



Dipl.-Ing. Anna Oprandi

**Der Einfluss des Anlagenzustands auf den  
finanziellen Mittelbedarf der  
Eisenbahninfrastruktur**

**DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktorin der technischen Wissenschaften  
eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer und Gutachter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit  
Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft  
Technische Universität Graz

Gutachterin:

Prof. Dr. Olga Fink  
Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Bern, August 2020



## Danksagung

Allen voran danke ich Prof. Peter Veit, der es mir ermöglichte, diese Dissertation am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft zu erstellen. Durch sein enormes Fachwissen hat er die Arbeit entscheidend geprägt. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Prof. Olga Fink dafür, dass sie als Zweitgutachterin und Prüferin zur Verfügung stand.

Ein spezieller Dank gebührt Prof. Stefan Marschnig. Ich durfte von dir so vieles – sowohl fachlich als auch menschlich – lernen, das in diese Arbeit mit eingeflossen ist und mich in meinem Berufsleben täglich leitet. Ich danke dir für all die Momente, in denen du mich an deinem Wissen und deiner Art der Lösungsfindung teilhaben lässt.

Weiters möchte ich meinen Kollegen am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft und dabei ganz besonders Dr. Stefan Walter und Dr. Matthias Landgraf danken. Die Gespräche mit euch und eure Unterstützung haben maßgeblich zum Ergebnis dieser Arbeit beigetragen.

Ein großer Dank gebührt Dr. Jochen Holzfeind, der mich zur SBB geholt hat und mir damit die Möglichkeit gegeben hat, meine Ideen und diese Arbeit mit Zahlen und Fakten zu füllen. Dr. Stefan Sommer hat mich immer unterstützt und ermutigt, diese Arbeit auch neben dem Berufsalltag weiterzuführen. Für diese Möglichkeit und den Ansporn möchte ich dir danken. Meiner Kollegin Dipl. Math. ETH Dorothea Winklehner und meinem Kollegen Dipl. Phys. ETH Raimund Helfenberger danke ich für die konstruktiven und spannenden Gespräche, die mir immer wieder wertvolle Anregungen und neue Ideen gaben.

Meinen Eltern werde ich immer dankbar sein, dass sie es mir ermöglicht haben, zu studieren und mich auf meinem Weg immer unterstützt haben.

Meinem Mann Davide danke ich von ganzem Herzen für den unermüdlichen Glauben daran, dass ich immer noch ein bisschen mehr erreichen kann und er zur Erreichung dieses Ziels immer an meiner Seite steht.





## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Bern, August 2020



# Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit soll die wirtschaftliche Bedeutung einer gesicherten Finanzierung der Eisenbahninfrastruktur aufzeigen, was anhand der historischen Entwicklung sowie an konkreten Beispielen erfolgt. Die erarbeitete Methodik der netzweiten Berechnung der finanziellen Auswirkungen geht, ergänzend zur Frage der Wirtschaftlichkeit auf einzelnen Gleisabschnitten, auf die Entwicklung des Gesamtbudgets der Fahrbahn über mehrere Jahre ein. Dieses Vorgehen beantwortet die oft gestellte Frage, ob kurzfristige Einsparungen langfristig doch zu denselben Kosten führen. Das vorgestellte Modell dient als Grundlage, um dies bei den jeweiligen Eisenbahninfrastrukturunternehmen in die spezifischen und netzweiten Prognosemodelle für den Substanzerhalt zu integrieren.

Die erarbeitete Methodik zur netzweiten Berechnung der Folgekosten beginnt mit der Analyse einzelner Substanzerhaltungsmaßnahmen und der Analyse der Konsequenzen bei einer Einsparung dieser Maßnahmen auf einem spezifischen Gleis und in der Gesamtmenge auf dem Netz. Die Analyse der Konsequenzen von Einsparungen erfolgt getrennt nach der Erneuerung der Gleise und dem Unterhalt der Gleise. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Einsparungen können aufgezeigt werden und in das Modell implementiert werden, um den netzweiten Effekt abzubilden. Dabei ist das vorliegende Modell keinesfalls abschließend, sondern kann zukünftig individuell für weitere Fragestellungen adaptiert werden.

Als Erkenntnis der vorliegenden Arbeit kann eine klare Handlungsempfehlung abgegeben werden: Bei finanziellen Engpässen sind jedenfalls die Mittel für den Unterhalt in einem ausreichenden Maß zur Verfügung zu stellen. Beim Unterhalt besteht kein Einsparungspotential – weder kurzfristig noch langfristig. Anders stellt sich jedoch die Erneuerung dar: Durch eine Reduktion der Erneuerungsmenge kann das Budget kurzfristig gedrückt werden, langfristig führt dies jedoch zu höheren Kosten. Eine große Herausforderung entsteht hierbei dadurch, dass die entstehenden Auswirkungen über Jahrzehnte nicht kompensiert werden können. Die entscheidenden Kriterien stellen dabei der Ressourcenengpass bezüglich finanzieller Mittel genauso wie der Wunsch nach der Verfügbarkeit des Netzes dar. Das Zusammenspiel zwischen der Verfügbarkeit des Netzes und den Kosten für den Substanzerhalt kann dabei ebenfalls nicht ignoriert werden. Werden sowohl die Verfügbarkeit als auch der Wunsch nach niedrigen Kosten gleichermaßen priorisiert, so führt dies zwangsläufig zu einer Kompromisslösung, da sich diese beiden Aspekte gegenseitig ausschließen.

Mit dieser Dissertation konnte aufgezeigt werden, dass jede Sparmaßnahme im Substanzerhalt langfristig zu Mehrkosten führt, welche die kurzfristigen Einsparungen im Endeffekt deutlich übersteigen. Die vorliegende Arbeit stellt damit eine weiterführende Forschung im Bereich der Wirtschaftlichkeit von Substanzerhaltsmaßnahmen der Fahrbahn dar und schließt eine Forschungslücke. Mit der

entwickelten Methodik können Substanzerhaltsmaßnahmen nicht nur bewertet, sondern neu auch langfristige Kosteneffekte der Erneuerung und des Unterhalts der Fahrbahn dargestellt und die effektiven Kosten errechnet werden.

# Abstract

The present study shows the economic importance of a secure financing of the railway infrastructure. This is done on the basis of historical developments and specific examples. The developed methodology for the network-wide calculation of the financial impact is responsive to the development of the overall budget of the roadway over the years beside the question of economy on individual track sections. This approach answers the frequently asked question if short-term savings can be compensated in the long term at the same costs. The model can be used by railway infrastructure companies as a basis to integrate the calculation into specific or network-wide forecast models for renewal and maintenance works.

The methodology developed for the network-wide calculation of the follow-up costs begins with the analysis of individual renewal and maintenance actions and the analysis of the consequences of saving these actions on a specific track section and in total on the network. This is done separately for renewal of the track and maintenance of the track. The effects of the different savings can be shown and implemented in the model to reflect the network-wide effect. The present model is by no means concluding but can be individually adapted to additional future questions.

As findings of the present work a clear recommendation can be given: In the event of financial shortages, the funds for maintenance must be made available. In maintenance there is no potential either for short-term nor for long-term savings. This fact is different for renewal: By reducing the amount of renewal the budget can be reduced at short notice, which leads in the long term to higher costs. A great challenge arises because the resulting effects cannot be compensated for decades. The decisive criterion is the resource shortage in terms of financial resources as well as the desire for the availability of the network. The interplay between the availability of the network and the costs of renewal and maintenance cannot be ignored either. If both availability and the desire for low costs are prioritized, a compromise solution is inevitable since the two issues are mutually exclusive.

Within this dissertation it was possible to demonstrate that every saving of renewal or maintenance leads in the long term to additional costs which ultimately clearly exceed the short-term savings. The present work thus represents further research in the area of the economic of railway track maintenance and closes a research gap. With the developed methodology, substance maintenance measures can not only be assessed, but now also long-term cost effects of the renewal and maintenance of the track can be shown and the effective costs can be calculated.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Begriffsdefinitionen</b>	<b>5</b>
2.1	Erneuerung/Instandhaltung/Unterhalt . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Finanzierung der Eisenbahninfrastruktur</b>	<b>9</b>
3.1	Die Zeit der Privatbahnen . . . . .	10
3.2	Die Verstaatlichungen der Eisenbahnen . . . . .	11
3.3	Die Veränderung des Marktes nach dem Zweiten Weltkrieg . . . . .	12
3.4	Das natürliche Monopol und seine versunkenen Kosten . . . . .	13
3.5	Die Eisenbahnpakete – Trennung von Infrastruktur und Betrieb . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Verfügbarkeit und Abhängigkeiten finanzieller Mittel</b>	<b>17</b>
4.1	Die Schweizer Bahn – eine Erfolgsgeschichte . . . . .	17
4.2	Die Japanische Bahn – zwischen privater und staatlicher Finanzierung	23
<b>5</b>	<b>Die ökonomische Bewertung der Eisenbahninfrastruktur</b>	<b>29</b>
5.1	Die Bewertung der Kosten . . . . .	32
5.1.1	Kapitalwertmethode . . . . .	33
5.1.2	Methode des internen Zinssatzes . . . . .	34
5.1.3	Annuitätenmethode . . . . .	35
5.1.4	Annuität vs. Kosten . . . . .	36
5.2	Nutzungsdauer . . . . .	36
5.2.1	Buchhalterische Nutzungsdauer . . . . .	37
5.2.2	Technische Nutzungsdauer . . . . .	38
5.2.3	Wirtschaftliche Nutzungsdauer . . . . .	38
5.2.4	Strategische Nutzungsdauer . . . . .	39
5.2.5	Reale Nutzungsdauer . . . . .	39
5.3	Zustand und Substanz . . . . .	40
5.3.1	Definition von Zustand und Substanz einer Anlage . . . . .	40
<b>6</b>	<b>Vergleich bestehender Bewertungsmethoden der Eisenbahninfrastruktur</b>	<b>43</b>
6.1	Railway Performance Index (RPI) . . . . .	44
6.2	Netzzustandsberichte . . . . .	46
6.3	Key Performance Indicators (KPI) . . . . .	48
6.4	Lasting Infrastructure Cost Benchmarking (LICB) . . . . .	49

<b>7</b>	<b>Die Ermittlung des Substanzerhaltungsbedarfs</b>	<b>53</b>
7.1	Top-down-Ermittlung des Substanzerhaltungsbedarfs . . . . .	55
7.2	Bottom-up-Ermittlung des Substanzerhalts – Standardelemente . . . . .	57
7.2.1	Der Einfluss der Belastung . . . . .	59
7.2.2	Der Einfluss der Schwellenart . . . . .	60
7.2.3	Der Einfluss der Schiene . . . . .	63
7.2.4	Der Einfluss des Unterbaus . . . . .	63
7.2.5	Der Einfluss des Radius . . . . .	65
7.2.6	Der Einfluss der Strategie . . . . .	65
7.2.7	Der Einfluss der Altersverteilung . . . . .	66
7.2.8	Der Einfluss des historischen Substanzerhalts . . . . .	68
7.2.9	Der Einfluss der Baulänge . . . . .	68
7.2.10	Der Einfluss des Traktionseintrags . . . . .	69
7.2.11	Der Einfluss der Geschwindigkeit . . . . .	69
7.2.12	Der Einfluss der Längsneigung . . . . .	69
<b>8</b>	<b>Einheitskosten</b>	<b>71</b>
8.1	Gleis / Weiche . . . . .	72
8.2	Bauverfahren . . . . .	73
8.3	Intervall . . . . .	73
8.4	Baulänge . . . . .	74
8.5	Entwässerung/Bankett . . . . .	78
8.6	Brücke/Tunnel/Perron . . . . .	78
8.7	Anfahrtsweg/Anfahrtszeit . . . . .	78
8.8	Fachdienstkosten . . . . .	78
8.9	Auszubauende Hindernisse . . . . .	79
8.10	Optimierung der Trassierung . . . . .	79
8.11	Personalkosten/Lohnkosten . . . . .	79
8.12	Materialkosten . . . . .	80
8.13	Maschinenkosten . . . . .	81
8.14	Logistikkosten/Traktionskosten . . . . .	82
8.15	Projektierungskosten . . . . .	82
8.16	Entsorgungskosten . . . . .	82
8.17	Betriebserschwerternkosten . . . . .	83
8.18	Aufsicht und Führung . . . . .	83
8.19	Sicherheitskosten . . . . .	83
8.20	Kosten des Overhead/Gemeinkosten . . . . .	83
<b>9</b>	<b>Modellnetz</b>	<b>85</b>
9.1	Altersverteilung . . . . .	86
9.2	Verteilung der Belastung . . . . .	86
9.3	Verteilung Schwellenart . . . . .	88
9.4	Verteilung Schienenprofil . . . . .	89
9.5	Radienverteilung . . . . .	90



9.6	Annahme Unterbauzustand . . . . .	91
9.7	Die Streuung der Nutzungsdauer der Standardelemente . . . . .	91
9.8	Annahme Kosten . . . . .	93
9.9	Aufbau Modellrechnung und Abgrenzungen . . . . .	94
<b>10</b>	<b>Die Bewertung des verursachten Schadens</b>	<b>95</b>
<b>11</b>	<b>Reduktion des Erneuerungsbudgets</b>	<b>97</b>
11.1	Definition von „Nachholbedarf“ . . . . .	98
11.1.1	Die Entwicklung der Annuität im Nachholbedarf . . . . .	100
11.1.2	Berechnung der Mehrkosten im Nachholbedarf anhand der Annuität . . . . .	111
11.2	Einjähriger Nachholbedarf . . . . .	112
11.2.1	Die Definition von einjährigem Nachholbedarf . . . . .	112
11.3	Mehrjähriger Nachholbedarf . . . . .	113
11.3.1	Die Definition von mehrjährigem Nachholbedarf . . . . .	113
11.4	Eingangsparameter für die Modellrechnung . . . . .	117
11.4.1	Netzweite Auswirkungen einer reduzierten Erneuerungsmenge bei einem einjährigen/mehrjährigen Nachholbedarf . . . . .	119
11.5	Alternder Nachholbedarf . . . . .	121
11.5.1	Die Definition von alterndem Nachholbedarf . . . . .	121
11.5.2	Die Auswirkungen einer reduzierten Erneuerungsmenge bei einem alternden Nachholbedarf . . . . .	123
11.6	Mischform Nachholbedarf . . . . .	125
11.6.1	Definition einer Mischform des Nachholbedarfs . . . . .	125
11.7	Stetiger Nachholbedarf . . . . .	127
11.7.1	Die Definition von stetigem Nachholbedarf . . . . .	127
11.7.2	Erhebung der Verteilung des Nachholbedarfs in einem Gleisnetz . . . . .	129
11.8	Reduktion der Unterbausanierungen . . . . .	132
11.8.1	Die Auswirkungen reduzierter Unterbausanierung bei der Erneuerung . . . . .	134
11.8.2	Sensitivitätsanalyse zur Reduktion der Unterbausanierung . . . . .	137
11.9	Priorisierung bei der Erzeugung von Nachholbedarf . . . . .	139
11.10	Schlussfolgerungen zur Reduktion des Erneuerungsbudgets . . . . .	141
<b>12</b>	<b>Reduktion des Unterhaltsbudgets</b>	<b>143</b>
12.1	Strategische Priorisierung . . . . .	143
12.1.1	Priorisierung nach Dringlichkeit bezüglich der Verfügbarkeit (Alter der Anlagen) . . . . .	144
12.2	Eingangsparameter für die Modellrechnung . . . . .	145
12.2.1	Netzweite Auswirkungen einer reduzierten Stopfmenge . . . . .	154
12.3	Schienenbearbeitung und Schienenwechsel . . . . .	158
12.3.1	Netzweite Auswirkungen einer reduzierten Schleifmenge . . . . .	166

12.4 Schraublochsanierung (SLS) . . . . .	168
12.5 Schotter(bett)reinigung . . . . .	169
12.6 Umbau kleiner Längen (UKL) . . . . .	172
12.7 Schwellenwechsel . . . . .	176
12.8 Schlussfolgerungen zur Reduktion des Unterhaltsbudgets . . . . .	180
<b>13 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>183</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Unterteilung der Instandhaltung nach DIN 31051 (Quelle: eigene Darstellung nach [65]) . . . . .	6
2.2	Definitionen von „Erhaltung“ nach SIA 469 (Quelle: eigene Darstellung nach [63]) . . . . .	6
3.1	Phasen der Privatisierung und Liberalisierung in Europa zwischen 1825 bis 2010 (Quelle: eigene Darstellung nach [96]) . . . . .	11
4.1	Entwicklung der Unterhaltsarbeiten in Abhängigkeit zur Belastung (Quelle: eigene Darstellung nach [77]) . . . . .	21
4.2	Einlagen und Entnahmen in FABI [9] . . . . .	22
4.3	Organigramm der JNR im Jahr 1987 (Quelle: eigene Abbildung nach [50]) . . . . .	25
5.1	Zahlungsstrombild einer Investition (Quelle: eigene Darstellung nach [30]) . . . . .	32
5.2	Kapitalwertmethode (Quelle: eigene Darstellung nach [30]) . . . . .	33
5.3	Methode des internen Zinssatzes (Quelle: eigene Darstellung nach [30]) . . . . .	34
5.4	Zusammenhang zwischen Zustand und Substanz (Quelle: eigene Darstellung nach [21]) . . . . .	42
6.1	Zusammensetzung des Railway Performance Indexes (Quelle: eigene Darstellung nach [22]) . . . . .	45
6.2	Railway Performance Index 2017 (Quelle: eigene Darstellung nach [22]) . . . . .	45
6.3	Bewertungsmethodik Netzzustandsbericht SBB 2011 (Quelle: eigene Darstellung nach [71]) . . . . .	47
6.4	Vergleich der jährlichen Netznutzung, Daten 2010 (Quelle: eigene Darstellung nach [31]) . . . . .	50
6.5	Normalisierte Kostenindizes für Unterhalt und Erneuerung (Quelle: eigene Darstellung nach [31]) . . . . .	50
7.1	Einfluss der Belastung auf die Annuität (5 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	60
7.2	Einfluss der Schwellenart auf die Annuität (0 %) der Standard-elemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	61

7.3	Einfluss der Nutzungsdauer auf die Annuität (0 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	62
7.4	Einfluss der Schiene auf die Annuität (5 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	63
7.5	Einfluss des Unterbaus auf die Annuität (0 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	64
7.6	Einfluss des Radius auf die Annuität (5 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	65
7.7	LCC bei unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien am Beispiel der ÖBB (Quelle: eigene Darstellung nach [89]) . . . . .	66
7.8	Altersverteilung pro Schwellenart, Stand 1996 [73] . . . . .	67
8.1	Prozentuelle Entwicklung der Kosten bei einer Optimierung der Baulänge – Vergleich Reduktion der EhK FbE im Vergleich zum Anstieg der Annuität (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	75
8.2	Einfluss der Baulänge auf die Einheitskosten der Fahrbahnerneuerung im Netz der SBB (Quelle: eigene Darstellung nach [27]) . . . . .	76
8.3	Prozentualer Einfluss der Wahl der Gleisbaumaschine bei einer Unterbausanierung [5] . . . . .	76
9.1	Einfluss der Altersverteilung auf die Bedarfsmenge im Modellnetz SBB (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	86
9.2	Verteilung der Belastungsklassen im Modellnetz (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	87
9.3	Verteilung der Belastungsklassen im Netz der SBB (2017) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	87
9.4	Schwellenverteilung im Modellnetz (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	88
9.5	Schwellenverteilung im Netz der SBB (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	88
9.6	Schienenprofilverteilung im Modellnetz (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	89
9.7	Schienenprofilverteilung im Netz der SBB (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	89
9.8	Radienverteilung im Modellnetz (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	90
9.9	Radienverteilung im Netz der SBB (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	90
9.10	Schwellenverteilung im Modellnetz sowie die Umsetzung der Oberbaustrategie (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	93
11.1	LCC eines Gleises mit Nachholbedarf [66] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	98
11.2	Beispiele Annuitätenverläufe [90] . . . . .	99
11.3	Erhöhung der Annuität nach Überschreiten des optimalen Erneuerungszeitpunktes der Re-Investitionsprojekte der Jahre 2011 bis 2014 der ÖBB (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	101

11.4	Boxplots der Annuitäten der Re-Investitionsprojekte der ÖBB in den Jahren 2011 bis 2014 nach Überschreiten des optimalen Erneuerungszeitpunktes (Annuität = 100 %) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	102
11.5	Boxplot der Annuitäten der Gleisabschnitte > 10 m im Nachholbedarf der SBB der Fahrbahnerneuerung 2017 [44] . . . . .	104
11.6	Boxplot der Annuitäten der Gleisabschnitte > 10 m im Nachholbedarf der SBB der Fahrbahnerneuerung 2017, < 3 Jahre im Nachholbedarf [44] . . . . .	105
11.7	Boxplot der Annuitäten der Gleisabschnitte > 10 m im Nachholbedarf der SBB der Fahrbahnerneuerung 2017, < 4 Jahre im Nachholbedarf [44] . . . . .	107
11.8	Boxplot der Annuitäten der Gleisabschnitte > 10 m im Nachholbedarf der SBB der Fahrbahnerneuerung 2017, > 4 Jahre im Nachholbedarf [44] . . . . .	108
11.9	Vergleich der bewerteten Gleislängen der Auswertungen von ÖBB und SBB (bei SBB wurden ausschließlich Gleisabschnitte > 10 m gewählt) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	109
11.10	Entstehung des einjährigen Nachholbedarfs bei einer Erneuerungsquote von 80 % nach 3 Jahren (Quelle: eigene Darstellung)	114
11.11	Altersverteilung im Nachholbedarf nach 6 Jahren und 80 % Erneuerungsquote (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	116
11.12	Kostenentwicklung der Erneuerung bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (mehrjähriger Nachholbedarf) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	120
11.13	Kostenentwicklung des Unterhalts bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (mehrjähriger Nachholbedarf) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	120
11.14	Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (mehrjähriger Nachholbedarf) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	120
11.15	Entstehung von alterndem Nachholbedarf (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	122
11.16	Kostenentwicklung der Erneuerung bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (alternder NB) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	124
11.17	Kostenentwicklung des Unterhalts bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (alternder NB) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	124
11.18	Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (alternder NB) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	124
11.19	Entstehung der Mischform des Nachholbedarfs nach 10 Jahren bei einer Erneuerungsrate von 80 % (Quelle: eigene Darstellung)	126

11.20	LCC pro Zugkilometer und Bruttotonnen-km (bezogen auf Hauptgleise) (Quelle: eigene Darstellung nach [53][81]) . . . . .	128
11.21	Längen über das Soll-Ausbaujahr – Nachholbedarf SBB (Datenstand 06.01.2017) (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	129
11.22	Altersverteilung der Gleise im NB im Netz der SBB (Datenstand 06.01.2017) . . . . .	131
11.23	Altersverteilung der Weichen im NB im Netz der SBB (Datenstand 06.01.2017) . . . . .	131
11.24	Annuitäten bei Unterbau C saniert / unsaniert / unsaniert mit reduzierter Nutzungsdauer (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	133
11.25	Kostenentwicklung der Erneuerungskosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre (Quelle: eigene Darstellung)	136
11.26	Kostenentwicklung der Unterhaltskosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre (Quelle: eigene Darstellung)	136
11.27	Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre (Quelle: eigene Darstellung) . .	136
11.28	Kostenentwicklung der Erneuerungskosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre bei Betonschwellen und einer zusätzlichen Reduktion der erwarteten Nutzungsdauer auf 25 % (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	138
11.29	Kostenentwicklung der Unterhaltskosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre bei Betonschwellen und einer zusätzlichen Reduktion der erwarteten Nutzungsdauer auf 25 % (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	138
11.30	Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre bei Betonschwellen und einer zusätzlichen Reduktion der erwarteten Nutzungsdauer auf 25 % (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	138
11.31	Einfluss der Belastung auf die Annuität am Beispiel von Holzschwellen bei einem Zinssatz von 5 % im Netz der SBB auf Basis der Standardelemente [94] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	140
11.32	Vergleich der finanziellen Einsparungen über 10 Jahre zu den Mehrkosten bis zum Erreichen der strategischen Kosten (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	142
11.33	Vergleich der Rendite (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	142
12.1	Qualitätsverhalten des Gleises in Abhängigkeit von der Eingriffsschwelle [93] . . . . .	147
12.2	Verlängerung der Nutzungsdauer durch eine präventive Eingriffsschwelle [46] . . . . .	148
12.3	Reduktion der Nutzungsdauer bei reduzierter Stopfquote . . . . .	149
12.4	Reduktion der Nutzungsdauer bei reduzierter Stopfquote nach den Standardelementen der ÖBB und dem Modellnetz nach [54] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	151

12.5	Reduktion der Nutzungsdauer bei reduzierter Stopfquote nach Modellrechnung 2D (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	153
12.6	Reduktion der Nutzungsdauer bei reduzierter Stopfquote nach Modellrechnung 3D (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	153
12.7	Kostenanteile der Unterhaltsarbeiten [54] . . . . .	154
12.8	Kostenentwicklung der Unterhaltskosten bei reduzierter Stopfquote um 50 % für 10 Jahre und einem darauffolgenden Anstieg der Erneuerungsquote nach Bedarf (Quelle: eigene Darstellung) .	156
12.9	Kostenentwicklung der Erneuerungskosten bei reduzierter Stopfquote um 50 % für 10 Jahre und einem darauffolgenden Anstieg der Erneuerungsquote nach Bedarf (Quelle: eigene Darstellung) .	156
12.10	Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei reduzierter Stopfquote um 50 % für 10 Jahre und einem darauffolgenden Anstieg der Erneuerungsquote nach Bedarf (Quelle: eigene Darstellung) . . .	156
12.11	Entwicklung der Mengen und Kosten der Schienenbearbeitung sowie Anzahl der Schienenfehler nach [43] und [78] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	159
12.12	Datenvergleich zu den Längen der Schienenwechsel nach [78] und [84] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	160
12.13	Einkaufsmengen Schienen, abzüglich der Menge für die Fahrbahnerneuerung (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	161
12.14	Entwicklung der Schienenfehler der SBB 2004 bis 2017 [43] . . .	162
12.15	Entwicklung der Schienenfehler der SBB 2004 bis 2017 basierend auf [43] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	163
12.16	Entwicklung der Schienenfehler der SBB 1998 bis 2013 bzw. 2012 basierend auf Daten von [43] (Quelle: eigene Darstellung) . . . .	164
12.17	Entwicklung der Einheitskosten für die Schienenbearbeitung in Bezug auf die jährliche Schienenbearbeitungslänge der SBB der Jahre 2013 bis 2017 basierend auf den Daten aus [78] (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	165
12.18	Kostenentwicklung der Unterhaltskosten bei reduzierter Schienenbehandlungsquote um 50 % für 15 Jahre, Anstieg der Erneuerung ist nicht abgebildet (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	167
12.19	Kostenentwicklung der Erneuerungskosten bei reduzierter Schienenbehandlungsquote um 50 % für 15 Jahre, Anstieg der Erneuerung ist nicht abgebildet (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	167
12.20	Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei reduzierter Schienenbehandlungsquote um 50 % für 15 Jahre, Anstieg der Erneuerung ist nicht abgebildet (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	167
12.21	Verteilung der Standardelemente der Hauptgleise im Netz der SBB, Standardelemente mit einem Netzanteil über 1 %, Stand: 11.01.2020 (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	171
12.22	Berechnung der Wirtschaftlichkeit vom Umbau kleiner Längen (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	175

---

12.23	Berechnung der Wirtschaftlichkeit eines Einzelschwellenwechsels über einen Anteil von 10 % (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	178
12.24	Berechnung der Wirtschaftlichkeit eines Einzelschwellenwechsels über einen Anteil von 20 % (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	179
12.25	Vergleich der finanziellen Einsparungen zu den Mehrkosten bei der Reduktion von Stopfen bis zum Erreichen der strategischen Kosten (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	181
12.26	Vergleich der finanziellen Einsparungen zu den Mehrkosten bei der Reduktion des Schienenunterhalts bis zum Erreichen der strategischen Kosten (Quelle: eigene Darstellung) . . . . .	181



## Glossar

<b>AfA</b>	Absetzung für Abnutzung
<b>BFS</b>	Bundesamt für Statistik (Schweiz)
<b>CAS</b>	Certificate of Advanced Studies
<b>CAPEX</b>	Investitionsausgaben
<b>CHF</b>	Schweizer Franken
<b>DB</b>	Deutsche Bahn
<b>DfA</b>	Datenbank fester Anlagen
<b>EhK</b>	Einheitskosten
<b>EIU</b>	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
<b>ES</b>	Eingriffsschwelle
<b>EVU</b>	Eisenbahnverkehrsunternehmen
<b>FABI</b>	Finanzierung und Ausbau Bahninfrastruktur
<b>JNR</b>	Japanese National Railways
<b>JRW</b>	West Japan Railway Company
<b>JR</b>	Japan Railway Company
<b>KCRC</b>	Kowloon-Canton Railway Corporation
<b>LCC</b>	Lebenszykluskosten
<b>LICB</b>	Lasting Infrastructure Cost Benchmarking
<b>ÖBB</b>	Österreichische Bundesbahnen
<b>OPEX</b>	Betriebskosten
<b>RCF</b>	Rollkontaktermüdung
<b>RPI</b>	Railway Performance Index
<b>SBB</b>	Schweizerische Bundesbahnen
<b>SES</b>	Soforteingriffsschwelle
<b>SNCF</b>	Société nationale des chemins de fer français
<b>SUST</b>	Schweizerische Untersuchungsstelle
<b>UIC</b>	Union internationale des chemins de fer
<b>VöV</b>	Verband öffentlicher Verkehr



# 1 Einleitung

Die Eisenbahnen in Europa befinden sich in den letzten drei Jahrzehnten im Umbruch. Die vergangenen Jahre waren von Reorganisationen, der Trennung von Betrieb und Infrastruktur, Personalabbau, der Stilllegung von Strecken, Interoperabilität, Externalisierung, teilweise auch der Privatisierung des Betriebs sowie steigenden Kosten geprägt. Der Grundstein für diese Veränderungen im Eisenbahnwesen wurde bereits 1991 mit der Richtlinie RL 91/440 EWG des Rates der Europäischen Gemeinschaft zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen gelegt. Mit dieser Richtlinie wurde der erste Schritt zu einer Öffnung der Verkehrsmärkte sowie zu einem transeuropäischen Verkehrsnetz gemacht. Die Trennung von Betrieb und Infrastruktur wurde bezüglich des Rechnungswesens nun obligatorisch, die organisatorische Trennung blieb jedoch fakultativ. Neben den Einnahmen durch das Infrastrukturbenützungsentgelt liegt die Finanzierung für die Infrastruktur in der Verantwortung des Staates und erfolgt größtenteils über Bundesmittel. Diese Maßnahmen der Marktöffnung sollten nicht nur den Markt beleben, sondern auch die Kosten für die Eisenbahn senken, um die Bahn konkurrenzfähiger gegenüber der Straße zu machen, was wiederum zu einer Verlagerung des Verkehrs hin zur Schiene und damit zu einem ökologischeren Verkehr führen sollte. [16]

Diese allgemeine Reduktion der Kosten und auch die gewünschte Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene konnten bis heute jedoch noch nicht erreicht werden. Der Verkehr auf der Schiene nimmt zwar stetig zu, im Verhältnis zur Straße jedoch um ein deutlich geringeres Maß. Parallel dazu entstehen zusätzliche Herausforderungen, die unter anderem mit der Trennung von Infrastruktur und Betrieb einhergehen. Der ehemalige Direktor des „Verband öffentlicher Verkehr (VöV)“ Carlo Pfund veröffentlichte 2002 seinen kritischen Bericht über die Trennung des Verkehrs von der Infrastruktur der Bahn. Darin stellt Pfund fest, dass der erwartete Nutzen sich kaum einstellte, während auf der anderen Seite eine Reihe an neuen Herausforderungen entstand. [68] Im Themenpapier des Europäischen Parlaments aus dem Jahr 2011 wird zudem auf Koordinationsprobleme zwischen den neu geschaffenen Parteien (Infrastruktur und Betrieb) sowie als Resultat daraus auf eine geringere Sicherheit und Zuverlässigkeit des Eisenbahnbetriebs hingewiesen. Dabei wird insbesondere der Unfall von Hatfield als Negativbeispiel genannt, bei dem ein Schienenbruch auf Grund von Head Checks zu einer Entgleisung führte. Zudem wird erwähnt, dass nicht nur die Trennung an sich, sondern auch vertragliche und kommerzielle Anreize zu diesem Versagen geführt haben könnten. [35]

Heute steht die Infrastruktur der Bahn vor den Herausforderungen einer steigen-

den Verkehrsbelastung sowie einer erhöhten Beanspruchung. Diese Tatsache lässt den Substanzerhaltungsbedarf steigen, während die dafür vorgesehene Zeit im Gleis für den Substanzerhalt eine immer kleiner werdende Ressource darstellt. Dies führt zu steigenden Kosten, während parallel vor allem eine Reduktion der Kosten der Infrastruktur erreicht werden soll, um die Bahn konkurrenzfähig gegenüber anderen Verkehrsträgern zu machen. In dieser klaffenden Schere zwischen dem angestrebten Ziel und den erhöhten Anforderungen machte man sich meist die Gutmütigkeit langlebiger Anlagen zunutze und reduzierte die Finanzierung der Infrastruktur, um ein Scheinbild von sinkenden Kosten zu erzeugen. Heute verzeichnen einige Ländern jedoch einen scheinbar sprunghafter Anstieg der Kosten und der Eisenbahninfrastruktur sowie einen Anstieg an Unfällen, der aus der langjährigen Vernachlässigung des Substanzerhalts resultiert.

Der „Railway Performance Index“ der Boston Consulting Group versucht, einen Zusammenhang zwischen der Höhe der Finanzierung der Bahn und der daraus resultierenden Qualität des Angebots herzustellen. Er wurde in den Jahren 2012, 2015 und 2017 veröffentlicht und definiert die Performance einer Bahn zu je einem Drittel aus der Intensität der Nutzung (Passagier- und Güteraufkommen), der Servicequalität (Pünktlichkeit der Regionalzüge, Pünktlichkeit der Fernverkehrszüge, Anteil an High-Speed-Verkehr, durchschnittlicher Fahrpreis pro Passagier und Kilometer) und der Sicherheit (Unfälle pro Reisekilometer, Todesfälle pro Reisekilometer). Diese Ergebnisse zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Subventionen der Bahn pro Einwohner<sup>1</sup> und der Performance besteht, was vor allem bei Betrachtungen über einen längeren Zeitraum deutlich wird. Länder, die die Kosten für die Bahn in den Jahren 2009 bis 2014 beträchtlich erhöhten, wurden mit einer guten Performance belohnt, beispielhaft dafür sei hier Finnland aufgezeigt. Andere Länder wie Frankreich, Großbritannien, Italien und Schweden reduzierten die öffentlichen Mittel für die Bahn und erleben heute einen Abwärtstrend bei der Performance. Auffallend ist, dass manche Länder einen Plan für die zukünftige Finanzierung der Bahn erstellten, um diesen Abwärtstrend umzukehren. Die Autorin Agnès Audier und die Autoren Sylvain Durantou, Joël Hazan und Vincent Gauche halten fest, dass Länder mit einem bestehenden Abwärtstrend der Performance diesen nur aufhalten können, wenn sie deutlich mehr investieren würden als heute. [23]

Die Habilitationsschrift von Stefan Marschnig behandelt die Höhe der Kosten der Infrastruktur in Abhängigkeit vom Investitionsvolumen. Er stellt fest, dass es, ausgehend von einem eingeschwungenen Zustand der Finanzierung einer Eisenbahninfrastruktur, drei Möglichkeiten gibt, um die Kosten zu reduzieren. Diese sind die Reduktion der Unterhaltskosten, die Reduktion der Erneuerungskosten,

---

<sup>1</sup>Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Dissertation die gewohnte männliche Sprachform bei personenbezogenen Substantiven und Pronomen verwendet. Dies impliziert jedoch keine Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, sondern soll im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen sein.

und die gleichzeitige Reduktion beider Kostenblöcke. In jedem der drei Fälle führt die Reduktion der Kosten langfristig zu einem Anstieg der Lebenszykluskosten, wenn Verfügbarkeit und Sicherheit der Eisenbahninfrastruktur gewährleistet bleiben sollen.[54] Daraus lässt sich ableiten, dass die Kosten der Infrastruktur kein stabiler Wert sind, sondern der Kostenbedarf unter anderem vom Verhalten des Bahnbetreibers abhängig ist. Der Zustand der Eisenbahninfrastruktur und damit auch der zukünftige Bedarf werden durch die Menge an Unterhalt und Erneuerung beeinflusst. Basierend auf der Kostenentwicklung aus dem UIC Benchmark LICB zeigt Marschnig die Kostenentwicklung unterschiedlicher Länder auf und veranschaulicht den Effekt seiner drei Möglichkeiten, Kosten einzusparen.

In der vorliegenden Arbeit sollen diese Thesen anhand eines Modells validiert werden. Am Beispiel der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) wird der Effekt von Einsparungen auf den langzeitigen Substanzerhaltungsbedarf und damit auch auf die Kosten der Fahrbahn aufgezeigt. Anhand des Modells kann gezeigt werden, welche Auswirkungen eine reduzierte Erneuerungsmenge sowie unterschiedliche Unterhaltsregime auf die zukünftigen Gesamtkosten haben und wie eine erneute Reduktion der Gesamtkosten der Fahrbahn nach einem Kostenanstieg realisiert werden könnte. Auf Basis der Ergebnisse aus diesem Modell können Schlussfolgerungen gezogen werden, die eine Empfehlung zur Finanzierung und zum Substanzerhaltungsregime für die Infrastrukturbetreiber wie auch die Staaten selbst darstellt. Ganz im Sinne des nachfolgenden Zitates von Charles Kettering (1876-1958) soll ein Bewusstsein dafür erzeugt werden, wie die finanziellen Mittel der Fahrbahn am effektivsten investiert werden können, in Bezug auf eine nachhaltige Reduktion der Kosten:

„Inventing is a combination of brains and materials. The more brains you use,  
the less material you need.”



## 2 Begriffsdefinitionen

Die Begriffe „Erneuerung“, „Instandhaltung“ und „Unterhalt“ sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit von zentraler Bedeutung. Obgleich diese mehrfach in europäischen und länderspezifischen Normen definiert sind, besteht keine einheitliche und allumfassende Definition. Aus diesem Grund sollen an dieser Stelle die unterschiedlichen Definitionen diskutiert werden und es soll festgelegt werden, auf welche Definition in diesem Text Bezug genommen wird.

### 2.1 Erneuerung/Instandhaltung/Unterhalt

Die Instandhaltung nach DIN 31051 wird als

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“ [62][65]

verstanden. Sie beinhaltet damit die Begriffe „Wartung“, „Inspektion“, „Instandsetzung“ und „Verbesserung“. Der Zusammenhang zwischen diesen ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Im Gegensatz dazu steht die Schweizer SIA 469 [63], die die Begrifflichkeiten für die Erhaltung von Bauwerken in der Schweiz festlegt. Da sich die Norm auf alle Arten von Bauwerken bezieht, kommt sie auch bei den Schweizer Bahnen zur Anwendung. In dieser Norm wird „Erhaltung“ als übergeordneter Begriff definiert, der sich aus „Erneuerung“ als

„Wiederherstellen eines gesamten Bauwerks oder von Teilen desselben in einen mit dem ursprünglichen Neubau vergleichbaren Zustand“ [63]

und „Unterhalt“ als das

„Bewahren oder Wiederherstellen eines Bauwerks ohne wesentliche Änderung der Anforderungen“ [63]

zusammensetzt. Die Begriffe „Instandhaltung“ und „Instandsetzung“ werden dann nur mehr mit der Begrifflichkeit des Bewahrens oder Wiederherstellens der

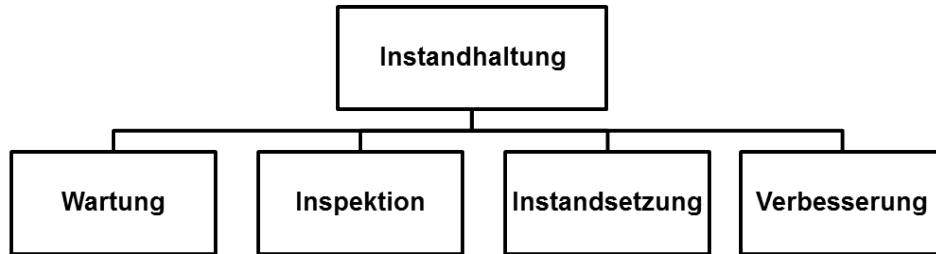


Abbildung 2.1: Unterteilung der Instandhaltung nach DIN 31051 (Quelle: eigene Darstellung nach [65])

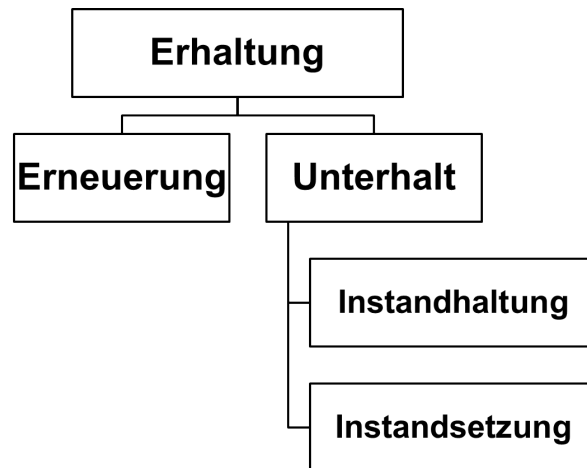


Abbildung 2.2: Definitionen von „Erhaltung“ nach SIA 469 (Quelle: eigene Darstellung nach [63])



Sicherheit und/oder Gebrauchstauglichkeit verstanden. Somit sind mit Instandhaltungstätigkeiten zumeist kleinere Arbeiten gemeint und mit der Instandsetzung größere Arbeiten. [63] Die Abhängigkeiten zwischen den Begriffen sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Erneuerung einer Anlage wird weder von der DIN 31051 [65] noch von der DIN EN 13306 [62] definiert. Es fehlt somit der Zusammenhang zum Gesamtauftrag zur Erhaltung einer Anlage an den Anlagenmanager. Der Begriff der „Re-Investition“ wird als Synonym für „Erneuerung“ verwendet.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Begrifflichkeiten nach Definition SIA 469 [63] angewendet.



# 3 Finanzierung der Eisenbahninfrastruktur

Der finanzielle Mittelbedarf der Eisenbahninfrastruktur wird maßgebend durch die Finanzierungsform und die Höhe der Finanzierung geprägt und beeinflusst. Der finanzielle Bedarf einer Infrastruktur stellt somit keinen statischen Wert dar, da er durch die Höhe der Finanzierung sowie durch das Substanzerhaltungsregime deutlich beeinflusst werden kann. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird diese Verknüpfung weiter herausgearbeitet. Die Abhängigkeit zwischen Finanzierung und finanziellem Mittelbedarf resultiert aus dem simplen Zusammenhang, dass eine Anlage, die regelmäßig gewartet und instandgehalten wird, eine längere Lebenserwartung aufweist als eine Anlage, die nicht sorgfältig bewirtschaftet wird. Die Qualität der Errichtung oder Erneuerung einer Anlage hat ebenso Einfluss auf die zukünftigen Kosten und die zu erwartende Lebensdauer. Die Finanzierung ist dabei stark von den Eigentumsverhältnissen einer Bahn abhängig. Während eine Privatbahn primär gewinnorientiert wirtschaftet, verfolgt eine Staatsbahn das Ziel eines langfristigen Werterhalts. Zudem ergeben sich diverse Unterschiede in den Finanzierungsmöglichkeiten: Als privates Unternehmen erfolgt die Finanzierung entweder über Privatvermögen oder das Geld für Investitionen wird am Finanzmarkt beschafft. Zur Tilgung dieser entstandenen Schulden muss ein entsprechender Gewinn erwirtschaftet werden. Bei staatlich geführten Unternehmen kommt das benötigte Geld zumeist aus dem Staatsbudget und der volkswirtschaftliche Nutzen steht im Mittelpunkt. Damit unterscheidet sich die strategische Ausrichtung einer Privatbahn von Grund auf von der einer Staatsbahn.

