

LO 2025 P4 4.1

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur

Projekt: 4 Fahrbahnsteifigkeit

Modul: 3 Vademecum Fahrbahn - Best-Practice-Anwendung der Fahrbahnprodukte für die massgebenden Anwendungsfälle bei den Meterspurbahnen

Vademecum Fahrbahn



ID:	RAILPlusSF-00061	LO in BAV Detailziel
Datum / Status:	20.11.2025 / Freigegeben	Seitenanzahl 47
Öffentlichkeitsgrad	RAILplus-Mitglieder (Partner Bahnen)	
Verfasser:	Albin Gehriger / Appenzeller Bahnen AG Dr. Matthias Landgraf / evias rail consulting	
Geprüft:	Markus Barth / RAILplus Martin Siegen / MGBahn	
Freigegeben:	Martin Siegen / MGBahn	

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Datum	Verantwortlich
1.0	02.12.2025	Technical Board
1.0	11.12.2025	Management Board

Management Summary

Für Meterspurbahnen ist die wirtschaftliche Auswahl von Fahrbahnbauteilen ein zentraler Hebel, um die Lebenszykluskosten zu optimieren und die Systemstabilität sicherzustellen. Unterschiedliche Komponentenstrategien, steigende Anforderungen an Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit sowie begrenzte Ressourcen machen eine fundierte, harmonisierte Entscheidungsbasis erforderlich. Das Vademecum bündelt Erkenntnisse aus Analysen, Praxis und Simulationen im Rahmen der Systemführerschaft „Interaktion Fahrzeug/Fahrweg“. Es richtet sich an Fachleute, die strategische und operative Entscheidungen zur Fahrbahn treffen.

Die Untersuchungen zeigen: Die Wahl der Schienengüte, der Schwellenart und der Zwischenlage hat massgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, das Fahrverhalten und den Instandhaltungsaufwand. Höherfeste Schienen verringern Verschleiss und den Aufwand für die Schienenoberflächenpflege, während optimierte Schwellen- und Zwischenlagenkonzepte die Belastung des Unterbaus und die Dynamik im System deutlich reduzieren. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer abgestimmten Komponentenstrategie, die technische und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt.

Die nachfolgenden Empfehlungen bilden den Kern der ausgearbeiteten Komponentenstrategie. Sie geben den Bahnen eine klare Orientierung darüber, wie durch eine gezielte Materialwahl und eine abgestimmte Systemoptimierung die Lebenszykluskosten gesenkt, die Betriebssicherheit erhöht und die Instandhaltung sowohl reduziert als auch planbarer gestaltet werden kann. Die Strategie berücksichtigt unterschiedliche bahnspezifische Streckenprofile, Belastungen und betriebliche Anforderungen und schafft somit eine praxisnahe Grundlage für Investitions- und Unterhaltsentscheidungen.

- **Schienengütenstrategie**

- **R400HT**: Für enge Bögen (Radius < 300 m), um Schlupfwellen und dynamischen Verschleiss zu reduzieren.
- **R350HT**: Für mittlere Radien (300 – 600 m) oder bei Ein-Güten-Strategie („UniRail“) auf Strecken mit hohem Bogenanteil.
- **R260**: Für gerade Abschnitte (Radius > 600 m) und weniger stark beanspruchte Strecken.
- Dabei wird ein einheitliches Schienenprofil **46E1** empfohlen. Die Profilpaarung zwischen Rad und Schiene muss aufeinander abgestimmt sein.

- **Schwellenstrategie**

- **Besohlte Betonschwellen**: Sie sind der Standard für stark belastete Strecken (> 5.000 BT/t), verbessern die Gleislage und reduzieren Schlupfwellen sowie die Schotterbeanspruchung.
- **Stahlschwellen**: Sie werden bei gering belasteten Strecken (< 5.000 BT/t) oder bei begrenzter Schotterbettdicke eingesetzt. Sie sind wirtschaftlich, aber nicht für hohe Geschwindigkeiten geeignet.

- **Zwischenlagen**

- **Weiche Zwischenlagen (85 kN/mm)** haben Vorteile in Bezug auf die Schlupfwellenbildung und die vertikale Lastabtragung.
- Steife Zwischenlagen (700 kN/mm) reduzieren die Lärmbildung (Schienensingen). Um die jeweiligen Vor- und Nachteile beider Lösungen zu balancieren, wird der Einsatz der **mittelsteifen Zwischenlage (200 kN/mm)** empfohlen.
- In Lärm-sensitiven Gebieten und bei dementsprechenden Auflagen kann die **steife Zwischenlage (700kN/mm)** eingesetzt werden. Dies sollte allerdings in Bogenbereichen (R < 300 m) aufgrund der erhöhten Schlupfwellenbildung (und der dadurch auch verursachten Lärmentwicklung) möglichst vermieden werden.

Ergänzend wird die Einführung digitaler Werkzeuge für Zustandsüberwachung und LCC-Analysen sowie die Harmonisierung von Komponentenstrategien empfohlen. Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz bleiben zentrale Leitlinien. Zusätzliche Erkenntnisse aus laufenden Simulationen und Betriebserprobungen zur Interaktion Fahrzeug/Fahrweg werden erwartet und fließen in die Aktualisierung des Vademecums ein.

Inhalt

1	Einleitung	6
1.1	Über die Systemführerschaft.....	6
1.2	Ausgangslage.....	6
1.3	Zweck, Ziel und Abgrenzung.....	6
1.4	Begriffsdefinitionen.....	7
1.4.1	<i>Begriffe der Fahrbahn</i>	7
1.5	Vorhandene Literatur.....	8
1.5.1	<i>Stand der Technik Fahrbahnsteifigkeit</i>	8
1.5.2	<i>Anwendbarkeit und Empfehlungen aus Ergebnissen zur Einteilung der Standardelemente Meterspur</i>	8
1.5.3	<i>Faktenblätter zu Fahrbahnkomponenten und Auswirkungen</i>	8
1.5.4	<i>Grundlagenwissen zur Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur – Stand 2023</i>	8
1.5.5	<i>Fahrbahn – Schadenskatalog und Schadenskatalog Interaktion – Kontaktflächen Rad und Schiene</i>	8
2	Situationsaufnahme	10
2.1	Probleme aus der Umfrage.....	10
2.2	Fahrbahnkomponenten.....	10
2.3	Massnahmen zur Verschleissreduktion.....	11
2.4	Ableitung des Handlungsbedarfs für technische und wirtschaftliche Entscheidungen.....	11
3	Kostenfaktoren	12
3.1	Verhältnis jährlicher Investitionsbedarf in Erneuerung und Unterhalt.....	12
3.2	Baukosten.....	13
3.2.1	<i>Fahrbahnaufbau</i>	13
3.2.2	<i>Materialkosten der Fahrbahnelemente im Schotteroberbau</i>	14
4	Fahrbahnelemente und deren Auswirkungen	16
4.1	Schiene.....	16
4.2	Stützpunkt.....	16
4.3	Schwelle.....	18
4.4	Schotter.....	19
4.5	Unterbau / Untergrund.....	20
4.6	Gleissteifigkeit - Fahrbahnübergänge.....	22
5	Anlagenmanagement	25
5.1	Strategisches und operatives Anlagenmanagement.....	25
5.2	Fahrbahninformationsmanagement (Asset-Datenmanagement).....	26
5.3	Instandhaltungsstrategien.....	27
5.4	Erneuerungsplanung.....	28
6	Einfluss der Fahrbahnkomponenten	30
6.1	Erkenntnisse aus Simulationsmodellen.....	30
6.2	Erkenntnisse: Schiene und Schienenaufleger.....	33
6.3	Erkenntnisse: Schwelle, Schotter und Untergrund.....	34
7	Empfehlungen Komponentenstrategie	36
8	Optimierung durch Komponentenwahl und Instandhaltung	40

8.1	Optimierung durch Komponentenwahl:.....	40
8.2	Optimierung durch Instandhaltung:.....	42
8.3	Potentielle zukünftige Optimierungspotentiale durch Innovationen:	44
9	Ausblick	45
10	Verzeichnisse	46
10.1	Referenzen	46
10.2	Abbildungen	46
10.3	Tabellen	47

1 Einleitung

1.1 Über die Systemführerschaft

Die Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrweg stellt ein zentrales Element für die Betriebssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit von Meterspurbahnen dar. In den vergangenen Jahren haben sich in diesem Bereich zunehmend Probleme manifestiert – insbesondere übermäßiger Verschleiss an Rad und Schiene, erhöhte Lärmemissionen sowie Einschränkungen in der Fahrzeugverfügbarkeit. Diese Herausforderungen führen zu steigenden Instandhaltungskosten und beeinträchtigen die Effizienz des Gesamtsystems.

Um diesen komplexen technischen und betrieblichen Fragestellungen systematisch zu begegnen, hat das Bundesamt für Verkehr (BAV) die RAILplus AG mit der temporären Systemführerschaft „Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur“ beauftragt. Ziel dieser branchenweiten Initiative ist es, zwischen 2022 und 2027 ein koordiniertes Vorgehen zu entwickeln, das durch gezielten Wissensaufbau, technische Massnahmen und praxisnahe Empfehlungen die Grundlage für eine nachhaltige Optimierung der Fahrzeug-Fahrweg-Schnittstelle schafft.

Im Rahmen der Systemführerschaft werden bestehende Wissenslücken analysiert, Fachwissen gebündelt und neue Kompetenzen aufgebaut – unter anderem durch Schulungsangebote und digitale Lernformate. Die erarbeiteten Erkenntnisse fliessen beispielsweise in die Regelwerke Technik Eisenbahn (RTE) des Verbands öffentlicher Verkehr (VöV) ein und stehen allen Meterspurbahnen sowie weiteren Interessierten öffentlich zur Verfügung.

Die neu geschaffenen Meterspurzentren bilden die Nachfolgelösung für die temporäre Systemführerschaft Interaktion, die noch bis 2027 läuft.

Die Meterspurzentren sichern das in der Systemführerschaft erarbeitete Wissen, übertragen es in die betriebliche Praxis der Bahnen und stehen diesen beratend und unterstützend zur Seite. Zudem fördern die Zentren den Austausch innerhalb der Branche, sichern den Wissenstransfer und gewährleisten die kontinuierliche Weiterentwicklung des Wissens.

1.2 Ausgangslage

Die Belastungen auf die Fahrbahn von Meterspurbahnen haben sich in den letzten Jahren deutlich erhöht – verursacht durch höhere Achslasten, verdichtete Fahrplankontakte, höhere Traktion und steifere Drehgestellkonstruktionen. Dies führt zu verstärktem Verschleiss an Rädern, Ober- und Unterbau, was mit einer Verschlechterung der Gleislagequalität sowie einer Zunahme von Lärm und Erschütterung einhergeht. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit, den Lärmschutz sowie die Erschütterungsbegrenzung, insbesondere in sensiblen Siedlungsgebieten.

Eine Umfrage unter Meterspurbahnen hat zentrale technische und wirtschaftliche Herausforderungen aufgezeigt. Dazu zählen steigende Instandhaltungskosten, mangelnde Kenntnisse sowie unzureichende Datengrundlagen zur Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrbahn sowie die Notwendigkeit, Lebenszykluskosten gezielter zu steuern.

Die Systemführerschaft Fahrzeug/Fahrweg Meterspur (SyAu I Fz/Fw M) mit dem Teilprojekt P4 Fahrbahnsteifigkeit wurde initiiert, um diesen Herausforderungen gezielt zu begegnen. Ziel der Systemführerschaft ist die Steigerung der Gesamtwirtschaftlichkeit des Systems Fahrbahn/Fahrzeug. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden im vorliegenden Vademecum strukturiert zusammengeführt und bilden eine praxisnahe Grundlage für die Bewertung und Auswahl von Fahrbahnelementen. Die Inhalte basieren auf den im Abschnitt 1.5 aufgeführten Dokumenten, die als gegeben betrachtet werden – eine direkte Zitierung erfolgt nicht.

1.3 Zweck, Ziel und Abgrenzung

Das Vademecum Fahrbahn ist ein praxisorientiertes Werkzeug zur wirtschaftlichen Auswahl und Bewertung von Fahrbahnelementen aus Sicht des Gesamtsystems Fahrzeug/Fahrweg. Es bündelt die im Rahmen der Systemführerschaft gewonnenen Erkenntnisse und überführt sie in konkrete Handlungsempfehlungen. Zielgruppe sind Fachpersonen aus Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung sowie insbesondere das Anlagenmanagement Fahrbahn. Das Vademecum unterstützt

Infrastrukturbetreiber dabei, fundierte Entscheidungen zu treffen, die Lebenszykluskosten zu optimieren und die Systemqualität nachhaltig zu sichern.

Zweck des Vademecums ist es, den aktuellen Wissensstand zu dokumentieren, bestehende Wissenslücken sichtbar zu machen, Empfehlungen für die Anwendung und Weiterentwicklung von Standards zu geben und eine Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu schaffen. Die Inhalte basieren auf den Arbeiten der Systemführerschaft Fahrzeug/Fahrweg Meterspur.

Ziel ist es, die Lebenszykluskosten der Fahrbahn zu optimieren, die Instandhaltungsplanung zu verbessern, die Systemqualität nachhaltig zu sichern und sowohl kurzfristige als auch langfristige Strategien auf Basis aktueller Erkenntnisse weiterzuentwickeln.

Die vorliegende Version stellt die Erstveröffentlichung des Vademecum Fahrbahn im Jahr 2025 dar. Eine aktualisierte Ausgabe mit den abschliessenden Erkenntnissen aus dem Teilprojekt P4 folgt im Jahr 2026. Ergänzend wird ein ausführlicher Abschlussbericht unter dem Titel „Fahrbahn Meterspurbahn / Erkenntnisse aus Teilprojekt Fahrbahnsteifigkeit“ erscheinen.

Das Vademecum konzentriert sich auf die Schotterfahrbahn im Adhäsionsbetrieb von Meterspurbahnen. Die dargestellten Erkenntnisse und Empfehlungen lassen sich jedoch in vielen Fällen auch auf Zahnradstrecken und andere Fahrbahntypen übertragen.

1.4 Begriffsdefinitionen

1.4.1 Begriffe der Fahrbahn

<u>Fahrbahn</u>	Bahnkörper, auf welchen eine Bahndurchfahrt einen Einfluss hat. Die Fahrbahn umfasst den Oberbau und den Unterbau mit der Fahrbahnentwässerung bis zur Ableitung.
<u>Fahrweg</u>	Der Fahrweg umfasst alle für den Betrieb der Bahn notwendigen Anlagenteile.
<u>Oberbau</u>	Der Oberbau ist der Teil des Gleiskörpers oberhalb der Planie, dies beinhaltet Schiene, Schwelle, Schienenbefestigung und Schotter.
<u>Unterbau</u>	Unterbau ist der Teil unterhalb der Planie und beinhaltet die Sperrschicht, Fundationsschicht, Übergangsschicht
<u>Untergrund</u>	Untergrund ist der unter dem Oberbau oder Unterbau anstehende Boden oder Fels. Unterbau und Untergrund bilden die Gründung des Fahrweges.

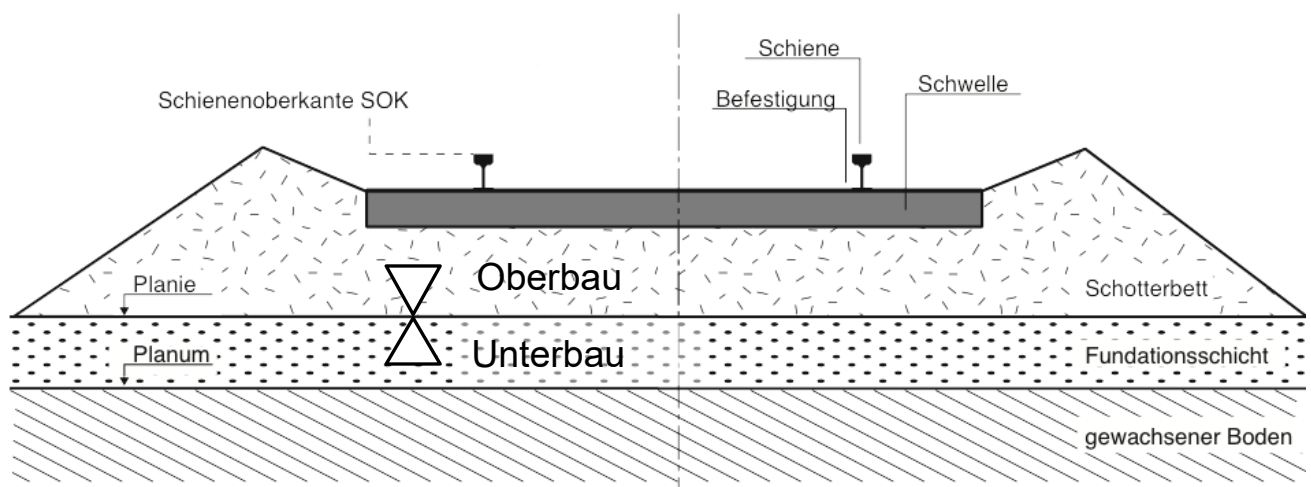


Abbildung 1: Begriffe der Fahrbahn [1]

1.5 Vorhandene Literatur

Dieser Abschnitt bietet eine strukturierte Übersicht über alle relevanten Dokumente, die als Grundlage für die Erstellung dieses Dokuments dienten. Berücksichtigt werden sowohl interne Unterlagen als auch öffentlich zugängliche Quellen. Die aufgeführten Dokumente enthalten wesentliche Informationen, die zur fachlichen Fundierung und zur Ableitung von Erkenntnissen im Rahmen des Projekts Fahrbahnsteifigkeit beigetragen haben.

1.5.1 Stand der Technik Fahrbahnsteifigkeit

Das Dokument „Stand der Technik Fahrbahnsteifigkeit“ ist ein fachtechnischer Bericht, der im Rahmen des Projekts Fahrbahnsteifigkeit zu Beginn der Systemführerschaft erstellt wurde. Es dient als zentrale Referenz für die aktuelle Situation und Entwicklung bei Meterspurbahnen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften der Fahrbahn und deren Auswirkungen auf Betrieb, Instandhaltung und Umwelt.

Der Bericht bildet eine wesentliche Grundlage für die Ableitung des Forschungsbedarfs im Projekt. Er zeigt auf, dass insbesondere im Bereich der Interaktion zwischen Fahrbahn und Fahrzeug sowie bei der Bewertung von Lärm- und Erschütterungseinflüssen gezielte Forschungsansätze erforderlich sind, um bestehendes Wissen weiterzuentwickeln und praxisnahe Lösungen zu fördern.

1.5.2 Anwendbarkeit und Empfehlungen aus Ergebnissen zur Einteilung der Standardelemente Meterspur

Im Rahmen der Systemaufgabe wurden spezifisch für die Meterspur neue Standardelemente (StdE) entwickelt und systematisch aufgebaut. Der entsprechende Bericht beschreibt die Methodik zur Definition der Standardelemente auf Basis historischer Instandhaltungs- und Anlagendaten. Ziel ist die Segmentierung des Netzes in vergleichbare Abschnitte mit ähnlichem Verschleissverhalten, um Instandhaltungsstrategien zu optimieren und Wirtschaftlichkeitsanalysen zu ermöglichen. Die StdE dienen als Grundlage für einheitliche Bewertungen und transparente Entscheidungsprozesse im Infrastrukturmanagement. Die Methodik wurde anhand von Daten und Erfahrungen von fünf Bahnen entwickelt und soll kontinuierlich weiterentwickelt werden, um neue Erkenntnisse und Materialien zu berücksichtigen.

1.5.3 Faktenblätter zu Fahrbahnkomponenten und Auswirkungen

Die im Rahmen der Systemaufgabe erstellten Faktenblätter sind ein internes Arbeitsinstrument des Projekts Fahrbahnsteifigkeit. Für alle Fahrbahnelemente – wie Schiene, Schwelle, Schotter usw. – sowie deren Auswirkungen auf Lärm, Verschleiss, Gleislage und Erschütterungen wurden spezifische Faktenblätter erstellt. Diese enthalten zunächst eine Übersicht über das vorhandene Wissen, die aktuelle Situation und den Stand der Technik – sowohl allgemein als auch spezifisch für die Meterspur. Daraus wird der Forschungsbedarf aus Sicht des Projekts Fahrbahnsteifigkeit abgeleitet. Teile dieses definierten Forschungsbedarfs werden im Rahmen des Projekts entweder direkt in diesem Faktenblatt oder in ergänzenden Dokumenten bearbeitet.

Ziel der Faktenblätter ist es, eine strukturierte Grundlage für die weitere Forschung und Entwicklung im Bereich der Fahrbahnsteifigkeit zu schaffen. Sie dienen als Nachschlagewerk und Entscheidungshilfe für projektinterne Fachpersonen.

