Strecken auf Grund von Anrainerwünschen in Tunneln verlaufen sollen, obwohl dies aus Trassierungsgründen nicht erforderlich wäre [29].

Das Projektteam der DB warnt des Weiteren davor, zu viele verschiedene Systeme der Festen Fahrbahn in das Netz eines einzelnen Eisenbahninfrastrukturunternehmens einzubauen, da dies Herstellung und Instandhaltung stark verkompliziert. Als Lösung wird die Verwendung von lediglich ein bis zwei standardisierten Bauarten im gesamten Netz der DB empfohlen [32]. Auch die SBB sieht es aus demselben Grund als *„von großem Vorteil, sich auf ein einziges System zu beschränken“* [29]. Bedingt durch die lange Lebensdauer von Schieneninfrastruktur bleibt den Eisenbahninfrastrukturunternehmen jedes eingebaute System über Jahrzehnte erhalten und muss während dieser Zeitspanne auch instandgehalten werden.

Die Übertragung dieser Überlegungen auf Schmalspur-Strecken ist schwierig, da hier auch über Staatsgrenzen hinweg in den meisten Fällen nicht genug Streckenkilometer mit gleicher Spurweite und ähnlichen Rahmenbedingungen vorhanden sind, um einen mit der Normalspur vergleichbaren Standardisierungsgrad zu erreichen. Da die Eisenbahninfrastrukturunternehmen in diesem Bereich jedoch wesentlich kompaktere Unternehmen sind, die deutlich kleinere Schienennetze verwalten, kann davon ausgegangen werden, dass der potenzielle Einbau einer Feste Fahrbahn unabhängig vom Einbauort von derselben Abteilung oder Projektgruppe begleitet wird, wodurch Kontinuität und Wissensweitergabe vereinfacht werden. Bei größeren Eisenbahninfrastrukturunternehmen ist die Gefahr, dass etwa jede Region andere Systeme und Ziele verfolgt, wesentlich ausgeprägter. Trotzdem können auch Schmalspurbahnbetreiber davon profitieren, mit anderen Eisenbahninfrastrukturunternehmen zu kooperieren, die vor ähnlichen Herausforderungen stehen und so mögliche Synergien nutzen. Dies gilt selbstverständlich allgemein und ist nicht auf das Thema Fahrweg beschränkt.

5.6 Noch nicht berücksichtigte Aspekte

In diesem Kapitel werden Themen und Potenziale bezüglich der Entscheidung zwischen Schotteroberbau und Fester Fahrbahn diskutiert, die vom Projektteam der DB bewusst ausgeklammert oder schlicht nicht in Betracht gezogen wurden, aber für Schmalspurbahnen von Relevanz sind.

5.6.1 Tunnel

In längeren Tunneln ist die Feste Fahrbahn in Europa aus wirtschaftlichen Gründen zum Standardoberbau geworden. Als Grenze, ab der eine Feste Fahrbahn jedenfalls sinnvoll ist, wird verbreitet eine Tunnellänge von 500 m genannt (Deutschland: [32], [31]; ÖBB: [5]). Bei der Rhätischen Bahn liegen inzwischen Erkenntnisse vor, die den Einbau von Fester Fahrbahn bei meterspurigen Tunneln bereits ab 300 m Länge wirtschaftlich erscheinen lassen (vgl. Abschnitt 6.1.1).

Für die Errichtung von Festen Fahrbahnen in Tunneln sprechen unter anderem die folgenden Gründe, die auch für Schmalspurbahnen anwendbar sind:

- Die Sohlplatte oder Sohlauffüllung (bei Tunneln mit Sohlgewölbe) erfüllt die von der Festen Fahrbahn an die oberste Tragschicht gestellten Anforderungen. Die daraus resultierende Option, die hydraulisch gebundene Tragschicht einzusparen und die beim klassischen Aufbau darüberliegenden Schichten direkt auf die Tunnelsohle aufzubringen, sowie der Entfall der Mittenentwässerung bei zweigleisigen Strecken(-abschnitten) ermöglichen im Tunnel die Ausführung von vereinfachten und damit günstigeren Bauweisen der Festen Fahrbahn [32].
- Durch die aus der größeren Homogenität der Auflagerbedingungen resultierende niedrigere erforderliche Aufbauhöhe reduziert sich der Aufwand für Material und Logistik.
- Die bezüglich Temperaturschwankungen und Witterung günstigeren Verhältnisse im Tunnel erlauben bei einigen Bauarten der Festen Fahrbahn eine Reduktion der Bewehrung in der Betontragplatte gegenüber der für die freie Strecke erforderlichen Menge. In einigen Fällen kann die Bewehrung sogar ganz entfallen. Dies verringert Materialkosten und Einbauaufwand [32].
- Die Instandhaltung von Schotteroberbau in Tunneln ist durch die beschränkten Platzverhältnisse, die Abwesenheit von Tageslicht, die eingeschränkte Belüftung und die damit einher gehenden Arbeitsschutzvorschriften weitaus aufwändiger als auf der freien Strecke. Im Vergleich der LCC steigt der Anteil der Instandhaltungskosten beim Schotteroberbau in Tunneln stark an, womit größere Anfangsinvestitionen für eine Feste Fahrbahn wirtschaftlich werden [32].
- Für die freie Strecke entwickelte mechanisierte Bauverfahren sind in Tunneln oft nicht oder nur eingeschränkt anwendbar. Bei normalspurigen Bahnen, für die umfangreiche Maschinenparks von Schotterbettreinigungsmaschinen über Untergrundsanierungsmaschinen bis zu Umbauzügen bestehen, kann deren nicht möglicher Einsatz in Tunneln eklatant höhere Kosten bedeuten. Für Schmalspurbahnen sind derart komplexe und hochautomatisierte Maschinen wenig verbreitet und der Gleisbau muss auch auf der freien Strecke zum Teil manuell bewerkstelligt werden. Enge Tunnelquerschnitte können jedoch auch für Arbeiten mit Zweiwegbaggern und ähnlichen Geräten Erschwernisse darstellen, sodass ein möglichst wartungsarmer Oberbau in diesen Bereichen sehr attraktiv ist.
- Die im Vergleich zum Schotteroberbau relativ ebene Oberfläche von Festen Fahrbahnen nimmt über ihre Erleichterung für Selbst- und Fremddrettung positiven Einfluss auf die Tunnelsicherheit. Je nach Bauart kann die Feste Fahrbahn ggf. auch befahrbar für luftbereifte Fahrzeuge ausgeführt werden [32].
- Bei Tunneln mit knappem oder eingeschränktem Lichtraumprofil kann der Einsatz einer Festen Fahrbahn
 - durch Verringerung des nötigen Ausbruchsvolumens die Kosten für die nachträgliche Herstellung des Regellichtraumprofils reduzieren,
 - für mehr Platz sorgen, indem die für den Schotteroberbau erforderlichen Hebungsreserven und seitlichen Toleranzbereiche eingespart werden, oder
 - die Aufhebung Geschwindigkeitseinschränkungen für Transporte mit gewissen Lade- maßüberschreitungen und somit eine bessere Streckennutzung ermöglichen [32].

Wenn die freie Strecke in Richtung Tunnelportal abfällt, ist bei Ausführung einer Festen Fahrbahn auf eine entsprechende Dimensionierung der Entwässerungsanlagen im portalnahen Tunnelbereich zu achten.

Länderspezifisch werden für den Einbau im Tunnel unterschiedliche Systeme bevorzugt, die sich in der Aufbauhöhe teilweise stark unterscheiden. Tabelle 5.6 enthält einen Überblick über den Höhenbedarf von verschiedenen gemäß Kapitel 4.4 für Schmalspurbahnen geeigneten Bauarten bei deren Anwendung in Tunneln. Wie schon der Höhenvergleich in Abbildung 4.43 sind auch die Werte in Tabelle 5.6 nur für eine erste Abschätzung geeignet, da Systeme für verschiedene Einsatzzwecke miteinander verglichen werden (ohne Fußnote = für hoch belastete Normalspur; ¹ = für Schmalspur).

Konzept	Bauart	Beschreibung in Abschnitt	Höhe ^a	Quelle
Schotteroberbau				
–	Pinzgauer Lokalbahn ¹	–	74,4 cm ^b	Abb. 4.43
Feste Fahrbahn				
Kompakt	RHEDA 2000	4.3.1.1	47,2 cm ^c	[4, 32], Abb. 4.43
Aufgelagert	GETRAC A3	4.3.3.5	57,4 cm	[32]
Fertigteilplatten	BÖGL	4.3.5.2	47,4 cm ^c	Abb. 4.43
	RhB ¹	4.3.5.6	61,7 cm ^d	Abb. 4.43
	ÖBB-PORR ²	4.3.5.3	43,3 cm ^c	Abb. 4.43
Elastische Schwellenlagerung	LVT ¹	4.3.2.2	62,7 cm	Abb. 4.43

^a von der Schienenoberkante des Profils 60E1 bis zur Oberkante der Tunnelsohle

^b ohne 40 cm ungebundene Tragschicht

^c ohne 30 cm hydraulisch gebundene Tragschicht bzw. Lastverteilplatte

^d Doppelfunktion als Sohlsprenger

¹ für Schmalspur (760 bzw. 1000 mm)

² mit unbewehrtem Füllbeton

Tab. 5.6: Aufbauhöhen verschiedener FF-Bauarten im Tunnel bei Direktauflagerung auf profilgerecht hergestellter Tunnelsohle bzw. Sohlauffüllung

Für Erläuterungen zu regionalen Unterschieden wird auch auf Kapitel 4.5 verwiesen. Eine Eignungs- bzw. Kostenbewertung verschiedener Oberbauarten bezüglich der in diesem Abschnitt beschriebenen Aspekte ist nur projektspezifisch möglich.

5.6.2 Brücken

Aufgrund ihres geringen Anteils an der Streckenlänge sind Brücken für die Systementscheidung nicht maßgeblich. Die Wahl eines passenden Oberbaus hängt stark von der jeweiligen Brückenkonstruktion ab und kann daher nur in Abstimmung mit den im jeweiligen Eisenbahninfrastrukturunternehmen für Brücken zuständigen Stellen getroffen werden. Aus diesem Grund beschäftigte sich auch das Projektteam um Holger Koriath nicht weiter mit ihnen [32].

5.6.3 Baukostenzuschüsse

Bei der Überführung der DB in eine Aktiengesellschaft im Jahr 1994 wurde die Vereinbarung getroffen, dass die Baukosten für Neu- und Ausbaustrecken in Zukunft vom deutschen Staat getragen würden, während die DB selbst für die erforderliche Instandhaltung aufzukommen hätte [31, 99]. Dies führte zu einem Boom der Festen Fahrbahn und letztendlich zur Einschaltung des Bundesrechnungshofs sowie des Rechnungsprüfungsausschusses des Bundestages, da der Bund die Mehrkosten für die Errichtung der Festen Fahrbahnen nicht übernehmen wollte. Kurzum – die deutsche Politik beschäftigte sich eingehend mit dem Thema Feste Fahrbahn [31].

Bei einer betragsmäßig geringen Barwertdifferenz ist aus wirtschaftlicher Sicht jedoch nach wie vor zu empfehlen, allfällige Unterschiede bei diversen Förderungen in die auf die Analyse der Lebenszykluskosten folgende Managemententscheidung einfließen zu lassen [32].

5.6.4 Bauzeitunterschiede

Bezüglich der Bauzeitunterschiede ist kein allgemeiner Trend für oder gegen eine Oberbauart festzustellen. Allfällige Nachteile der Festen Fahrbahn durch einzuhaltende Aushärtezeiten von hydraulisch gebundenen Tragschichten oder aus Ortbeton hergestellten Teilen können in der Regel durch die Möglichkeit zur Inselbauweise ausgeglichen werden: Gleisabschnitte, die sich zwischen Brücken oder Tunneln befinden, können im Schotteroberbau erst dann hergestellt werden, wenn die Ingenieurbauwerke von einer Seite kommend bis zum jeweiligen Gleisabschnitt fertig sind. Bei der Festen Fahrbahn kann die Errichtung auch schon erfolgen, wenn sich die Ingenieurbauwerke, die den Gleisabschnitt begrenzen, noch in Bau befinden [32].

Um das Problem der ausgedehnten Sperrdauern zur Einhaltung von erforderlichen Aushärtezeiten zu vermeiden, entwickelte die Rhätische Bahn eine für ihre Zwecke angepasste Spezialbauweise der Festen Fahrbahn, die ohne Abwarten von Abbindeprozessen befahrbar ist. Diese wurde in Abschnitt 4.3.5.6 vorgestellt.

Bei der Betrachtung von konkreten Baumaßnahmen vor allem in den Bauszenarien Gleisneulage und Ausbau sollten die Bauzeiten über die Betriebserscherniskosten in der Analyse der Lebenszykluskosten erfasst werden, um die ggf. unterschiedliche Nutzungseinschränkung der betroffenen Bestandsstrecke abbilden zu können [32]. Überlegungen zu den diesbezüglichen Unterschieden zwischen verschiedenen Spurweiten wurden bereits am Ende von Abschnitt 5.3.1.2 angestellt.

5.6.5 Trassierung

Trotz seiner im Allgemeinen eher kritischen Einstellung der Festen Fahrbahn gegenüber gesteht das schweizerische Projektteam dieser Oberbauform in solchen Fällen Potenzial zu, in denen zur Anpassung an ein übergeordnetes Fahrplankonzept eine Fahrzeitverkürzung um einige Minuten erforderlich ist. Derartige Umbauten ermöglichen eine flexiblere Fahrplangestaltung und können in verspätungsanfälligen Netzabschnitten wie z. B. beim Zulauf zu großen Knotenpunkten für Erleichterung sorgen [29].

5.6.5.1 Allgemeines

In den meisten Fällen handelt es sich bei Schmalspurbahnen jedoch um Stichstrecken, die nur einen geringen Beitrag zur Netzwirkung haben. Mögliche Vorteile von Fahrzeitverkürzung bei derartigen Bahnen sind die bereits in Kapitel 5.3.3 diskutierten Umlaufoptimierungen sowie ggf. Taktverdichtungen ohne Errichtung von zusätzlichen Kreuzungsstellen, was vor allem bei ungünstigen Topographien eine Lösung darstellt.

Zusätzlich zu den bereits diskutierten Trassierungsvorteilen ermöglicht die Feste Fahrbahn gem. Einschätzung der DB-Projektgruppe die Ausführung von optimierten Übergangsbogenformen, die „aufgrund der komplexeren Rahmenbedingungen beim SchO in der Praxis kaum umgesetzt werden“ können [32, S. 85].

Vor allem bei der Attraktivierung bestehender Strecken ist die Anwendung von dynamisch optimierten Übergangsbögen sinnvoll, da diese mit geringen Lageveränderungen des Gleises je nach gewählter Form erhebliche Verlängerungen von Übergangsbögen und Überhöhungsrampen ermöglichen [32] oder die im Fahrzeugschwerpunkt wirksame Seitenbeschleunigung deutlich verringern können [93]. In der Schweiz erfolgt die Konstruktion von Übergangsbögen im Gegensatz zu Deutschland und Österreich grundsätzlich nicht durch Verdrehung um die bogeninnere Schiene, sondern durch Verdrehung um die Gleisachse. Diese Vorgehensweise bringt Vorteile in Trassierung und Fahrkomfort, eine weitere Optimierung wäre nur durch die Anwendung von Schwerpunktstrassierung möglich [8, 29].

Auf jenen Strecken, auf denen derartige Maßnahmen noch nicht umgesetzt wurden, wären Fahrzeitverkürzungen durch Trassierungsoptimierung unter Umständen also auch ohne Wechsel des Oberbausystems durch einfache Anpassung der Übergangsbogenformen erreichbar.

5.6.5.2 Schwerpunktstrassierung

Die Wankbewegung von Schienenfahrzeugen

In Streckenabschnitten mit variabler Überhöhung (Übergangsbögen mit Überhöhungsrampen) führen Schienenfahrzeuge eine Wankbewegung aus. Diese nimmt Einfluss auf die Seitenbeschleunigung, die auf das Fahrzeug wirkt. Der Beitrag der Wankbewegung zur unausgeglichene Seitenbeschleunigung hängt von der zweiten Ableitung der Überhöhungsfunktion, also der Änderungsrate ihrer Krümmung, ab. Bei der herkömmlichen Trassierung mit klothoidenförmigem Übergangsbogen und gerader Überhöhungsrampe wird die Wankbewegung vernachlässigt bzw. tritt unter der Annahme, dass sich der Fahrzeugschwerpunkt in der Gleisachse und somit der Drehachse befindet, gar nicht auf [100, 101].

Der Wiener Bogen

Beim „Wiener Bogen“ handelt es sich um eine von Herbert Hasslinger entwickelte optimierte Übergangsbogenform, bei der die sogenannte Schwerpunktstrassierung zur Anwendung kommt [93]: Hierbei wird die tatsächliche Lage des Fahrzeugschwerpunkts (ca. 1,50 bis 1,80 m über der Schienenoberkante) berücksichtigt [101, 102]. Somit geht die beschriebene Wankbewegung in die Berechnungen ein und die ermittelte Bogenform beugt der Wankbewegung und dem aus ihr entstehenden seitlichen Ruck vor [101]. Der Einsatz von derart optimierten Übergangsbögen führt somit zu einer geringeren Belastung von Oberbau und Fahrzeug [103].

Auswirkungen auf die Gleislagequalität

Die Effekte aus der Wankbewegung wirken sich nennenswert auf die Lagequalität und den Schienenverschleiß und somit auch den Instandhaltungsaufwand von Schottergleisen aus [103], weswegen etwa im *ÖBB Regelwerk 01.03: Entwerfen von Bahnanlagen – Linienführung von Gleisen* [101] festgeschrieben ist, dass Übergangsbögen abgesehen von Ausnahmefällen grundsätzlich „als Wiener Bogen mit geschwungener Überhöhungsrampe“ auszuführen sind. Die in diesem Abschnitt eingangs zitierte Einschätzung der DB, dass derartig optimierte Übergangsbogenformen nur mit Fester Fahrbahn zu realisieren seien, muss folglich als falsch bzw. veraltet zurückgewiesen werden: In Österreich wird der Wiener Bogen auf Schotteroberbau sowohl im Netz der ÖBB [93] als auch bei einigen Wiener U-Bahn-Linien [102] umfangreich eingesetzt. Der Umbau auf den Wiener Bogen ist im Rahmen der Durcharbeitung mit einer geeigneten Stopfmaschine im Zuge der planmäßigen Instandhaltung möglich, wodurch Zeitaufwand und

Kosten des Umbauvorgangs minimiert werden [93, 103]. Hierzer und Ossberger [102] berichten, dass sich der Einsatz dieser Übergangsbogenform bei der Wiener U-Bahn durch Vorteile bei Instandhaltung und Fahrplanerstellung in allen untersuchten Fällen finanziell schon nach kurzer Zeit rechnet - dies gilt sowohl für Neubauabschnitte als auch für den Umbau von Bestandsstrecken mit Schottergleis.

Auswirkungen auf Fahrkomfort und Maximalgeschwindigkeit

Der Einsatz von optimierten Übergangsbögen reduziert auch die Belastung der Fahrzeuge bzw. den in diesen Bereichen spürbaren Ruck für die Fahrgäste. Die aus dem Knick in der Überhöhungsrampe sowie dem Sprung in der Änderung des Krümmungsverlaufs an Anfang und Ende der Klothoide bzw. der geraden Überhöhungsrampe resultierende Einwirkung auf das Fahrzeug kann bei engen Radien entscheidend für die Maximalgeschwindigkeit zur Einhaltung des maßgeblichen Komfortkriteriums sein. Beim Wunsch nach einer Geschwindigkeitserhöhung in solchen Abschnitten kann die Anordnung eines Wiener Bogens daher unabhängig von der Oberbauart sinnvoll sein.

Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken, den klassischen Einsatzbereichen der Fester Fahrbahn bei Vollbahnen, gelangen große Radien mit großzügig dimensionierten Übergangsbögen zur Ausführung. Auf Grund des ausreichenden Platzangebots können hier problemlos Klothoiden trassiert werden, bedingt durch deren ausgedehnte Längen die zugehörigen Überhöhungsrampen tendenziell flach ausfallen. Unter diesen Umständen sind meist nicht die vom oben beschriebenen Knick in Überhöhungsrampe und Krümmungsverlauf hervorgerufenen Einwirkungen, sondern die Seitenbeschleunigung während der Bogenfahrt das geschwindigkeitsbegrenzende Kriterium [104]. Aus diesem Grund ist eine Anordnung von optimierten Übergangsbogenformen auf Strecken mit größeren Radien auch aus fahrdynamischen Gründen nicht sinnvoll.

Konsequenzen für die Feste Fahrbahn

Aufgrund ihrer Steifigkeit verfügen Feste Fahrbahnen über einen Widerstand gegen Gleislageverschiebungen, der so hoch ist, dass der Ruck aus der Wankbewegung keine Gefahr für die Gleislagequalität darstellt. Die Anwendung des Wiener Bogens führt zu längeren Rampenbereichen [105] und somit zu höheren Herstellungskosten, da die Errichtung von Übergangsbögen bei den meisten Bauarten von Fester Fahrbahn teurer ist als von solchen für gerade Streckenabschnitte.

Wie in Kapitel 5.7 beschrieben wird, kommt die Feste Fahrbahn bei den ÖBB überwiegend auf den für höhere Geschwindigkeiten ausgelegten Hochleistungsstrecken mit dementsprechend großen Mindestradien zum Einsatz. Demnach kann der Wiener Bogen in diesen Bereichen auch seine Stärken bezüglich Fahrkomfort und Erhöhung der Maximalgeschwindigkeit nicht ausspielen.

Aus diesen Gründen legt das *ÖBB Regelwerk 07.05.01: Oberbau – Feste Fahrbahn* [106] zur Vermeidung von hohen Errichtungskosten, die keine Vorteile mit sich bringen, fest, dass in Bereichen mit Fester Fahrbahn kein Wiener Bogen anzuwenden ist.