Bereits im Jahr 1863 beschrieb Karl Marx in seinem Werk „Das Kapital“ den wohl schwerwiegendsten finanziellen Aspekt der Eisenbahn: Das hohe, fix gebundene Kapital der Eisenbahn muss über eine entsprechende Dauer abgeschrieben werden, damit man nach dem Ablauf dieser Zeit erneut Investitionen tätigen kann. Die Frage, ob dieses Kapital zur „Reparatur“ oder zum „Ersatz“ gerechnet wird, beschäftigte bereits damals die Eisenbahngesellschaften. Soll also ein gleich bleibender stabiler und sicherer Betrieb der Eisenbahn gewährleistet werden, so müssen über Jahrzehnte entsprechende Rücklagen gebildet werden. Diese Investitionsform bietet jedoch weder für private Investoren noch für einen Staat besonderen Anreiz. Wurde tatsächlich ausreichend Geld eingehoben, um auch die Abschreibungen zu decken, dann wurde das frei gewordene Kapital entweder als Gewinn ausgeschüttet oder in gewinnbringendere Geschäfte investiert. Mit steigender Konkurrenz durch andere Eisenbahnunternehmen konnten die Einnahmen in der nötigen Höhe

teilweise gar nicht mehr lukriert werden. Dies machte sich jedoch erst nach vielen Jahren bemerkbar als die damalige Nutzungsdauer der Anlagen erreicht war und erneute Investitionen nötig wurden. [55][102] Diese Erkenntnis ist damals wie heute bedeutsam, um die Eisenbahn als Gesellschaft und auch ihre Rolle im Staat nachvollziehen zu können.

Aus diesem Grund wird zu Beginn dieser Arbeit der Fokus auf die Eigentumsverhältnisse der Bahn über die Zeit und damit auf die Form der Finanzierung der Eisenbahninfrastruktur über die vergangenen Jahrhunderte gelegt. Dies soll die heutige finanzielle Situation der Bahnen erklären sowie aufzeigen, welchen Einflüssen die Bahn als Unternehmen durch politische Entscheidungen zumeist unterliegt. Von den Anfängen bis in die heutige Zeit kann die Eisenbahn in Europa nicht als unabhängiges Unternehmen betrachtet werden, das ausschließlich vom Erfolg oder Misserfolg der Unternehmensbetreiber abhängig war und ist. War die Eisenbahn anfänglich von kapitalistischen Gesinnungen getrieben, so wurde sie bald zum Wirtschaftstreiber eines Landes oder gar einer ganzen Epoche. Ein Bankrott dieser finanzträchtigen Infrastruktur konnte aus Sicht der Staaten nicht toleriert werden, wodurch weltweit Staaten wiederholt rettend eingriffen und privat entstandene Bahnen aufkauften.

Ulrich Weidmann und Markus Rieder stellten 2012 im Rahmen einer Schriftenreihe die Entwicklung europäischer Bahnen hinsichtlich Privatisierung und Verstaatlichung anschaulich dar. Abbildung 3.1 stellt die zeitliche Entwicklung der Privat- und Staatsbahnen der jeweiligen Länder dar und ermöglicht einen Rückschluss auf die Zusammenhänge zur weltweiten wirtschaftlichen und politischen Lage der jeweiligen Zeit. Während die meisten Bahnen als Privatbahnen gegründet wurden, waren alle dargestellten Bahnen bis Mitte des 20. Jahrhunderts verstaatlicht. Die einzige Ausnahme dabei stellt die Schweiz dar, welche sowohl über eine große Staatsbahn als auch – bis heute – über kleinere Privatbahnen verfügt.

### 3.1 Die Zeit der Privatbahnen

Anfang des 19. Jahrhunderts entstanden die ersten Eisenbahnen. Diese waren noch nicht in staatlicher Verantwortung, sondern wurden meist von privaten Investoren errichtet. Ein Grund hierfür war, neben dem vorherrschenden Liberalismus, auch die schwache finanzielle Lage der jeweiligen Staaten. [96] Die Bahn war in Zeiten des großen Rohstoffhandels als Folge der Industrialisierung ein lukratives Geschäft und so entstanden in ganz Europa nach und nach Eisenbahnstrecken, die vorrangig dem Transport von Gütern, allen voran Kohle, dienten. Der Transport von Kohle bot als Treibstoff für die Bahn einen zusätzlichen Vorteil, weil dadurch die Kosten für den Betrieb der Dampfeisenbahn gering waren. Die Pferdeeisenbahn konnte

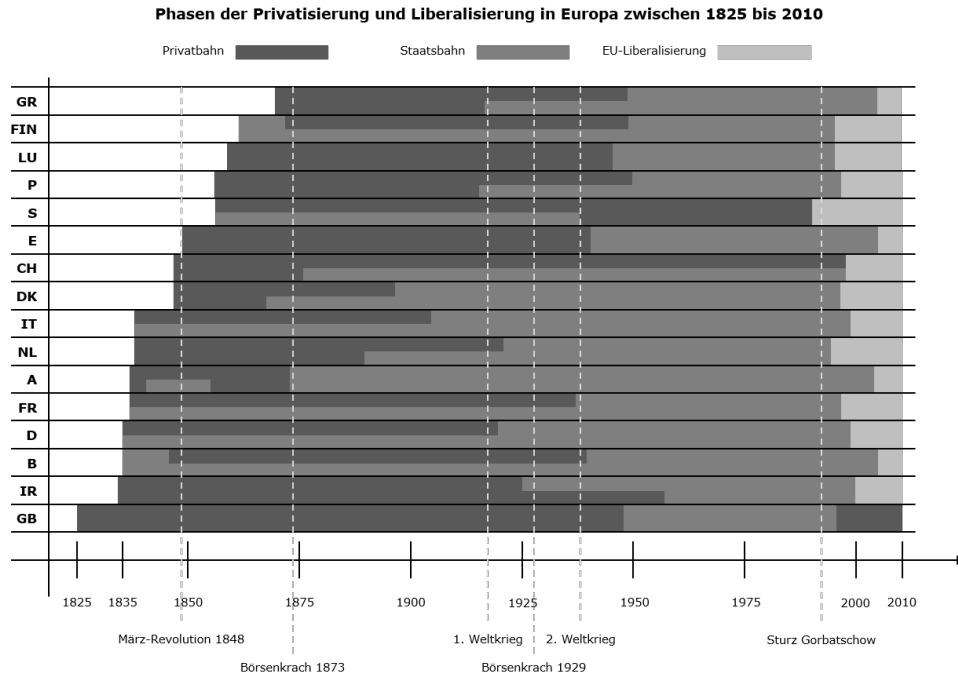


Abbildung 3.1: Phasen der Privatisierung und Liberalisierung in Europa zwischen 1825 bis 2010 (Quelle: eigene Darstellung nach [96])

mit dieser Entwicklung preislich nicht mehr konkurrieren, hielt sich jedoch noch mehrere Jahrzehnte. Erst 1825 eröffnete die meist als erste Eisenbahnstrecke der Welt bezeichnete Bahn zwischen Stockton und Darlington in England, die vorrangig die erste öffentliche Eisenbahnstrecke war, die auch für den Personenverkehr Verwendung fand. In den darauffolgenden zwei Jahrzehnten erlebte die Eisenbahn ihr großes Aufstreben und in ganz Europa wurden erste Bahnstrecken nach dem Vorbild Englands eröffnet. [102]

Harald Bodenschatz traf mit seinen Worten den Zeitgeist: „Mit der Eisenbahn hatte die Industrialisierung ihr industrielles Zugpferd gefunden.“ [7] Die Eisenbahn erlebte einen Boom. Im Jahr 1840 gab es in Europa erst 2.925 km Eisenbahnstrecken. Nur 50 Jahre später war das Streckennetz bereits rund um das Hundertfache größer. Gerade große Industrienationen wie Großbritannien, Frankreich und Deutschland erlebten durch die Eisenbahn zusätzlichen Aufschwung. [102]

## 3.2 Die Verstaatlichungen der Eisenbahnen

Vom Ende des 19. Jahrhunderts bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts wurde die Bahn in vielen Ländern verstaatlicht. Die ersten Eisenbahnkrisen wurden durch gescheiterten Spekulationen ausgelöst. Die Renditenerwartungen waren zu hoch angesetzt worden und es stellte sich heraus, dass die Bahn doch kein disproportional lukratives Geschäft ist. Gerade bei den Nebenbahnen wurde dies schnell deutlich. [96] Der Staat selbst und auch die Steuerzahler stiegen bei den Verstaatlichungen immer mit Verlusten aus. Mögliche Gewinne wurden zumeist frühzeitig abgeschöpft. Der freie Markt und die individuelle Planung von Strecken führte zu einer steigenden Konkurrenz zwischen den einzelnen Bahnlinien und schmälerte die Gewinne der Bahnbetreiber zusätzlich. Der Bedarf einer staatlichen und abgestimmten Planung von Eisenbahnnetzen wurde bald deutlich. Die beiden Weltkriege veränderten in diesem Zeitraum auch die Sichtweise auf den Liberalismus und trugen somit zu einem Umdenken hinsichtlich der Bahnen in privater Hand bei. [96]

Mit der Verstaatlichung der Bahnen sah man sich mit einer neuen Herausforderung konfrontiert: Die Infrastruktur der Bahnen befand sich meist in einem schlechten Zustand. Neubauten und eine Modernisierung des Streckennetzes lagen bereits lange zurück. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erlebte Europa nun den größten Bauboom von Eisenbahnstrecken. Ausgehend von etwa 3.000 km Streckennetz in Europa im Jahr 1840 war das Netz 10 Jahre später bereits auf die siebenfache Größe angewachsen. Von 1850 bis 1860 fand eine weitere Verdoppelung des Netzes statt, die sich bis 1870 noch einmal wiederholte. Bis zur Jahrhundertwende wuchs das Streckennetz weiter, aber in reduziertem Ausmaß. Anfang des 20. Jahrhunderts stand die Bahn noch in keinem nennenswerten intermodalen Wettbewerb. Gerd Aberle [1] nennt dies eine „monopolähnliche Konstellation“. Um die Gewinne für den Staat durch die Bahn zu erhalten, wurde beispielsweise in Deutschland die Bepreisung des Straßengüterverkehrs insofern reguliert, dass keine Preisunterbietung des Schienengüterverkehrs erfolgen durfte. Ab den 1930er-Jahren stagnierte der Ausbau des Streckennetzes auf Grund der aufkommenden Konkurrenz der Straße vollkommen und war in einigen Ländern sogar rückläufig.

## 3.3 Die Veränderung des Marktes nach dem Zweiten Weltkrieg

Die steigende Konkurrenz durch den leistungsfähiger gewordenen Individualverkehr nach dem Zweiten Weltkrieg und die Veränderung der Güterstrukturen weg von Massengütern und hin zu Einzelprodukten, welche "just in time" geliefert werden sollten, führten zu einer deutlichen Verlagerung des Verkehrs von der Schiene auf die Straße. Gerd Aberle [1] verdeutlicht dies mit der Veränderung des Marktanteils

der Schiene in Deutschland im Schienenpersonenverkehr von 36,4 % im Jahr 1950 auf nur mehr 6,2 % im Jahr 1992. Auch im Schienengüterverkehr war im selben Zeitrahmen ein Rückgang von 56 % auf 16,8 % zu verzeichnen. Der Güterverkehr auf der Straße konnte im Vergleich dazu einen Zuwachs von 20,2 % auf 63,4 % verzeichnen. [19] Durch den Wettbewerbsvorteil der Straße konnte die Verlagerung des Güterverkehrs auf die Straße auch durch die nach dem Zweiten Weltkrieg folgenden Restriktionen und Konzessionierungen der Straße nicht verhindert werden. Die Staatsbahnen standen somit nicht nur den Herausforderungen der Konkurrenz des Automobils gegenüber, sondern auch wichtige Modernisierungen zur Attraktivitätssteigerung für die Kunden fehlten. Nur wenige Länder erweiterten ihr Streckennetz weiterhin und stellten beispielsweise auf moderne Fahrzeuge oder auf einen für die Kunden attraktiveren Taktfahrplan um. Die Möglichkeiten, nach wirtschaftlichen Grundsätzen zu handeln und auf die Veränderungen des Marktes zu reagieren, waren im Konstrukt der Staatsbahnen und als Spielball der Politik begrenzt. [1]

### **3.4 Das natürliche Monopol und seine versunkenen Kosten**

Die Sanierung der Eisenbahnen gegen Ende des 20. Jahrhunderts folgte einigen entscheidenden wirtschaftlichen Grundsätzen. Es wurde erkannt, dass die Eisenbahninfrastruktur ein dauerhaftes natürliches Monopol darstellt. Als natürliches Monopol bezeichnet Windisch im Jahr 1987 [99] den folgenden Effizienzbestand:

„Ein einziges Unternehmen ist in der Lage, den relevanten Markt zu niedrigeren kostendeckenden Preisen zu versorgen als dies zwei oder mehreren Unternehmen möglich wäre, welche zu denselben Bedingungen Zugang zu derselben Technologie haben wie der natürliche Monopolist.“ [99]

Dies begründet sich in den sehr hohen Fixkosten der Eisenbahninfrastruktur, die es anderen Anbietern unmöglich macht, gewinnbringend in den Markt einzutreten. Durch die Monopolstellung ergibt sich ein gewinnmaximierender Preis bei einem nicht regulierten natürlichen Monopol. Es liegt somit ein Marktversagen vor, da nicht alle Nachfrager bedient werden können. Aus diesem Grund muss wirtschaftspolitisch eingegriffen werden, um das Monopol volkswirtschaftlich zu optimieren. Dazu hat der Staat zwei Optionen: die Regulierung des bestehenden Marktes oder die Schaffung eines neuen Marktes. Die Schaffung eines weiteren Versorgungsnetzes würde zu sehr hohen Kosten führen und wäre volkswirtschaftlich nicht sinnvoll. Zur Lösung dieser Situation bedarf es der Theorie der „bestreitbaren Märkte“, die darauf basiert, dass es einen Unterschied zwischen Fixkosten und versunkenen Kosten gibt. Dabei stellen Fixkosten im Gegensatz zu versunkenen

Kosten keine Markteintrittsbarrieren dar. Bei der Eisenbahn findet man solche Fixkosten beispielsweise beim Rollmaterial, dessen Anschaffung sehr hohe Kosten darstellt. Die Fahrzeuge können jedoch bei Marktaustritt wieder verkauft werden. Die Kosten für die Gleise, also für die Infrastruktur, stellen im Gegensatz dazu jedoch versunkene Kosten dar, also Kosten, die bei Marktaustritt nicht wieder erbracht werden können. Es liegt somit kein perfekter, sondern ein bestreitbarer Markt vor. Diese Theorie veränderte die Einstellung und die politische Gesinnung gegenüber öffentlichen Unternehmen nachhaltig und führte zu Privatisierungen von Unternehmen, die bis dahin als natürliches Monopol betrachtet wurden. [3][50][99]

Die Eisenbahnpakete folgen – ob bewusst oder unbewusst kann nicht nachvollzogen werden – dieser Theorie der bestreitbaren Märkte. So ist im ersten Eisenbahnpaket [29] zu erkennen, dass die Verantwortung für die Infrastruktur und insbesondere für die Weiterentwicklung der Infrastruktur vom Staat zu tragen ist, obgleich sie andere Einrichtungen oder Unternehmen mit dem Betrieb der Infrastruktur beauftragen könnten. Diese Unternehmen sind jedoch verpflichtet, nach den Vorgaben des Staates zu handeln und zu wirtschaften sowie einen diskriminierungsfreien Zugang zum Netz zu gewährleisten. Die Kosten für die Infrastruktur als versunkene Kosten verbleiben somit in der Verantwortung des Staates, während über die Möglichkeit von privaten Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) ein Markt geschaffen wird.

### **3.5 Die Eisenbahnpakete – Trennung von Infrastruktur und Betrieb**

In den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts wurde in Europa der entstandene Marktnachteil der Bahn erkannt. Der Rat der Europäischen Gemeinschaften veröffentlichte im Jahr 1975 die „Entscheidung des Rates vom 20. Mai 1975 zur Sanierung der Eisenbahnunternehmen und zur Harmonisierung der Vorschriften über die finanziellen Beziehungen zwischen diesen Unternehmen und den Staaten“ [17]. In dieser Entscheidung wird festgehalten, dass die Eisenbahn für die Herausforderungen des neuen Jahrhunderts fit gemacht werden muss, da sie volkswirtschaftlich und gesellschaftspolitisch nicht zu ersetzen ist. Sie stellt das umweltfreundlichste Transportmittel dar, hat jedoch unter der Herrschaft der Staaten deutliche Defizite erlitten. Mit der europäischen Richtlinie aus dem Jahr 1991 [16] wurde der erste Schritt in die Richtung eines Wandels der europäischen Eisenbahn gesetzt. Ziel der Eisenbahnpakete war die Schaffung eines Marktes, der die Wirtschaftlichkeit der Eisenbahn erhöht. Erreicht werden sollte das mit der Trennung von Infrastruktur und Betrieb. Es soll damit mehreren EVUs ermöglicht werden, als Konkurrenz auf derselben Infrastruktur zu verkehren, als Ausgleich dafür müssen sie jedoch ein Infrastrukturbenutzungsentgelt für die Nutzung dieser



Infrastruktur bezahlen. Diese Zielrichtung bietet nennenswerte Vorteile, bringt jedoch auch Nachteile mit sich. Tatsächlich konnte in einigen, wenn auch wenigen Bereichen erreicht werden, dass gewisse Marktanteile von privaten EVUs oder EVUs anderer Staaten übernommen werden. Beispiele dafür sind die WESTbahn Management GmbH, die seit 2011 auf der Strecke zwischen Wien und Salzburg verkehrt oder die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB), die mit dem Jahr 2016 die Nachtzüge der Deutschen Bahn (DB) übernommen hat. Der schwerwiegende Nachteil dieses Konstrukts liegt jedoch in der dafür unabdinglichen Trennung der Rechnungskreise der Infrastruktur und des Betriebes, der aber den oben erwähnten Vorteil einer Marktöffnung erst ermöglicht. Die Bahnen sind dazu angehalten, wirtschaftlich zu handeln. Dies führt im Falle eines EVUs dazu, möglichst attraktive Bedingungen für die Passagiere bei möglichst niedrigen Kosten zu schaffen. Die Abrechnung für den Teil des Infrastrukturbenützungsentgelts, welches aus den Kosten der Fahrbahn entsteht, erfolgt noch heute in den meisten europäischen Ländern auf Basis der gefahrenen Kilometer multipliziert mit dem Gewicht des Fahrzeuges. Bei der Beschaffung eines Fahrzeuges strebt das EVU damit zwangsläufig ein möglichst geringes Gewicht an, um die Ausgaben für das Infrastrukturbenützungsentgelt möglichst niedrig zu halten und damit den Gewinn zu erhöhen. Durch die steigenden Anforderungen an die Fahrzeuge können diese jedoch selten in einer leichten Bauweise ausgeführt werden. Technisch gesehen ist primär der Krafteintrag des Fahrzeuges der Treiber für die Kosten der Fahrbahn. Die Konsequenz daraus ist, dass eine Optimierung der Fahrzeuge erfolgte, welche eher zu einem höheren Krafteintrag in die Fahrbahn führte. Erst die Einführung verschleißorientierter Trassenpreissysteme, wie das Beispiel des Verschleißfaktors [45] der Schweiz zeigt, machen es möglich, dass gleisschonende Fahrzeuge, im Gegensatz zu anderen Fahrzeugen, einen positiven Business Case für das EVU aufweisen. [54] Die Erfahrungen der Schweiz sind drei Jahre nach Einführung des neuen Verschleißfaktors im Trassenpreis sehr positiv. Bei der Beschaffung von neuen Fahrzeugen wird größtenteils auf die Auswirkungen im Trassenpreis wertgelegt. Zudem werden bestehende Fahrzeugflotten nachgerüstet und neu eingepreist.



## 4 Verfügbarkeit und Abhängigkeiten finanzieller Mittel

Der in Kapitel 3 gegebene Einblick in die Historie der Eisenbahn zeigte, dass die Entwicklung der Bahn auch stark durch die wirtschaftliche und politische Lage eines Landes beeinflusst wird. Das Zusammenspiel zwischen privater und staatlicher Investition ist dabei ein komplexes Konstrukt. Anhand von der SBB und der Japanischen Bahn soll in diesem Kapitel dargestellt werden, wie eine Bahn meist das Spiegelbild der politischen Entscheidungen darstellt und nur in den seltensten Fällen einem Selbstbestimmungsrecht unterliegt – und das obwohl vor allem dies von einer Bahn explizit verlangt wird.

Die SBB stellt dabei ein außergewöhnliches Beispiel dar: In vielen Grundsätzen hält sie an der Tradition fest und ist weiterhin eine integrierte Bahn, zudem gilt sie als sehr innovativ und modern. Obwohl die SBB zu 100 % in der Hand des Bundes ist, sind ähnliche Phänomene zu erkennen wie beispielsweise in Deutschland oder auch in England, deren Systeme sich vollkommen unterschiedlich darstellen. Auf die Entwicklung der SBB wird in Unterkapitel 4.1 weiter eingegangen.

Die Japanische Bahn galt seit Jahren als Vorbild für die Entwicklung der Bahnen in Europa und vor allem als Vorbild für die Privatisierung der Bahn. Jedoch konnte mit zunehmendem Interesse an der Japanischen Bahn festgestellt werden, dass das System nicht einfach auf europäische Bahnen umgelegt werden kann und auch keine vollkommene Erfolgsgeschichte aufzuweisen hat. Näheres dazu wird in Unterkapitel 4.2 ausgeführt.

### 4.1 Die Schweizer Bahn – eine Erfolgsgeschichte

Die Schweiz hat neben Japan nicht nur eine der besten Eisenbahnen weltweit, sondern die Bahn selbst hat einen bemerkenswerten Stellenwert in der Schweiz. Kaum ein Land ist so stolz auf seine Bahn wie die Schweiz. Trotz all dieser Hingabe für das System Eisenbahn hat die Bahn historisch gesehen jedoch eine sehr ähnliche Entwicklung erlebt wie in anderen Ländern.

Am 7. August 1847 wurde die erste Eisenbahnstrecke der Schweiz – die „Spanisch-Bröttli-Bahn“ von Zürich nach Baden – eröffnet. Deutlich später als die angren-

zenden Länder begann die Schweiz – erst unter dem Druck der Nachbarstaaten – ernsthaft über den Aufbau eines Schienennetzes nachzudenken. Es bestand die Sorge, dass die Schweiz durch das umliegende Schienennetz umfahren werden und damit an Bedeutung verlieren würde. [49][97] Trotz der eingeholten Expertise der englischen Ingenieure Robert Stephenson und Henry Swinburne sowie einer Reihe an inländischer lauter Stimmen für eine staatlich finanzierte und organisierte Bahn entschied sich der Bundesrat in seiner Botschaft vom 7. April 1851 für ein Privatbahnprinzip. Das benötigte Kapital für die Verwirklichung einer Staatsbahn überstieg das dafür zur Verfügung stehende Kapital des Bundes. Auf Basis der Expertise von Geigy wurde die Notwendigkeit gesehen, den Bau der Eisenbahn nicht gänzlich privaten Gesellschaften zu überlassen. Geigy machte jedoch einen Vorschlag, der die Vorteile von Privat- und Staatsbahn vereinen sollte: Der Bau der Bahnen würde zwar in der Hand von privaten Gesellschaften liegen, der Staat würde sich aber durch eine bis zur Rückzahlung fortlaufende Zinsgarantie den Einfluss auf die Entwicklung des Eisenbahnwesens sichern, womit auch die Möglichkeit des Erwerbs der Bahnen gegen Rückzahlung des Nennwertes einhergeht. [20] Dies wurde 1852 im ersten Eisenbahngesetz geregelt. Die Kantone waren damit für die Vergabe von Konzessionen verantwortlich. Das Interesse der Allgemeinheit konnte in den darauffolgenden Jahren durch die Kantone jedoch nicht gewahrt werden. [72]

In den Folgejahren entstanden eine Reihe an Nebenbahnen sowie die fünf später als Hauptbahnen bezeichneten Bahnen: die Schweizerische Centralbahn (1853), die Schweizerische Nordostbahn (1853), die Vereinigten Schweizerbahnen (1857), die Jura-Simplon-Bahn (1890) und die Gotthardbahn (1971). [97]

In den 1860er- und 1870er-Jahren kam es zur großen Eisenbahnkrise: Die Bahnen konkurrierten untereinander und verspekulierten sich. Der Bund musste mehrmals unterstützend eingreifen, um die großen Bauverpflichtungen zu realisieren, was dazu führte, dass sechs Eisenbahnunternehmen Bankrott anmelden mussten. Die Kapitalverluste erreichten im Jahr 1877 einen Wert von 443 Millionen Schweizer Franken (CHF). Die Stimmen zur Verstaatlichung der Bahnen wurde lauter. An der Spitze der Propaganda stand Stämpfli, der sich bereits 1850 für eine Staatsbahn ausgesprochen hatte. Jedoch war dies zu dem Zeitpunkt für den Bund noch kein ernsthaftes Thema. 1872 wurde das Bundesgesetz über Bau und Betrieb der Eisenbahnen auf dem Gebiet der Eidgenossenschaft erneuert und damit definiert, dass die Vergabe der Konzessionen nunmehr in der Verantwortung des Bundes lagen. Konzessionen wurden jedoch nur verweigert, wenn eine Gefährdung des militärischen Interesses bestand. Die Finanzträchtigkeit der Bahnunternehmen wurde nur selten überprüft. 1883 entschied sich der Bund auf Grund des finanziellen Risikos, den ersten möglichen Rückkauftermin der Bahnen im Jahr 1888 nicht wahrzunehmen. Allerdings wurde 1883 das Bundesgesetz über das Rechnungswesen der Eisenbahnen erlassen, um die vorangegangenen Missstände zu beseitigen. Die finanzielle Lage der Bahnen besserte sich jedoch nicht deutlich. Zusätzlich ließ eine Reihe an Unfällen die Stimmen für die Verstaatlichung wieder lauter werden, die im

Rahmen des Referendums am 6. Dezember 1891 vom Volk jedoch abgelehnt wurde. Die Verstaatlichung wurde weiterhin vorbereitet und so wurde das „Bundesgesetz betreffend der Erwerbung und des Betriebs von Eisenbahnen für Rechnung des Bundes und die Organisation der Verwaltung der Schweizerischen Bundesbahnen“ im Rahmen der Volksabstimmung im Jahr 1898 eindeutig angenommen und ebnete damit den Weg zur Verstaatlichung der fünf Schweizerischen Hauptbahnen. [20][72]

Von 1901 bis 1911 fand die erste Rückkaufetappe der fünf Hauptbahnen statt. 1911 wies das Netz der Schweizer Staatsbahn damit eine Netzlänge von 2.750 km auf. Von 1912 bis 1922 erfolgte die zweite Rückkaufetappe. Das Netz wuchs durch den Ankauf von fünf weiteren Eisenbahnlinien nochmals um 153 km. Damit war die Verstaatlichung angesichts dringenderer verkehrspolitischer Themen, wie die Elektrifizierung des Netzes, unvollendet abgeschlossen. Ein gemischtes System zwischen Staatsbahnen und Privatbahnen blieb bestehen. [20][72] Die Staatsbahn wurden unter dem Namen „Schweizerische Bundesbahnen“ vereint und aus Sorge vor dem Zentralismus organisatorisch in fünf Eisenbahnkreise aufgeteilt. Unter der neuen Organisation sollten die Schulden getilgt, der Betrieb vereinheitlicht und die Tarife gesenkt werden. Dies gelang erfolgreich, bis das Transportmonopol der Eisenbahn durch das Automobil Konkurrenz bekam.

Während des Ersten Weltkrieges erschienen die ersten Autos auf der Bildfläche der Schweiz. In den 1920er-Jahren erlebte das Auto den ersten Aufschwung, der die SBB ein Minus schreiben ließ. Die hohen Kosten der Verstaatlichung und der Elektrifizierung des Netzes belasteten die Bilanz der Bahn genauso wie Gratisleistungen für Post und Militär. Neben der Diskussion über Konzessionen für den Transport auf der Straße war vor allem die Frage nach der Finanzierung der Straßen von großer Bedeutung. Bis dahin war der Staat für den Bau von Straßen verantwortlich gewesen. Schlussendlich führte die Zweckbindung des Treibstoffzolls, der in seinen Anfängen eigentlich die leeren Staatskassen nach dem Krieg wieder füllen sollte, durch die steigenden Treibstoffpreise zu einem Überschuss, der in die Straßen investiert werden musste. So führten die steigenden Verkehrszahlen immer zu einem weiteren Ausbau der Straßen. 1945 waren die Schulden der SBB getilgt, während der Ausbau der Straßen boomte. Seit 1945 explodierte der Verkehr in der Schweiz quasi, was vor allem dem Individualverkehr anzurechnen ist. Auch die gefahrenen Zugkilometer nahmen stetig zu, parallel reduzierte sich jedoch der Anteil der Bahn am Modal Split von 57 % auf nur mehr 20 %. Was den Bau der Nationalstraßen betrifft, der 1960 verabschiedet wurde, war die Schweiz wiederum zeitlich deutlich hinter den Nachbarstaaten. In jedem Fall sollte jedoch verhindert werden, dass die gleichen Fehler wie bei den Anfängen der Eisenbahn gemacht wurden. Erst in den 1980er-Jahren kamen die ersten Gegenstimmen auf, nachdem die Kosten für den Bau der Autobahnen die Schätzungen um ein Vielfaches überstiegen. Seit 1968 wird versucht, sich an ein gesamtheitlichen Verkehrskonzept für die Schweiz zu halten, welches das Umweltbewusstsein, die Energieeffizienz und die Handhabung mit den steigenden Kosten in den Mittelpunkt rückt. [49]

Um 1970 herum stiegen die Investitionen im Bereich der Fahrbahn der SBB deutlich an. Historisch gesehen befand sich die SBB in dieser Zeit jedoch in einer größeren Krise. Die Passagierzahlen gingen stetig zurück und das Automobil war auf dem Vormarsch. Zusätzlich dazu wurden die möglichen Investitionen der SBB politisch begrenzt, auf Grund des §18 des SBB-Gesetzes in der Fassung von 1944. „Für Anschaffungen und Bauten [...] dürfen höchstens die aus Abschreibungen gewonnenen Mittel verwendet werden.“ [48] Erst im Jahr 1961 wurde der Passus wie folgt abgeändert: „Die Eidgenossenschaft stattet die Bundesbahnen mit einem Dotationskapital von 800 Mio. Fr. aus.“ [48]

1971 taten drei junge Ingenieure der SBB unter dem Namen „Spinnerclub“ zusammen und entwickelten im Geheimen ein Konzept, das die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs wieder steigern sollte. Ein Jahr später präsentierten Samuel Stähli, Jean-Pierre Berthouzoz und Hans Meiner ihr schweizweites Konzept des Taktfahrplans auf einer Fachtagung der Gesellschaft der Ingenieure der SBB und hatten damit durchschlagenden Erfolg. Nach einigen Verschiebungen konnte 1982 der schweizweite integrale Taktfahrplan mit einigen Kompromissen, die schließlich 1987 ausgemerzt werden konnten, eingeführt werden. Die letzte Weiterentwicklung des Taktfahrplans wurde 2004 im Rahmen des Projektes „Bahn 2000“ eingeführt. [85]

1987 wird die Volksabstimmung zu „Bahn 2000“ mit 57 % der Stimmen angenommen. [13] Inhaltlich sollte „Bahn 2000“ den Anteil der Bahn am Modal Split wieder erhöhen. Nach den großen Ausbauten im Straßenverkehr wurde erkannt, dass die Straße die Herausforderungen im Verkehrssektor nicht lösen kann. Aus diesem Grund wurde versucht, durch bessere und häufigere Verbindungen den öffentlichen Verkehr zu stärken. Die Ausweitung des Taktfahrplans stand klar im Fokus. Dies sollte, neben vielen anderen Maßnahmen, durch vier Neubaustrecken verwirklicht werden: Vauderens-Villars-sur-Glâne, Mattstetten-Rothrist, Olten-Muttenz sowie Zürich Flughafen-Winterthur. Die Hälfte der bewilligten 5,4 Milliarden CHF wurde alleine für diese vier Neubaustrecken zur Verfügung gestellt. Nach den ersten Jahren wurde jedoch ersichtlich, dass die Kosten für das Vorhaben „Bahn 2000“ deutlich unterschätzt wurden. Der Kreditrahmen wurde auf 8 Milliarden CHF erhöht und das Vorhaben stark abgeändert. Ausschließlich die Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist ist heute vollständig realisiert. Der steigende Bedarf wurde über Doppelstockwagen sowie Neigezüge kompensiert. Das Vorhaben wird mit Endkosten von 5,9 Milliarden CHF als Erfolg verbucht, da die geplanten Kosten von 7,4 Milliarden CHF unterschritten wurden. Dabei sei jedoch zu erwähnen, dass diese 5,9 Milliarden CHF ausschließlich den Abschluss der ersten Etappe darstellen. Die Etappierung erfolgte, als erkannt wurde, dass es nicht möglich war, das gesamte Vorhaben mit den geplanten Kosten zu realisieren. [14]

1998 wurde mit dem Bundesbeschluss zum Bau und der Finanzierung von Infrastrukturvorhaben des öffentlichen Verkehrs (FinöV) das Finanzierungssystem der SBB geändert. Es wurde davon ausgegangen, dass die SBB die durch den Ausbau des Streckennetzes steigenden Kosten sowie die Rückzahlung des Darlehens und die Zinsen selbst erwirtschaften könne. Dies war jedoch nicht der Fall und der Bund musste in weiterer Folge das Defizit der SBB decken. [11] Mit 1. Januar 1999 wurde die SBB in eine Aktiengesellschaft umgewandelt, die bis heute jedoch zu 100 % in der Hand des Bundes ist. [79] Der Bund behält sich jedoch mit dem Bundesgesetz über die Schweizerischen Bundesbahnen das Recht vor, die Aktien zu veräußern. [75]

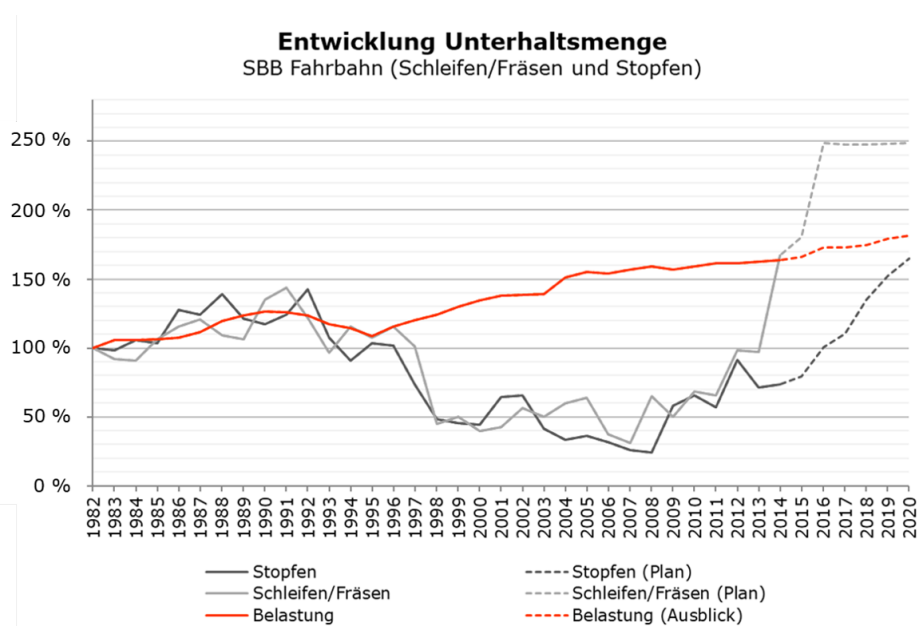


Abbildung 4.1: Entwicklung der Unterhaltsarbeiten in Abhängigkeit zur Belastung (Quelle: eigene Darstellung nach [77])

Der der SBB auferlegte Kostendruck für die Infrastruktur ist auch in der finanziellen Kürzung des Substanzerhalts der Fahrbahn (siehe Abbildung 4.1) erkennbar. Die in rot dargestellte Belastung der Fahrbahn wuchs stetig, während der Unterhalt (hier beispielhaft an der Menge an Stopfen und Schleifen dargestellt) um das Jahr 1999 herum auf rund die Hälfte reduziert wurde. Neben einer steigenden Belastung durch die erhöhte Kapazität kamen zusätzlich neue und weniger gleisschonende Züge hinzu, um Taktknoten auch ohne die großen Ausbauprojekte zu realisieren.

Am 16. Februar 2013 entgleiste eine S-Bahn zwischen Schwerzenbach und Nanikon-Greifensee (ZH). Laut dem Bericht der Schweizerischen Untersuchungsstelle (SUST) [80] war diese Entgleisung auf Squats zurückzuführen. Daher wur-

de empfohlen, dass die SBB sowohl die Kontrolle von Rollkontaktermüdungen überprüfe wie auch die Frequenz von Schienenschleifen als Maßnahme gegen Rollkontaktermüdung. Damit wurde die Infrastruktur der SBB wachgerüttelt und das Ausmaß des verursachten Schadens durch den reduzierten Substanzerhalt zumindest teilweise sichtbar. In weiterer Folge wurden vor allem die Schleifmengen der SBB drastisch erhöht. Eine zusätzliche Auswirkung des finanziellen Drucks war der Anstieg des Nachholbedarfs durch die reduzierten Substanzerhaltungsmengen. In Unterkapitel 11.1 werden dieser Zusammenhang und die Auswirkungen für die SBB näher erläutert.

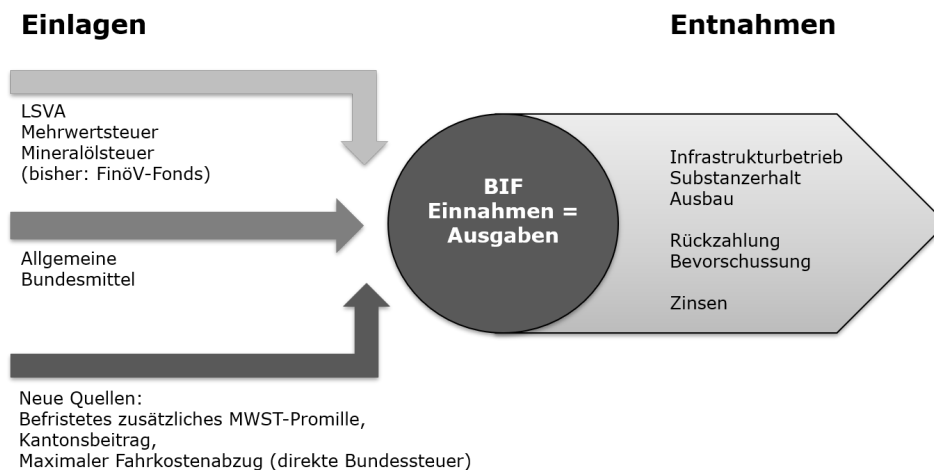


Abbildung 4.2: Einlagen und Entnahmen in FABI [9]

Auch von der politischen Seite bekam zu dieser Zeit der Substanzerhalt mehr Gewicht, was mit der Abstimmung vom 09. Februar 2014 zur „Finanzierung und Ausbau der Bahninfrastruktur“ (FABI) deutlich wurde. FABI wurde mit 62 % von der Bevölkerung angenommen. Damit wurde nach 18 Jahren der FinöV-Fonds abgelöst, der 1998 ins Leben gerufen wurde. Über diese 18 Jahre wurden dem FinöV-Fonds 27,3 Milliarden CHF für den Ausbau und die Lärmsanierung entnommen. [12] Inhalt von FABI war die Schaffung einer neuen Finanzierung für Betrieb, Substanzerhalt und Ausbau der Bahninfrastruktur. Ausbau und Substanzerhalt werden damit aus einem gemeinsamen Topf finanziert, wobei der Substanzerhalt Vorrang gegenüber dem Ausbau erhalten soll. Es wurde der unbefristete Bahninfrastrukturfonds (BIF) geschaffen, der auf Verfassungsebene verankert wurde. [26] Es wurde erkannt, dass die bestehende Finanzierungsform (FinöV-Fonds) weder die weiteren geplanten Ausbauschritte, die ursprünglich unter „Bahn 2000“ geplant wurden, noch den bestehenden Betrieb und Substanzerhalt decken kann. Die bisherigen Gelder von rund 4 Milliarden CHF pro Jahr, welche sich aus den leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgaben (LSVA), Anteilen der Mehrwertsteuer und der Mineralölsteuer zusammensetzen, wurden damit um weitere rund 20 %



erhöht. Dazu kommen zusätzliche Beiträge der Kantone sowie der Mehrwertsteuer. Auch die Reisenden beteiligen sich am BIF mit einem Anteil der Ticketpreise. Langstreckenpendler leisten einen Beitrag über einen verringerten Abzug der berufsbedingten Fahrkosten bei der direkten Bundessteuer. Die Einlagen und Entnahmen des BIFs sind in Abbildung 4.2 dargestellt. FABl trat 2016 in Kraft. [9][10]

## 4.2 Die Japanische Bahn – zwischen privater und staatlicher Finanzierung

Die Japanische Bahn gilt als die pünktlichste und beste Bahn der Welt. Bei genauerer Betrachtung des Systems der Japanischen Bahn kristallisieren sich deutliche Unterschiede zu europäischen Bahnen heraus. Die japanische Kultur hatte einen deutlichen Einfluss auf die Strategie und Philosophie dieser Bahn. In diesem Unterkapitel soll die Entwicklung der Japanischen Bahn vor allem in Bezug auf die Finanzierung dargestellt werden. Gerade im Substanzerhalt sind die Unterschiede zwischen der Japanischen Bahn und den Grundsätzen der europäischen Bahnen bedeutend. Um von der besten Bahn der Welt lernen zu können, lohnt es sich jedenfalls, die Hintergründe zu betrachten. Die Japanische Bahn dient vor allem auf Grund ihrer herausragenden Performance immer wieder als Objekt für einen Benchmark. Auch die Tatsache, dass sie als privatisierte ehemalige Staatsbahn gilt, wirft in der Fachwelt die Frage auf, ob dies auch ein denkbare und rentable System für die europäischen Bahnen sein könnte. Ein Vergleich der jährlichen Einnahmen und Ausgaben greift hier allerdings zu kurz, um beurteilen zu können, ob das heutige System der Japanischen Bahn bei der Anwendung auf eine europäische Bahn zu niedrigeren Kosten führen würde.

Bei seiner Entstehung wurde das Eisenbahnnetz in Japan sowohl staatlich wie auch privat finanziert. Da die Staatskassen leer waren, schaffte der Staat Ende des 19. Jahrhunderts finanzielle Anreize, um private Investoren anzulocken. Die Ticketpreise und die Preise für den Rohstofftransport waren jedoch so hoch, dass sie einer Förderung der Wirtschaft hemmend gegenüber standen. Aus diesem sowie auch politischen und militärischen Gründen wurden die Bahnen 1906 (mit Ausnahme der innerstädtischen Bahnen) verstaatlicht. Auf Grund der zu der Zeit attraktiven Gewinne im Eisenbahnsektor geschah dies nicht ohne Widerstand der Eigentümer der privaten Bahngesellschaften. Unter staatlicher Hand verfolgte das Ausbauprogramm der Japanischen Bahn hauptsächlich politische Ideale. Somit wurden Strecken errichtet, die vorrangig Wählerstimmen befriedigen sollten, die Japanische Bahn jedoch defizitär werden ließen. [37][50]

1949 wurde die Japanische Bahn auf Grund ihrer Defizite zu einem öffentlichen Unternehmen mit dem Namen „Japanese National Railways“ umgewandelt. Die

Gewinne der Bahn wurden während der Kriegszeit für das Militär abgeschöpft. Zusätzlich diente die Bahn dazu, ehemalige Soldaten und Eisenbahner aus den Kolonialgebieten einzustellen und ihnen damit Arbeit zu geben. Neben diesen finanziellen Belastungen war eine massive Streiktätigkeit nicht im Sinne der politischen Führung. Das amerikanisch geprägte Konstrukt erlaubte jedoch nur nach außen hin eine gewisse Autonomie der Bahn, im Inneren blieb die Bahn Spielball der Politik. Neben dem unwirtschaftlichen Ausbau des Netzes setzte der Wandel der Markt- und Verkehrsstruktur der Bahn zusätzlich zu. Die Bahn erhielt immer mehr Strecken, die nur unwirtschaftlich betrieben werden konnten, parallel dazu durften auch keine Strecken geschlossen werden, die Kosten mussten von der Bahn jedoch selbstständig getragen werden. Ab 1976 blieb dem Staat schließlich nichts anderes mehr übrig als die Bahn zu subventionieren. [50]

Im Jahr 1987 wurde unter die Machtkämpfe der politischen Parteien und Gewerkschaften ein Schlussstrich gezogen, die Staatsbahn wurde privatisiert und in sieben privatrechtliche Gesellschaften aufgespalten. Die Japanese National Railways (JNR) wurde in drei Personentransportgesellschaften auf der Hauptinsel, drei Personengesellschaften auf den Nebeninseln, eine Frachtgesellschaft ohne eigene Infrastruktur und eine Liquidationsgesellschaft, die 70 % der Schulden und das überschüssige Personal aufnahm, aufgeteilt. Während die drei Personengesellschaften auf der Hauptinsel je über einen rentablen Anteil am Shinkansennetz verfügen, können die drei Personengesellschaften auf den Nebeninseln kaum rentabel wirtschaften. [40][50] In Abbildung 4.3 ist das Organigramm der JNR aus dem Jahr 1987 abgebildet. Neben den Bahnen der JNR existieren in Japan heute noch eine Reihe privater Bahnunternehmen.