1.5.4 Grundlagenwissen zur Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur – Stand 2023

Das Dokument stellt das Grundlagenwissen zur Interaktion Fahrzeug/Fahrweg dar, das zu Beginn der Systemführerschaft 2023 erarbeitet wurde. Es bietet einen strukturierten Überblick über technische, betriebliche und wirtschaftliche Aspekte der Meterspur-Interaktion. Die Inhalte basieren auf Erkenntnissen aus der Systemaufgabe sowie internationalen Forschungen. Eine Veröffentlichung des Werks erfolgt über den Verband öffentlicher Verkehr (VÖV). Es bildet die Grundlage für das entstehende D RTE 29051

1.5.5 Fahrbahn – Schadenskatalog und Schadenskatalog Interaktion – Kontaktflächen Rad und Schiene

Im Rahmen der Systemführerschaft „Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur“ wurden ergänzend zum vorliegenden Vademecum zwei weitere Dokumente durch RAILplus erarbeitet. Der Schadenskatalog

Fahrbahn [2] entsteht parallel zum Vademecum und steht in engem inhaltlichem Bezug dazu. Er bietet eine systematische Übersicht typischer Schäden an Fahrbahnelementen von Meterspurbahnen und dient als Grundlage für die Zustandsbewertung, Instandhaltungsplanung und das strategische Infrastrukturmanagement. Der Schadenskatalog Interaktion – Kontaktflächen Rad und Schiene [3] fokussiert sich hingegen auf Schienenfehler im Zusammenhang mit der Interaktion zwischen Rad und Schiene. Auch dieses Dokument wird durch RAILplus erstellt und ergänzt die Betrachtung der Fahrbahn um die dynamischen Beanspruchungen und Wechselwirkungen an den Kontaktflächen.

2 Situationsaufnahme

2.1 Probleme aus der Umfrage

Im Jahr 2022 wurde unter 17 Mitgliederbahnen von RAILplus sowie zwei Trambahnen und der inzwischen beigetretenen Forchbahn eine umfassende Umfrage [4] durchgeführt. Ziel war es, die grössten Herausforderungen und Wissensdefizite im Bereich Fahrbahn zu identifizieren. Die wichtigsten Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Steigende Belastungen:** Bei den meisten Bahnen haben sich die mittleren täglichen Gleisbelastungen durch Taktverdichtungen und höhere Achslasten deutlich erhöht.
- **Kostenanstieg durch Systeminteraktion:** Über die Hälfte der Bahnen führt den festgestellten Anstieg der Instandhaltungskosten auf ein suboptimales Zusammenspiel zwischen Fahrzeug und Fahrweg zurück.
- **Lärmproblematik:** Rund 80 % der Bahnen berichten von Lärmproblemen, insbesondere Kurvenkreischen in engen Bögen, das zu Beschwerden von Anwohnern führt. Auch allgemeiner Lärm ohne klar zuordenbare Ursache wird genannt.
- **Schadensbilder:** Schienenverschleiss und Schlupfwellen sind die dominierenden Schadensformen an den Fahrflächen. Zusätzlich verzeichnen etwa die Hälfte der Bahnen erhöhten Verschleiss an den Schienenflanken, was auf unzureichende Spurkranzschmierung hinweist. Die Instandhaltung der Schiene wird dabei vorwiegend durch die Bildung von Schlupfwellen beeinflusst, da diese den Schleifbedarf und die Eingriffshäufigkeit massgeblich bestimmen.
- **Uneinheitliche Schadenerfassung:** Für die Meterspur existierten bislang keine einheitlichen, systematisch aufgebauten Schadenskataloge. Dies erschwerte eine vergleichbare Bewertung und strukturierte Dokumentation von Schäden. Mit dem Fahrbahn – Schadenskatalog sowie dem Schadenskatalog Interaktion – Kontaktflächen Rad und Schiene stehen nun erstmals zwei umfassende, durch RAILplus erarbeitete Referenzdokumente zur Verfügung, welche die Grundlage für eine standardisierte Schadenerfassung und -bewertung im Rahmen der Systemführerschaft „Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur“ bilden – und auch darüber hinaus eine einheitliche Methodik für das Infrastrukturmanagement ermöglichen.

Diese Ergebnisse bestätigen die Notwendigkeit einer strukturierten Herangehensweise an die Fahrbahnplanung und -bewertung, wie sie im Vademecum verfolgt wird.

2.2 Fahrbahnkomponenten

Die Umfrage [4] zeigt, dass Stand 2022 bei den meisten Bahnen das Schienenprofil 46E1 mit der Stahlgüte R260 einbegaut wird. In stark beanspruchten Abschnitten oder engen Bögen kommen vereinzelt seit einigen Jahren auch höherfeste Stähle wie R350HT oder R400HT zum Einsatz.

Bei Neubauten werden zunehmend Betonschwellen eingesetzt, obwohl noch verschiedene Schwellentypen im Bestand vorhanden sind. Die Schwellenbesohlung ist bislang wenig verbreitet. Die Steifigkeit der Zwischenlagen variiert stark – von 85 kN/mm über 200 kN/mm bis zu 700 kN/mm.

Ein standardisierter Unterbau ist bei den meisten Bahnen nicht vorhanden; vielfach wird noch der ursprüngliche Unterbau aus der Erstellungszeit genutzt. Der Stopfzyklus liegt je nach Belastung zwischen 4 und 8 Jahren. Schienenschleifen wird bei allen Bahnen durchgeführt, meist zur Behebung von Oberflächenfehlern.

Grössere Bahnen überwachen die Gleislage mit Messwagen, kleinere Bahnen führen punktuelle manuelle Messungen und visuelle Beurteilungen durch. Die Überwachung erfolgt gemäss den üblichen Parametern nach R RTE 22570.

Stahlschwellen gelten bei niedrigen bis mittleren Belastungen als wirtschaftlich und besitzen auch nach ihrer Nutzungsdauer einen Rohstoffwert. Holzschwellen zeigen gute Eigenschaften hinsichtlich Fahrbahnsteifigkeit, Lärm und Erschütterung, sind jedoch bei hohen Belastungen ungeeignet und verschleissen schneller – insbesondere in feuchten Umgebungen. Ihre Entsorgung ist aufgrund der Imprägnierung mit umweltbelastenden Stoffen aufwendig und arbeitsintensiv.

2.3 Massnahmen zur Verschleissreduktion

Zur Reduktion von Rad- und Schienenverschleiss sowie zur Verbesserung der Entgleisungssicherheit setzen alle Bahnen fahrzeugseitig auf Spurkranzschmierung (SKS). Zusätzlich verwenden einzelne Bahnen Schienenkopfkonditionierung (SKK), um Kurvenkreischen, Schlupfwellenbildung und Verschleiss zu mindern. Die Wirksamkeit dieser Massnahmen variiert je nach Bahn und Einsatzbedingungen.

2.4 Ableitung des Handlungsbedarfs für technische und wirtschaftliche Entscheidungen

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Herausforderungen zeigen deutlich, dass die Fahrbahn von Meterspurbahnen heute unter komplexen technischen, wirtschaftlichen und betrieblichen Spannungsfeldern steht. Die Umfrageergebnisse [4] belegen nicht nur eine Zunahme von Belastungen und Schadensbildern, sondern auch eine unzureichende Systematik in der Erfassung und Bewertung von Fahrbahnzuständen. Gleichzeitig bestehen grosse Unterschiede in der eingesetzten Technik, den Instandhaltungsstrategien und der Datenverfügbarkeit.

Hinzu kommt ein Mangel an spezifischem Expertenwissen bei den Bahnen, welches in Europa vorhanden wäre aber bislang nur unzureichend genutzt wird.

Vor diesem Hintergrund wird ersichtlich, dass eine strukturierte, systemübergreifende Grundlage für die Bewertung und Auswahl von Fahrbahnelementen dringend erforderlich ist. Das Vademecum schliesst diese Lücke, indem es die relevanten Komponenten, deren Auswirkungen und Optimierungspotenziale im Kontext der Meterspur systematisch aufbereitet. Es schafft damit eine gemeinsame fachliche Basis für Infrastrukturbetreiber, Planer, Anlagenmanager Fahrbahn und Instandhaltungsverantwortliche.

Die nachfolgenden Kapitel bauen auf dieser Grundlage auf und zeigen auf, wie durch gezielte Komponentenwahl, abgestimmte Instandhaltungsstrategien und strategisches Anlagenmanagement sowohl die Lebenszykluskosten als auch die Systemqualität verbessert werden können. Das Vademecum dient somit nicht nur als Nachschlagewerk, sondern als strategisches Werkzeug zur Weiterentwicklung der Fahrbahn im Meterspurbereich.

3 Kostenfaktoren

Die Fahrbahn zählt zu den kostenintensivsten Anlagenteilen in der Infrastruktur. Die Systemführerschaft Fahrzeug/Fahrweg Meterspur hat den Zweck, den Meterspurbahnen praxistaugliche Lösungen bereitzustellen, die eine signifikante Reduktion der Lebenszykluskosten ermöglichen. Die nachfolgende Analyse beleuchtet die wesentlichen Kostenfaktoren der Fahrbahn und bildet die Grundlage für strategische Entscheidungen im Instandhaltungsmanagement. Sie basiert auf konkreten Daten einzelner Meterspurbahnen erstellt, spiegelt jedoch typische Strukturen und Herausforderungen wider, wie sie im gesamten Meterspurbereich anzutreffen sind. Somit bietet sie eine belastbare Grundlage für die Ableitung allgemeiner Empfehlungen und Handlungsbedarfe.

Im vorliegenden Kontext wird ausschliesslich die Fahrbahn auf offener Strecke inklusive Unterbau betrachtet, mit dem Ziel, zentrale Kostentreiber zu identifizieren und Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Aspekte wie Entwässerung, Bankettsicherungen, Kabelführung, Winterdienst und Vegetationspflege bleiben unberücksichtigt. Die Analyse basiert auf aktuellen Projekten der Matterhorn Gotthard Bahn, der Rhätischen Bahn und den Appenzeller Bahnen. Die angegebenen Laufmeterpreise dienen der Orientierung und sind nicht direkt auf die Meterspurbahnen übertragbar, da Faktoren wie geografische Lage, Infrastruktur und gewählte Technologie erheblichen Einfluss haben. Betriebserschwerungskosten sind nicht berücksichtigt.

3.1 Verhältnis jährlicher Investitionsbedarf in Erneuerung und Unterhalt

Der Grossteil der Investitionen in die Fahrbahn einer Meterspurbahn wird für deren Erneuerung verwendet. Angesichts dieses hohen Anteils ist eine datenbasierte und technisch-wirtschaftliche Erneuerungsplanung besonders empfehlenswert. In diesem Kontext ist die Möglichkeit, durch gezielte Planung Einfluss auf die Gesamtkosten zu nehmen, besonders hoch.

Die in Abbildung 2 dargestellten Investitionen zeigen exemplarisch die Aufwendungen für die Instandhaltung und den Substanzerhalt einer mittelgrossen Meterspurbahn. Das Verhältnis des Investitionsbedarfs für den Substanzerhalt (80%) und die Instandhaltung (20%) ist bei der untersuchten Bahn höher als es von den Normalspurbahnen in den DACH-Regionen üblicherweise der Fall ist. In der Regel fällt die Instandhaltung stärker ins Gewicht. Dieser Umstand lässt sich durch die derzeitige Aufarbeitung des Nachholbedarfs im Substanzerhalt und dem damit ebenfalls geringeren Schienenersatz erklären. Bei den untersuchten RAILplus Bahnen wurden zudem grosse Unterschiede in der Schleifstrategie erkannt.

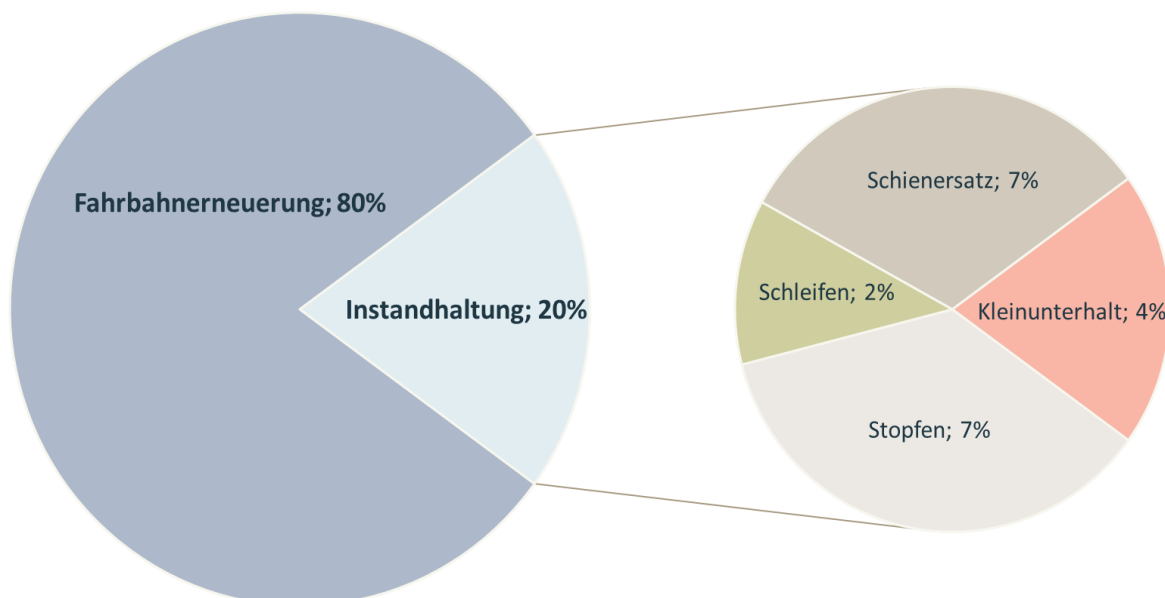


Abbildung 2: Investierte Mittel in die Fahrbahn einer RAILplus Meterspurbahn

Die vielversprechendste Möglichkeit, die Kosten im Substanzerhalt zu reduzieren, ist eine Erhöhung der Lebensdauer in Verbindung mit einer zustandsabhängigen Erneuerungsplanung. Eine Erhöhung der Lebensdauer auf ein wirtschaftliches Maximum erfordert eine hohe Anfangsqualität (Substanz) in Kombination mit einer ebenfalls zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie. Die Kosten für die relevanten Instandhaltungsmassnahmen (Stopfen, Schleifen etc.) machen im Verhältnis zu den Gesamtkosten nur einen kleinen Anteil aus. Die Auswirkungen einer optimierten Instandhaltungsstrategie auf die Wirtschaftlichkeit können jedoch signifikant sein. Um aus Lebenszykluskostensicht die geringsten Kosten im Gesamtsystem zu erzielen, sind kontinuierliche Messungen und Zustandsbeschreibungen notwendig.

In der Meterspurbranche sind die entsprechenden Werkzeuge des strategischen und operativen Anlagenmanagements weiter zu erarbeiten und zu etablieren. Im Verlauf dieses Dokuments werden konkrete Ansätze vorgestellt, wie durch gezielte Komponentenwahl und abgestimmte Instandhaltungsstrategien die Lebenszykluskosten reduziert und die Wirtschaftlichkeit von Massnahmen verbessert werden kann.

3.2 Baukosten

3.2.1 Fahrbahnaufbau

Bei Neubauten und Erneuerungen der Fahrbahn im Bereich der Meterspur haben sich insbesondere drei Unterbauarten bewährt:

- Bitumenhaltige Sperrschicht (Asphaltbeton Typ AC RAIL 16 oder AC RAIL 22)
- Sperrschicht Kiessand PSS¹ (Planumsschutzschicht)
- Ohne Unterbau (ohne Sperrschicht)

Die Wahl der Sperrschicht bzw. des Unterbaus beeinflusst die eingesetzten Maschinen und die Art der Streckensperrung bei Fahrbahnerneuerungen. Der Einbau einer bitumenhaltigen Sperrschicht erfordert eine durchgehende Vollsperrung. Wird hingegen eine Kiessand-Sperrschicht (PSS) verwendet oder handelt es sich um eine reine Oberbauerneuerung, können die Arbeiten in nächtlichen Sperrpausen durchgeführt werden. Der Einbau von PSS in Nachtsperren ist technisch möglich, aber aufgrund der begrenzten Einbauleistung wirtschaftlich oft nicht sinnvoll. Ein wesentlicher Nachteil liegt in der zeitlichen Fragmentierung des Bauablaufs, was die Prozessstabilität beeinträchtigen und eine gleichmässige Ausführungsqualität über die gesamte Umbaulänge – insbesondere an den Übergängen – erschweren kann. Beim Aufbau ohne Unterbau wird der Schotter direkt auf den vorhandenen Untergrund aufgebracht. Dieses Verfahren hat sich bei tragfähigem Boden bewährt – vorausgesetzt, der Untergrund ist entweder bereits wasserfrei oder es ist eine funktionierende Entwässerung sichergestellt. Ein trockener, gut entwässerter Untergrund erhöht die Dauerhaftigkeit der Fahrbahn, da Wasser als Hauptursache für Fahrbahnschäden gilt. Gleichzeitig ist bei dieser Bauweise mit einem erhöhten Risiko für Steifigkeitssprünge und Schlammausstösse zu rechnen, was sich negativ auf die Gleislage auswirken kann.

Automatisierte Gleisbaumethoden wie das System TYREX verursachen höhere Kosten als konventionelle Verfahren, insbesondere bei Unterbausanierungen. Diese resultieren aus dem intensiven Maschineneinsatz im Verhältnis zur Umbauleistung. Ein direkter Kostenvergleich ist jedoch schwierig, da betriebliche Einschränkungen, Sperrzeiten und logistische Rahmenbedingungen in den Richtpreisen nicht abgebildet sind. Der konventionelle Einbau einer bituminösen Sperrschicht liefert zwar hohe Qualität, ist jedoch teurer als eine Oberbauerneuerung mit Schotterreinigung, die durch hohe Verfügbarkeit überzeugt. Die Wahl der gesamten Umbaulänge beeinflusst die Wirtschaftlichkeit und Logistik des Bauverfahrens – längere Umbaulängen ermöglichen einen effizienteren Ressourceneinsatz, insbesondere beim Maschineneinsatz.

Die aktuell geltenden Vorgaben der AB-EBV verlangen häufig den Einbau einer bitumenhaltigen Sperrschicht (siehe auch Abschnitt 4.5). **Auf tragfähigem, filterstabilem und nicht verwitterungsempfindlichem Untergrund – insbesondere bei Frostsicherheit – ist eine Sperr-**

¹ «Bei dem aus historischen Gründen als Kiessand PSS bezeichneten Material handelt es sich um ein frostsicheres, relativ wasserundurchlässiges, ungebundenes Kiesgemisch aus beständigen, festen Gesteinskörnern mit stetig verlaufender Korngrößenverteilung...» (AB-EBV, AB 25, Abschnitt 4.3.9).

und Foundationsschicht aus wirtschaftlicher Sicht nicht zwingend erforderlich. Unter solchen Bedingungen ist eine generelle Unterbausanierung zu hinterfragen.

Die Wahl des Umbauverfahrens sollte daher nicht nur technische Anforderungen, sondern auch betriebliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen berücksichtigen – ein Vorgehen, das sich im Bereich der Normalspur bereits bewährt hat. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Überprüfung bestehender Strategien durch die Infrastrukturbetreiber oder im Rahmen der Meterspurzentren sinnvoll.

3.2.2 Materialkosten der Fahrbahnelemente im Schotteroberbau

Die Gesamtkosten des Oberbaus setzen sich im Wesentlichen aus Schienen, Schwellen (inkl. Besohlung), Schotter sowie Transport und Handhabung (Gleisbau) zusammen (siehe Abbildung 3). Die Kosten für Schienen und Schwellen bei den RAILplus-Bahnen sind weitgehend vergleichbar. Die Kosten für den Schotter variieren hingegen je nach lokaler Verfügbarkeit und Transportdistanz.

Höherwertige Ausführungen – etwa härtere Schienenstahlsorten oder besohlte Schwellen – verursachen moderate Mehrkosten von rund 4 % der Gesamtkosten, können sich jedoch durch geringeren Unterhalt und längere Lebensdauer wirtschaftlich lohnen. Insgesamt zeigt sich, dass hohe Qualität bei Komponenten und Ausführung langfristig wirtschaftlich ist.

Beim Einsatz höherfester Schienenstahlgüten – beispielsweise R400HT – ist auf eine optimal abgestimmte Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene zu achten. Nur unter dieser Voraussetzung kann der Einsatz höherfester Rad- und Schienenstähle zu reduziertem Verschleiss und geringeren RCF-Schäden am Gegenpartner führen.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine generelle Empfehlung zugunsten höherfester Güten sinnvoll – insbesondere im Hinblick auf verbesserte Profilstabilität und verlängerte Lebensdauer. Die detaillierten Empfehlungen zur Schienenwerkstoffwahl befinden sich im Abschnitt 7 Empfehlungen Komponentenstrategie.

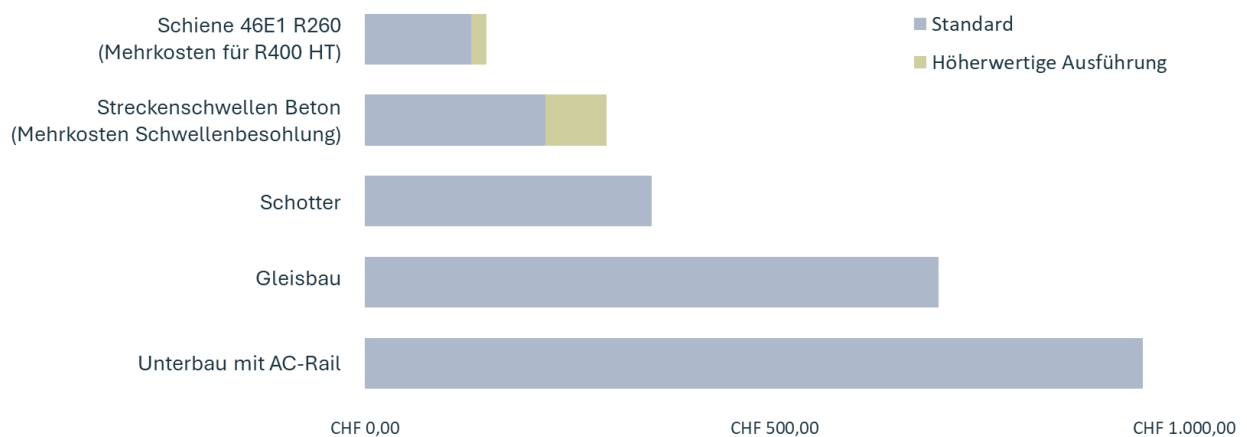


Abbildung 3: Laufmeterpreise Komponenten Schotteroberbau konventioneller Gleisbau [CHF / Im]

Bei der Meterspur wird heute vorwiegend das Schienenprofil 46E1 in drei Stahlsorten zum Einsatz. Die Preisdifferenz zwischen den Schienenstahlsorten R260 und R350HT liegt bei etwa 5,5 %. Die Preisdifferenz zwischen R400HT und der Standardgüte beträgt etwa 15,5 %². Unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten relativieren sich diese Unterschiede zugunsten der höherfesten Güten.