Kritik

Die Sinnhaftigkeit des Wiener Bogens und anderer Formen der Schwerpunktstrassierung wird von einigen Autoren durchaus in Frage gestellt: Nottbeck [8] hinterfragt etwa den Nutzen der Anwendung auf Strecken, auf denen kein (nahezu) artreiner Verkehr vorliegt, da für die Berechnungen eine bestimmte Höhe des Fahrzeugschwerpunktes über der Gleisebene angenommen werden muss und sich verschiedene Schienenfahrzeuge diesbezüglich deutlich unterscheiden. Weigend [105] stellt im Rahmen seiner Untersuchungen fest, dass die Unterschiede zwischen „bewährten“ Formen von geschwungenen Überhöhungsrampen mit dazugehörigem Übergangsbogen (z. B. die in Deutschland gebräuchliche Variante nach Bloss) und den neuen Formen aus der Schwerpunktstrassierung sich in der Größenordnung der Herstellungstoleranzen für Schotteroberbau befinden und die Schwerpunktstrassierung daher für die Praxis schlicht nicht relevant ist. Auch nach Pospischil [9]

eignet sich für Anhebung der Geschwindigkeit auf Ausbaustrecken vor allem der Übergangsbogen nach Bloss, mit dem gemäß Weigend [105] unter Beibehaltung des Abrückmaßes im Vergleich mit einer Klothoide mit gerader Überhöhungsrampe die 1,72-fache Überhöhung erreicht werden kann. Bei gleichem Abrückmaß ist eine Konstruktion nach Bloss kürzer und ein Wiener Bogen länger als die herkömmliche Klothoide, wodurch bei Anwendung von Bloss Eingriffe in benachbarte Zwangspunkte (z. B. Brücken, Bahnübergänge bzw. Eisenbahnkreuzungen, Weichen) eher vermieden werden können als mit dem Wiener Bogen [105].

5.6.6 Schienenverschleiß

Der zeitliche und finanzielle Aufwand für die Instandhaltung der Schienen kann vom vorliegenden Oberbautyp maßgeblich beeinflusst werden. Die Untersuchungen von Mach [5] für seine Dissertation erstrecken sich auch auf das diesbezügliche Verschleißverhalten. Die von ihm betrachteten Strecken mit 1435 mm Spurweite wurden zu diesem Zweck anhand der Oberbauart sowie der vorliegenden Radien in Kategorien unterteilt:

- **Radien über 3000 m:** Der Verschleiß und die Rollkontaktermüdungserscheinungen auf Abschnitten mit Schotteroberbau und Fester Fahrbahn sind bei derart großen Radien vergleichbar. Bei Fester Fahrbahn ist tendenziell eine geringere Schleifhäufigkeit erforderlich [5].
- **Radien zwischen 3000 und 300 m:** Auch in diesem Radienbereich ist der Erhaltungsaufwand bei den beiden Oberbautypen vergleichbar. Die Verwendung von hochelastischen Schienenstützpunkten bei der Festen Fahrbahn führt jedoch bei Überfahrt zu einer größeren lateralen Auslenkung des Schienenkopfes. Die damit einher gehende konzentrierte Kraftereinleitung beschleunigt vor allem bei Radien zwischen 1200 und 600 m das Wachstum von Head Checks [5].
- **Radien unter 300 m:** Laut Mach [5] ist bei Radien dieser Größe die „Tendenz eines erhöhten Erhaltungsaufwandes bei der Festen Fahrbahn erkennbar“.

Durch die hauptsächliche Anwendung von Fester Fahrbahn auf hochrangigen Strecken sind Radien unter 300 m sehr selten und damit von geringer Relevanz. Den beschriebenen Verschleißerscheinungen im mittleren Radienbereich kann durch den Einbau von kopfgehärteten Schienen begegnet werden, Mach [5] empfiehlt deren Einsatz bei Radien bis 2000 m. Im Rahmen einer Gleisneulageschleifung besteht darüber hinaus die Möglichkeit, ein speziell für diese Zwecke entwickeltes „*Anti-Headcheck-Profil*“ aufzuschleifen. Die genannten Maßnahmen verursachen zunächst zwar höhere Kosten, werden jedoch trotzdem als im Endeffekt wirtschaftlich zweckmäßig beschrieben [5].

Von einer direkten Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse auf andere Spurweiten kann nicht ausgegangen werden, für Schmalspurbahnen wären eigene diesbezügliche Untersuchungen anzustellen. Da kleine Bogenhalbmesser zu den typischen Charakteristika von Schmalspurbahnen zählen und bei Fester Fahrbahn ein steigender Erhaltungsaufwand bei sinkenden Bogenradien beobachtet werden konnte, wäre eine weitere Untersuchung dieses Phänomens bei geringeren Spurweiten zielführend.

5.6.7 Setzungen

Für den Einbau einer Festen Fahrbahn wird unabhängig von der Bauart ein setzungsarmer Untergrund bzw. Unterbau benötigt. Je nach lokalen Bedingungen und verfügbaren Schüttmaterialien kann dies zu hohen Aufwendungen für Erdbauwerke sowie zu langen erforderlichen

Liegezeiten zwischen Dammschüttung und Einbau der Festen Fahrbahn führen [32]. Setzungen in geringem Ausmaß sind unter Umständen unvermeidbar bzw. aus wirtschaftlichen Gründen in Kauf zu nehmen. Empirischen Erkenntnissen der ÖBB zu Folge kann auf Erdbauwerken bei homogenen Untergrundverhältnissen mit einem Abklingen der Setzungen nach spätestens zwei Jahren Betriebsbelastung gerechnet werden [5].

Diesbezügliche Annahmen für die Lebenszykluskostenberechnung der einzelnen Bauarten werden in Abschnitt 5.3.1.5 erläutert. Systemabhängige Sanierungsverfahren im Fall des Auftretens von Setzungen werden im folgenden Abschnitt 5.6.8 beschrieben.

5.6.8 Reparatur und Havarie

Für Feste Fahrbahnen sind durch die Entwickler bzw. Anbieter formulierte Reparaturkonzepte [106] (auch als Havarie- [32] oder Sanierungskonzepte [5] bezeichnet) vorzulegen. In diesen ist definiert, bei welchen Schäden an der Konstruktion welche Reparatur- bzw. Erneuerungsmaßnahmen zu treffen sind, um die Funktionstüchtigkeit der Fahrbahn vollständig wiederherzustellen. Sowohl in Deutschland als auch in Österreich wird gemäß der soeben zitierten Quellen in dieselben drei verschiedenen Schadensszenarien unterschieden, die im Reparaturkonzept zu behandeln sind:

1. Zerstörung im oberen Bereich

Dieser Fall repräsentiert die Entgleisung eines schweren Güterzuges und die daraus resultierenden Schäden. Auf einer Länge von 500 m ist die Oberfläche der FF zerstört, teilweise sind auch die Schienenbefestigungen zu ersetzen.

2. Komplette Zerstörung bzw. Systemversagen

Auch das zweite Szenario beruht auf der Entgleisung eines schweren Güterzuges. In diesem Fall sind die Schäden auf nur 100 m begrenzt, die Zerstörungen sind jedoch tiefgehend und machen einen kompletten Austausch des betroffenen Bereiches erforderlich.

3. In der Schienenbefestigung nicht korrigierbare Einsenkung und Lageveränderung

Bei Auftreten von Setzungen des Untergrundes auf einer Länge von 100 m, die die Korrekturmöglichkeiten der Schienenbefestigungsmittel übersteigen, ist eine Wiederherstellung der ursprünglichen Lage der Schienen ohne Qualitätseinbußen erforderlich.

Im Folgenden werden einige charakteristische Eigenschaften der vier gem. Kapitel 5.1 unterschiedenen FF-Bauarten bezüglich Sanierungen genannt. Diesbezügliche herstellereigentliche Details enthält auch Kapitel 4.3.

Für Schäden infolge von Entgleisungen konnten von der Projektgruppe der DB die folgenden grundsätzlichen Aussagen aufgestellt werden [32]:

- Bei oberflächlichen Schäden ist bei kompakten Bauweisen (A) und Plattenbauweisen (B) meist ein Tausch der Befestigungsmittel (ggf. inkl. Schwellendübel) ausreichend. In manchen Fällen ist in den geschädigten Bereichen ersatzweise der Einbau von Einzelstützpunkten möglich, die im Füllbeton oder in der Fertigteilplatte verankert werden.
- Fertigteilplatten (B) verfügen über den Vorteil, dass zerstörte oder defekte Platten innerhalb von kurzen Gleissperren (wenige Stunden) getauscht werden können. Der Nachteil dieser Bauart ist jedoch, dass im Inneren oder auf der Unterseite der Fertigteilplatten Risse entstehen können, die von außen nicht detektierbar sind und Schwachstellen in der Konstruktion darstellen.

- Bei aufgelagerten Bauarten (C) ist wie beim Schotteroberbau bereits bei oberflächlichen Schäden der Tausch von zumindest einzelnen Schwellen erforderlich.
- Beim Auftreten von tiefgehenden Zerstörungen der Tragplatte sind Bauweisen mit Fertigteileplatten (B) sowie aufgelagerte Bauarten (C) klar im Vorteil, da eine vergleichsweise schnelle Reparatur möglich ist. Bei den kompakten Bauweisen (A) ist der bei derartigen Schäden entstehende Aufwand vergleichbar mit einer Neuherstellung. Vor allem die erforderliche Abbindezeit des neu einzubringenden Füllbetons führt in diesen Fällen zu längeren Sperrzeiten.

Auch bezüglich der Instandsetzungsmöglichkeiten beim Auftreten von Setzungen (vgl. oben beschriebenes Szenario 3) unterscheiden sich die Bauarten stark voneinander:

- Bei aufgelagerten Bauweisen (C) ist ein Anheben und Unterfüttern der Schwellen möglich.
- Bei Bauweisen mit Fertigteileplatten (B) kann die Untergussmasse gelöst und im Anschluss an die Höhenkorrektur ein Neuerguss durchgeführt werden.
- Kompakte Bauweisen (A) sind diesbezüglich am wenigsten flexibel - bei geeignetem Untergrund können ggf. Hochdruckinjektionen durchgeführt werden, andernfalls sind Abbruch und Neuherstellung der Konstruktion die einzige Lösungsmöglichkeit.

5.6.9 Körperschall und Erschütterungen

Bezüglich Körperschall und Erschütterungen wird die Feste Fahrbahn im Allgemeinen als gleichwertig oder sogar günstiger gegenüber dem Schotteroberbau eingeschätzt [32]. In besonders sensiblen Bereichen ist die Ausführung von Masse-Feder-Systemen möglich, je nach Hersteller werden diesbezüglich andere Konzepte angewendet. Auf Grund seines Umfangs und seiner Komplexität wird auf dieses Thema in der vorliegenden Diplomarbeit nicht näher eingegangen.

5.6.10 Luftschall

Die Luftschallabstrahlung ist bei der Festen Fahrbahn durch die ebenere Oberfläche höher als beim Schotteroberbau mit seinem diffuseren Reflexionsverhalten [32]. Eine Ausnahme hiervon bilden die in Kapitel 4.3.3 vorgestellten aufgelagerten Systeme mit Einschotterung, deren schalltechnische Eigenschaften denen des Schotteroberbaus entsprechen. Um in Tunneln, die mit Fester Fahrbahn ausgerüstet sind, die Lärmbelastung der Fahrgäste durch Reflexion der Schallwellen an Fahrbahn und Tunnelinnenschale zu reduzieren, verwenden etwa die ÖBB schallabsorbierende Platten, die auch für gummibereifte Fahrzeuge befahrbar ausgeführt werden können [5].

Die Verwendung von Schallabsorbern wie im genannten Fall ist zwar möglich, bringt aber abseits der Kosten auch andere Nachteile mit sich: Bei Planung und Einbau ist zu berücksichtigen, dass die Zugänglichkeit zu Schienenbefestigungen, Erdungen, Anlagen der Streckenausrüstung und weiteren Einbauten im Gleis zu Wartungs- und Instandhaltungszwecken immer gegeben sein muss. Die im Gleis befindlichen Schallabsorber können darüber hinaus Schläge auf Räder von entgleisten Radsätzen verursachen und damit zu Totalentgleisungen führen [32]. In der Vergangenheit traten auch Probleme mit der Lockerung von schallabsorbierenden Eindeckungen auf (vgl. Kapitel 4.6.2). Aus diesen Gründen ist es bei Erfordernis von Schallschutzmaßnahmen nach Ansicht der DB und der von ihr beigezogenen Experten ratsam, schallschutztechnische Einbauten im Gleisbereich zu vermeiden. Alternative Maßnahmen sind beispielsweise die Errichtung von höheren Lärmschutzwänden oder eine engmaschigere Überwachung des Schienenzustandes mit ggf. häufigerem Schleifen [32].

5.6.11 Amphibienquerung

Die Querung für Amphibien wird bei der Festen Fahrbahn durch seitliche Anschotterung ermöglicht, die die Abtreppungen der Tragschichten überdeckt. Wenn derartige Maßnahmen nicht erforderlich sind, bringt eine Einsparung der Anschotterung wirtschaftliche Vorteile [32]. Ein Beispiel für besonders amphibienfreundliche Oberbaugestaltung ist auch die in Abschnitt 6.2.3 vorgestellte Einschüttung mit Kies über die gesamte Breite der Festen Fahrbahn.

5.6.12 Vegetationskontrolle

Die Vegetationskontrolle ist bei Festen Fahrbahnen nur mehr im Bereich der Randwege erforderlich. Der hierfür zu veranschlagende Aufwand ist gegenüber Strecken mit Schotteroberbau daher stark reduziert [32].

5.6.13 Rückbau, Recycling und Entsorgung

Wie im Kapitel 5.5 bereits festgestellt, wurde das komplexe Thema Recycling und Entsorgung am Ende der Oberbau-Lebensdauer in den Projekten von DB und SBB ausgeklammert. Bei genauerer Betrachtung eröffnen die im Gleisbereich auftretenden Verunreinigungen aus dem Bahnbetrieb (Brems- und sonstiger Metallabrieb, Schmiermittel,...) sowie von den Eisenbahninfrastrukturunternehmen zur Vegetationskontrolle eingesetzte Herbizide hier in Kombination mit der stetig strenger werdenden europäischen Abfall- und Umweltschutzgesetzgebung jedoch ein weites Untersuchungsfeld. Für das Schotterrecycling bestehen in der Praxis erprobte und immer wieder weiterentwickelte Verfahren. Da der überwiegende Teil der „ersten Generation“ der Festen Fahrbahnen das Ende seiner Lebensdauer noch nicht erreicht hat, gibt es in diesem Bereich noch sehr wenig Erfahrungen.

Dieser Themenkomplex kann bedingt durch seinen Umfang im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht im Detail behandelt werden.

5.6.14 Vertragliche Aspekte

Wie bereits in Abschnitt 5.3.2 erläutert, erfolgte die Entwicklung des optimalen Schotteroberbaus empirisch auf Basis von Versuchen und Erfahrung [9]. Aus diesem Grund gibt es für diese Oberbauart keine Bemessung im engeren Sinn und auch keine diesbezügliche Haftungsübernahme durch den Hersteller. Nach der Abnahme durch das Eisenbahninfrastrukturunternehmen haftet die ausführende Firma nur mehr sehr beschränkt für die Qualität ihres „Bauwerks“.

Im Gegenzug dazu ist die Feste Fahrbahn ein Ingenieurbauwerk mit Bemessung und Haftungsübernahme, dessen Eigenschaften vom Eisenbahninfrastrukturunternehmen unter Umständen nur im Rahmen einer funktionalen Ausschreibung definiert werden. Dies führt in der Regel zur Anwendung von entsprechenden finanziellen Sicherheitszuschlägen durch die Hersteller sowie zu länger laufenden Haftungen im Anschluss an die Fertigstellung [32]. Dass die beauftragten Firmen bei Festen Fahrbahnen länger die Verantwortung für die ausgeführte Qualität tragen, kann in manchen Fällen von Vorteil sein, in anderen Fällen aber auch Flexibilität und Handlungsspielraum der Eisenbahninfrastrukturunternehmen einschränken.

5.7 Internationaler Vergleich

In den meisten Ländern ist der Haupteinsatzort der Festen Fahrbahnen das jeweilige Hochgeschwindigkeitsnetz, so etwa in Japan, Frankreich und Deutschland [4].

Auch wenn die gefahrenen Geschwindigkeiten in **Österreich** unter denen in den soeben genannten Ländern bleiben, wird auch hier die Feste Fahrbahn hauptsächlich auf den sogenannten Hochleistungsstrecken verwendet. Gemäß den Erfahrungen der ÖBB führt vor allem die Kombination von hohen Geschwindigkeiten und unelastischer Gründung (z. B. in Tunnelbereichen) bei Vorliegen eines klassischen Schotteroberbaus zu Schotterzertrümmerung [5]. Laut ihrer diesbezüglichen Richtlinie [106] sehen die ÖBB den Einbau von Festen Fahrbahnen daher auf allen Hochleistungsstrecken in Bereichen von Brücken, Tunneln und Wannern mit einer Gesamtlänge von mindestens 500 m vor. Eventuelle dazwischenliegende Bereiche, die „*keine wesentlich größeren Längen als ein Einzelabschnitt aufweisen*“, sind ebenfalls als Feste Fahrbahn auszuführen. Mit der Anweisung, dass „*die Anordnung von Festen Fahrbahnen [...] nach technischen und gesamtwirtschaftlichen Überlegungen unter Berücksichtigung ihrer Gesamtlebensdauer und Instandhaltung projektspezifisch festzulegen*“ ist, werden diese Bestimmungen jedoch aufgeweicht (wörtliche Zitate aus [106, S. 11]). Der Weg zu einer Entscheidung für oder gegen eine Feste Fahrbahn ist in Österreich demzufolge weniger systematisiert, es handelt sich von Projekt zu Projekt um Einzelfallentscheidungen, die dementsprechend durch Gutachten etc. vorzubereiten sind.

Im Jahr 2011 waren die ÖBB dem Bau von Festen Fahrbahnen auf Erdbauwerken gegenüber auch auf Grund mangelnder eigener Erfahrungswerte noch skeptisch eingestellt [5]. Seit 2010 wurden in Österreich jedoch viele Streckenkilometer Fester Fahrbahn auch auf freier Strecke errichtet (z. B. Güterzugumfahrung St. Pölten [107], Koralmbahn [108],...), mit denen in diesem Bereich Praxis gesammelt werden konnte.

Einen gänzlich anderen Weg beschreitet die **Schweiz** mit ihrer Philosophie zum Einsatz von Festen Fahrbahnen [29]: In dem kleinen Land mit einer maximalen Ausdehnung von knappen 350 km (in Ost-West-Richtung, vgl. [109]) ist der Bedarf nach Hochgeschwindigkeitszügen überschaubar, der Netzwirkung und dem Taktverkehr werden weit höhere Priorität zugemessen. Laut [29] galt im SBB-Netz im Jahr 2005 eine Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h mit der Aussicht, diese „*in naher Zukunft auf 200 bis 230 km/h*“ zu erhöhen. Im internationalen Vergleich mit Ländern wie Frankreich, Deutschland, Japan und China sind 230 km/h (wie sie auch in Österreich gefahren werden) noch keine echte „Hochgeschwindigkeit“, die den Einbau von Festen Fahrbahnen wegen zu hoher Beanspruchung für Schotteroberbau erforderlich macht.

Bedingt durch die Geographie mit ihren engen, oft dicht besiedelten Tälern fehlen in der Schweiz auch die verfügbaren Flächen, um wie die Nachbarländer großzügige neue Hochgeschwindigkeitsstrecken zu errichten. Zu große Geschwindigkeitsunterschiede zwischen einzelnen Zugkategorien auf derselben Strecke werden als Hindernis für eine effiziente Streckenauslastung gesehen, der Fokus liegt daher vielmehr auf der Erhöhung der Geschwindigkeit von langsamen Zügen. Da in der Schweiz im internationalen Vergleich unabhängig von der Oberbauart weniger strenge Grenzwerte für verschiedene Trassierungsparameter gelten, ist auch das Potenzial für Geschwindigkeitserhöhungen durch den Einsatz von Fester Fahrbahn wesentlich kleiner. Der Hauptfokus bei der Fester Fahrbahn in der Schweiz liegt somit auf der Verwendung als instandhaltungsarme Oberbauform für die zahlreichen Alpentunnel mit teils beträchtlicher Länge [38].

Kapitel 6

Gebaute Beispiele und dokumentierte Erfahrungen

Aus den bisherigen Kapiteln zeichnet sich ab, dass der Haupteinsatzbereich von Festen Fahrbahnen bei Schmalspurstrecken abseits von Spezialfällen in Tunneln zu finden ist. Daher werden in diesem Kapitel zunächst erfolgreich durchgeführte Tunnelsanierungen in Kombination mit dem Einbau von Fester Fahrbahn betrachtet. Im Anschluss wird als Beispiel für einen Spezialfall die Situation der Pinzgauer Lokalbahn (Salzburg, Österreich) erläutert, wo die Feste Fahrbahn zur Verbesserung der Überflutungssicherheit der hochwassergeplagten Strecke eingesetzt wird.

6.1 Tunnelsanierungen

Bei den meist seit über 100 Jahren in Betrieb befindlichen und oft nicht den aktuellen sicherheitstechnischen Anforderungen entsprechenden Tunneln von Schmalspurbahnen bietet sich eine Sanierung an, mit der möglichst viele der gängigen Probleme [86, 110–112] bei derartigen Anlagen adressiert werden sollen:

- Wassereintritte
- Schäden am Mauerwerk oder an später angebrachten Spritzbetonschalen
- Versinterung der Entwässerungsanlagen
- starke Verwitterung von unverkleideten Tunnelabschnitten
- unzureichende Sicherheitsräume
- verringertes Lichtraumprofil

In den folgenden Abschnitten werden Beispiele von Tunneln mit verschiedenen Spurweiten erläutert.

6.1.1 Profilaufweitung meterspuriger Tunnel in der Schweiz mit der „Normalbauweise Tunnel“

Das 384 km lange Streckennetz der Rhätischen Bahn (RhB) verfügt über insgesamt 58,7 km Tunnel, was einem Anteil an der Streckenlänge von 15 % entspricht. Die meisten dieser insgesamt 115 Tunnelbauwerke wurden zwischen 1901 und 1914 errichtet und nähern sich nach über 100 Jahren Betrieb dem Ende ihrer Lebensdauer [86].