Es stellt sich dabei die Frage, wie die privatrechtlichen Gesellschaften organisatorisch aufgebaut wurden. Wie in Unterkapitel 3.4 ausgeführt, geht die Wissenschaft heute davon aus, dass die Infrastruktur als natürliches Monopol auf Dauer nicht ohne entsprechende Maßnahmen am Markt bestehen kann. Ob bei der Privatisierung der Japanischen Bahn eine Trennung in Betrieb und Infrastruktur erfolgte, wird in der Literatur unterschiedlich dargestellt. Während Gutzwiller [40] klar betont, dass niemand in Japan von einer Trennung von Infrastruktur und Betrieb spricht, macht Pfund [69] deutlich, dass in einigen Bereichen eine Trennung erfolgte. Genannt wird hierbei die Ausgliederung der Shinkansen. Die Fahrzeuge wurden von JR East, Central und West zum Buchwert gekauft und betrieben, während die Infrastruktur in die Shinkansen Holding Corporation eingebracht wurde und von den Personenbeförderungsgesellschaften geleast wurde. Auch das Güterverkehrsunternehmen erhielt keine eigene Infrastruktur, sondern muss diese von den Personenverkehrsgesellschaften mieten. [50] Es kann festgehalten werden, dass keine Trennung von Infrastruktur und Betrieb im europäischen Sinne erfolgte. Es gibt jedoch Bereiche, in denen Infrastruktur und Betrieb nicht im Eigentum desselben Unternehmens angesiedelt wurden. Im Jahr 1991 wurde die Trennung zwischen Betrieb und Infrastruktur beim Shinkansen wieder aufgegeben, da die

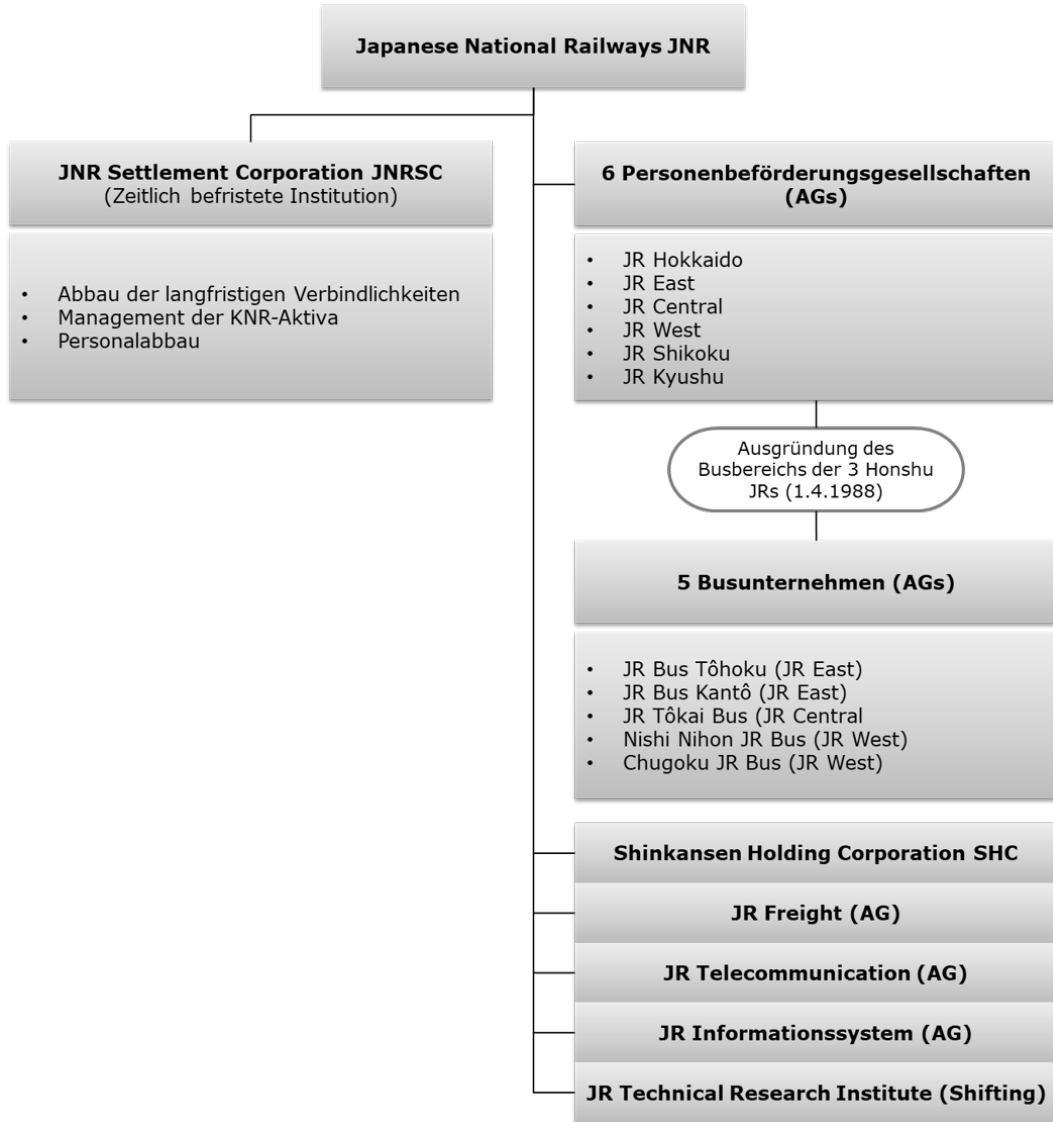


Abbildung 4.3: Organigramm der JNR im Jahr 1987 (Quelle: eigene Abbildung nach [50])

Leasinggebühren für die Infrastruktur für die Personenverkehrsgesellschaften eine hohe Last waren. Zudem gab es keine Regelung, wie die Eigentumsverhältnisse nach der dreißigjährigen Leasingperiode aussehen würden. Aus diesem Grund wurde die Infrastruktur an die drei Personenverkehrsgesellschaften verkauft und die Shinkansen Holding Corporation aufgelöst. Die japanische Meinung, dass Infrastruktur und Betrieb gemeinsam zu führen sind, wurde damit gestärkt und ist aus diesem Grund heute kein Thema in Japan. [69]

Bei der Privatisierung handelt es sich um keine vollständige Privatisierung. Es wurde ein Konzept verfolgt, bei dem die imperfekten Märkte durch wettbewerbs-schaffende Maßnahmen ergänzt wurden. Im Fall der Japanischen Bahnen bedeutet das, dass durch die Aufspaltung in mehrere kleinere Bahnen regionale Monopole geschaffen wurden, die miteinander verglichen werden können, allerdings regional nicht konkurrieren. Zudem besteht im Bereich des Personenverkehrs Konkurrenzdruck durch die privaten Bahnen. Die Privatisierung erfolgte nicht in Form einer AG, sondern es wurden Unternehmen gegründet, die einer Sondergesetzgebung unterliegen. Es blieb eine starke Regulierung des Staates aufrecht, die vor allem bei der Preisregulierung der Tarife deutlich wird. Zudem betrifft dies den Entscheid und die Finanzierung über Neubau und Schließung von Strecken, die Bestellung des Vorstandes, die strategische Unternehmensplanung sowie die Entscheide über Unternehmensvermögen. [50][69]

Die Privatisierung wird angesichts der Gewinne in den Jahren nach der Privatisierung als Erfolg angesehen, jedoch sind diese Gewinne vor allem in den Rationalisierungsmaßnahmen und dem Personalabbau als Vorbereitung auf die Privatisierung begründet. Zudem wurden die Bahnen größtenteils entschuldet und subventioniert. Die Kosten der Infrastruktur werden weiterhin den privaten Bahngesellschaften angelastet. Jedoch wurde einige Jahre nach der Privatisierung zumindest ein komplexes Subventionierungskonzept zum Ausbau neuer Strecken eingerichtet. So mussten die Bahnen nicht mehr selbst für den politischen Entscheid über den Ausbau des Eisenbahnnetzes aufkommen. Der Substanzerhalt der Infrastruktur wird jedoch weiterhin eigenständig finanziert. [50]

Zusammenfassend kann bezüglich der Privatisierung der japanischen Staatsbahn gesagt werden, dass sie aus Sicht der Kundschaft ein Erfolg war. Das Angebot wurde verbessert, während die Preise gleich blieben. Einen positiven Einfluss auf den deklarierten Erfolg der Privatisierung hatte die Nachfrage: Im Gegensatz zu Europa ist es in Japan sehr teuer, ein Auto zu besitzen und auf den Straßen herrscht grundsätzlich Stau. Aus finanzieller Sicht war die Privatisierung für die drei Personenverkehrsgesellschaften auf der Hauptinsel ein Erfolg. Sie erwirtschaften heute abzüglich der Schuldverzinsung einen kleinen Gewinn. Bis auf den Ausbau können sie sich damit selbst finanzieren. Neben den rentablen Strecken ist dies auch durch die rentablen Nebengeschäfte der Bahn begründet. Der Wert ihrer Aktien liegt trotzdem nicht in der erhofften Höhe. Für die drei

Personenverkehrsunternehmen auf den Nebeninseln sieht das Resümee deutlich schlechter aus. Ihre Verschuldung steigt stetig an. [40][69]

Neben anderen Faktoren wirkt sich auch die organisatorische und finanzielle Situation der JR-Gesellschaften auf das Substanzerhaltungsregime der Fahrbahn aus. Dieses konnte im Rahmen eines Besuchs von JR West im Jahr 2016 bei der SBB verglichen werden. In Europa herrscht die Meinung vor, dass möglichst lange Abschnitte der Fahrbahn effizient mit großen Baumaschinen erneuert werden können. Zudem sind vor allem die Herstellungsqualität und deren Einfluss auf die Langlebigkeit der Fahrbahn von großem Wert, um die Infrastruktur wirtschaftlich auch für die nächste Generation erhalten zu können. Dieses Substanzerhaltungsregime wird durch die Finanzierung der Investition der Infrastruktur durch den Staat begünstigt, da es möglich ist, hohe Investitionen zu tätigen, die über viele Jahrzehnte abgeschrieben werden können. Das Substanzerhaltungsregime in Japan konzentriert sich auf kurze betriebliche Unterbrechungen in der Nacht. Auch Gutzwiller [40] beschreibt den Umbau von Gleisen vornehmlich als Handarbeit. Gleisumbauzüge kommen nicht zum Einsatz. Bei einer Fahrbahn mit Schotteroberbau werden deshalb vor allem die Komponenten Schiene, Schwelle und Schotter je nach Zustand einzeln erneuert und nicht, wie aus wirtschaftlichen Gründen in der Schweiz üblich, die gesamte Fahrbahn.



# 5 Die ökonomische Bewertung der Eisenbahninfrastruktur

Die Bewertung einer Eisenbahninfrastruktur kann unterschiedliche Ziele verfolgen. Im Gegensatz zur klassischen Unternehmensbewertung eines privatwirtschaftlichen Unternehmens kann jedoch festgehalten werden, dass es nur in einem untergeordneten Maß um die Erhebung des finanziellen Wertes eines Eisenbahninfrastrukturunternehmens (EIU) geht. Dies begründet sich in den Unternehmenszielen eines EIUs. Im Gegensatz zu anderen Unternehmen ist die Infrastruktur der Eisenbahn in Europa zumeist Eigentum des Staates und somit subventioniert. Diese Subventionierungssituation hat zur Folge, dass die Infrastruktur selbst keinen Gewinn erwirtschaften bzw. abschöpfen darf und damit am Ende des Jahres das Ziel eine Kostendeckung durch die Einnahmen und Subventionen ist. Das Bestreben von privaten Unternehmen ist es jedoch zumeist, einen möglichst hohen und stabilen Gewinn abzuschöpfen. Diese beiden kontroversen Zielrichtungen zeigen auf, dass die Bewertung eines EIUs und eines privatwirtschaftlichen Unternehmens auf unterschiedliche Weise erfolgen muss.

Somit drängt sich die Frage auf, welche Ziele die Bewertung einer Eisenbahninfrastruktur zu verfolgen hat. Um diese Frage zu beantworten, muss den generellen Zielen der Eisenbahninfrastruktur auf den Grund gegangen werden. In der Schweiz hat das EIU die Infrastruktur möglichst sicher, verfügbar und wirtschaftlich zu erhalten. [52] Die Sicherheit der Eisenbahn steht dabei in Europa außer Frage. Sicherheit steht jedoch immer im Zusammenhang mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit. Während es in anderen Branchen, wie beispielsweise der Luftfahrt, bekannt ist, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Unfalls meist einem Geldwert gegenüber gestellt wird, so gilt bei der Eisenbahn, dass ein wesentliches Risiko immer ausgeschlossen werden muss. Dies ist in der Realität jedoch unmöglich.

Der Stellenwert der Verfügbarkeit wird nicht in jedem europäischen Land gleich hoch angesiedelt. In der Schweiz steht die Verfügbarkeit hinter der Sicherheit direkt an zweiter Stelle. Die Kosten für diese Verfügbarkeit werden nur selten öffentlich thematisiert. In anderen Ländern werden die Erwartungen der Bahnkundschaft meist den Kosten der Infrastruktur nachgereiht und Zugverspätungen oder Schienenersatzverkehr werden deutlich leichter akzeptiert als dies in der Schweiz der Fall ist. Dabei wird meist die Definition der Kundschaft für die Eisenbahninfrastruktur nicht ausreichend hinterfragt. Kunde der Eisenbahninfrastruktur ist der Steuerzahler als indirekter Geldgeber sowie der Staat als Eigentümer, das EVU,

welches für die Zurverfügungstellung der Infrastruktur ein Entgelt bezahlt und der Bahnfahrer an sich, der seine bezogene Leistung über Ticketpreise bezahlt. Jeder dieser Kunden erwartet eine gewisse Leistung. Während der Steuerzahler oft den größten Beitrag leistet, werden seine Interessen nur sehr selten vertreten. Zudem sind die Interessen der unterschiedlichen Kunden meist gegensätzlich, auch wenn es sich um dieselbe Person handelt. Der Bahnfahrer erwartet möglichst niedrige Ticketpreise und einen stabilen und möglichst dichten Fahrplan. Diese Erwartungen erhöhen jedoch die Kosten für den Steuerzahler, da einerseits die hohen Anforderungen auch zu höheren Kosten führen und andererseits nicht gedeckte Kosten zu Lasten des Steuerzahlers anfallen. Das EVU stellt dabei die Schnittstelle zwischen diesen beiden Kunden dar. Je mehr Kosten dem EVU angelastet werden, umso mehr steigen auch die Ticketpreise für den Bahnkunden.

Neben diesen offensichtlichen Kunden, die alle einen Beitrag für das System „Bahn“ zahlen, kann jedoch auch die Volkswirtschaft an sich als Kunde betrachtet werden. In der Hand des Staates leistet die Infrastruktur auch immer einen Beitrag zur Volkswirtschaft. Neben den, in früheren Zeiten, militärischen Hintergründen, war der Erhalt der Leistung an der Volkswirtschaft einer der ursprünglichen Treiber, um die Bahnen in Europa zu verstaatlichen. Auch heute noch leistet die Bahn einen tragenden Beitrag zur Wirtschaft eines Landes. In der Schweiz wies der VöV im Jahr 2004 einen volkswirtschaftlichen Nutzen (inklusive induzierte Effekte) des öffentlichen Verkehrs von 33 Mia. CHF aus. Rund 70 % davon werden der Eisenbahn zugerechnet. [67] Dieser volkswirtschaftliche Nutzen relativiert die oft kritisierten Kosten der Bahn.

Das dritte Ziel eines EIUs ist die Wirtschaftlichkeit. Wird eine strenge Begriffsdefinition verfolgt, so stellt die Wirtschaftlichkeit das Verhältnis zwischen Ertrag und Aufwand bzw. Erlös und Kosten dar. Das Streben nach einer möglichst hohen Wirtschaftlichkeit ist damit schon auf Grund der Subventionierungssituation per Gesetz ausgeschlossen. Viel mehr ist mit der Wirtschaftlichkeit hier jedoch das Streben nach möglichst niedrigen Kosten gemeint. Hierbei ist jedoch zwischen kurzfristig niedrigen Kosten oder nachhaltig und langfristig niedrigen Kosten klar zu unterscheiden. Diese Unterscheidung führt zu vollkommen unterschiedlichen Unternehmensstrategien eines EIUs.

Der Grundsatz einer Investition in die Infrastruktur steht dabei im Gegensatz zur Wirtschaftsphilosophie der heutigen Zeit. Während eine Infrastruktur möglichst nachhaltig und damit über eine lange Nutzungsdauer zu niedrigen Kosten betrieben werden soll, liegt der heutigen Wirtschaft eine Konsumgesellschaft zu Grunde. Die geplante Obsoleszenz spielt dabei eine große Rolle. Sie gilt seit den 1920er-Jahren als Wirtschaftstreiber, vor allem in Krisenzeiten. Einerseits wird der Kostendruck auf Produkte immer größer. Somit sind langlebige Produkte zu diesem Preis auch kaum mehr produzierbar. Andererseits wird geplante Obsoleszenz auch dafür genutzt, einen regelmäßigen und hohen Absatz der Produkte zu



generieren. [42] Das EIU bewegt sich auf einem Markt, der von diesem Prinzip der geplanten Obsoleszenz getrieben wird. Dies bringt jedoch gerade bei Produkten des EIUs, die den Grundsätzen der Sicherheit und der Nachhaltigkeit unterliegen, einen großen Nachteil mit sich. Somit befinden sich EIUs heute in einem Spannungsfeld zwischen einem bewusst angekurbelten Markt, in dem Innovationen gefördert werden sollen, und dem oft als veraltet abgetanen Grundsatz der Bahn. Kurze Nutzungsdauern dienen grundlegend der Förderung von Innovationen, da Testzyklen kurz sind und die Gesamtmenge der Produkte in kürzester Zeit ersetzt werden kann. Die Fahrbahn als langlebige Infrastruktur mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 30 bis 40 Jahren hat damit Erneuerungszyklen, die jedem privaten Unternehmen auf dem freien Markt hinderlich sind. Die Entwicklung eines neuen Produkts, die Zulassung und die anschließende Testphase bis zum effektiven Rollout über das ganze Netz kann ein bis zwei Jahrzehnte andauern. Erst nach dieser Zeit kann erkannt werden, ob die Entwicklung eines Produktes erfolgreich war. Als Schlussfolgerung wird das Risiko des Unternehmers in Form von Kosten meist der Bahn übertragen. Die Bahn gilt, wie bereits erwähnt, jedoch auch als Wirtschaftstreiber eines Landes und so ist eine niedrige Produktionstätigkeit nur selten das angestrebte Ziel des Staates. Eine hohe Produktionstätigkeit der Bahn garantiert eine niedrige Arbeitslosigkeit und gute Auftragslage für Unternehmen, vorrangig im eigenen Land.

Die Infrastruktur der Bahn hat somit als oberstes Ziel die nachhaltige Zurverfügungstellung einer den Anforderungen des Bahnbetriebes gerechten Infrastruktur zu möglichst niedrigen Kosten. Gerade bei hohen Investitionskosten ist eine möglichst lange Nutzungsdauer ein entscheidendes Kriterium für niedrige Kosten auf lange Sicht. Angesichts der unterschiedlichen Nutzungsdauern der Komponenten und der unterschiedlichen Kosten bedarf es somit einer Bewertung dieser Komponenten und der Infrastruktur als Ganzes. Dabei sind drei grundlegende Eingangsparameter zur Bewertung der Infrastruktur zu unterscheiden:

- die Kosten,
- der Zustand und
- die Substanz der Eisenbahninfrastruktur.

Die monetäre Bewertung einer Investition und damit die Bewertung der Kosten kann über unterschiedliche Verfahren erfolgen. Auf die für die Eisenbahninfrastruktur relevanten Bewertungsverfahren wird in Unterkapitel 5.1 genauer eingegangen. Wie bereits erwähnt, ist zur Unterscheidung der kurzfristigen Bewertung der Kosten zur nachhaltigen Wirtschaftlichkeit vor allem die Nutzungsdauer in Betracht zu ziehen. Eine Definition dieser Nutzungsdauer erfolgt in Unterkapitel 5.2. Der Vergleich zwischen den Begriffen „Zustand“ und „Substanz“ erfolgt schließlich in Unterkapitel 5.3

## 5.1 Die Bewertung der Kosten

Für die wirtschaftliche Bewertung von Investitionen stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Grundlegend werde diese in statische und dynamische Bewertungsverfahren geteilt, wobei statische Bewertungsmethoden den Zeitpunkt der Zahlung vernachlässigen. Da Eisenbahninfrastrukturanlagen Nutzungsdauern von mehreren Jahrzehnten aufweisen, sind bei der Bewertung dynamische Aspekte zu berücksichtigen. Bei den dynamischen Bewertungsverfahren stehen drei Methoden zur Auswahl:

- Kapitalwertmethode
- Methode des internen Zinssatzes
- Annuitätenmethode

Bei allen drei Methoden wird der Zahlungszeitpunkt in Betracht gezogen. Wie in Abbildung 5.1 zu erkennen ist, liegt als Basis ein Zahlungsstrom zu Grunde. Dies bedeutet, dass die Höhe aller Zahlungen und der Zahlungszeitpunkt bekannt sind. Werden die Zahlungen auf ein Bezugsjahr (meist das Jahr der Investition) abgezinst, so ergeben sich die Barwerte der Zahlungen. [30] Damit werden Kosten und Erlöse immer weniger wert, je weiter sie in der Zukunft liegen.

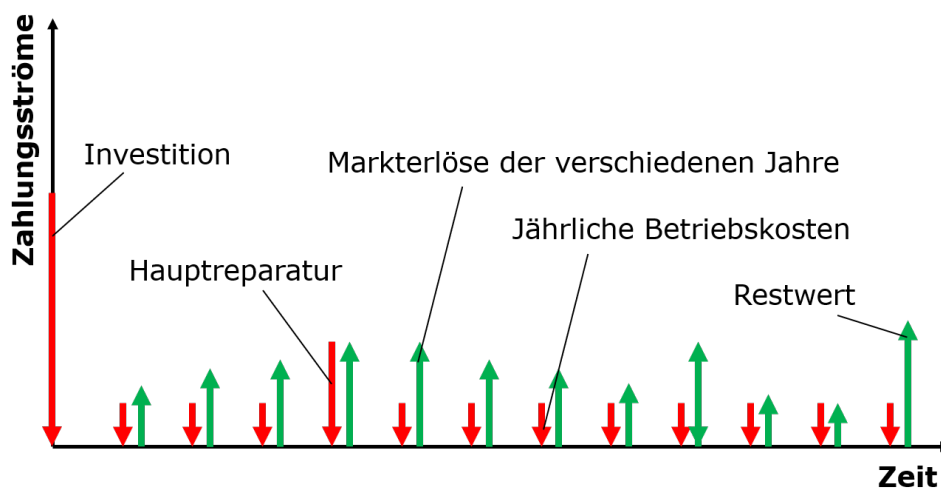


Abbildung 5.1: Zahlungsstrombild einer Investition (Quelle: eigene Darstellung nach [30])

Zur Abzinsung der Zeitwerte zu Barwerten ist ein kalkulatorischer Zinssatz festzulegen, der sich bei Infrastrukturprojekten zwischen rund 2 % und 5 % bewegt. Das Bundesamt für Statistik (Schweiz) (BFS) veröffentlicht jedes Jahr den

Bericht „Schweizerische Eisenbahnrechnung“ [82]. Dem zu entnehmen ist, dass der kalkulatorische Zinssatz für Eisenbahnen in der Schweiz in den Jahren 2001 bis 2011 von 4,29 % auf 3,21 % gesunken ist. Grundlegend wird beim kalkulatorischen Zinssatz zwischen dem Nominalzinssatz und dem Realzinssatz unterschieden, wobei der Nominalzinssatz inklusive Inflation berechnet wird und der Realzinssatz ohne Inflation. [64] Bei so langlebigen Anlagen wie es Infrastrukturanlagen sind, besteht keine gesicherte Information über die Inflation über viele Jahrzehnte. Zudem würde die Inflation in einem ersten Schritt auf die heutigen Kosten aufgerechnet werden, um sie dann bei der Abzinsung auf das Bezugsjahr wieder abzuziehen. Die Berechnung mit dem Nominalzinssatz wäre somit ein zusätzlicher Ungenauigkeitsfaktor. Aufgrund dessen ist der Realzinssatz zur Bewertung von Infrastrukturanlagen anzusetzen. [30]

Ein zusätzlicher Faktor zur Bestimmung des kalkulatorischen Zinssatzes ist das Miteinbeziehen eines unternehmerischen Risikos. Somit ist selbst bei einem Realzinssatz von 0 % eine dynamische Bewertungsmethode zu wählen und ein kalkulatorischer Zinssatz zur Bewertung des Risikos einzurechnen.

### 5.1.1 Kapitalwertmethode

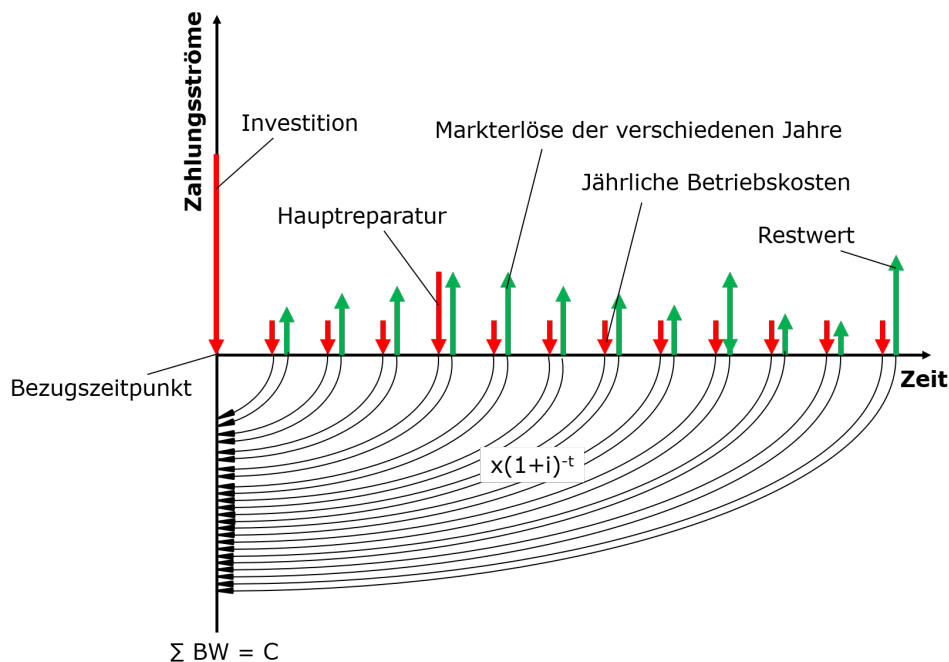


Abbildung 5.2: Kapitalwertmethode (Quelle: eigene Darstellung nach [30])

Die Summe der Barwerte ergibt den Kapitalwert (siehe Abbildung 5.2). Die

Kapitalwertmethode setzt zum Vergleich zweier Kapitalwerte gleiche Investitionen und gleiche Nutzungsdauern voraus. Somit ist sie für die Bewertung von Infrastrukturanlagen nicht geeignet, da die Investitionen und Nutzungsdauern zweier Varianten auch stark unterschiedlich sein können. Alternativ kann mit einer Restwertbildung gearbeitet werden. [30] Die Bildung eines Restwertes ist bei einem Gleis jedoch sehr fragwürdig, da real kein Geld mit der Anlage lukriert werden kann. Die Kapitalwertmethode vernachlässigt zudem die Möglichkeit, eine Investition mehrmals zu tätigen.

$$BW = ZW \cdot (1 + i)^{-t} \quad (5.1)$$

$$C = \sum_t BW \quad (5.2)$$

*BW*...Barwert

*ZW*...Zeitwert

*i*...kalkulatorischer Zinssatz [%]

*t*...Zeit [Jahre]

### 5.1.2 Methode des internen Zinssatzes

Die Methode des internen Zinssatzes (siehe Abbildung 5.3) bestimmt die dynamische Rentabilität einer Investition. Der interne Zinssatz definiert sich über den Zinssatz, bei dem der Kapitalwert 0 ist und stellt damit jenen Zinssatz dar, mit dem sich die Investition verzinst. Je höher der interne Zinssatz ist, umso rentabler wird die Investition. Auch für die Berechnung des internen Zinssatzes sind gleiche Nutzungsdauern jedoch Voraussetzung. [30]

$$C = 0 \rightarrow i = IRR \quad (5.3)$$

*C*...Kapitalwert

*i*...kalkulatorischer Zinssatz

*IRR*...interner Zinssatz [%]

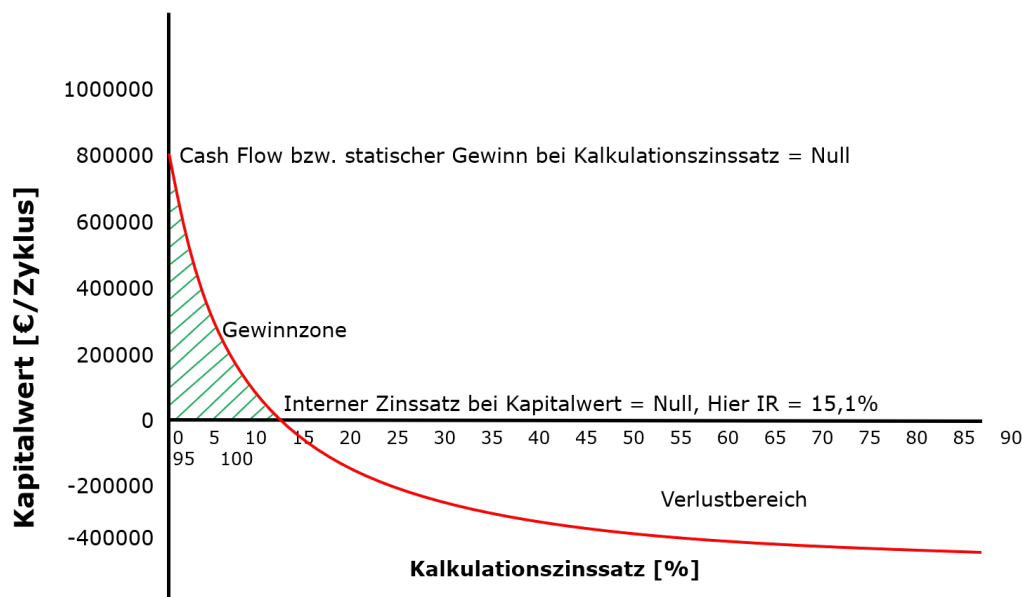


Abbildung 5.3: Methode des internen Zinssatzes (Quelle: eigene Darstellung nach [30])

### 5.1.3 Annuitätenmethode

Die Annuitätenmethode stellt die einzige dynamische Wirtschaftlichkeitsbewertung dar, die von der Nutzungsdauer unabhängig ist. Die Annuität berechnet auf Basis des Kapitalwerts die durchschnittlichen jährlichen dynamischen Kosten bzw. den Gewinn. [30] Bei einer generellen Bewertung von Investitionen sollte das Ergebnis einer Annuität einen Gewinn darstellen und damit eine möglichst hohe positive Zahl ergeben. Die Bewertung von Infrastrukturanlagen der Bahn stellt dabei einen Spezialfall dar, da den Investitionen keine Erlöse gegenüberstehen. Infolgedessen ist es nicht möglich, einen Gewinn zu berechnen, sondern ausschließlich die über die Nutzungsdauer entstehenden durchschnittlichen dynamischen Kosten. Somit werden bei der Bewertung von Eisenbahninfrastrukturanlagen möglichst geringe Annuitäten angestrebt.

$$A = KWF \cdot C \quad (5.4)$$

$$KWF = (1 + i)^t \cdot \frac{i}{(1 + i)^t - 1} \quad (5.5)$$

*A*...Annuität  
*C*...Kapitalwert  
*KWF*...Kapitalwiedergewinnungsfaktor  
*i*...kalkulatorischer Zinssatz [%]  
*t*...Zeit [Jahre]

### 5.1.4 Annuität vs. Kosten

Wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben, dient die Annuität zur wirtschaftlichen Bewertung von Eisenbahninfrastrukturanlagen. Somit können beispielsweise durch einen Annuitätenvergleich Investitions- und Unterhaltsstrategien für die Fahrbahn erstellt werden, da jeweils der wirtschaftlichste Einsatz von Oberbaukomponenten, Unterbausanierungen oder auch Unterhaltsmaßnahmen bewertet werden kann. Den größten Einfluss auf die Annuität hat jedoch die Nutzungsdauer einer Anlage. Lange Nutzungsdauern werden im Bauwesen grundlegend durch langlebige Komponenten und eine gute Ausgangsqualität erreicht. Nicht selten hängt dies zwangsläufig mit den Herstellungskosten zusammen. So kann als Ergebnis von Wirtschaftlichkeitsrechnungen der SBB [94] und der ÖBB [91] zusammenfassend gesagt werden, dass auch teure Umbaumaßnahmen, wie beispielsweise eine teure Unterbausanierung, ab einer gewissen Belastungsgrenze zu einer niedrigeren Annuität führen als günstigere Umbauverfahren, die einen schlechteren Unterbauzustand zur Folge haben. Dies führt jedoch in einem betriebswirtschaftlich geführten Unternehmen bei der Einführung einer wirtschaftlich optimierten Strategie zu einem komplexen Finanzierungseingpass. Dies erklärt sich aus dem Zusammenhang, dass die Annuität zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit die Kosten auf gleichmäßige Jahresscheiben über die Nutzungsdauer verteilt. Der wirtschaftlichen Bewertung steht jedoch eine reale Finanzierung gegenüber, die keine jährlichen Jahresscheiben einer Investition zu erwarten hat. Für die hohen Anfangsinvestitionen, die in weiterer Folge niedrigere Kosten generieren, muss somit die Finanzierung sichergestellt werden. Bei einer staatlich finanzierten Bahn sollte somit das Bewusstsein geschaffen werden, dass ein Lebenszykluskosten (LCC)-optimierter Umbau höhere Kosten verursacht als ein nicht wirtschaftlich optimaler Umbau eines Gleises. Über die Jahre sinken trotz höheren Investitionskosten jedoch die jährlichen Kosten für die Erneuerung, da die Bedarfsmenge durch die längeren Nutzungsdauern reduziert wird.

Dieses gegensätzliche Verhalten – dass hohe Kosten grundsätzlich zu einer gesteigerten Wirtschaftlichkeit führen – ist Auslöser für häufige Fehlfinanzierungen in der Infrastruktur. Nur selten wird der Blick in die Zukunft gewagt und das Bewusstsein geschaffen, dass eine Reduktion von Kosten – sofern sie nicht einer

realen Effizienzsteigerung entsprechen – zu einer Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit führen.

## 5.2 Nutzungsdauer

Die „Nutzungsdauer“ oder auch „Lebensdauer“ einer Anlage ist ein Begriff, der meist intuitiv interpretiert wird, da die Definition trivial scheint und sich aus dem natürlichen Sprachgebrauch ergibt. Dies führt jedoch dazu, dass beim Vergleich von Nutzungsdauern meist vernachlässigt wird, wie eine Nutzungsdauer erreicht wurde. Wenn also Unterhaltsstrategien oder auch der finanzielle Bedarf von EIUs verglichen werden, so ist es unabdingbar, zu hinterfragen, wie und aus welchem Grund eine Nutzungsdauer angestrebt wird. In dieser Arbeit soll eine klare Definition der bestehenden Methoden zur Erreichung einer Nutzungsdauer eingeführt werden, um Vergleiche zwischen unterschiedlichen EIUs zu ermöglichen.

### 5.2.1 Buchhalterische Nutzungsdauer

Die buchhalterische Nutzungsdauer oder Abschreibungsdauer einer Anlage ist jene Nutzungsdauer, die von der Steuerverwaltung oder der Unternehmung selbst für eine Anlage festgelegt wird. Mit dieser Nutzungsdauer geht eine Anlage in die Bilanz der Unternehmung ein. Die buchhalterische Nutzungsdauer ist somit eine rechnerische Größe, die nicht zwangsläufig mit der real erreichten Nutzungsdauer (siehe Abschnitt 5.2.5) verknüpft ist. Diese Nutzungsdauer bildet die Grundlage für die Absetzung für Abnutzung (AfA) und verteilt die Investitionskosten auf diese vorgegebene theoretische Nutzungsdauer. Meist wird die buchhalterische Nutzungsdauer reglementarisch geregelt.

Die buchhalterische Nutzungsdauer sollte so gut wie möglich der real erreichten Nutzungsdauer entsprechen und damit regelmäßig an die Parameter eines Eisenbahnnetzes, die die Nutzungsdauer der Anlagen verändern, angepasst werden. Keinesfalls jedoch darf versucht werden, die reale Nutzungsdauer an die buchhalterische Nutzungsdauer anzupassen. Bereits im Jahr 2013 konnte Bauer in einer Masterarbeit zu Langsamfahrstellen im Netz der ÖBB [2] zeigen, dass eine Langsamfahrstelle dazu verwendet wird, um die vorgegebene buchhalterische Nutzungsdauer einer Anlage zu erreichen. Dies ist zwar der Bilanz dienlich, verursacht jedoch – im Beispiel der Langsamfahrstellen – eine geringere Verfügbarkeit des Netzes und erhöhte Kosten. Bei anderen EIUs, wie beispielsweise der SBB, wird der Fokus auf die Verfügbarkeit gelegt. Die reale Nutzungsdauer wird in diesem Fall nicht durch Langsamfahrstellen, sondern durch teure Instandsetzungsmaßnahmen über die wirtschaftliche Nutzungsdauer hinaus verlängert. Das Erreichen der buchhalterischen Nutzungsdauer ist bei der SBB kein Entscheidungskriterium

für die Erneuerung.

Wird die buchhalterische Nutzungsdauer als Referenz der Bewertung von Infrastrukturanlagen herangezogen, so muss beachtet werden, dass die buchhalterische Nutzungsdauer ausschließlich einen Effekt auf den Konzerngewinn hat und keinen auf die Berechnung des Cashflows. Dies begründet sich durch die staatlichen Subventionen in die Infrastruktur und das damit einhergehende Verbot, Gewinn zu machen. Real fließt somit kein zusätzliches Geld, was eine Optimierung der Anlage auf die buchhalterische Nutzungsdauer als sinnlos erscheinen lässt. Eine Optimierung der buchhalterischen Nutzungsdauer auf die reale Nutzungsdauer ist jedoch von großer Bedeutung, um das Konzernergebnis möglichst realitätsnah darzustellen.

### 5.2.2 Technische Nutzungsdauer

Die technische Nutzungsdauer ist jene Nutzungsdauer, die ein Produkt technisch erreichen kann. Anders als bei der buchhalterischen Nutzungsdauer ist die technische Nutzungsdauer für einen Anlagentyp nicht immer gleich, sondern spezifisch für jede Anlage und abhängig von Zustand und Substanz. Die technische Nutzungsdauer endet, wenn eine Anlage aus technischen Gründen nicht mehr genutzt werden kann. Bei elektronischen Anlagen ist die technische Nutzungsdauer beispielsweise dann erreicht, wenn die Verfügbarkeit von Ersatzteilen nicht mehr gegeben ist.

Bei der Fahrbahn ist die Definition der technischen Nutzungsdauer deutlich schwieriger. Die technische Nutzungsdauer des Schottergleises ist theoretisch endlos und entspricht einem ständigen Komponentenwechsel. Jede Komponente (Schiene, Schwelle, Schotter und in seltenen Fällen sogar der Unterbau) kann gesondert für sich betrachtet und regelmäßig gewechselt werden. Einige Bahnen (beispielsweise die West Japan Railway Company (JRW)) setzen diese Vorgehensweise strategisch ein. Die Begründung hierfür liegt im Planungshorizont eines EIU. Die langen Nutzungsdauern von Gleisen führen zu einem Planungshorizont von 30 bis 100 Jahren. In Europa sind die EIUs großteils staatlich finanziert, was solch einen langen Planungshorizont zulässt und wünschenswert ist, um die Gesamtkosten auch noch für nachfolgende Generationen möglichst niedrig zu halten. Ist ein EIU gewinnorientiert aufgestellt, dann bedeutet eine so lange und hohe Kapitalbindung ein zu großes Risiko. Somit wird versucht, große Investitionen zu vermeiden, zumal eine Nutzung über mehrere Jahrzehnte nicht garantiert ist.

Bei der festen Fahrbahn fällt es deutlich leichter, das Erreichen der technischen Nutzungsdauer zu definieren. Hat die Betonplatte einen Zustand erreicht, in dem die Fahrbahn nicht mehr instandgesetzt werden kann ohne die gesamte Betonplatte zu erneuern, so kommt es aus technischen Gründen zu einer Erneuerung.



### 5.2.3 Wirtschaftliche Nutzungsdauer

Die wirtschaftliche Nutzungsdauer ist jene Nutzungsdauer, die sich auf Basis der Annuitätenmethode, welche im Abschnitt 5.1.3 erläutert wird, als die Nutzungsdauer definiert, bei der das wirtschaftliche Optimum erreicht wird. Sowohl bei einem früheren wie auch einem späteren Ersatz der Anlage kommt es somit zu höheren durchschnittlichen Kosten als bei einem Ersatz nach Erreichen der wirtschaftlichen Nutzungsdauer. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer ist immer kleiner oder gleich der technischen Nutzungsdauer.

Beim Gleis wird die wirtschaftliche Nutzungsdauer durch einen erhöhten Unterhaltsbedarf sowie größere Unterhaltsarbeiten, wie einen Schwellenwechsel oder eine Schotterreinigung, begrenzt. Auch betriebliche Einschränkungen, wie eine Langsamfahrstelle, lösen hohe Betriebserschwerungskosten aus und definieren damit das Ende der wirtschaftlichen Nutzungsdauer.

### 5.2.4 Strategische Nutzungsdauer

Die strategische Nutzungsdauer berechnet sich auf Basis der wirtschaftlichen Nutzungsdauer. Sie wird jedoch meist als Mittelwert für Gleise mit bestimmten Rahmenbedingungen definiert, wie dies in den Standardelementen (siehe Unterkapitel 7.2) der Fall ist. So kann die strategische Nutzungsdauer also von der am Einzelobjekt berechneten wirtschaftlichen Nutzungsdauer abweichen. Im Mittel sollte sie jedoch den wirtschaftlichen Nutzungsdauern der jeweiligen Gleise entsprechen.

### 5.2.5 Reale Nutzungsdauer

Die reale Nutzungsdauer ist die effektiv erreichte Nutzungsdauer eines Gleises, unabhängig davon, warum eine Erneuerung erfolgt. Die reale Nutzungsdauer errechnet sich wie folgt:

$$ND_{real} = a_{Ausbau} - a_{Einbau} \quad (5.6)$$

$ND_{real}$ ...Reale Nutzungsdauer des Gleises [Jahre]  
 $a_{Ausbau}$ ...Ausbaujahr des Gleises  
 $a_{Einbau}$ ...Einbaujahr des Gleises

Dabei ist bei dem Ein- und Ausbaujahr darauf zu achten, dass der rechnerische Zeitpunkt immer auf denselben Tag eines Jahres festgelegt wird. Sollten der Einbau mit dem Jahresbeginn und der Ausbau mit dem Jahresende definiert werden, so ist die Formel 5.6 wie folgt zu erweitern:

$$ND_{real} = a_{Ausbau} - a_{Einbau} + 1 \quad (5.7)$$

## 5.3 Zustand und Substanz

Die Annuität dient der Bewertung von Investitionen im Sinne der Erneuerung oder auch des Unterhalts. Da Infrastrukturanlagen jedoch eine lange reale Nutzungsdauer aufweisen, kann ebenso im Laufe der Nutzungsdauer die Frage nach dem Zustand einer Anlage gestellt werden, um den zukünftigen Mittelbedarf zu erheben. Dabei stellt sich der Begriff des Zustands jedoch als komplexes Konstrukt heraus. Grundlegend gilt es zu bedenken, dass der Begriff des Zustands die Art und Weise beschreibt, wie etwas zu einem bestimmten Zeitpunkt beschaffen ist. Eine rein mathematische Beschreibung des Zustandes eines Gleises fehlt. Von großer Bedeutung ist somit, was der Zustand beschreiben soll – im Falle einer Eisenbahninfrastruktur nämlich den zu erwartenden Substanzerhaltungsbedarf. Der Substanzerhalt wird generell in Erneuerung und Unterhalt getrennt. Erneuerung und Unterhalt können dabei jedoch niemals getrennt voneinander beschrieben werden, da sie zwangsläufig aneinander gekoppelt sind. Vereinfacht gesagt führt zu wenig Unterhalt zu einem erhöhten Erneuerungsbedarf und eine reduzierte Erneuerung zu einem erhöhten Unterhaltsbedarf.