Auf Zahnradstrecken sind in der Schweiz ausschliesslich die Profile 36E3 und 46E1 im Einsatz. Grund dafür ist die definierte Höhenlage der Zahnstange relativ zur Schienenoberkante, die eine lokale Profilvariation technisch ausschliesst.

² Preise gemäss Rahmervertrag für Lieferungen bis 31.08.2021 für die RAILplus Mitgliedsbahnen

Die Schwellenwahl erfolgt nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien. Besohlte Betonschwellen verursachen Mehrkosten von etwa CHF 35–50 pro Schwelle³, bieten jedoch Vorteile bei der Instandhaltung. Mit zunehmender Belastung steigt die Wirtschaftlichkeit besohlter Schwellen weiter, da sie insbesondere bei stark beanspruchten Strecken eine längere Lebensdauer und geringeren Instandhaltungsaufwand ermöglichen.

Die Auswahl des Schotters richtet sich nach Qualität, Körnung, Gesteinsart sowie Transportdistanz. Eine Wiederaufbereitung von Altschotter – etwa bei Bettungsreinigungen oder im Werk – ist ökologisch sinnvoll, aber nur bei grösseren Mengen wirtschaftlich. Beim Einsatz aufbereiteter Materialien ist es essentiell, dass die geforderten Anforderungen an den Schotter erfüllt sind – insbesondere hinsichtlich Kornform, Festigkeit und Wasserdurchlässigkeit. Rezyklierter Schotter darf nur dort eingesetzt werden, wo er den technischen Anforderungen entspricht und für die jeweilige Anwendung geeignet ist.

Die Abbildung 3 zeigt deutlich, dass die Kosten für eine Unterbausanierung die Erneuerungskosten signifikant erhöhen. Im Rahmen der Erneuerungsplanung ist demnach zu evaluieren, ob eine Unterbausanierung erforderlich ist oder der anstehende Boden bereits eine ausreichende Tragfähigkeit aufweist. Ein Vergleich mit der Normalspur zeigt, dass Unterbausanierungen dort in deutlich geringerem Umfang umgesetzt werden – diese Beobachtung kann als grobe Orientierung für die Meterspur dienen.

³ Preise gemäss Rahmervertrag 2024-2028 für die RAILplus Mitgliedsbahnen

4 Fahrbahnelemente und deren Auswirkungen

Die Fahrbahn als Gesamtsystem besteht aus dem Unterbau und dem darüber liegenden Oberbau. Die einzelnen Komponenten dieses Systems – wie Schiene, Zwischenlage/Stützpunkt, Schwelle, Schotter und Unterbau – haben einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit der Fahrbahn. Die auf das Gleis wirkenden Kräfte, insbesondere durch Masse, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Fahrzeuge, werden über die Schiene auf die Schwellen und weiter auf das Schotterbett und den Unterbau übertragen. Ein optimiertes Zusammenspiel dieser Komponenten ermöglicht eine gleichmässige Lastverteilung, reduziert den Verschleiss sowie Lärm und verlängert die Nutzungsdauer bei gleichzeitig geringerem Instandhaltungsaufwand. Die Auswahl geeigneter Komponenten ist daher ein zentraler Hebel zur Optimierung der Lebenszykluskosten. Im Rahmen des Projektes Fahrbahnsteifigkeit der Systemaufgabe wurde untersucht, in welchem Ausmass einzelne Komponenten die Auswirkungen auf Lärm, Verschleiss, Erschütterung und Gleislage beeinflussen. Dieses Kapitel beschreibt den aktuellen Stand der eingesetzten Fahrbahnelemente und deren Auswirkung auf die vier Systemantworten im Meterspurbereich.

Eine vertiefte Betrachtung des Einflusses der Fahrbahnkomponenten (Erkenntnisse aus der Systemführerschaft) sowie Empfehlungen zur Optimierung durch Komponentenwahl und Instandhaltung erfolgen in den Kapiteln 6 und 8. In der aktuellen Praxis kommen unterschiedliche Fahrbahnelemente zum Einsatz, abhängig von den betrieblichen Anforderungen, den örtlichen Randbedingungen und den strategischen Zielsetzungen der Infrastrukturbetreiber.

4.1 Schiene

Die Schiene ist ein zentrales Element der Kraftübertragung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn. Ihre Eigenschaften beeinflussen direkt den Verschleiss, die Geräuschentwicklung und die Lebensdauer des Systems. Die Hauptschädigungen an den Schienen bei Meterspurbahnen sind Schlupfwellen, Verschleiss, Schleuderstellen sowie Ablätterungen und Materialausbrüche an der Schienenoberfläche. Schlupfwellen treten vor allem an der Innenschiene in engen Bögen auf, während Verschleiss sowohl seitlich als auch am Schienenkopf beider Schienen auftritt.

In der Meterspur wird heute überwiegend das Profil 46E1 eingesetzt, da das ursprünglich verwendete 36E3 kaum noch verfügbar ist. In Weichenbereichen oder bei weichen Untergründen kommt auch das Profil 54E2 zum Einsatz. Hinsichtlich der Stahlgüte setzen die Bahnen auf R260, R350HT und in besonders beanspruchten Bereichen auf R400HT. Die Schienen werden in der Regel lückenlos verschweisst, auch in engen Radien bis 40 m. Isolierstösse werden zunehmend durch Achszähler ersetzt.

Erfahrungen aus dem Betrieb zeigen auch bei der Meterspur, dass höherfeste Schienenstahlgüten wie R350HT und R400HT den Verschleiss reduzieren und die Bildung von Schlupfwellen verringern können. «Eine zwischen Rad und Schiene optimal abgestimmte Berührgeometrie vorausgesetzt, kann der Einsatz höherfester Rad- und Schienenstähle für weniger Verschleiss und weniger RCF-Schäden am Gegenpartner sorgen.»[5] Dies hat sich auch bei der Meterspur bestätigt. Zu beachten ist jedoch die höhere Kerbempfindlichkeit härterer Stähle, insbesondere bei thermischer Belastung.

4.2 Stützpunkt

Die Beton Streckenschwellen VÖV-EM2 sind üblicherweise mit dem Schienenbefestigungssystem W 14 ausgestattet. Der Stützpunkt besteht beim System W 14 aus der Spannklemme Skl 14 und der Winkelführungsplatten Wfp 14. Zwischenlagen – auch Railpads genannt – befinden sich zwischen Schienenfuss und Schwelle und übernehmen eine zentrale Funktion im Oberbau. Sie verteilen die Radlasten gleichmässig, reduzieren lokale Spannungen und schützen die Schwellenoberfläche vor Abplatzungen. Darüber hinaus tragen sie zur Schwingungsdämpfung bei und wirken sich positiv auf die Lebensdauer von Schwellen, Schotter und Befestigungssystemen aus. Beim Schienenwechsel wird – in Anbetracht der hohen Belastung und der starken mechanischen Beanspruchung – grundsätzlich davon abgeraten, Zwischenlagen wiederzuverwenden. Ihre Funktion ist entscheidend für die Systemstabilität.

Die vertikale Steifigkeit in kN/mm ist die zentrale Kenngrösse der Zwischenlage. Die Meterspur verwendet bei Betonschwellen üblicherweise Steifigkeiten von 85 kN/mm (weich), 200 kN/mm (mittelsteif) und 700 kN/mm (steif). Weiche Zwischenlagen erhöhen die Elastizität des Oberbaus und

verbessern die Lastverteilung über mehrere Schwellen. Sie können die Bildung von Schlupfwellen in engen Bögen reduzieren, führen jedoch zu einer geringeren Gleisabklingrate, was sich negativ auf die Lärmemission auswirken kann. Steife Zwischenlagen bieten eine hohe Kopplung zwischen Schiene und Schwelle und tragen zur Reduktion von Lärm bei, dämpfen jedoch hochfrequente Schwingungen weniger effektiv. In der Vergangenheit dominierten steife Zwischenlagen, insbesondere bei Betonschwellen. Mittelsteife Zwischenlagen stellen einen Kompromiss dar und werden dort eingesetzt, wo sowohl Lärmschutz als auch Verschleissminderung gefordert sind. Für mittelsteife Zwischenlagen liegen bislang nur begrenzte Erfahrungen vor; ihr Potenzial hinsichtlich Lärmreduktion und Systemverhalten wird derzeit untersucht.

Betriebserfahrungen zeigen weiter, dass weiche Zwischenlagen (85 kN/mm) durch ihre hohe Elastizität zwar positive Effekte auf die Lastverteilung und die Verzögerung der Schlupfwellenbildung aufweisen, jedoch gleichzeitig auch mehr Bewegung im Stützpunkt zulassen, was zu erhöhtem Verschleiss an Befestigungssystemen und Schwellen führen können. Bei Einsatz von weichen Zwischenlagen sollte daher der Einsatz von Spannklemmen mit erhöhter Niederhaltekraft untersucht werden. **Stattdessen gelten mittelsteife Zwischenlagen (200 kN/mm) als geeigneter Kompromiss zwischen Elastizität, Dämpfungsverhalten und Dauerhaftigkeit und werden für den Einsatz in der Meterspur empfohlen.**

Ein Überblick der zu erwartende Effekte im Zusammenhang mit Zwischenlagen ist in der Abbildung 4 dargestellt.

Parameter	Steife ZW	Weiche ZW
Verbesserung (Erhöhung) der Gleisabklingrate	👍	
Reduktion von Lärm	👍	
Reduktion der Anregung von Schotter und Schwellen		👍
Reduktion von Schlupfwellen		👍
Verbesserte Lastverteilung auf mehrere Schwellen		👍
Höhere Lebensdauer des Befestigungssystems	👍	

Abbildung 4: Effekte der Steifigkeit von Zwischenlagen

Die Wahl der Zwischenlage hängt stark von der Streckencharakteristik, den betrieblichen Anforderungen und der Kombination mit anderen Komponenten wie Schwellenbesohlung und Spannklemmen ab. Moderne Befestigungssysteme verfügen über integrierten Kippschutz, um bei hohen Querkräften – insbesondere in engen Bögen – die Spannklemmen zu entlasten. Neue Kombinationen aus weichen Zwischenlagen und verstärkten Spannklemmen zeigen in der Normalspur gute Ergebnisse hinsichtlich Lärmemissionen. Ob sich diese Erkenntnisse auf die Meterspur übertragen lassen, ist noch offen. Zusätzlich beeinflussen Temperatur, Vorspannung, Achslast und Alterung das mechanische Verhalten der Zwischenlagen.

In Fachkreisen wird gelegentlich von sogenannten Hochdämpfende Zwischenlagen gesprochen. Dabei handelt es sich nicht um eine eigenständige Zwischenlagenart, sondern um Varianten mit erhöhter Dämpfungswirkung innerhalb des bestehenden Typenspektrums. Diese Zwischenlagen kombinieren definierte Steifigkeit mit verbesserter Schwingungsdämpfung und zeigen in der Normalspur erste positive Ergebnisse hinsichtlich Lärmemission und Systemverhalten. Für die Meterspur sind entsprechende Produkte derzeit noch nicht verfügbar; ihr Einsatzpotenzial wird im Rahmen zukünftiger Entwicklungen geprüft.

Es ist weiter bekannt, dass sich bei Meterspurbahnen im Betrieb in engen Bögen die bogenäussere Schiene aufstellen (abkippen) kann. Obwohl die Schienen bei den Bahnen üblicherweise mit einer nominalen Schieneneinbauneigung von 1:20 (vereinzelt auch 1:40) eingebaut werden, kann sich diese

im Betrieb im Bereich von engen Bögen deutlich verändern – etwa zu Neigungen von 1:35, 1:50, 1:100 oder sogar zu negativen Schienenneigungen. Das Abkippen und die irreversible Spurerweiterung in engen Bögen ist nach häutigen Wissenstand auf den Stützpunkt zurückzuführen. Trotz ausstehender detaillierter Untersuchungen ist auf eine korrekte Befestigung des Stützpunktes zu achten. Die mittlere Schlaufe der Spannklemme ist so anzuziehen, dass ein Spiel von maximal 0,5 mm zur Schiene verbleibt.

Trotz dieser Veränderungen weist die Fahrfläche infolge des Verschleissverhaltens häufig weiterhin eine Neigung von etwa 1:20 auf. Dieses Phänomen ist Gegenstand laufender Untersuchungen im Rahmen der Systemaufgabe. Die aktuellen Überlegungen zur Neukonzeption von Spurweite, Spurerweiterung und asymmetrischen Schienenprofil setzen jedoch voraus, dass künftig die Spurweite sowie die wirksame Schienenneigung im Betrieb gezielt beherrscht und unerwünschte Veränderungen verhindert werden können.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird derzeit eine Situationsanalyse des Stützpunkts durchgeführt. Im Rahmen dessen sind Testeinbauten zu unterschiedlichen Stützpunktkonzepten in Vorbereitung. Diese beinhalten Zwischenlagen aus höherwertigen Kunststoffen sowie Spannklemmen mit erhöhter Niederhaltekraft. Ziel ist es, die Stabilität der Schienenlagerung zu verbessern und unerwünschte Veränderungen der Schienenneigung – insbesondere in engen Bögen – künftig wirksam zu begrenzen.

4.3 Schwelle

Die Schwelle übernimmt im Schotteroberbau zentrale Aufgaben: Sie verteilt die vertikalen und horizontalen Kräfte aus dem Rad-Schiene-Kontakt gleichmässig in das Schotterbett, gewährleistet die Spurhaltung und trägt zur Stabilität der Gleislage bei. Bei Meterspurbahnen kommen heute verschiedene Schwellentypen zum Einsatz – darunter Holz-, Stahl-, Y-Stahl-, Beton- sowie Kunstholz- und Kunststoffschwelle. Während Holzschwellen aufgrund ihrer Elastizität und einfachen Verarbeitung lange Zeit weit verbreitet waren, werden sie zunehmend aus ökologischen Gründen sowie wegen ihrer begrenzten Lebensdauer durch Betonschwellen ersetzt. Letztere bieten eine hohe Lebensdauer und Stabilität, erfordern jedoch einen tragfähigen Unterbau und neigen aufgrund Ihrer Steifigkeit in engen Bögen zu Schlupfwellenbildung und damit indirekt zu Lärmemissionen.

Y-Stahlschwellen zeichnen sich durch eine hohe Rahmensteifigkeit aus und eignen sich besonders für enge Radien. Aufgrund ihrer hohen Steifigkeit ist die Instandhaltung jedoch erschwert, da konventionelles Stopfen nur begrenzt wirksam ist. Einerseits kann die Schwelle beim Stopfvorgang kaum elastisch mitbewegt werden, andererseits erschwert die spezielle Geometrie – insbesondere die versetzte Lage der Schienenaufleger – eine gezielte Schotterverdichtung unter den Auflagepunkten.

Kunstholzschwellen (FFU) sind technisch geeignet für spezifische Anwendungsbereiche (beispielsweise als Brückenhölzer), aber aufgrund ihrer hohen Investitionskosten für den Einsatz als Standardstreckenschwelle nicht wirtschaftlich. Abbildung 5 zeigt einen Vergleich der potenziellen Standardstreckenschwellen (Betonschwelle, besohlte Betonschwelle, Stahlschwelle, Holzschwelle, Kunststoffschwelle). Kunststoffschwellen befinden sich aktuell in der Erprobung. Für die Meterspur sind deren Langzeitverhalten, speziell in Bezug auf Querverschiebewiderstand und Spurweitenstabilität, noch nicht ausreichend untersucht.

	Lebensdauer	Lastabtragung (Stopfbedarf)	Interaktion (Schleifbedarf)	Bogenatmung QVW	Kosten (Invest)
Betonschwelle	Neutral	Neutral	Negativ	Negativ, Neutral	Positiv
Beton besohlt	Positiv	Positiv	Positiv	Aktueller Forschungsbedarf, Positiv	Neutral
Stahlschwelle	Positiv	Neutral	Neutral	Neutral, Neutral	Neutral
Holzschwelle	Negativ	Positiv	Positiv	Negativ, Negativ	Neutral
Kunststoff	Ungeklärt	Positiv	Aktueller Forschungsbedarf	Ungeklärt	Ungeklärt






Neutral:  Neutral
 Positiv:  Positiv
 Negativ:  Negativ
 Ungeklärt:  Ungeklärt
 Aktueller Forschungsbedarf:  Aktueller Forschungsbedarf

Abbildung 5: Vor- und Nachteile der eingesetzten Streckenschwellentypen im Adhäsionsbereich

Ein zentrales Element der Betonschwelle ist die Schwellenbesohlung. Diese elastischen oder plastischen Elemente an der Unterseite der Schwelle verbessern die Lastverteilung, erhöhen den Querverschiebewiderstand und tragen zur Reduktion von Schlupfwellen bei. Somit können besohlte Betonschwellen den Schleifbedarf gegenüber konventionellen Betonschwellen erheblich reduzieren. Zusätzlich leisten sie einen Beitrag zur Schotterschonung, indem sie Kontaktfläche zwischen der Unterseite der Schwelle und der obersten Schotterschicht vergrössern. Durch den vermehrten Einsatz der besohnten Betonschwellen können diese Effekte in den kommenden Jahren auch im Netz der Meterspur im Sinne von Messdatenauswertungen vertieft untersucht werden.

Einzelne Meterspurbahnen verbauen bereits vermehrt besohlte Betonschwellen, wobei bislang ausschliesslich steife Besohlungen zum Einsatz kommen. Erste Tests mit elastischen Varianten laufen seit 2024. Besonders plastische Besohlungen zeigen in der Normalspur ein gleichmässigeres Bogenatmungsverhalten und könnten künftig auch in der Meterspur zur Reduktion des Grenzradius beitragen. Gemäss R RTE 22541 ist bei Radien unter 200 m eine gleichmässige seitliche Bogenatmung von 20 mm zulässig. Erste Erkenntnisse deuten darauf hin, dass bei plastisch besohnten Betonschwellen auch bei Radien um 100 m ein gleichmässiges Atmungsverhalten möglich wäre – dies wird derzeit weiter untersucht.

4.4 Schotter

Schotter ist ein gebrochenes, scharfkantiges Gestein, das sich durch seine hohe Druckfestigkeit, Abriebfestigkeit und Witterungsbeständigkeit auszeichnet. Er dient im Oberbau der Sicherstellung der horizontalen und vertikalen Gleislagestabilität, verteilt die Lasten auf eine für den Untergrund zulässige Grösse, gewährleistet die Entwässerung und ermöglicht die Durchführung von Unterhaltsarbeiten. Typische Gesteinsarten sind Basalt, Diabas, Granit, Metaphyr und Grauwacke. Um die geforderten Eigenschaften zu erfüllen, wird Schotter nach einer idealen Siebkurve klassiert. Die technische Spezifikation erfolgt gemäss SN EN 13450 und VSS 70110. Für Meterspurbahnen gelten die Empfehlungen der R RTE 21110, wonach je nach Belastungsgruppe Schotter der Klasse 1, 2 oder RC (Recycling-Schotter) einzusetzen ist.

Die Qualität des Schotters hat einen direkten Einfluss auf die Lebensdauer des Gleises. Bereits ein erhöhter Feinanteil bei der Lieferung kann die Gleisqualität und deren Entwicklung über die Zeit negativ beeinflussen. Gerade bei aufbereitetem Schotter muss die Einhaltung der technischen Anforderungen – insbesondere Kornform, Festigkeit und Wasserdurchlässigkeit – sichergestellt sein. Schotter mit ungenügender Kantigkeit kann die Gleislagestabilität beeinträchtigen und den Querverschiebewiderstand vermindern, daher kann dieser für den Einsatz als Fahrbahnschotter ungeeignet sein.

Zur Schonung des Schotters können elastische Elemente oberhalb des Schotterbetts eingesetzt werden – etwa weiche Zwischenlagen oder plastische Besohlungen. Beide Ansätze vergrössern die Lastverteilung oder Kontaktfläche und können die Alterung des Schotters verlangsamen. Im Sinne der

Ressourcenschonung wird empfohlen, ausgebauten Schotter – sofern technisch geeignet – als Vorschotterung wiederzuverwenden.

4.5 Unterbau / Untergrund

Der Aufbau des Fahrweges gliedert sich in verschiedene Schichten (siehe Abbildung 1). Besonders zentral für die Stabilität und Funktionalität der Fahrbahn ist der Unterbau – er übernimmt tragende und entwässernde Aufgaben und beeinflusst massgeblich die Lebensdauer der Gleisanlage.

Der Unterbau ist der Teil unterhalb der Planie und beinhaltet die Sperrschicht, Fundationsschicht, Übergangsschicht. Der Untergrund ist der unter dem Oberbau oder Unterbau anstehende Boden oder Fels. Die Grenze zwischen Unterbau und Untergrund wird als Planum bezeichnet.