Aufgrund des großen Umfangs der erforderlichen Arbeiten wurde spezifisch für die eingleisigen Meterspurtunnel der RhB die „Normalbauweise Tunnel“ entwickelt, wobei durch einen hohen Standardisierungsgrad Planung und Ausführung vereinfacht und die Gesamtkosten gesenkt werden sollten. Bei der Konzeption wurden darüber hinaus die folgenden Ziele angestrebt [86]:

- Verlängerung der Lebensdauer einer Tunnelsanierung von den heute üblichen 30 bis 50 Jahren auf 70 bis 100 Jahre unter anderem durch Behebung der Ursachen der aufgetretenen Mauerwerksschäden
- sicherheitstechnische Anpassung an aktuelle Vorschriften
- möglichst geringe betriebliche Einschränkungen während der Bauzeit

Die neue Bauweise sollte bei etwa 75 Tunneln mit einer Gesamtlänge von 25 km zum Einsatz kommen – das Ziel war eine jährliche Umbauleistung von 500 m.

Zur Herstellung der nach aktuellen Standards erforderlichen Sicherheitsräume wird der Tunnelquerschnitt dabei von 18 auf 24,5 Quadratmeter vergrößert. Zu diesem Zweck wird das Gleis um etwa einen halben Meter abgesenkt, das gesamte gemauerte Tunnelgewölbe abgebrochen und der Tunnel in alle Richtungen erweitert. Nach Abschluss der erforderlichen Ausbruchsarbeiten und dem Verlegen der Sickerleitungen werden aus jeweils 7 Betontübbingungen bestehende neue Gewölbesegmente mit 1,5 m Länge eingebaut [86]. Die Tübbingungen werden hierbei mit entsprechenden Dichtungsbändern verbunden und mit Perlkies hinterblasen [86, 113].

Um am Tag uneingeschränkter Betrieb auf der betroffenen Strecke zu gewährleisten, werden die Arbeiten in der Regel nur in der Nacht ausgeführt – tagsüber wird in diesen Fällen eine fahrbare Tunnel-im Tunnel-Stahlkonstruktion eingesetzt, um den Betriebsbereich vom darüber befindlichen Arbeitsbereich zu trennen und vor allfälligen Nachbrüchen zu schützen [86, 114].

Bei der Anwendung der „Normalbauweise Tunnel“ wird auch die Tunnelentwässerung erneuert. Zu diesem Zweck werden unterhalb der neuen Randwege zwei Kanäle errichtet, mit denen die Tunnelsohle und das Gewölbe entwässert werden. Die Randwege entsprechen durch ihre Ausrüstung mit LED-beleuchteten Handläufen den aktuellen Sicherheitsvorschriften [86].

Bei den ersten Einsätzen des Bauverfahrens wurde an der Tunnelsohle zwar ein Ringschluss mit Beton-Fertigteilplatten durchgeführt [86, 115], die Doppelnutzung der Platten als Sohlsprenger und Feste Fahrbahn wurde jedoch erst im Lauf der Zeit entwickelt:

- Im **Gletscherastunnel** (333,5 m [84], Fertigstellung 2017 [116]), in dem die „Normalbauweise Tunnel“ als erstes zum Einsatz kam, wurde zuerst die Tunnelsohle abgesenkt. Hierbei wurden die Betonplatten auf ein Splittbett ohne Zementanteil verlegt und bilden die Unterlage für einen gewöhnlichen Schotteroberbau.
- Der **Sasslatschtunnel** (232,1 m [84], Fertigstellung 2016 [117]) wurde als bisher einziger Tunnel während einer Totalsperre (20 Wochen) saniert. Aus diesem Grund wurde die Tunnelsohle nicht aus Fertigteilplatten, sondern aus Ortbeton hergestellt. Nach der Aushärtung wurde auf der Platte ein Schotteroberbau errichtet.
- Im **Mistailtunnel** (299,6 m [84], Fertigstellung 2020 [118]) dienen die eingebauten Fertigteilplatten als tieferliegende temporäre Feste Fahrbahn ohne Überhöhung für den Bauzustand. Nach Ende der Gewölbeausbruchsarbeiten wurde ebenfalls ein Schotteroberbau auf den Platten ausgeführt.
- Auch im **Bergünnersteintunnel** (409,3 m [84], Fertigstellung laut Schlussstein Tunnelportal 2021) erfolgte zuerst der Umbau der Tunnelsohle. Die hierbei eingesetzten Betonplatten verfügen über zwei verschiedene Typen von Stützpunkten. Für die Dauer der Ausbruchsarbeiten wurden die Schienen in einer temporären Position auf den hierfür vorgesehenen Stützpunkten befestigt. Zwischen Abschluss der Ausbruchsarbeiten mit Spritzbetonsicherung und dem Versetzen der Tübbingungen wurde die Endgleislage unter Verwendung der dafür in den Platten ausgesparten Vergussöffnungen hergestellt.

- Beim **Brailtunnel II** (308,6 m [84]), in dem die Ausbruchsarbeiten mit Juni 2023 begonnen wurden, kommt nun die aktuellste Weiterentwicklung des Systems zum Einsatz: Den ersten Schritt bildet die Profilaufweitung des Tunnels oberhalb der Schienenoberkante in Nachtsperren. Um den Tunnel hierbei mit luftbereiften Baufahrzeugen befahren zu könne, kann das ausführende Unternehmen den bestehenden Schotteroberbau entsprechend ausbohren bzw. einschütten. In einer 26 Tage dauernden Totalsperre werden im Anschluss die Bestandsgleise entfernt, die Ausbruchsarbeiten im mittleren Bereich der Sohle durchgeführt und die Feste Fahrbahn, wie sie in Kapitel 4.3.5.6 beschrieben ist, eingebaut. In weiteren Nachtsperren werden die seitlichen Sohlbereiche ausgebrochen, die Entwässerung hergestellt und die etwa 400 kg schweren Sockelsteine sowie die Tübbinge versetzt. Die Sockelsteine sind hierbei mit einer Genauigkeit von ± 3 mm zu positionieren. Der Einbau der Gleistragplatten ist bei diesem Projekt für April 2024 vorgesehen.

Die Ausführung einer Festen Fahrbahn bei den genannten Tunnelprojekten wurde durch die Aufhebung einer Vorgabe des eidgenössischen Bundesamts für Verkehr ermöglicht, das den Einbau von Festen Fahrbahnen erst ab einer Länge von 1000 m (in Ausnahmefällen 500 m) genehmigte. Diese Vorschrift basierte rein auf wirtschaftlichen Gründen und wurde durch die Weiterentwicklung und damit sinkenden Kosten von Übergangskonstruktionen zwischen Schotteroberbau und Fester Fahrbahn obsolet. Bei der Rhätischen Bahn AG wird inzwischen davon ausgegangen, dass die Untergrenze für den wirtschaftlichen Einsatz von Fester Fahrbahn zumindest in Tunneln bei etwa 300 m liegt. Bei den oben angeführten sowie für die Zukunft geplanten Projekten reduziert der Einsatz einer Festen Fahrbahn die erforderliche Sohlabsenkung und vereinfacht durch den Wegfall des Schotteroberbaus die Baustellenlogistik [115, 119].



Abb. 6.1: Portal des sanierten Berggütersteintunnels [eigene Aufnahme]

Für die Dauer der Umbauarbeiten wird das Oberleitungskettenwerk im Tunnel durch eine Deckenstromschiene ersetzt. Diese erlaubt eine einfache Demontage im Arbeitsbereich zu Schichtbeginn und eine schnelle Wiederherstellung vor Schichtende.

Da die Strecken der Rhätischen Bahn teilweise zum UNESCO-Weltkulturerbe gehören, sind am Ende der Sanierung die Portalbereiche möglichst originalgetreu wiederherzustellen. Zu diesem Zweck werden die neuen Tunnelportale, die gegenüber den alten Portalen etwas vergrößert sind, aber deren Verhältnis von Höhe zu Breite kopieren, überwiegend aus Steinen der alten Portale sowie der ehemaligen Tunnelausmauerung wieder aufgebaut [120]. Ein auf diese Art und Weise rekonstruiertes Portal zeigt Abbildung 6.1.

In den kommenden Jahren plant die Rhätische Bahn, dieses Verfahren auf sieben weitere Tunnel anzuwenden. Das längste hierfür vorgesehene Objekt ist der Solistunnel der Albulabahn mit 985,8 m [84].

6.1.2 Neubau des Bahntunnels und Umnutzung des Bestandstunnels als Rettungsstollen in der Schweiz

In diesem Kapitel werden zwei Projekte vorgestellt, bei denen sich die betreffenden Eisenbahninfrastrukturunternehmen aus betrieblichen Überlegungen sowie bedingt durch den schlechten Zustand der Bestandstunnel für Neubauten in Kombination mit einem Umbau des Bestandstunnels zu einem Flucht- bzw. Rettungsstollen entschieden.

6.1.2.1 Bözbergtunnel

Der ca. 2,5 km lange, normalspurige alte Bözbergtunnel war zweigleisig, wurde 1875 in Betrieb genommen und verfügte über ein sehr enges Tunnelprofil [112]. 1966 kam es dort zum ersten Einbau einer Festen Fahrbahn in der Schweiz [38]. Wegen Gebirgsdeformationen musste der Tunnel mehrmals saniert werden [112]. Im Rahmen der Errichtung des sogenannten 4-Meter-Korridors, der Verbesserungen bezüglich der zulässigen Lademaße im Güterverkehr bedeutete, wurde eine Aufweitung des Tunnels für ein größeres Lichtraumprofil erforderlich. Da eine Profilaufweitung des bestehenden Tunnels einen einspurigen Betrieb über eine Dauer von mindestens 6 Jahren sowie damit einher gehend erhebliche Trassenverluste bedeutet hätte, entschied sich die SBB für die Errichtung eines neuen parallelen Tunnels mit zwei Gleisen und die Umnutzung des Bestandstunnels als Rettungsstollen. Die beiden Röhren sind alle 400 bis 500 m durch Querstollen verbunden, der neue Tunnel wurde mit einer Festen Fahrbahn der Bauart LVT ausgerüstet und 2020 in Betrieb genommen [121].

6.1.2.2 Albulatunnel

Der 1903 eröffnete und 5,866 m lange Albulatunnel verfügt über ein hufeisenförmiges Profil und wird von einer 60 cm starken, unten offenen Steinausmauerung gestützt. Der mittlere Tunnelabschnitt verläuft über etwas mehr als 4 km durch stabilen Granit, im Anschluss an die Portalbereiche ist die geologische Situation mit Schiefer, Dolomit, Sedimenten und Moräne jedoch ungünstig und führte schon bei den Errichtungsarbeiten zu Einstürzen und Wassereinbrüchen [84].

Bei diesem Tunnel sprachen mehrere Gründe gegen eine Sanierung unter Anwendung der in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen „Normalbauweise Tunnel“:

- Die Sanierung des fast 6 km langen Tunnels unter Betrieb wäre ein mehrere Jahre dauerndes Projekt mit entsprechenden Auswirkungen auf den Bahnbetrieb der Strecke gewesen, die stark touristisch genutzt wird (Glacier-Express).

- Die Tunnelkonstruktion ist in einem schlechteren Zustand als die Bauwerke, bei denen die „Normalbauweise Tunnel“ bisher angewendet wurde. Dazu bleibt die mit einer Sanierung erreichbare Qualität unabhängig von der gewählten Methode immer hinter der eines Neubaus zurück.
- Die für die Genehmigungsverfahren zuständige Behörde, das Schweizer Bundesamt für Verkehr, schreibt bei umfassenden Sanierungen und Neubauten ab einer Tunnellänge von 3 km die Errichtung eines Flucht- und Rettungsstollens vor. Bei Weiternutzung des Bestandstunnels für den Bahnbetrieb wäre demnach die Errichtung eines Fluchttunnels notwendig geworden.

Als Konsequenz entschied sich die Rhätische Bahn für die Errichtung eines neuen Bahntunnels und den anschließenden Umbau des alten Stollens in einen Fluchtweg nach behördlichen Vorgaben. Der Durchschlag im neuen Albulatunnel erfolgte 2018, aktuell (Juni 2023) läuft der Einbau der Festen Fahrbahn. Zum ersten Mal auf dem Netz der Rhätischen Bahn kommt hierbei wie bei den großen Schweizer Alpentunneln der SBB die Bauart LVT zum Einsatz. Ihre Herstellung wird in Abschnitt 4.3.2.2 ausführlich beschrieben. Auf Grund der eingeschränkten Platzverhältnisse und des engen Zeitplans wird tagsüber in zwei Schichten betoniert, in der Nacht wird die logistische Versorgung der Baustelle abgewickelt.

Die Eröffnung des neuen Tunnels sowie der Beginn der Arbeiten am Bestandstunnel sind für 2024 geplant [122].

6.1.3 Tunnelsanierungen mit dem System ÖBB-PORR

Nach der erfolgreichen Sanierung des Tauerntunnels in den Jahren 2002 bis 2003 (insgesamt 9,8 km Feste Fahrbahn) sowie des Arlbergtunnels in den Jahren 2007 bis 2009 (insgesamt 20,8 km Feste Fahrbahn) durch die ÖBB unter Verwendung der Bauart ÖBB-PORR [5, 123] wurde das System auch in andere Länder exportiert. Die folgenden Abschnitte stellen diesbezügliche Projekte in der Tschechischen Republik sowie in Slowenien vor. Eine Umsetzung von Sanierungen mit der Bauart ÖBB-PORR ist nur bei zweigleisigen Tunneln unter Sperre eines Gleises dokumentiert. Eine Eignung für eingleisige Tunnel bzw. Bereiche mit schlechter Zugänglichkeit ist daher nicht mit Sicherheit gegeben und wäre bei Bedarf genauer zu untersuchen.

6.1.3.1 Střelenský Tunnel (CZ)

Der knapp 300 m lange zweigleisige tschechische Střelenský Tunnel ist Teil der normalspurigen elektrifizierten Bahnstrecke von Horní Lideč zur slowakischen Grenze und wurde 1935 eröffnet. Bedingt durch Probleme mit der Tunnelentwässerung sowie den schlechten Zustand des Oberbaus, der von Mikulášek [110] als „Mitleid erregend“ beschrieben wird, wurde ein umfangreiches Sanierungsprojekt durchgeführt. Im Zuge dessen wurde in den Jahren 2012 und 2013 das Entwässerungssystem im Bereich der Tunnelfugen erneuert und in den anderen Bereichen gereinigt, lokale nasse Stellen sowie Risse im Mauerwerk saniert, ein Beleuchtungssystem eingebaut und der bestehende Schotteroberbau mit Holzschwellen durch eine Feste Fahrbahn der Bauart ÖBB-PORR ersetzt [110, 123].

Die 415 m lange Feste Fahrbahn im Tunnel und den Portalbereichen ist die erste in der tschechischen Republik, aus diesem Grund wurde vom zuständigen Infrastrukturunternehmen SŽ (Správa železnic) ein umfangreicher Assessment-Prozess zur Projektbegleitung aufgesetzt. Die Wahl fiel auf eine Feste Fahrbahn, da die beschränkten Platzverhältnisse im Tunnel den Einbau eines modernen Schotteroberbaus mit Spannbetonschwellen und einer den technischen Standards entsprechenden Bettungsstärke unterhalb der Schwellen verunmöglichten.

Sämtliche Baumaßnahmen wurden jeweils unter Sperre von nur einem der beiden Streckengleise zuerst auf einer und dann auf der anderen Tunnelseite durchgeführt. Als Ausgleichsschicht wurde auf die bestehende betonierte Tunnelsohle, die über ein Gefälle in Richtung der Tunnelachse verfügte, eine bewehrte Lastverteilterplatte betonierte, die mittels vertikaler Stahldübel mit dem Bestand verbunden wurde. Auf dieser Lastverteilterplatte wurde im Anschluss die Feste Fahrbahn System ÖBB-PORR mit Füllbeton mit Mattenbewehrung errichtet [110].

6.1.3.2 Križiški, Jurgovski und Ležeški Tunnel (SLO)

Eine Feste Fahrbahn der Bauart ÖBB-PORR kam in den Jahren 2010 und 2011 auch bei drei über 150 Jahre alten normalspurigen Tunneln (Križiški, Jurgovski und Ležeški Tunnel) im Südwesten Sloweniens zum Einsatz [111, 123]. In diesen zweigleisigen, mit Kalkstein- und Ziegelmauerwerk errichteten Tunneln bestanden ähnliche Entwässerungsprobleme wie beim Střelenský Tunnel [111], eine genauere Beschreibung der durchgeführten Arbeiten in deutscher oder englischer Sprache ist leider nicht verfügbar.

6.1.4 Normalspurige Tunnel der DB

6.1.4.1 Sanierung der Alten Mainzer Tunnel

Die Alten Mainzer Tunnel wurden 1881 bis 1884 als ein durchgehender zweigleisiger Tunnel mit Auskleidung aus Sandsteinmauerwerk errichtet [124, 125]. Als Folge der schlechten Belüftungssituation in dem 1200 m langen Tunnel mit S-förmigem Grundriss bildete sich aus den Rauchgasen des Dampfbetriebs kombiniert mit den zufließenden Schichtwässern Schwefelsäure, die zu Schädigung des Mauerwerks (Umwandlung des Mörtels in Gips) sowie starker Korrosion am Oberbau (Erreichte Liegedauer von max. 4 Jahren) führte [124]. Der Einbau einer Abdichtung in den Jahren 1903 bis 1904 zeigte keine große Wirkung, daher wurde zwischen 1931 und 1934 ein ca. 300 m langer Abschnitt in der Mitte des Tunnels nach oben hin geöffnet und zu einem knapp 30 m tiefen Einschnitt umgebaut [124, 125]. In den 1950er-Jahren wurde die Strecke elektrifiziert. Im Zuge dessen wurden die Gleise im Tunnel tiefergelegt, um Platz für den Einbau einer Oberleitung zu schaffen.

Die Tunnel bildeten ein Nadelöhr zwischen Mainz Hauptbahnhof und Mainz Süd, wegen ihres geringen Querschnittes kam es zu Betriebseinschränkungen bei bestimmten Zugbegegnungen [124]. Auch der Gesamtzustand der Tunnel machte eine umfangreiche Sanierung erforderlich. Als Teil der Ausbaustrecke Mainz-Mannheim wurde zum Zweck des viergleisigen Ausbaus zwischen Mainz Hauptbahnhof und Mainz Süd daher ein zusätzlicher zweigleisiger Tunnel (Neuer Mainzer Tunnel) errichtet, nach dessen Fertigstellung 2006 eine Totalsperre der Alten Mainzer Tunnel zu diesem Zweck möglich wurde. Im Rahmen dieser Sanierung wurde der Tunnelquerschnitt oberhalb der Schienenoberkanten von 42 auf 72 m² vergrößert. Dies ermöglichte eine umfassende Nachrüstung im Bezug auf Brand- und Katastrophenschutz (u. a. Rettungswege und Löschwasserleitungen) sowie die Vergrößerung des Gleisabstandes von 3,50 m auf das aktuelle Sollmaß von 4,00 m. Auf Grund der sensiblen Bebauung über den Tunneln mussten im Zuge der Arbeiten zusätzliche Maßnahmen zur Setzungs- und Erschütterungsprävention getroffen werden. Dazu zählten unter anderem die Vorabsicherung des Gebirges mittels Injektionen, die Ausführung kürzerer Abschlagslängen, die Verwendung zusätzlicher Stützmittel sowie die Umsetzung eines umfangreichen Messprogrammes an der Oberfläche und unter Tage. Nach der Herstellung des einschaligen Ausbaus aus wasserundurchlässigem Beton konnten Entwässerungssystem, hydraulisch gebundene Tragschicht und die neue Feste Fahrbahn eingebaut werden [125].

Zum Thema der dort verbauten Festen Fahrbahn wurden keine detaillierteren Publikationen veröffentlicht. Werner Fiebig, einer der Autoren des in dieser Arbeit bereits wiederholt zitierten

Fachbuchs *Feste Fahrbahn: Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn* [4], schreibt auf seiner Website, dass die Alten Mainzer Tunnel mit der Bauart GETRAC A3 ausgestattet wurden [126]. Die Alten Mainzer Tunnel finden sich darüber hinaus auch auf der Liste mit Referenzen der PCM RAILONE AG für die Ausführung der Bauart GETRAC A3 [46].

6.1.4.2 Zweigleisiger Ausbau des Rappensteintunnels

Hochrhein-Strecke

Der Rappensteintunnel ist Teil der sogenannten Hochrhein-Strecke zwischen Basel und Lindau. Die Strecke wurde 1855/56 mit einem Bahnkörper für 2 Gleise errichtet, wobei vorerst jedoch nur ein Gleis verlegt und genutzt wurde. Das zweite Streckengleis wurde im Lauf der Zeit abschnittsweise ergänzt, zur Jahrtausendwende war nur mehr der 4,2 km lange Abschnitt zwischen Murg und Laufenburg Ost, auf dem sich auch der Rappensteintunnel befindet, eingleisig. Der Rhein ist in diesem Bereich Grenzfluss zwischen Deutschland (rechtes Ufer) und der Schweiz (linkes Ufer), wobei sich die Bahnstrecke auf deutschem Gebiet befindet. Im Jahr 2000 wurde auch dieser Teil der Strecke mit einem zweiten Gleis ausgestattet, wofür teilweise Ertüchtigungen und Verbreiterungen am Bahnkörper notwendig wurden [127].

Sanierung des Rappensteintunnels

Der 334 m lange Rappensteintunnel ist im harten Gneisanatexit des Schwarzwaldes gelegen und dient zur Durchquerung eines Bergvorsprungs [127, 128]. 1856 fertiggestellt wurde er bis 1904 in mehreren Phasen zur Gänze ausgemauert, in den 1970er-Jahren wurde eine Spritzbetonverstärkung aufgebracht. Der Tunnel verfügte ab Errichtung beidseitig über Sicherheitsnischen sowie einen gemauerten Sohlkanal in der Tunnelachse [128]. Die Bahnstrecke befindet sich im Bereich des Tunnels etwa 15 m oberhalb des Rheins, die an den Tunnel anschließenden Streckenabschnitte werden durch steile Anschnitte und hohe Stützmauern charakterisiert [127].