### 5.3.1 Definition von Zustand und Substanz einer Anlage

Der finanzielle Bedarf der Eisenbahninfrastruktur ist immer vom momentanen Zustand einer Anlage abhängig. Um den Finanzbedarf der Infrastruktur zu erklären, haben in den vergangenen Jahren europaweit einige Bahnen damit begonnen, Zustandsberichte in einem regelmäßigen Rhythmus zu veröffentlichen. Damit kam schnell die Frage nach der Definition des Zustands und der Bewertungsmöglichkeiten des Zustandes auf.

Der Zustand selbst ist dabei nur eine der beiden Größen, die es zu beachten gilt. Der momentane Zustand einer Anlage kann unabhängig vom Alter gut oder schlecht sein, entspricht immer einer Momentaufnahme und hängt von der Intensität und der Qualität des Unterhalts ab. Ein sehr altes Gleisnetz kann mit entsprechend intensivem Unterhalt immer in einem guten Zustand gehalten werden. Genauso kann ein sehr neues Gleis ohne entsprechenden Unterhalt nach einigen Jahren in einem schlechten Zustand sein. Dies zeigt schnell, dass ein wichtiger Parameter fehlt: die Substanz einer Anlage.

Beim Neubau einer Anlage wird mit der Ausbauqualität bereits die Substanz festgelegt. Hierüber wird die erreichbare Nutzungsdauer – abhängig vom Unterhalt – definiert. Der Zustand sollte zu Beginn der Nutzungsdauer immer dem Höchstwert entsprechen. Über die Zeit erfährt die Anlage eine entsprechende Beanspruchung. Diese Beanspruchung löst über den Verschleiß eine Verschlechterung des Zustands aus. Die Grenze der Verschlechterung ist dabei über Sicherheitsgrenzwerte definiert. Diese Grenzwerte garantieren den sicheren Betrieb von Gleisanlagen. Bei einer Überschreitung wird eine entsprechende Unterhaltsmaßnahme ausgelöst, durch die der Zustand wieder angehoben wird. [34]

Der Zustand stellt somit die momentane Funktionalität eines Gleises dar. Er wird über Messwerte wie die Längshöhe oder die Spurweite kontrolliert. Ein mathematisches Zusammenführen dieser Messgrößen wurde in der Vergangenheit immer wieder über Gleislagenoten versucht. Diese erfüllen jedoch niemals den Anspruch der Vollständigkeit einer Zustandsnote, da nicht alle Komponenten eine messtechnische Zustandserfassung erfahren.

Die Substanz bildet das Zeitintervall bis zur nächsten Erneuerung ab. Die Substanz lässt sich über die Nutzungsdauer beschreiben. Dies begründet sich in der generellen Abnutzung der einzelnen Komponenten über die Zeit.

Die deutsche Sprache ist zur Bezeichnung dieses Zusammenhangs denkbar ungeeignet, da die Kombination aus „Zustand“ und „Substanz“ immer den Gesamtzustand der Anlage ergibt und so wird das Wort „Zustand“ beide Male in zwei unterschiedlichen Definitionen angewandt – ein Umstand, der die Definition zusätzlich verkompliziert. Die englische Sprache bietet dabei den Vorteil, zwischen den Begriffen „condition“ und „technical state“ zu unterscheiden, wobei „condition“ hierbei für den Begriff „Gesamtzustand“ als Kombination aus „Zustand“ (technical state) und „Substanz“ (substance) verstanden wird. [88]

Abbildung 5.4 stellt genau diesen Zusammenhang zwischen „Zustand“ (state) und „Substanz“ (substance) dar. Abgebildet ist der Einfluss, den der Unterhalt bzw. die laufenden Kosten (OPEX) auf den Zustand haben sowie die Erneuerung (CAPEX) auf die Substanz. Zusätzlich können der Zustand und die Substanz nicht

getrennt voneinander betrachtet werden, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Einen ebenfalls bedeutenden Einfluss übt natürlich die Beanspruchung und Nutzung der Fahrbahn aus, wie auch Wetter- und andere Umwelteinflüsse den Zustand und die Substanz verändern können.

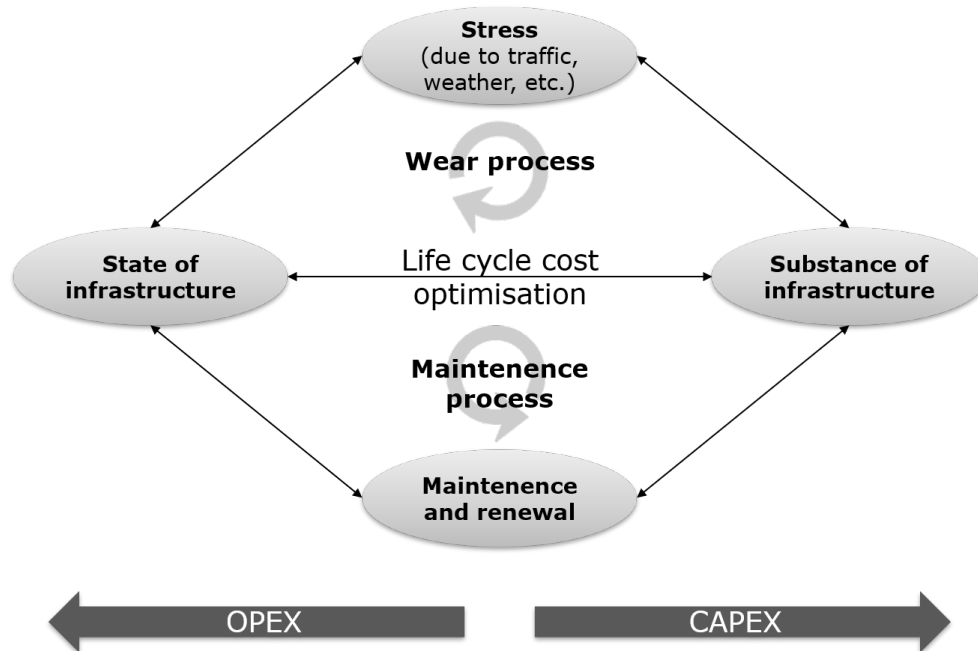


Abbildung 5.4: Zusammenhang zwischen Zustand und Substanz (Quelle: eigene Darstellung nach [21])

Bei einer noch detaillierteren Betrachtung des Zusammenhangs muss mit in Betracht gezogen werden, dass die Zustände der Einzelkomponenten eines Gleises sich gegenseitig beeinflussen, wodurch beispielsweise eine Schiene auf einem neuen Gleis eine längere Nutzungsdauer erreichen kann als auf einem alten Gleis. Mit zunehmender Nutzungsdauer wird die Gleislage instabiler und so erfährt die Schiene auf einem alten Gleis eine stärkere dynamische Beanspruchung. Dies verursacht Schienenfehler, die wiederum eine höhere Dynamik in das Gesamtsystem Gleis einbringen. [34]

Es muss also eine zusätzliche Betrachtungsebene eingeführt werden, welche nicht nur den Zustand und die Substanz eines Gleises, sondern auch die Einzelkomponenten definiert. Während das Gleis sich unter denselben Voraussetzungen und demselben Unterhaltsregime ident verhält, ist dieses Verhalten, bezogen auf die Einzelkomponenten, zusätzlich noch vom Zeitpunkt im Lebenszyklus des gesamten Gleises abhängig.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine getrennte Betrachtung von Zustand und Substanz zu keinem aussagekräftigen Ergebnis führt. Gerade in Anbetracht der Planung der finanziellen Mittel müssen sowohl Zustand als auch Substanz bekannt sein sowie ihre Abhängigkeiten zueinander. [34] Trotz einer Veröffentlichung dieses Zusammenhangs im Jahr 2000 [21] basiert heute kein Netzzustandsbericht einer Bahn auf einem ausgeklügelten mathematischen System, das diesen Zusammenhang abbildet. Ein direktes Ableiten eines langjährigen Unterhalts- oder Erneuerungsbedarfs aus einem Netzzustandsberichtes ist somit nur eingeschränkt möglich.



## 6 Vergleich bestehender Bewertungsmethoden der Eisenbahninfrastruktur

Die Bewertung der Eisenbahninfrastruktur hat in den vergangenen Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Dabei sind die existierenden Bewertungssysteme grundlegend in zwei Kategorien zu trennen. In einem ersten Schritt hat vor allem die relative Bewertung der eigenen Infrastruktur, die durch die Trennung von Infrastruktur und Betrieb sowie die teilweise Privatisierung von Teilen europäischer Bahnen in den Fokus gelangte, eine große Bedeutung. Durch die Umstrukturierungen wurde es nötig, zu erkennen, in welchem Zustand sich eine Bahn befindet und wie viele finanzielle Mittel ihr demnach als Subvention zustehen, um die geforderte Leistung zu erbringen. Diese Reports werden in dieser Arbeit generell als Netzzustandsberichte bezeichnet. Die Bezeichnung dafür variiert von Land zu Land, grundlegend handelt es sich jedoch um ein jährliches Berichtswesen gegenüber dem Bund. Die darin geführten Kennzahlen sind weitreichend und aus einer ingenieurwissenschaftlichen Sicht nur sehr selten für den Nachweis des Zustands eines Netzes geeignet. Auch das Ableiten eines Finanzbedarfs aus diesen Kennzahlen ist in den bestehenden Formen definitiv nicht möglich.

In weiterer Folge hat sich, neben dem Bestreben der Informationen über das eigene Eisenbahnnetz, auch ein reger Markt für Benchmarkings entwickelt. Das Mittel des Benchmarks hat sich in den letzten Jahren als entscheidendes Mittel zum Erkennen von Defiziten der unterschiedlichen Bahnen herauskristallisiert. Der informelle Austausch zwischen den Bahnen unterschiedlicher Länder nimmt zu und so wird gerade im Bereich der EIUs eine rege Benchmarkkultur forciert, um herauszufinden, wie die Kosten der Eisenbahninfrastruktur nach dem Vorbild anderer Länder reduziert werden können. Dieser Wille, vom „Besten“ lernen zu wollen, ist zwar lobenswert, stellt sich jedoch als wesentlich komplexere Aufgabe heraus als es im ersten Moment den Anschein hat.

Ende des 20. Jahrhunderts wurde bei den meisten Bahnen der Trend groß, die Kosten drastisch reduzieren zu wollen. In dieser Zeit kamen auch die ersten Benchmarks auf, die sehr schnell suggerierten, dass es Bahnen gibt, die deutlich günstiger agierten als andere. Selbst nach einer Kaufkraftbereinigung und unter Einrechnung der unterschiedlichen Netzstruktur wie auch Verkehrsleistung schien

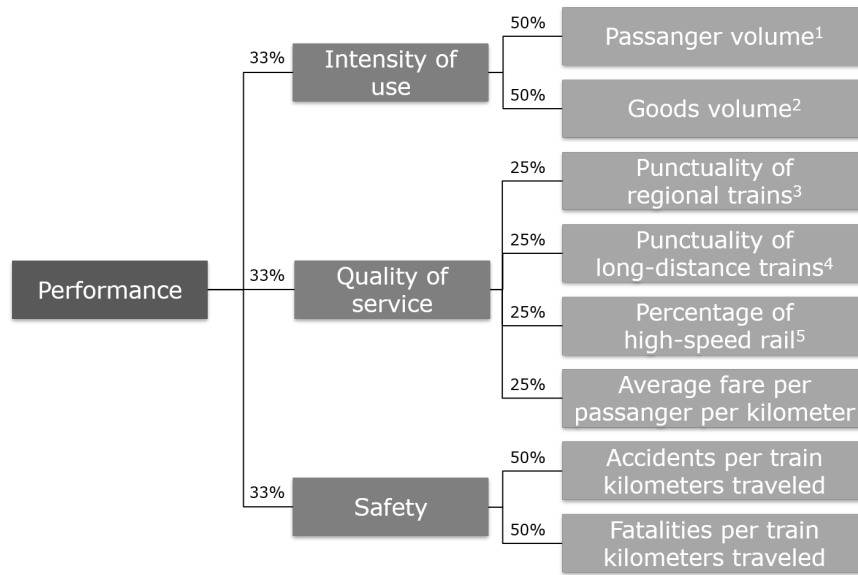
es Bahnen zu geben, die den Bahnbetrieb deutlich wirtschaftlicher gestalten können. Diese trügerische Erkenntnis führte neben dem politischen Druck der Staaten auf die Bahnen noch zu einem internen Druck der Bahnen, sich selbst dafür rechtfertigen zu müssen, warum die eigene Infrastruktur teurer als die anderer Länder ist. Der Trugschluss begründet sich in der Erkenntnis von Karl Marx [55], die bereits im Kapitel 3 ihre Erwähnung fand. Die lange Nutzungsdauer der Infrastruktur macht es möglich, die Substanz der Anlagen über mehrere Jahre auszubeuten. Ein kurzfristiger Benchmark über einige Jahre bietet also im besten Fall ausschließlich eine Momentaufnahme und hat absolut keine Aussagekraft darüber, wie nachhaltig ein EIU wirtschaftet und ob es auch noch 10 oder 20 Jahre später zu denselben Kosten produzieren kann. Schon in den ersten Jahren der Eisenbahn haben sich Eisenbahngesellschaften genau diese Tatsache zu Nutzen gemacht, um große Gewinne abzuschöpfen. Heute – rund 200 Jahre später – hat sich diese Tatsache nur in ihren Rahmenbedingungen verändert. Heute sind es nicht mehr die Großindustriellen, die Gewinne aus Eisenbahnunternehmen abschöpfen. Nicht zu verleugnen ist jedoch, dass die Bonuszahlungen der Managementebene direkt an den Betriebserfolg von Eisenbahnunternehmen geknüpft sind. Dies scheint selbstverständlich im Sinne eines privatwirtschaftlich geführten Unternehmens Sinn zu machen; in Anbetracht der langen Nutzungsdauern, die der Infrastruktur zugrunde liegen, führt dies jedoch zwangsläufig auf Basis des ökonomischen Maximalprinzips dazu, dass der eigene Gewinn maximiert wird und dies ist unweigerlich mit einer Ausbeutung der Infrastruktur verknüpft. Die Folgen dieses Effektes werden durch den Steuerzahler getragen.

Erst durch einen langjährigen Vergleich der Kosten von EIUs zusammen mit der Entwicklung des Zustandes und der erreichten Performance eines Netzes wird es möglich, einen Vergleich aufzustellen und festzustellen, ob das aufgewendete Budget auch dem realen Bedarf entsprach. Im Folgenden sollen einige bereits bestehende Bewertungssysteme für Eisenbahnen vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile aufgezeigt werden.

## 6.1 Railway Performance Index (RPI)

Der Railway Performance Index (RPI) wurde von der BCG - Global Management Consulting entwickelt und bis heute drei Mal veröffentlicht – in den Jahren 2012, 2015 und 2017. Es handelt sich dabei um einen Benchmark von Bahnen, dessen Aufbau bewusst sehr einfach gehalten wurde, um Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. [22] Der Index setzt sich zu gleichen Teilen aus der Netznutzung, der Qualität des Services und der Sicherheit zusammen, wie in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Einfachheit des Indexsystems lässt eine klare Interpretation des Ergebnisses zu. Genaue Begründungen für ein gutes oder schlechtes Abschneiden können durch diesen Index nicht gegeben werden. Beispielsweise werden die Investitionen in





<sup>1</sup>Passanger volume = number of passangers multiplied by kilometers traveled divided by the country's population.  
<sup>2</sup>Goods volume = tons of goods multiplied by kilometers traveled divided by the country's population.  
<sup>3</sup>Punctuality of regional trains = percentage experiencing less than a 5-minute delay.  
<sup>4</sup>Percentage of high-speed rail = share of long-distance traffic (number of passangers multiplied by kilometers traveled).

Abbildung 6.1: Zusammensetzung des Railway Performance Indexes (Quelle: eigene Darstellung nach [22])

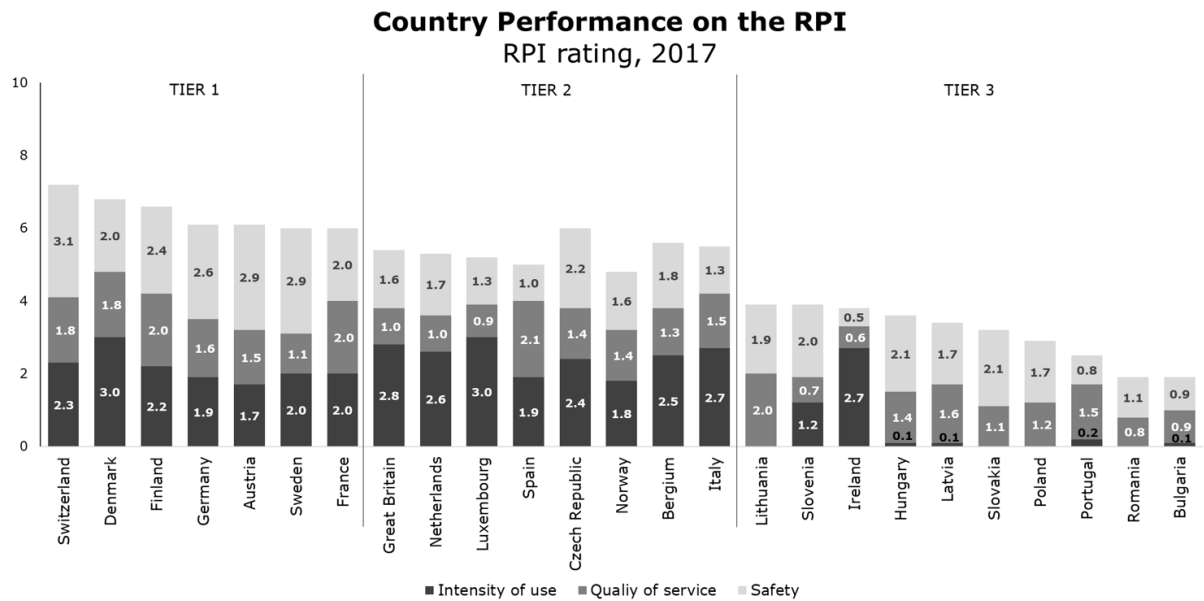


Abbildung 6.2: Railway Performance Index 2017 (Quelle: eigene Darstellung nach [22])

das System als entscheidendes Merkmal für eine Verbesserung des RPIs gesehen. Diese Entwicklung ist durchaus nachvollziehbar, da ein Ausbau des Streckennetzes zwangsläufig zu einer Steigerung der Netznutzung führt. Abbildung 6.2 zeigt das Ergebnis des RPIs aus dem Jahr 2017. Die Bahn der Schweiz wird darin am besten bewertet. Die Entwicklung des Zustandes des Netzes, der sich ausschließlich durch den Substanzerhalt beeinflussen lässt, ist hier nicht ersichtlich. Es wird versucht, die Bewertung des Zustands vor allem durch Netzzustandsberichte zu erreichen, die im folgenden Unterkapitel beschrieben werden.

## 6.2 Netzzustandsberichte

Netzzustandsberichte bilden ein Reporting-Instrument, das vor einigen Jahren in dieser Form entstand. Grundlegend dienen sie in den unterschiedlichsten Ländern dem Bund, als Eigentümer und Geldgeber, und dem EIU als Reporting-Instrument, um aufzuzeigen, ob die eingesetzten Mittel auch den erwarteten Nutzen erzielen. Dieser Nutzen wird im Zustand der Anlagen dargestellt, wobei sich hierbei die Art der Berichterstattung und die Philosophien in den verschiedenen Ländern deutlich unterscheiden.

Wie kann der Zustand einer Infrastruktur bewertet werden? Diese Frage konnte bis heute noch nicht beantwortet werden. In Unterkapitel 5.3 wurde die Komplexität des Zusammenhangs zwischen Zustand und Substanz näher beleuchtet. Hier wurde festgehalten, dass der Zustand durch den Unterhalt und die Substanz durch Erneuerung beeinflusst werden können, wobei sich diese beiden Größen gegenseitig beeinflussen. Werden sowohl Unterhalt als auch Erneuerung vom Bund finanziert, so muss als Größe für ein Reporting sowohl der Zustand als auch die Substanz von Relevanz sein – noch unabhängig davon, wie diese beziffert werden. Als Eigentümer der Infrastruktur muss das Augenmerk, unabhängig von der Finanzierungsform, jedoch auf beiden Größen liegen, da der finanzielle Bedarf in beiden Budgettöpfen voneinander abhängt. Eine Erhöhung der Erneuerungsmenge senkt den Unterhaltsbedarf, eine Reduktion der Erneuerungsmenge lässt ihn jedoch ansteigen. Das optimale Gleichgewicht zwischen den beiden Größen zu finden, ist Aufgabe des strategischen Anlagenmanagements.

In der Schweiz wurde nach dem Netzaudit 2009 [76] der erste Netzzustandsbericht für das Jahr 2009 [56] erstellt. Seit 2009 haben sich nicht nur das optische Erscheinungsbild, sondern auch die Berechnungsgrundlagen deutlich verändert. Mit der Leistungsvereinbarung 2011-2012 [52] wurde die SBB erstmals vertraglich zur Erstellung eines Netzzustandsberichtes verpflichtet. Seither wird der Netzzustandsbericht der SBB jährlich auch öffentlich publiziert. Im Netzzustandsbericht 2010 wird die Bewertungsmethode noch nicht erklärt. Im Netzzustandsbericht 2011 findet sich dafür eine ausführliche Beschreibung des Bewertungssystems

(siehe Abbildung 6.3).

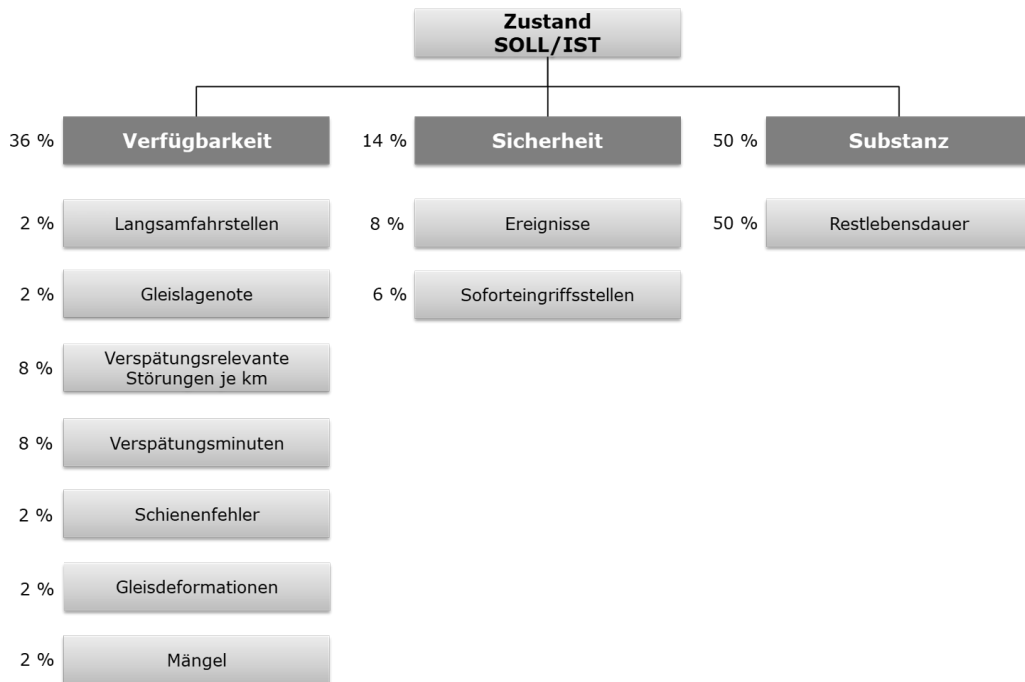


Abbildung 6.3: Bewertungsmethodik Netzzustandsbericht SBB 2011 (Quelle: eigene Darstellung nach [71])

Dabei auffallend ist neben dem Schweizer Benotungssystem von 6 bis 1, dass sich die Note aus den drei Komponenten „Verfügbarkeit“, „Sicherheit“ und „Substanz“ zusammensetzt. Während die Note der „Substanz“ eine klare Zuordnung zu den eingesetzten Mitteln in der Erneuerung erlaubt, fehlt den Noten für „Verfügbarkeit“ und „Sicherheit“ eine eindeutige Zuordnung zu Budgetmitteln. Über die Noten der Verfügbarkeit und Sicherheit wird versucht, den technischen Zustand der Anlagen abzubilden. Durch die komplexe Gewichtung ist allerdings eine Analyse der Veränderung der Note schwierig. Mit dem Jahr 2015 wurden die Minimalanforderungen an die Bewertungsmethode des Netzzustandsberichts für alle Schweizer Bahnen auf eine einheitliche Grundlage im RTE 29900 [95] gestellt. Somit wird die Bewertungsmethodik für den Netzzustand vereinfacht und beruht reglementarisch ausschließlich auf der Restnutzungsdauer einer Anlage, welche der Substanznote des Netzzustandsberichts 2011 entspricht. Die Aussagekraft des Netzzustandsberichts beschränkt sich damit auf die Restnutzungsdauer und lässt einen Rückschluss auf das Investitionsvolumen der Anlagen zu. Zudem wird die Notenskala in das international übliche System von 1 bis 5 umgewandelt, um eine Vergleichbarkeit mit anderen Ländern zu ermöglichen. Auch die Struktur der zu bewertenden Anlagen wird im RTE 29900 festgelegt.

## 6.3 Key Performance Indicators (KPI)

Als „Key Performance Indicators“ werden Unternehmenskennzahlen bezeichnet, die eine Indikation über den Zustand oder die Zielerreichung eines Unternehmens geben. In einem privaten Unternehmen sind die wichtigsten KPIs beispielsweise der Umsatz oder der Gewinn pro Zeiteinheit. Die Zielsetzungen eines staatlich finanzierten Infrastrukturunternehmens liegen jedoch woanders. In der EN 15341 [8] werden KPIs in drei Gruppen aufgeteilt: wirtschaftliche, technische und organisatorische KPIs. Die wirtschaftlichen KPIs beziehen sich grundsätzlich auf die jährlichen Kosten im Substanzerhalt und wie sich diese auf die unterschiedlichen Bereiche (präventiv, kurativ, extern, intern) aufteilen. Die technischen KPIs beziehen sich auf die Themen „Verfügbarkeit“ und „Sicherheit“. Hier wird auf die Außerbetriebszeiten, verursacht durch Unterhalt oder Störungen wie auch die Anzahl der verletzten Personen, Bezug genommen. Die organisatorischen KPIs beziehen sich vor allem auf die geleistete Arbeit pro Person und messen damit die Effizienz im Substanzerhalt. In einem Paper [83] der Technischen Universität in Lulea werden diesen Kennzahlen KPIs über den Zustand der Anlage hinzugefügt, die vor allem aus Messungen resultieren. In der Literatur findet sich somit eine unzählige Menge an KPIs über die Infrastruktur und auch Infrastrukturunternehmen an sich. Was jedoch fehlt, ist ein eindeutiger Zusammenhang und damit eine Steuerungsgröße, um das Unternehmen nachhaltig zu beeinflussen.

In den KPIs spiegelt sich ganz deutlich das Zusammenspiel zwischen Bedarf und eingesetzten Mitteln wider. Die Messung der eingesetzten Mittel alleine gibt keinen Hinweis darauf, ob ausreichend Menge gemacht wurde, um den Bedarf stabil zu halten. Zusätzlich sind Schwankungen des Bedarfs auf Grund der Altersverteilung der Anlagen bei der Infrastruktur vollkommen natürlich und deuten nicht zwangsläufig auf ein falsches Verhalten der Unternehmung hin. Werden nun den eingesetzten Mitteln Zustandsindikatoren gegenübergestellt, so ist dies ein erster Schritt. Auf Grund der langen Reaktionszeiten der Anlage kann es jedoch passieren, dass eine Reaktion erst mehrere Jahre nach dem Fehlverhalten sichtbar wird. Die durchschnittliche Gleislage des Netzes der SBB [70] zeigte beispielsweise bei einer reduzierten Stopfrate eine Reaktionszeit von rund 10 Jahren. Diese verzögerte Reaktion ist von der Höhe der reduzierten Menge wie auch der Verteilung der Menge im Netz abhängig. Bei der Definition von KPIs ist es somit zu empfehlen, eine Auswahl zu treffen, die einen Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang aufzeigt und eine möglichst kurze Reaktionszeit hat. Ein Beispiel dafür wäre die realisierte Schleifmenge und das Ausmaß an Schienenfehlern im Netz. Der Zusammenhang ist eindeutig, jedoch beträgt auch hier die Reaktionszeit ein paar Jahre, abhängig von der Beanspruchung des Netzes. Die Betrachtung von KPIs in einer Zeitreihe ist somit eine wichtige Voraussetzung, um Fehler in der Unterhaltsstrategie erkennen zu können.

Für einen internationalen Benchmark sind solch komplexe Wirkungszusammen-

hänge nur selten geeignet. Hierfür werden meist stark aggregierte Kennzahlen herangezogen, die zwar erkennen lassen, wo ein EIU starke Unterschiede zu anderen aufweist, um jedoch aus diesen Erkenntnissen ein effektives Verbesserungspotenzial ableiten zu können, bedarf es einer deutlich detaillierteren Betrachtung des Netzes an sich wie auch der Kenntnis über die genaue Zusammensetzung der Kennzahlen. Die benötigte Schleifrate eines Netzes ist beispielsweise von der Unterhaltsstrategie, der Nutzung des Netzes, dem eingesetzten Material, den Grenzwerten, den Kosten, der Altersstruktur, den Radien und Steigungen im Netz, vom Fahrplankonzept und damit der benötigten Traktion, von den Geschwindigkeiten im Netz und der Abtragungstiefe bei jedem Schleifvorgang abhängig. Eine vereinfachte Betrachtung der geschliffenen Kilometer pro Gleiskilometer gibt somit keinen Aufschluss darüber, ob die Schleifmenge korrekt angesetzt wurde. Bestätigt werden konnte diese Theorie im Rahmen der DACH Arbeitsgruppe Fahrwegtechnik bei einem Benchmark zum Thema Gleisinstandsetzung [18]. Diese Arbeitsgruppe ging den Kennzahlen zu Stopf-, Schleif- und Schienenwechselraten auf den Grund und sowohl die dabei entstehenden Kosten in den jeweiligen Ländern wie auch der Unterschied in der Entstehung der Mengen wurde aufgezeigt. Es wurde deutlich, dass ein Mengenvergleich nicht weit genug reicht, um nachzuvollziehen wie gut oder schlecht die Substanzerhaltungsstrategie einer Bahn ist. Trotzdem gibt es mehrere Benchmarks, die versuchen, sich mit diesem Thema zu befassen. Als einer der am längsten andauernden Benchmarks wird im Folgenden auf den Lasting Infrastructure Cost Benchmarking (LICB) der Union internationale des chemins de fer (UIC) eingegangen.

## 6.4 Lasting Infrastructure Cost Benchmarking (LICB)

Das UIC Projekt LICB [87] ist ein Projekt, das seit mittlerweile 20 Jahren die Kosten von unterschiedlichen EIUs – vorrangig in Europa – vergleicht. Dieser lange Betrachtungszeitraum macht es möglich, von einer punktuellen Betrachtung eines einzelnen Jahres wegzukommen und die Entwicklung der Kosten über die Zeit darzustellen. Dabei ist zu beachten, dass ein Vergleich der EIUs untereinander, wie in Unterkapitel 6.3 angeführt, irreführend sein kann.

Die Wichtigkeit einer langjährigen Zeitreihe zeigt sich anhand der Abbildungen 6.4 und 6.5. Zu erkennen ist die normalisierte Netznutzung aus dem Projekt LICB für das Jahr 2010 in Abbildung 6.4. Die Normalisierung bedeutet, dass versucht wurde, die Netze vergleichbarer zu machen, indem die Weichendichten, die Anteile an zweigleisigen Strecken, die Elektrifizierungsgrade etc. des Netzes berücksichtigt wurden. [86] Die an dem Projekt teilnehmenden Bahnen wurden mit einer Codierung versehen. In Abbildung 6.5 sind die durchschnittlichen nor-

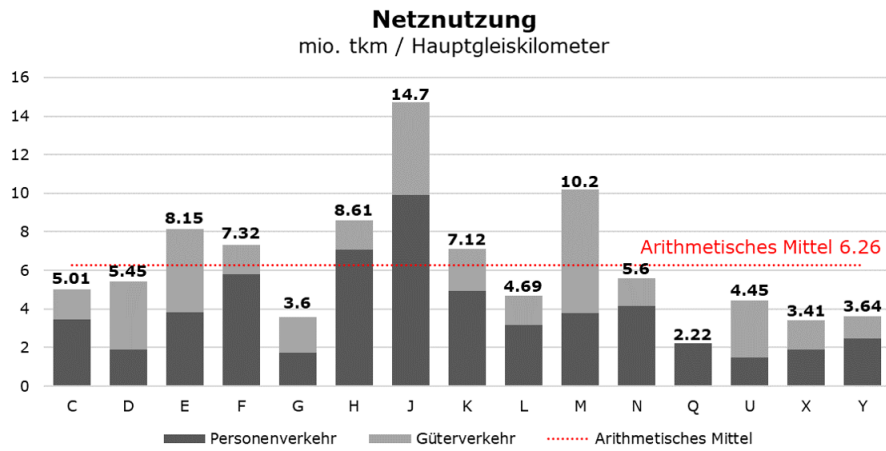


Abbildung 6.4: Vergleich der jährlichen Netznutzung, Daten 2010 (Quelle: eigene Darstellung nach [31])

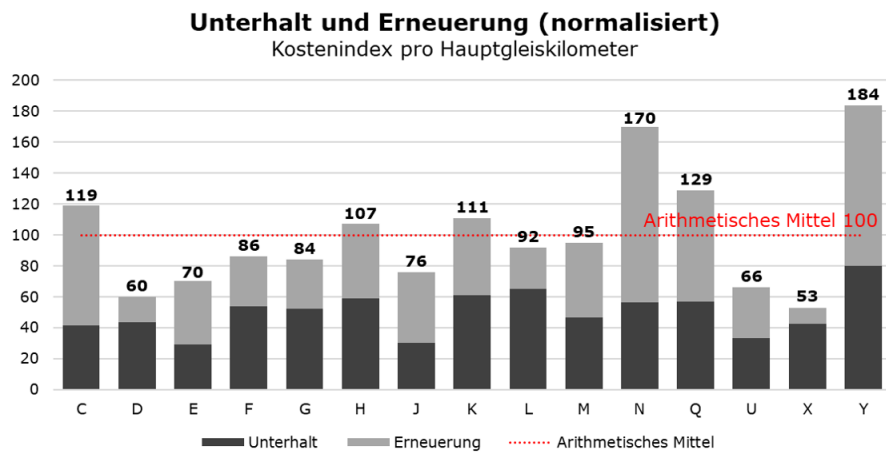


Abbildung 6.5: Normalisierte Kostenindizes für Unterhalt und Erneuerung (Quelle: eigene Darstellung nach [31])

malisierten Kosten für den Unterhalt und die Erneuerung der Jahre 1996 bis 2010 dargestellt. Bei einer Gegenüberstellung der beiden Abbildungen für die Bahn J wird schnell ersichtlich, dass die Bahn mit der höchsten Netznutzung dies zu relativ niedrigen Kosten realisieren kann. Im Gegensatz dazu weist Bahn Q eine im Vergleich sehr niedrige Netznutzung auf. Im Kostenvergleich hat die Bahn Q jedoch die dritthöchsten jährlichen Kosten. Dieser Vergleich scheint im ersten Moment vollkommen im Gegensatz zur bestehenden Logik. Ein stark genutztes Eisenbahnnetz benötigt auf Grund des gesteigerten Verschleißes zusätzlichen Unterhalt und eine erhöhte Erneuerungsrate, was gesteigerte Kosten bedingt. Die Auswertung des LICBs könnte jedoch genau das Gegenteil suggerieren. Die Gründe für diesen Eindruck sind vielfältig. Einerseits weist die Eisenbahn in ihren Grundprinzipien einen sehr hohen Anteil an Fixkosten auf. Durch die Fixkostenumlage auf die produzierte Einheit sinken bei einer steigenden Produktion die Stückkosten. Somit kann eine Bahn mit einer hohen Netznutzung zwangsläufig pro Stück günstiger produzieren. Ein weiterer Grund ergibt sich aus dem gewählten Betrachtungszeitraum und der Unterscheidung zwischen Bedarf und investierten Kosten, auf welche in Kapitel 7 näher eingegangen wird.





## 7 Die Ermittlung des Substanzerhaltungsbedarfs

Die Kenntnis über den Substanzerhaltungsbedarf einer Anlage ist eine Grundvoraussetzung, um eine Anlage überhaupt managen zu können. Auf dem ermittelten Mengenbedarf aufbauend kann der Kostenbedarf errechnet werden. Bei der Ermittlung des Bedarfs – unabhängig davon, ob es der Mengenbedarf oder der finanzielle Bedarf ist – werden grundlegend zwei Ansätze unterschieden: Sie kann über eine Top-down-Methode aus der Vergangenheit abgeleitet oder ingenieurmäßig von Grund auf mit einer Bottom-up-Methode berechnet werden. Die Meinungen darüber, welcher Ansatz zum richtigen Ergebnis führt, sind dabei sehr unterschiedlich. Der Schriftenreihe Umwelt-Recht-Gesellschaft mit dem Titel „Die Zukunft der Bahn“ [25] ist zu entnehmen, dass die Top-down-Analyse grundsätzliche Vorteile bietet, während die Bottom-up-Methode deutliche Probleme aufweist und die Realität nur schwer abzubilden vermag. Aus Sicht der Fahrbahn soll auf die Vor- und Nachteile dieser beiden Methoden eingegangen werden und aufgezeigt werden, dass vor allem die Top-down-Methode in der heutigen allgemeinen Situation der Bahnen einen gravierenden blinden Fleck aufweist, der der langen Nutzungsdauer von Infrastrukturanlagen geschuldet ist.

Die Ermittlung des Bedarfs der Fahrbahn ist keineswegs trivial, da dieser durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst wird, auf die in weiterer Folge vertieft eingegangen wird. Unabhängig von der Wahl des Ermittlungsverfahrens ist es von großer Bedeutung, über die großen Treiber des Bedarfs Bescheid zu wissen. Das Bewusstsein über die Einflussfaktoren ermöglicht es erst, eine Abschätzung der Treffergenauigkeit zu wagen. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Substanzerhaltungsbedarf der Fahrbahn sind

- die Belastung bzw. Beanspruchung der Fahrbahn,
- die Schwellenart,
- das Schienenprofil und die Schienenstahlgüte,
- der Unterbau,
- der Radius,
- die Erneuerungs- und Unterhaltsstrategie,

- die Altersverteilung der Anlagen,
- der historische Substanzerhalt,
- die durchschnittliche Baulänge,
- der Traktionseintrag,
- die Geschwindigkeit und
- die Längsneigung.

Die ersten fünf Einflussfaktoren können dabei hinreichend gut über Modelle, wie das Modell der Standardelemente [94], beschrieben werden. Dieses Modell dient in dieser Arbeit in weiterer Folge auch als Basis, um den Substanzerhaltungsbedarf, ausgehend von einem eingeschwungenen Netz in einem guten Zustand, zu beschreiben. Der Einfluss der Altersverteilung der Anlagen kann heute über aufwendige Prognosemodelle dargestellt werden. Das Prognosemodell der SBB von Winklehner [100] basiert ebenso auf den Standardelementen und berechnet den Einfluss der Erneuerungsstrategie und damit den Einfluss der Wahl unterschiedlicher Komponenten über die Jahre. Heute noch nicht darstellbar ist jedoch der Effekt der Wahl des Erneuerungszeitpunktes im Rahmen einer Erneuerungsstrategie. Der Einfluss verschiedener Unterhaltsstrategien kann heute ebenso schlecht aufgezeigt werden wie der Effekt des historischen Substanzerhalts. Ebenso haben die Erneuerungs- und die Unterhaltsstrategie Einfluss auf die ausgeführten Längen, was den Bedarf ebenfalls mitbeeinflusst. Diesen fehlenden Einflussparametern soll mit dieser Arbeit etwas näher gekommen werden.

Die große Anzahl an Einflussparametern zeigt, dass der Bedarf der Fahrbahn kein statischer, jährlich wiederkehrender Wert ist. Der Bedarf der Fahrbahn ist natürlichen Schwankungen unterlegen sowie aktiv beeinflussbar. Ein EIU ab einer gewissen Netzgröße hat zudem großes Interesse daran, eine jährlich gleich bleibende Substanzerhaltungsquote zu realisieren. Dies begründet sich durch die bestehenden Rahmenbedingungen: Einerseits ist die Finanzierung durch den Bund über eine gewisse zeitliche Periode stabil, andererseits ist aus logistischer Sicht eine schwankende Substanzerhaltungsmenge nicht anzustreben, da derartige Schwankungen zu erhöhten Kosten führen würden – beispielsweise durch Gleisbaumaschinen, welche meist über mehrere Jahre für ein fixiertes Kontingent eingemietet werden. Kann dieses Kontingent nicht ausgenutzt werden, so verteilen sich die Fixkosten auf eine geringere Anzahl von Schichten oder Gleiskilometern (abhängig von der vertraglichen Regelung), was gesamtheitlich die Kosten für den Substanzerhalt erhöht. Neben dem Einfluss durch die Fixkosten wie für die Gleisbaumaschinen kann eine schwankende Substanzerhaltungsmenge zusätzlich aus Ressourcen Gründen (Personal, Verfügbarkeit Material, Intervalle ...) entweder nicht oder nur zu sehr hohen Kosten ausgeführt werden, da die Ressourcen meist fremdbeschafft

werden müssen und zusätzlich zu den bestehenden Verträgen anfallen.

In einem eingeschwungenen System führt diese Tatsache dazu, dass Abschnitte entweder ein paar Jahre zu früh oder zu spät erneuert werden. In beiden Fällen führt dies zu einer Erhöhung der Annuität des jeweiligen Gleisabschnittes. In den folgenden beiden Unterkapiteln 7.1 und 7.2 werden die beiden Ansätze zur Ermittlung des Substanzerhaltungsbedarfs (Top-down und Bottom-up) detailliert vorgestellt. Im Rahmen der Bottom-up-Methode werden zudem die finanziellen Auswirkungen der verschiedenen Einflussparameter beleuchtet.