Der Unterbau bildet die tragende und entwässernde Schicht unterhalb des Schotterbetts. Er verteilt die vertikalen Lasten aus dem Rad-Schiene-Kontakt in den Untergrund, schützt die Fahrbahn vor Frostschäden und leitet Wasser gezielt ab. Eine mangelhafte Tragfähigkeit oder Entwässerung kann schwerwiegende Folgen haben – von Setzungen über Schlammaufstösse bis hin zu Gleislagefehlern. Besonders bei Meterspurbahnen ist der Unterbau oft historisch gewachsen – rund 80 % der Strecken verfügen über keinen normierten Aufbau. Bei Erneuerungen wird heute vermehrt eine Planumsschutzschicht (PSS) oder eine bitumenhaltige Sperrschicht (AC-Rail) eingebaut.

Die Wahl des Unterbaus richtet sich nach Geologie, Belastung und Betriebsbedingungen. Die Strassenbauweise mit dem AC-Rail-System besteht aus einer wasserdurchlässigen Fundationsschicht und einer bituminösen, wasserundurchlässigen Sperrschicht. Sie bietet eine hohe Tragfähigkeit und Langlebigkeit, erfordert jedoch längere Sperrzeiten beim Einbau. Die PSS ist einfacher zu verlegen, auch in Nachtschichten, jedoch weniger dauerhaft. In beiden Fällen ist eine funktionierende Entwässerung entscheidend – sie verhindert die Durchfeuchtung des Untergrunds und damit verbundene Tragfähigkeitsverluste. Die Sperrschicht sollte mit Querneigung eingebaut werden, idealerweise in Richtung der Überhöhung, um Schotterflanken zu minimieren und Schotterflüssen zu vermeiden.

Ein besonderes Augenmerk gilt Steifigkeitssprüngen – etwa beim Übergang von Schottergleis auf feste Fahrbahn oder bei wechselnden Untergrundverhältnissen. Solche Übergänge können zu erhöhtem Schotterverschleiss oder gar Schienenbrüchen führen. Durch gezielte Massnahmen wie besohlte Schwellen oder abgestufte Unterbausteifigkeiten können diese Effekte reduziert werden. Die statische Gleissteifigkeit sollte möglichst gleichmässig verlaufen; Einsenkungsmessungen mit dem Messwagen liefern hierzu wertvolle Hinweise (siehe Abschnitt 4.6).

Bei Erneuerungen ist eine vorgängige Untersuchung des Untergrunds unerlässlich. Je nach Verformbarkeit auf dem Planum sind unterschiedliche Massnahmen erforderlich – von Materialersatz über Schottersäulen bis hin zu Mikropfählen.

Die Anforderungen an die Verformbarkeit des Planums⁴ sind in der AB-EBV zu Art. 25, AB 25, Ziffer 4.3.3 klar definiert: «*Falls der Verformungsmodul M_{E1} auf dem Planum bei Neubauten geringer als 15 MN/m² bzw. bei Erhaltungsvorhaben geringer als 6 MN/m² ist, sind Massnahmen zur Verbesserung des Planums zu treffen.*» Diese Vorgabe unterstreicht die Bedeutung einer sorgfältigen Untersuchung des Untergrunds – insbesondere bei Erneuerungen, wo die Tragfähigkeit oft stark variiert.

Für die Dimensionierung des Unterbaus sind Plattendruckversuche oder Drucksondagen **an der Planie** die aussagekräftigsten Methoden. Bei bestehenden Fahrbahnen ohne normierten Unterbau ist besondere Vorsicht geboten: Die oberste Bodenschicht ist oft über Jahrzehnte verdichtet („hard pan“ – eine stark verfestigte Bodenschicht mit hoher Tragfähigkeit) und sollte bei Erneuerungen möglichst erhalten bleiben. **Unabhängig davon, ob ein Unterbau in Form einer Sperrschicht ausgeführt wird, ist in jedem Fall eine funktionsfähige Entwässerung sicherzustellen – sie bildet die Grundlage für die dauerhafte Leistungsfähigkeit der Fahrbahn.**

Im Rahmen der Unterbauuntersuchung sollte stets eine Variantenbetrachtung erfolgen, bei der eine Bandbreite möglicher Massnahmen – von minimalen über mittlere bis hin zu maximalen Lösungen – systematisch erarbeitet und bewertet wird. Dieses Vorgehen, das üblicherweise bei der Normalspur

⁴ Die Begrifflichkeiten Unterbau, Untergrund, Planie und Planum werden in Abbildung 1 erläutert.

Anwendung findet, erlaubt eine differenzierte Beurteilung hinsichtlich Nutzen, Wirtschaftlichkeit und technischer Machbarkeit. Es verhindert, dass pauschal die technisch beste, aber auch kostenintensivste Lösung gewählt wird – ein Vorgehen, das bei Meterspurbahnen derzeit noch häufig anzutreffen ist. Stattdessen können auch wirtschaftlichere Massnahmen zur Anwendung kommen, die funktional ausreichend sind, den betrieblichen Anforderungen ebenso gerecht werden und nicht selten eine bessere Wirtschaftlichkeit aufweisen.

4.6 Gleissteifigkeit - Fahrbahnübergänge

Übergänge im Gleis stellen aufgrund unvermeidbarer Systemwechsel stets Unstetigkeiten der vertikalen Einsenkungen dar. Werden sie unsachgemäß ausgeführt, führen diese Unstetigkeiten zu einer erheblichen Reduktion der Lebensdauer des Oberbaus und damit zu erhöhtem Unterhaltsaufwand und LCC. In extremen Fällen kann mangelhafter Unterhalt sogar sicherheitsrelevante Probleme verursachen.

Die nachfolgende Erläuterung beschreibt die wesentlichen Zusammenhänge der vertikalen Gleiseinsenkungen und zeigt auf, welche Aspekte bei der Gestaltung von Fahrbahnübergängen zwingend zu berücksichtigen sind.

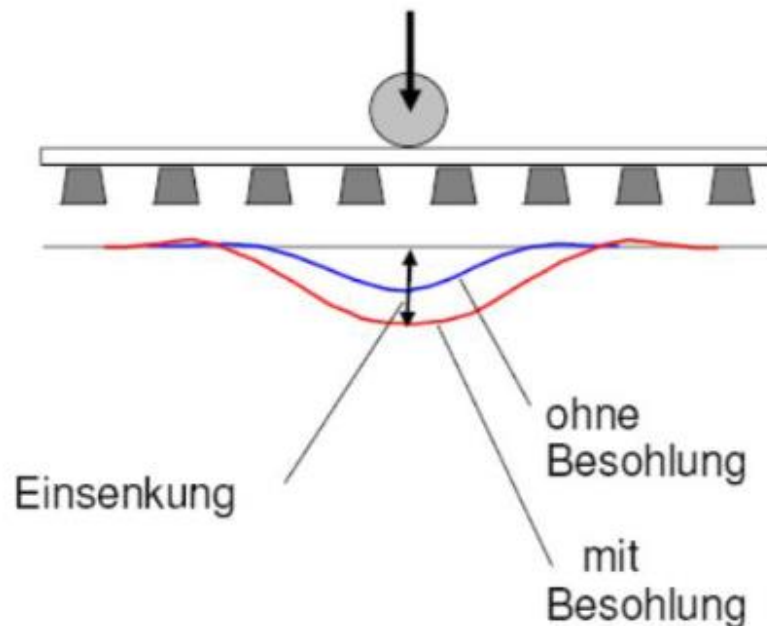


Abbildung 6: Einsenkung mit Besohlung und ohne Besohlung

Im Allgemeinen wird eine Deflexion – die vertikale Einsenkung des Gleises unter Last und als Mass für die Fahrbahnsteifigkeit - von etwa 1 mm unter 20 t Achslast angestrebt (AB-EBV zu Art.31, Blatt Nr. 4N). Für Meterspurbahnen entspricht dies ungefähr einer quasi-statischen Einsenkung von 1.0 bis 1.5 mm bei 16 t Achslast. Bei elastischen Stützpunkten entstehen eher längerwellige Einsenkungen, was die resultierenden Kontaktkräfte zwischen Rad und Schiene reduziert. Die Einsenkung darf im Allgemeinen bei 16 t nicht mehr als ca. 2 mm betragen.

Die Beispiele in Tabelle 1 bis Tabelle 3 zeigen die berechneten Einsenkungen nach Zimmermann, die mit dem entsprechenden Berechnungstool [6] für die spezifizierten Parameter ermittelt wurden.

Tabelle 1: Berechnung der Einsenkung nach Zimmermann mit Achslast 16t, Achsabstand 2.4m, ZW=700 kN/mm

Schwellenart:	Ohne spezifischen Unterbau	PSS / AC-Rail
Holzschwelle	1.0 – 1.7 mm	
Stahlschwelle	1.1 – 1.8 mm	1.0 – 0.9 mm
Y-Schwelle	1.5 – 2.6 mm	1.4 – 1.2 mm
Betonschwelle	1.1 – 1.8 mm	1.0 – 0.9 mm
Besohlte Betonschwelle	1.4 – 2.0 mm	1.3 – 1.2 mm

Tabelle 2: Berechnung der Einsenkung nach Zimmermann mit Achslast 12t, Achsabstand 2.0m, ZW=700 kN/mm

Schwellenart:	Ohne spezifischen Unterbau	PSS / AC-Rail
Holzschwelle	0.8 – 1.3 mm	
Stahlschwelle	0.8 – 1.4 mm	0.6 – 0.8 mm
Y-Schwelle	1.2 – 2.1 mm	0.9 – 1.1 mm
Betonschwelle	0.8 – 1.4 mm	0.6 – 0.8 mm
Besohlte Betonschwelle	1.0 – 1.6 mm	0.9 – 1.0 mm

Tabelle 3: Berechnung der Einsenkung nach Zimmermann mit Achslast 12t, Achsabstand 2.0m, ZW=100 kN/mm

System:	
Feste Fahrbahn LVT	1.1-1.3 mm
Feste Fahrbahn LVT HA	1.5-1.9 mm

Die in den vorhergehenden Tabellen dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen die Gesamteinsenkungen für verschiedene Fahrbahnkonfigurationen. Ergänzend dazu sind im Folgenden die möglichen Beiträge einzelner Elemente zur Einsenkung dargestellt:

- Zwischenlage
 - Weich 0.2 mm
 - Steif 0.0 mm
- Schwellenbesohlung
 - Steif 0.2 mm
- Schotterbett 0.5 mm
- Unterschottermatte
 - $C_{stat} = 0.06 \text{ N/mm}^3 \rightarrow 0.6 \text{ mm}$
 - $C_{stat} = 0.1 \text{ N/mm}^3 \rightarrow 0.3 \text{ mm}$
- Untergrund 0.0 – 5.0 mm

Der Untergrund hat den grössten Einfluss auf die Einsenkung. Um den Setzungsunterschied möglichst klein zu halten und damit den Unterhaltsaufwand zu reduzieren, bedarf es eines guten tragfähigen Unterbaus.

In der Vergangenheit wurden, um einen gleichmässigen Steifigkeitsübergang zwischen Stahlschwellen und Betonschwellen zu erhalten, mehrere Holzschwellen im Übergangsbereich eingebaut. Durch den Einsatz von besohnten Betonschwellen entfallen diese zusätzlichen Holzschwellen.

Im Eisenbahnwesen sind Unstetigkeiten und Einsenkungen systembedingt nie vollständig zu vermeiden. Entscheidend ist es jedoch, ihre Auswirkungen zu minimieren. Durch eine Begrenzung der Einsenkungsdifferenz auf 0,5 mm zwischen benachbarten Abschnitten lassen sich dynamische Effekte, die durch unterschiedliche Radlasten und Fahrgeschwindigkeiten entstehen, deutlich reduzieren. Ein zentrales Ziel jeder Übergangsgestaltung besteht daher darin, Setzungsunterschiede möglichst gering zu halten – insbesondere an Stellen, an denen das Gleis an fixe Zwangspunkte grenzt.

Die Dimensionierung und bauliche Gestaltung von Übergängen zwischen Schotteroberbau und festen Fahrbahnsystemen oder zwischen verschiedenen schotterlosen Systemen hat sich nach den einschlägigen Schweizer Normen zu richten. Insbesondere die SN EN 16432-2 [7] definiert die zu erfüllenden technischen Anforderungen. Häufig treten Übergänge an folgenden Stellen auf:

- Wechsel des Oberbausystems
- Wechsel des Unterbausystems
- Schotteroberbau ↔ Feste Fahrbahn
- Freie Strecke ↔ Brücke
- Gleis ↔ Weiche

Diese Systemwechsel führen zu Unterschieden in der Steifigkeit und damit zu variierenden Einsenkungen im Gleis.

Eine sachgerecht ausgelegte Übergangskonstruktion muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Minderung dynamischer Einflüsse zur Reduktion von Verschleiss und Belastung.
- Abstufung von Steifigkeitssprüngen, um harte Übergänge zu vermeiden.
- Minimierung differentieller Setzungen, die zu Unstetigkeiten und erhöhten Kräften führen.
- Optimale Länge des Übergangsbereichs, abhängig vom Systemwechsel und den örtlichen Randbedingungen.

Ziel ist stets ein Übergang, der möglichst geringe Setzungen verursacht und die Gleisgeometrie langfristig stabil hält.

Am Übergang zwischen den FF-Systemen und bei unterschiedlichen Schieneneinsenkungen wird empfohlen, dass jeder Steifigkeitsbereich eine Mindestlänge von v (in m/s) \times 0,5 (in s) haben sollte [7].

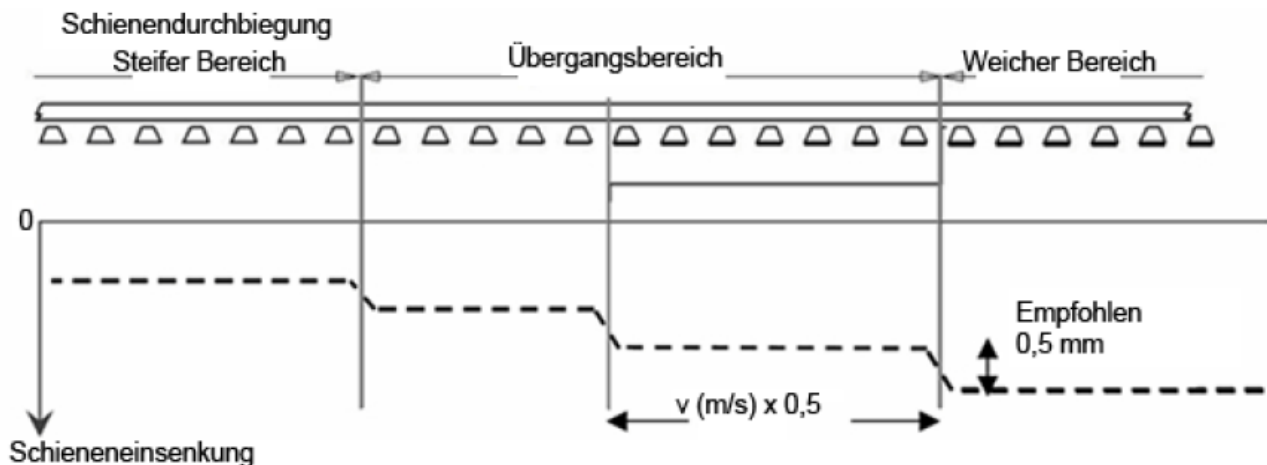


Abbildung 7: Schieneneinsenkung bei einem Fahrbahnübergang [8]

Zur baulichen Umsetzung wird ein umgekehrter Keil aus Magerbeton, Geröllbeton oder Rundkies 32/50 eingebaut. Um Nachsetzungen zu vermeiden, ist der Einbau schichtweise (ca. 30 cm) mit sorgfältiger Verdichtung vorzunehmen. Der Keil sollte möglichst flach ausgebildet sein; eine Neigung von 1:3 ist einzuhalten. Weiter ist am Ende von Schottertrögen, z.B. Brücken, eine Schotterhalterung von mindestens 2m Länge zur Vermeidung von Schotterfließen anzubringen.

5 Anlagenmanagement

Anlagenmanagement im Bereich Fahrbahn bedeutet, die verfügbaren Ressourcen effizient einzusetzen. Es zielt darauf ab, die Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus zu optimieren – von der strategischen Planung über die operative Umsetzung bis zur datenbasierten Zustandsbewertung. Die Lebenszykluskosten (LCC) setzen sich aus Abschreibung, Instandhaltung und Betriebserschwerungskosten zusammen.

Während Abschreibungskosten relativ einfach als Funktion der Investition und Nutzungsdauer erfasst werden können, erfordert die Prognose der Instandhaltungskosten eine Kombination aus dokumentierten Arbeitszyklen und messdatenbasierter Analyse. Betriebserschwerungskosten entstehen durch Einschränkungen im Regelbetrieb und müssen bei der Massnahmenplanung zwingend berücksichtigt werden, um ein Gleichgewicht zwischen Arbeitskosten und Betriebsqualität zu erreichen.

Der Zustand einer Anlage beschreibt die aktuelle Abweichung von der idealen Funktionalität, während die Substanz das Verhältnis von Anlagenalter zur erreichbaren Nutzungsdauer darstellt. Beide Größen beeinflussen sich gegenseitig und müssen gemeinsam betrachtet werden, um eine stabile und aussagekräftige Bewertung zu ermöglichen. Ein sicherheitskritischer Zustand ergibt sich aus der Festlegung eines technischen Grenzwerts – wird dieser unterschritten, ist die Funktionalität der Anlage nicht mehr gewährleistet. Während der Zustand durch gezielte Instandhaltung mit vergleichsweise geringem Aufwand verbessert werden kann, erfordert die Wiederherstellung der Substanz meist eine kostenintensive Reinvestition, die langfristig Mittel bindet. Eine integrierte Zustandsnote kann helfen, Budgetmittel gezielt zu verteilen – insbesondere auf Netzebene, wo die Substanzstruktur entscheidend ist. Dabei ist zu beachten, dass eine solche Note – je nach Gewichtung – eher das Alter als den tatsächlichen Zustand der Anlagen widerspiegeln kann.

5.1 Strategisches und operatives Anlagenmanagement

Grundsätzlich wird zwischen strategischem und operativem Anlagenmanagement unterschieden (Abbildung 8). Strategisches Anlagenmanagement verfolgt netzweite Ziele wie die Budgetplanung und die Entwicklung LCC-basierter Strategien. Es basiert auf einem Top-down-Ansatz mit sogenannten Standardelementen, die typische Konfigurationen (z. B. Gleisabschnitte mit definierten Randbedingungen) repräsentieren.

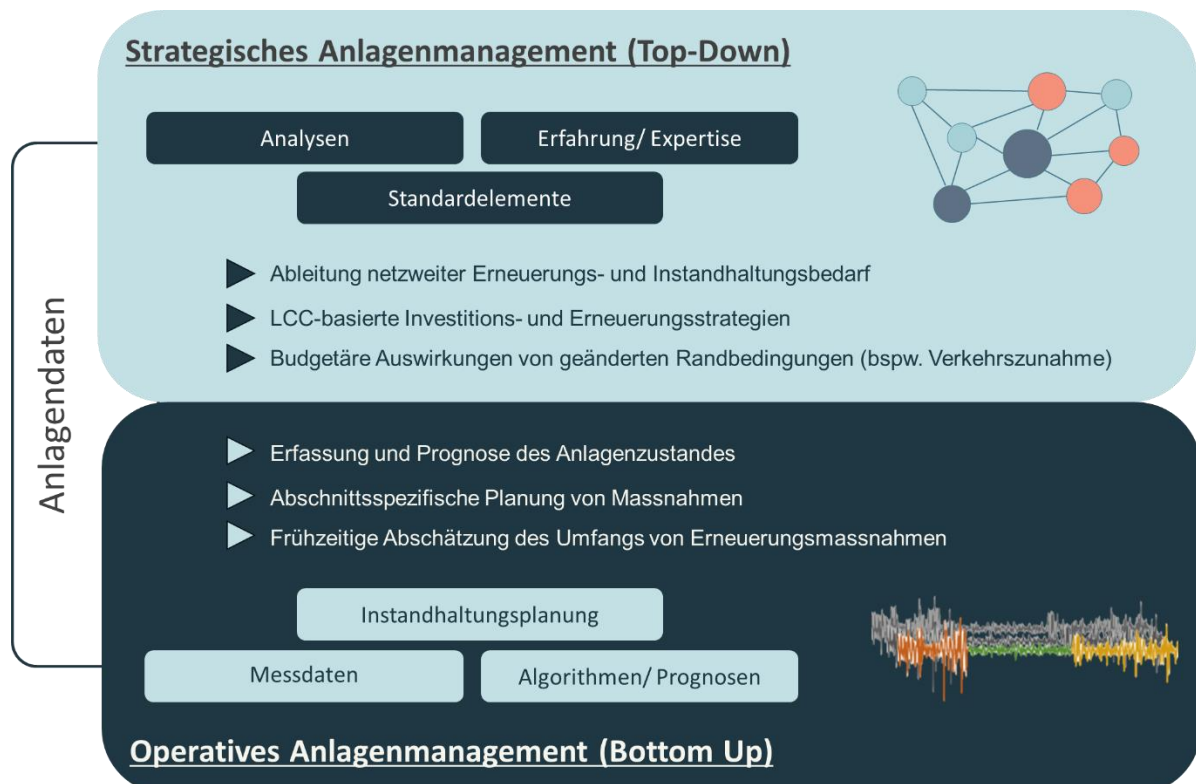


Abbildung 8: Überblick strategisches und operatives Anlagenmanagement

Diese Standardelemente ermöglichen eine standardisierte Bewertung von Lebenszykluskosten und Instandhaltungszyklen (Abbildung 9). Berücksichtigt werden bei den StdE Meterspur die kostenrelevanten Parameter wie Belastungsgruppe, Längsneigung, Bogenradius, Schwellentyp, Schienenprofil, Schienenstahlgüte, Unterbau und Entwässerung. Für jede Kombination dieser Parameter werden auf Basis historischer Daten und Expertenwissen typische Nutzungsdauern und Instandhaltungszyklen abgeleitet.