Wie die übrige Strecke war auch der Rappensteintunnel vor über 150 Jahren für zwei Gleise errichtet worden. Durch die Weiterentwicklung der Eisenbahntechnik und damit einher gehende Änderungen der Lichtraumprofile sowie durch die gestiegenen Sicherheitsanforderungen war das Verlegen des zweiten Gleises jedoch nicht ohne Weiteres möglich. Da umfassendere Ausbruchsarbeiten durch ihre Kosten das Gesamtprojekt in Frage gestellt hätten, wurde die Entscheidung getroffen, die Gleise im Tunnel entsprechend tiefer zu legen [128, 129]. Durch die Abtragung sämtlicher im Tunnel befindlichen Schichten bis zur felsigen Tunnelsohle und den Einbau eines Oberbaus mit minimaler Bauhöhe konnte das zweigleisige Lichtraumprofil unter minimalen Eingriffen in die Tunnelsubstanz hergestellt werden [127, 128]. Auf der ursprünglich mit einem Gleisabstand von 3,50 m geplanten Strecke beträgt der Gleisabstand mit einer Ausnahmege-nehmigung nun 3,75 m statt der in der deutschen EBO (Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung) vorgeschriebenen 4,00 m [128]. Am Tunnelgewölbe waren somit lediglich abschnittsweise Reprofilierungsmaßnahmen in der Größenordnung einiger Zentimeter erforderlich. Diese Eingriffe in das Gewölbe waren ohne vorhergehende bzw. begleitende Ertüchtigungsmaßnahmen möglich [127].

Bei der Entfernung des bestehenden Schotteroberbaus sowie der darunterliegenden Auffüllungen stellte sich heraus, dass die Spritzbetonschale auf einer Seite lediglich auf den Anschüttungen gegründet worden war. Durch die Herstellung einer Unterfangung aus Stahlbeton konnte die Tragfähigkeit des Widerlagers gesichert werden. Im auf dieser Seite befindlichen Randweg wurde auch eine Reserveleitung des örtlichen Wasserverbundes durch den Tunnel geführt. Die bestehenden Sicherheitsnischen wurden in ihrer Größe an die neue Höhenlage des Gleises sowie an die aktuellen Sicherheitsbestimmungen angepasst [128].

Feste Fahrbahn der Bauart FFYS

Der am Beginn dieses Abschnitts beschriebene 4,2 km lange Streckenabschnitt konnte in einer Gesamtbauzeit von nur 5 Monaten zweigleisig ausgebaut werden. Dies wurde durch den Einsatz von Fester Fahrbahn im Tunnelbereich ermöglicht, die in knappen vier Wochen in einer Totalsperre während der Sommerferien errichtet wurde.

Aus einem Variantenvergleich von verschiedenen Bauarten der Festen Fahrbahn ging das System FFYS auf einer 15 cm starken dreilagigen Asphalttragschicht als günstigste Variante hervor. Die ATS wurde mit einer Höhengengenauigkeit von ± 2 mm auf einer HGT als Ausgleichsschicht hergestellt. Unter Verwendung von Schienen des Typs S54 verfügt das angewendete System über eine Einbauhöhe von nur 294 mm.

Gemäß dem damaligen Stand der Technik wurden die Enden des FF-Abschnitts durch Betontragplatten in Form von zwei ca. 10 m langen Abschnitten der Bauart RHEDA bzw. RHEDA Berlin gebildet. Der Einbau des Systems FFYS wurde für die Betriebserprobung von neuen Stützpunkten sowie eines neuen Schienenbefestigungssystems genutzt. Die Übergangsbereiche zwischen Fester Fahrbahn und Schotteroberbau befinden sich an beiden Tunnelenden in Abschnitten mit komplizierter Gleisgeometrie (Krümmungswechsel bzw. Übergangsbogen) [128].

Bevorstehende Elektrifizierung des Rappensteintunnels

Nach der Elektrifizierung des Abschnittes zwischen Schaffhausen und Erzingen bis zum Jahr sollen in den Jahren 2025 bis 2027 auch die zwischen Basel und Erzingen gelegenen 75 km der Hochrhein-Strecke mit Oberleitung ausgestattet werden. Eine technische und finanzielle Herausforderung bildet hierbei erneut der Rappensteintunnel. Zur Schaffung des erforderlichen Lichtraums soll die Fahrbahn erneut um 60 cm abgesenkt werden, da eine Aufweitung der Tunnelröhre aufwändiger und mit noch höheren Kosten verbunden wäre [130]. Im Tunnelbereich ist die Ausführung der Oberleitung mittels fester Stromschienen vorgesehen [129]. Die Verantwortlichen rechnen aktuell mit einer Bauzeit von mehreren Monaten allein für die Anpassung des Tunnels [130].

Als Begleitmaßnahme sollen im Rahmen des Elektrifizierungsprojektes Bahnsteige der Bahnhöfe und Haltepunkte entlang der Strecke verlängert sowie deren Barrierefreiheit verbessert werden [130].

6.1.4.3 Umbau des alten Buschtunnels

Der 1841 bis 1843 in Feinsanden errichtete Buschtunnel ist Teil der zweigleisigen Strecke von Brüssel über Liège (Lüttich) und Aachen nach Köln und liegt zwischen Aachen und der deutsch-belgischen Staatsgrenze [131, 132]. Die Elektrifizierung der Strecke erfolgte in den 1960er-Jahren [132], durch seinen technischen Zustand entwickelte sich der Tunnel in den darauffolgenden Jahrzehnten immer mehr zum Nadelöhr im internationalen Fernverkehr auf der Strecke [131]. Während die übrigen Abschnitte mit 110 km/h befahren werden konnten, galt im alten Buschtunnel im Jahr 2004 eine Begrenzung auf nur 40 km/h. Der Abstand zwischen den Gleisen betrug im Tunnel lediglich 3,50 m, das Lichtraumprofil war im gesamten Tunnelverlauf stark eingeschränkt.

Im Zuge des Modernisierungsprojektes sollte die Strecke unter anderem durch eine Linienverbesserung für den Betrieb mit 160 km/h ausgebaut werden. Im Streckenbereich zwischen Aachen und der Staatsgrenze bestand auch Optimierungspotenzial bezüglich des Übergangs zwischen deutschem Rechtsverkehr mit Einphasenwechselstrom (15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz) und belgischem Linksverkehr mit Gleichstrom (3 kV). Da diese Aspekte nicht Thema dieser Diplomarbeit sind, wird auf sie jedoch nicht näher eingegangen [132].

In einer Variantenuntersuchung wurden die folgenden Optionen für den Streckenausbau verglichen [132]:

- Aufweitung des bestehenden Tunnels

- Bau eines neuen zweigleisigen Tunnels und Verfüllung des bestehenden Tunnels
- Bau eines neuen eingleisigen Tunnels und Umbau des bestehenden Tunnels für ebenfalls eingleisige Nutzung

Da die sehr engen Platzverhältnisse eine Sanierung des alten Buschtunnels unter laufendem Betrieb verunmöglichten [131], ging die Lösung mit einem Endausbau mit zwei eingleisigen Tunnelröhren als beste Variante aus dem Vergleich hervor. Der neue Buschtunnel wurde hierbei östlich des bestehenden Tunnels errichtet. Nach seiner Fertigstellung und Inbetriebnahme 2007 konnten die Arbeiten am alten Buschtunnel beginnen [132, 133].

Der Bestandstunnel verfügte über ein Gewölbe aus Ziegelmauerwerk in Kalkmörtel und ein Sohlgewölbe aus Mauerwerk mit Verstärkungen in Form von Sohlrippen aus Stahlbeton. Die etwa alle 30 m angeordneten Sicherheitsnischen hatten eine Größe von etwa 1 x 2 Metern. Nach dem Rückbau der Tunnelausrüstung wurde unter Verwendung von Spritzbeton als Abdichtungsträger umlaufend eine 3 mm dicke Kunststoffdichtungsbahn (KDB) aufgebracht. Das Gewölbe wurde mittels einer 35 cm starken Beton-Innenschale verstärkt. Im Sohlbereich wurde außerhalb der Abdichtung eine bewehrte Spritzbetonschale angeordnet, auf die KDB wurde eine Ausgleichs- und Lastverteilplatte mit einer Mindeststärke von 45 cm betoniert. Auf dieser Platte wurde eine Feste Fahrbahn der Bauart RHEDA 2000 ausgeführt. Im derart verstärkten Tunnel reichte der Querschnitt für die Anordnung eines Gleis inklusive der vorgeschriebenen Sicherheitsräume und sonstiger bahn- und sicherheitstechnischer Ausrüstung [132]. Die Wiederinbetriebnahme des alten Buschtunnels erfolgte im Oktober 2011 [133].

6.1.4.4 Sanierung des Brandleitetunnels

Der etwa drei Kilometer lange zweigleisige Brandleitetunnel wurde in den Jahren 1881 bis 1884 im Thüringer Wald erbaut. Er durchquert stark wasserführenden vulkanischen Porphyrtuff, der von vielen Störzonen unter anderem aus Sandstein, Schiefer sowie Ton durchzogen ist. Bereits 20 Jahre nach der Tunnelöffnung musste eine aufwändige Mauerwerkssanierung begonnen werden, im Rahmen derer an Stellen mit hohem Wasserandrang eine Rückendichtung aus Ton eingebaut wurde. Die Arbeiten wurden während des ersten Weltkriegs unterbrochen und danach zu Ende geführt.

Kurz vor dem 120-jährigen Bestehen des Eisenbahntunnels wurde um die Jahrtausendwende durch den selben Berg der Rennsteigtunnel für die Autobahn A71 errichtet. Dieser verläuft oberhalb des sowie quer zum Brandleitetunnel - im Querungsbereich liegen nur 7,5 m zwischen den Tunnelröhren. Da in diesem Bereich keine Rückendichtung vorhanden war, wurde eine Erneuerung der Innenschale dieses Abschnitts auf Kosten der Autobahnbaugesellschaft vertraglich vereinbart. Die Herstellung des Autobahntunnels führte zu einer so starken Änderung des Wasserhaushalts im Berg, dass es im Winter 2003/04 zu betriebsgefährdender Eisbildung im Brandleitetunnel kam. Daraufhin wurden umfassendere Baumaßnahmen inkl. Erneuerung der Gleisanlagen sowie der Entwässerung geplant und ab August 2004 ausgeführt. Die Totalsperre der Strecke zu diesem Zweck sollte bis Dezember 2004 andauern [134]. Das Tunnelgewölbe wurde im Zuge der Bauarbeiten im Querungsbereich auf einer Länge von 48 m ausgefräst und durch eine Spritzbetonauskleidung inkl. Rückendichtung ersetzt [134, 135]. Bei der bis Oktober andauernden Entfernung von Bestandsgleisen und Bettung traten jedoch unerwartete Probleme zu Tage: Die gusseisernen Verbindungsleitungen von den Rückenentwässerungen zur Mittelentwässerung waren großteils gebrochen, die aus Bruchsteinen errichtete Mittelentwässerung selbst war „nicht im Entferntesten in der Lage, die nach dem Bau des Autobahntunnels vermehrt anfallenden Gebirgswässer aufzunehmen“ [134]. Auch der Tunnelboden war im Rahmen der Errichtung nicht egalisiert worden, sondern durch den Sprengvortrieb von sehr unebener Beschaffenheit. Aus

diesen Gründen wurde auf der gesamten Tunnellänge zunächst eine neue Mittelentwässerung mit einer Nennweite von 1,50 m installiert und alle Rückenentwässerungen an diese angeschlossen. Im Anschluss wurde der Tunnelboden mit einem Sauggerät gereinigt und mit Ausgleichsbeton eine ebene Sohlfläche hergestellt. Im Zuge dessen wurden auch die Löschwasserleitungen in beiden Randwegen erneuert. Nach dem erfolgreichen Abschluss dieser Arbeiten wurde eine Feste Fahrbahn der Bauart GETRAC A3 eingebaut. Im Sommer 2005 konnte der Brandleitetunnel mit einer Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h wieder in Betrieb genommen werden [134].

Schon damals wurde jedoch erwartet, dass das Gewölbemauerwerk im übrigen Tunnel in den nächsten Jahren eine Generalsanierung benötigen würde [134]. Diese war für den Sommer 2020 geplant, wurde kurz davor jedoch abgesagt bzw. verschoben [136].

6.2 Pinzgauer Lokalbahn

Die Pinzgauer Lokalbahn steht im Eigentum des österreichischen Bundeslandes Salzburg, verfügt über eine Spurweite von 760 mm und wurde im Jahr 1898 eröffnet. Die Strecke nimmt ihren Anfang in Zell am See, zweigt nach einer kurzen Parallelführung zur normalspurigen Strecke nach Wörgl in Richtung Westen ab und führt am linken Ufer der Salzach entlang bis nach Krimml [83].

6.2.1 Problemstellung

Nachdem die bedingt durch ihre Linienführung grundsätzlich stark hochwassergefährdete Bahnstrecke [98] seit 2005 bereits mehrmals wegen Hochwässerschäden unterbrochen und wiederhergestellt worden war [83], zerstörte ein Hochwasser in Kombination mit Murenabgängen im Sommer 2021 erneut einen großen Teil der Strecke [70] (ca. 22 km [137] von insgesamt 52,74 km [98]). Bei diesem Hochwasserereignis wurde am Pegel der Salzach in Mittersill ein Rekordwasserstand von 5,88 m erreicht (2005: 5,17 m, 2014: 5,68 m) [70]. Seitdem ist nur mehr der Beginn der Strecke von Zell am See bis Niedernsill befahrbar, im Rest des Tals wurde ein Schienenersatzverkehr eingerichtet [138].

6.2.2 Entwicklung einer Lösung

Im Rahmen des Wiederaufbaus werden zwei grundlegende Konzepte verfolgt:

- Überall, wo dies möglich ist, soll die Strecke durch Aufschüttung über die Marke des hundertjährigen Hochwassers gehoben werden.
- In den Abschnitten, wo eine Anhebung nicht möglich ist, etwa weil aus wasserwirtschaftlicher Sicht eine Nutzung der hinter dem Bahndamm befindlichen Retentionsräume zu erfolgen hat, werden sogenannte „Überflutungstrecken“ ausgeführt.

Die diesbezügliche Planung erfolgt dementsprechend in enger Abstimmung mit den lokal zuständigen Stellen für Schutzwasserwirtschaft sowie Wildbach- und Lawinenverbauung.

Durch diese Maßnahmen kann zwar kein von Hochwässern unabhängiger Bahnbetrieb gewährleistet werden, aber die diesbezügliche Resilienz [139] der Strecke wird durch eine entsprechende Ausführung der Überflutungstrecken erhöht: Diese soll für geringere Schäden sorgen sowie die aus Hochwasser resultierenden Betriebsunterbrechungen verkürzen [70].

Das Konzept mit den Überflutungsbereichen stammt ursprünglich bereits aus dem Jahr 2007 und ist eine Reaktion auf das verheerende Hochwasser von 2005. Damals wurde bereits ein Querschnitt mit Fester Fahrbahn entwickelt, aus Kostengründen kam dieser jedoch nicht

zur Ausführung und man bemühte sich, überflutungssichere Bereiche aus Schotteroberbau herzustellen. Durch das Hochwasser 2014 kam es zu einem derartigen Eintrag von Feinanteilen in den Oberbau, dass die Entwässerung nicht mehr funktionierte und der Schotter sämtliche Querschubfestigkeit verlor. Auch die Reinigung eines etwa 12 km langen Abschnittes mit einer eigens umgebauten Schotterbettreinigungsmaschine führte auf Grund der für Gleisschotter untypischen Verschmutzungsart nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Im auf das Hochwasser folgenden Frühling bildeten die Feinanteile einen guten Nährboden für Vegetation im Gleis. Die Idee des „hochwassersicheren“ Schotteroberbaus musste daraufhin wieder verworfen werden.

6.2.3 Laufende Baumaßnahmen

Aktuell wird der an den in Betrieb befindlichen Streckenteil anschließende Abschnitt von Niedersill bis Uttendorf wiederhergestellt. Neben der Durchführung von Anpassungen an einigen Brückenbauwerken, Eisenbahnkreuzungen sowie einer Haltestelle werden vier Überströmbereiche mit einer Gesamtlänge von 1,57 km ausgeführt. Eine Haltestelle wird auf Grund ihrer Lage mitten in einem der Überströmbereiche aufgelassen [70].

Abbildung 6.2 zeigt den Regelquerschnitt der Überströmbereiche: Auf das nur bedingt tragfähige Unterbauplanum wird mit einem Geotextil als Zwischenlage eine mindestens 40 cm starke Filterbetonschicht als Lastverteilplatte aufgebracht. Als verlorene seitliche Schalung dient hierbei an der flussabgewandten Seite eine niedrige Ortbetonstützmauer oder eine Reihe von Bahnsteigkanten, die entlang eines Streifenfundaments versetzt werden. Auf der flusszugewandten Seite, die sich in der Abbildung 6.2 auf der rechten Seite befindet, wird eine Stützwand als Hochwasserschutzmauer errichtet. Deren Höhe wird über hydrologische Abflussberechnungen ermittelt, um die Dotierung der Retentionsbereiche zum Zeitpunkt der größtmöglichen Wirkung zu gewährleisten.

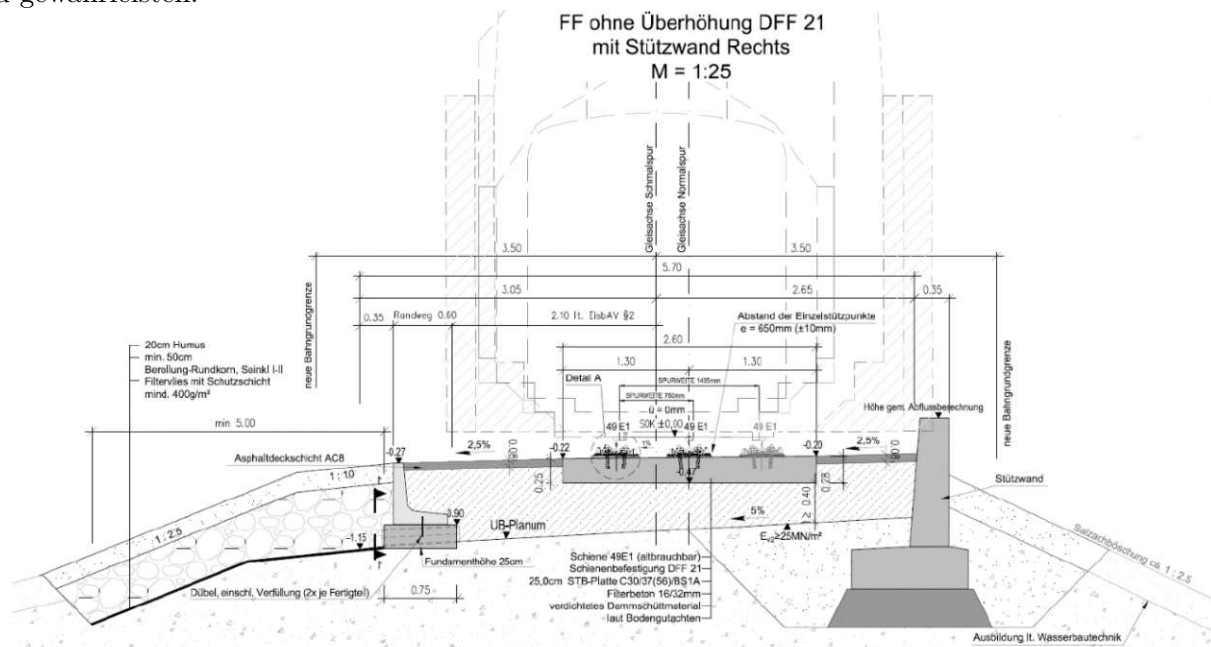


Abb. 6.2: Regelquerschnitt der Überströmbereiche der Pinzgauer Lokalbahn (nicht maßstäblich) [70, Abb. 17]

Auf der Filterbetonschicht wird die Feste Fahrbahn wie in Abschnitt 4.3.4.7 beschrieben errichtet. Die Wahl fiel in diesem Fall auf ein System mit Einzelstützpunkten, da die Einbauorte schwer zugänglich sind und es für eine Spurweite von 760 mm kaum gleisgebundene Baufahrzeuge gibt. Mit

den geplanten Aufbauten kann die gesamte Baustelle über bestehende Straßen und Wege sowie bis zum Einbau des Gleises unter Nutzung des Bahnkörpers als Baustraße abgewickelt werden. Der Beton für die Gleistragplatte wird hierbei vom jeweils nächsten möglichen Zufahrtspunkt (z. B. nächste Eisenbahnkreuzung) zum Einbauort gepumpt.

Um im Hochwasserfall eine Verschmutzung und Verstopfung des Filterbetonkörpers durch Feinanteile zu vermeiden, wird rechts und links der Betontragschicht der Festen Fahrbahn eine Asphaltdeckschicht (AC8) aufgebracht. Bei drückendem Wasser von unten sollen durch die Geotextil-Trennlage die Feinanteile zurückgehalten werden, während das Wasser in den Filterkörper eindringen kann, um Schäden am Unterbau zu vermeiden. Der Übergang von der Festen Fahrbahn bzw. der Asphaltdeckschicht auf die flussabgewandte Böschung wird möglichst eben und ohne Höhensprünge oder starke Neigungsänderungen ausgebildet, um dem überströmenden Wasser keine Angriffspunkte für eine allfällige Unterspülung zu bieten.

Die Entwässerung der Festen Fahrbahn erfolgt ins Landesinnere. Zu diesem Zweck wird die Betontragschicht inklusive der anschließenden Asphaltbereiche leicht geneigt ausgebildet. Die korrekte Lage der flussabgewandten Schiene wird durch das Ergänzen von Zwischenlagen in der Schienenbefestigung oder bei größeren Differenzen durch Unterguss des Stützpunktes hergestellt.

Der entwickelte Regelquerschnitt erlaubt sowohl die Elektrifizierung der Strecke, die ab 2026 stattfinden soll, sowie gegebenenfalls eine Umspurung von 760 auf 1435 mm. Eine Änderung der Spurweite ist zwar nicht unmittelbar geplant, das Land Salzburg als Eigentümer möchte jedoch eine Einschränkung des diesbezüglichen Entwicklungsspielraumes für die kommenden Jahrzehnte durch Errichtung einer nur für 760 mm geeigneten Festen Fahrbahn vermeiden. Aus diesem Grund wird die Betontragschicht der Festen Fahrbahn etwas breiter ausgeführt. Unter Weiternutzung der Schienenstützpunkte auf der flussabgewandten Seite würde sich bei einer Umspurung die Gleisachse etwas in Richtung Salzach verschieben, die Stützpunkte auf der flusszugewandten Seite wären entsprechend zu ergänzen.