## 7.1 Top-down-Ermittlung des Substanzerhaltungsbedarfs

Neben detaillierten Modellen zur Berechnung des Substanzerhaltungsbedarfs, wie dem Modell der Standardelemente [94] bei der SBB, kann der Substanzerhaltungsbedarf in einem ersten Schritt auch überschlägig berechnet werden. Diese Methode findet ihre Anwendung, wenn kein Modell für den spezifischen Substanzerhalt von Gleisen und Weichen zur Verfügung steht. Es kann somit eine vereinfachte Berechnung über netzweit gültige Aussagen gemacht werden. Hierzu ist ausschließlich die Netzlänge sowie die Kenntnis über die durchschnittliche Nutzungsdauer nötig. Diese Berechnung der Erneuerungsquote erfolgt wie in Formel 7.1 gezeigt durch die Division der Gleislänge des Netzes durch die durchschnittliche Nutzungsdauer der Fahrbahn in Jahren. Bei einer Gleislänge inklusive Weichen von 10.000 km und einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 40 Jahren ergibt sich nach Formel 7.1 damit eine Erneuerungsquote von 250 km pro Jahr. Bei Kenntnis über einen durchschnittlichen Schleif- oder Stopfzyklus erfolgt die Berechnung des Unterhaltsbedarfs auf dieselbe Weise, jedoch wird die durchschnittliche Nutzungsdauer durch den durchschnittlichen Schleif- oder Stopfzyklus, wie in Formel 7.2 gezeigt, ersetzt.

$$\frac{L_{Netz}}{\emptyset ND_{FB}} = \emptyset Erneuerung_{Netz} \quad (7.1)$$

$L_{Netz}$ ...Gleislänge des Netzes (inkl. Weichenlänge) [km]  
 $\emptyset ND_{FB}$ ...durchschnittliche Nutzungsdauer der Fahrbahn [a]  
 $\emptyset Erneuerung_{Netz}$ ...jährliche Erneuerungsquote [km/a]

$$\frac{L_{Netz}}{\emptyset Zyklus_{Unterhalt}} = \emptyset Unterhalt_{FB} \quad (7.2)$$

- $L_{Netz}$ ...Gleislänge des Netzes (inkl. Weichenlänge) [km]  
 $\emptyset Zyklus_{Unterhalt}$ ...durchschnittlicher Unterhaltszyklus der Fahrbahn [a]  
 $\emptyset Unterhalt_{FB}$ ...jährliche Unterhaltsquote [km/a]

Die durchschnittliche Nutzungsdauer der Fahrbahn kann dabei anhand von spezifischen Nutzungsdauern von Gleisabschnitten erfolgen oder über eine netzweite Analyse. Bei vielen EIUs erfolgt die Ermittlung der zu erwartenden Nutzungsdauer über die Bewertung von Anlagenverantwortlichen, die eine gute Kenntnis über den Zustand des Gleises haben, vor Ort. Ist die Nutzungsdauer pro Abschnitt bekannt, so errechnet sich die Nutzungsdauer dabei aus der gewichteten Hochrechnung der spezifischen Nutzungsdauern jedes Gleisabschnittes im Netz laut Winklehner [101] nach Formel 7.3.

$$\emptyset ND_{Netz} = \frac{\sum_{i=1}^n ND_i \cdot Gewicht_i}{\sum_{i=1}^n Gewicht_i} \quad (7.3)$$

- $\emptyset ND_{Netz}$ ...durchschnittliche Nutzungsdauer des Netzes [a]  
 $ND_i$ ...Nutzungsdauer eines Fahrbahnabschnittes [a]  
 $Gewicht_i$ ...reale oder finanzielle Länge Gleis und/oder Weichen

Bei der Erhebung der durchschnittlichen Nutzungsdauer wie auch den durchschnittlichen Unterhaltszyklen ist darauf zu achten, den Bedarf nicht den historischen Werten gleichzusetzen. Über einen Blick in die Vergangenheit kann niemals der reale Bedarf einer Anlage betrachtet werden. Die realisierte Nutzungsdauer ist sehr stark vom verfügbaren Budget abhängig und nicht vom wirtschaftlichen Bedarf. Damit bildet eine Analyse der in der Vergangenheit realisierten Nutzungsdauern ausschließlich ab, wie viele Mittel für eine Anlage aufgewendet wurden. Ob diese Mittel aus wirtschaftlicher Sicht tatsächlich benötigt wurden oder sogar zusätzliche Mittel benötigt gewesen wären, kann nur über einen Zeithorizont von Jahrzehnten erkannt werden. Der Nachweis, ob diese Aufwendungen dem wirtschaftlichen Bedarf entsprochen haben oder nicht, bleibt somit aus. Ein Unterschreiten des Bedarfs wird zumindest nach mehreren Jahren durch eine Verschlechterung des Zustands erkennbar. Ein Überschreiten des Bedarfs ist jedoch nicht erkennbar. So ist es empfehlenswert, nicht auf Grund der Historie auf den Bedarf einer Anlage zu schließen. Dies kann ausschließlich in Zusammenhang mit langjährigen Qualitätskennziffern erfolgen, die die Wirkung von Substanzerhaltungsmengen zeigen.

Nach der Ermittlung der Bedarfsmenge ist der nächste Schritt die Ermittlung der benötigten finanziellen Mittel. In einer ersten Näherung kann dies durch die Multiplikation der Mengen mit den durchschnittlichen Kosten der jeweiligen Substanzerhaltungsmaßnahme erfolgen. Die durchschnittlichen Kosten werden als Einheitskosten bezeichnet. Die Erneuerungskosten einer Weiche sind, bezogen auf ihre reale Länge, deutlich höher als die Erneuerungskosten eines Gleises. Es besteht also die Möglichkeit, getrennte Einheitskosten für Gleise und Weichen zu erheben oder die Länge der Weichen auf eine finanzielle Länge anzupassen, um denselben Einheitskostensatz wie für die Gleise ansetzen zu können. Durch die Multiplikation der jährlichen Erneuerungsquote mit den Einheitskosten der Fahrbahnerneuerung nach Formel 7.4 errechnet sich überschlägig das jährlich benötigte Erneuerungsbudget. Die Berechnung des Unterhaltsbudgets erfolgt adäquat.

$$\emptyset \text{ Erneuerung}_{FB} \cdot EhK_{FbE} = IR_{FB} \quad (7.4)$$

$$\begin{aligned} \emptyset \text{ Erneuerung}_{FB} &\dots \text{jährliche Erneuerungsquote [km/a]} \\ EhK_{FbE} &\dots \text{Einheitskosten Fahrbahnerneuerung [CHF]} \\ IR_{FB} &\dots \text{jährliches Erneuerungsbudget [CHF/a]} \end{aligned}$$

Bei diesem Ansatz über Einheitskosten ist, wie bei der Ermittlung der Bedarfsmenge, mit etwaigen Schwankungen der Einheitskosten zu rechnen. Diese Schwankungen ergeben sich aus den unterschiedlichen Projektzusammensetzungen pro Jahr. So kann beispielsweise ein hoher Anteil an Weichen oder Unterbausanierungen in einem Jahr zu höheren Einheitskosten für die Fahrbahnerneuerung führen, ebenso kann ein hoher Anteil an Substanzerhalt in hochbelasteten Gleisen auf Grund einer schlechteren Intervallsituation zu erhöhten Kosten führen. Eine ausführliche Betrachtung dieser Zusammenhänge erfolgt in Kapitel 8.

## 7.2 Bottom-up-Ermittlung des Substanzerhalts – Standardelemente

Die Standardelemente dienen der Beschreibung der Lebenszykluskosten eines Gleisabschnittes. Als Voraussetzung dafür beinhalten die Standardelemente den spezifischen Substanzerhaltungsbedarf, welcher für eine Bottom-up-Betrachtung genutzt werden kann. Bei der ÖBB und der SBB sind diese „Standardelemente“ in Verwendung. Sind solche „Standardelemente“ vorhanden, so kann eine Zuordnung der Elemente zu jedem Gleisabschnitt im Netz und daraufhin eine Hochrechnung des Erneuerungs- und Unterhaltsbedarfs erfolgen. Die Hochrechnungen der DB

basieren auf einem ähnlichen Modell, dem 3i-Modell [15]. Dieses unterscheidet sich jedoch darin, dass es Unterhaltungsmengen grundlegend für ganze Strecken angibt und nicht für ein spezifisches Objekt mit definierten Einflussparametern. Grundlegend trennen beide Methoden zwischen Gleis und Weiche. Beim Gleis haben die zwei Modelle folgende Einflussparameter gemeinsam:

- die Trassierung (Radien),
- die Belastung und
- die Bauart der Schwelle.

Die Standardelemente ergänzen diese Parameter noch um:

- die Schienenstahlgüte,
- das Schienenprofil und
- den Unterbau.

Als zusätzlichen Parameter führt das 3i-Modell noch

- die Geschwindigkeit

an.

Die Geschwindigkeit ist im Modell der Standardelemente über die Radienklasse implementiert. Während die Radienklasse im 3i-Modell nur zwischen „ohne“, „schwach“, „mittel“ und „stark“ unterscheidet, wird im Modell der Standardelemente auf den Radius in Metern eingegangen. Mit diesen Parametern erfolgt eine Bedarfserhebung je Parameterset und eine Definition der strategischen Nutzungsdauer. Dabei ist darauf zu achten, welcher Zustand des Netzes bzw. welche Unterhaltsstrategie durch das Modell abgebildet wird. Bei dem Modell der Standardelemente wird grundsätzlich eine Mischung aus der bestehenden Unterhaltsstrategie und dem daraus resultierenden Optimum abgebildet. Das bedeutet, dass ausreichend Unterhalt durchgeführt wird, um die Nutzungsdauer des Gleises zu optimieren. Die Nutzungsdauer des Standardelements ist als strategische Nutzungsdauer ausgearbeitet und endet somit bevor die durchschnittlichen jährlichen Kosten am Ende der Nutzungsdauer durch einen erhöhten Unterhaltsbedarf steigen.

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und zum Vergleich der Standardelemente untereinander dient die Annuität, wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben. Durch die Berechnung der normierten durchschnittlichen jährlichen Kosten erfolgt eine kombinierte Bewertung zwischen Substanzerhaltungsbedarf und damit

erreichbarer Nutzungsdauer. Beide Parameter fließen mit ein und erlauben eine kombinierte Betrachtung. Je niedriger die Annuität, umso wirtschaftlicher stellt sich ein Standardelement dar. Dies erlaubt einerseits die Formulierung einer Erneuerungsstrategie, indem für ein bestimmtes Parameterset die wirtschaftlichste Kombination an Komponenten gewählt werden kann. Andererseits ermöglicht diese Betrachtungsweise den Vergleich von Unterhaltsstrategien, da diese zu jeweils unterschiedlichen Zyklen führen. Die Berechnung der Annuität stellt damit nicht nur Lebenszykluskosten dar, sondern impliziert auch eine gewisse Bedarfsmenge für den Substanzerhalt.

Durch eine Umlegung eines solchen Modells auf das gesamte Netz kann der Substanzerhaltungsbedarf berechnet werden und durch die Multiplikation der Maßnahmen mit den Einheitskosten der jeweiligen Maßnahme ergibt sich der jährliche Budgetbedarf des Netzes unter der Annahme, dass die Unterhaltszyklen auch in der Vergangenheit nach diesem Modell durchgeführt wurden. Eine etwaige Reduktion des Substanzerhalts in der Vergangenheit ist darin nicht zwangsläufig abgebildet.

Bei der Ermittlung des Substanzerhalts für ein Gleisnetz ist die Kenntnis über die Einflussparameter entscheidend. Somit ergibt sich für jedes Gleisnetz ein anderer Substanzerhaltungsbedarf. Der Einfluss dieser Parameter auf den finanziellen Bedarf der Gleise, welcher sich aus den Substanzerhaltungsmaßnahmen berechnet, wird in den nachfolgenden Abschnitten analysiert.

### **7.2.1 Der Einfluss der Belastung**

Die Nutzung der Fahrbahn ist einer der größten Einflussparameter auf den Substanzerhaltungsbedarf der Fahrbahn. Eine Fahrbahn, die keine Belastung erfährt, weist als Bedarf ausschließlich die Errichtung bzw. Investition auf und in weiterer Folge nur in sehr geringem Ausmaß Unterhaltsbedarf, wenn davon ausgegangen wird, dass der Zustand der Fahrbahn auf einem Level gehalten werden muss, damit jederzeit ein Zug das Gleis nutzen könnte. Durch die Nutzung einer Fahrbahn erfahren die Komponenten einen Verschleiß, der durch Unterhaltstätigkeiten behoben werden muss, die jedoch die Annuität der Fahrbahn erhöhen. Zusätzlich reduziert sich bei einer steigenden Belastung auch die Nutzungsdauer der Fahrbahn, ein Effekt, der noch zusätzlich erhöhend auf die Annuität wirkt. In Abbildung 7.1 ist der Einfluss der Belastung auf die Annuität bei einem Zinssatz von 5 % eines Betonschwellengleises mit einer Schiene 60E1 in einem geraden Gleis zu erkennen. Die Auswertung bezieht sich auf die Standardelemente der SBB [95]. Die Gesamtkosten der Fahrbahn erhöhen sich je nach Belastungsklasse bezogen auf die höchste Belastung von > 100.000 GesBt/Tag und Gleis von 72 % auf 100 %.

Festzuhalten ist, dass die Belastung über die Nutzungsdauer nur selten ein

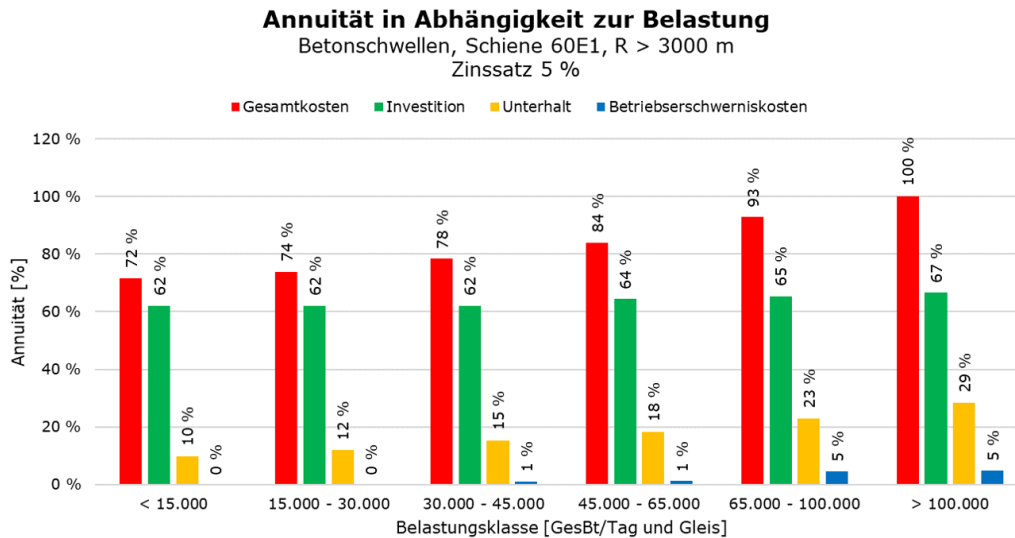


Abbildung 7.1: Einfluss der Belastung auf die Annuität (5 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung)

konstanter Wert ist. In den vergangenen Jahrzehnten stieg die Belastung der Fahrbahn in der Schweiz sowie in vielen europäischen Ländern stark an. Somit ist – sofern diese Daten bekannt sind – eine Betrachtung der kumulierten Belastung über die Nutzungsdauer zu empfehlen. Zudem ist die Belastung ein Bewertungskriterium, das die Einwirkungen in die Fahrbahn zwar hinreichend beschreibt und meist auch verfügbar ist, jedoch bildet sie nicht die gesamte Einwirkung auf die Fahrbahn ab. Die Beanspruchung als Kräfteeintrag in die Fahrbahn wäre eine deutlich genauere Abbildung der Einwirkung. Mit der Beanspruchung kann nicht nur der zusätzliche Einfluss der Geschwindigkeit, sondern auch die Konstruktion des Fahrzeuges abgebildet werden. Dieses System ist in den Verschleißfaktor Fahrbahn SBB [45] eingeflossen. Die Standardelemente zur Berechnung des Substanzerhaltungsbedarfs basieren in der Schweiz jedoch weiterhin auf der Belastung.

## 7.2.2 Der Einfluss der Schwellenart

Neben dem Unterhaltsbedarf definiert sich durch die Schwellenart vor allem die erreichbare Nutzungsdauer. Die Nutzungsdauer ist wiederum ein entscheidendes Kriterium für den Erneuerungsbedarf der Fahrbahn. Während Holzschwellen einer natürlichen Witterung unterliegen sind und diese Schwellenart grundsätzlich auf Grund von Einpressungen, Fäulnis oder fehlender Formstabilität erneuert werden muss, müssen Betonschwellengleise nur selten auf Grund einer defekten Schwelle ersetzt werden. Bei Betonschwellengleisen ist meist der Schotter oder der Unterbau das auslösende Kriterium für eine Erneuerung. Stahlschwellengleise kommen, im



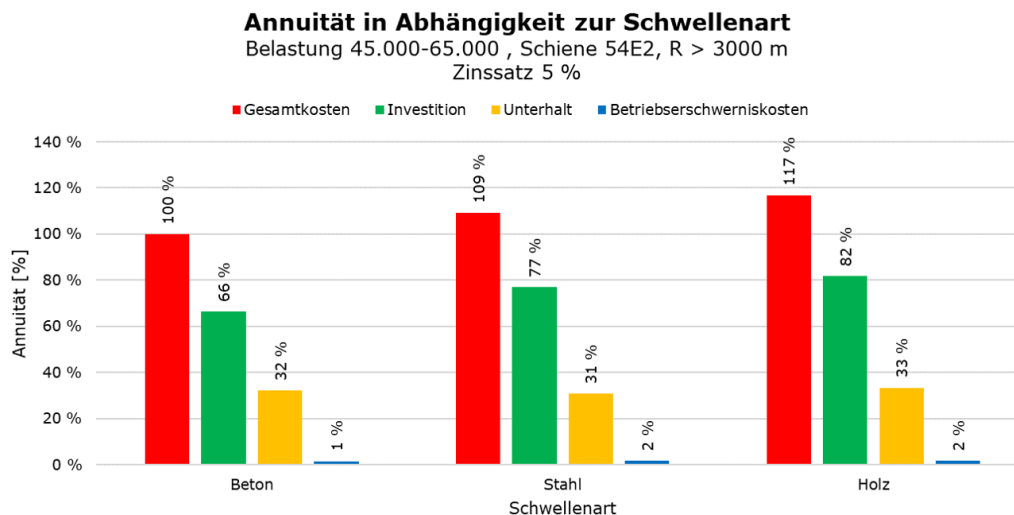


Abbildung 7.2: Einfluss der Schwellenart auf die Annuität (0 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung)

Gegensatz zu anderen Ländern, in der Schweiz noch recht häufig zum Einsatz. Stahlschwellen weisen vor allem bei niedrigen Belastungen eine lange Lebensdauer und geringere Anforderungen – gegenüber Betonschwellen – an Schotter und Unterbau auf. Demzufolge werden Stahlschwellen in der Schweiz vorwiegend auf schlechtem Unterbau oder Gleisen mit einer zu geringen Schotterbettstärke verbaut. Im Vergleich zu Holzschwellen verwittern Stahlschwellen langsamer und sind damit eine gute Alternative. Herausforderungen bietet die Stahlschwelle aufgrund ihrer Leitfähigkeit jedoch bei hohen Geschwindigkeiten und Gleisstromkreisen. All diese Kriterien führen zu einem differenzierten Einsatz von Schwellenarten und einer bunten Zusammensetzung an erreichbaren Nutzungsdauern der Fahrbahn in Abhängigkeit von der Schwellenart. In Abbildung 7.2 ist der Einfluss der Schwellenart auf die Annuität bei einem Zinssatz von 5 %, einer Belastung zwischen 45.000 und 65.000 GesBt/Tag und Gleis, einem gerade Gleis und einem Schienenprofil 54E2 dargestellt. Dabei weisen Stahlschwellen eine Annuität von 109 % und Holzschwellen eine Annuität von 117 % im Vergleich zu Betonschwellen auf.

Die Definition der zu erwartenden Nutzungsdauer bei Schwellen ist somit entscheidend dafür, ob eine Schwellenart als wirtschaftlich oder unwirtschaftlich betrachtet wird. Hierbei gilt es, mehrere Faktoren zu beachten: Grundsätzlich gilt es festzuhalten, dass die Standardelemente die strategische Nutzungsdauer abbilden. Wird versucht, aus den vorhandenen Inventarlisten die Nutzungsdauer der Gleise in der Vergangenheit abzuleiten, so ergibt sich die reale Nutzungsdauer, welche nicht zwangsläufig oder sogar nur sehr selten der strategischen Nutzungsdauer entspricht. Nichtsdestotrotz kann ein Vergleich einen guten Anhaltspunkt bieten.

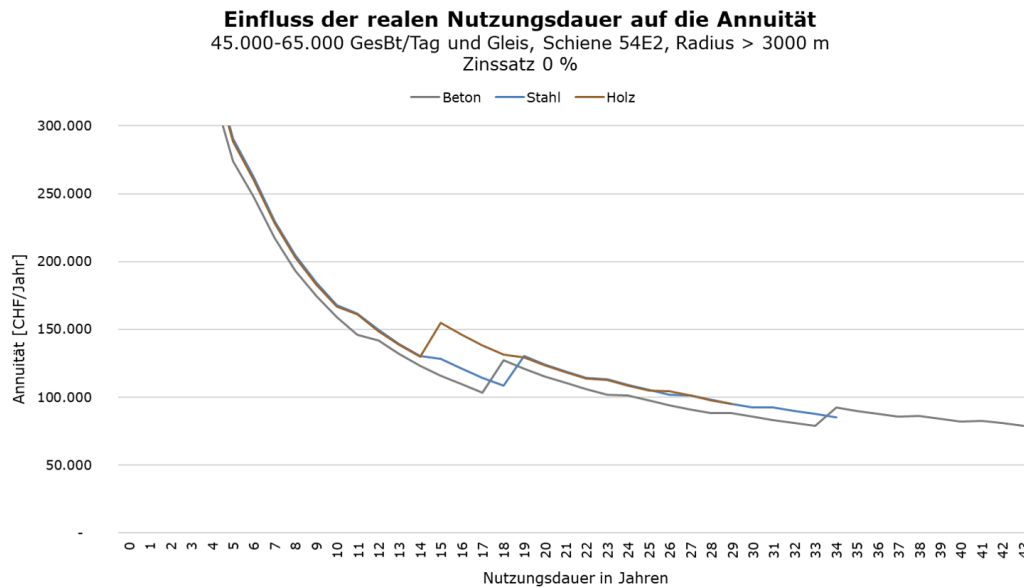


Abbildung 7.3: Einfluss der Nutzungsdauer auf die Annuität (0 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung)

So zeigten Vergleiche der erreichten mit der strategischen Nutzungsdauer der SBB, dass diese bei Holzschwellen gut übereinstimmen oder unter der erwarteten Nutzungsdauer (vor allem bei Weichen) liegen. Die zu niedrige Nutzungsdauer lässt sich jedoch gut mit dem fehlenden Unterhalt der vergangenen Jahre erklären. Im Gegenzug dazu weisen Stahlschwellen keine Normalverteilung zur definierten Nutzungsdauer auf. Hier wird der Mittelwert kaum erreicht, jedoch liegen in etwa gleich viele Werte deutlich unter der erwarteten Nutzungsdauer wie darüber. Somit ergibt sich ein passender Mittelwert, jedoch ist die Abweichung in den einzelnen Abschnitten deutlich zu groß. Bei Betonschwellen ist eine fundierte statistische Aussage nicht möglich, da die ersten Betonschwellen erst in den 1970er-Jahren verbaut wurden. Die zu dieser Zeit verbaute B70-Betonschwelle weist nach heutigem Wissensstand jedoch einen Konstruktionsfehler auf, der zu Rissen in der Schwelle und damit zu einem frühzeitigen Ersatz führt. Mit der B91 wurde dieser Fehler ab 1991 korrigiert. Da die Standardelemente eine Nutzungsdauer von bis zu 50 Jahren für Betonschwellen aufweisen, kann somit keine vollständige Verteilung errechnet werden. Es wird ersichtlich, dass die Definition der Nutzungsdauer eines Standardelementes eine komplexe Angelegenheit ist. Aus diesem Grund wird in Abbildung 7.3 eine Sensitivitätsanalyse über die zu erreichende Nutzungsdauer der Standardelemente abhängig von der Schwellenart bei einem geraden Gleis mit einer Belastung zwischen 45.000 und 65.000 GesBt/Tag und Gleis und einem 54E2-Schienenprofil durchgeführt. Dies soll die Variabilität der wirtschaftlichen Entscheidung aufzeigen.

### 7.2.3 Der Einfluss der Schiene

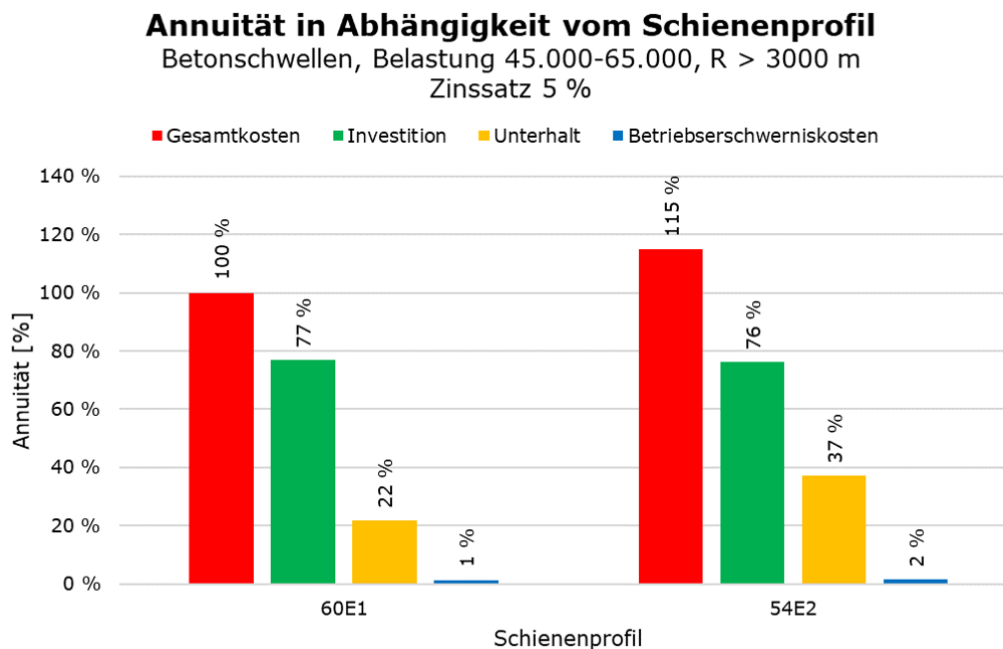


Abbildung 7.4: Einfluss der Schiene auf die Annuität (5 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung)

Der Einfluss der Wahl der Schiene ist meist so deutlich, dass sowohl das Schienenprofil als auch die Schienenstahlgüte bereits reglementarisch geregelt sind. So sind diese meist nicht mehr frei wählbar. Trotzdem soll in der folgenden Abbildung 7.4 zumindest der Einfluss des Schienenprofils zwischen einem Profil 60E1 und einem Profil 54E2 auf einem Gleis mit einer Belastungsklasse zwischen 45.000 und 65.000 GesBt/Tag und Gleis auf Betonschwellen gezeigt werden. Das Schienenprofil 60E1 ist dabei für hohe Belastungen deutlich besser geeignet. Dies zeigt sich auch in der Annuität des Gleises mit einem Schienenprofil 54E2, das eine Annuität von 115 % gegenüber dem Gleis mit Schienenprofil 60E1 aufweist.

### 7.2.4 Der Einfluss des Unterbaus

Der Unterbau ist, wie in Abbildung 7.5 zu erkennen ist, einer der größten Kostentreiber für die Annuität der Fahrbahn. Im Projekt der Standardelemente SBB [94] wurde der Unterbau in Klassen eingeteilt, die sich über den Einfluss des Unterbaus auf die Nutzungsdauer und den Unterhaltsbedarf der Fahrbahn definieren. Dabei stellt die Unterbauklasse A einen Unterbau dar, bei dem die volle Nutzungsdauer des Gleises erreichbar wird und die Unterbauart keinen negativen Einfluss hat. Bei

Unterbau B besteht bereits ein Einfluss auf den Unterhaltsbedarf (Stopfmenge), zudem erfolgt bei Betonschwelengleisen eine Reduktion der Nutzungsdauer um 40 %. Der Unterbau C stellt einen unzureichenden Unterbau dar, bei dem, neben der erhöhten Stopfmenge, eine Reduktion der Nutzungsdauer bei Betonschwellen um 50 % erfolgt. Bei Holz- und Stahlschwellen ist ein abgeschwächter Einfluss auf den Unterbau zu erkennen und damit eine Reduktion der Nutzungsdauer um 25 %. Bei einem Vergleich dieser drei Unterbauklassen (siehe Abbildung 7.5) eines geraden Betonschwelengleises mit einem Schienenprofil 60E1 und einer Belastung von 45.000 bis 65.000 GesBt/Tag und Gleis ist eine Annuität von 133 % bei Unterbauklasse B und eine Annuität von 190 % bei Unterbauklasse C im Vergleich zu einem guten Unterbau, wie es die Unterbauklasse A wäre, zu erwarten.

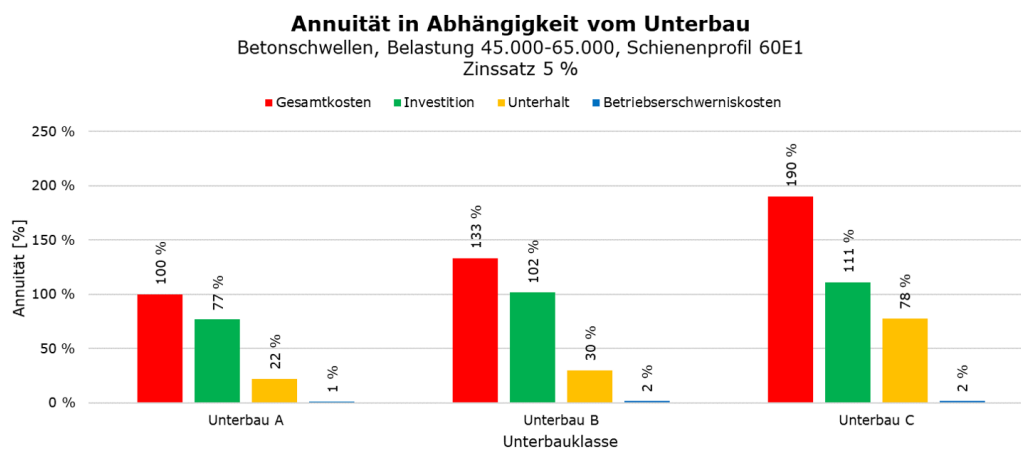


Abbildung 7.5: Einfluss des Unterbaus auf die Annuität (0 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung)

Die Unterbausituation eines Eisenbahnnetzes ist zumeist auf Grund der geologischen Bedingungen und der gewählten Linienführung der Gleise gegeben. Sehr wohl kann dieser Einfluss jedoch bereits bei Neubaustrecken mitbedacht und berücksichtigt werden. Dieser Faktor rückt auf Grund der steigenden Anforderungen (höhere Geschwindigkeiten, Linienführung im dicht besiedelten Raum) aber immer mehr in den Hintergrund. Bei neuen Linienführungen besteht nur noch selten die Möglichkeit, die Trasse abhängig vom Unterbau zu optimieren, da die Vorgaben durch gesetzliche Auflagen und besiedelte Gebiete immer deutlicher in den Vordergrund rücken. Die technische Optimierung einer Anlage verliert damit an Stellenwert.

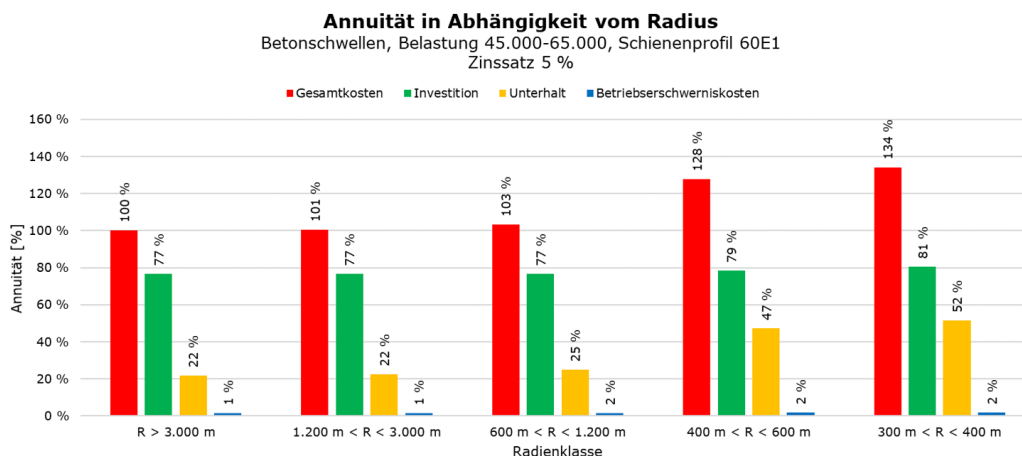


Abbildung 7.6: Einfluss des Radius auf die Annuität (5 %) der Standardelemente SBB [94] (Quelle: eigene Darstellung)

## 7.2.5 Der Einfluss des Radius

Gerade Gleise weisen auf Grund der physikalischen Effekte die niedrigste Annuität auf. In Abbildung 7.6 wird der Einfluss des Radius auf die Annuität eines Betonschwellengleises mit Schienenprofil 60E1 bei einer Belastung von 45.000 bis 65.000 GesBt/Tag und Gleis gezeigt. Die Radienklasse 300 m bis 400 m weist dabei eine Annuität von 134 % im Vergleich zum gerade Gleis auf. In Radienklassen unter 300 m steigt die Annuität nochmals zusätzlich durch den Unterhaltsbedarf des Stoßlückengleises an. Die Definition der Abgrenzung der Radienklasse ist dabei von der reglementarischen Grenze der Verschweißbarkeit der Schienen abhängig, welche bei der SBB im Reglement 220.41 festgehalten ist [74].

## 7.2.6 Der Einfluss der Strategie

Die Unterhalts- oder Erneuerungsstrategie für die Fahrbahn ist ein Mittel, um den Bedarf aktiv zu beeinflussen. Es handelt sich damit nicht um einen durch die physikalischen Zusammenhänge gegebenen Einfluss, sondern der Bedarf kann bis zu einem gewissen Maß gesteuert werden. Diese Zusammenhänge sollen im weiteren Verlauf der Arbeit vertieft betrachtet werden. Ein großes Risiko der Analyse des Einflusses der Strategie besteht darin, dass Anlagen mit einer sehr langen Nutzungsdauer, wie diese die Fahrbahn aufweist, auch eine lange Reaktionszeit haben. Dies bedeutet, dass Veränderungen des Zustands der Anlage auf Grund einer falschen Strategie erst nach mehreren Jahren zu erkennen sind. Ein eventuell höherer Bedarf kann somit erst sehr spät erkannt werden. Eine zusätzliche Herausforderung ergibt sich bei der gleichbleibenden Datenstruktur über die Zeit. Auf Grund der sehr langen Nutzungsdauern und dem Umfeld, das

sich stetig im Wandel befindet, sind mehrere Jahrzehnte alte Daten kaum mehr mit den heutigen vergleichbar. Der größte Teil der Unterlagen und Reportings der Vergangenheit ist bei Bahnen ausschließlich noch in Papierform vorhanden. Die Datenformate haben sich in den letzten beiden Jahrzehnten so stark verändert, dass sie mit den heutigen Systemen nicht mehr kompatibel sind.

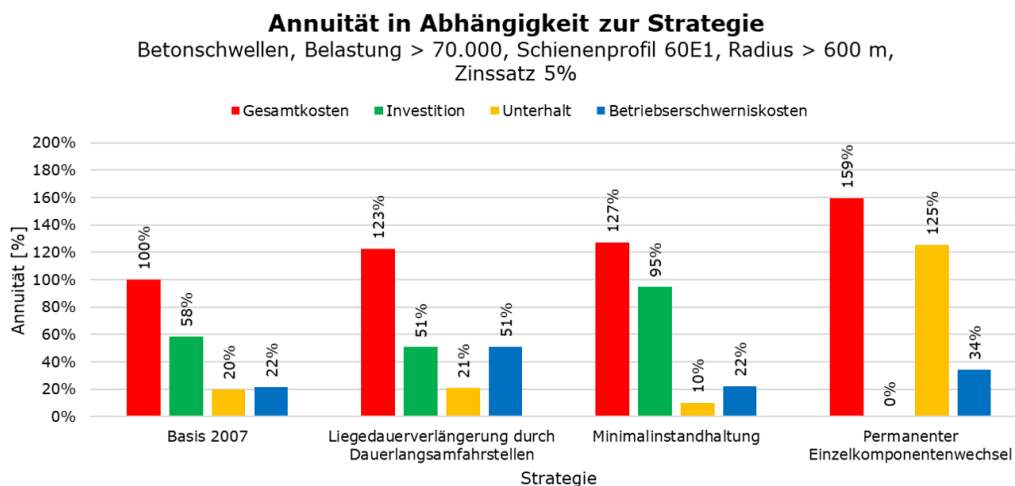


Abbildung 7.7: LCC bei unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien am Beispiel der ÖBB (Quelle: eigene Darstellung nach [89])

In Abbildung 7.7 ist der Einfluss unterschiedlicher Instandhaltungsstrategien nach Veit [89] am Beispiel eines Betonschwellengleises der ÖBB mit Schienenprofil 60E1 in einem Radius über 600 m abgebildet. Ausgehend von einer Basisstrategie auf gutem Unterbau wird der Kosteneffekt durch den Einsatz einer Langsamfahrstelle, durch reduzierten Unterhalt und einen ständigen Komponentenwechsel gezeigt. Es kann daraus geschlossen werden, dass alle drei Strategien zu einem Anstieg der Annuität führen und damit als wirtschaftliche Strategie nicht geeignet sind. Es wird empfohlen, die Basisstrategie der Standardelemente zu verfolgen. Die Auswertung macht jedoch deutlich, wie stark der reale finanzielle Bedarf vom strategischen Bedarf abweichen kann, wenn im Netz andere Substanzerhaltungsstrategien verfolgt wurden oder werden.

## 7.2.7 Der Einfluss der Altersverteilung

Die Altersverteilung ist zur Berechnung des Bedarfs für ein spezifisches Jahr ein wichtiger Einflussfaktor, sie kann jedoch nur schwer vollkommen unabhängig von der, durch die anderen Parameter beeinflussten, erreichbaren Nutzungsdauer betrachtet werden. In die Berechnung des durchschnittlichen Erneuerungsbedarfs

nach Formel 7.1 fließen die Altersverteilung und die spezifischen Nutzungsdauern nicht mit ein. Dies kann in der jährlichen Erneuerungsplanung dazu führen, dass Schwankungen kompensiert werden müssen. Im Rahmen des Inventarsystems DfA (Datenbank fester Anlagen) [24][98] der SBB besteht seit Jahrzehnten eine Dokumentation zum Einbaujahr von Schwellen und damit in weiterer Folge von Gleisen. In Abbildung 7.8 ist die Altersverteilung nach Schwellenart (Stand 1996) zu sehen. Diese Altersverteilung ist auch heute noch im Netz der SBB zu finden. Jedoch haben sich die Verteilung der Schwellenarten und damit auch die jeweiligen Nutzungsdauern stark verändert. Während bis 1996 noch fast ausschließlich Holzschwellen verbaut waren, so hat sich der Anteil der Holzschwellen heute auf rund 30 % reduziert. Je größer das zu erhaltende Netz ist, umso leichter lassen sich starke Schwankungen kompensieren. Bei einem kleinen Netz können starke Schwankungen der Altersverteilung nicht oder nur schwer ausgeglichen werden.

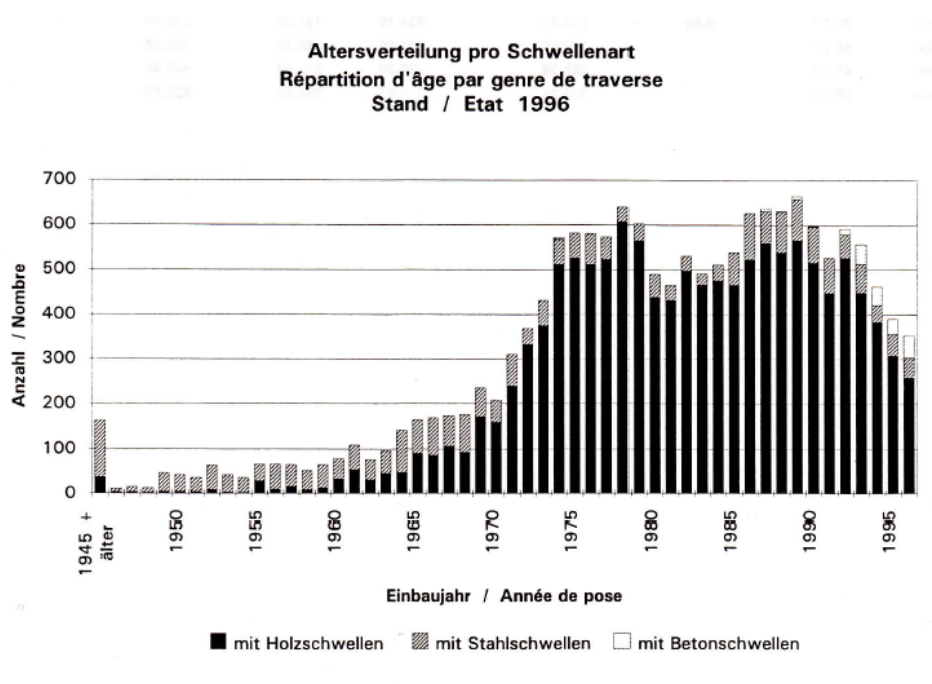


Abbildung 7.8: Altersverteilung pro Schwellenart, Stand 1996 [73]

Eine besondere Herausforderung in Bezug auf den Einfluss der Altersverteilung von Anlagen auf den Erneuerungsbedarf stellen heute bestehende Neubaustrecken dar. Die Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist mit rund 90 km Gleislänge ging mit Dezember 2004 in Betrieb. Es ist davon auszugehen, dass der größte Teil dieser Gleise mehr oder weniger gleichzeitig zur Erneuerung anstehen wird. Auch die Erneuerung der Fahrbahn des Gotthard-Basistunnels wird in rund 80 Jahren eine logistische und vor allem finanzielle Herausforderung darstellen. Auch in anderen Ländern wird heute schon versucht, Konzepte zu erarbeiten, wie in Zukunft auf

solch langen Abschnitten eine jährlich gleichbleibende Erneuerungsquote umgesetzt werden könnte.

Die bestehende Altersverteilung eines Netzes macht es zudem notwendig, dass bei der Bedarfsermittlung lange Betrachtungszeiträume gewählt werden. In den ersten Jahren nach der Investition fällt bei einem Gleis kaum Unterhalt an. Dieser häuft sich jedoch gegen das Ende der Nutzungsdauer. Je nach Betrachtungszeitraum kann sich somit ein unterschiedlicher Bedarf errechnen.

### **7.2.8 Der Einfluss des historischen Substanzerhalts**

Die Ableitung der Bedarfsmenge basierend auf den Einflüssen des real durchgeführten Substanzerhalts ist eine der größten Herausforderungen. Dabei ist zu beachten, dass selbst bei Kenntnis des heutigen Bedarfs, ausgehend von einem ausreichenden Substanzerhalt in der Vergangenheit, die Rückrechnung auf den Substanzerhaltsbedarf in die Vergangenheit nur möglich ist, sofern ausreichende Daten über die Vergangenheit vorhanden sind. Dies bedeutet, dass Informationen über den Ausbaustandard und die Belastung zur Verfügung stehen müssen. Auf dieser Basis ist es zumindest unter der Annahme der heutigen Beanspruchung und Qualität des Substanzerhalts möglich, in die Vergangenheit zu rechnen. Dabei bleibt jedoch noch unbeantwortet, welchen Krafteintrag frühere Fahrzeuge geleistet haben, die noch einen deutlich weniger straffen Fahrplan zu verfolgen hatten. Ebenso wenig sind Informationen über das Unterhaltsregime vorhanden. Es ist davon auszugehen, dass der Fokus in der Vergangenheit deutlich mehr auf Maßnahmen des Kleinunterhalts und einem präventiven Unterhaltsregimes lag, da der Unterhalt meist noch weniger durch eine Zentrale und mehr von den Personen in den Regionen geführt wurde. Dies erlaubt eine deutlich bessere Kenntnis über den Zustand der Anlagen und damit eine bessere Definition von auszuführenden Unterhaltstätigkeiten.

### **7.2.9 Der Einfluss der Baulänge**

In einem bestehenden Gleisnetz werden zur Optimierung der Baulänge auch Abschnitte erneuert, die entweder noch nicht das Ende ihrer wirtschaftlichen Nutzungsdauer erreicht oder diese bereits überschritten haben. Im optimalen Fall stellt die strategische Bedarfsmenge damit den netzweiten Mittelwert dar. Optimalisiert werden kann somit nicht die jährliche Länge, aber die Einheitskosten können durch eine intelligente Steuerung minimiert werden. Fehlende Erneuerungsmengen führen damit dazu, dass eine Optimierung erschwert wird und, abhängig vom Grad der Reduktion, die durchschnittliche Baulänge einer Bahnerneuerung immer kürzer wird. Dies ist von der Zusammensetzung des Netzes abhängig.



Je länger die Abschnitte sind, die das Ende der Nutzungsdauer gleichzeitig erreichen, umso geringer ist das Risiko, viele kurze Baulängen zu erhalten. Die Länge solcher Abschnitte hängt dabei nicht nur vom gleichen Einbaujahr, sondern auch von der Materialwahl und einem gleichbleibenden Unterbau ab. Der Einfluss der Baulänge auf die Einheitskosten wird in Unterkapitel 8.4 näher behandelt.