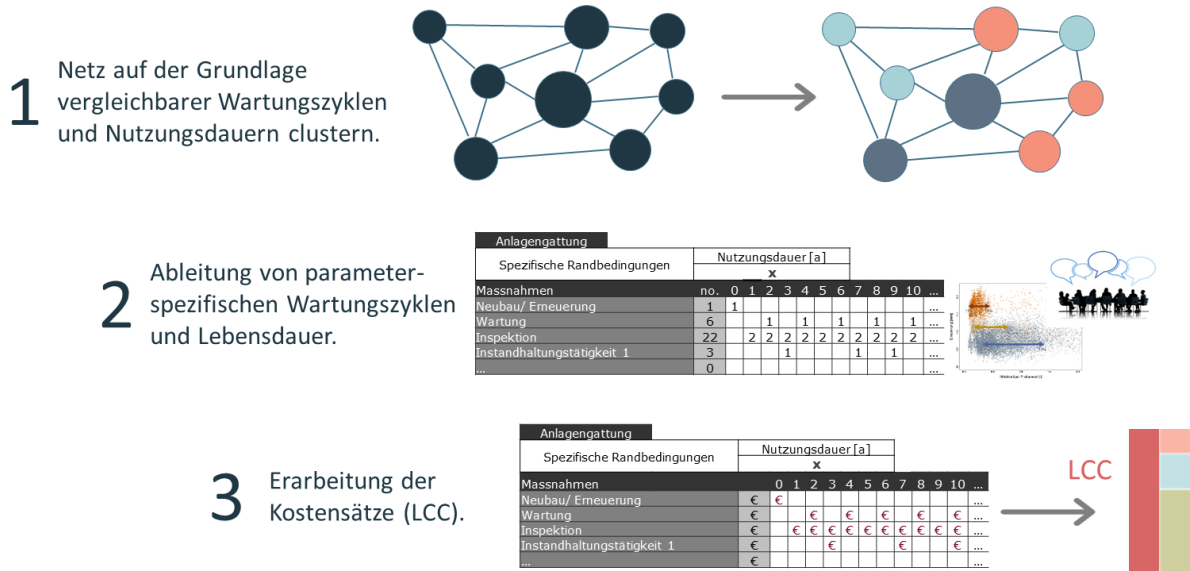


Abbildung 9: Erarbeitung von Standardelementen

So lassen sich netzweite Budgetprognosen und Strategien entwickeln, ohne jeden Abschnitt individuell analysieren zu müssen. Die Anwendung von Standardelementen erlaubt eine effiziente, vergleichbare und skalierbare Bewertung der Infrastruktur – ersetzt jedoch nicht die detaillierte Betrachtung einzelner Abschnitte.

Das operative Anlagenmanagement hingegen basiert auf einem Bottom-up-Ansatz und stützt sich auf die Erhebung und Auswertung von Messdaten. Nur durch die Erfassung des tatsächlichen Zustands einzelner Abschnitte kann eine nachhaltige, bedarfsgerechte Instandhaltungsstrategie etabliert werden. Anlagen, die konsequent auf hohem Qualitätsniveau instandgehalten werden, erreichen deutlich höhere Nutzungsdauern als solche, die lediglich an der Schwelle sicherheitskritischer Eingriffe betrieben werden. Die gewählte Instandhaltungsstrategie beeinflusst somit direkt die Substanzentwicklung und die langfristige Wirtschaftlichkeit.

Moderne Messsysteme wie Gleismesswagen und On-Board-Monitoring (OBM) liefern kontinuierliche Daten, die mittels Zeitreihenanalysen in konkrete Massnahmen überführt werden können. Ziel ist eine komponentenspezifische Prognose, die eine bedarfsgerechte Planung ermöglicht und die Verfügbarkeit der Infrastruktur maximiert.

5.2 Fahrbahnhinformatiionsmanagement (Asset-Datenmanagement)

Ein effizientes Anlagenmanagement basiert auf der Verknüpfung von Anlagedaten (Stammdaten) und Messdaten. Anlagedaten beschreiben die statischen Eigenschaften eines Abschnitts (z. B. Oberbau, Unterbau, Trassierung, Einbauten) und sind essenziell für die Kontextualisierung von Zustandsinformationen. Historische Daten liegen oft nur analog vor und müssen digitalisiert werden, um eine vollständige Substanzbewertung zu ermöglichen.

Messdaten dienen der Zustandserfassung und können visuell oder maschinell erhoben werden. Visuelle Einschätzungen sind subjektiv und wenig reproduzierbar, während maschinelle Messungen (z. B. Gleislage, Spurweite) eine objektive und prognosefähige Grundlage bieten. Eine sinnvolle Prognose ist ab drei bis vier Messpunkten möglich, weshalb eine regelmässige Messung – zumindest jährlich – empfohlen wird.

Die Zusammenführung aller Daten erfolgt über eine Datenplattform mit eindeutigem Ordnungsrahmen (z. B. Kilometrierung, georeferenzierte Querschnitte). Der Datenprozess folgt dabei einem klaren Ablauf: Die richtigen Informationen müssen erfasst, gespeichert, logisch verknüpft, analysiert und schliesslich visualisiert werden (Abbildung 10). Nur so entsteht eine belastbare Grundlage für strategische und operative Entscheidungen. Die Plattform muss flexibel genug sein, um Daten aus verschiedenen Quellen und Formaten zu integrieren – auch historische, analoge Daten.

Die RAILplus Arbeitsgruppe Anlagenmanagement arbeitet derzeit an der strategischen Beschaffung einer Anlagenmanagement Software. Im Rahmen dessen wird auch die Definition der Grundlagen für ein strukturiertes FahrbahnInformationsmanagement erarbeitet. Ziel ist es, eine einheitliche und praxisnahe Datenstruktur zu schaffen, die sowohl aktuelle als auch historische Informationen integriert und für strategische wie operative Entscheidungen nutzbar macht.

Darüber hinaus existiert die Spezifikation aus der Systemführerschaft Interaktion für die Erfassung, Auswertung und Bewertung von Rad- und Schienenprofilen [6].

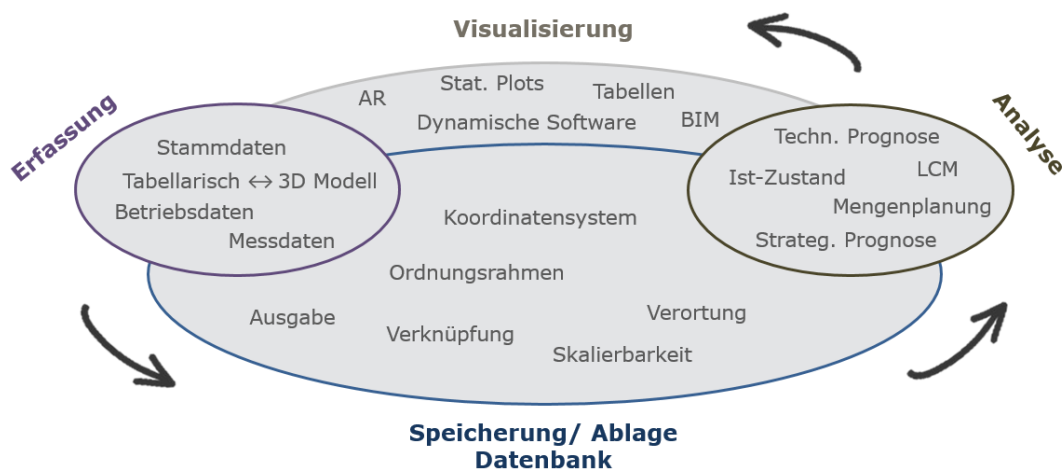


Abbildung 10: Werkzeuge zur Erfassung, Speicherung, Analyse und Visualisierung von Daten im Anlagenmanagement

5.3 Instandhaltungsstrategien

Instandhaltungsstrategien lassen sich in korrektive und präventive Massnahmen unterteilen.

SN EN 13306, 2018-07

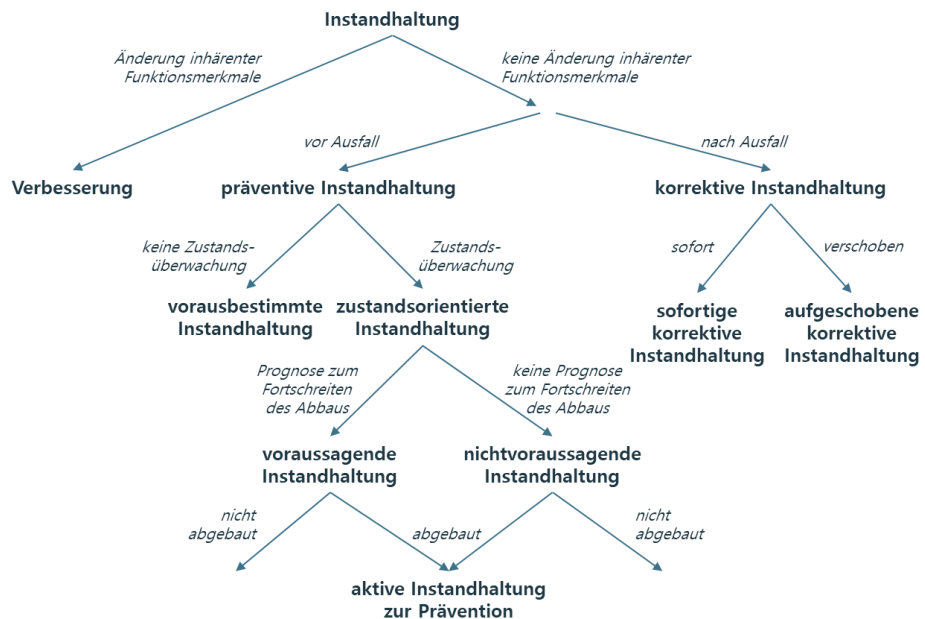


Abbildung 11: Arten der Instandhaltung laut SN EN 13306

Korrektive Instandhaltung erfolgt reaktiv nach Fehlererkennung und ist mit hoher Nichtverfügbarkeit verbunden. Präventive Instandhaltung zielt darauf ab, Schäden zu vermeiden und umfasst vorausbestimmte (zyklische) sowie zustandsorientierte Massnahmen.

Zustandsorientierte Instandhaltung basiert auf kontinuierlicher Messung und ermöglicht eine bauteilspezifische Planung. Prognosemodelle wie Regressionsanalysen helfen, den zukünftigen Zustand vorherzusagen und Massnahmen rechtzeitig zu planen. Die Genauigkeit hängt stark von der Positionierungsgenauigkeit der Messdaten ab – eine saubere Nachstationierung ist daher unerlässlich.

Die technische Analyse erfolgt querschnittsbasiert (bspw. alle 25 cm), muss aber in linienbezogene Instandhaltungskonzepte überführt werden. Dabei sind baubetriebliche Aspekte, Sonderkonstruktionen (Brücken, Weichen, etc.) und verfügbare Ressourcen zu berücksichtigen.

Eine frühzeitige Prognose ermöglicht die Zusammenfassung mehrerer Abschnitte zu einem grösseren Massnahmenpaket – ein Vorgehen, das als Clustering bezeichnet wird. Dabei werden einzelne Abschnitte gemeinsam instandgehalten, auch wenn dies lokal zu leicht vorgezogenen oder verzögerten Eingriffen führt. Durch Clustering lassen sich Kosten, Maschinen- und Personaleinsatz optimieren, sofern keine sicherheitskritischen Grenzwerte überschritten werden.

5.4 Erneuerungsplanung

Die Erneuerungsplanung beantwortet die zentrale Frage: Wann wird laufende Instandhaltung unwirtschaftlich? Ziel ist es, durch ein optimiertes Instandhaltungsregime eine möglichst lange Nutzungsdauer zu erreichen – ohne dass die steigenden Instandhaltungskosten die Einsparungen durch verlängerte Abschreibung übersteigen.

Die Grundlage bildet die sogenannte Annuitätenkurve (Abbildung 12), welche die Summe aus Abschreibung und Instandhaltungskosten über die Zeit darstellt.

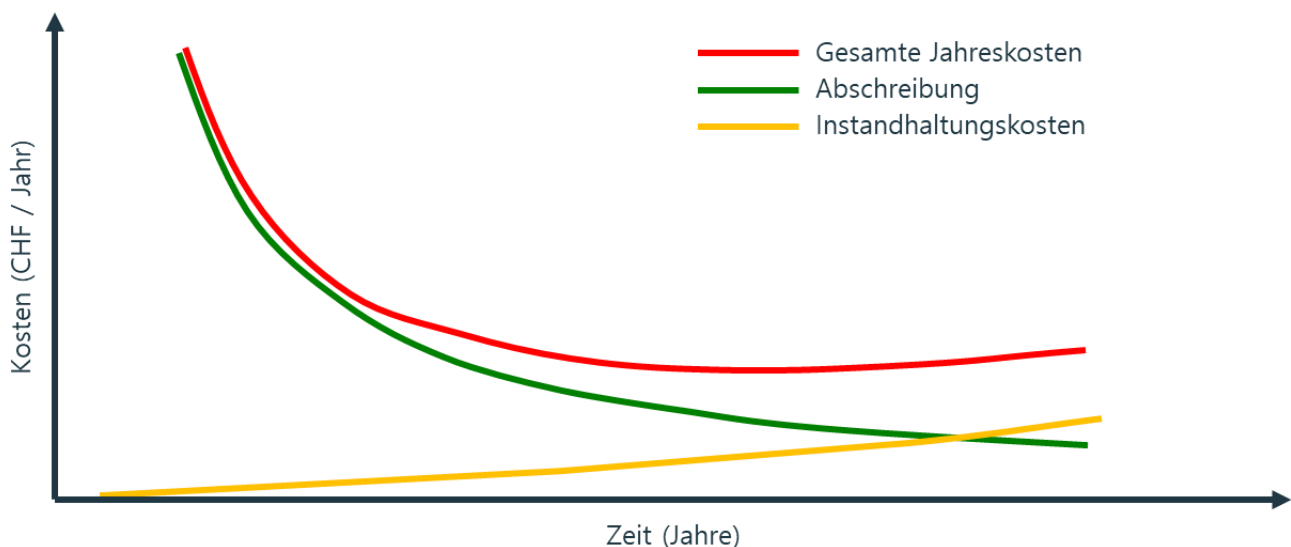


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Kostenfunktionen im Annuitätenmonitoring

Während die Abschreibungskosten mit zunehmender Nutzungsdauer kontinuierlich sinken, steigen die Instandhaltungskosten typischerweise sprunghaft an – insbesondere bei kostenintensiven Massnahmen. Gegen Ende der Nutzungsdauer ist darauf zu achten, dass diese steigenden Kosten die positiven Effekte der verlängerten Abschreibung nicht übersteigen. **Für eine wirtschaftlich fundierte Erneuerungsentscheidung reicht eine standardisierte Betrachtung nicht aus.** Entscheidend ist die Ermittlung des tatsächlichen Arbeitszyklus eines Abschnitts – also der konkreten Abfolge aller Massnahmen über die Zeit (Abbildung 13).

6 Einfluss der Fahrbahnkomponenten

In diesem Kapitel werden die im Bereich der Meterspur relevanten Fahrbahnkomponenten sowie deren Vor- und Nachteile erläutert. Darüber hinaus werden insbesondere Empfehlungen für den Einsatz und die Auswahl spezifischer Komponenten bei spezifischen Randbedingungen ausgesprochen. Diese allgemein gültigen Empfehlungen beziehen sich im Rahmen der Systemführerschaft auf das durchgängige Streckengleis im Adhäsionsbetrieb. Spezifische Bereiche (Übergangskonstruktionen, Weichen, Kunstbauten, etc.) sollten mittelfristig, beispielsweise im Rahmen der Meterspurzentren bearbeitet und ergänzt werden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die in Rahmen von «P4 Fahrbahnsteifigkeit» untersuchten Auswirkungen in unterschiedlicher Ausprägung durch die Wahl der Fahrbahnkomponenten beeinflusst werden können. Insbesondere die Auswirkungen hinsichtlich Lärms (sowohl «Kurvenkreischen» als auch «Schienensingen») und Schienenverschleiss werden vor allem auch durch die Trassierung sowie die Rad-/Schiene-Profilpaarung beeinflusst. Damit stellt sich ein indirekter Zusammenhang mit der Wahl der Fahrwegkomponenten dar (Abbildung 15).

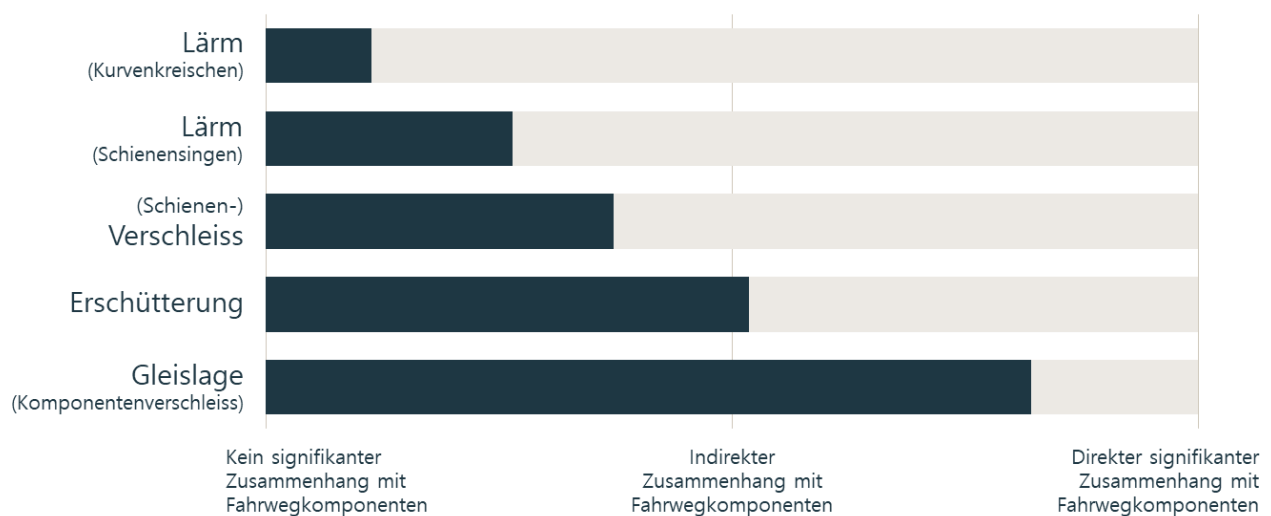


Abbildung 15: Zusammenhang und Beeinflussbarkeit der Auswirkungen mit unterschiedlicher Wahl der Fahrwegkomponenten

6.1 Erkenntnisse aus Simulationsmodellen

Im Rahmen von RAILplus werden innerhalb des Teilprojektes «P4 Fahrbahnsteifigkeit» unterschiedliche Modelle erarbeitet, um den Einfluss gewählter Komponenten auf das Fahrbahnverhalten quantifizieren zu können. Generell kann in Fahrbahnmodelle unterschieden werden, welche den Verschleiss sowie die Lärmentstehung an der Schienenoberfläche simulieren und Modelle, welche das Untergrundverhalten bei unterschiedlicher Baugrundbeschaffenheit bewerten. Dabei werden die Auswirkungen unterschiedlicher Fahrbahnkomponenten auf den Schienenverschleiss, die Lärmentstehung (Fokus Kurvenkreischen) sowie die langfristige Gleislagestabilität untersucht. Abbildung 16 stellt einen Überblick der Modelle sowie der anfänglichen Fragestellungen und gewonnenen Erkenntnisse dar.

		Zentrale Fragestellungen	Erkenntnisse
Statisch Feste Parameter, vereinfachte Annahmen zur Belastung.	 Quasi-statischer Schienenoberflächenverschleiss	<ul style="list-style-type: none"> ⊙ Wahl der Schienenstahlgüte ⊙ Einfluss der Achslast/ Achsabstand? ⊙ Nominalprofil vs. Verschleissprofil? ⊙ Spurerweiterung sinnvoll? 	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Relevanz in engen Bögen mit Radien < 150m ⊕ Verringerung der Radsatzführungssteifigkeit C_x kann den Anlaufwinkel positiv beeinflussen → Verschleissindikator TG/A wird dadurch reduziert, Longitudinalkräfte jedoch etwas erhöht. ⊕ Verschleissindikator TG/A ist generell etwas geringer bei RAILPLUS 25 Radprofil (schmalere Spurkränze)
	 Dynamischer Schienenoberflächenverschleiss	<ul style="list-style-type: none"> ⊙ Wahl der Schienenstahlgüte ⊙ Optimale Zwischenlage? ⊙ Einfluss der Achslast/ Achsabstand? ⊙ Nominalprofil vs. Verschleissprofil? ⊙ Spurerweiterung sinnvoll? 	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Minimierung des Verschleiss bei Anlaufwinkel < 10 mrad. ⊕ Kein wesentlicher dyn. Verschleiss bei Radien $R > 300m$. ⊕ Wellenlänge korreliert mit Betriebsgeschwindigkeit ⊕ Elastizität der Fahrbahn hat einen Einfluss → Detaillierte Aussagen Anfang 2026 erwartbar. ⊕ Profilgeometrie beeinflusst Initiierung von Schlupfwellen/Polygonen.
Dynamisch Berücksichtigen zeitabhängige Belastungen und wechselwirkende Kräfte.	 Lärmmodell (Fokus Kurvenkreischen)	<ul style="list-style-type: none"> ⊙ Kann die Fahrbahn das Kurvenkreischen durch Komponentenwahl minimieren? ⊙ Wenn ja, welche Komponenten sollten eingesetzt werden? 	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Nach aktuellem Erkenntnisstand zeigt sich kein wesentlicher Einfluss der Fahrbahnkomponenten auf die Entstehung und Ausprägung des Kurvenkreischen.
	 Baugrundmodell	<ul style="list-style-type: none"> ⊙ Langfristiges Gleislageverhalten bei unterschiedlichem Untergrund? ⊙ Unterbausanierung bei tiefliegendem schlechtem Baugrund ausreichend? ⊙ Können elastische Oberbauelemente die eingebrachten Spannungen verringern? 	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Signifikanter Einfluss der Fahrzeuge (Achslast und -abstand) und Geschwindigkeiten auf Scherdehnungsbeanspruchung im Untergrund. («Abe 100» rund 11% geringer als «Komet») ⊕ Steifer Oberbau (steife ZW, unbesohlte Betonschwellen) bewirkt bis zu +50% Vertikalspannungen auf Schotter. ⊕ Spannungsspitzen bei PSS um Faktor 0.89 zu AC RAIL. Günstigere Wasserableitung AC RAIL nicht berücksichtigt.