Um die Barrierewirkung der FF-Abschnitte für Amphibien abzuschwächen, ist etwa alle 30 m eine 5 m breite Einschüttung der Betonoberfläche mit aus der Salzach gewonnenem Kies geplant. Diese Einschüttung ist in Abbildung 6.3 in rot dargestellt.

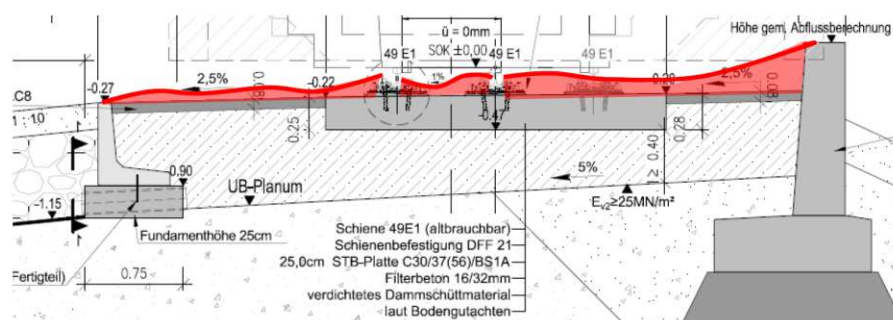


Abb. 6.3: Querschnitt des Bahnkörpers im Bereich eines Überquerungskorridors für Amphibien [70, Abb. 22]

Noch im Jahr 2023 soll durch die beschriebenen Maßnahmen die Befahrbarkeit der Strecke bis Mittersill wiederhergestellt werden.

Der Streckeneigentümer sowie die planenden Stellen erwarten, dass im Streckenabschnitt zwischen Mittersill und Krimml der Anteil von Bereichen, in denen eine Feste Fahrbahn erforderlich ist, höher ausfallen wird als im aktuell in Ausführung befindlichen Streckenteil. Aus diesem Grund ist mit den Erfahrungen aus dem aktuellen Projekt noch eine Optimierung des Querschnittes

hinsichtlich des hohen Materialverbrauchs vorgesehen, bevor der nächste Streckenabschnitt in Angriff genommen wird.

Kapitel 7

Ergebnisse

7.1 Gibt es bezüglich der Gleislage Unterschiede zwischen Schmalspur und Normalspur?

In Kapitel 3 konnte gezeigt werden, dass sich die Entwicklung der Gleislagequalität sowie die diesbezüglichen Einflussfaktoren bei der Schmalspurbahn beträchtlich von den entsprechenden Entwicklungen und Faktoren bei der Normalspur unterscheiden. Die Fahrwegbeanspruchung ist bei Schmalspurbahnen nicht, wie man vielleicht zu erwarten geneigt ist, geringer als bei regelspurigen Bahnen, sondern höher. Aus diesem Grund wirkt es umso kurzsichtiger, dass im Laufe der letzten Jahrzehnte bezüglich der Entwicklung von Prognosemodellen und modernen Oberbausystemen für Schmalspurbahnen bedingt durch niedrige Investitionsbereitschaft nur derart geringe Fortschritte erzielt werden konnten. Eine wesentliche Effizienzsteigerung der bestehenden Bemühungen wäre auch durch die Nutzung von Synergien durch bessere, auch internationale Zusammenarbeit von schmalspurbahnbetreibenden Eisenbahninfrastrukturunternehmen erreichbar. Hierbei wäre im Rahmen von betriebener Entwicklungsarbeit etwa das Mitdenken von sich nur geringfügig unterscheidenden anderen Spurweiten sinnvoll.

7.2 Wo ist Feste Fahrbahn sinnvoll?

Auch wenn die in Kapitel 5 dieser Diplomarbeit besprochenen Lebenszykluskostenberechnungen auf Annahmen basieren, die für Schmalspurbahnen überwiegend unzutreffend sind, können die grundsätzlichen Aussagen der Analysen auch für geringere Spurweiten als gültig betrachtet werden: Positive Barwertdifferenzen können im Kostenvergleich nur bei hoch belasteten Strecken erreicht werden. Aus diesem Grund ist die Anwendung von Festen Fahrbahnen bei Schmalspurbahnen nur bei Vorliegen von besonderen Rahmenbedingungen zu empfehlen. Für die diesbezüglichen zusammenfassenden Erläuterungen wird auf Kapitel 5.5 verwiesen.

7.2.1 Anwendung in Tunneln

Im Tunnel kann die Feste Fahrbahn viele ihrer Vorteile bei reduzierten Errichtungskosten ausspielen, da in diesen Bereichen je nach Systemwahl eine Einsparung der Bewehrung oder sogar von ganzen Schichten des Aufbaus möglich ist. Aus diesem Grund ist die Anwendung von Festen Fahrbahnen hier vollumfänglich zu empfehlen. Die Sinnhaftigkeit des Einbaus einer Festen Fahrbahn nimmt grundsätzlich mit steigender Tunnellänge zu, es sind jedoch bei Schmalspurbahnen Anwendungsfälle ab einer Länge von etwa 300 Metern bekannt (vgl. Abschnitt 6.1.1).

Die Umrüstung von Bestandstunneln ist jedoch nur dann zielführend, wenn im betroffenen Bereich im Anschluss an die Errichtung der Festen Fahrbahn für längere Zeit keine Instandsetzungen geplant sind. Eine Feste Fahrbahn, die unter Umständen lang vor Ablauf ihrer Lebensdauer wieder entfernt werden muss, um den Tunnel aus statischen Gründen zu sanieren oder mit einer Oberleitung auszustatten, ist definitiv nicht wirtschaftlich. Ein Negativbeispiel hierfür ist

etwa der deutsche Rappensteintunnel, bei dem die um die Jahrtausendwende ausgeführte Feste Fahrbahn nun wegen der bevorstehenden Elektrifizierung der Strecke vor dem Abriss steht (vgl. Abschnitt 6.1.4.2). Diesbezüglich hat die Entscheidung für eine Feste Fahrbahn bedingt durch die längere Lebensdauer dieser Oberbauart langfristige Auswirkungen als die Entscheidung für die Erneuerung eines vorliegenden herkömmlichen Schotteroberbaus.

7.2.2 Andere Anwendungsfälle

In Fällen abseits von Tunnelabschnitten ist eine projektbezogene Untersuchung notwendig, da die auf die Entscheidung Einfluss nehmenden Faktoren schlicht und ergreifend zu vielfältig sind. Da bei Schmalspurbahnen überwiegend noch der über 100 Jahre alte Original-Unterbau vorhanden ist, ist der Einbau einer Festen Fahrbahn auf Grund von Setzungsgefahr im Allgemeinen nur nach ausführlichen Untergrunduntersuchungen bzw. entsprechenden Sanierungsmaßnahmen empfehlenswert.

Im Rahmen der wirtschaftlichen Betrachtung ist vor allem eine genaue Ermittlung der Lebenszykluskosten für die in Kapitel 5.2 identifizierten vier Schlüsselkriterien für Schmalspurbahnen wichtig:

- Investitionskosten Fahrbahn
- Instandhaltungsaufwand
- Betriebserschwerungskosten durch geplante Nicht-Verfügbarkeit
- Schallsicherungsmaßnahmen

Wenn zum Zweck der Geschwindigkeitserhöhung eine Linienverbesserung angestrebt wird, kommt der betriebliche Nutzen aus der Trassierung als fünftes Schlüsselkriterium hinzu.

Die Entwicklung eines LCC-Tools analog zu dem der DB (vgl. Abschnitt 5.3.1) könnte einen wesentlichen Beitrag zur Vereinfachung dieser Kostenabschätzung leisten. Ein dementsprechendes Werkzeug wäre jedoch sowohl in der Entwicklung als auch in der Anwendung wesentlich komplizierter als das der DB, da durch die Vielfalt der Einflusskriterien bei Schmalspurbahnen die Berücksichtigung einer größeren Zahl von Eingangsparametern zu bewerkstelligen wäre. Eine solche Entwicklung müsste daher von einem Zusammenschluss möglichst vieler Schmalspurbahnen betreibender Eisenbahninfrastrukturunternehmen betrieben werden.

Vor dem Hintergrund, dass bei der Errichtung von Festen Fahrbahnen auf Schmalspurbahnen durch geringere Auftragsvolumina und den überwiegenden Entfall von kostenreduzierenden Standardisierungseffekten im Allgemeinen mit höheren Herstellungskosten zu rechnen ist, könnte eine engere Zusammenarbeit zwischen Eisenbahninfrastrukturunternehmen, die vor ähnlichen diesbezüglichen Herausforderungen stehen, die Nutzung von Synergien und somit die Senkung von Kosten in Planung und Ausführung ermöglichen.

Eine Anpassung bzw. Aktualisierung der Trassierungsvorschriften könnte zur Attraktivierung von Festen Fahrbahnen beitragen, da ihre speziellen Eigenschaften dort zum gegenständlichen Zeitpunkt kaum berücksichtigt werden. Die Feste Fahrbahn verfügt als Werkzeug zur Trassenoptimierung jedenfalls über ungenutztes Potenzial. Eine Bewertung dessen ist jedoch nur projektspezifisch unter Betrachtung von Strecke und Betriebsprogramm möglich.

Das Beispiel der Pinzgauer Lokalbahn (vgl. 6.2) zeigt jedenfalls, dass die Feste Fahrbahn bei Schmalspurbahnen auch abseits von Tunneln und städtischen Bereichen sinnvoll eingesetzt werden kann.

7.3 Welche ist die bestgeeignete Feste Fahrbahn?

Auch wenn viele in der Vergangenheit errichtete Bauarten der Festen Fahrbahnen nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, verbleibt mit den in Kapitel 4.4 zusammengestellten Vertretern nach wie vor eine ansehnliche Auswahl von Systemen, die grundsätzlich tauglich für den Einbau auf Schmalspurbahn-Abschnitten mit Vollbahn-Charakteristika sind bzw. mit unterschiedlichem Aufwand an deren Anforderungen und Abmessungen angepasst werden können.

Für die Bauart **RhB** sowie für die auf der Strecke der **Pinzgauer Lokalbahn** ausgeführte monolithische Feste Fahrbahn mit Einzelstützpunkten ist bekannt, dass diese auch bei geringem Platzangebot ohne den Einsatz von gleisgebundenen Spezialfahrzeugen mit herkömmlichen Baumaschinen errichtet werden können. Bei den in ihrer Errichtung komplett spurweitenunabhängigen Bauarten **LVT** und **EDILON** ist bedingt durch ihren Aufbau die Logistik etwas aufwändiger als bei den zuerst genannten Bauweisen. Mit entsprechender Vorbereitung und einem überlegten Logistik- und Betonierkonzept steht jedoch auch einer Ausführung dieser Bauarten bei Schmalspurbahnen nichts im Wege.

Bei den Bauarten **RHEDA**, **RHEDA 2000**, **GETRAC**, **BÖGL** und **ÖBB-PORR** sind in verschiedenem Umfang Anpassungen der Bauteile an die Spurweite erforderlich. Ob sich eine diesbezügliche Anpassung bzw. Weiterentwicklung rechnet und ob Anlieferung und Einbau der benötigten Teile (z. B. große und schwere Fertigteile) und Baustoffe an den Einbauort technisch möglich und wirtschaftlich durchführbar sind, kann nur projektspezifisch und in Zusammenarbeit mit an der Ausführung interessierten Firmen festgestellt werden.

Die Empfehlung an vor einer diesbezüglichen Entscheidung stehende Eisenbahninfrastrukturunternehmen lautet jedenfalls, ausreichend Zeit und finanzielle Mittel für eine detaillierte projektspezifische Untersuchung einzuplanen. Diesbezügliche Sparmaßnahmen oder die Umsetzung von unüberlegten Projekten können unangenehme und/oder teure Konsequenzen mit sich bringen.

Kapitel 8

Betrachtung der Mariazellerbahn

8.1 Geschichte der Strecke und ihrer Tunnel

Auf einer Streckenlänge von etwas über 84 km verfügt die Mariazellerbahn über 4,6 km Tunnel. Mit einer Länge von 2369 m ist der Gösingtunnel der Längste davon [25]. Er wurde in den Jahren 1904 bis 1906 zur Unterquerung der sogenannten „Brandeben“ zwischen den Stationen Puchenstuben und Gösing errichtet, ist auf ca. 60 % seiner Länge ausgemauert und verfügt über ein unten offenes, hufeisenförmiges Profil [25, 140]. Im Bereich der zum Gösingtunnel hinaufführenden Nordrampe wurde beim Bau der Strecke ein „Gewirr von verschiedensten Gesteinsarten“ angetroffen. „In einem einzigen Einschnitt kamen oft Triaskalk, Dolomit und Sandstein zugleich vor. Diese Gesteinsmassen begannen beim Anschnitt auf den geneigten Kohlentonsschichten zu rutschen.“ Auch beim Bau von kleineren Tunneln kam es bedingt durch die Geologie des Gebiets zu Schwierigkeiten. Im 89,2 m langen Meierlbergtunnel war etwa eine 2 bis 3 m starke Ausmauerung erforderlich [25].

Die seit Eröffnung der jeweiligen Streckenabschnitte bestehenden Tunnelbauwerke wurden in den Jahren 1896 bis 1907 hergestellt und verfügen über dementsprechend enge Querschnitte. Zwischen 1909 und 1914 wurden bedingt durch Rutschungen und Steinschläge oder Trassenoptimierungen drei weitere Tunnel ergänzt (Stettenriegeltunnel, Kerlsteintunnel und Florkogeltunnel) [25].

Die Elektrifizierung der Mariazellerbahn erfolgte bereits wenige Jahre nach ihrer Fertigstellung. 1911 konnte der elektrische Betrieb auf der gesamten Strecke aufgenommen werden [25]. In den Tunneln befindet sich eine sehr niedrige Form der Kettenoberleitung, für die etwa im Gösingtunnel die Auslegerbereiche in den Fels eingestemmt wurden. Eine Aufweitung seines Gesamtquerschnitts war im Zuge der Elektrifizierung nicht erforderlich.

Nach einer schrittweisen Reduktion des Güterverkehrs ab 1988 wurde selbiger im Jahr 1999 komplett eingestellt. Gegenwärtig wird der Regelverkehr auf der Strecke mit dem Fahrzeugtyp „Himmelstreppe“ abgewickelt. Auf der Talstrecke zwischen St. Pölten Hauptbahnhof und Laubenbachmühle, wo sich das Betriebszentrum befindet, herrscht hierbei Stundentakt, auf der Bergstrecke weiter nach Mariazell fahren die Züge alle zwei Stunden mit einzelnen Verstärkern. An Samstagen, Sonn- und Feiertagen verkehrt zwischen St. Pölten Hauptbahnhof und Mariazell ein „Ötscherbär“-Zugpaar, das sich aus restauriertem alten Wagenmaterial und einer Elektrolok zusammensetzt. Etwa 10 Mal pro Jahr werden mit der Dampflokomotive Mh.6 und den Waggons des „Ötscherbär“ Nostalgiefahrten durchgeführt [25, 141].

8.2 Aktuelle Situation im Gösingtunnel

Wände und Decke des etwas mehr als 2 km langen Gösingtunnels bestehen teilweise aus rohem Fels, abschnittsweise dient Natursteinmauerwerk zur Gewölbesicherung. In einigen Bereichen wurde bei vergangenen Sanierungsarbeiten auch eine Spritzbetonsicherung ausgeführt. Das Betriebswasser sowie die Bergwässer werden nach ihrer Fassung über steinerne Kanäle oder

Betonrohre in einen steingemauerten, mittigen Sohlkanal mit rechteckigem Querschnitt eingeleitet [140, 142].

Abbildung 8.1 zeigt einen exemplarischen Querschnitt des Gösingtunnels in einem mit Bruchsteinmauerwerk ausgekleideten Abschnitt.

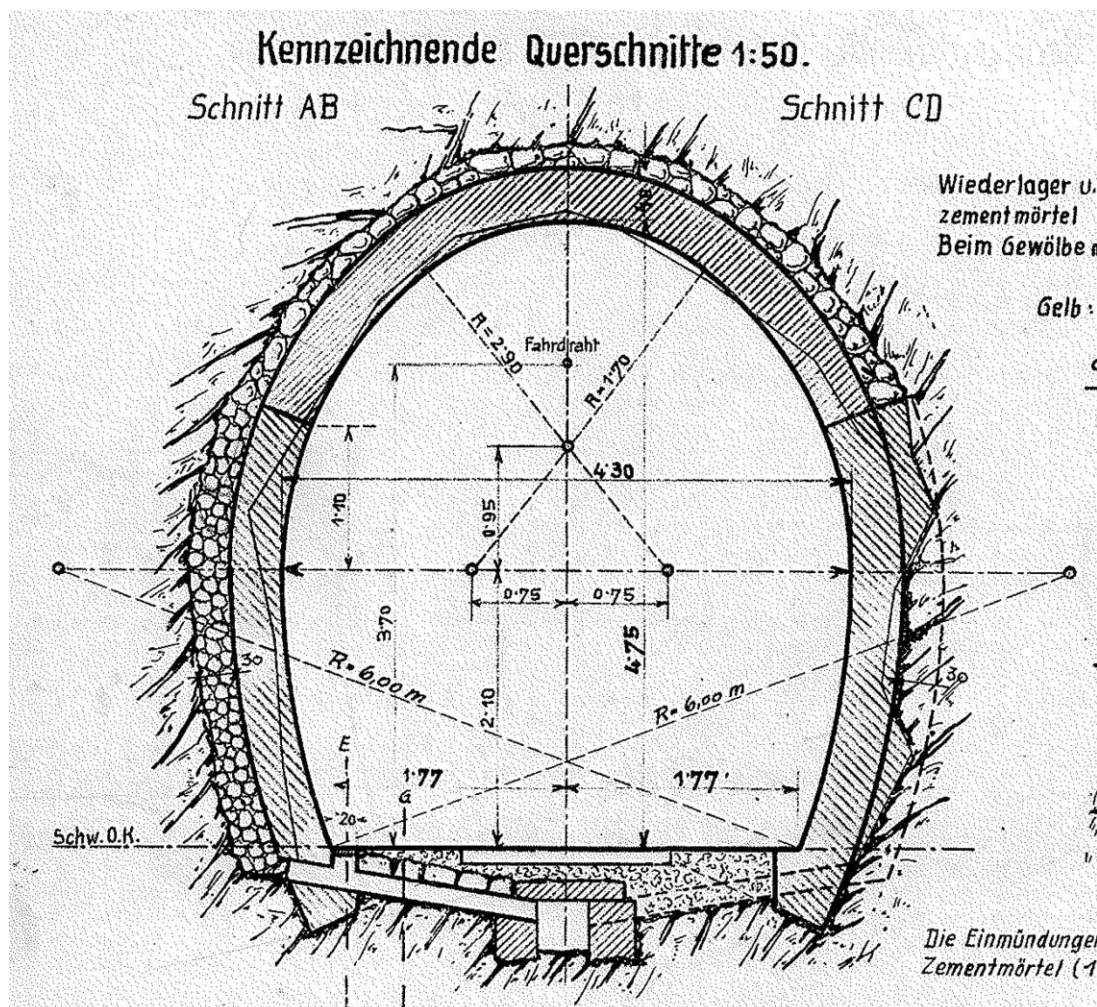


Abb. 8.1: Querschnitt des Gösingtunnels mit Gewölbesicherung aus Bruchsteinmauerwerk (nicht maßstäblich) [140]

In den Jahren von 1989 bis 1991 wurde in mehreren Etappen eine Generalsanierung durchgeführt, im Zuge derer auch eine Sanierung der Tunnelsohle erfolgte [25]. Nach Angaben des Streckenbetreibers ist die Standsicherheit des Tunnels derzeit grundsätzlich gegeben und es sind in näherer Zukunft keine großen diesbezüglichen Sanierungsmaßnahmen geplant.

8.2.1 Entwässerung

Der Andrang von Bergwasser in der schnell wechselnden Geologie des durchquerten Gebirges führte bereits während der Errichtung des Gösingtunnels zu großen Problemen. Wegen der Entstehung von Wasseraustrittsstellen musste die Entwässerung bereits mehrmals abschnittsweise saniert werden. Durch Planunterlagen dokumentiert sind diesbezügliche Arbeiten unter anderem in den Jahren 1939/40 sowie 1949 [142, 143]. Auch seit der Streckenübernahme durch die NÖVOG

(Niederösterreichische Verkehrsorganisationsges. m. b. H.) von den ÖBB im Jahr 2010 [144] wurden mehrmals Sanierungsmaßnahmen erforderlich.

Die Ursache der Probleme ist hierbei nie eine mangelnde Kapazität des Sohlkanals, sondern die starke Variation der Abflusswege des Bergwassers. Hierdurch werden immer wieder neue Wasserfassungen erforderlich, während bestehende Leitungen trocken fallen. Ungefasste Bergwässer führen zu Schäden an den Gewölbesicherungen und können „unbehandelt“ somit auch zu Verursachern von Standsicherheitsproblemen werden.

8.2.2 Querschnittsabmessungen

Im Gösingtunnel besteht ein Randweg mit beleuchtetem Handlauf, der nach Angaben des zuständigen Eisenbahninfrastrukturunternehmens abschnittsweise zu schmal für die aktuell gültigen Regelungen ist. Da die Breite des Wegs nur in geringem Maß eingeschränkt wird und der Tunnel darüber hinaus mit Notsprechstellen ausgerüstet ist, erreicht das Bauwerk einen durchaus modernen Sicherheitsstandard. Die Betriebssicherheit des Tunnels ist somit gewährleistet, auch wenn bezüglich der Randwegbreite Ausnahmen vom aktuellen Stand der Technik bestehen.

Problematisch ist jedoch die Höhe des Tunnels: Aktuell befindet sich auf der gesamten Strecke Schotteroberbau, wobei im Gösingtunnel wie auch in einigen kürzeren Tunneln der Strecke kaum Höhenreserven für die Durcharbeitung vorhanden sind. Im Gösingtunnel hat der Schotteroberbau den Angaben der NÖVOG zufolge derzeit eine Lebensdauer von 25 Jahren, da nach vier Durcharbeitungen die Stopfreserven aufgebraucht sind. In der Regel wird beim Schotteroberbau von der Erfordernis einer Bettungsreinigung nach etwa 20 Jahren und einer kompletten Erneuerung nach 40 Jahren ausgegangen [78]. Der Vergleich mit der erwarteten Lebensdauer dieser Oberbauform im Gösingtunnel zeigt deutlich die Unwirtschaftlichkeit der aktuellen Situation auf.