### **7.2.10 Der Einfluss des Traktionseintrags**

Der Traktionseintrag hat nach heutigem Wissensstand vorwiegend Einfluss auf die Entstehung von Rollkontaktermüdung. Der aktuelle Forschungsstand dazu wurde in den Jahren 2017 und 2019 auf der Schienenfahrzeugtagung in Graz durch Nerlich, Menth und Meyer [57][58] vorgestellt. Durch das Beschleunigungs- und Bremsverhalten der Fahrzeuge, welches vor allem durch die spezifische Traktionsregelung des Fahrzeuges beeinflusst wird, entsteht eine Gefügeveränderung in der Schiene, welche zu Rollkontaktermüdung führt. Zum heutigen Zeitpunkt besteht kein abschließendes Modell, welches den Einfluss des Traktionseintrages auf den Substanzerhalt quantifiziert. Grundlegend ist der mittlere Traktionseintrag eines Gleisnetzes durch die Definition der Schleifzyklen und den daraus entstehenden Zyklen für den Schienenwechsel in den Standardelementen indirekt abgebildet. Dies gilt, solange keine grundlegende Veränderung des Fahrzeugkollektives auf dem Netz erfolgt.

### **7.2.11 Der Einfluss der Geschwindigkeit**

Die Geschwindigkeit definiert einerseits die sicherheitstechnischen Grenzwerte des Gleises und führt damit zu einem erhöhten Substanzerhaltungsbedarfs. Andererseits tritt durch die höhere Dynamik bei einer großen Geschwindigkeit und die zusätzlich benötigte Traktion, um die Geschwindigkeit zu halten, ein stärkeres Verschlechterungsverhalten bei der Gleislage und dem Wachstum von Schienenfehlern auf. Um den daraus zu definierenden Bedarf für den Substanzerhalt zu ermitteln, stellt heute primär die genaue Kenntnis über die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit auf einem spezifischen Gleisabschnitt die größte datentechnische Herausforderung dar. Auf dem Netz der SBB wird deshalb auch der Einfluss der Geschwindigkeit laut Veit [94] durch die Trassierung nur indirekt auf Grund des bekannten Bedarfs abgebildet.

### **7.2.12 Der Einfluss der Längsneigung**

Die Längsneigung beeinflusst den Substanzerhaltungsbedarf insofern, dass in der Steigung ein erhöhter Traktionsbedarf besteht, welcher zu Schienenfehlern führt, und im Gefälle das Bremsen einen erhöhten Abrieb an der Schiene verursacht. Der

zusätzliche Abrieb an der Schiene verringert ihre Nutzungsdauer auf Grund der einzuhaltenden Verschleißreserve. Der Abrieb der Schiene wie auch der Bremsstaub der Fahrzeuge führen zu einer oberflächlichen Verhärtung des Schotterbettes. Die Erfahrung im Netz der SBB zeigt, dass das Schotterbett in Bereichen mit sehr starkem Gefälle nach mehreren Jahren auf Grund der metallischen Ablagerungen nicht mehr stopfbar ist, was bedeutet, dass eine Schotterreinigung als Unterhaltsmaßnahme durchgeführt werden muss. In den Standardelementen der SBB [94] wird die Längsneigung, welche für die Standardelemente gültig ist, von 0 ‰ bis 7,5 ‰ begrenzt. Dies liegt daran, dass erst über 7,5 ‰ ein relevanter Einfluss der Traktion merkbar wird. Heute besteht keine systematische Erhebung des zusätzlichen Bedarfs durch eine erhöhte Längsneigung. Im Jahr 2015 wurde anhand der Bahnhöfe Löwenstraße und Museumsstraße in Zürich, welche eine maximale Längsneigung von 28 ‰ bzw. 37 ‰ aufweisen, eine Lebenszykluskostenberechnung durchgeführt, um die Auswirkungen dieser Längsneigung zu quantifizieren. [32] Die Analyse zeigt auf, dass die Auswirkungen von hohen Längsneigungen sich je nachdem unterscheiden, ob vor dem Abschnitt eine Beschleunigungsstrecke angeordnet ist oder der Zug aus dem Stand direkt in die Steigung einfährt. Auch die Länge der hohen Längsneigung muss daraus abgeleitet einen Einfluss haben. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lebenszykluskosten der beiden Beispielbahnhöfe rund 130 % bis 300 % der Lebenszykluskosten des Basisstandardelements betragen können.

## 8 Einheitskosten

Die Einheitskosten des Substanzerhalts der Fahrbahn stellen die mittleren Kosten für eine Fahrbahnerneuerung, eine Stopfung, das Schleifen von Schienen oder auch jeder anderen Unterhaltstätigkeit pro Längen- oder Stückeinheit dar. Sie dienen einerseits dem Aufzeigen der Effizienz des Substanzerhalts: Je niedriger die Kosten pro Einheit sind, umso effizienter konnte eine Maßnahme durchgeführt werden. Andererseits kann durch die Multiplikation der mittleren Kosten mit der angesetzten Menge auch ein Budgetbedarf erhoben werden. Dabei zeigen auch die Einheitskosten eine starke Abhängigkeit von vielen Parametern, wie das bereits im Bezug auf die Bedarfsmengen in Kapitel 7 aufgezeigt wurde. Als größte Treiber auf die Einheitskosten gelten die folgenden Parameter:

- Gleis/Weiche
- Bauverfahren
- einsetzbare Gleisbaumaschine
- Intervall / Gleissperre
- Baulänge
- Entwässerung / Bankett
- Brücke / Tunnel / Perron
- Anfahrtsweg / Anfahrtszeit
- Arbeiten anderer Fachdienste
- auszubauende Hindernisse
- Optimierung der Trassierung

Dabei gibt es Parameter, die aktiv beeinflussbar sind, Parameter, die gegeben sind oder auch solche Parameter, die nur langfristig und durch eine klare strategische Ausrichtung beeinflussbar sind. Auf eine Detaillierung dieser Parameter wird in den folgenden Unterkapiteln näher eingegangen. Von den Einflussparametern auf die Einheitskosten klar zu unterscheiden sind die Kostenarten. Diese können

nach den unterschiedlichsten Kriterien unterschieden und gegliedert werden. Für die Fahrbahn sind die folgenden Kostenarten von Bedeutung:

- Personalkosten
- Materialkosten
- Maschinenkosten
- Logistikkosten / Traktionskosten
- Fachdienstkosten
- Projektierungskosten
- Entsorgungskosten
- Betriebserschwerungskosten
- Aufsicht und Führung
- Sicherheitskosten
- Gemeinkosten (Overheadkosten)

## 8.1 Gleis / Weiche

Einheitskosten werden als Mittelwert über das gesamte Netz oder auch eines Teilnetzes ermittelt. Dabei ist der anteilige Mix zwischen Gleis und Weiche als Anlage entscheidend. Weichen weisen generell einen höheren Einheitskostensatz auf, der sich durch den Einsatz anderer Maschinen, das teurere Material oder auch die komplexere Intervallsituation ergibt, da immer zwei Gleise von einer Weiche betroffen sind. Das Verhältnis zwischen Gleisen und Weichen in einem Jahr ist jedoch kaum aktiv beeinflussbar, sondern ergibt sich aus der bestehenden Altersstruktur sowie der zu erwartenden Nutzungsdauer der Anlagen. Eine Senkung des Anteils der Weichen im Substanzerhalt ist ausschließlich durch eine Reduktion der Weichen im Netz wirtschaftlich möglich. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass eine sinnvolle Reduktion von Weichen bei einem gleichzeitigen Beibehalten der bestehenden Flexibilität meist nur in Großprojekten und mit der vollständigen Umgestaltung des Gleisplans einhergeht.

## 8.2 Bauverfahren

Das Umbauverfahren ist an sich ein Parameter, der frei wählbar ist. Es steht generell vollkommen frei, ob eine Fahrbahnerneuerung mit einer Unterbausanierung, als Schotterreinigung oder Schottererneuerung durchgeführt wird, aus technischer und wirtschaftlicher Sicht wird jedoch sehr wohl ein bestimmtes Umbauverfahren vorgegeben. Abhängig von der bestehenden Qualität des Unterbaus und des Schotters sowie der vorgesehenen Nutzung des Gleises ist technisch ein bestimmtes Verfahren vorzuschlagen. Auf Basis der Annuitätenmethode kann in weiterer Folge wirtschaftlich ermittelt werden, ob sich ein bestimmtes Umbauverfahren lohnt. Wird die Strategie verfolgt, die Kosten der Fahrbahn nachhaltig so niedrig wie möglich zu halten, dann ist somit keine Auswahl zwischen den Verfahren gegeben. Die Herausforderung dabei besteht vor allem in dem Abbilden der Konsequenzen bei einem bestimmten Bauverfahren. Dies stellt sich auf Basis eines netzweiten Mittelwerts, wie es bei den Standardelementen gemacht wurde [94], als lösbare Aufgabe dar. Bei der Betrachtung eines spezifischen Abschnittes ist dies jedoch deutlich schwieriger, da durch eine Erneuerung eines Gleises der größte Teil der ableitbaren Informationen auf Basis des bestehenden Gleises verloren geht.

Die Beurteilung unterschiedlicher Unterhaltsverfahren stellt sich deutlich einfacher dar. Schleifarbeiten lassen sich beispielsweise grundsätzlich auf Grund ihres Schienenabtrags zu einem bestimmten Kostensatz beurteilen. Entscheidend hierfür ist die Geschwindigkeit der Rissentwicklung, die – bei korrekter Ausführung der Schleifarbeiten – nur in einem sehr geringen Maß durch das Schleifverfahren beeinflusst wird, umso mehr jedoch durch die Geometrie des Schienenkopfes, die durch das Schleifverfahren erzeugt wird. Selbstverständlich kann auch die Hitzeentwicklung beim Schleifen einen negativen Einfluss auf die Rissentwicklung in der Schiene nach dem Schleifverfahren haben. Dies ist jedoch vor allem eine Frage der korrekten Umsetzung der Maßnahme. Bei Stopfarbeiten kann grundsätzlich durch die Leistung unterschieden werden, die eine Maschine bringen kann und die eindeutig von der Anzahl der Stopfaggregate abhängig ist. Dies bedeutet, dass bei weniger Hindernissen oder Störstellen auf einer Strecke eher eine effizient arbeitende Stopfmaschine eingesetzt werden kann. Auch dabei handelt es sich nicht um einen Grundsatz zwischen Strategien, sondern ausschließlich um eine optimale Anpassung zwischen der gegebenen Infrastruktur und der Einsetzbarkeit von Maschinen.

## 8.3 Intervall

Das Intervall bezeichnet in der Schweiz als Überbegriff die nutzbare Gleissperre. Dabei ist nicht nur die absolute Zeit von Bedeutung, sondern auch wie viele Gleise gesperrt werden können. So kann wesentlich effizienter gearbeitet werden,

wenn eine Baustelle in einer Totalsperre erfolgen kann und damit beide Gleise nicht in Betrieb sind. Weiters kann neben der effektiven Stundenzahl auch eine Tag-, Nacht- oder auch Wochenendsperre unterschieden werden. Dies schlägt sich nicht nur in der Effektivität, sondern auch in den Lohnkosten zu Buche, da für das Personal zwangsläufig Nacht- und Wochenendzuschläge zu entrichten sind. Während also durchgehende Wochenendsperren als die effizientesten Baustellen gelten, haben sie auch einen Nachteil: Dieselbe Sperre wäre an Wochentagen nochmals günstiger, hat jedoch einen deutlich spürbareren Einfluss auf die Passagiere. Zudem führt eine Überproportionalität von Wochenendsperren dazu, dass Montag und Dienstag als Ruhezeiten für das Personal eingehalten werden müssen. Neben der effektiven Sperrdauer ist auch die Geschwindigkeit relevant, mit der das Nachbargleis während der Baustelle oder auch das umzubauende Gleis tagsüber wieder freizugeben ist. Die Geschwindigkeit am Nachbargleis bestimmt vor allem die Baugrubensicherung des Arbeitsgleises. Die freizugebende Geschwindigkeit am Arbeitsgleis verkürzt gegebenenfalls die verfügbare Bauzeit in der Nacht, da das Gleis ausreichend gestopft und stabilisiert sein muss, bevor es wieder in den Betrieb übergehen kann.

## 8.4 Baulänge

Die Baulänge hat einen entscheidenden Einfluss auf die Einheitskosten der Substanzerhaltungsmaßnahme. Je größer die realisierte Menge ist, umso kleiner ist der Anteil der Fixkosten pro Längeneinheit. So konnte in den vergangenen Jahren bei der SBB durch die Einführung der präventiven Schleifstrategie eine Reduktion der Einheitskosten für das Schleifen um rund 35 % (vom Jahr 2015 auf das Jahr 2017) erreicht werden. Die Gründe dafür liegen vorrangig in einem Anstieg der jährlichen Schleifleistung um rund 32 %. Durch diesen Anstieg der Menge werden die gemieteten Schleifmaschinen optimal ausgelastet. Die Mehrmenge konnte somit annähernd mit demselben Budget durchgeführt werden. Diese Effizienzsteigerung ist jedoch im Bereich anderer Maßnahmen deutlich herausfordernder. Kann die Effizienzsteigerung die Mehrmenge nicht kompensieren, so bedeutet dies einen Anstieg der Gesamtkosten. Ebenso muss die Mehrmenge auch zielführend sein. Dies steht beim Stopfen nicht außer Zweifel, da das Stopfen einer stabilen Gleislage die Verschlechterungsrate des Gleises negativ beeinflussen kann. Bei der Fahrbahnerneuerung ist es definitiv bekannt, dass eine zu frühe Erneuerung die Annuität erhöht und damit nutzbare Nutzungsdauer vergeben wird. Damit drängt sich automatisch die Frage auf, wann sich eine Mengenerhöhung rechnet. Diese Frage lässt sich, ebenso wie andere strategische Entscheidungen, mithilfe der Annuitätenmethode beantworten. Anhand eines ausgewählten Standardelements kann der Effekt beispielhaft aufgezeigt werden.

Ausgehend von den Preisen der SBB für das Jahr 2017 wurde der Einsparungs-

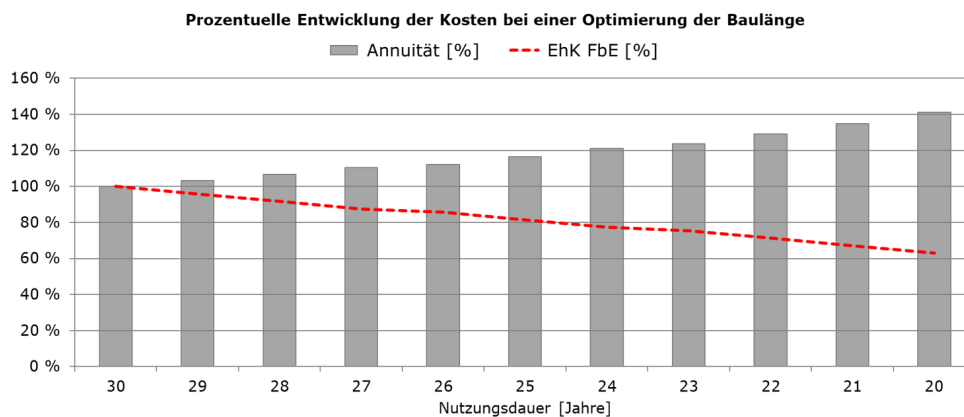


Abbildung 8.1: Prozentuelle Entwicklung der Kosten bei einer Optimierung der Baulänge – Vergleich Reduktion der EhK FbE im Vergleich zum Anstieg der Annuität (Quelle: eigene Darstellung)

effekt einer erhöhten Baulänge im Vergleich zum Verlust von Nutzungsdauer (siehe Abbildung 8.1) berechnet. Als Basis wurde das Standardelement eines geraden Gleises mit einer Belastung von 45.000-65.000 GesBt/Tag und Gleis, Holzschwellen, Schienenprofil 54E2 und Schienenstahlgüte R260 gewählt. Nach den Standardelementen der SBB [94] erreicht dieses Gleis eine Nutzungsdauer von 30 Jahren. Mit jedem Jahr, das das Gleis früher erneuert wird, steigen die Annuität und damit die durchschnittlichen jährlichen Kosten, da Nutzungsdauer vernichtet wird. Bei einer Reduktion der Nutzungsdauer auf 20 Jahre steigt die Annuität bei einem Zinssatz von 5 % bereits auf 141 % an. Um den Anstieg dieser durchschnittlichen jährlichen Kosten zu reduzieren, wird der kritische Wert für die Reduktion der Kosten für die Fahrbahnerneuerung berechnet. Nach 20 Jahren Nutzungsdauer müsste eine Reduktion der Einheitskosten der Fahrbahnerneuerung um mindestens 37 % erreichbar sein, damit sich ein frühzeitiger Ersatz und damit eine Verlängerung der Baulänge rechnet.

Im Gegensatz dazu ist die Effizienz bei einer Verlängerung der Baulänge zu betrachten. In Abbildung 8.2 ist eine statistische Auswertung aus dem Jahr 2014 zum Einfluss der Baulänge auf die Einheitskosten der Fahrbahnerneuerung ersichtlich. Bei statistischen Auswertungen kann jedoch der Effekt von anderen Einflussparametern, wie in diesem Fall beispielsweise die Wahl des Sperrpausenkonzeptes, nicht abgesondert werden. In der Auswertung scheint der positive Effekt einer größeren Baulänge bei Baustellen mit einer Unterbausanierung nur in einem sehr geringen Ausmaß zu existieren. Bei einer Fahrbahnerneuerung mit Schotterreinigung oder Schotterersatz wird der Einfluss der Baulänge jedoch deutlich.

Im Jahr 2016 wurde bei der SBB entschieden, die Analyse der Einheitskosten

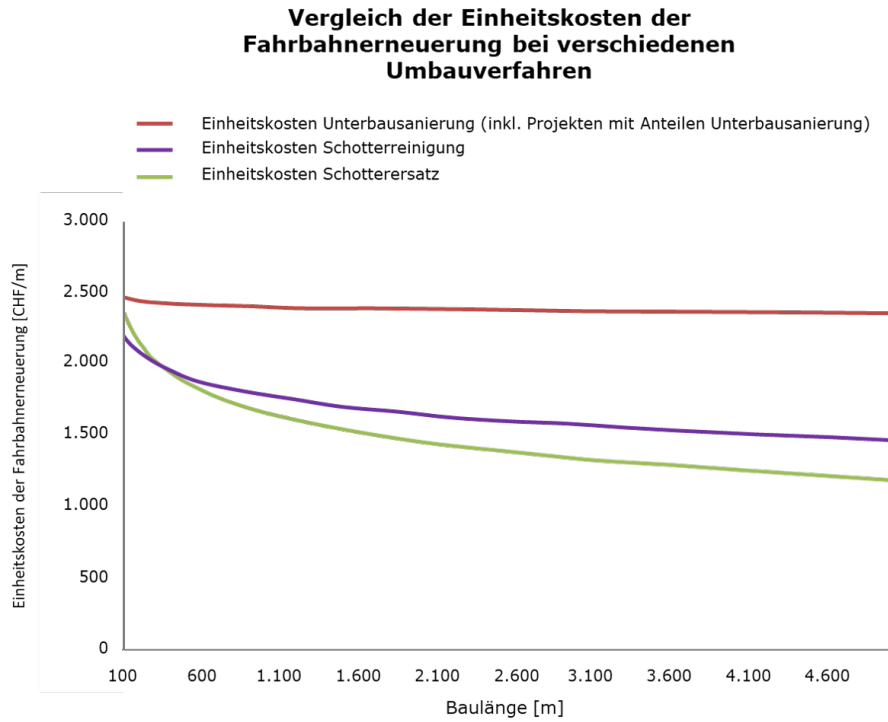


Abbildung 8.2: Einfluss der Baulänge auf die Einheitskosten der Fahrbahnerneuerung im Netz der SBB (Quelle: eigene Darstellung nach [27])

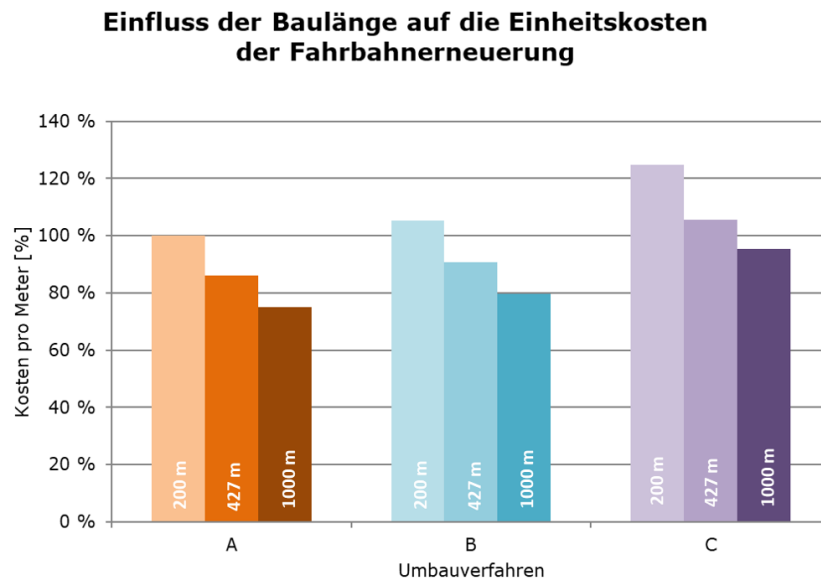


Abbildung 8.3: Prozentualer Einfluss der Wahl der Gleisbaumaschine bei einer Unterbausanierung [5]



der Fahrbahnerneuerung auf Basis einer Kalkulation zu erheben. Kalkuliert wurde ein bestehendes Projekt mit einer realen Umbaulänge von 427 m Länge. Sowohl die Gleisbaumaschine wie auch die Baulänge wurden variiert. Bei der Baustelle handelt es sich jedoch um eine Baustelle mit Unterbausanierung und so wird im Gegensatz zur statistischen Auswertung aus dem Jahr 2014 deutlich, dass auch bei einer Baustelle mit Unterbausanierung eine deutliche Reduktion der Einheitskosten durch eine Erhöhung der Umbaulänge erreicht wird. Das Ergebnis dieser Kalkulation ist aus Abbildung 8.3 ersichtlich. Mit einer Steigerung der Baulänge um 500 % ist somit eine Reduktion der Einheitskosten von rund 25 % möglich. Auf Grund der Differenzen zu der Auswertung in Abbildung 8.3 ist davon auszugehen, dass bei Projekten mit Schotterreinigung oder Schotterersatz höhere Einsparungen generiert werden könnten. Dies gilt es jedoch im Einzelfall nachzuweisen.

Als Entscheidungsbasis, ob eine Verlängerung der Baulänge wirtschaftlich sinnvoll durchgeführt werden kann, müssen die Einsparungen der Baustelle durch die Erhöhung und damit Optimierung der Baulänge dem Verlust der Kosten durch die Erhöhung der Annuität gegenübergestellt werden. Übersteigen die Einsparungen durch die Erhöhung der Baulänge den Verlust durch die Reduktion der Nutzungsdauer, so ist die Verlängerung der Baustelle wirtschaftlich sinnvoll. Die Berechnung dieses Vergleichs ist in Formel 8.1 ersichtlich. Bei der Anwendung dieser Formel ist jedoch auf eine statische Berechnung der Annuität zu achten.

$$\begin{aligned} & \sum(EhK_{alt_i} \cdot L_{alt_i}) - (EhK_{neu} \cdot L_{neu}) > \\ & > \sum(A_{strat} \cdot ND_{strat}) - \sum(A_{real} \cdot ND_{real}) \end{aligned} \quad (8.1)$$

$EhK_{alt_i}$ ...Einheitskosten der Fahrbahnerneuerungsabschnitte vor der Optimierung der Baulänge [CHF/km]

$EhK_{neu}$ ...Einheitskosten der Fahrbahnerneuerung nach der Optimierung der Baulänge [CHF/km]

$L_{alt_i}$ ...Länge der einzelnen Fahrbahnerneuerungsabschnitte vor der Optimierung [km]

$L_{neu}$ ...Länge der Baustelle mit optimierten Einheitskosten [km]

$A_{strat}$ ...Annuität bei Erreichen der strategischen Nutzungsdauer [CHF/km]

$A_{real}$ ...Annuität bei Erreichen der realen Nutzungsdauer [CHF/km]

$ND_{strat}$ ...Strategische Nutzungsdauer [Jahre]

$ND_{real}$ ...Reale Nutzungsdauer [Jahre]

## 8.5 Entwässerung/Bankett

Die Kosten für die Errichtung einer Entwässerung können einen bedeutenden Anteil an den Einheitskosten ausmachen. Aus den im Projekt der Standardelemente SBB [94] angegebenen Kostensätzen kann ein durchschnittlicher Anteil der Entwässerungskosten an den Gesamtkosten der Fahrbahnerneuerung von rund 30 % ausgewiesen werden. Trotz dieses hohen Kostenanteils konnte die Wirtschaftlichkeit des Baus von Entwässerungen bei schlechtem Unterbau und hohen Belastungen nachgewiesen werden. Trotzdem bietet die Entwässerung immer wieder ein scheinbares und vor allem kurzfristiges Sparpotential. Die Einsparung einer benötigten Entwässerungsleitung gilt es jedoch in jedem Fall zu verhindern.

## 8.6 Brücke/Tunnel/Perron

Brücken, Tunnels und Perrons (Bahnsteigkanten) haben insofern einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten, da sie ein zusätzliches Hindernis bedeuten. In diesen Bereichen ist vor allem die Arbeitsbreite deutlich eingeschränkt. Dies führt dazu, dass die Wahl nur auf eine beschränkte Auswahl an Gleisbaumaschinen fallen kann. Tunnels erhöhen die Kosten zudem durch den meist langen Anfahrtsweg zur Baustelle und die zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen sowie das benötigte Belüftungs- und Rettungskonzept.

## 8.7 Anfahrtsweg/Anfahrtszeit

Der Anfahrtsweg zur Baustelle oder viel mehr die dafür effektiv benötigte Zeit ist ein entscheidendes Kriterium für die Höhe der Einheitskosten. Deutlich ins Gewicht fällt dieser Faktor, wenn Gleisbaumaschinen über Verträge eingemietet werden, die pro Schicht abrechnen. Je mehr Zeit für die Anfahrt benötigt wird, umso mehr unproduktive Zeit muss somit bezahlt werden. Um den Anfahrtsweg möglichst kurz zu halten, muss die entsprechende Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden. Dies bedeutet, dass entsprechend lange Abstellgleise und Spurwechsel vorhanden sein müssen. Der in den vergangenen Jahren aufgekommene Trend der „Schlanken Infrastruktur“ forciert jedoch einen deutlichen Rückbau wenig genutzter Abstellgleise.

## 8.8 Fachdienstkosten

Als Fachdienstarbeiten werden jene Arbeiten verstanden, die nicht direkt der eigenen Anlagengattung zugeordnet werden. Für die Fahrbahn entspricht dies zumeist

Arbeiten an der Fahrleitung, welche durch Arbeiten an der Fahrbahn zwangsläufig ausgelöst werden. Seltener betrifft dies Anlagengattungen wie Kunstbauten oder Perronanlagen bzw. den Bahnzugang. Ob diese Kosten der Fahrbahn oder den jeweiligen Gewerken angelastet werden, wird bei den jeweiligen Bahnen unterschiedlich geregelt. Bei einem Benchmark der Kosten ist auf diesen Unterschied in der Verrechnung zu achten.

## 8.9 Auszubauende Hindernisse

Als auszubauende Hindernisse werden Elemente in oder in der Nähe der Fahrbahn verstanden, die für eine Maßnahme ausgebaut werden müssen. Dies sind zum Beispiel Platten von Bahnübergängen, Balisen oder andere Sicherungssysteme, die im Gleis verlegt sind. Diese Arbeiten generieren einen entsprechenden Mehraufwand. Dies kommt vor allem zum Tragen, wenn Arbeiten in einem Nachtintervall ausgeführt werden und das Gleis tagsüber wieder freizugeben ist. Wie bei den Fachdienstkosten sind auch hier die Regelungen der Verrechnung auf die Anlagengattungen der Bahnen unterschiedlich.

## 8.10 Optimierung der Trassierung

Vor allem bei alten Gleisen kann es im Falle einer Erneuerung passieren, dass die Trassierung noch alten Reglements entspricht. Bei einer Erneuerung ist die Trassierung den neuen Reglements anzupassen. Dies verursacht einen zusätzlichen Projektierungsaufwand. Zudem kann es dazu kommen, dass bei einer Erneuerung bewusst eine Anpassung der Trassierung gefordert wird, um beispielsweise höhere Geschwindigkeiten fahren zu können. Bei einem Vergleich der Kosten von Fahrbahnerneuerungsprojekten ist dieser Kostentreiber zu beachten.

## 8.11 Personalkosten/Lohnkosten

Internes Personal ist, genauso wie Gleisbaumaschinen, auf eine bestimmte Produktionsmenge ausgelegt. Sinkt die Produktionsmenge, dann wird das volle Potential des Personals nicht ausgeschöpft, die Kosten bleiben jedoch gleich hoch. Der Effekt ist somit ident zu dem der Gleisbaumaschinen – die Kosten pro Einheit steigen. Lohnkosten sind im Gegensatz zu den meisten Gleisbaumaschinenverträgen jedoch kurzfristig betrachtet ausschließlich Fixkosten. Externes Personal hat den großen Vorteil, dass es bei einer Reduktion der Substanzerhaltungsmenge relativ leicht reduziert werden kann und damit die Kosten gesenkt werden können. Dies führt jedoch auch zu dem großen Nachteil von externem Personal. Denn auf Grund dieser

Unsicherheit und auch weil ein Unternehmen zwischengeschaltet ist, das zusätzlich Einnahmen generieren muss, sind die Kosten für externes Personal höher als für internes Personal. Somit kann zwar kurzfristig auf Schwankungen reagiert werden, jedoch kostet dafür die Zeit, in der große Mengen umgesetzt werden, mehr. Nur schwer kann es somit also zu einer effektiven Einsparung kommen. Umso mehr noch, da externem Personal meist die langjährige Erfahrung und das Know-how fehlt, die einen Prozess oder eine Planung meist effizient werden lassen. Zudem ist der Leistungsanspruch an einen externen Auftraggeber sicher ein anderer als an den eigenen Betrieb. Dies birgt vor allem im Infrastrukturbau seine Risiken, da der Effekt einer schlechten Arbeit meist erst nach 10 bis 20 Jahren auftritt.

Zu den Kosten des Personals zählen auch die Kosten der Projektierung. Diese verhalten sich kongruent zu den anderen Personalkosten und müssen ebenso in interne und externe Kosten geteilt werden.

Bei Gleisbauarbeiten ist jedenfalls der Anteil von Nacht- und Wochenendzuschlägen der Personalkosten zu beachten. So fallen Bauarbeiten meist in die weniger dichten Bereiche des Fahrplans, welche einen geringeren Einfluss auf den Kunden haben, und damit in die Nacht oder das Wochenende. Dem Personal stehen zu diesen Zeiten Zuschläge zu, die die Personalkosten erhöhen. Zudem gilt es, das Arbeitsschutzgesetz zu beachten und Ruhezeiten einzuplanen.

## 8.12 Materialkosten

Als Materialkosten werden jene Kosten bezeichnet, die direkt für das benötigte Material verrechnet werden. Bei der Fahrbahn entspricht dies jeglichem für die Erneuerung und den Unterhalt für die Fahrbahn benötigten Material wie Schotter, Schwellen, Schienen, Material des Unterbaus und Weiteres. Die Kosten des Materials sind grundlegend direkt von der Stückzahl oder der Menge abhängig. Sofern also die Stückzahl nicht unter eine für die Produktion entscheidende Menge fällt und die Fixkosten bei der Produktion von Material nicht einen zu hohen Anteil einnehmen, können die Einkaufskosten von Material mit einer Reduktion der Produktionsmenge tatsächlich gesenkt werden. Meist wird jedoch eine gewisse Kostensenkung der Materialkosten durch ein hohes Abnahmevolumen gewährt. Somit tritt der Effekt nur kurzfristig auf und langfristig wird er sich durch neue Verträge mit den Lieferanten wieder minimieren.

Neben den steigenden Materialkosten bei einem geringen Abnahmevolumen besteht beim Bau von Infrastruktur ebenso der gegenteilige Effekt. So stößt ein Land mit dem benötigten Bauvolumen oft an die Grenzen der verfügbaren Rohstoffe. Die Anforderungen an die Qualität sind zumal sehr hoch, was die Anzahl der Lieferanten einschränkt.

## 8.13 Maschinenkosten

Die Wahl der Gleisbaumaschine hat großen Einfluss auf die Einheitskosten. Die Gleisbaumaschine definiert außerdem die Logistik und die Anforderungen an die Baustelle. In Abbildung 8.3 ist die bereits in Unterkapitel 8.4 erwähnte Kalkulation einer Baustelle mit Unterbausanierung dargestellt. Hierbei wird der Einfluss der Wahl der Gleisbaumaschine deutlich. Bei allen drei Umbauverfahren wird eine durchgehende Unterbausanierung realisiert, jedoch mit drei verschiedenen Gleisbaumaschinen. Bei der gleichen Baulänge beträgt der Einfluss auf die Einheitskosten über 20 %.

Bei Gleisbaumaschinen, die über mehrere Jahre eingemietet sind, ist dieser Effekt deutlich zu erkennen. Es bestehen die unterschiedlichsten vertraglichen Modelle, bei denen die Verrechnung entweder pro Meter, pro Zeiteinheit oder pro Schicht erfolgt. Meist sind den Verträgen jährliche Mindestmengen hinterlegt, die bezogen werden müssen und ansonsten auch ohne Bezug von Leistung abgegolten werden müssen. Rahmenverträge mit Gleisbaumaschinenanbietern weisen grundlegend jedoch eine Laufzeit zwischen 3 und 10 Jahren auf, was in etwa der Zeit bis zu einer vollkommenen Strategieumkehr bei den Infrastrukturbetreibern gleich kommt. Diese Verträge geben den Gleisbauunternehmen die nötige Sicherheit, die für das Fortbestehen des Unternehmens unabdingbar ist. Dies begründet sich in der hohen Investitionssumme für eine Gleisbaumaschine. Möchte eine Bahn eine gewisse Flexibilität in Bezug auf den Einsatz einer Gleisbaumaschine, dann wird dieses Risiko der Gleisbaufirma über entsprechend hohe Kostensätze für eine Schicht- oder Kilometerleistung kompensiert. Durch die Laufzeit der Maschinenverträge über mehrere Jahre führt eine kurzfristige Reduktion von Substanzerhaltungsmengen nicht nur zu einem Folgeschaden auf Grund des Einflusses auf Zustand und Substanz, sondern auch die Einheitskosten werden erhöht. Sollte die Substanzerhaltungsmenge über mehrere Jahre reduziert werden und die Verträge bezüglich der Gleisbaumaschinen angepasst werden, so zeigt sich ein zusätzlicher Effekt. Da Gleisbauunternehmen keinen flexiblen Markt vorfinden und meist als Kunde von der größten Bahn in einem Land abhängig sind, kann keine Reduktion der Kosten bei einer geringeren Absatzmenge realisiert werden. Die Kosten der Investition der Gleisbaumaschine werden trotzdem auf die geringere Menge umgelegt und es kann somit keine Einsparung realisiert werden. Es gilt also, wenn die Anschaffung einer Gleisbaumaschine von Seiten der Bahn forciert wurde, diese Maschine möglichst auszulasten. Da die vertragliche Situation einer spezifischen Bahn in diesem Modell nicht in Betracht gezogen werden kann, wird dieser Einfluss nicht betrachtet.

## 8.14 Logistikkosten/Traktionskosten

Als Logistik- oder Traktionskosten werden jene Kosten verstanden, die bei der Abwicklung des Transportes von Baumaschinen oder Material entstehen. Erfolgt der Materialtransport gleisgebunden, so sind dies vor allem Kosten für die Loks und die Triebfahrzeugführer sowie die dafür benötigten Wagen. Abhängig von der Struktur des Unternehmens kann dieses über eigene Loks, Wagen und Triebfahrzeugführer verfügen oder diese bei einem Cargounternehmen einmieten. Bei Schotter nehmen die Logistikkosten einen signifikanten Anteil an den Gesamtkosten für Schotter ein [51], was dazu führt, dass das Einzugsgebiet für Schotter beschränkt ist.

## 8.15 Projektierungskosten

Die Projektierungskosten zählen zu den Personalkosten (siehe Unterkapitel 8.11). Diese werden jedoch meist gesondert ausgewiesen, da sie der Projektierungsphase und nicht der Bauausführungsphase zugeordnet werden. Oftmals werden für die Projektierung auch externe Ingenieurbüros beauftragt, die diese anschließend durchführen.

Für die Höhe der Projektierungskosten ist neben der Entscheidung zwischen internem und externen Personal vor allem die Planungsstabilität entscheidend. Dies gilt sowohl für Erneuerungs- als auch Ausbauprojekte. Je früher ein Variantenentscheid getroffen werden kann, umso weniger Varianten müssen parallel vertieft projektiert werden. Spätestens mit Abschluss des Vorprojektes sollte nur mehr eine Variante in die Phase des Bauprojektes übergehen. Instabilitäten in Managemententscheidungen oder der Finanzierungssituation können jedoch im Laufe der Projektierung dazu führen, dass die Wahl des Umbauverfahrens, der Gleisbaumaschine oder auch der Baulänge hinterfragt wird. Dies führt zu einem erheblichen Mehraufwand in der Projektierung und sollte in jedem Fall vermieden werden.

## 8.16 Entsorgungskosten

Entsorgungskosten fallen für Schienen, Schwellen, Schotter, Unterbau- und Untergrundmaterialien sowie für alle übrigen Kleinteile an. Dabei ist zu beachten, dass stark verunreinigte Bereiche im Gleis gesondert untersucht werden müssen. Diese sind Gleisabschnitte mit Holzschwellen oder Abschnitte, auf denen zuvor Holzschwellen verlegt waren und Teile des Gleisaufbaus bei einem Wechsel auf andere Schwellen im Gleisbereich verblieben sind, zudem auch Gleise im Bahnhofs-,

Rangier- und Abstellbereich, Zahnstangengleise, der Weichenbereich und Spezialanlagen sowie andere verdächtige Gleisabschnitte. [39]

## 8.17 Betriebserschwerungskosten

Als Betriebserschwerungskosten werden jene Kosten bezeichnet, die dem Eisenbahnbetrieb durch die Durchführung einer Maßnahme im Gleis entstehen. Dies können offensichtliche Kosten wie auch externe (versteckte) Kosten sein. Betriebserschwerungskosten entstehen nach Veit durch „Verspätungen, Folgeverspätungen, Probleme in der nachfolgenden Zugbildung, Zusatzkosten im Verschub, negative Marktreaktionen (Kundenabwanderung), Pönalzahlungen, Umleitungen von Zügen, Ausfall von Zügen oder Schienenersatzverkehre“ [92]. Die dadurch entstandenen Kosten können direkt aus der Buchhaltung ersichtlich sein, beispielsweise als Rechnungslegung eines Busunternehmens, oder im Aufwand (z. B. Personalaufwand) des Unternehmens versteckt sein.

## 8.18 Aufsicht und Führung

Die Kosten von Aufsicht und Führung sind Teil der Personalkosten (siehe Unterkapitel 8.11) und können entweder gesondert verbucht oder als eigene Kostenposition geführt werden.

## 8.19 Sicherheitskosten

Die Kosten für die Sicherheit beziehen sich sowohl auf Personalkosten als auch auf Kosten für das akustische oder optische Sicherheitssystem für Personen. Abhängig sind diese von der Art der betrieblichen Sperrung und der Übersichtlichkeit der Baustelle. Ein starkes Verkehrsaufkommen am Nachbargleis bedarf dabei eines höheren Sicherheitsaufwands als eine Totalsperrung. Baustellen in engen Radien benötigen auf Grund der Sichtdistanz zusätzliches Sicherheitspersonal. Es sollte niemals versucht werden, an Sicherheitskosten zu sparen, sie können jedoch indirekt durch die Baustellenplanung reduziert werden.

## 8.20 Kosten des Overhead/Gemeinkosten

Gemeinkosten beinhalten alle Kosten, die nicht einer spezifischen Kostenstelle zugeordnet werden können, sondern anteilmäßig auf alle Kostenstellen aufgeteilt

werden. Gemeinkosten würden somit nicht existieren, wenn das gesamte Unternehmen ein Bezugsobjekt wäre. [36] Damit ist die Höhe der Gemeinkosten von der Kostenstruktur des Unternehmens abhängig. Die Höhe der Gemeinkosten in einem EIU wird in der Regel nicht veröffentlicht, generell liegen Gemeinkosten jedoch zwischen 15 % und 30 % der Gesamtkosten. Diese Kosten können bei einer reduzierten Produktion nicht oder nur sehr langfristig gesenkt werden. Grundsätzlich gelten sie als Fixkosten. [36] Auf die einzelne Produktion gesehen erhöht sich bei einer reduzierten Produktion daher der Anteil an Gemeinkosten. Es gilt somit ebenso, ein möglichst effizientes Management anzustreben.

Die Gemeinkosten bei der Infrastruktur werden durch die Finanzierungsstruktur entscheidend beeinflusst. Der „Produktion“ der Fahrbahn oder auch anderen Anlagengattungen werden meist nur Gemeinkosten angelastet, welche direkt zur Produktion benötigt werden, so zum Beispiel Einkaufsgemeinkosten und Logistikgemeinkosten. Kosten des Managements oder der Produktentwicklung werden nicht auf die Einheitskosten der Fahrbahnerneuerung oder des Unterhalts umgelegt.



## 9 Modellnetz

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Modellrechnung erstellt. Diese Modellrechnung dient dazu, den Langzeiteffekt von vermeintlichen Kosteneinsparungen abzubilden. Die Kosteneinsparungen werden unterschieden in die Reduktion des Erneuerungsbudgets und die Reduktion des Unterhaltsbudgets. Ziel der Modellrechnung ist es, auszuweisen, wie groß der tatsächlich entstehende Schaden von Kosteneinsparungen ist und welches Verhalten bei Budgeteinsparungen zu dem geringsten Schaden führt. Als Basis für diese Berechnung dient ein Modellnetz, das in weiterer Folge beschrieben wird. Aufbauend auf diesem Modellnetz werden dann die möglichen Budgetrestriktionen kalkuliert und veranschaulicht.

Als Modellnetz wird ein Ausschnitt aus dem Netz der SBB ohne Weichen gewählt. Dies bietet den Vorteil, dass ein Abgleich mit der Realität möglich ist und gleichzeitig die Rechenmenge auf einem Level gehalten wird, auf dem die Berechnung noch auf Basis von MS Excel erfolgen kann. Das in dieser Arbeit erarbeitete Modell kann in weiterer Folge auf ein beliebiges Bahnnetz umgelegt werden, sofern ein Modell zur Beschreibung des Bedarfs wie jenes der Standardelemente besteht. Für die Modellrechnung dienen die Standardelemente SBB [94] als Grundlage zur Kalkulation des Substanzerhaltungsbedarfs. Dabei ist davon auszugehen, dass die Standardelemente den eingeschwungenen Bedarf eines strategisch bewirtschafteten Netzes aufzeigen. Die Nutzungsdauer stellt jeweils die strategische Nutzungsdauer dar. Im Gegensatz zu einem realen Netz wird bei der Erhebung des Bedarfs unterstellt, dass kein Nachholbedarf im Netz besteht und in der Vergangenheit immer ausreichend Unterhalt durchgeführt wurde. Somit wird die Soll-Nutzungsdauer der Standardelemente angewendet. Zudem werden der statistische Erwartungswert der Nutzungsdauer und die hinterlegte Streuung in Unterkapitel 9.7 behandelt. Diese fließen jedoch in weiterer Folge nicht in die Modellrechnung mit ein. Gleise, welche heute unbekannte Attribute aufweisen, wodurch keine Zuordnung der Standardelemente möglich ist, werden in der Modellrechnung aus der Gesamtmenge entfernt.

In den folgenden Unterkapiteln werden das verwendete Bestandsnetz und seine Ausprägungen im Detail beschrieben.

## 9.1 Altersverteilung

Die durchschnittliche Altersverteilung wird auf Basis des Einbaujahres der Schwellen ermittelt. Dieses Einbaujahr ist in Abbildung 9.1 als Zyklus 0 in Violett mit der entsprechenden Gleislänge dargestellt. Durch Addition der Nutzungsdauer des Standardelementes errechnen sich die Erneuerungszyklen 1 bis 3. Während die durchschnittliche Soll-Nutzungsdauer nach den Standardelementen im Modellnetz 36 Jahre beträgt, beläuft sich die durchschnittliche Ist-Nutzungsdauer auf 31 Jahre. Das Modellnetz ist somit deutlich überaltert, was auch die Realität des Netzes der SBB widerspiegelt. Bei den berechneten Erneuerungszyklen ergeben sich große Schwankungen im jährlichen Bedarf, die in Abbildung 9.1 zu erkennen sind. Wird der jährliche durchschnittliche Bedarf der Fahrbahnerneuerung nach Formel 7.1 berechnet, so ergibt sich ein durchschnittlicher Bedarf von rund 3.080 m Fahrbahnerneuerung pro Jahr. Zu erkennen ist, dass sich die Altersverteilung auf Grund der spezifischen Nutzungsdauern im Netz über die Erneuerungszyklen glättet. Bei dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die Nutzungsdauer laut Standardelemente effektiv erreicht wird. In der Realität ist jedoch bekannt, dass die jeweiligen Nutzungsdauern der Standardelemente einer Streuung unterliegen. Wird die Streuung der Standardelemente in Betracht gezogen, so erfolgt eine zusätzliche Glättung der jährlichen Erneuerungsmenge (siehe Unterkapitel 9.7).