Abbildung 16: Übersicht der Simulationsmodelle Fahrbahn, Ziele und Erkenntnisse

Für die Simulationen hinsichtlich dynamischen Verschleisses wurden seitens virtual vehicle (vif) Mehrkörpersystem-Modelle mit flexiblen Rad- und Schienenkörpern erarbeitet, die über Finite-Elemente-Berechnungen ergänzt und mit Messdaten aus dem Betrieb (unter anderem MGB und zb) kalibriert wurden. Die Untersuchungen zum dynamischen Verschleiss – und damit zur Entstehung von Schlupfwellen – zeigen, dass dieser Mechanismus wesentlich durch das Zusammenwirken der strukturdynamischen Eigenschaften von Fahrzeug und Fahrbahn bestimmt wird. Für den Fahrweg bedeutet dies, dass seine elastischen und dynamischen Eigenschaften einen direkten Einfluss auf die Wachstumsrate aufweisen. Die Simulationen verdeutlichen, dass Schlupfwellen in Bögen der Meterspurbahnen dann entstehen, wenn ausreichend hohe Querschleppbewegungen auftreten. Diese wiederum werden im Wesentlichen durch den Anlaufwinkel der Radsätze bestimmt. Wird der kritische Grenzwert von etwa 10 mrad überschritten, steigt die Wachstumsrate des dynamischen Verschleisses deutlich an.

Aus fahrbahnseitiger Sicht sind dabei insbesondere jene Eigenschaften relevant, die in der Struktur-dynamik des Rad-Schiene-Systems wirksam werden. Die Simulationen zeigen klar, dass die Wellenlänge der entstehenden Schlupfwellen ausschliesslich von der Geschwindigkeit abhängt und nicht vom Bogenradius. Die Wachstumsrate hingegen lässt sich sowohl durch fahrzeugseitige Massnahmen (z. B. aktive Radsatzsteuerung) als auch durch gezielte Eingriffe am Fahrweg beeinflussen.

In den Simulationen wird ersichtlich, dass sowohl Wellenlänge als auch Wachstumsrate von Schlupfwellen gezielt durch die Modifikation der strukturdynamischen Eigenschaften von Fahrzeug- und Fahrwegkomponenten beeinflusst werden können. Damit wird deutlich, dass Änderungen an Fahrwegparametern – etwa Steifigkeit und Dämpfung einzelner Elemente wie Schienen, Zwischenlagen oder Bettung – im Systemverhalten wirksam werden und die Ausprägung des dynamischen Verschleisses verändern können. Detaillierte Erkenntnisse zur optimalen Schienengüte und dem Einfluss der Zwischenlagen- und Schwellentypen auf dynamischen Verschleiss sind für Anfang 2026 zu erwarten.

Weiterhin zeigen die Simulationen, dass sich der dynamische Verschleiss in Bögen in grossen Radien ($R > 300 m$) nicht mehr wesentlich ausbildet. Dies ist ein strukturdynamisches Ergebnis und bedeutet

für den Fahrweg, dass in diesen Radien aus Sicht des dynamischen Verschleisses keine besonderen Massnahmen notwendig sind.

Im Rahmen des **Baugrundmodells**, welches durch Baugrund Dresden erarbeitet wurde, wurden baugrund- und fahrbahnbezogene Parameterstudien mittels 2- und 3-dimensionaler Finite-Elemente-Modelle durchgeführt, um die Beanspruchungen des Untergrunds sowie die Belastungsverteilung innerhalb des Oberbaus von Meterspurstrecken zu beurteilen.

In Phase 1 wurde die dynamische Stabilität von Gleisen im Sinne der Planungshilfe DB InfraGO AG [10] untersucht. Dabei zeigen die Simulationen für mittelmittlen Baugrund nahezu eine Verdopplung der Scherdehnungen – und damit Beanspruchung des Untergrundes – bei einer Geschwindigkeitssteigerung von 50 km/h auf 100 km/h. Auch für Achslast und -abstand der Fahrzeuge konnte ein wesentlicher Einfluss nachgewiesen werden, so erhöhen sich beispielsweise die Scherdehnungen im Untergrund bei Einsatz des untersuchten Fahrzeugs «Komet» aufgrund der höheren Achslast und Achsabständen gegenüber dem Fahrzeug «ABe 100» um rund 11%. Für schlechten Baugrund konnten die Anforderungen der dynamischen Stabilität bis in 3 m Tiefe für keine der untersuchten Varianten erfüllt werden. Damit decken sich die Simulationsergebnisse mit den geotechnischen Feststellungen der MGB, wonach bei besonders schlechten Untergrundverhältnissen eine dauerhaft stabile Gleislage auf diesem Untergrund ohne bautechnische Ertüchtigung nicht erreichbar ist. Wenn dieser Nachweis der dynamischen Stabilität nicht erbracht werden kann, ist aufgrund erwartbarer kumulativer Setzungen im Lauf der Nutzungsdauer mit erhöhtem Stopfbedarf und entsprechend höheren Instandhaltungskosten zu rechnen. In diesen Fällen sind zusätzlich zum Einbau einer PSS oder AC Rail tiefgreifende Untergrundverbesserungsmassnahmen (z. B. Rüttelstopfsäulen) nötig, um eine langfristige Setzungsfreiheit gewährleisten zu können. Die Wirtschaftlichkeit dieser Massnahmen ist im Einzelfall zu prüfen.

In Phase 2 wurde anhand speziell für die Meterspur entwickelter 3D-FE-Modelle der Einfluss verschiedener Fahrbahnkomponenten auf die vertikale Spannungsverteilung analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass ein steifer Fahrbahnaufbau (steife Zwischenlagen in Kombination mit unbesohlenen Betonschwellen) die Lasten deutlich ungünstiger verteilt als ein elastischer Fahrbahnaufbau (weiche Zwischenlagen und besohlte Betonschwellen): Die vertikalen Normalspannungen an der Schotteroberkante steigen um bis zu 50 %, die Bettungssteifigkeit unter der Schwelle (Bettungsverteilung) um bis zu 97% (Abbildung 17). Der überwiegende Teil dieser erhöhten Spannungen wird im Schotterbett abgebaut. Dies führt zu einer höheren Kornbeanspruchung und somit potenziell schlechterer Gleislage und folglich verringerten Gleisnutzungsdauern sowie erhöhtem Stopfbedarf aufgrund Schotterzerstörung und ungleichmässigen Setzungen.

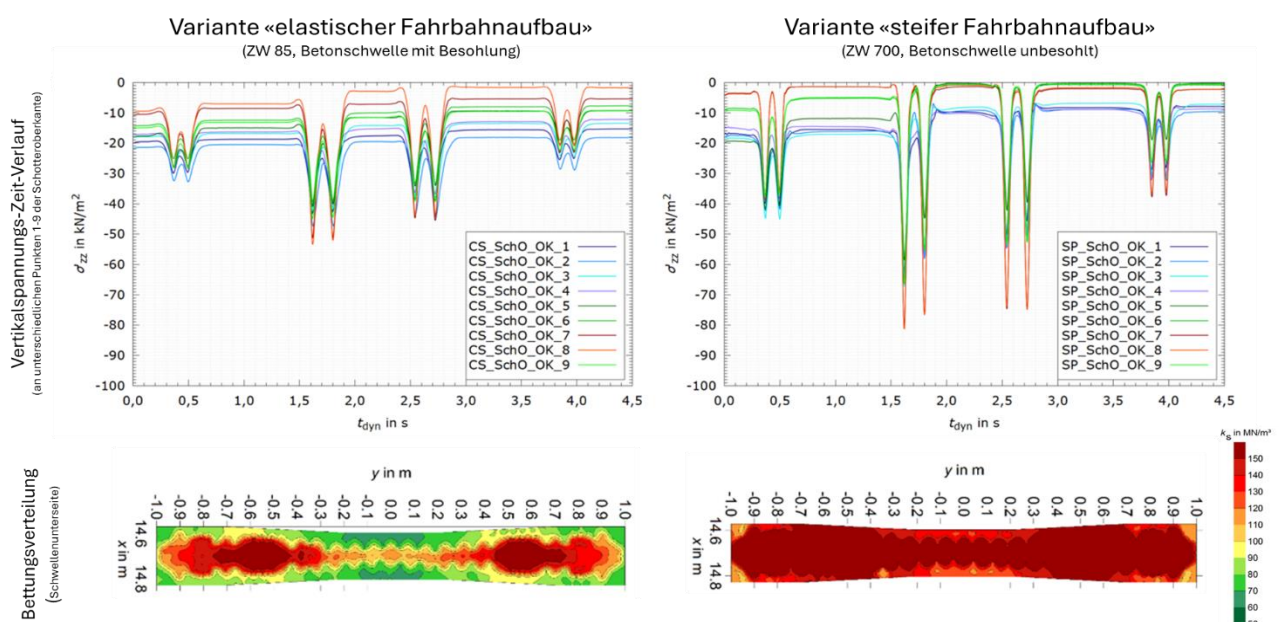


Abbildung 17: Vertikalspannungen und Bettungsverteilung bei unterschiedlichen Elastizitäten der Fahrbahn; Simulationen Baugrund Dresden

Darüber hinaus zeigen auch höheren Achslasten eine erhöhte Normalspannung in vertikaler Richtung. Eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Spannungen konnte nicht nachgewiesen werden, was auf die Modellannahme bewegter, aber nicht angeregter Lasten zurückzuführen ist. Ebenso blieb der Achsabstand ohne erkennbaren Einfluss - beides Ergebnisse, die in der Realität nur eingeschränkt übertragbar sind. Die maximalen Spannungsspitzen sind bei PSS um einen Faktor 0.89 kleiner als bei AC RAIL, die günstigere Ableitung des Wassers bei AC RAIL konnte im Modell allerdings nicht berücksichtigt werden.

Nähere Informationen und weitere Erkenntnisse aus den Simulationsmodellen sind über die dementsprechenden Lieferobjekte aus den einzelnen Teilprojekten abrufbar.

6.2 Erkenntnisse: Schiene und Schienenaufleger

Die Schienengüte hat keinen direkten Einfluss auf das Phänomen des Kurvenkreischens. **Ein einheitliches Schienenprofil, wie beispielsweise das empfohlene Profil 46E1, wirkt jedoch positiv, da es eine netzweit durchgängige Abstimmung mit dem Radprofil ermöglicht.** Besonders in Bögen unter 300m Radius sind hochfeste Stahlgüten zu bevorzugen, da sie den Verschleiss – insbesondere die Bildung von Schlupfwellen – vermindern und damit auch indirekt die Lärmbildung reduzieren (Abbildung 18).

Hinsichtlich Erschütterungen gibt es aus heutiger Sicht keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Schienenprofil oder -güte und den entstehenden Vibrationen. Das Profil 54E2 kann aufgrund seiner grösseren Biegelinie die Lastabtragung und damit die Gleislage positiv beeinflussen, jedoch führt das grössere Schienenprofil zu erhöhten Spannungen, wodurch in engen Bögen das Risiko für Gleisverwerfungen erhöht wird. Während es keinen direkten Zusammenhang zwischen der Stahlgüte und dem Gleislageverhalten gibt, wirken sich höhere Stahlgüten jedoch indirekt günstig aus, da sie die Schlupfwellenbildung und damit verbundene Überbeanspruchungen der Fahrbahnkomponenten verringern.

	Schiene		Schienengüte			Stützpunkt, Zwischenlagen		
	46 E1	54 E2	R 260	350 HT	400 HT	Hoch-elastisch	Elastisch	Steif
Lärm (Kurvenkreischen)	+	-	X	X	X	X	X	X
Lärm	+	-	B	+	++	-	+	++
(Schiene-) Verschleiss	+	-	B	+	++	++	+	-
Erschütterung	X	X	X	X	X	++	+	-
Gleislage (Komp.-Verschleiss)	B	+	X	X	X	++	+	+

++ sehr positiver Einfluss + positiver Einfluss ? keine generelle Aussage möglich X kein signifikanter Zusammenhang B Basisfall - negativer Einfluss -- sehr negativer Einfluss

Abbildung 18: Auswirkungen der Komponentenwahl Schiene und Schienenaufleger

Ein nennenswerter Einfluss von unterschiedlichen Zwischenlagen auf das Phänomen des Kurvenkreischens ist auf Basis der durchgeführten Fahrbahnsimulationen durch das ViF nicht zu erwarten. Generell können steifere Zwischenlagen Vibrationen und damit auch Lärm aus dem Rad-Schiene-Kontakt sowie die Entstehung von Schienensingen reduzieren. Im Gegensatz dazu haben weiche Zwischenlagen insbesondere im Bogen positive Effekte auf die Schlupfwellenbildung, wodurch sie indirekt zur Lärminderung beitragen. Sie bewirken zudem eine teilweise Entkopplung der Schienen- und Radschwingungen, was die Schlupfwellenbildung signifikant verzögert [11]. Weiche Zwischenlagen bieten auch weitere Vorteile, wie die Verringerung des Schwellenverschleisses und eine

verbesserte Dämpfung der eingebrachten Lasten. Dies führt dazu, dass weniger Last in das Schotterbett und den Untergrund abgetragen wird. Allerdings verkürzen weiche Zwischenlagen die Nutzungsdauer von Befestigungssystemen, da sie zu einer verstärkten Bewegung am Stützpunkt führen. Dies zeigt sich besonders beim Schienenprofil 54E2, dessen Verhältnis von Höhe zu Breite zu einer ungünstigen Krafrichtung beiträgt.

6.3 Erkenntnisse: Schwelle, Schotter und Untergrund

Der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Schwellentypen und dem Kurvenkreischen kann auf Basis der Fahrbahnsimulationen des vif als nicht signifikant erachtet werden (Abbildung 19). Bezüglich Lärmentwicklung (Schienensingen) weisen besohlte Betonschwellen ein positives Verhalten gegenüber unbesohnten Betonschwellen auf, während Stahlschwellen aufgrund ihrer hohen Dichte eine erhöhte Lärmentwicklung mit sich bringen; Holzschwellen zeigen im Gleisnabebereich aufgrund geringer Dichte einen positiven Effekt auf die Lärmentwicklung, weisen allerdings eine geringe Gleisabklingrate und damit erhöhte Lärmausbreitung auf [12]. Darüber hinaus zeigen besohlte Schwellen in Bogenbereichen positive Effekte, indem sie die Schlupfwellenbildung und damit indirekt die Lärmentstehung reduzieren.

Hinsichtlich des Schienenverschleisses besteht aus heutiger Sicht kein signifikanter direkter Zusammenhang mit dem Schwellentyp. Dennoch verhindern Schwellenbesohlungen das Auftreten partieller Hohllagen, wodurch sie grundsätzlich schlupfwellenhemmend wirken. Der Einfluss von Schwellentypen auf Erschütterungen ist insgesamt gering, jedoch zeigen besohlte Betonschwellen mit weichen Besohlungen eine besonders positive Wirkung im Hinblick auf Erschütterungsreduktion.

Betonschwellen mit elasto-plastischer (steifer) Schwellenbesohlung bieten die höchste Gleislagestabilität. Sie tragen zur Verringerung der Schotterzerstörung bei und erhöhen die Nutzungsdauer der Fahrbahn. Zudem zeigen Schwellen mit elasto-plastischer Besohlung in engen Bögen einen besseren Querschriebewiderstand als unbesohlte oder auch elastisch besohlte Betonschwellen [13]. Im Vergleich zu Holzschwellen bieten Betonschwellen eine bessere Spurhaltung. Y-Stahlschwellen zeichnen sich durch ihre Rahmensteifigkeit aus, weisen jedoch in der Praxis Probleme hinsichtlich der Lagestabilität und Durchführbarkeit von Instandhaltungsmassnahmen (Stopfen) auf.

	Schwellentyp					Schotter		Unterbau/Untergrund	
	Holz	Beton unbesohlt	Beton bes weich	Beton bes steif	Stahl	Schotterbettung	Unterschottermatte	Gut	Schlecht
Lärm (Kurvenkreischen)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Lärm	+	B	++	+	--	X	X	X	X
(Schienen-) Verschleiss	+	-	+	+	+	X	X	X	X
Erschütterung	+	-	++	+	+	B	++	+	-
Gleislage (Komp.-Verschleiss)	-	-	+	++	+	B	+	++	--

++ sehr positiver Einfluss + positiver Einfluss ? keine generelle Aussage möglich X kein signifikanter Zusammenhang B Basisfall - negativer Einfluss -- sehr negativer Einfluss

Abbildung 19: Auswirkungen der Komponentenwahl Schwelle, Schotter und Untergrund

Aus heutiger Sicht besteht kein direkter signifikanter Zusammenhang zwischen Schotter sowie Unterbau oder Untergrund und dem Kurvenkreischen, der Lärmentstehung oder dem

Schienenverschleiss. Dennoch haben Unterschottermatten (USM) in spezifischen Bereichen, wie Übergängen, Tunneln oder speziellen Brückenkonstruktionen, eine nachweislich positive Wirkung auf die Reduktion von Erschütterungen, sofern sie korrekt dimensioniert werden. Zudem können sie dort das Gleislageverhalten verbessern und den Komponentenverschleiss reduzieren (Abbildung 19).

Der Zustand des Unterbaus ist ein entscheidender Faktor im Rahmen der Lebenszykluskosten (LCC) einer Fahrbahn. Ein schlechter Unterbauzustand kann inhomogene Setzungen und das Aufsteigen von Feinteilen ins Schotterbett verursachen, was die Gleislage verschlechtert und den Komponentenverschleiss deutlich erhöht. Darüber hinaus wirkt ein nicht ausreichend tragfähiger Untergrund negativ auf die Erschütterungswerte, was sich langfristig auf die Infrastruktur auswirken kann.

7 Empfehlungen Komponentenstrategie

Die Komponentenstrategie wurde entwickelt, um die vielfältigen technischen Erkenntnisse aus Simulationen und Detailanalysen in eine klare, anwendungsorientierte Handlungsempfehlung zu überführen. Ziel war es, eine ausgewogene Balance zwischen technisch optimaler Auslegung und einer praktikablen, wirtschaftlichen Umsetzung mit möglichst wenigen unterschiedlichen Komponenten zu erreichen. Dadurch entsteht eine robuste, standardisierbare Strategie, die sowohl den betrieblichen Anforderungen als auch den Beschaffungs- und Instandhaltungsprozessen der Bahnen gerecht wird. Die Auswahl der geeigneten Komponenten im Gleisneubau richtet sich massgeblich nach den drei zentralen Einflussgrössen Belastung, Bogenradius sowie Untergrundqualität (Abbildung 20). Eine systematische Auslegung dieser Parameter ermöglicht einen wirtschaftlichen, langlebigen und robusten Oberbau, der sowohl die betrieblichen Anforderungen als auch die Lebenszykluskosten berücksichtigt.

Hinsichtlich der Belastungskategorie (Bruttotonnen pro Jahr) ist zu unterscheiden: Auf hochbelasteten Streckenabschnitten mit mehr als 5.000 BT/t werden besohlte Betonschwellen empfohlen, da sie eine hohe Tragfähigkeit, gute Schwingungsdämpfung und ein langfristig optimiertes Gleislageverhalten aufweisen. Unterhalb von 5.000 BT/t stellen Stahlschwellen eine wirtschaftliche Alternative dar, da sie bei moderaten Verkehrsbelastungen ausreichend dimensioniert sind und je nach Aktualität (Stahlpreis kann signifikanten Preisschwankungen unterliegen) geringere Beschaffungs- und Entsorgungskosten aufweisen können. Daher können Stahlschwellen – insbesondere in geraden Streckenabschnitten – auch bei Belastungen bis rund 7.000 BT/t eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative darstellen.

Als Schienenprofil wird durchgängig das Profil 46E1 empfohlen. Die Auswahl der Schienengüte und der Zwischenlagensteifigkeit wird massgeblich durch den Bogenradius bestimmt. Als massgebender Grund für Schleifmassnahmen stellt sich im Bereich der Meterspurbahnen der dynamische Verschleiss in Form von Schlupfwellen dar. Daher ist es essentiell, diesem Phänomen unter anderem auch mit höheren Schienenstahlgüten entgegenzuwirken. Aus diesem Grund wird empfohlen, die hochfeste Schienengüte R 400HT in engen Radien unter 300 m einzusetzen, welche besonders von Schlupfwellenbildung betroffen sind. In Radien oberhalb von 600 m können Schienengüten der Klasse R260 eingesetzt werden. Im Zwischenbereich ($300\text{ m} < R < 600\text{ m}$) kann es bei zunehmendem Auftreten von Head-Checks sinnvoll sein, die Schienengüte R 350HT zu verwenden, um dieser Fehlercharakteristik vorzubeugen, wie dies auch bei Normalspurbahnen bis zu Radien von 1500 m praktiziert wird.