Auf Grund der bereits sehr platzsparenden Ausführung der Kettenoberleitung (vgl. Kapitel 8.1) kann die Höhenproblematik auch durch Umbau der Oberleitung auf eine Deckenstromschiene nicht gelöst werden. Deshalb wird aktuell eine Umrüstung auf Feste Fahrbahn in Erwägung gezogen.

8.3 Empfehlung

Zur Verbesserung der beschriebenen Situation im Gösingtunnel ist der Einbau einer Festen Fahrbahn jedenfalls zu empfehlen. Durch eine vorausschauende und umfassende Planung sowie die Ausführung von entsprechenden Begleitmaßnahmen sollte hierbei jedoch versucht werden, eine Situation wie im Rappensteintunnel (vgl. 6.1.4.2), bei dem die Feste Fahrbahn auf Grund von nachfolgenden Projekten nun bereits nach 25 Jahren vor dem Abbruch steht, zu vermeiden.

In den zunächst folgenden beiden Abschnitten werden die Empfehlungen für den Tunnel konkreter ausgeführt. Der dritte und letzte Abschnitt dieses Kapitels enthält allgemeine Empfehlungen für die Gesamtstrecke.

8.3.1 Planung und Voruntersuchungen

Vor einem Einbau von Fester Fahrbahn im Gösingtunnel sind jedenfalls eine genaue Analyse der aktuellen Tunnelsituation in all ihren technischen Teilaspekten durchzuführen und Maßnahmen, die die Stand- und Betriebssicherheit des Tunnels für die kommenden 80 Jahre gewährleisten, zu planen und umzusetzen. Diese Ertüchtigungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen sind Voraussetzung für den sinnvollen Einbau einer Festen Fahrbahn sowie einen nachhaltigen Mitteleinsatz im Bezug auf die Erhaltung der Strecke.

Falls die diesbezügliche Analyse des Tunnels ergibt, dass die Funktionalität der Tragstruktur und Entwässerung ohne weitere Maßnahmen für die nächsten 20 Jahre gesichert ist, kann auch die Erneuerung des Schotteroberbaus eine gute temporäre Lösung sein. Dies gilt insbesondere, wenn der bestehende Oberbau im Tunnel akut erneuerungsbedürftig ist. Die Lebensdauer dieses neuen Schotteroberbaus sollte jedoch intensiv für die detaillierte Planung einer Generalsanierung inklusive Einbau einer Festen Fahrbahn nach dem Vorbild der Rhätischen Bahn (vgl. Kapitel 6.1.1) genutzt werden.

8.3.2 Geeignete Bauarten der Festen Fahrbahn

Je nach erforderlichem Umfang und gewählter Methode der Tunnelsanierung ist der Einsatz von verschiedenen Bauarten der Festen Fahrbahn gemäß Kapitel 4.4 möglich. Unabhängig von der exakten Größe des Tunnelquerschnitts nach der Sanierung ist der Einbau von großen Fertigteilen, wie sie bei den Systemen ÖBB-PORR und BÖGL vorkommen, in eingleisigen Tunnelröhren mit Herausforderungen verbunden bzw. keine dokumentierte und bewährte Methode.

Bedingt durch die Einstellung des Güterverkehrs bestehen am Streckenbeginn in St. Pölten, wo sich auch ein Knotenpunkt mehrere normalspuriger Bahnstrecken befindet, nur mehr eingeschränkte Möglichkeiten zur Beladung von Güterwagen. Aus diesem Grund sowie da es sich bei der Mariazellerbahn um eine Stichstrecke handelt, kann auch die Erreichbarkeit der Tunnelportale über das öffentliche Straßennetz zu einem bestimmenden Faktor für die Wahl der Bauverfahren sowie des FF-Systems werden. Das Nordportal des Gösingtunnels ist in einem Waldgebiet gelegen und aus diesem Grund nicht für straßengebundene Anlieferungen geeignet. Das Südportal des Tunnels befindet sich direkt hinter dem Bahnhof Gösing, der über die 4 km lange niederösterreichische Landesstraße L 6164 an das höherrangige Straßennetz (B 28 Puchentubener Straße) angeschlossen ist (vgl. § 1 Abs. 1 und 2 NÖ Landesstraßenverzeichnis). Der Anlieferung der benötigten Materialien und Geräte müsste daher entweder gleisgebunden vom Betriebszentrum Laubenbachmühle, das über die besser ausgebaute L 5221 erreichbar ist, zum Nordportal oder über die starke Steigung und die Kehren der L 6164 zum Südportal erfolgen (vgl. § 1 Abs. 2 NÖ Landesstraßenverzeichnis). Da der Antransport eines für die Genauigkeiten von Asphalttragschichten für aufgelagerte Bauarten geeigneten Asphaltfertigers sich unter diesen Umständen schwierig gestaltet und darüber hinaus für die benötigte Spurweite von 760 mm noch keine Entwicklung von passenden Spezielschwellen bzw. Quertragelemente bekannt ist, ist der Einbau der Systeme GETRAC sowie IVES kritisch zu bewerten. Dazu kommt die Gefahr, dass der Tunnelquerschnitt auch nach einer Sanierung zu klein für den Asphaltfertiger sein könnte.

Die Bauart LVT ist gegenüber den Bauarten RHEDA und RHEDA 2000 durch ihre Erprobung auf Meterspur-Strecken sowie die Möglichkeit zu einer effizienteren Gestaltung der Baustellenlogistik mit einzelnen Schwellenblöcken statt Mono- oder Biblockschwellen im Vorteil. Für die Bauart RHEDA 2000 wäre des Weiteren noch eine Anpassung der bestehenden Spezielschwellen erforderlich.

Auch das System EDILON sowie eine monolithische Feste Fahrbahn aus Ortbeton wie bei der Pinzgauer Lokalbahn sind unabhängig von der Art der Tunnelsanierung einsetzbar.

Die Bauart RhB in ihrer derzeitigen Form ist vor allem dann zu empfehlen, wenn sie gemeinsam mit der „Normalbauweise Tunnel“ (vgl. Abschnitte 4.3.5.6 und 6.1.1), für die sie entwickelt wurde, zur Anwendung kommt.

8.3.3 Sonstige Empfehlungen

Bei der derzeitigen Streckennutzung besteht das Potenzial, durch eine Optimierung der Trassierung für Fahrzeuge des Typs „Himmelstreppe“ eine Fahrzeitverkürzung und damit einher gehende

Streckenattraktivierung erreichen zu können. Die Durchführung einer diesbezüglichen Untersuchung, wie sie ohne Berücksichtigung von fahrzeugspezifischen Aspekten etwa von Edlinger [98] für die Pinzgauer Lokalbahn angefertigt wurde, wäre aus diesem Grund zweckmäßig.

Kapitel 9

Reflexion und weiterführender Forschungsbedarf

Durch die thematisch breit gefächerten Grundlagen, auf denen diese Diplomarbeit aufbaut, ist auch der dabei identifizierte weitere Forschungsbedarf vielfältig. Auf eine Reflexion möglicher Schwächen der vorliegenden Arbeit folgt in diesem abschließenden Kapitel eine nach Themen gegliederte Zusammenstellung von offenen Fragestellungen für die Zukunft.

9.1 Reflexion

Im Verlauf der vorliegenden Diplomarbeit konnten die in der Einleitung (vgl. Kapitel 1) formulierten Fragen großteils beantwortet werden. Davon ausgenommen sind die folgenden beiden Themenbereiche:

- Zu einigen Bauarten und Versuchsabschnitten in Deutschland gibt es keine öffentlichen zugänglichen Informationen. Somit ist bei den betroffenen Bauarten nicht nachvollziehbar, aus welchen Gründen diese vom Markt verschwunden sind bzw. sie sich nicht durchsetzen konnten. Im für diese Diplomarbeit zur Verfügung stehenden Zeitraum war es nicht möglich, von der DB AG diesbezügliche Informationen einzuholen.
- Bei mehreren Bauarten der Festen Fahrbahn konnte keine abschließende Aussage über deren Anpassbarkeit für Schmalspurbahnen getroffen werden. Wenn Systeme noch nicht bei Schmalspurweiten eingesetzt wurden, kann die Umsetzung entweder an technischen Gegebenheiten gescheitert sein oder eine Anpassung der Spurweite wurde noch nicht versucht.
 - Bei den Bauarten RHEDA, RHEDA 2000, GETRAC und IVES wäre vor dem Einsatz bei Schmalspurbahnen die Form der Schwellen bzw. Quertragelemente anzupassen. Ob dies wirtschaftlich sinnvoll ist bzw. die anbietenden Unternehmen daran Interesse haben, hängt maßgeblich vom Projektumfang und den daraus folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen ab. Eine definitive allgemeine Aussage ist bezüglich dieser Bauarten daher nicht möglich.
 - Für die Fertigteilplatten-Systeme BÖGL und ÖBB-PORR ist dokumentiert, dass eine Anpassung an verschiedene Spurweiten grundsätzlich möglich ist (vgl. Abschnitte 4.3.5.2 und 4.3.5.3). Ob dies beispielsweise nur für verschiedene Arten der Breitspur oder auch für geringe Spurweiten wie 760 mm gilt, bleibt unbeantwortet. Der Einsatz des Systems BÖGL auf Schmalspurstrecken könnte auch am hohen Gewicht der Fertigteile scheitern, wenn der Einbau nicht von einem Begleitweg oder Nachbargleis aus möglich ist. Die Gleistragplatten der Bauart ÖBB-PORR verfügen in der Gleisachse über eine Vergussöffnung für die schubfeste Verbindung zwischen Platte und Vergussbeton. Falls für diesen Schubsockel aus statischen Gründen eine Mindestbreite erforderlich ist, würde daraus auch eine Mindestspurweite für die Anwendung des

Systems resultieren. Im Zeitrahmen der vorliegenden Diplomarbeit war es leider nicht möglich, diesbezügliche Informationen vom Hersteller einzuholen.

Trotz der soeben beschriebenen noch offenen Fragen liegt mit dieser Diplomarbeit ein ausführliches Grundlagendokument vor, das den aktuellen Stand der Technik umfassend darstellt. Hierauf aufbauend ist die Durchführung von tiefergehenden Recherchen und ergänzenden Untersuchungen möglich. Auch für die Anwendung auf konkrete Strecken und Projekte bildet diese Arbeit eine gute Basis.

Herausforderungen in der Recherche

Innerhalb einzelner Eisenbahninfrastrukturunternehmen oder Planungsbüros liegen zwar viele Informationen und Erfahrungswerte zu den Themen Gleislagequalität und Feste Fahrbahn vor, diese sind jedoch nicht öffentlich verfügbar. Da für die vorliegende Diplomarbeit zuerst eine umfassende Literaturrecherche zur Verarbeitung möglichst vieler publizierter diesbezüglicher Informationen durchgeführt wurde, reichte die verbleibende Zeit nicht mehr aus, um in größerem Umfang fehlende Informationen von Eisenbahninfrastrukturunternehmen sowie aus der Wirtschaft einzuholen. Einige der kontaktierten Unternehmen zeigten großes Interesse an dem bearbeiteten Thema und meldeten sich rasch mit Gesprächsangeboten zurück oder stellten umfangreiche Dokumente zur Verfügung. Mit zunehmender Größe der Unternehmen gestalteten sich die Recherchen jedoch schwieriger.

Erwartete Bedeutung des Themas in der Zukunft

Durch das Fortschreiten des Klimawandels erlangt der Öffentliche Verkehr in Kombination mit allem, was zu seiner Verbesserung beitragen kann, immer mehr gesellschaftliche und politische Relevanz. Nach Jahrzehnten des Sparens nimmt die Investitionsbereitschaft der öffentlichen Hand in Eisenbahninfrastruktur in den meisten europäischen Ländern wieder zu. Dies gilt auch für Schmalspurbahnen, deren Image sich nun vom teuren Relikt aus der Vergangenheit wieder mehr in Richtung regionaler Lebensader, attraktivem Arbeitgeber und Wegbereiter eines nachhaltigeren Tourismus entwickelt.

Da Eisenbahninfrastruktur fast immer von der öffentlichen Hand finanziert wird, sind qualitative wissenschaftliche Grundlagen in diesem Zusammenhang äußerst wichtig, um einerseits einen sinnvollen Einsatz von öffentlichen Geldmitteln zu gewährleisten und andererseits Politik und Bevölkerung von der Richtigkeit einer Investitionsmaßnahme überzeugen zu können.

9.2 Weiterer Forschungsbedarf

9.2.1 Gleislagequalität

Vorhersagemodelle

Die Entwicklung von zuverlässigen Vorhersagemodellen für verschiedene Spurweiten unter anderem mit Hilfe von Fallstudien wie der in Kapitel 3 zitierten Studie von Marchetta et al. [15] befindet sich noch in ihren Anfängen.

Derartige Modelle wären in der Lage, einen wichtigen Beitrag zur wirtschaftlicheren Gestaltung der Instandhaltung von Schmalspurbahnen zu leisten, um auch bei diesen den Übergang von der korrektiven zur voraussagenden Instandhaltung vollziehen zu können. Auch Ahac und Lakušić, die Autoren einer Studie zur Entwicklung der Gleislagequalität bei der Zagreber Straßenbahn, sehen derartige Fallstudien als wichtigen ersten Schritt in diese Richtung [28].

Vergleich verschiedener Oberbauarten

Eine genauere Untersuchung der Performance in der Gleislagensicherung von verschiedenen Oberbauarten (Schwellen- und Besohlungsmaterialien beim Schotteroberbau und diverse Bauarten der

Festen Fahrbahn) in unterschiedlichen Streckensituationen würde wichtige Ergebnisse liefern, mit Hilfe derer in Zukunft fundiertere Entscheidungen für eine wirtschaftliche Oberbaugestaltung möglich wären. Bezüglich des Vergleiches von Holz- und Betonschwellen liegen derzeit widersprüchliche Messergebnisse vor, für Feste Fahrbahnen wurden vermutlich auf Grund ihrer nach wie vor geringen Verbreitung bei Schmalspurbahnen noch keine Studien durchgeführt bzw. veröffentlicht. Zu diesem Zweck wäre eine vertiefte Zusammenarbeit und Koordination von Schmalspurbahn-EIU sowohl untereinander als auch mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen wünschenswert.

9.2.2 Trassierung

Grenzwerte

Eine Anpassung der in Österreich für die Trassierung von Schmalspurbahnen gültigen Regelwerke an den aktuellen Stand der Technik ist auch unter ausschließlicher Betrachtung von Schotteroberbau überfällig. Diese Gelegenheit sollte jedoch auch für eine Einarbeitung von abweichenden Festlegungen für Abschnitte mit Fester Fahrbahn unter Berücksichtigung ihrer trassierungsbezogenen Eigenschaften genutzt werden.

Streckenattraktivierung

Untersuchungen zur Trassierungsoptimierung von Schmalspurbahnen, wie sie etwa von Edlinger in seiner Diplomarbeit [98] für die Pinzgauer Lokalbahn durchgeführt wurden, können Potenziale zur Steigerung der Streckenattraktivität aufzeigen. Im Zuge derartiger Studien können auch die Einbeziehung der trassierungsbezogenen Eigenschaften von Festen Fahrbahnen sowie die Anwendung von Schwerpunktstrassierung zweckmäßig sein.

9.2.3 Verschleiß und Gebrechen

Allgemeinzustand und Alterung von Festen Fahrbahnen

Für eine beträchtliche Anzahl von Bauarten, die im Laufe der Entwicklung von Festen Fahrbahnen errichtet wurden, verfügen nur die jeweiligen Eisenbahninfrastrukturunternehmen über Informationen zum Zustand der Erprobungsabschnitte. Eine vermehrte Publikation von Informationen über die bisherigen Entwicklungen sowie vor allem zum Thema des Langzeitverhaltens verschiedener Bauarten könnte wesentlich zur positiven Weiterentwicklung von FF-Systemen beitragen.

Schienenverschleiß

Die am DB-Projekt zur Systementscheidung zwischen Schotteroberbau und Fester Fahrbahn beteiligten Experten erwarteten zu Beginn der 2000er eine geringere Schienenbeanspruchung durch den Einsatz von Fester Fahrbahn [32]. Die Messungen von Mach [5] ergeben stark radienabhängige Unterschiede im Schienenverschleiß zwischen Schotteroberbau und der FF-Bauart ÖBB-PORR. Durch die weite Verbreitung der Festen Fahrbahn auf normalspurigen Strecken mit großen Radien (Hochgeschwindigkeitsverkehr) ist anzunehmen, dass von den einzelnen Eisenbahninfrastrukturunternehmen zumindest interne diesbezügliche Aufzeichnungen geführt werden.

Da Mach [5] auf Strecken mit Fester Fahrbahn einen zunehmenden Verschleiß bzw. Erhaltungsaufwand bei geringer werdenden Bogenradien beschreibt und kleine Bogenhalbmesser bei Schmalspurbahnen typisch sind, sollten die in der Arbeit beschriebenen, neu errichteten oder derzeit in Ausführung befindlichen Schmalspurbahn-Abschnitte mit Fester Fahrbahn zeitnah für den Beginn von vergleichenden Untersuchungen bei geringeren Spurweiten genutzt werden.

Anfälligkeit für Gebrechen

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Bauarten der Festen Fahrbahn unterscheiden sich in ihrem Aufbau beträchtlich voneinander und neigen hierdurch unter Umständen auch zum Auftreten verschiedener Gebrechen bzw. Versagensmechanismen. Eine umfassende Vergleichsstudie von Art, Häufigkeit und Umfang der bei unterschiedlichen Bauarten der Festen Fahrbahn sowie im selben Zeitraum auf vergleichbaren Strecken mit Schotteroberbau in Erscheinung tretenden Schäden würde die Datengrundlage für die Entscheidungsfindung deutlich verbessern. Für den Fall, dass diesbezügliche Untersuchungen bereits durchgeführt wurden, beschränkten sich diese auf die Netze einzelner Eisenbahninfrastrukturunternehmen und wurden nicht veröffentlicht.

Aus Studien zu diesem Thema ließe sich ggf. auch ableiten, ob bestimmte Bauarten der Festen Fahrbahn anfälliger für unvorhergesehen auftretende Schäden sind als andere.

9.2.4 Errichtung und Abbruch

Unterbauqualität

Die Kosten für die Umrüstung einer Bestandsstrecke von Schotteroberbau auf Feste Fahrbahn hängen stark von der Qualität und Beschaffenheit des Unterbaus und Untergrundes ab. Für eine effiziente Projektabwicklung sollten so früh wie möglich detaillierte Informationen über die Eigenschaften des bestehenden Unterbaus vorliegen. Eine Entwicklung von geeigneten Untersuchungsverfahren, die einen zerstörungsfreien Erkenntnisgewinn ohne Beeinträchtigung des Bahnbetriebs ermöglichen, könnte einen erheblichen Beitrag zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit diesbezüglicher Projekte leisten.

Bauzeit

Durch den geringeren Automatisierungsgrad des Gleisbaus bei weniger verbreiteten Spurweiten wie 760 oder 950 mm benötigen Gleisneulagen unter Verwendung von Schotteroberbau bei diesen Bahnen eine längere Bauzeit als dies bei Normalspur oder Meterspur unter Einsatz von Schnellumbauzügen der Fall wäre.

Ein Vergleich der Bauzeiten und somit der Betriebserscherniskosten bei Anwendung von Schotteroberbau bzw. von verschiedenen Bauarten der Festen Fahrbahn wäre für hiervon betroffene Eisenbahninfrastrukturunternehmen eine relevante Information, anhand derer eine wirtschaftlichere Entscheidung zur Oberbaugestaltung möglich würde. Bei einer derartigen Studie für weniger gängige Schmalspurweiten ist mit einem Ergebnis zu rechnen, welches sich erheblich von dem für Normal- oder Meterspur unterscheidet.

Kostenentwicklung

Der von der DB zu Beginn der 2000er durchgeführte Variantenvergleich der Barwertdifferenzen (vgl. Kapitel 5.3.1.6) stellte die Feste Fahrbahn im Vergleich zum Schotteroberbau als sehr unwirtschaftlich dar. Ein ähnlicher Vergleich unter Verwendung von aktuellen Preisen oder eine Untersuchung der Entwicklung der relevanten Kostenfaktoren über die vergangenen 20 Jahre könnte Informationen darüber bereitstellen, ob eine divergierende Entwicklung der Preise für verschiedene Rohstoffe, Maschinen sowie Arbeit nun zu einem anderen Ergebnis führt.

Recycling und Entsorgung

Unter dem Aspekt von Kreislaufwirtschaft und Umweltbelastung wäre eine vergleichende Untersuchung der Recyclingfähigkeit der verschiedenen Bauarten der Festen Fahrbahn sowie der Möglichkeit bei ihrer Herstellung Recyclingmaterialien einzusetzen äußerst sinnvoll.

Bei Betonstraßen ist die Wiederverwendung des abgebrochenen Betons als Zuschlag für die neue Betondecke bereits weit verbreitet [145]. Im Unterschied hierzu wären bei diesbezüglichen Unter-

suchungen für die Feste Fahrbahn jedenfalls die für den Bahnbetrieb typischen Verschmutzungen, die bereits aus dem Recycling von Oberbauschotter bekannt sind, zu berücksichtigen.