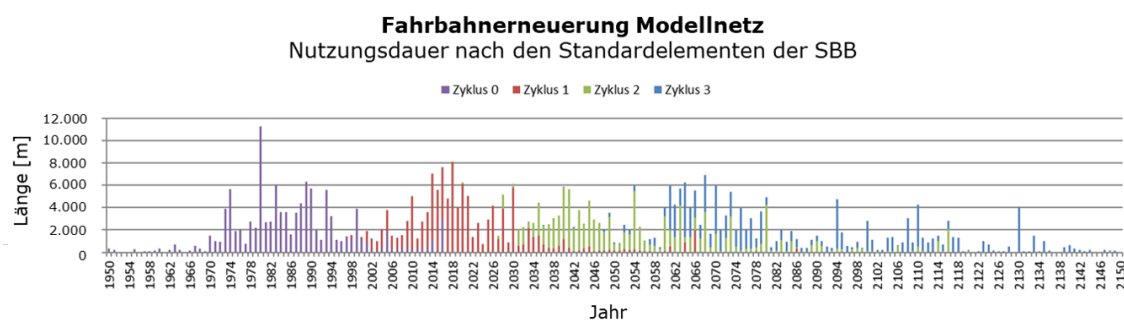


Abbildung 9.1: Einfluss der Altersverteilung auf die Bedarfsmenge im Modellnetz SBB (Quelle: eigene Darstellung)

## 9.2 Verteilung der Belastung

Wie bereits in Abschnitt 7.2.1 ausgeführt, ist die Belastung eines Gleisnetzes einer der größten Treiber für den Substanzerhaltungsbedarf. Die gewichtete mittlere Gleisbelastung des Modellnetzes beträgt 27.915 GesBt/Tag und Gleis. Die Verteilung der Belastungsklassen ist aus Abbildung 9.2 ersichtlich und entspricht dem Datenstand des Jahres 2017. Im Vergleich zur Belastungsklassenverteilung

der Auswertung zu den Standardelementen aus dem Jahr 2011 SBB [94] wird ersichtlich, dass sich ein deutlich höherer Anteil der Gleise in der Belastungsklasse zwischen 0 und 15.000 GesBt/Tag und Gleis befindet. Diese Klasse dominiert das Modellnetz, wobei in der Auswertung für die Standardelemente die Belastungsklasse 30.000 bis 45.000 GesBt/Tag und Gleis die am häufigsten vertretene Klasse darstellt. Der Unterschied der beiden Auswertungen ergibt sich dabei nicht nur aus den unterschiedlichen Bezugsjahren, sondern primär aus der Abgrenzung der Gleise. Während die Auswertung für die Standardelemente sich auf die Hauptgleise (1-4) bezieht, stellt Abbildung 9.2 die Verteilung des Bestandsnetzes mit allen Gleisen ohne Weichen dar. In Abbildung 9.3 ist die Verteilung der Belastung im Netz der SBB des Jahres 2017 mit allen Gleisen ohne Weichen dargestellt. Dadurch wird deutlich, dass das Modellnetz das Netz der SBB trotz einiger Abweichungen hinreichend genau beschreibt.

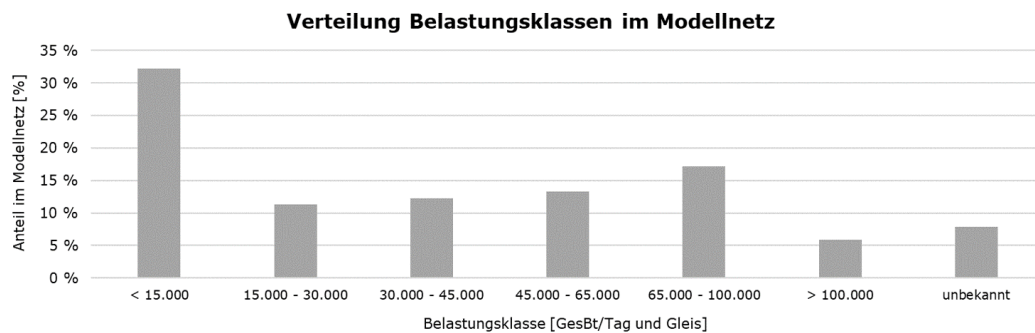


Abbildung 9.2: Verteilung der Belastungsklassen im Modellnetz (Quelle: eigene Darstellung)

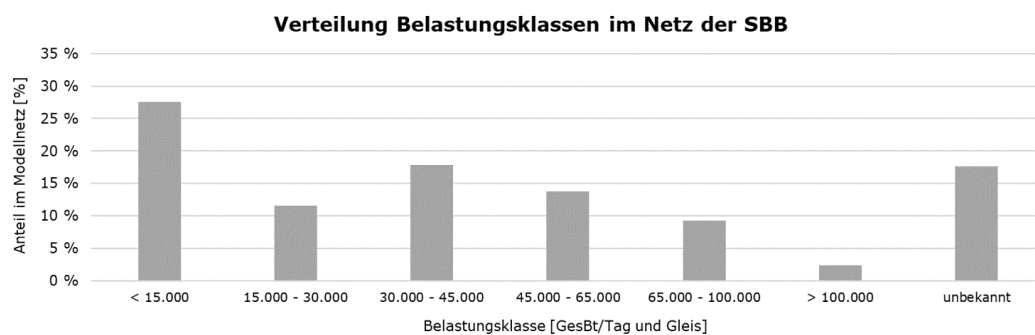


Abbildung 9.3: Verteilung der Belastungsklassen im Netz der SBB (2017) (Quelle: eigene Darstellung)

### 9.3 Verteilung Schwellenart

Die Verteilung der Schwellenart ist ein treibender Faktor zur Bestimmung der mittleren Nutzungsdauer eines Netzes. Die zu erwartende Nutzungsdauer von Betonschwellen ist deutlich höher als die von Holzschwellen. Während das Hauptgleisnetz auf Basis der Auswertung der Standardelemente SBB [94] im Mittel einen Anteil von Holzschwellen von rund 30 % aufweist, nehmen die Holzschwellen im Modellnetz einen Anteil von 56 % ein. Der Anteil von „weiteren“ Schwellenarten, welche Sonderformen von Schwellen bezeichnen, liegt bei 0,06 % und kann somit bei der Modellierung vernachlässigt werden. Die mittlere Nutzungsdauer des Modellnetzes liegt mit 36 Jahren nur ein Jahr unter der mittleren Nutzungsdauer von 37 Jahren auf Basis der Standardelemente im Netz der SBB. In Abbildung 9.5 ist die Verteilung der Schwellen im gesamten Netz der SBB dargestellt. Damit zeigt sich, dass auch bei einem Vergleich mit denselben Abgrenzungsparametern im Modellnetz die Holzschwellen gegenüber den Betonschwellen überrepräsentiert sind und der Anteil der Betonschwellen zu niedrig ist.

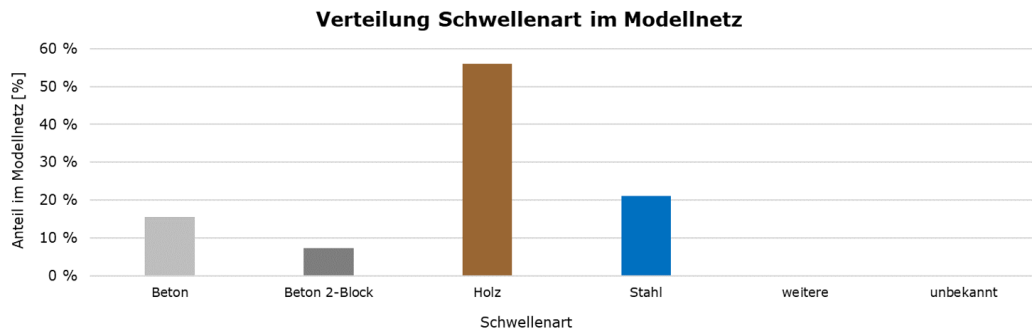


Abbildung 9.4: Schwellenverteilung im Modellnetz (Quelle: eigene Darstellung)

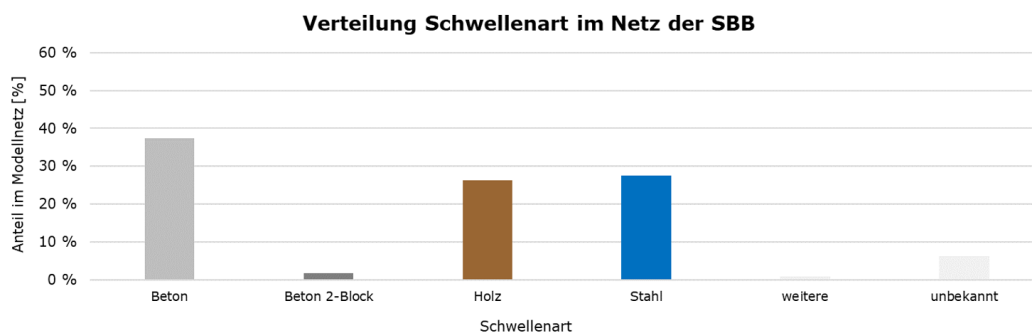


Abbildung 9.5: Schwellenverteilung im Netz der SBB (Quelle: eigene Darstellung)

## 9.4 Verteilung Schienenprofil

Die Verteilung des Schienenprofils ist einerseits für die benötigte Anzahl der Schienenwechsel entscheidend. Andererseits besteht auch ein leichter Einfluss auf die erreichbare Nutzungsdauer. Diese kann durch ein zu kleines Schienenprofil reduziert werden. Die Verteilung der Schienenprofile im Modellnetz ist in Abbildung 9.6 dargestellt. Die Verteilung im gesamten Netz der SBB ist aus Abbildung 9.7 ersichtlich. Im direkten Vergleich wird deutlich, dass das Schienenprofil 54E2 im Vergleich zu 60E1 im Modellnetz leicht übervertreten ist. In den Auswertungen zu den Standardelementen [94] der SBB beträgt der Anteil des Schienenprofils 46E1 nur rund 5 %. Die Profile 54E2 und 60E1 kommen mit jeweils etwas mehr als 45 % in etwa gleich häufig vor. Diese Diskrepanz erklärt sich somit wiederum durch die unterschiedliche Abgrenzung der Gleise bei den Auswertungen.

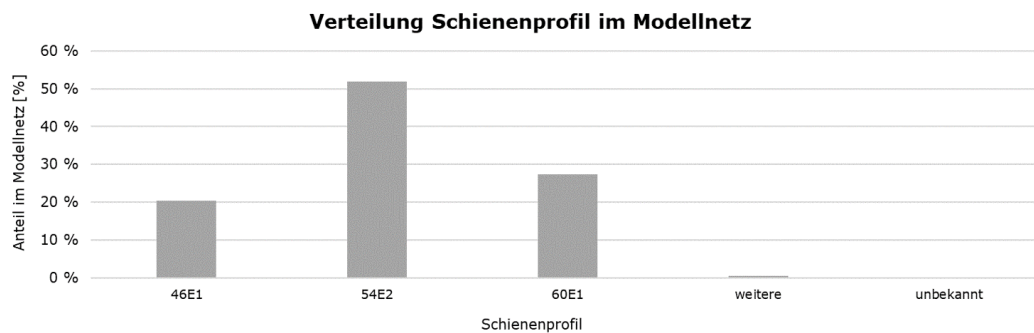


Abbildung 9.6: Schienenprofilverteilung im Modellnetz (Quelle: eigene Darstellung)

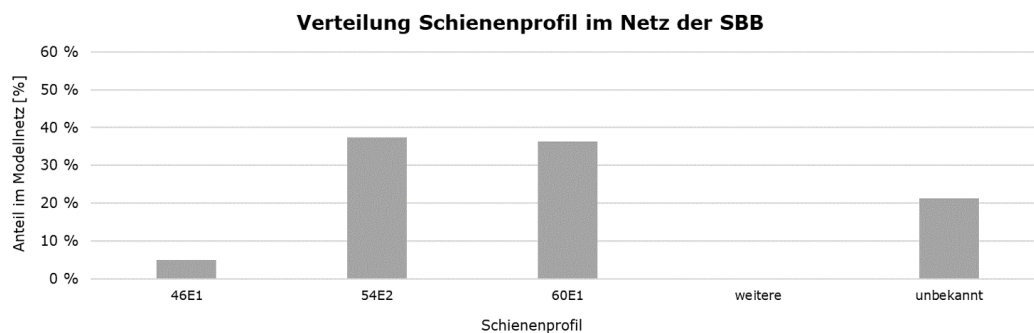


Abbildung 9.7: Schienenprofilverteilung im Netz der SBB (Quelle: eigene Darstellung)

## 9.5 Radienverteilung

Die Radienverteilung eines Netzes ist für die zu erwartende Nutzungsdauer und den Unterhaltsbedarf entscheidend. Der Unterhaltsbedarf wird höher, je kleiner der Radius wird. Die Schweiz weist im europäischen Vergleich dabei einen eher hohen Radienanteil auf. Die Radienverteilung des Modellnetzes ist aus Abbildung 9.8 ersichtlich. Ein Vergleich mit der Radienverteilung des gesamten Netzes der SBB in Abbildung 9.9 zeigt, dass das Modellnetz die Radienverteilung des Netzes der SBB hinreichend genau repräsentiert. Im Vergleich mit der Radienverteilung in der Auswertung zu den Standardelementen der SBB [94] ist der Anteil der geraden Strecke im Modellnetz etwas herabgesetzt. Die Auswertungen für die Standardelemente weisen hier eine relative Häufigkeit von 59 % auf, während im Modellnetz 49 % auf die Radienklasse größer 3.000 m fallen. Die fehlenden Prozente werden durch einen höheren Anteil in den Radienklassen unter 300 m und zwischen 1.200 m und 3.000 m kompensiert. Der Unterschied der beiden Betrachtungen ergibt sich wiederum aus der unterschiedlichen Abgrenzung der Gleise.

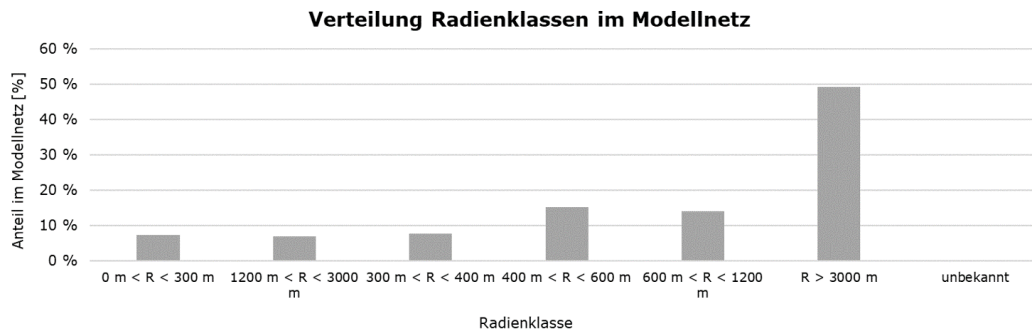


Abbildung 9.8: Radienverteilung im Modellnetz (Quelle: eigene Darstellung)

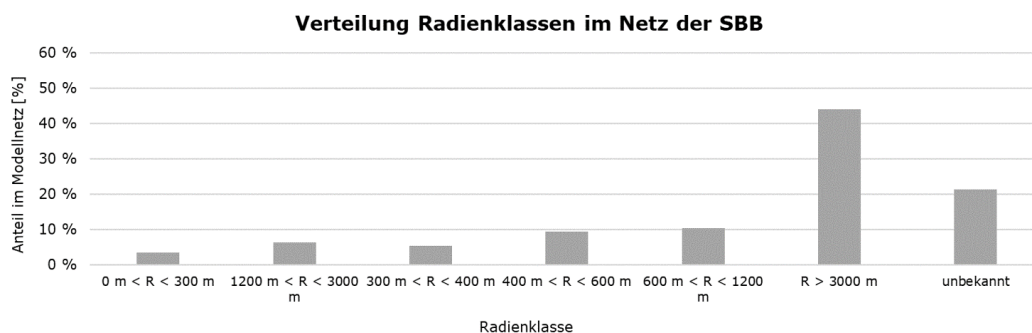


Abbildung 9.9: Radienverteilung im Netz der SBB (Quelle: eigene Darstellung)

## 9.6 Annahme Unterbauzustand

Bei der Definition des Unterbaus ist generell der Unterbau vom Untergrund zu unterscheiden. Der Untergrund stellt das anstehende Erdreich dar, welches nicht oder nur in den seltensten Fällen durch eine Untergrundsanie rung beeinflusst wird. Beim Unterbau handelt es sich um ein konstruktives Element des Gleiskörpers. Er bildet das Fundament des Oberbaus und grenzt sich mit dem Planum gegen den Oberbau ab. Die Erhebung des Unterbauzustands, ohne das Gleis zu öffnen, ist sehr komplex und heute Gegenstand der aktuellen Forschungen. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit nicht tiefergreifend auf das Thema eingegangen. Der Unterbau des Modellnetzes wird als Ausgangsbasis nach der Definition der Standardelemente als durchgehend „gut“ bezeichnet und ist damit ohne jeglichen negativen Einfluss auf die Nutzungsdauer oder den Unterhaltsbedarf der Fahrbahn. Ausschließlich im Szenario mit einer reduzierten Unterbausanierung in Unterkapitel 11.8 wird der Anteil von gutem Unterbau reduziert und ein entsprechender Anteil an schlechtem Unterbau angesetzt.

## 9.7 Die Streuung der Nutzungsdauer der Standardelemente

Das Modell der Standardelemente [94] definiert Nutzungsdauern ausreichend genau, um den Bedarf eines Netzes abzubilden. Es findet jedoch eine Vereinfachung statt. Die Gleise der SBB lassen sich mit den in Unterkapitel 7.2 beschriebenen Parametern und den daraus resultierenden 214 Standardelementen beschreiben. Werden zusätzliche Parameter zur Definition eines Standardelementes herangezogen, so vervielfacht sich die Anzahl der Standardelemente. Dies hat zur Folge, dass die resultierende Menge manuell nicht mehr bearbeitet werden kann sowie dass eine ausreichende statistische Menge zur Beschreibung des Standardelementes fehlt. Aus diesem Grund liegt jedem Standardelement eine gewisse statistische Streuung zugrunde. Der Einfluss der statistischen Streuung bewirkt, dass die Schwankungen der jährlichen Erneuerungsmenge geglättet werden. Die Verteilfunktion kann über die Auswertung historischer Erneuerungsprojekte erfolgen. Dazu müssen Informationen über die real erreichten Nutzungsdauern erneuerter Gleisabschnitte sowie Informationen zur Zuordnung zu den Standardelementen vorhanden sein.

Um eine statistisch relevante Stichprobe zu erhalten, müssen diese Informationen für Ausbauprojekte mehrerer Jahre zur Verfügung stehen. Es ist zu bedenken, dass zur Erstellung der Standardelemente das gesamte Netz zur Verfügung steht, pro Jahr werden jedoch nur rund 1 % bis 2 % des Netzes erneuert, welche dann zur statistischen Auswertung der realen Verteilfunktion herangezogen werden können. Bezogen auf das jeweilige Standardelement ist somit die pro Jahr ge-

nerierte Menge zur Auswertung sehr gering. Zudem ist in Betracht zu ziehen, dass ein Datenauszug der real erreichten Nutzungsdauer nicht der strategischen Nutzungsdauer der Standardelemente entspricht. Es werden somit unbekannte Einflüsse auf die Nutzungsdauer mit abgebildet. Zudem spiegeln heute ausgebaute Gleisabschnitte tendenziell vor allem das Unterhaltsregime und die kumulierte Belastung vergangener Jahre wider. Eine Hochrechnung basierend auf diesen Daten würde das heutige Unterhaltsregime und heutige Belastungsprognosen außer Acht lassen.

Bei der Erhebung der Verteilfunktionen für Nutzungsdauern ist ferner darauf zu achten, dass die gesamte Bandbreite der Verteilung bereits abgebildet werden kann. Das bedeutet, dass bei einer erwarteten Nutzungsdauer von 30 Jahren rund 60 Jahre Erfahrung vorhanden sein müssen. Diese Bedingung kann heute vor allem bei der Bestimmung der Nutzungsdauer von Betonschwellengleisen nicht eingehalten werden, weshalb die mittlere Nutzungsdauer der Betonschwellen anhand einer Auswertung als zu niedrig ausgewiesen wird. In der Schweiz wurden die ersten Betonschwellen in den 1970er-Jahren eingebaut. In den 1990er-Jahren erhielt die Betonschwelle eine neue Konstruktion, da es zu einer Rissbildung bei den bestehenden Schwellen kam. Dies bedeutet, dass die ältesten Schwellen der aktuellen Betonschwellenkonstruktion im Gleis heute 30 Jahre alt sind und damit den erwarteten Mittelwert der Nutzungsdauer von 50 Jahren noch nicht erreicht haben.

Im Rahmen einer Projektarbeit an der Universität Bern aus dem Jahr 2017 [33] wurde der Einfluss der Streuung der Nutzungsdauer auf den Erneuerungsbedarf der Gleise untersucht. Dafür wurden 22 % des Netzes der SBB für eine Simulation herangezogen. Es wurde die Hochrechnung des Erneuerungsbedarfs auf Basis der Standardelemente und einer Hochrechnung mit der hinterlegten Streuung der Nutzungsdauer verglichen. Als Basis für die Annahmen der Streuung wurde die Auswertung der Fahrbahnerneuerung des Jahres 2016 herangezogen. Die daraus ausgewertete Streuung der Nutzungsdauer nach Schwellenart wurde der Nutzungsdauer der Standardelemente hinterlegt. Als Ergebnis konnte eine Abweichung des jährlichen Erneuerungsbedarfs von 7 % nachgewiesen werden, wenn der Erneuerungsbedarf mit oder ohne den Einfluss der Streuung der Nutzungsdauer berechnet wird. Es ist somit klar zu empfehlen, die Streuung der Standardelemente in einem Netz auszuwerten und diese etwaigen Modellen zur Berechnung des Erneuerungsbedarfs zu hinterlegen.

Auf Basis der Standardelemente wurde eine Strategie entwickelt, die die Oberbauform für das gesamte Hauptgleisnetz der SBB darstellt. Primär definiert sich diese Strategie über die einzubauende Schwellenart. Ein Abgleich des Modellnetzes mit dem daraus formulierten Zielnetz der SBB zeigt einen Umsetzungsgrad der Strategie von 54 %. Dabei werden die Nebengleise als „strategiekonform“ angenommen, da hier eine Definition für die Strategie fehlt. In Abbildung 9.10 ist die Auswertung des Umsetzungsgrades der Strategie zu erkennen. Darin ist



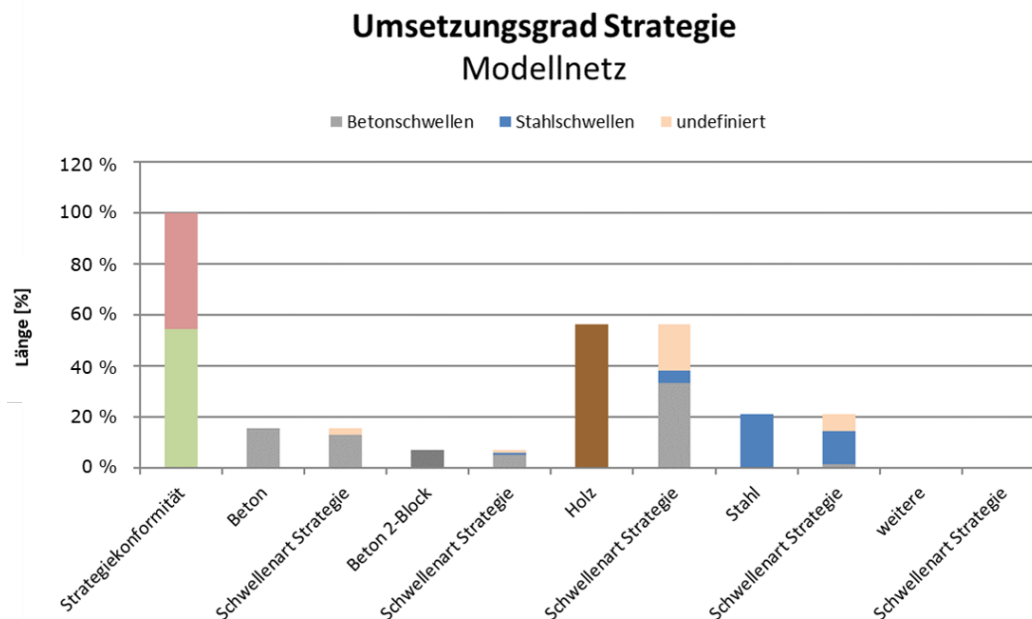


Abbildung 9.10: Schwellenverteilung im Modellnetz sowie die Umsetzung der Oberbaustrategie (Quelle: eigene Darstellung)

neben dem Umsetzungsgrad von 54 % auch zu erkennen, wie sich die Schwellenart zukünftig verändern wird. Heutige Betonschwellen bleiben grundsätzlich als Betonschwellen bestehen, wobei ein Teil davon auf Nebengleisen verlegt ist und somit als undefiniert dargestellt wird. Bi-Block-Schwellen werden fast vollständig durch Betonschwellen ersetzt. Von den heute verlegten Holzschwellen werden 60 % bei der nächsten Erneuerung zu Betonschwellen, 8 % zu Stahlschwellen und 33 % liegen im Nebengleis und gelten somit als strategiekonform. 62 % der Stahlschwellen bleiben als Stahlschwellen erhalten und nur 6 % werden durch Betonschwellen ersetzt. 31 % liegen im Nebengleis und gelten damit ebenfalls als strategiekonform. Nur 0,06 % des Modellnetzes hat als Definition der Schwellenart „weitere“. Dies bezeichnet Oberbauformen wie die Feste Fahrbahn oder Sonderformen wie die Flachbetonschwelle B06.

## 9.8 Annahme Kosten

Für die Modellrechnung erfolgt die Berechnung der jährlichen Erneuerungsmenge auf Basis der Formel 7.1 sowie das jährliche Erneuerungsbudget nach Formel 7.4. Der Unterhaltsbedarf einer Anlage wird gleichmäßig über die Nutzungsdauer verteilt und ist keinen Schwankungen unterlegen. Auch die jährliche Erneuerungsmenge wird gleichverteilt angesetzt und die Altersverteilung im Modellnetz nicht

miteinbezogen. Das Modellnetz weist eine Gesamtlänge von rund 110 km Länge auf. Basierend auf einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 36 Jahren, die sich gewichtet nach der Länge aus den Nutzungsdauern laut den Standardelementen [94] errechnet, ergibt sich ein jährlich zu erneuerndes Volumen von 3,076 km. Die Kosten für die Erneuerung werden mit 2.300 CHF/m ohne Unterbausanierung und 3.500 CHF/m mit Unterbausanierung angesetzt und im Rahmen von Sensitivitätsanalysen variiert. Die jährlichen Unterhaltskosten werden unabhängig der Oberbauform angesetzt und betragen 23 CHF/m und Jahr.

## 9.9 Aufbau Modellrechnung und Abgrenzungen

Die Modellrechnung, basierend auf dem beschriebenen Modellnetz, dient der Veranschaulichung von Einflüssen auf die Kosten bei unterschiedlichen Erneuerungs- und Unterhaltsstrategien. Die Berechnung basiert grundlegend auf einem mittleren Bedarf des Modellnetzes. Das bedeutet, dass die reale Altersverteilung sowie die Verteilung der Standardelemente im Modellnetz dazu genutzt wird, um den mittleren jährlichen Bedarf an Erneuerungen und Unterhalt zu erheben. Es wird jedoch in weiterer Folge nicht mit den spezifischen Werten gerechnet, sondern ausschließlich mit den Mittelwerten. Zudem wird der Erneuerung- und Unterhaltsbedarf nicht – wie ansonsten üblich – in Mengen ausgegeben, sondern in Kosten. Dieser Ansatz wurde gewählt, um den effektiven Kostenbedarf pro Jahr aufzeigen zu können, da übliche Bewertungsverfahren wie die Annuitätenmethode zwar zum Ausweisen der Wirtschaftlichkeit einer Entscheidung dienen können, jedoch den realen Zahlungsstrom pro Jahr verzerren. Für ein EIU ist jedoch vor allem die Frage der Finanzierung ein wichtiger Teil der Strategie.

Durch den Ansatz des mittleren jährlichen Bedarfs ist es problemlos möglich, die Berechnung auch für andere Eisenbahnnetze anzuwenden, sofern der jährliche Bedarf bekannt ist. Die Berechnung ist somit unabhängig von der Art der Erhebung des Bedarfs wie in Kapitel 7 beschrieben. Die Modellrechnung kann somit nicht ausweisen, ob der heutige jährliche Bedarf eines EIUs dem optimierten strategischen Bedarf entspricht und ob Finanzierungslücken aus der Vergangenheit bestehen. Dies ist mit ein Grund, warum als Modellnetz nicht das Netz der SBB selbst gewählt wurde. Eine Modellrechnung des gesamten Netzes der SBB würde suggerieren, dass dies dem aktuellen Bedarf entspricht, der reale Bedarf wird jedoch vor allem durch die Vergangenheit beeinflusst.

# 10 Die Bewertung des verursachten Schadens

Die Modellrechnung ergibt als Ergebnis jährliche Kosten und als Summe davon den Kostenbedarf über die Zeit. Dabei sind die eingesetzten Mittel und die Jahre bis zur Stabilisierung des Netzes jedoch recht unterschiedlich. Um darstellen zu können, welche strategische Stoßrichtung verfolgt werden soll, wenn zu wenig finanzielle Mittel zur Verfügung stehen, damit der finanzielle Schaden möglichst gering gehalten werden kann, bedarf es eines Kennwerts. Um den verursachten Schaden durch fehlendes Budget zu bewerten, wird die Rendite herangezogen. Die Rendite setzt den Gewinn und die eingesetzten Mittel wie folgt ins Verhältnis:

$$Rendite = \frac{Gewinn}{eingesetztes\ Kapital} \quad (10.1)$$

In diesem Fall der Bewertung einer Investition wird kein Gewinn erzielt, da die Einnahmen vom Staat kompensiert werden, jedoch kein Gewinn erwirtschaftet werden darf. In diesem Fall wird also der Gewinn mit dem Verlust ersetzt, der durch die versuchte Einsparung entstanden ist.

$$Rendite = \frac{\sum_{n=1}^x Gesamtkosten_{IST} - \sum_{n=1}^x Gesamtkosten_{Strategie}}{Gesamtkosten_{IST}} \quad (10.2)$$

Hierbei stellt  $x$  die Anzahl der Jahre dar, bis die jährlichen Gesamtkosten<sub>IST</sub> wieder auf das Niveau der Gesamtkosten<sub>Strategie</sub> gesunken sind. Somit wird eine negative Rendite erreicht, die den Schaden zum Ausdruck bringt. Die Anzahl der Jahre  $x$  zum Erreichen der Strategie zeigt damit auch an, wie viele Jahre lang Mehrkosten entstehen. So verursacht eine Rendite mit einem niedrigen  $x$  eine viel größere Herausforderung zur Finanzierung als dieselbe Rendite mit einem hohen  $x$ .



# 11 Reduktion des Erneuerungsbudgets

Die Reduktion des Erneuerungsbudgets ist der einfachste Weg, die Kosten der Anlage kurzfristig zu reduzieren, sie langfristig jedoch zu erhöhen. Die Kosten der Erneuerung sind im Vergleich zu den Kosten des Unterhalts verhältnismäßig hoch. Kurzfristig werden die teuren Ausgaben der Erneuerung durch eine Unterhaltsarbeit ersetzt. Dies lässt das verwendete Budget kurzfristig sinken, ohne vorerst spürbare Konsequenzen. Dies führt zu einem unwirtschaftlichen Bewirtschaften der Anlage und einem anstauenden Bedarf an Fahrbahnerneuerungen, der langfristig gesehen wiederum einen zu hohen Budget- und Ressourcenbedarf zur Folge hat. Dieser vor allem finanziell getriebene Ansatz findet sich bei jeder Investition wieder. Ist die Nutzungsdauer einer Anlage oder eines Produktes wirtschaftlich beendet, dann stellt sich zwangsläufig die Frage nach der Finanzierung einer neuen Anlage. Konnte während der Nutzungsdauer nicht der dafür nötige Geldwert angespart werden, dann bleibt meist nur die Option des teuren Unterhalts. Dieses Phänomen lässt sich sowohl in privaten Haushalten wie auch in jedem Unternehmen, das hohe Investitionen benötigt, beobachten. Bei einem Unternehmen mit einer Vielzahl von Anlagen gibt es bei einer Reduktion der Erneuerungsquote und damit einem reduzierten Erneuerungsbudget mehrere Möglichkeiten. Es bleibt hier die Option, das für die Investitionen zur Verfügung stehende Budget aktiv zu steuern oder je nach treibenden Parametern ohne strategischen Hintergrund zu handeln. Bei der Fahrbahn im Speziellen wird nur sehr selten aus strategischer Sicht gesteuert, auf Grund des meist fehlenden Wissens über den Kosten-Nutzen-Effekt unterschiedlicher Fahrbahnerneuerungen. Entscheidungen für die Schiebung von Fahrbahnerneuerungen werden meist aus rein operativer Sicht bezüglich Planungsfortschritt, Intervallsituation oder vertraglicher Strafzahlungen bei Verschiebungen gefällt. Der netzweite Kostenbedarf verändert sich abhängig von der Auswahl der zu erneuernden Abschnitte. Somit kann selbst bei unwirtschaftlichem Handeln noch die Höhe der Auswirkung dieses Handelns beeinflusst werden.

In diesem Kapitel soll der Effekt auf die Fahrbahn genauer analysiert werden, wenn der aus wirtschaftlicher Sicht benötigte Bedarf der Erneuerung nicht durchgeführt wird. Darauf aufbauend wird aufgezeigt, in welcher Zeit und mit welchen Kosten der „gesunde“ Ausgangszustand bei der Fahrbahn wieder hergestellt werden kann. Bei der Erneuerung bestehen zwei Möglichkeiten, Budget einzusparen. Einerseits ist das die Reduktion der Fahrbahnerneuerungsmenge. Diese Einsparung führt zwangsläufig zu Nachholbedarf, welcher in den folgenden Unterkapiteln

genauer definiert und analysiert wird. Ein anderer Weg ist, am Ausbaustandard von Erneuerungsprojekten zu sparen, was vor allem durch die Einsparung von Unterbausanierungen versucht wird. Dieser Effekt wird nachfolgend ebenso behandelt.

## 11.1 Definition von „Nachholbedarf“

Nachholbedarf entsteht, wenn Anlagen später als zum wirtschaftlichen Zeitpunkt erneuert werden. Durch die entstandene Menge an Nachholbedarf kann das finanzielle Ausmaß beschrieben werden. Es können die entstehenden Mehrkosten bei einer Reduktion der Erneuerungsmenge definiert werden. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer wird, wie in Abschnitt 5.2.3 erläutert, durch das Überschreiten des Minimums der durchschnittlichen jährlichen Kosten definiert. Bei einer Überschreitung dieses Minimums wird demnach mehr Geld über die Nutzungsdauer ausgegeben als nötig gewesen wäre.

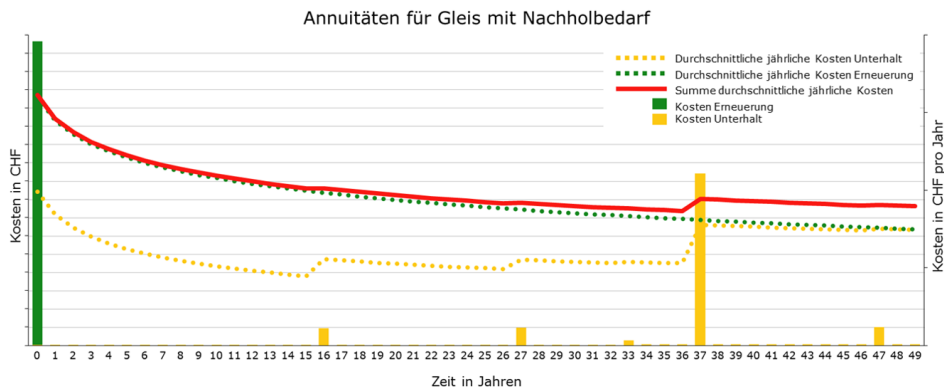


Abbildung 11.1: LCC eines Gleises mit Nachholbedarf [66] (Quelle: eigene Darstellung)

In Abbildung 11.1 ist der Zahlungsstrom eines Gleises aus dem Netz der SBB über die Nutzungsdauer dargestellt. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass die wirtschaftliche Nutzungsdauer im Jahr 37 erreicht und eine Erneuerung in diesem Jahr die wirtschaftlichste Maßnahme gewesen wäre. Alle Kosten, die somit in den Folgejahren an Unterhalt anfallen, sind vermeidbare Mehrkosten und Kosten, die durch den Nachholbedarf anfallen. Dabei kann sich die Annuitätenkurve am Ende oder auch nur am vermeintlichen Ende einer Nutzungsdauer sehr unterschiedlich darstellen.

In Abbildung 11.2 sind nach Veit [90] mögliche unterschiedliche Ausprägungen von Annuitätenverläufen am Ende der Nutzungsdauer dargestellt. In Grafik (1)

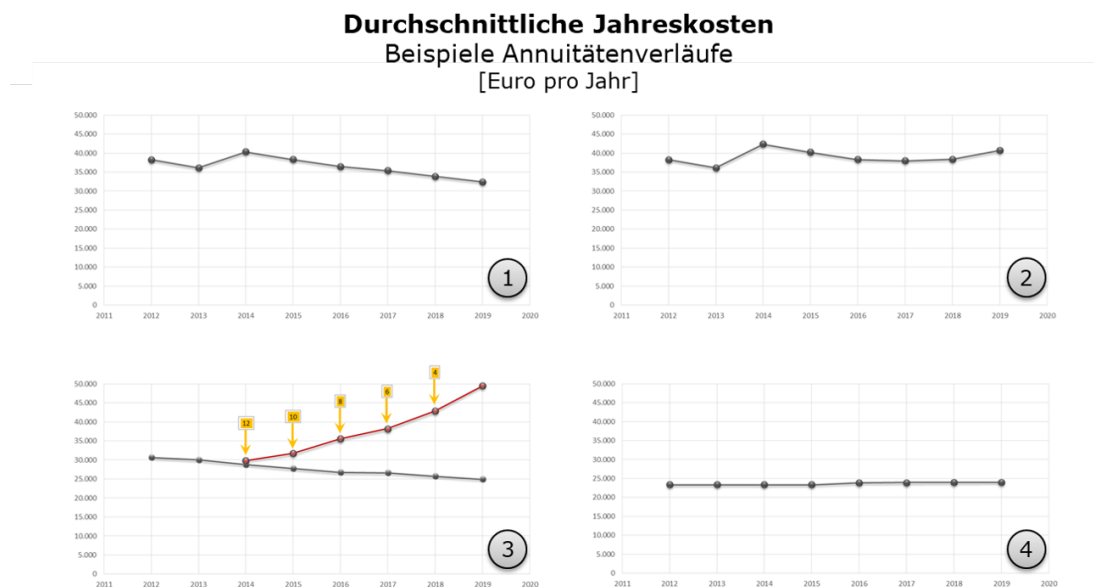


Abbildung 11.2: Beispiele Annuitätenverläufe [90]

wird im Jahr 2014 eine Unterhaltsmaßnahme getätigt, die zu einer Erhöhung der Annuität führt. In weiterer Folge sinkt die Annuität von Jahr zu Jahr weiter. Das wirtschaftliche Ende der Nutzungsdauer ist noch nicht erreicht. In Grafik (2) zeigt sich ein Sprung in der Annuitätenkurve im Jahr 2014. Es kommt danach zu einem leichten Absinken der Annuitätenkurve und ab dem Jahr 2018 zu einem erneuten kontinuierlichen Anstieg. Der wirtschaftlichste Zeitpunkt für eine Erneuerung ist das Jahr 2014. Grafik (3) zeigt ein kontinuierliches Sinken der Annuität. Um die Kostenwahrheit darzustellen, müssen die Betriebserschwerungskosten miteingerechnet werden. Die sinkende Annuitätenkurve entsteht, da der benötigte Unterhalt durch eine Langsamfahrstelle kompensiert wird. Die rote Linie zeigt den Annuitätenverlauf inklusive Betriebserschwerungskosten, welche durch eine Langsamfahrstelle verursacht werden. Das wirtschaftlichste Jahr für eine Erneuerung ist das Jahr 2015. Grafik (4) zeigt eine stabile Annuität über die Jahre. Das Erneuerungsjahr ist hier ohne Folgeschaden frei wählbar. Um die Erneuerungsmenge möglichst tief zu halten, sollte ein spätes Erneuerungsjahr gewählt werden. Müssen jedoch Ressourcen ausgelastet werden oder Baustellenlängen optimiert werden, so entsteht kein Schaden durch eine frühere Erneuerung.

Durch die Erhebung des Nachholbedarfs eines Netzes kann eine Aussage über die fehlende Erneuerungsmenge der Vergangenheit getroffen werden. Abhängig von dem jeweiligen Erneuerungsprozess einer Eisenbahninfrastruktur kann sich der Nachholbedarf unterschiedlich ausprägen. Die Ausprägung hängt von dem Verfahren der Meldung der Fahrbahnerneuerungen bzw. der strategischen Entscheidung für Fahrbahnerneuerungen ab. Ein kleiner Anteil an Nachholbedarf

kann anlagenüber- greifend sogar die Gesamtkosten der Bahn senken. Steht beispielsweise ein großer Bahnhofsumbau an, so ist es nicht zielführend, ein paar Jahre vor diesem Umbau noch Anlagen zu erneuern, die kurze Zeit später, aufgrund der geometrischen Anpassungen im Bahnhof, wieder erneuert werden müssen. Während grundlegend eine zu frühe Erneuerung wirtschaftlicher ist als die Bildung von Nachholbedarf, ist es in diesem Sonderfall sinnvoll, Nachholbedarf zu erzeugen. Auch zur Senkung der Einheitskosten innerhalb einer Anlagengattung kann eine Überschreitung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer zweckdienlich sein. In diesem Fall sollte jedoch grundlegend eine zu frühe Erneuerung der Anlagen angestrebt werden, um den sprunghaften Anstieg der Kosten zu vermeiden.

Bei der SBB fand der Nachholbedarf erstmals im Netzzustandsbericht 2010 [47] Erwähnung. Er wurde in diesem Jahr auf 430 km beziffert. Der Nachholbedarf stellt dabei den dringend zu erneuernden Nachholbedarf dar, welcher die strategische Nutzungsdauer um mehr als 5 Jahre überschritten hatte. Diese Zahl erhöhte sich bis zum Netzzustandsbericht 2016 stetig auf 715 km. Diese Zahlen spiegeln eindeutig die fehlenden Fahrbahnerneuerungsmengen der SBB wider. Eine Stabilisierung oder sogar Reduktion des Nachholbedarfs kann ausschließlich durch eine Erhöhung der Erneuerungsmengen erreicht werden. Dabei stellen diese 715 km an Nachholbedarf keineswegs ein Sicherheitsrisiko dar. Auch die Japanische Bahn hat kein Sicherheitsproblem, obwohl sie ihr Netz ausschließlich im Nachholbedarf betreibt. Nachholbedarf ist eine Frage der Wirtschaftlichkeit und damit eine Frage der angestrebten Kosten. Er verursacht zusätzlichen Mittelbedarf im Unterhalt und in weiterer Folge soll aus diesem Grund auf die Berechnung der Mehrkosten im Nachholbedarf näher eingegangen werden.

### **11.1.1 Die Entwicklung der Annuität im Nachholbedarf**

Um die Kostenfunktion des Nachholbedarfs für ein Fahrbahnmodell zu ermitteln, wurden die Erneuerungsprojekte der ÖBB und der SBB ausgewertet.