Hinsichtlich Zwischenlagen sollten grundsätzliche mittelsteife Zwischenlagen eingesetzt werden, da sie eine Reduktion der vertikalen Steifigkeit bewirken und damit die Schlupfwellenbildung als auch Beanspruchung der Komponenten Schwelle und Schotter verringern. Ist dies in lärmsensitiven Gebieten nicht möglich, wird die steife Zwischenlage empfohlen. Besondere Bedeutung hat auch die Qualität der Zwischenlagen sowie der eingesetzten Spannklemmen. Neben der statischen Steifigkeit [kN/mm] ist insbesondere in engen Radien auf hochwertige Kunststoffmaterialien sowie die geeignete Spannmittelwahl zu achten. Unterschiede in der Materialqualität und in den konstruktiven Eigenschaften der Zwischenlagen und Spannklemmen wirken sich nachweislich auf die Verwindung der Schiene, die resultierende Schienenneigung sowie auf den Verschleiss aus. Aus diesem Grund werden im Jahr 2026 umfassende Feldversuche bei mehreren Meterspurbahnen durchgeführt, um verschiedene Zwischenlagen- und Spannmittelkonzepte systematisch zu testen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen künftig in standardisierte Empfehlungen für den Fahrbahnaufbau im Bogen einfließen.

Die Untergrundqualität stellt den dritten massgeblichen Einflussfaktor dar. Auf tragfähigen Untergrundabschnitten sind in der Regel keine zusätzlichen Massnahmen erforderlich, sofern die Entwässerungsfähigkeit dauerhaft gewährleistet ist. Bei schlechten Untergrundverhältnissen hingegen sind konstruktive Verbesserungen wie eine Planumsschutzschicht (PSS) oder der Einsatz von bituminösen Tragschichten wie AC Rail notwendig, um Setzungen zu reduzieren und die langfristige Tragfähigkeit und Entwässerungsfähigkeit sicherzustellen.

Belastung	>= 5'000 BT/t (N1/E1 & N2/E2 & N3/E3)		< 5'000 BT/t (N4/E4)	
	Schwelle Besohlte Betonschwelle		Stahlschwelle	
Radius	R ≥ 600m		600m ≥ R ≥ 300m	
	Schienenprofil 46E1			
	Schienengüte R260		R 350HT	
	Zwischenlage		R 400HT	
Mittelsteif (200 kN/mm) [In lärmsensitiven Gebieten: Steif (700 kN/mm)]				
Untergrund	Gut		Schlecht	
	Verbesserungsmassnahme Keine Massnahme*		PSS oder AC Rail	

* (Wieder)Herstellung der Entwässerungsfähigkeit sollte jedenfalls erfolgen.

Abbildung 20: Generelle Komponentenstrategie im Rahmen der Erneuerung

Darüber hinaus spielt die Wahl des durch «Teilprojekt P3 Rad/Schiene» in Erarbeitung befindlichen (Verschleiss-) Schienenprofils eine Rolle in dem zu wählenden Schienenprofil. Sofern ein Verschleissprofil aufgeschliffen werden sollte, welches sich danach durch Betriebseinwirkungen möglichst wenig verändern (weiter verschleissen) sollte, kann eine Verwendung der Güte R400HT gegenüber R350HT auch aus diesem Aspekt im Sinne der Interaktion nützlich sein. Jedenfalls sollte neben der Profil- auch die Werkstoffpaarung von Rad und Schiene für Einsatz hochfester Güten optimiert werden.

Zur praktischen Anwendung der Bahnen wird im Rahmen der Erarbeitung der Komponentenstrategie auch die strecken-spezifische Radienverteilung mitberücksichtigt (Abbildung 21). Für Strecken, welche einen hohen Anteil (>= 45% der Streckenlänge) an engen Bögen aufweisen, kann es wirtschaftlich und logistisch sinnvoll sein, eine Ein-Güten-Strategie (Bezeichnung «UniRail») zu verfolgen und durchgehend hochfeste Schienenstahlgüten einzusetzen. In Anlehnung an die Erkenntnisse aus Teilprojekt P3 wird bei einer Ein-Güten-Strategie die Schienengüte R350HT empfohlen.

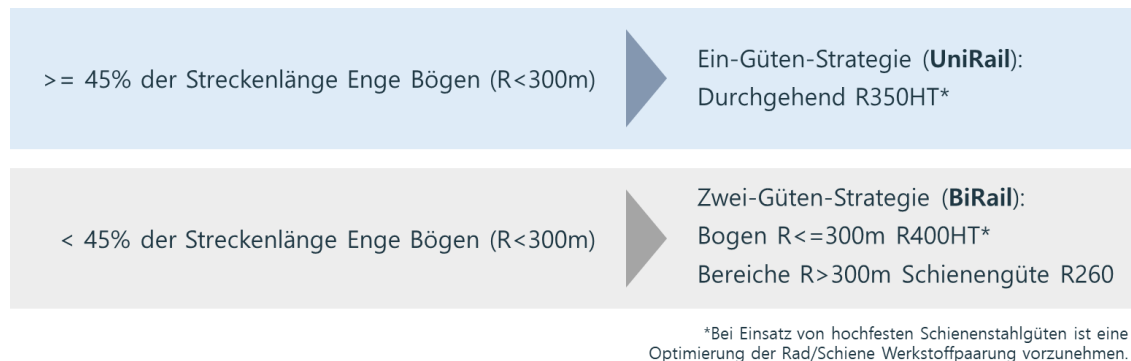


Abbildung 21: Differenzierung der Strecken zur Erarbeitung der streckenspezifischen Schienenstahlgütenstrategie

Während eine generell formulierte Komponentenstrategie (Abbildung 20) eine sinnvolle Grundlage darstellt, ist sie für die Umsetzung in der Praxis nur bedingt ausreichend. Die Schweizer Meterspurbahnen weisen eine grosse Vielfalt an betrieblichen und topografischen Rahmenbedingungen auf, die sich unmittelbar auf die Anforderungen an Fahrbahnkomponenten auswirken. Aus diesem Grund ist es entscheidend, die Strategie nicht nur auf genereller Ebene zu definieren, sondern zusätzlich streckenspezifisch für jedes Bahnunternehmen auszuwerten. Nur so lässt sich eine technisch belastbare und wirtschaftlich optimale Empfehlung ableiten.

Ein zentraler Grund für die streckenspezifische Betrachtung liegt in den unterschiedlichen Belastungsniveaus (BT/t). Die jährliche Bruttotonnenbelastung bestimmt wesentlich, ob besohlte Betonschwellen oder Stahlschwellen eingesetzt werden sollten (Abbildung 20). Die dafür notwendigen Belastungsdaten wurden auf unterschiedliche Weise erhoben. Bahnen mit mehreren, stark unterschiedlich belasteten Strecken (RhB, MOB, AB, RBS, TPF, zb) wurden streckenspezifisch erhoben. Alle weiteren Bahnen sind als Durchschnittswert auf Basis der netzweiten Belastung laut WDI-Daten (Webinterface Daten Infrastruktur, BAV) abgebildet. Sämtliche aktuellen Belastung wurden für die Erarbeitung der Strategien werden um 20% erhöht, um einen künftig zu erwartenden Verkehrszuwachs zu berücksichtigen. Ausser, seitens der Bahnen wurden bereits prognostizierte zukünftige Belastungen übermittelt.

Ebenso relevant ist die streckenspezifische Radienverteilung, da diese unmittelbar die erforderliche Wahl der Schienengüte beeinflusst (Abbildung 21). Die Eingangsdaten der spezifischen Radienverteilung aller Bahnen beziehen sich auf Ausarbeitungen der unterschiedlichen Teilprojekte der Systemführerschaft und sind im Tool «Innovative Times» abgebildet. Folgende Bahnen wurden hinsichtlich ihrer Bogenverteilung aktuell noch nicht erfasst und scheinen dementsprechend auch noch nicht in der streckenspezifischen Strategieklassifizierung auf: BDWM Transport AG (BD), Biere-Apples-Morges (BAM), Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi (FART), Wynetal- und Suhrental-Bahn (WSB).

Die folgenden Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die streckenspezifischen Empfehlungen hinsichtlich Schienengüten- («BiRail», «Unirail») sowie Schwellenstrategie («Betonschwelle mit Besohlung», «Stahlschwelle»). Zusätzlich sind auch die zugrunde gelegte Belastung sowie die Radienverteilung der spezifischen Strecke dargestellt. Insbesondere sollte damit sichtbar gemacht werden, welche Strecken sich in der Nähe des Schwellenwerts von 45 % Streckenlänge mit engen Radien (< 300 m) befinden. Dieser Wert wurde als technische Richtgrösse gewählt, um eine klare und belastbare Strategie ableiten zu können. Aus praktischen Gründen – insbesondere im Hinblick auf Logistik und Beschaffung – kann es jedoch sinnvoll sein, auch Strecken mit einem etwas geringeren Anteil enger Bögen der «UniRail»-Strategie zuzuordnen, wenn diese bereits auf anderen Strecken desselben Bahnunternehmens eingesetzt wird.

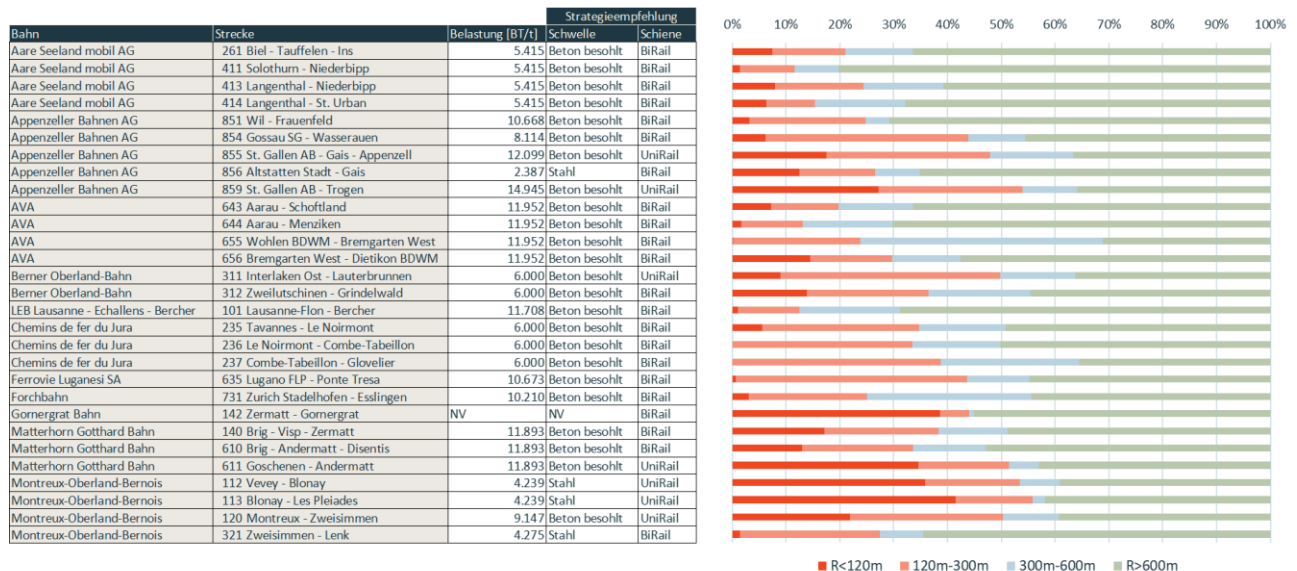


Abbildung 22: Ableitung der Streckenspezifischen Empfehlungen für Schienengüte und Schwellentyp, Seite 1 von 2

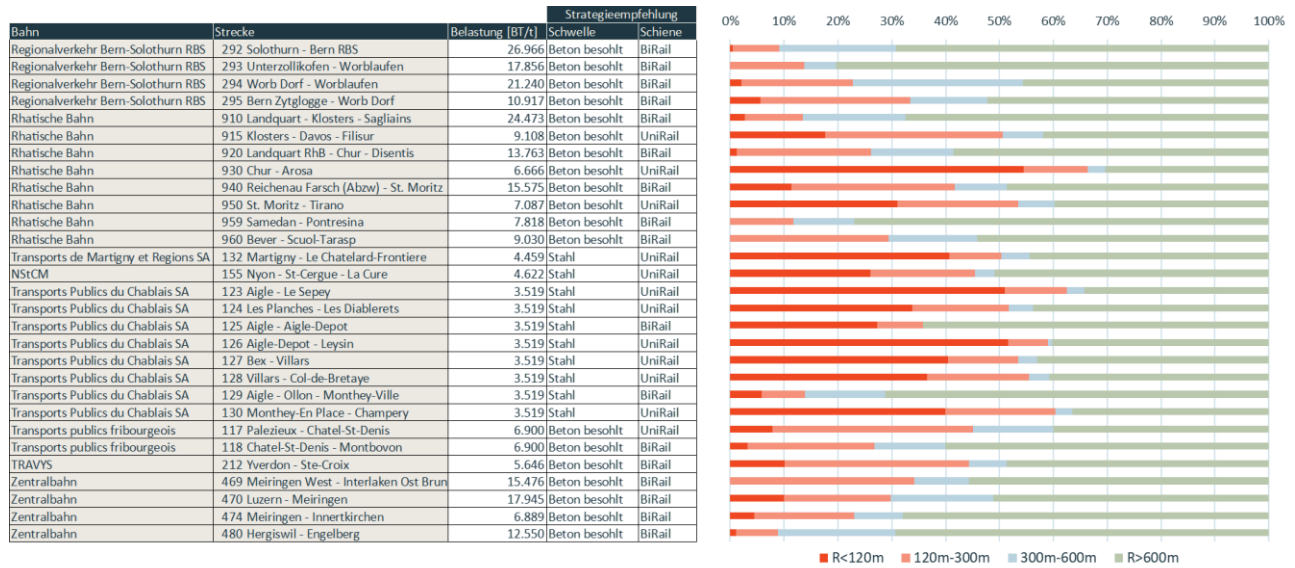


Abbildung 23: Ableitung der Streckenspezifischen Empfehlungen für Schienengüte und Schwellentyp, Seite 2 von 2

Wie notwendig eine streckenspezifische Komponentenstrategie ist, zeigt unter anderem das Beispiel der Montreux-Berner Oberland-Bahn (MOB, französisch: Chemin de fer Montreux Oberland bernois). Das Netz der MOB umfasst mehrere Strecken mit sehr unterschiedlichen Charakteristika (Abbildung 22). Auf dem Streckenabschnitt Vevey – Les Pléiades befinden sich mehr als 50% der Streckenlänge in engen Bögen mit einem Radius kleiner 300 m. Dementsprechend wird hier eine «UniRail» Strategie empfohlen, während diese für den Streckenabschnitt Zweisimmen – Lenk nicht sinnvoll ist, da hier lediglich rund 25% der Streckenlänge als enge Bögen charakterisiert sind. Ähnliche Unterschiede ergeben sich auch hinsichtlich der Schwellenstrategie, da drei von vier Strecken der MOB eine Belastung von knapp über 4.000 BT/t aufweisen und daher der Einsatz von Stahlschwellen empfohlen wird, während die Strecke Montreux – Zweisimmen eine weitaus höhere Belastung erfährt und hier folglich besohlte Betonschwellen die optimale Wahl darstellen. An diesem Beispiel zeigt sich, dass innerhalb eines Bahnunternehmens mehrere unterschiedliche Komponentenstrategien je Strecke sinnvoll und notwendig sein können. Eine generalisierte Strategie für sämtliche Strecken eines Unternehmens würde die spezifischen technischen Unterschiede nicht ausreichend abbilden und könnte zu Fehlentscheidungen oder unwirtschaftlichen Lösungen führen. Die streckenspezifische Betrachtung hingegen ermöglicht eine differenzierte, technisch fundierte und betrieblich optimierte Ableitung der wesentlichen Komponenten – angepasst an die tatsächlichen Beanspruchungen jeder einzelnen Strecke.

Auf Basis dieser streckenspezifischen Strategien wird für 73% des gesamten Meterspurnetzes eine Mehr-Güten-Strategie («BiRail») empfohlen, welche sich durch den Einsatz der Schienengüte R 400 HT in engen Bögen (R<300 m) sowie R 260 in den übrigen Bereichen definiert. Für den übrigen Anteil der Strecken wird aufgrund der erhöhten Bogenhäufigkeit eine «UniRail» Strategie mit einem durchgehenden Einsatz von R 350 HT empfohlen. Hinsichtlich des Einsatzes unterschiedlicher Schwellentypen wird belastungsspezifisch für 89% des gesamten Meterspurnetzes der Einsatz von besohnten Betonschwellen empfohlen, während für die übrigen 11% die Stahlschwelle die optimierte Lösung darstellt.

8 Optimierung durch Komponentenwahl und Instandhaltung

Aus Sicht des Teilprojektes «P4 Fahrbahnsteifigkeit» sollten Optimierungen in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus des Fahrwegs durchgeführt werden. Daher werden an dieser Stelle auf Basis der erarbeiteten Erkenntnisse auch Optimierungspotentiale im Rahmen der Komponentenwahl (Neubau, Erneuerung und Austausch von Komponenten) sowie von Instandhaltungsmassnahmen und -strategien zusammengefasst. Darüber hinaus werden an dieser Stelle auch Potentiale möglicher Innovationen angeführt, deren Einsatzgebiete mittelfristig weiter untersucht und analysiert werden sollten.

8.1 Optimierung durch Komponentenwahl:



Um eine optimale Abstimmung der Rad- und Schienenprofilpaarung sicherzustellen, wird die Verwendung des einheitlichen Schienenprofils 46E1 empfohlen. Im Rahmen des Projekts P3 – Rad/Schiene wird derzeit ein asymmetrisches Schienenprofil entwickelt und erprobt. Bei Radien unter 200 m könnte dieses Profil künftig eingesetzt werden, um die Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene zu optimieren. Ob der Einsatz eines verschleissoptimierten und gegebenenfalls ebenfalls asymmetrischen Schienenprofils in Geraden sinnvoll ist, bleibt offen. Nach Klärung der technischen Eignung ist die Wirtschaftlichkeit dieser Massnahmen zu prüfen. *(Aktueller Stand der Empfehlung, der in Abstimmung mit dem Projekt P3 – Rad/Schiene der SFI erreicht wurde.)*










Für sämtliche Gleisabschnitte – sowohl in der Geraden als auch im Bogen – wird die Anwendung einer durchgehenden Spurweite von 1003 mm empfohlen. Dadurch kann eine Spurverengung unter 1000 mm verhindert werden. Der Einsatz von hochfestem Schienenstahl der Güteklasse R400HT (oder alternativ R350HT) in Bögen mit Radien von weniger als 300 m führt zu einer signifikanten Reduktion der Bildung von Schlupfwellen und somit des dynamischen Verschleisses. Die Ausgestaltung der Schienengütenstrategie erfolgt bahn- und streckenspezifisch unter Berücksichtigung der Radienverteilung. In Abschnitten mit gerader Linienführung ($R > 600$ m) wird die Verwendung der Güteklasse R260 empfohlen. Wird aus logistischen und Beschaffungsgründen eine Ein-Güten-Strategie empfohlen, so sollte diese mit R350HT ausgeführt werden, um einen übermässigen Einsatz von R400HT in geraden Abschnitten zu vermeiden. Detaillierte Empfehlungen dazu werden in Abschnitt 7 erläutert. *(Aktueller Stand der Empfehlung, der in Abstimmung mit dem Projekt P3 – Rad/Schiene der SFI erreicht wurde.)*



Bei wiederkehrenden vertikalen Fahrwegeinflüssen im Bereich von Schienenstössen – insbesondere bei Überschreitung akzeptabler Amplituden – sollte mittelfristig auch die Schweissstrategie kritisch hinterfragt werden. Statistische Auswertungen von Loidolt & Marschnig [14] legen nahe, dass aluminothermische Schweissungen im Vergleich zu Abtrennstumpfschweissungen deutlich häufiger zu Schweissnahtverformungen („weld battering“) führen. Ein möglicher Erklärungsansatz für das beschriebene Phänomen ist die grössere Wärmeeinflusszone. Diese kann lokal zu einer reduzierten Härte im Schienenkopf und damit zu erhöhtem Verschleiss führen. In Anbetracht der vorliegenden Fakten und Daten ist zu evaluieren, ob das Abtrennstumpfschweissen als alternatives Verfahren aus technisch-wirtschaftlicher Sicht auch bei der Meterspur eingesetzt werden kann.



Die Wahl der Schieneneinbauneigung (1:20 oder 1:40) beeinflusst die Berührgeometrie bei der Verwendung verschleissoptimierter Radprofile nur geringfügig. Zur Vereinheitlichung der Schienenbefestigung und zur Verbesserung der Interaktion zwischen Rad und Schiene wird eine einheitliche Einbauneigung von 1:20 empfohlen. (Aktueller Stand der Empfehlung, der in Abstimmung mit dem Projekt P3 – Rad/Schiene der SFI erreicht wurde.)