9.2.5 Allgemeines

Stand der Technik

Auch ein aktuelles Fachbuch als Zusammenstellung des gegenwärtigen Standes der Technik ist geradezu überfällig – die letzten Veröffentlichungen mit diesem Anspruch waren *Feste Fahrbahn: Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn* (2006) von Darr und Fiebig [4] und *Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit* (2010) von Lichtberger [2], wobei bei letzterem das Kapitel zu Festen Fahrbahnen seit der ersten Auflage 2003 kaum Änderungen erfahren haben dürfte. Ob und wenn ja in welchem Ausmaß sich einer der zukünftigen Bände von Bernhard Lichtbergers *Das große Handbuch der Gleisinstandhaltung*, dessen erster Band [146] 2022 erschienen ist, mit Festen Fahrbahnen beschäftigen wird, ist zum gegenständlichen Zeitpunkt noch unbekannt.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Streckenverlauf der Nordrampe der Mariazellerbahn (nicht maßstäblich) [25, S. 11]	24
Abb. 4.1	Übersicht über die Bauarten der Festen Fahrbahn	29
Abb. 4.2	Querschnitt des Gleises im Bahnhof Rheda-Wiedenbrück [4, Abb. 5.3] . . .	31
Abb. 4.3	Querschnitt der Bauart RHEDA-Sengeberg [4, Abb. 5.4]	32
Abb. 4.4	Querschnitt der Bauart RHEDA-Breddin-Glöwen [4, Abbildung 5.7]	32
Abb. 4.5	Querschnitt der Bauart RHEDA-Rathenow [4, Abb. 5.12]	33
Abb. 4.6	Querschnitt der Bauart RHEDA-Berlin mit Schutzschienen [4, Abb. 5.13] .	33
Abb. 4.7	Querschnitt der Bauart RHEDA-Berlin für Hochgeschwindigkeitsverkehr [4, Abb. 5.15]	34
Abb. 4.8	Querschnitt der Bauart RHEDA 2000 [4, Abb. 5.17]	34
Abb. 4.9	Querschnitt der Bauart HEITKAMP [4, Abb. 5.26]	35
Abb. 4.10	Querschnitt der Bauart ZÜBLIN [4, Abb. 5.27]	36
Abb. 4.11	Querschnitt der Bauart SBB-BÖZBERG-STEDEF [4, Abb. 5.36]	37
Abb. 4.12	Bauart LVT im Albulatunnel (nicht maßstäblich) [40]	39
Abb. 4.13	Auflegen der Schwellen im Albulatunnel [eigene Aufnahme]	39
Abb. 4.14	Auflegen der Schwellen im Albulatunnel [eigene Aufnahme]	40
Abb. 4.15	Montage der Schienen im Albulatunnel [eigene Aufnahme]	40
Abb. 4.16	Herstellung der Festen Fahrbahn im Albulatunnel [eigene Aufnahmen] . . .	41
Abb. 4.17	Querschnitt der Bauart SATO [4, Abb. 5.45]	43
Abb. 4.18	Querschnitt der Bauart FFYS [4, Abb. 5.46]	44
Abb. 4.19	Querschnitt der Bauart FFBS-ATS-SATO [4, Abb. 5.48]	45
Abb. 4.20	Querschnitt der Bauart ATD [4, Abb. 5.51]	45
Abb. 4.21	Querschnitt der Bauart BTD mit Spannbügelbefestigung [4, Abb. 5.53] . .	46
Abb. 4.22	Querschnitt der Bauart BTD mit Stahldübel-Befestigung [4, Abb. 5.54] . .	46
Abb. 4.23	Querschnitt der Bauart WALTER [4, Abb. 5.56]	46
Abb. 4.24	Querschnitt der Bauart GETRAC A1 [4, Abb. 5.58]	47
Abb. 4.25	Probeaufbau der Bauart GETRAC A3 ohne Einschotterung [44, Abb. 2] .	48
Abb. 4.26	Isometrie der Bauart IVES [47, Abb. 2]	49
Abb. 4.27	Querschnitt der Bauart RASENGLEIS [4, Abb. 5.68]	50
Abb. 4.28	Querschnitt der Bauart HOCHTIEF/SCHRECK-MIEVES/LONGO [4, Abb. 5.70]	51
Abb. 4.29	Querschnitt der Bauart FFC [4, Abb. 5.72]	51
Abb. 4.30	Querschnitt der Bauart BES [4, Abb. 5.78]	52
Abb. 4.31	Querschnitt der Bauart BTE [4, Abb. 5.80]	52
Abb. 4.32	Querschnitt der Bauart NBU [56, S. 2]	53
Abb. 4.33	Querschnitt der Bauart KARLSFELD [4, Abb. 5.84]	54
Abb. 4.34	Querschnitt und Plattenisometrie der Bauart BÖGL [4, Abb. 5.87]	55
Abb. 4.35	Querschnitt und Plattenisometrie der Bauart ÖBB-PORR [4, Abb. 5.92] .	57

Abb. 4.36	Grundriss und Isometrie des japanischen Shinkansen-Systems [63, Abb. 3] .	58
Abb. 4.37	Querschnitt Bauart RhB [65]	59
Abb. 4.38	Schienenlagerung bei der Bauart EDILON [4, Abb. 5.97]	60
Abb. 4.39	Querschnitt der Bauart EDILON [4, Abb. 5.98]	61
Abb. 4.40	Querschnitt der Bauart SFF [4, Abb. 5.103]	62
Abb. 4.41	Querschnitt der Bauart VIBREX [68]	62
Abb. 4.42	Querschnitt der Bauart SAARGUMMI [4, Abb. 5.104]	63
Abb. 4.43	Höhenvergleich der Bauarten	64
Abb. 5.1	Entscheidungsbaum aus dem Projekt der DB (eigene Darstellung gemäß [32, Abb. 6-1])	90
Abb. 6.1	Portal des sanierten Berggütersteintunnels [eigene Aufnahme]	106
Abb. 6.2	Regelquerschnitt der Überströmbereiche der Pinzgauer Lokalbahn (nicht maßstäblich) [70, Abb. 17]	114
Abb. 6.3	Querschnitt des Bahnkörpers im Bereich eines Überquerungskorridors für Amphibien [70, Abb. 22]	115
Abb. 8.1	Querschnitt des Gösingtunnels mit Gewölbesicherung aus Bruchsteinmauerwerk (nicht maßstäblich) [140]	121

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	In dieser Diplomarbeit betrachtete Spurweiten	13
Tab. 3.1	Klasseneinteilung der Studie von Marchetta et al. [15]	20
Tab. 3.2	Schienenprofile in der Studie von Marchetta et al. [15]	20
Tab. 4.1	Vorgefertigte Gleistragplatten der Bauart RhB [64]	59
Tab. 5.1	Vor- und Nachteile von Fester Fahrbahn und Schotteroberbau bzgl. Konstruktion (nach [32], Tabellen 2-1 und 2-2)	72
Tab. 5.2	Vor- und Nachteile von Fester Fahrbahn und Schotteroberbau bzgl. Herstellung (nach [32], Tabelle 2-3)	73
Tab. 5.3	Vor- und Nachteile von Fester Fahrbahn und Schotteroberbau bzgl. Instandhaltung (nach [32], Tabelle 2-4)	73
Tab. 5.4	Ersatzinvestitionen nach 60 Jahren (gem. [32], Tabelle 5-4)	82
Tab. 5.5	In der Variantenrechnung [32] untersuchte Streckenstandards bzw. Belastungsprofile	84
Tab. 5.6	Aufbauhöhen verschiedener FF-Bauarten im Tunnel bei Direktauf Lagerung auf profilgerecht hergestellter Tunnelsohle bzw. Sohlauffüllung	95

Abkürzungsverzeichnis

ATS	Asphalttragschicht
BAV	Bundesamt für Verkehr (Schweiz)
BES	Betontragschicht mit Einzelstützpunkten
BTD	Betontragschicht mit Direktauflagerung
BTE	Betontragschicht mit Einzelstützpunkten
BTS	Betontragschicht
DB	Deutsche Bahn AG
EBA	Eisenbahn-Bundesamt (Deutschland)
EBS	EDILON Corkelast Block-System
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
ESL	Elastische Schwellenlagerung
FF	Feste Fahrbahn
FFC	Feste Fahrbahn Crailsheim
FFS	Fahrzeug-Fahrweg-System
FFYS	Feste Fahrbahn Y-Stahlschwelle
FS	Ferrovie dello Stato Italiane (Italienische Staatseisenbahnen)
FSS	Frostschutzschicht
GETRAC	German Track Corporation
HGT	Hydraulisch gebundene Tragschicht
IVES	Intelligent, Vielseitig, Effizient und Solide
LCC	Lebenszykluskosten
LCT	Low Cost Track
LVT	Low Vibration Track
NBU	Naumburger Bauunion
NÖVOG	Niederösterreichische Verkehrsorganisationsges. m. b. H.
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen AG

OK	Oberkante
PSS	Planumsschutzschicht
RhB	Rhätische Bahn
SATO	Studiengesellschaft Asphalt-Oberbau e. V.
SBB	Schweizerische Bundesbahnen AG
SBV	Schwellen mit Bitumenverguss
SchO	Schotteroberbau
SFF	Schwingungsgedämpfte Feste Fahrbahn
UK	Unterkante

Literatur

- [1] G. Adler. *Lexikon der Eisenbahn*. 6., bearbeitete und ergänzte Auflage. Berlin: Transpress Verlag f. Verkehrswesen, 1981.
- [2] B. Lichtberger. *Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. 3., komplett überarbeitete Neuauflage. Hamburg: Eurailpress, 2010. ISBN: 978-3-7771-0400.
- [3] R. Menius und V. Matthews. *Bahnbau und Bahninfrastruktur*. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020. ISBN: 978-3-658-27732-1. DOI: 10.1007/978-3-658-27733-8.
- [4] E. Darr und W. Fiebig. *Feste Fahrbahn: Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn*. 2. überarbeitete Auflage. VDEI-Schriftenreihe. Hamburg: Eurailpress, 2006. ISBN: 3-7771-0348-8.
- [5] M. Mach. „Zustandsbewertung und Nutzungsdauerprognose von Festen Fahrbahn Systemen im Netz der ÖBB“. Dissertation. Wien: Technische Universität Wien, 2011.
- [6] Plasser & Theurer, Wien (Österreich). „Der Schweißroboter APT 1500 R – ein Technologiesprung bei der mobilen Abbrennstumpfschweißung“. In: *ZEVrail – Sonderausgabe InnoTrans 2012* 136 (2012), S. 86–91.
- [7] S. Rangosch. „Lagestabilität lückenloser Meterspurgleise in kleinen Bogenradien“. Dissertation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1995.
- [8] A. Nottbeck. „Untersuchungen zu Auswirkungen von Geschwindigkeitserhöhungen auf Bahnstrecken im Bestand“. Dissertation. München: Technische Universität München, 2016.
- [9] R. Pospischil. „Auswirkungen einer geänderten Oberbauform auf die Linienführung bei Neu- und Ausbaustrecken“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 40 (Juli 1991), S. 451–457.
- [10] *Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung*. Bern: Bundesamt für Verkehr (BAV), Nov. 2020.
- [11] L. Mitterbauer. „Unfälle an Bahnübergängen passieren oft in gewohnter Umgebung“. In: *NÖN – Niederösterreichische Nachrichten* (4. Mai 2022). URL: <https://www.noen.at/niederosterreich/gesellschaft/verkehrssicherheit-unfaelle-an-bahnuebergang-paessen-oft-in-gewohnter-umgebung-niederosterreich-redaktionsfeed-verkehrssicherheit-verkehrsunfaelle-niederosterreich-bahnen-ludwigschleritzko-barbara-komarek-redaktion-321454477> (abgerufen am 15.06.2023).
- [12] D. Piekenbrock. *Gabler Kompakt-Lexikon Wirtschaft : 4.500 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden*. 10., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Gabler, 2010. ISBN: 3-8349-0155-5.
- [13] C. Zehbold. *Lebenszykluskostenrechnung*. ger. krp-Edition. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH, 1996. ISBN: 978-3-409-12153-8.
- [14] J. Pacht. *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. 11. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2022. ISBN: 978-3-658-38265-0. DOI: 10.1007/978-3-658-38266-7.

- [15] V. Marchetta, A. Di Graziano, I. Soleimanmeigouni und A. Ahmadi. „Railway degradation behaviour analysis in narrow-gauge railways: A local-railway case study“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* (2022). DOI: 10.1177/09544097221136912.
- [16] B. Knoll. „Die Möglichkeit einer Gleisverwerfung bei Schmalspurbahnen in engen Bögen“. Dissertation. Wien: Technische Universität Wien, 1998.
- [17] L. Ferreira und M. H. Murray. „Modelling rail track deterioration and maintenance: current practices and future needs“. In: *Transport Reviews* 17 (März 1997), S. 207–221. DOI: 10.1080/01441649708716982.
- [18] N. Lyngby. „Railway Track Degradation: Shape and Influencing Factors“. In: *International Journal of Performability Engineering* 5 (Jan. 2009), S. 177–186.
- [19] *DIN EN 13848-1:2019 06: Bahnanwendungen – Oberbau – Gleislagequalität – Teil 1: Beschreibung der Gleisgeometrie*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2019.
- [20] *DIN EN 13674-4:2020 02: Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen – Teil 4: Vignolschienen mit einer längenbezogenen Masse zwischen 27 kg/m und unter 46 kg/m*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Feb. 2020.
- [21] *DIN EN 13674-1:2017 07: Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen – Teil 4: Vignolschienen ab 46 kg/m*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Juli 2017.
- [22] E. Steiner und M. Krueger. „Verwerfungssichere durchgehend verschweißte Schmalspurgleise bei der Mariazellerbahn der Niederösterreich Bahnen (NÖVOG)“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 9 (Sep. 2022), S. 136–143.
- [23] B. Bopp, P. Braess und U. Weidmann. „Lückenlos verschweißte Gleise in kleinen Radien der Meterspur“. In: *EIK – Eisenbahningenieurkompendium* (2017), S. 241–258.
- [24] ORF Niederösterreich. *Mariazellerbahn: Weiße Schienen gegen Hitzeschäden*. Juli 2021. URL: <https://noe.orf.at/stories/3114483/> (abgerufen am 23.05.2023).
- [25] H. Felsinger und W. Schober. *Die Mariazellerbahn*. 3., erweiterte Auflage. Wien: Pospischil, 2002.
- [26] G. Mackinger. „Bau und Betrieb der Mariazellerbahn“. In: *Mariazell, Mariazellerland und die Mariazellerbahn*. Hrsg. von G. Artl, R.-H. Gröger und G. Gürtlich. 2. erweiterte Auflage. Wien: Verlag Holzhausen GmbH, 2018, S. 211–224. ISBN: 978-3-903207-29-5.
- [27] *R RTE 22541: Lückenlos verschweisstes Gleis (LVG), lückenlos verschweisste Weichen und verlaschte Gleise für Meterspur - Anforderungen an den regelkonformen Zustand des LVG im Schottergleis*. Bern: Verband öffentlicher Verkehr (VÖV), Juni 2006.
- [28] M. Ahac und S. Lakušić. „Track Gauge Degradation Modelling on Small Urban Rail Networks: Zagreb Tram System Case Study“. In: *Urban Transport Systems*. Hrsg. von H. Yaghoubi. London: IntechOpen, 18. Jan. 2017. ISBN: 978-953-51-2874-8. DOI: 10.5772/65086.
- [29] R. Steinegger, T. P. Lang, A. Hamprecht, P. Güldenapfel und P. Ablinger. „Systementscheidung Feste Fahrbahn versus Schotteroberbau für die Schweizerische Bundesbahn“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 54 (Juni 2005), S. 348–354.
- [30] G. Leykauf und L. Mattner. „Feste Fahrbahn mit Asphalttragschicht“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 49 (Aug. 1998), S. 36–42.

- [31] G. Oberweiler. „Die Feste Fahrbahn - Eine kritische Zwischenbilanz nach 30 Jahren Forschung, Entwicklung und Erfahrung“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 51 (Jan. 2002), S. 68–74.
- [32] *Systementscheidung Schotteroberbau oder Feste Fahrbahn*. 3. Auflage. Berlin: ifv-Bahntechnik, 2003. ISBN: 3-9809335-0-4.
- [33] J. Eisenmann, B. Duwe, U. Lempe, G. Leykauf und L. Steinbeißer. „Entwicklung, Bemessung und Erforschung des schotterlosen Oberbaues „Rheda““. In: *AET – Archiv für Eisenbahntechnik* 34 (1979), S. 23–41.
- [34] G. Leykauf. „Vorgefertigte Platten und Rahmen für die Feste Fahrbahn“. In: *ZEV + DET Glasers Annalen* 123 (Juni 1999), S. 221–228.
- [35] E. Jänsch. „Hochgeschwindigkeitssysteme: Blick auf China“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 9 (Sep. 2018), S. 80–85.
- [36] Y. Hu. „Fertigstellung der Teststrecke Wuhan“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Mai 2010), S. 21–24.
- [37] M. Mißler. „Feste Fahrbahnen im Streckennetz der Deutschen Bahn AG - Wechselspiel zwischen Betriebserprobung und Weiterentwicklung“. In: *EIK – Eisenbahningenieurkalender* (2005), S. 61–82.
- [38] L. Laborenz, W. Stahl und T. Silbermann. „50 Jahre Feste Fahrbahn in der Schweiz - Die Entwicklung der Festen Fahrbahn in der Schweiz - von der ersten Idee bis zum Einbau im längsten Eisenbahntunnel der Welt“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Nov. 2014), S. 32–35.
- [39] C. Hofmann und G. Hejda. „Feste Fahrbahn bei den SBB“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 49 (Apr. 1998), S. 52–56.
- [40] Ingenieurbuereau Heierli AG im Auftrag der Rhätischen Bahn AG. *Plan Nr. 3018.51: Neubau Albulatunnel II, Ausführungsprojekt, Los 410 Feste Fahrbahn – Detail Feste Fahrbahn*. Chur, Feb. 2023.
- [41] T. Wenzel, H.-C. Rossmann, M. König und W. Fahrnberger. „Feste Fahrbahn im Winter – Wie Deutsche Bahn und die zuständige ARGE den Streckenabschnitt zwischen Wittenberg und Halle bei Kälte, Schnee und innerhalb kürzester Zeit ertüchtigt haben.“ In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Sep. 2018), S. 116–119.
- [42] Jö. Frenzel und Jü. Frenzel. „Vier Jahrzehnte Feste Fahrbahn System Sato auf Asphalttragschicht“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Sep. 2010), S. 54–62.
- [43] W. Antlauf und N. Dotzer. „Gleiserneuerung der Teilstrecke Roitzsch-Hohenthurm – Wiederherstellung der Streckenverfügbarkeit in Rekordzeit“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Okt. 2013), S. 69–71.
- [44] A. Koletzko, M. Plath und L. Vogt. „Ressourcenschonung durch Weiternutzung des Eisenbahnunterbaus – Erneuerung eines Streckenabschnitts der Eisenbahnstrecke Halle-Bitterfeld mit Fester Fahrbahn mit Weiternutzung des Unterbaus sowie Teilen des Oberbaus“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Mai 2021), S. 10–12.
- [45] S. Freudenstein und B. Ripke. „Feste Fahrbahn auf Asphalt – System GETRAC nach 10 Jahren Betrieb“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* (Sep. 2007), S. 539–544.
- [46] PCM RAILONE AG. *Referenzen – Feste-Fahrbahn-Projekte im Fern- und Nahverkehr*. URL: https://www.railone.de/fileadmin/daten/05-presse-medien/downloads/referenzen/20210423_referenzen_DE.pdf (abgerufen am 11.06.2023).

- [47] W. Krumnow, G. Gabler, S. Roth, N. Wiethoff und T. Dülsner. „Das FF-System IVES kombiniert die Vorteile gängiger FF-Systeme“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Nov. 2021), S. 28–31.
- [48] H. J. Henze und M. Siemsen. „Zur Geschichte des „Grünen Gleises““. In: *EIK – Eisenbahningenieurkalender* (2004), S. 125–139.
- [49] J. Eisenmann. „Feste Fahrbahn auf Erdkörper – Anmerkungen zum Entwurf und Bau einer Festen Fahrbahn auf Erdkörper“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 48 (Jan. 1997), S. 33–37.
- [50] A. von Wilcken, W. Fleischer und H. Lieschke. „Neue Feste Fahrbahn-Systeme in Betonbauweise“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 53 (Okt. 2002), S. 73–81.
- [51] K. Dickhut und E. Richter. „Feste Fahrbahn – Hochtier/Schreck-Mieves“. In: *Edition ETR: Feste Fahrbahn*. Hrsg. von R. Heinisch, R. Kracke, E. Lehmann, T. Rahn und H. Stuchly. Darmstadt: Hestra-Verlag, 1997, S. 88–89. ISBN: 3-7771-0269-5.
- [52] L. Mattner und H. Freystein. „Zulassung von Bauarten im Oberbau durch das Eisenbahn-Bundesamt – Beispiel Feste Fahrbahn der Neubaustrecke Köln-Rhein/Main“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 53 (Aug. 2002), S. 5–17.
- [53] D. Kočan. „Reparaturverfahren für Feste Fahrbahn-Systeme“. In: *EIK – Eisenbahningenieurkalender* (2005), S. 83–102.
- [54] H. Widmann. „Feste Fahrbahn Bauart Züblin“. In: *Edition ETR: Feste Fahrbahn*. Hrsg. von R. Heinisch, R. Kracke, E. Lehmann, T. Rahn und H. Stuchly. Darmstadt: Hestra-Verlag, 1997, S. 106–107. ISBN: 3-7771-0269-5.
- [55] D. Pietschmann, J. Wolf und H. Sante. „Innovative Feste Fahrbahn System NBU“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 54 (Apr. 2005), S. 197–200.
- [56] ThyssenKrupp GfT Gleistechnik GmbH. *Feste Fahrbahn ‚System NBU‘ – Konzept, Ausführung und Dokumentation*. URL: https://www.naumburger-bauunion.de/wp-content/uploads/2015/07/NBU_D.pdf (abgerufen am 12.06.2023).
- [57] Eisenbahn-Bundesamt. *Antrag auf Verlängerung der Zulassung zur Betriebserprobung für die Bauart der Festen Fahrbahn ‚System NBU‘ – Bescheid*. URL: <https://www.feste-fahrbahn.eu/images/pdf/100416-Verlaengerung-der-Zulassung-zur-Betriebserprobung.pdf> (abgerufen am 12.06.2023).
- [58] Eisenbahn-Bundesamt. *Antrag auf Zulassung zur Betriebserprobung für das Feste Fahrbahn System NBU 2012 - im Tunnel - unbewehrt, befahrbar – Bescheid*. URL: <https://www.naumburger-bauunion.de/wp-content/uploads/2018/05/170619-Zulassung-Betriebserprobung-FF-NBU-Tunnel-unbewehrt-befahrbar-EBA-vom-13.06.2017.pdf> (abgerufen am 12.06.2023).
- [59] Eisenbahn-Bundesamt. *Antrag auf Zulassung zur Betriebserprobung für das Feste Fahrbahn System NBU 2012 auf Erdkörper und im Tunnel - bewehrt, nicht befahrbar – Bescheid*. URL: <https://www.naumburger-bauunion.de/wp-content/uploads/2018/05/170619-Zulassung-Betriebserprobung-FF-NBU-Tunnel-bewehrt-nicht-befahrbar-EBA-vom-13.06.2017.pdf> (abgerufen am 12.06.2023).
- [60] Eisenbahn-Bundesamt. *Antrag auf Zulassung zur Betriebserprobung für das Feste Fahrbahn System NBU 2012 auf Erdkörper und im Tunnel - bewehrt, befahrbar – Bescheid*. URL: <https://www.naumburger-bauunion.de/wp-content/uploads/2018/05/170619-Zulassung-Betriebserprobung-FF-NBU-Tunnel-bewehrt-befahrbar-EBA-vom-13.06.2017.pdf> (abgerufen am 12.06.2023).

- [61] D. Wolf, M. Kresse, C. Klein und M. Künsting. „Die Feste Fahrbahn des Großprojekts VDE 8.1 und deren Bauüberwachung“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau – VDE Spezial* (Dez. 2017), S. 56–59.
- [62] „Ersteinsatz der Festen Fahrbahn Bögl in Israel“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* (Jan.–Feb. 2019), S. 70.
- [63] R. Bastin. „Development of German non-ballasted track forms“. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport* 159 (Feb. 2006), S. 25–39. DOI: 10.1680/tran.2006.159.1.25.
- [64] Ingenieurbüreau Heierli AG im Auftrag der Rhätischen Bahn AG. *Plan Nr. RhB 3440-0127.4: Brailtunnel II – Km 113.481 - Km 113.790 – Detailprojekt – Feste Fahrbahn – Statische Nachweise*. Chur, Apr. 2023.
- [65] Ingenieurbüreau Heierli AG im Auftrag der Rhätischen Bahn AG. *Plan Nr. RhB 3440-0121.4: Brailtunnel II – km 113.481 - km 113.789 – Detailprojekt – Querprofile Fahrbahn*. Chur, Apr. 2023.
- [66] Ingenieurbüreau Heierli AG im Auftrag der Rhätischen Bahn AG. *Plan Nr. RhB 3440-0221.1 A: Brailtunnel II – km 113.481 - km 113.789 – Detailprojekt – Feste Fahrbahn – GTP Typ RhB-1 (4-Pkt.-Platte, vorfabriziert)*. Chur, Apr. 2023.
- [67] Ingenieurbüreau Heierli AG im Auftrag der Rhätischen Bahn AG. *Plan Nr. RhB 3440-0221.2 A: Brailtunnel II – km 113.481 - km 113.789 – Detailprojekt – Feste Fahrbahn – GTP Typ RhB-2 (6-Pkt.-Platte, vorfabriziert)*. Chur, Apr. 2023.
- [68] ORTEC Gesellschaft für schienentechnische Systeme mbH. *System VIBREX*. URL: <https://www.ortec-gmbh.de/index.php/de/produkte/system-vibrex> (abgerufen am 24.05.2023).
- [69] ORTEC Gesellschaft für schienentechnische Systeme mbH. *Referenzliste – Kontinuierlich elastische Schienenlagerung – "Kopfschiene" – ORTEC-Flüsterschiene – System VIBREX*. URL: <https://www.ortec-gmbh.de/index.php/de/produkte/system-vibrex> (abgerufen am 24.05.2023).
- [70] Amt der Salzburger Landesregierung – Abteilung 6 – Referat 6/12 „Öffentlicher Verkehr und Verkehrsplanung“. *Plan Nr. PLB 22 - 01 - 01: Pinzgauer Lokalbahn – Wiederaufbau 2022 – Niedernsill - Uttendorf – km 15,280 - 21,475 – Technischer Bericht*. Salzburg, Mai 2022.
- [71] B+S AG. *Appenzeller Bahnen AG: Durchmesserlinie Trogen–St. Gallen–Appenzell*. 2018. URL: <https://www.bs-ing.ch/dienstleistungen/fachkompetenzen/projekt-2294> (abgerufen am 05.06.2023).
- [72] Appenzeller Bahnen AG. *Die Geschichte der einzelnen Linien: Linie Trogen - St. Gallen - Appenzell*. URL: <https://appenzellerbahnen.ch/de/unternehmen/auftrag/geschichte/geschichte.html> (abgerufen am 05.06.2023).
- [73] Rhätische Bahn AG. *Aktuelles*. URL: <http://albulatunnel.rhb.ch/de/ausgabe/albulatunnel/aktuelles.html> (abgerufen am 05.06.2023).
- [74] C. Linder, C. Lackhove und R. Schenkendorf. „Prognoseverfahren zur Gleislageabweichung bei Einzelfehlern“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Feb. 2014), S. 17–20.
- [75] *DIN EN 13848-5:2017 10: Bahnanwendungen – Oberbau – Qualität der Gleisgeometrie – Teil 5: Geometrische Qualitätsstufen – Gleise, Weichen und Kreuzungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Okt. 2017.

- [76] „Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union“. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* Nr. L 356 (Dez. 2014), S. 1.
- [77] „Durchführungsverordnung (EU) 2019/776 der Kommission vom 16. Mai 2019 zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 321/2013, (EU) Nr. 1299/2014, (EU) Nr. 1301/2014, (EU) Nr. 1302/2014, (EU) Nr. 1303/2014 und (EU) 2016/919 der Kommission sowie des Durchführungsbeschlusses 2011/665/EU der Kommission im Hinblick auf die Angleichung an die Richtlinie (EU) 2016/797 des Europäischen Parlaments und des Rates und Umsetzung der in dem Delegierten Beschluss (EU) 2017/1474 der Kommission festgelegten spezifischen Ziele“. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* Nr. L 139 I (Mai 2019), S. 108.
- [78] O. Kraft. „Erfahrungen der Deutschen Bahn AG mit der Festen Fahrbahn - 40 Jahre nach Einbau der ersten Festen Fahrbahn kann nun auch ein Resümee aus Sicht des Infrastrukturbetreibers gezogen werden.“ In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Juni 2012), S. 12–15.
- [79] H. Koriath, A. Hamprecht, H. Huesmann und P. Ablinger. „Objektivierung der Systementscheidung Schotteroberbau versus Feste Fahrbahn bei der DB AG“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 52 (März 2003), S. 113–122.
- [80] *DB Richtlinie 413.03.01: Streckenstandards*. Karlsruhe: DB Kommunikationstechnik GmbH, Jan. 2022.
- [81] *Richtlinie: Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln*. Deutschland: Eisenbahn-Bundesamt, Juli 2008.
- [82] *ÖBB Regelwerk 10.01.09: Tunnelsicherheit*. Wien: Selbstverlag der ÖBB Infrastruktur AG, Apr. 2023.
- [83] J. Blieberger, A. Meyer und J. Pospichal. *Schmalspurig durch Alt-Österreich*. 1. Auflage. bahnmedien.at. Bildband. Wien: bahnmedien.at, 2022. ISBN: 3-903177-38-5.
- [84] P. Belloncle, G. Brüngger, R. Grossenbacher und C. Müller. *Das grosse Buch der Rhätischen Bahn : 1889 - 2001*. Kerzers: viafer, 2002. ISBN: 3-9522494-0-8.
- [85] W.-D. Machel. *Enzyklopädie der deutschen Schmalspurbahnen: Geschichte, Strecken, Fahrzeuge*. München: GeraMond, 2011. ISBN: 3-86245-101-1.
- [86] C. Mayer. „Normalbauweise für die Bahntunnelerneuerung - Schweizer Schmalspur-Gebirgsbahn hat Regelbauverfahren für die Tunnelinstandsetzung entwickelt.“ In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Nov. 2017), S. 16–20.
- [87] *DIN 31051:2019 06: Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 2019.
- [88] W. Haas, H. Moshhammer, R. Muttarak und O. Koland. *Österreichischer Special Report Gesundheit, Demographie und Klimawandel (ASR18)*. 1. Auflage. Wien: Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2019. ISBN: 978-3-7001-8427-0.
- [89] R. Beier. „Schienenverkehr aktuell – Salzburg AG – Wiederaufbau der PLB verzögert sich“. In: *Eisenbahn Österreich* (Okt. 2022), S. 548.
- [90] Statistisches Bundesamt (Deutschland). *Inflationsrate in Deutschland von 1950 bis 2022*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/4917/umfrage/inflationsrate-in-deutschland-seit-1948/> (abgerufen am 04.06.2023).

- [91] Österreichische Nationalbank. *Entwicklung des Kapitalmarktzinssatzes in Deutschland in den Jahren von 1975 bis 2022*. 2023. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/201419/umfrage/entwicklung-des-kapitalmarktzinssatzes-in-deutschland/> (abgerufen am 04.06.2023).
- [92] H. Huesmann, E. Lay, H. Bente und I. Levkov. „Feste Fahrbahn und Schotteroberbau - Entwicklung eines Bewertungsverfahrens für NBS“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 52 (März 2003), S. 123–129.
- [93] G. Presle, M. Boyer und A. Hahn. „Der Wiener Bogen in der Erhaltung der Gleisinfrastruktur der ÖBB“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 3 (März 2007), S. 135–140.
- [94] *B 51/P Oberbauvorschrift für Österreichische nicht vom Bunde betriebene Haupt- und Nebenbahnen*. Wien, Feb. 1958.
- [95] *B 51 Oberbauvorschrift*. Wien: Selbstverlag der Österreichischen Bundesbahnen, Jan. 1980.
- [96] *B 52 Oberbau - Technische Grundsätze*. Wien: Selbstverlag der Österreichischen Bundesbahnen, März 1986.
- [97] A. Dähling. „Bescheid für Bahnanbindung in Rohrberg ist in Reichweite“. In: *Tiroler Tageszeitung* (14. Mai 2022). URL: <https://www.tt.com/artikel/30820171/bescheid-fuer-bahnanbindung-in-rohrberg-ist-in-reichweite> (abgerufen am 20.04.2023).
- [98] S. Edlinger. „Variantenvergleich und Ausarbeitung Betriebskonzept für die Lokalbahn Zell am See - Kaprun“. Diplomarbeit. Wien: Technische Universität Wien, 2020.
- [99] D. Nürnberger. „Erfolgreiche Weichenstellung? – Die Privatisierung der Bahn 1994“. In: *Deutschlandfunk* (1. Jan. 2019). URL: <https://www.deutschlandfunk.de/erfolgreiche-weichenstellung-die-privatisierung-der-bahn-100.html> (abgerufen am 06.06.2023).
- [100] H. Hasslinger. „Eine moderne Trassierungsvorschrift mit optimaler Regelüberhöhung“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 56 (Okt. 2005), S. 47–52.
- [101] *ÖBB Regelwerk 01.03: Entwerfen von Bahnanlagen – Linienführung von Gleisen*. Wien: Selbstverlag der ÖBB Infrastruktur AG, Sep. 2016.
- [102] R. Hierzer und M. Ossberger. „Trassenoptimierung von U-Bahn Bestandsstrecken mit dem Wiener Bogen“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 3 (März 2007), S. 134–139.
- [103] G. Presle und W. Zottl. „Eisenbahnforschungsprojekte in der ÖBB-Infrastruktur AG“. In: *EIK – Eisenbahningenieurkompendium* (2012), S. 256–270.
- [104] M. Weigend. „Trassierung und Gleisplangestaltung“. In: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Hrsg. von L. Fendrich und W. Fengler. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg / Springer-Verlag GmbH, 2019, S. 639–672. ISBN: 978-3-662-56061-7. DOI: 10.1007/978-3-662-56062-4.
- [105] M. Weigend. „Ist die aktuelle Trassierungstechnik noch zeitgemäß für die moderne Bahn?“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* (Okt. 2007), S. 612–618.
- [106] *ÖBB Regelwerk 07.05.01: Oberbau – Feste Fahrbahn*. Wien: Selbstverlag der ÖBB Infrastruktur AG, Feb. 2022.
- [107] Rhomberg Sersa Rail Holding GmbH. *GZU St. Pölten, Westabschnitt*. Apr. 2017. URL: <https://www.rhomberg-sersa.com/de/referenzen/gzu-westabschnitt-knotenrohr> (abgerufen am 27.04.2023).

- [108] FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH. *Feste Fahrbahn und MFS Koralmbahn Abschnitt Mittlern-Althofen*. Juli 2022. URL: <https://www.fcp.at/de/news/projekt-des-monats/koralmbahn-abschnitt-mittlern-althofen> (abgerufen am 27.04.2023).
- [109] Eidgenössisches Departement für Auswärtige Angelegenheiten. *Geografie – Fakten und Zahlen*. Apr. 2023. URL: <https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/de/home/umwelt/geografie/geografie---fakten-und-zahlen.html> (abgerufen am 02.05.2023).
- [110] P. Mikulášek. „Rekonstrukce Střelenského Tunelu – Strelna Tunnel Reconstruction“. In: *Tunel* 23 (Jan. 2014), S. 63–70.
- [111] J. Strupi Šuput, A. Mladenovič, L. Černilogar und V. Olenšek. „Deterioration of mortar caused by the formation of thaumasite on the limestone cladding of some Slovenian railway tunnels“. In: *Cement and Concrete Composites* 25.8 (2003). Thaumasite in Cementitious Materials, S. 1141–1145. ISSN: 0958-9465. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00144-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00144-6).
- [112] W. Kradolfer. „Instandsetzung und Erneuerung von alten Bahntunneln – Technische Lösungen und Erfahrungen bezogen auf das Schienennetz der Schweiz“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Okt. 2016), S. 10–15.
- [113] Rhomberg Sersa Rail Holding GmbH. *Instandsetzung Gletscherastunnel*. Dez. 2016. URL: <https://www.rhomberg-sersa.com/de/referenzen/gletscherastunnel-tunnelinstandsetzung> (abgerufen am 29.05.2023).
- [114] K. Grossauer, F. Modetta und U. Tanner. „Die „Normalbauweise Tunnel“ der Rhätischen Bahn“. In: *Geomechanics and Tunneling* 10.5 (2017), S. 542–550. DOI: 10.1002/geot.201700029.
- [115] Rhätische Bahn AG. *Normalbauweise Tunnel – Die RhB als Vorreiterin*. URL: <https://www.rhb.ch/de/unternehmen/projekte-dossiers/normalbauweise-tunnel> (abgerufen am 29.05.2023).
- [116] C. Raguth Tschärner. „Der Gletscherastunnel ist fertig saniert“. In: *suedostschweiz.ch* (17. Mai 2017). URL: <https://www.suedostschweiz.ch/aus-dem-leben/2017-05-10/der-gletscherastunnel-ist-fertig-saniert> (abgerufen am 09.06.2023).
- [117] Rhätische Bahn AG. *Totalsperre Sasslatschtunnel aufgehoben*. URL: <https://www.rhb.ch/de/medien/medienmitteilungen/details/totalsperre-sasslatschtunnel-aufgehoben> (abgerufen am 09.06.2023).
- [118] O. Christoffel AG Hoch- und Tiefbau. *Solis - Tiefencastel Mistailtunnel - Instandsetzung*. 2020. URL: https://www.hartmann-bau.ch/referenz-pdf-detail?firma=oc&ref_id=952&cHash=b2f3bad8e73cd9e455c98520cdc5ce38 (abgerufen am 09.06.2023).
- [119] Rhomberg Sersa Rail Holding GmbH. *Eine gute Lösung verbessert*. März 2021. URL: <https://www.rhomberg-sersa.com/de/news/eine-gute-loesung-verbessert> (abgerufen am 29.05.2023).
- [120] Basler & Hofmann AG. *Gletscherastunnel: Instandsetzung eines 100 Jahre alten Denkmals*. URL: <https://www.baslerhofmann.ch/projekte/details/gletscherastunnel-instandsetzung-eines-100-jahre-alten-denkmals.html> (abgerufen am 09.06.2023).
- [121] T. Zieger, H. Rahimi und P. Hengartner. „Großprojekt neuer Bözbergtunnel – Das größte Einzelprojekt des 4-Meter-Korridors geht Ende 2020 in Betrieb.“ In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Nov. 2020), S. 12–16.

- [122] Rhätische Bahn AG. *Zahlen und Fakten zum neuen Albulatunnel*. URL: <http://albulatunnel.rhb.ch/de/ausgabe/albulatunnel/zahlen-und-fakten-zum-neuen-albulatunnel.html> (abgerufen am 09.06.2023).
- [123] PORR Bau GmbH. *Referenzliste – Geeignet für Hochgeschwindigkeits-, Vollbahn- und U-Bahnanwendungen*. URL: <https://slabtrackaustria.com/de/referenzliste/> (abgerufen am 29.05.2023).
- [124] H.-P. Brunotte und H. Steiger. „Neuer Mainzer Tunnel“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 49 (Sep. 2000), S. 606–614.
- [125] G. Brux. „Erneuerung der Alten Mainzer Tunnel“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Juli 2009), S. 34–36.
- [126] W. Fiebig. *GETRAC A3*. URL: <https://fiebig.com/getrac-spezial/getrac-a3/> (abgerufen am 31.05.2023).
- [127] U. Wedler, L. Dauwe und W. Rahn. „Zweigleisiger Ausbau am Hoahrhein – Geotechnische Aspekte“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 52 (Sep. 2001), S. 43–47.
- [128] B. Gruhn, C. Thomar und J. Kuligk. „Die Feste Fahrbahn am Hoahrhein“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 52 (Juni 2001), S. 39–44.
- [129] J. Weißer. „Ausbau der Hoahrheinbahn Basel Bad Bf-Erzingen“. In: *LOK Report* (Nov. 2020), S. 4–13.
- [130] M. Vonberg. „Der Rappensteintunnel ist der Knackpunkt bei der Elektrifizierung der Hoahrheinbahn“. In: *Südkurier* (9. Apr. 2019). URL: <https://www.suedkurier.de/region/hoahrhein/laufenburg/Der-Rappensteintunnel-ist-der-Knackpunkt-bei-der-Elektrifizierung-der-Hoahrheinbahn;art372611,10111500> (abgerufen am 31.05.2023).
- [131] W. Spaan. „Neubau des Buschtunnels Aachen“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* (Jan. 2009), S. 8–10.
- [132] G. Holsten und G. Wengemann. „Baumaßnahmen Aachen Hbf–Landesgrenze der ABS Köln–Aachen“. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 53 (Jan. 2004), S. 37–44.
- [133] S. von der Ruhren. *Der Aachener Buschtunnel*. URL: <https://www.vonderruhren.de/aachenbahn/seiten/buschtun.php> (abgerufen am 31.05.2023).
- [134] G. Walter. „Brandleitetunnel bei Oberhof“. In: *EI – Der Eisenbahningenieur* 56 (Aug. 2005), S. 78–81.
- [135] müller + hereth – Ingenieurbüro für Tunnel- und Felsbau GmbH. *Referenzvorhaben Straßen- und Eisenbahntunnel in Thüringen und Sachsen – Sanierung Brandleitetunnel*. 2004. URL: <https://www.mueller-hereth.com/cdn/uploads/1283-brandleitetunnel-d-1.pdf> (abgerufen am 31.05.2023).
- [136] D. Nürnberger. „Bahn: Sanierung des Brandleitetunnels fällt aus“. In: *inSüdthüringen.de* (4. Aug. 2020). URL: <https://www.insuedthueringen.de/inhalt.thueringen-bahn-sanierung-des-brandleitetunnels-faellt-aus.8b7a1ec3-402c-4743-a92d-617443d31071.html> (abgerufen am 31.05.2023).
- [137] Land Salzburg. *Start zum Wiederaufbau der Pinzgauer Lokalbahn*. URL: <https://service.salzburg.gv.at/lkorrj/detail?nachrid=66771> (abgerufen am 07.06.2023).

- [138] P. Lokalbahn und S. AG. *Fahrplan R 33 & 230, Zell am See Lokalbahn - Krimml und Krimml - Zell am See Lokalbahn, gültig ab 11.12. 2022 bis auf Weiteres - Schienenersatzverkehr ab Niedernsill*. Dez. 2022. URL: https://www.pinzgauerlokalbahn.at/content/dam/websites/pinzgauerlokalbahn/Downloads/Fahrplan_Krimml_2023_Hochwasser_Fahrradverkehr_neu.pdf (abgerufen am 20.04.2023).
- [139] UNDRR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction. *Terminology – Resilience*. URL: <https://www.preventionweb.net/terminology/resilience> (abgerufen am 15.06.2023).
- [140] R.B.D. (Reichsbahndirektion) Wien Dez. 41. *Plan: Ausmauerung des Gösingtunnels von km 64,844 bis km 64,955*. Wien, Juni 1939.
- [141] N. V. (NÖVOG). *Mariazellerbahn - Fahrplan & Angebote, St. Pölten Hbf. - Mariazell, gültig von 11. Dezember 2022 bis 9. Dezember 2023*. Okt. 2022. URL: <https://www.mariazellerbahn.at/action/download?id=%7B834a59b6-6a57-d572-a48f-d4ba785ddae8%7D> (abgerufen am 20.04.2023).
- [142] Bundesbahndirektion Wien – Abteilung II/2a-w. *Plan Nr. 75: Entwässerung und Abdichtung von Wasseraustrittsstellen im Gösingtunnel. km 66,335 u. km 66,450 l.d.B. der Strecke St. Pölten – Gußwerk*. Wien, Apr. 1949.
- [143] R.B.D. (Reichsbahndirektion) Wien Dez. 41. *Plan: Ausmauerung des Gösingtunnels 1939/40 – Skizze für die Gewölbeabdichtung*. Wien, Nov. 1939.
- [144] Niederösterreichische Verkehrsorganisationsges.m.b.H. (NÖVOG). *Die Geschichte der Mariazellerbahn*. URL: <https://www.mariazellerbahn.at/geschichte-mariazellerbahn> (abgerufen am 14.06.2023).
- [145] H. Bermel. „Recycling von Betondecken“. In: *Straße+Autobahn* 54 (Jan. 2003), S. 5–7.
- [146] B. Lichtberger. *Das große Handbuch der Gleisinstandhaltung – Band 1*. 1. Auflage. Ahrensburg: tredition, 2022. ISBN: 978-3-347-69311-1.