	<p>Weiche Zwischenlagen (85 kN/mm) haben Vorteile in Bezug auf die Schlupfwellenbildung und vertikale Lastabtragung, steife Zwischenlagen (700 kN/mm) reduzieren die Lärmbildung (Schienensingen). Um die Vor- und Nachteile beider Lösungen zu balancieren, wird der Einsatz der mittelsteifen Zwischenlage (200 kN/mm) empfohlen. In Lärm-sensitiven Gebieten und bei dementsprechenden Auflagen kann die steife Zwischenlage (700kN/mm) eingesetzt werden. Dies sollte allerdings in Bogenbereichen ($R < 300\text{m}$) aufgrund der erhöhten Schlupfwellenbildung (und dadurch auch verursachten Lärmentwicklung) möglichst vermieden werden.</p>
	<p>Für stark belastete Bereiche wird die Verwendung von plastisch beschlten Betonschwellen als Standard empfohlen. Diese Massnahme führt zu einer signifikanten Verbesserung der langfristigen Gleislagequalität, was wiederum die Nutzungsdauer erhöht. Darüber hinaus wird die Schlupfwellenbildung reduziert. Der Einsatz von Schwellenbeschlungen führt zu einer signifikanten Reduktion der Kontaktpressungen zwischen Schwelle und Schotter. Dies führt zu einer längeren Nutzungsdauer der Komponente Schotter</p>
	<p>Bei geringen Belastungen ($< 5.000\text{ BT/t}$, Belastungsklasse N4/E4 nach AB-EBV) oder unzureichender Schotterbettdicke können Stahlschwellen eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Aufgrund ihrer schmalen Flanken erfolgt die Lastübertragung punktuell, wodurch im Bereich der Schwellenkanten sehr hohe Flächenpressungen entstehen. Dies kann bei hoher Belastung zu Schotterzertrümmerung und einer schnellen Verschlechterung der Gleislage führen. Stahlschwellen sind zudem nur bedingt für höhere Geschwindigkeiten geeignet.</p>
	<p>Der Einsatz von Unterschottermatten erweist sich unter spezifischen Randbedingungen, wie beispielsweise im Kontext von Tunneln oder Steifigkeitssprüngen, als sinnvoll. An dieser Stelle kann keine generelle Empfehlung ausgesprochen werden. Es ist jedoch in jedem Fall erforderlich, eine Dimensionierung unter Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten vorzunehmen.</p>
	<p>Im Rahmen einer Erneuerungsmassnahme ist jedenfalls zu prüfen, ob eine Unterbauverbesserung notwendig ist und die Entwässerungsfunktion der Fahrbahn gewährleistet ist. Bei einem ausreichend tragfähigem anstehenden Boden (vgl. AB-EBV) erweist sich eine Unterbausanie rung in der Regel als unwirtschaftlich.</p>
	<p>Der Einsatz von PSS oder AC Rail wird massgeblich von den technischen Rahmenbedingungen sowie von den organisatorischen Gegebenheiten, wie etwa Sperrzeiten oder Umbauverfahren, beeinflusst. AC Rail bei Totalsperren und hohem Belastungsniveau, PSS bei kurzen Sperrpausen.</p>
	<p>Eine optimierte Trassierung reduziert die Beanspruchung der Fahrbahn und verlängert die Lebensdauer. Es wird empfohlen, eine möglichst gestreckte Linienführung zu wählen und die Grenzwerte in Normalfall gemäss AB-EBV einzuhalten, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Fahrdynamik und Unterhalt sicherzustellen. In der Regel sind Radien $R < 200\text{ m}$ zu vermeiden. Abrupte Richtungsänderungen in der Gleistrassierung sind zu vermeiden, da diese als „Katzenohren“ bekannten Überhöhungsverläufe zu erhöhten Rad-Schiene-Kräften sowie Verschleiss führen. Harmonische Übergangsbögen und gleichmässige Überhöhungsrampen sind daher zwingend vorzusehen. Bei Y-Stahlschwellen ist der mögliche Überhöhungsverlust zu berücksichtigen und durch gezielte Stopfarbeiten auszugleichen.</p>

8.2 Optimierung durch Instandhaltung:



Die vorrangige Zielsetzung des Anlagenmanagements besteht in der Optimierung der Lebenszykluskosten, der langfristigen Sicherung der Infrastruktur sowie der bedarfsgerechten Planung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmassnahmen. Um diese Ziele zu erreichen, wird die systematische Erfassung aller relevanten Unterhaltsdaten empfohlen. In Bezug auf Struktur und Umfang sollte sich die Datenerfassung an den Empfehlungen der Arbeitsgruppe IRISSYS orientieren. Dies umfasst insbesondere folgende Parameter: Linie (Name), Linie (Nummer), km von, km bis, Instandhaltungsart (Stopfen, Schienenschleifen, Schieneneinbau, Schwelleneinbau, Oberbauerneuerung, Unterbausanierung, Schotterreinigung, Entwässerung) Datum Beginn, Datum Ende



Es wird generell eine optimierte Instandhaltungsplanung empfohlen, die insbesondere die Stopfen- und Schienenoberflächenbearbeitung auf Basis von Messdaten umfasst. Ziel dieser Empfehlung ist die Optimierung der Nutzungsdauer der einzelnen Komponenten sowie der gesamten Anlage. Die korrekte Massnahme zur richtigen Zeit verhindert, dass der fortschreitende Verschleiss einzelner Komponenten zu einer Überbelastung und damit signifikantem Verschleiss weiterer Fahrwegkomponenten führt.



Es wird empfohlen, eine optimierte Strategie zur Schienenoberflächenbehandlung – auch in Geraden – zu implementieren, da diese dazu beiträgt, die Anregung durch Irregularitäten an der Schienenoberfläche (z. B. Schlupfwellen, Schweissstösse) zu reduzieren. In der Folge werden Zwischenlagen, Schwellen und das Schotterbett vor Überbeanspruchung geschützt. Eine konsequente Schienenoberflächenbehandlung trägt zu einem stabilen Gleislageverhalten bei und hat eine signifikante Verlängerung der Nutzungsdauer des Fahrwegs zur Folge. Darüber hinaus ermöglicht die Wiederherstellung der Schienengeometrie die Einhaltung eines konformen Schienenprofils, was für eine optimierte Rad-/Schiene-Profilpaarung von entscheidender Bedeutung ist.

Untersuchungen bei Meterspurbahnen haben ergeben, dass bei verschlissenen und damit verschleissangepassten Radprofilen Mindestanforderungen an die Profilform der Schiene notwendig sind, um die äquivalente Konizität und damit ein sicheres und komfortables Fahrverhalten bei höheren Geschwindigkeiten sicherzustellen. Im Rahmen des Projekts P3 der Systemführerschaft werden hierzu Vorgaben hinsichtlich der Konizität für die Schienenbearbeitung erarbeitet.



In Bezug auf die Reprofilierung aufgrund von Schlupfwellen an der Innenschiene in engen Bögen wird gemäss dem aktuellen Wissensstand eine Eingriffsschwelle (ISS) bei einer Tiefe von 0,08 mm empfohlen. In Abhängigkeit von der Streckencharakteristik und den betrieblichen Randbedingungen kann dieser Wert mit den aktuell eingesetzten Drehgestellen auf einzelnen Strecken in der Praxis nicht immer eingehalten werden. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass ein Spitze-Spitze-Wert von 0,2 mm keinesfalls überschritten werden sollte, da dies mit einem signifikant erhöhten Schädigungsrisiko assoziiert ist.



Es konnte insbesondere in Bogenbereichen punktuell ein erheblicher Verschleiss der Zwischenlagen beobachtet werden. Dieser kann aufgrund der Messung der Spurweite oder der Schienenneigung, welche durch den Gleismesswagen durchgeführt wird, detektiert und bei vorhandenen Zeitreihen auch prognostiziert werden. Die Implementierung entsprechender Massnahmen ermöglicht eine frühzeitige Planung, wodurch eine Überbeanspruchung des Systems präventiv vermieden werden kann.



Im Abgleich mit stationären Messungen der DB Systemtechnik konnte nachgewiesen werden, dass die Spurweitenmessungen des Messwagens Meterspur (MWMS) die belastete Spurweite zuverlässig erfassen. Aufgrund der Anordnung des Messsystems kann die Fahrtrichtung des Messwagens jedoch zu geringen Abweichungen führen. Sofern organisatorisch möglich, wird empfohlen, die Spurweitenmessung vorlaufend durchzuführen. Ist dies nicht möglich, sollten die Messungen stets in derselben Fahrtrichtung erfolgen, um die Reproduzierbarkeit sicherzustellen. Dies betrifft sinngemäss auch weitere Parameter, die von der Fahrtrichtung abhängig sind.



Die Entwässerungsfähigkeit der Fahrbahn muss zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Strukturelle Probleme im Schotterbett und Unterbau können mithilfe unterschiedlicher automatisierter Verfahren (spezifische Gleislageanalyse, Georadar, Einsenkungsmesswagen) detektiert werden. Werden diese strukturellen Schädigungen zu spät erkannt, ist meist keine Instandhaltungsmassnahme mehr möglich, sondern es muss eine (Teil-)Erneuerungsmassnahme durchgeführt werden.



Eine gezielte Schienenflankenschmierung (über das System Spurkranzschmierung, SKS) trägt signifikant zur Reduktion von Verschleisserscheinungen an Rad und Schiene bei, insbesondere in engen Bögen. Eine Überschmierung kann jedoch dazu führen, dass Schmierfett auf die Fahrflächen gelangt und die Traktion negativ beeinflusst. Demgegenüber hat ein Ausfall der Schmierung signifikante Auswirkungen auf die Lebensdauer der Komponenten. Die Infrastrukturbetreiber sind folglich dazu angehalten, regelmäßige Kontrollen des Schmierfilms an den Schienenflanken durchzuführen. Die Initialschmierung mit SKS-Fett an der Fahrflanke wird sowohl beim Einbau neuer Komponenten als auch nach längeren Streckensperrungen empfohlen.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die bestehenden Systeme bei der Meterspur gegenwärtig keine verlässliche Balance zwischen Über- und Unterschmierung gewährleisten. In Anbetracht dieser Erkenntnisse ist mittelfristig die Umsetzung einer bedarfsgerechten Schmierung erforderlich. Dies bedeutet, dass die Schmierstoffmenge und die Schmierintervalle an die Streckencharakteristik, die aktuellen Traktionsbedingungen, die Lärmemissionen oder den klimatischen Einflüssen angepasst werden müssen. Im Rahmen des Projekts "P3" werden derzeit entsprechende Untersuchungen und Erprobungen durchgeführt.



Es wird ergänzend der Einsatz der Schienenkopfkonditionierung (SKK) empfohlen, insbesondere in engen Bögen, in denen ein hohes dynamisches Verschleiss- oder Lärmaufkommen vorliegt. SKK reduziert die Reibung im Kontaktbereich Rad/Schiene, mindert die Bildung von Schlupfwellen und trägt zur Verringerung von Kurvenkreischen bei. Die Ergebnisse der Betriebserprobungen im Rahmen der Systemführerschaft und RAILplus zeigen signifikante Reduktionen von Lärm und Verschleiss. Die Wirksamkeit des Produkts ist dabei abhängig von der korrekten Dosierung und der Anpassung an die Streckenbedingungen. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projekts P3 die hohe Wirtschaftlichkeit des SKK-Einsatzes nachgewiesen.

8.3 Potentielle zukünftige Optimierungspotentiale durch Innovationen:



Bisherige Untersuchungen der Normalspur deuten darauf hin, dass sogenannte hochdämpfende Zwischenlagen – Varianten mittelsteifer Zwischenlagen mit gezielt erhöhter Dämpfungswirkung – eine optimierte Lastabtragung bei gleichzeitig geringer Lärmentwicklung ermöglichen. Die Einsatzgebiete und die Wirtschaftlichkeit innerhalb der Meterspur sind noch im Rahmen von Feldtests zu untersuchen.

In Bögen mit engen Radien wirken erhöhte Querkräfte und dynamische Belastungen auf den Stützpunkt, was zu Abkippen der Schiene, veränderter Schienenneigung und erhöhtem Verschleiss führen kann.



Es empfiehlt sich grundsätzlich, bei der Verwendung von Zwischenlagen auf den Einsatz hochwertiger Materialien zu achten und gegebenenfalls eine Optimierung der Niederhaltekraft vorzunehmen. Für das Jahr 2026 sind Untersuchungen und Feldversuche angedacht. Ziel ist die Entwicklung eines standardisierten Befestigungskonzepts für enge Radien, dass die Gleisgeometrie stabilisiert, den Verschleiss reduziert und die Lebenszykluskosten nachhaltig senkt.



Kunststoffschwellen könnten in Zukunft eine Alternative für Streckenabschnitte mit mittlerer bis schwacher Belastung darstellen. Insbesondere jene aus rezyklierten Kunststoffen leisten einen positiven Beitrag im Sinne der Nachhaltigkeit. In der jüngeren Vergangenheit wurden bereits Kunststoffschwellen auf Streckenabschnitten der Meterspur installiert. Eine detaillierte Analyse ist erforderlich, um potenzielle technische Einsatzgebiete sowie deren Wirtschaftlichkeit zu evaluieren.



Irregularitäten an der Schienenoberfläche wirken sich direkt auf die Lebensdauer der Fahrbahn und die Beanspruchung weiterer Komponenten aus. Um die Qualität langfristig sicherzustellen, wurden erste Vorarbeiten für die Entwicklung einer Schienenoberflächenstrategie in Form einer RTE gestartet. Diese Strategie bietet ein erhebliches Optimierungspotenzial und sollte konsequent weiterverfolgt werden, um eine gleichbleibend hohe Anlagenqualität und damit die Systemstabilität zu gewährleisten.



Mittels innovativer Analysen von Gleismessdaten ist es möglich, eine Einschätzung und Prognose des Zustands einzelner Komponenten zu erstellen. Zu diesen Komponenten zählen beispielsweise die Zwischenlage, Schwellen, das Schotterbett sowie der Unterbau bzw. der Untergrund. Derartige Analysen werden bereits bei europäischen Normalspurbahnen eingesetzt und könnten mittelfristig auch für die Massnahmenplanung der Meterspurbahnen erarbeitet und integriert werden.

9 Ausblick

Das vorliegende Vademecum bildet eine fundierte Grundlage für die ökonomische Auswahl von Fahrbahnkomponenten und beinhaltet bereits umfassende Erkenntnisse aus Analysen und Praxis. Die Ergebnisse aus den laufenden Simulationen, Untersuchungen und Betriebserprobungen zur Interaktion Fahrzeug/Fahrweg werden bis zum Abschluss der Systemaufgabe ergänzt.

Das Vademecum trägt zur Erhöhung der Infrastrukturverfügbarkeit bei, indem es Empfehlungen zur Reduktion von Verschleiss und zur Stabilisierung der Gleislage gibt. Die in diesem Dokument enthaltenen Komponentenstrategien und technischen Grundlagen bilden die Grundlage für eine harmonisierte Entscheidungsfindung im Hinblick auf die Meterspurbahnen. Gleichzeitig besteht die Notwendigkeit, LCC-Betrachtungen zu vertiefen, insbesondere im Hinblick auf die Optimierungspotenziale, die im Rahmen der Meterspurzentren weiterverfolgt werden sollen, um die Gesamtwirtschaftlichkeit nachhaltig zu steigern.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Weiterentwicklung der Regelwerke: Das RTE zur Schienenbearbeitung ist voranzutreiben, da die Erkenntnisse zeigen, dass eine konsequente Oberflächenpflege entscheidend für Lebensdauer und LCC ist. Zudem gilt es, die im Vademecum aufgezeigten Innovationspotenziale – wie optimierte Befestigungssysteme und elastische Komponenten – gemeinsam mit der Industrie zu prüfen und gegebenenfalls in die Praxis zu überführen.

Die konsequente Anwendung und Weiterentwicklung des Vademecums ist demnach ein Schlüssel, um die Systemziele zu erreichen. Diese erstrecken sich von der Erhöhung der Verfügbarkeit über die Standardisierung technischer Lösungen bis hin zur Förderung von Innovationen und Fachkompetenz im Bereich der Meterspur.

10 Verzeichnisse

10.1 Referenzen

- [1] Kohler Michael, Trag- und Stabilitätsverhalten. Kursunterlagen des CAS Eisenbahn Fahrbahn, 27.10.2023
- [2] Gehriger Albin, RAILplus / AB: *Schadenskatalog Fahrbahn*. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00062, 10.11.2025
- [3] Alessandro Bianchi, RAILplus/Rhätische Bahn & Roland Müller, Gleislauftechnik Müller: *Schadenskatalog Interaktion – Kontaktflächen Rad und Schiene*. Technischer Bericht, RAILplusSF-00066, 18.04.2025
- [4] Güldenapfel Peter, Railplus / KPZ Fahrbahn: *Grundlagenscanning Umfrage Bahnen*. Technischer Bericht, 14.10.2022
- [5] Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt: *Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung. Bericht 36 (2023). Untersuchung und Auswirkung des Verschleissverhaltens neuer Rad-Schiene-Paarungen*, Februar 2023
- [6] Werner Stefan, RAILplus / Railvision Särl: *Anleitung Berechnungstool Zimmermann. Bedienungshinweise und Hintergrundinformationen*, 12.10.2025
- [7] Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), SN EN 16432-2:2017 *Bahnanwendungen - Feste Fahrbahn-Systeme - Teil 2: Systementwurf, Untersysteme und Komponenten*, 1.11.2017
- [8] Schulz Olaf, Keller Steffen. SBB: *FB 400 – 0060 Planungsassistent Übergänge Fahrbahn SBB*, 01.03.2023
- [9] Schuler Lukas, RAILplus / RBS: *Spezifikation für die Erfassung, Auswertung und Bewertung von Rad- und Schienenprofilen*. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00004, 04.10.2024
- [10] DB InfraGO AG: *Planungshilfe „Rechnerisches Verfahren zur Bewertung der dynamischen Stabilität“*. Leitfaden, 2018
- [11] Auer Florian, TU Graz: *Zur Verschleissreduktion von Gleisen in engen Bögen*. Dissertationsschrift, 7. Juni 2010.
- [12] Van Damme Bart; Cugnioni Joël; Nardin Raphaël; Crausaz Vincent, Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD): *Experimental and numerical track system evaluation: Methodology for finding optimal components*. Forschungsbericht im Auftrag BAFU/OFT, 31.10.2023.
- [13] Quirchmair Martin; Steiner Ekkehard; Augustin Andreas; Kumar Nishant, Getzner Werkstoffe GmbH / Universität Innsbruck: *Gleislagestabilität – Was tun, wenn's drückt? – Teil 2*. Fachartikel, ZEV Rail, Ausgabe 06/07, 2025.
- [14] Loidolt Markus, Marschnig Stefan, Graz University of Technology: *Weld battering of thermite welds and flash butt welds based on statistical evaluations*. Artikel, Engineering Failure Analysis, Februar 2025.

10.2 Abbildungen

Titelbild: RAILplus

Abbildung 1: Begriffe der Fahrbahn [1].....	7
Abbildung 2: Investierte Mittel in die Fahrbahn einer RAILplus Meterspurbahn	12
Abbildung 3: Laufmeterpreise Komponenten Schotteroberbau konventioneller Gleisbau [CHF / Im] ..	14
Abbildung 4: Effekte der Steifigkeit von Zwischenlagen	17
Abbildung 5: Vor- und Nachteile der eingesetzten Streckenschwellentypen im Adhäsionsbereich	19
Abbildung 6: Einsenkung mit Besohlung und ohne Besohlung	22
Abbildung 7: Schieneneinsenkung bei einem Fahrbahnübergang [8]	24
Abbildung 8: Überblick strategisches und operatives Anlagenmanagement	25
Abbildung 9: Erarbeitung von Standardelementen	26
Abbildung 10: Werkzeuge zur Erfassung, Speicherung, Analyse und Visualisierung von Daten im Anlagenmanagement	27
Abbildung 11: Arten der Instandhaltung laut SN EN 13306	27
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Kostenfunktionen im Annuitätenmonitoring	28

Abbildung 13: Vervollständigung des spezifischen Zyklus eines Projektabschnitts zur Erneuerungsplanung.....	29
Abbildung 14: Ermittlung der Annuitätenkurve des spezifischen Abschnitts	29
Abbildung 15: Zusammenhang und Beeinflussbarkeit der Auswirkungen mit unterschiedlicher Wahl der Fahrwegkomponenten	30
Abbildung 16: Übersicht der Simulationsmodelle Fahrbahn, Ziele und Erkenntnisse	31
Abbildung 17: Vertikalspannungen und Bettungsverteilung bei unterschiedlichen Elastizitäten der Fahrbahn; Simulationen Baugrund Dresden	32
Abbildung 18: Auswirkungen der Komponentenwahl Schiene und Schienenaufleger	33
Abbildung 19: Auswirkungen der Komponentenwahl Schwelle, Schotter und Untergrund.....	34
Abbildung 20: Generelle Komponentenstrategie im Rahmen der Erneuerung.....	37
Abbildung 21: Differenzierung der Strecken zur Erarbeitung der streckenspezifischen Schienenstahlgütenstrategie.....	37
Abbildung 22: Ableitung der Streckenspezifischen Empfehlungen für Schienengüte und Schwellentyp, Seite 1 von 2.....	38
Abbildung 23: Ableitung der Streckenspezifischen Empfehlungen für Schienengüte und Schwellentyp, Seite 2 von 2.....	39

10.3 Tabellen

Tabelle 1: Berechnung der Einsenkung nach Zimmermann mit Achslast 16t, Achsabstand 2.4m, ZW=700 kN/mm.....	22
Tabelle 2: Berechnung der Einsenkung nach Zimmermann mit Achslast 12t, Achsabstand 2.0m, ZW=700 kN/mm.....	23
Tabelle 3: Berechnung der Einsenkung nach Zimmermann mit Achslast 12t, Achsabstand 2.0m, ZW=100 kN/mm.....	23