#### **Bewertung der Erneuerungsprojekte der ÖBB**

Erneuerungs- bzw. Re-Investitionsprojekte der ÖBB werden seit dem Jahr 2011 jährlich vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft an der TU Graz auf ihre Wirtschaftlichkeit hin überprüft. Im Zuge dessen werden für die zu prüfenden Projekte die Unterhaltszyklen der Vergangenheit erhoben sowie eine Prognose der zukünftig anfallenden Unterhaltsarbeiten erstellt. Alle bewerteten Projekte der Jahre 2011-2014 wurden auf den Verlauf der Annuitätenkurve nach Überschreiten des optimalen Re-Investitionszeitpunktes hin ausgewertet. Das Ergebnis ist in Abbildung 11.3 dargestellt. Auf der Abszisse sind die einzelnen Erneuerungsprojekte nach Bewertungsjahren aufsteigend aufgetragen. Die Ordinate



zeigt den prozentualen Anstieg der Annuität bei 0 % Zinssatz im Verhältnis zur minimalen Annuität, welche mit 100 % angegeben ist.

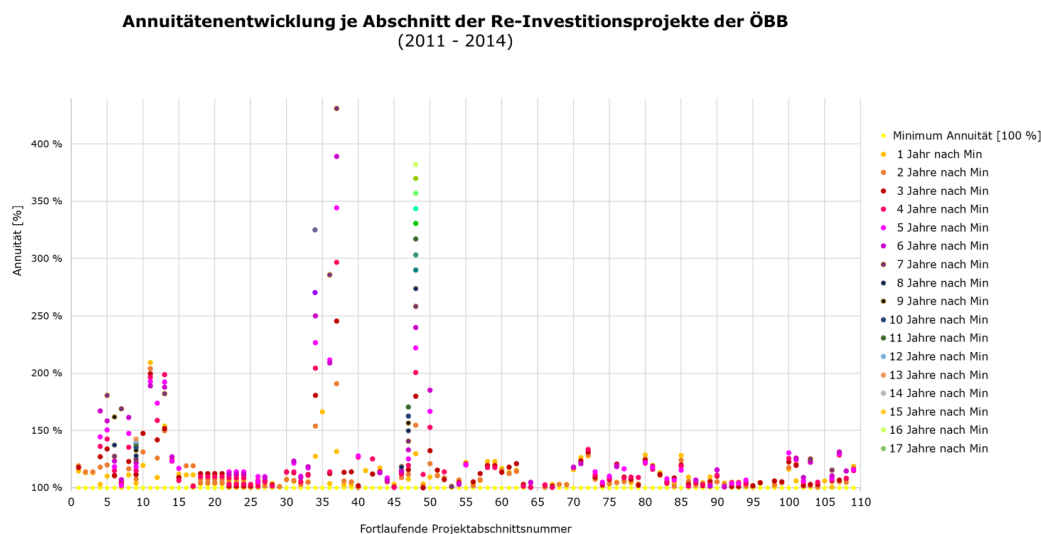


Abbildung 11.3: Erhöhung der Annuität nach Überschreiten des optimalen Erneuerungszeitpunktes der Re-Investitionsprojekte der Jahre 2011 bis 2014 der ÖBB (Quelle: eigene Darstellung)

Deutlich zu erkennen sind höhere Kosten in den Projekten des Jahres 2011 (Nummer 1-10). Dies lässt sich auf eine Umstellung der Berechnungsmethode nach dem Jahr 2011 zurückführen. Weiters fallen einzelne Projekte mit sehr hohen Kosten und einer langen Überschreitung in den darauffolgenden Jahren auf (Nummer 34, 37, 47, 48 und 50). Dabei handelt es sich ausnahmslos um Projekte mit einer Langsamfahrstelle. In den darauf folgenden Jahren wurden die Kosten der Langsamfahrstelle nicht mehr in die Annuitätenberechnung miteinbezogen. Auf Grund der Erfahrung wird die Langsamfahrstelle nur im Bericht erfasst und als eindeutiges Kriterium gesehen, dass die wirtschaftliche Nutzungsdauer beendet ist. Aus diesem Grund wurden für eine weiterführende Auswertung die Projekte mit einer finanziell bewertete Langsamfahrstelle herausgenommen. Das Ergebnis der Annuitätenentwicklung nach dem wirtschaftlich optimalen Erneuerungsjahr für Projekte ohne Langsamfahrstelle ist in Abbildung 11.4 in Form von Boxplots dargestellt.

Aus der Auswertung zu erkennen ist ein über die Jahre stufenweiser stetiger Anstieg der Annuität. Dabei ergibt sich alle zwei Jahre eine leichte Stagnation des Anstiegs der Annuität. Dies begründet sich in den angesetzten Maßnahmen, die meist den Zustand für rund zwei Jahre verbessern, bevor eine erneute Maßnahme gesetzt werden muss. Nach sieben Jahren ist nur mehr ein einziges Erneuerungs-

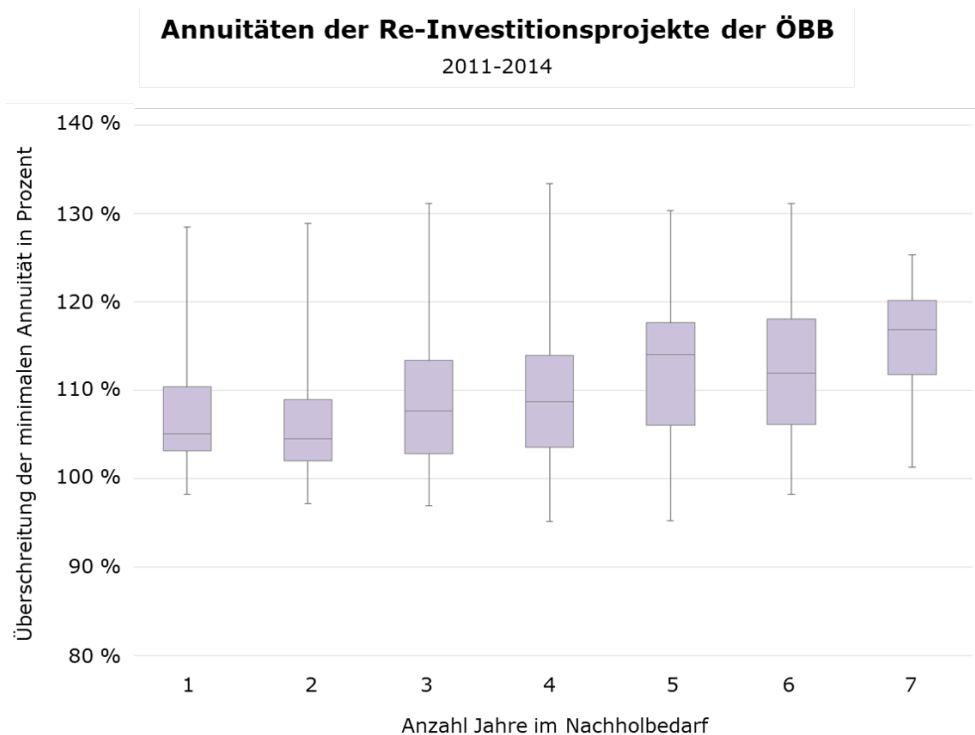


Abbildung 11.4: Boxplots der Annuitäten der Re-Investitionsprojekte der ÖBB in den Jahren 2011 bis 2014 nach Überschreiten des optimalen Erneuerungszeitpunktes (Annuität = 100 %) (Quelle: eigene Darstellung)

projekt bewertet, womit die statistische Auswertung beendet wird. In Summe wurden 52 Erneuerungsprojekte ausgewertet, die aus 118 einzelnen Gleisabschnitten bestehen und für die eine Annuitätenkurve berechnet wurde. Davon wiesen 42 Projekte mit 97 Gleisabschnitten keine Langsamfahrstelle auf und konnten für die Auswertung herangezogen werden.

### Bewertung der Erneuerungsprojekte der SBB

Für die Auswertung des Nachholbedarfs bei der SBB konnte nicht auf eine Bewertung von Re-Investitionsprojekten zurückgegriffen werden, da dies nicht systematisch zur Anwendung kommt. Das Netz der SBB weist jedoch eine ausreichend große Menge an Nachholbedarf auf, um die real angefallenen Kosten im Nachholbedarf zu bewerten. Diese Methode bietet den Vorteil, dass sie nicht auf Annahmen und Prognosen basiert, sondern die realen Kosten zeigt. In einer Studienarbeit [44] zusammen mit der ETH Zürich wurden die Fahrbahnerneuerungen des Jahres 2017 auf das Auftreten von Nachholbedarf untersucht. Für das Jahr 2017 konnten 93,8 % aller angemeldeten Gleisobjekte und 87,2 % aller

angemeldeten Weichenobjekte bewertet werden. Davon wiesen 6,1 % der Objekte einen nachweisbaren Nachholbedarf auf. Auf Grund fehlender Unterhaltsdaten wird jedoch davon ausgegangen, dass die reale Menge deutlich höher liegt. Aus den ausgewiesenen Objekten konnte in weiterer Folge der Annuitätenverlauf im Nachholbedarf berechnet werden, der in Abbildung 11.5 ebenfalls in Form von Boxplots dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass sich der Median über die 10 Jahre Nachholbedarf zwischen 116 % und 104 % bewegt. Der Verlauf der Kosten im Nachholbedarf zeigt in einer ersten Auswertung einen unerklärbaren Wellenverlauf. Dieser wellenartige Verlauf des Medians über die Jahre erklärt sich jedoch nicht durch unterschiedliche Unterhaltsmaßnahmen, sondern durch die großen Unterschiede der Verweildauer im Nachholbedarf. In Abbildung 11.6 sind die Gleisabschnitte, welche nur 3 Jahre im Nachholbedarf verbleiben, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Median im Jahr 1 jeweils sprunghaft ansteigt und dann von 108 % auf 102 % absinkt. Im darauffolgenden Jahr wurden die Gleisabschnitte erneuert.

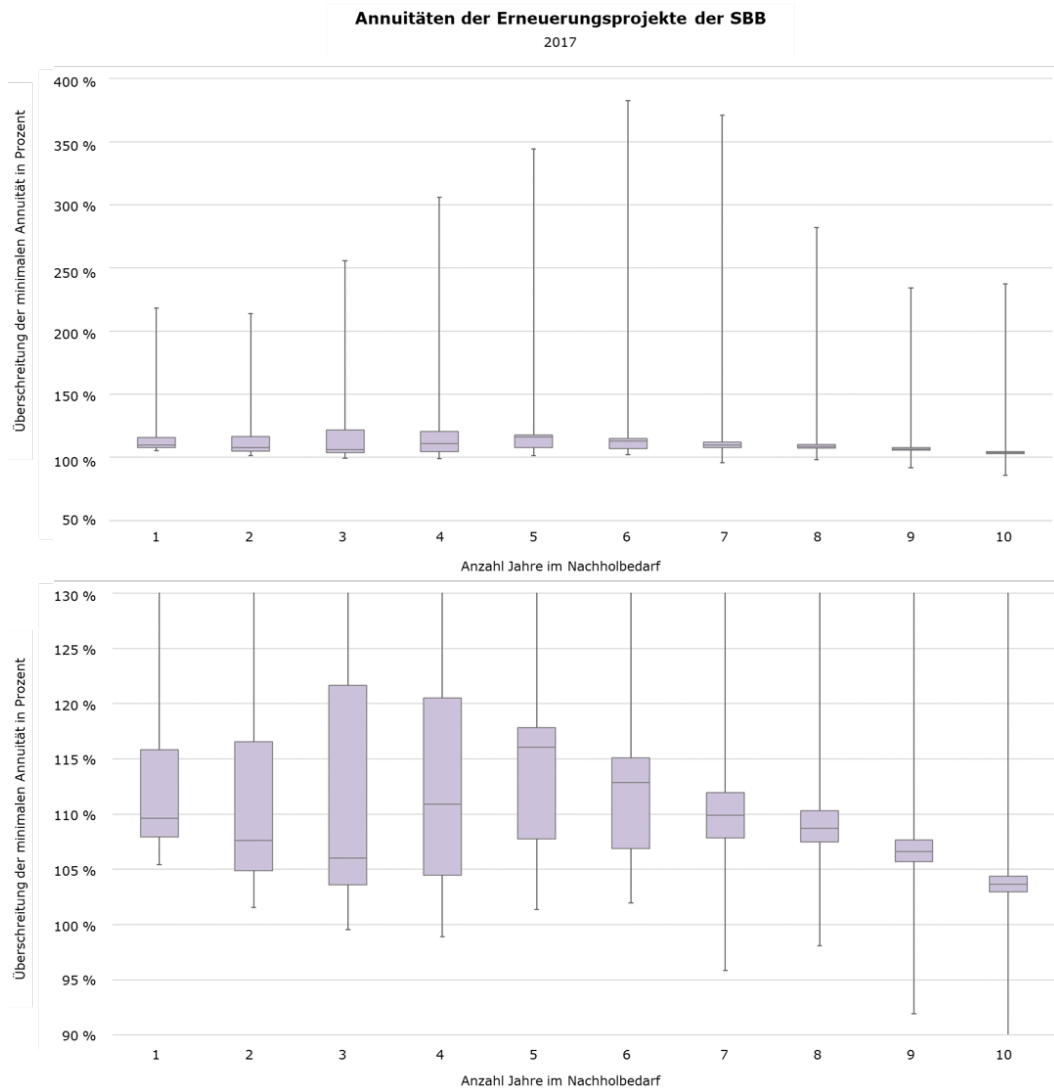


Abbildung 11.5: Boxplot der Annuitäten der Gleisabschnitte > 10 m im Nachholbedarf der SBB der Fahrbahnerneuerung 2017 [44]

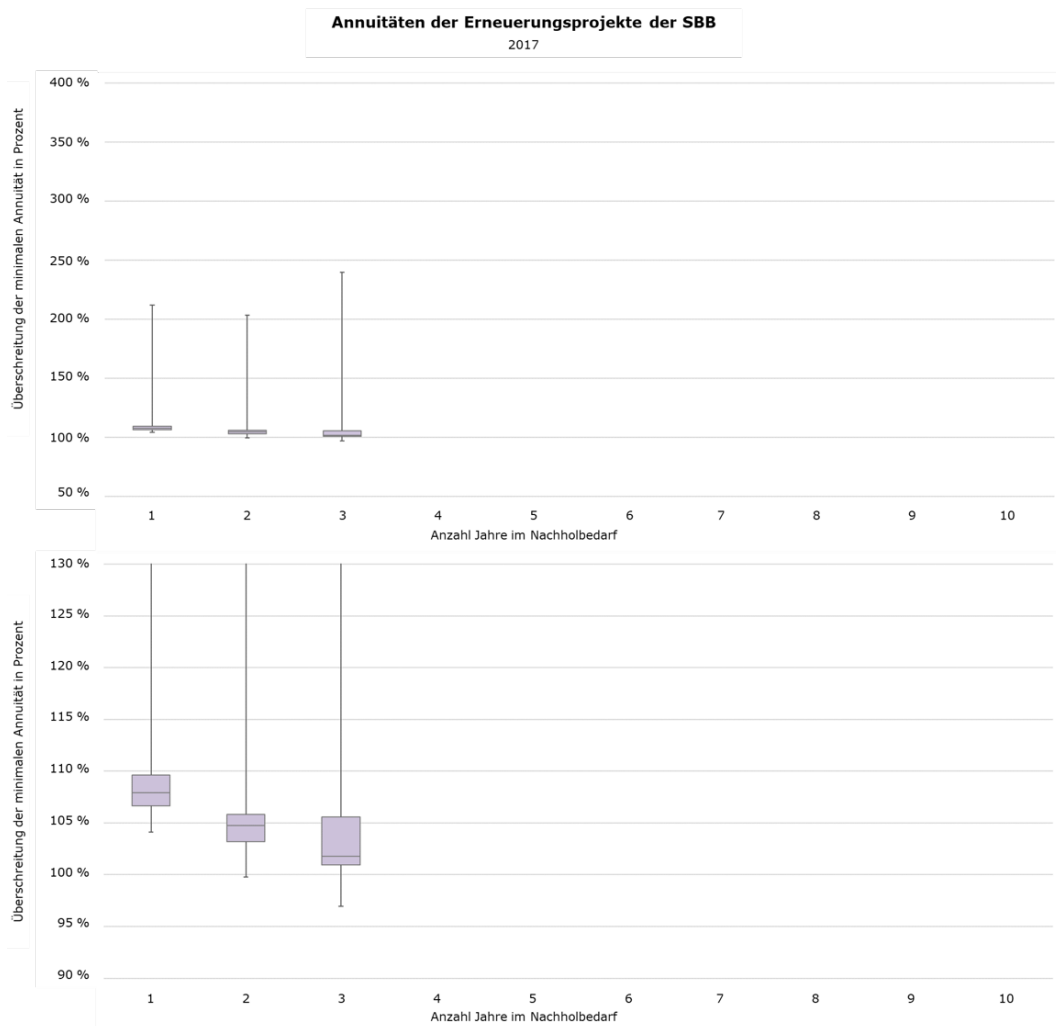


Abbildung 11.6: Boxplot der Annuitäten der Gleisabschnitte  $> 10$  m im Nachholbedarf der SBB der Fahrbahnerneuerung 2017,  $< 3$  Jahre im Nachholbedarf [44]

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Auswertung der Gleisabschnitte, welche 4 Jahre im Nachholbedarf verweilen. Diese sind in Abbildung 11.7 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass der Median im Jahr 1, ebenso wie in den Projekten unter 3 Jahren, jeweils sprunghaft ansteigt und dann von 109 % auf 102 % absinkt. Im darauffolgenden Jahr wurden die Gleisabschnitte erneuert. Durch die Abtrennung der Abschnitte unter 3 bzw. unter 4 Jahren wird auch die Entwicklung der realen Kosten im Nachholbedarf der Projekte sichtbar, die mehr als 4 Jahre im Nachholbedarf verbleiben. Der Median dieser Projekte steigt ebenfalls im Jahr 1 sprunghaft auf 128 % an und stagniert dann bis zum Jahr 10 auf 104 %. Der Verlauf der Annuitäten ist in Abbildung 11.8 dargestellt. Dies lässt darauf schließen, dass Gleisabschnitte entweder 3 bis 4 Jahre im Nachholbedarf verbleiben oder etwa 7 bis 10 Jahre. Während der 3- bis 4-jährige Nachholbedarf ausschließlich durch Schienenwechsel verursacht wurde, kann der 7- bis 10-jährige Nachholbedarf sowohl durch Schienenwechsel als auch durch eine Schotterreinigung verursacht werden.

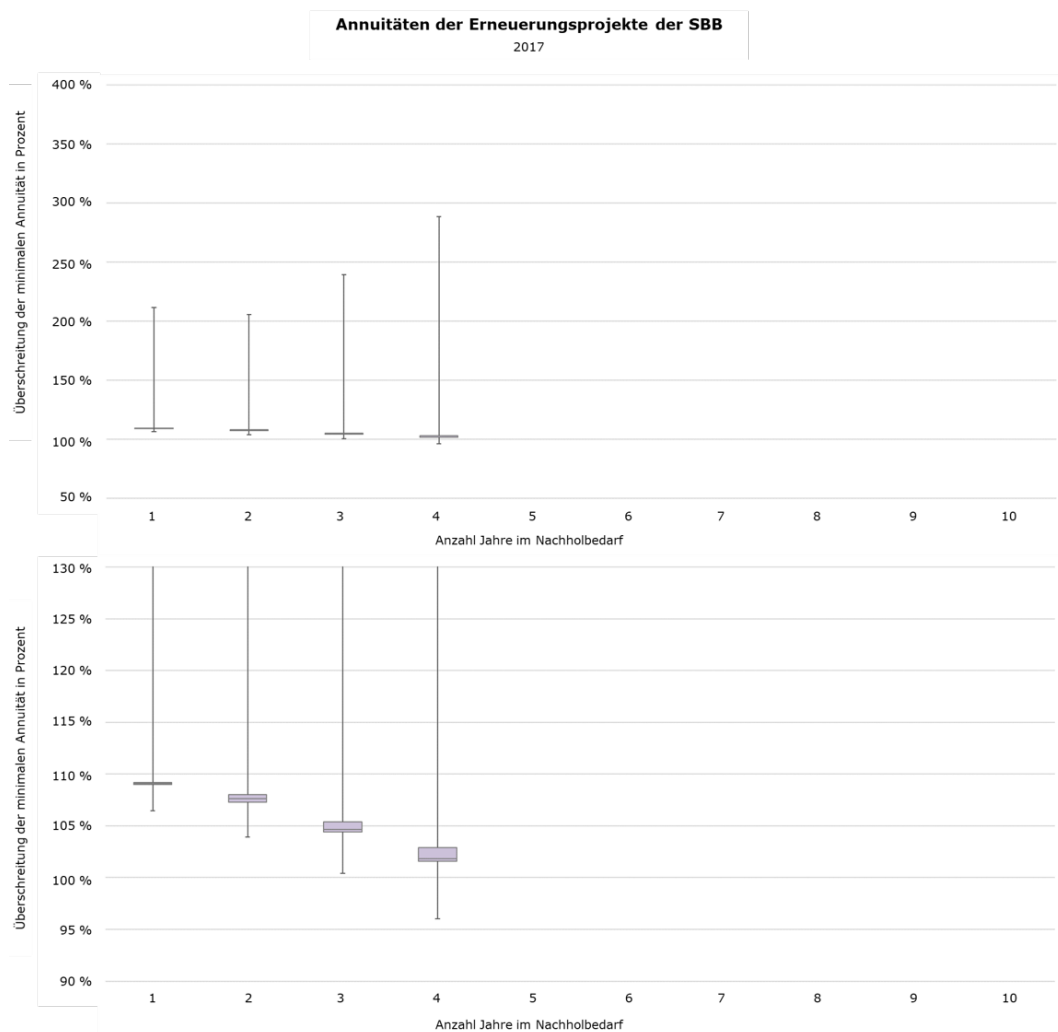


Abbildung 11.7: Boxplot der Annuitäten der Gleisabschnitte  $> 10$  m im Nachholbedarf der SBB der Fahrbahnerneuerung 2017,  $< 4$  Jahre im Nachholbedarf [44]

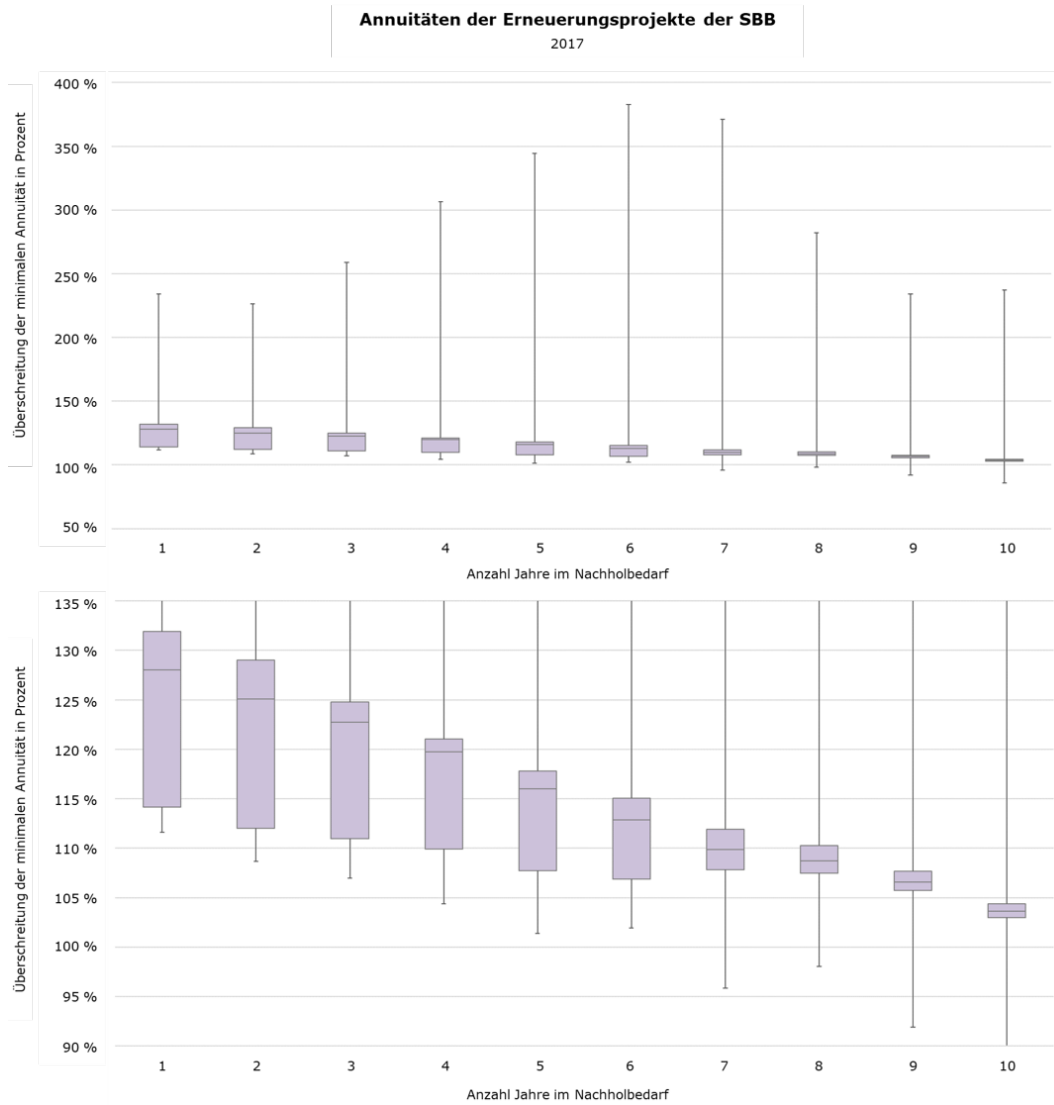


Abbildung 11.8: Boxplot der Annuitäten der Gleisabschnitte > 10 m im Nachholbedarf der SBB der Fahrbahnerneuerung 2017, > 4 Jahre im Nachholbedarf [44]



## Vergleich der Bewertung der Erneuerungsprojekte zwischen ÖBB und SBB

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der ÖBB und der SBB fallen als erstes die beiden unterschiedlichen Entwicklungen der Kosten auf. Die Auswertungen der Erneuerungsprojekte der ÖBB zeigen, dass die Annuität im Nachholbedarf von Jahr zu Jahr ansteigt. Die genaue Betrachtung der Auswertungen der Kosten bei der SBB zeigen jedoch beim Nachholbedarf ein Abflachen der Kosten über die Jahre. Der Unterschied dieser beiden Auswertungen erklärt sich durch den jeweiligen gewählten Ansatz. Bei den Auswertungen der ÖBB werden Re-Investitionsprojekte betrachtet und für sich optimiert. Damit gehen Abschnitte im Nachholbedarf prozentual in das gesamte Projekt mit ein. Bei den Auswertungen der SBB aus der DfA beziehen sich die Kosten ausschließlich auf den jeweiligen Abschnitt eines Objektes. Es befindet sich also immer der gesamte Abschnitt im Nachholbedarf. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass bei der Berechnung der Kosten des Nachholbedarfs danach unterschieden werden muss, ob eine Objekt- oder eine Projektsicht eingenommen wird. Um den Unterschied in den bewerteten Längen der Projekte der ÖBB und der SBB zu verdeutlichen, sind in Abbildung 11.9 die unterschiedlichen Längen der bewerteten Abschnitte zwischen ÖBB und SBB ersichtlich. Während die bewerteten Projekte der ÖBB einen Median von 1.250,5 m besitzen und damit eine entsprechende Länge für ein Erneuerungsprojekt aufweisen, hat der Median der SBB-Objekte nur eine Länge von 36 m. Dies entspricht nicht einmal einer Schichtleistung einer typischen Erneuerungsmaschine der SBB.

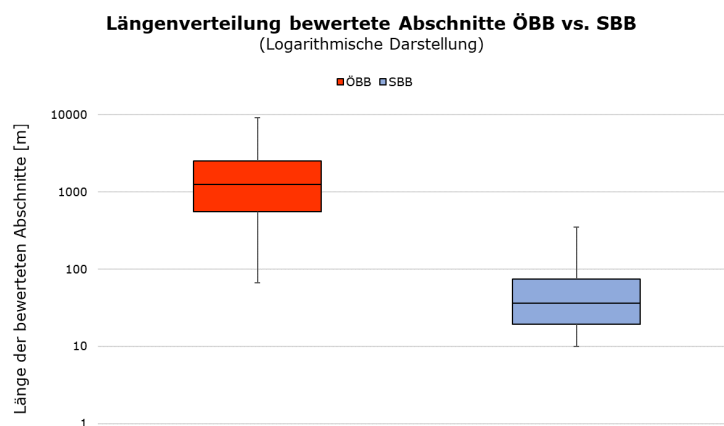


Abbildung 11.9: Vergleich der bewerteten Gleislängen der Auswertungen von ÖBB und SBB (bei SBB wurden ausschließlich Gleisabschnitte  $> 10$  m gewählt) (Quelle: eigene Darstellung)

Auffallend ist, dass der Median der Erhöhung der Annuität sich bei beiden Bahnen in einer Bandbreite zwischen 100 % und 130 % bewegt. Im Einzelfall kann die Annuität im Nachholbedarf bei der SBB jedoch bis über 170 % erreichen. Bei der ÖBB scheint dieser Effekt durch die Betrachtung der Projekte abgeschwächt

zu sein. Ausreißer liegen kaum über 130 %. Diese Erkenntnisse fließen in die Modellrechnung der vorliegenden Arbeit mit ein.

Auf Basis dieses Ergebnisses wird deutlich, dass ein Abschnitt, der sich im Nachholbedarf befindet und damit eine steigende Annuität aufweist, durch das gemeinsame Erneuern mit einem benachbarten Abschnitt, der eine fallende Annuität aufweist, kompensiert werden kann. Kann der Trend der fallenden Annuität durch eine Geradengleichung mit einer negativen Steigung beschrieben werden, so wird deutlich, dass eine Kompensation der fallenden Annuität bei zwei gleich langen Gleisabschnitten dann erreicht wird, wenn der zweite Abschnitt dieselbe Geradengleichung mit einer positiven Steigung aufweist (siehe Formel 11.1).

$$y = (-k \cdot x + d) + (k \cdot x + d) \quad (11.1)$$

$y$ ...Variable auf der y-Achse

$x$ ...Variable auf der x-Achse

$k$ ...Steigung

$d$ ...y-Achsenabschnitt

Sind die Längen der beiden Abschnitte unterschiedlich, so muss zur Kompensation der fallenden Annuität die Steigung durch den Faktor der Längenänderung dividiert werden (siehe Formel 11.2).

$$y = (-k \cdot x + d) \cdot L + \left(\frac{k}{m} \cdot x + d\right) \cdot L \cdot m \quad (11.2)$$

$y$ ...Variable auf der y-Achse

$x$ ...Variable auf der x-Achse

$k$ ...Steigung

$d$ ...y-Achsenabschnitt

$L$ ...Länge des Abschnittes im Nachholbedarf

$m$ ...Multiplikator

Durch diesen Zusammenhang kann aufgezeigt werden, aus welchem Grund die typischen Verläufe der Annuitäten am Ende der Nutzungsdauer durchwegs von der Wahl der Projektlänge abhängig sind. Für den effektiven Entscheid, wann ein Gleis zu erneuern ist, ist somit vor allem die Definition der Projektlänge und damit auch die Abhängigkeit der Projektkosten zur Erneuerungslänge entscheidend. Um

eine Erneuerungsentscheidung treffen zu können, ist es somit nötig, dass für jeden Gleisabschnitt die zukünftig anfallenden Unterhaltskosten bekannt sind und nicht das vorgeschlagene Erneuerungsjahr, da diese Entscheidung immer nur relativ sein kann.

Es wird deutlich, dass das Alter des Nachholbedarfs eine entscheidende Rolle in der Modellrechnung eines Gesamtnetzes spielt. Einerseits kann erst damit der aktuelle Wert der Annuität eines Gleisabschnittes in Betracht gezogen werden, andererseits lässt die Altersverteilung, nach der der Nachholbedarf beendet wird, Rückschlüsse auf die Strategie eines EIUs zu. Die Auswertungen der ÖBB lassen nur einen sehr theoretischen Rückschluss auf die Verweildauer von Projekten im Nachholbedarf zu, da das Ende der Zeit im Nachholbedarf nur das Ende des Betrachtungszeitraums und der Prognose darstellt. Die Auswertungen der SBB erlauben jedoch einen direkten Rückschluss. Der nach der Länge gewichtete Mittelwert zeigt eine Verweildauer der Abschnitte von 4,9 Jahre im Nachholbedarf, wobei das Minimum bei 2 Jahren und das Maximum bei 11 Jahren liegt. Diese 11 Jahre werden jedoch nur von einem einzigen Abschnitt erreicht, weshalb dieser in den Auswertungen nicht dargestellt wird.

Um die Entwicklung der Altersverteilung im Nachholbedarf prognostizieren zu können, muss klar zwischen Erneuerungsstrategien unterschieden werden, die eine unterschiedliche Altersverteilung im Nachholbedarf und damit unterschiedliche Unterhaltskosten hervorrufen. Aus diesem Grund wird in den Unterkapiteln 11.2 und den darauf folgenden auf die unterschiedlichen Formen der Altersentwicklung des Nachholbedarfs eingegangen.

### **11.1.2 Berechnung der Mehrkosten im Nachholbedarf anhand der Annuität**

Bei der Berechnung der Mehrkosten im Nachholbedarf ist zwischen der Annuität und den effektiven Kosten in den Jahren des Nachholbedarfs zu unterscheiden. Die Berechnung, ob sich ein Abschnitt im Nachholbedarf befindet, erfolgt über die Berechnung der Annuität. Dabei stellt das Minimum der Annuität über die Nutzungsdauer 100 % dar und das Ende der strategischen oder wirtschaftlichen Nutzungsdauer. Danach kann die Annuität nur mehr über diesen 100 % liegen. In Abschnitt 11.1.1 wurde genauer darauf eingegangen, welche Höhe die Annuität im Nachholbedarf erreicht. Eine Annuität von 110 % im Nachholbedarf bedeutet, dass über die gesamte Nutzungsdauer (strategische Nutzungsdauer plus die Anzahl der Jahre im Nachholbedarf) die Kosten 10 % über dem strategischen Minimum liegen. Die Kosten, die diese Erhöhung verursachen, werden jedoch ausschließlich in den wenigen Jahren im Nachholbedarf hervorgerufen. Die effektiven Kosten im Nachholbedarf liegen damit weit über diesen zusätzlichen 10 %. Die Berechnung

der durch den Nachholbedarf entstandenen Mehrkosten im Unterhalt, ohne Einbezug des zusätzlichen Nutzens der verlängerten Nutzungsdauer, errechnet sich wie folgt:

$$A_{ENb} \cdot ND_{ENb} - A_{ENDw} \cdot ND_{ENDw} = MK_{NB} \quad (11.3)$$

$A_{ENb}$ ...Annuität am Ende des Nachholbedarfs

$ND_{ENb}$ ...Nutzungsdauer am Ende des Nachholbedarfs

$ND_{ENDw}$ ...wirtschaftliche Nutzungsdauer

$A_{ENDw}$ ...Annuität am Ende der wirtschaftlichen Nutzungsdauer

$MK_{NB}$ ...durch den Nachholbedarf verursachte Mehrkosten

Das in Abbildung 11.1 gezeigte Beispiel weist nach 12 Jahren im Nachholbedarf eine statische Annuität von 115 % auf. Über diese 12 Jahre entstehen Mehrkosten von rund 1.105 Mio. CHF. Die Annuität von 100 % liegt in diesem Fall bei rund 53.800 CHF/Jahr. Somit liegen die jährlichen Mehrkosten bei einer Annuität von 115 % bei 435 % gegenüber den Kosten bis zum Ende der wirtschaftlichen Nutzungsdauer. Die Mehrkosten liegen damit deutlich höher als es die Annuität vermuten lassen würde. Je länger die Gesamtnutzungsdauer der Anlage ist und je kürzer sich eine Anlage im Nachholbedarf befindet, umso höher stellen sich die Mehrkosten im Verhältnis zur Erhöhung der Annuität dar.

Die Ausprägung des Nachholbedarfs ist für die Berechnung der verursachten netzweiten Mehrkosten von Bedeutung. An der Form des Verlaufs des Nachholbedarfs lässt sich erkennen, wie das Verhalten bei der Erneuerungsplanung gewählt wurde. Anhand dieser Verteilfunktion lässt sich in weiterer Folge ein Kostenmodell aufstellen. Aus diesem Grund sollen folgend die unterschiedlichen Ausprägungen des Nachholbedarfs theoretisch formuliert werden und mit der realen Verteilung des Nachholbedarfs der SBB verglichen und plausibilisiert werden.

## 11.2 Einjähriger Nachholbedarf

### 11.2.1 Die Definition von einjährigem Nachholbedarf

Ein einjähriger Nachholbedarf stellt sich dann ein, wenn jedes Jahr zur Erneuerung die scheinbar „dringendsten“ Fälle herangezogen werden. Es werden also immer jene Abschnitte erneuert, die neu in den Nachholbedarf gekommen sind. Dadurch erhöht sich der Nachholbedarf zwar jedes Jahr, er ist aber jeweils nur ein Jahr alt. Ein einjähriger Nachholbedarf lässt sich jedoch nur so lange erhalten, bis die

Länge des Nachholbedarfs die jährliche Erneuerungsmenge übersteigt. Ab diesem Jahr muss die Differenz um ein weiteres Jahr altern. Dieses Vorgehen scheint vor allem dann sinnvoll, wenn eine Bewertung nach Projekten vorgenommen wurde und die Annuität im Nachholbedarf jedes Jahr ansteigt.

In Abbildung 11.10 ist die Entstehung von einjährigem Nachholbedarf bei einer Erneuerungsquote von 80 % über 3 Jahre abgebildet. In dem theoretischen Beispiel bestehen die Anlagen aus einer vollkommen gleich verteilten Altersstruktur. Alle Anlagen werden 10 Jahre alt und danach erneuert. Bei einer Erneuerungsquote von nur 80 % und einer Bildung eines einjährigen Nachholbedarfs sind nach 3 Jahren bereits 60 % des jährlichen Erneuerungsvolumens im Nachholbedarf.

Werden bei der Definition von Erneuerungsabschnitten tatsächlich nur einzelne Abschnitte als Objekte für sich definiert, so würde diese Entwicklung des Nachholbedarfs die wirtschaftlich ungünstigste Variante darstellen. In diesem Fall werden Abschnitte immer genau zu dem Zeitpunkt erneuert, wenn das Annuitätenminimum sprunghaft überschritten wurde. Ein erneutes Fallen der Annuitätenkurve und damit eine Reduktion der durchschnittlichen jährlichen Kosten wird also nicht mehr abgewartet.

Diese Form des Nachholbedarfs ist vor allem dann zu erwarten, wenn Erneuerungsabschnitte in einem starren Bestellprozess abgewickelt werden. Wird der Erneuerungszeitpunkt auf den letzten möglichen Termin hinausgezögert, dann kann es einige Monate vor der Erneuerung noch zu unwirtschaftlichen Maßnahmen wie beispielsweise einem Weichenherzwechsel kommen. Die Erneuerung kann zu diesem Zeitpunkt jedoch entweder prozessual oder auf Grund des schlechten Zustandes nicht mehr weiter hinausgezögert werden.

## 11.3 Mehrjähriger Nachholbedarf

### 11.3.1 Die Definition von mehrjährigem Nachholbedarf

Wird über mehrere Jahre hinweg eine gewisse reduzierte Erneuerungsmenge durchgeführt, so kann nach mehreren Jahren auch der einjährige Nachholbedarf nicht mehr vollständig erneuert werden. Dies führt zu einer Alterung der Abschnitte um ein zusätzliches Jahr und wird in weiterer Folge als mehrjähriger Nachholbedarf bezeichnet.

Nach einer Zeit von  $n$  Jahren kann die Altersverteilung des bestehenden Nachholbedarfs nach Formel 11.4 berechnet werden:

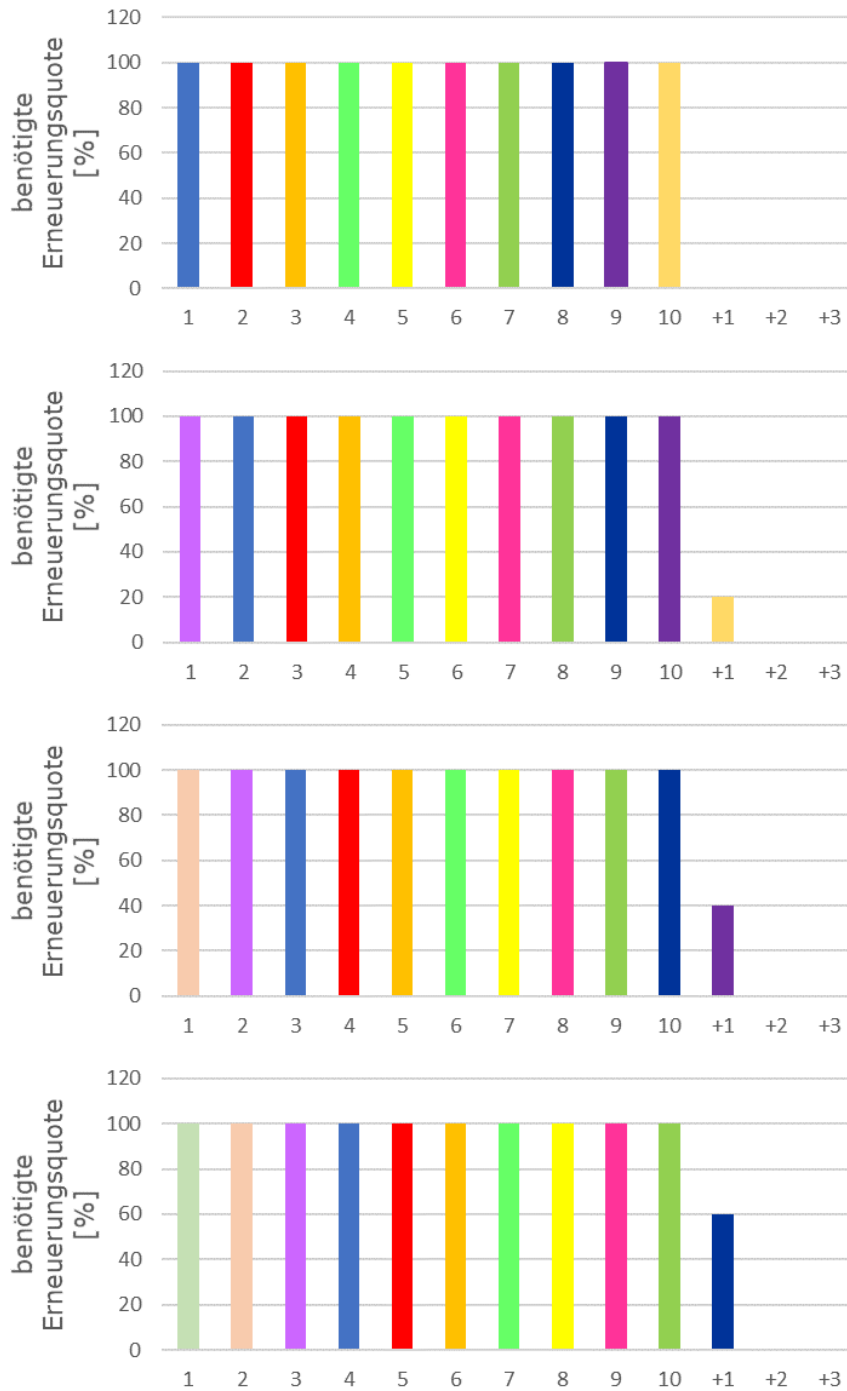


Abbildung 11.10: Entstehung des einjährigen Nachholbedarfs bei einer Erneuerungsquote von 80 % nach 3 Jahren (Quelle: eigene Darstellung)

$$\frac{[EQ \cdot (1 - EQ_{red})] \cdot n}{EQ} = \text{Anzahl Jahre im NB (je 100\%)} \quad (11.4)$$

$n$ ...Anzahl der Jahre reduzierter Erneuerungsquote

$EQ$ ...Erneuerungsquote

$EQ_{red}$ ...Annuität am Ende der wirtschaftlichen Nutzungsdauer

In Abbildung 11.11 ist die Altersverteilung des Nachholbedarfs nach 6 Jahren reduzierter Erneuerungsmenge dargestellt. Bei einer Erneuerungsquote von 80 % ergibt sich mithilfe von Formel 11.4 ein Wert von 1,1. Dies bedeutet, dass 100 % der jährlichen Erneuerungsquote 1 Jahr alt sind und 10 % der jährlichen Erneuerungsquote 2 Jahre alt sind. Diese Berechnung dient als Basis zur Berechnung der erhöhten Kosten im Nachholbedarf.

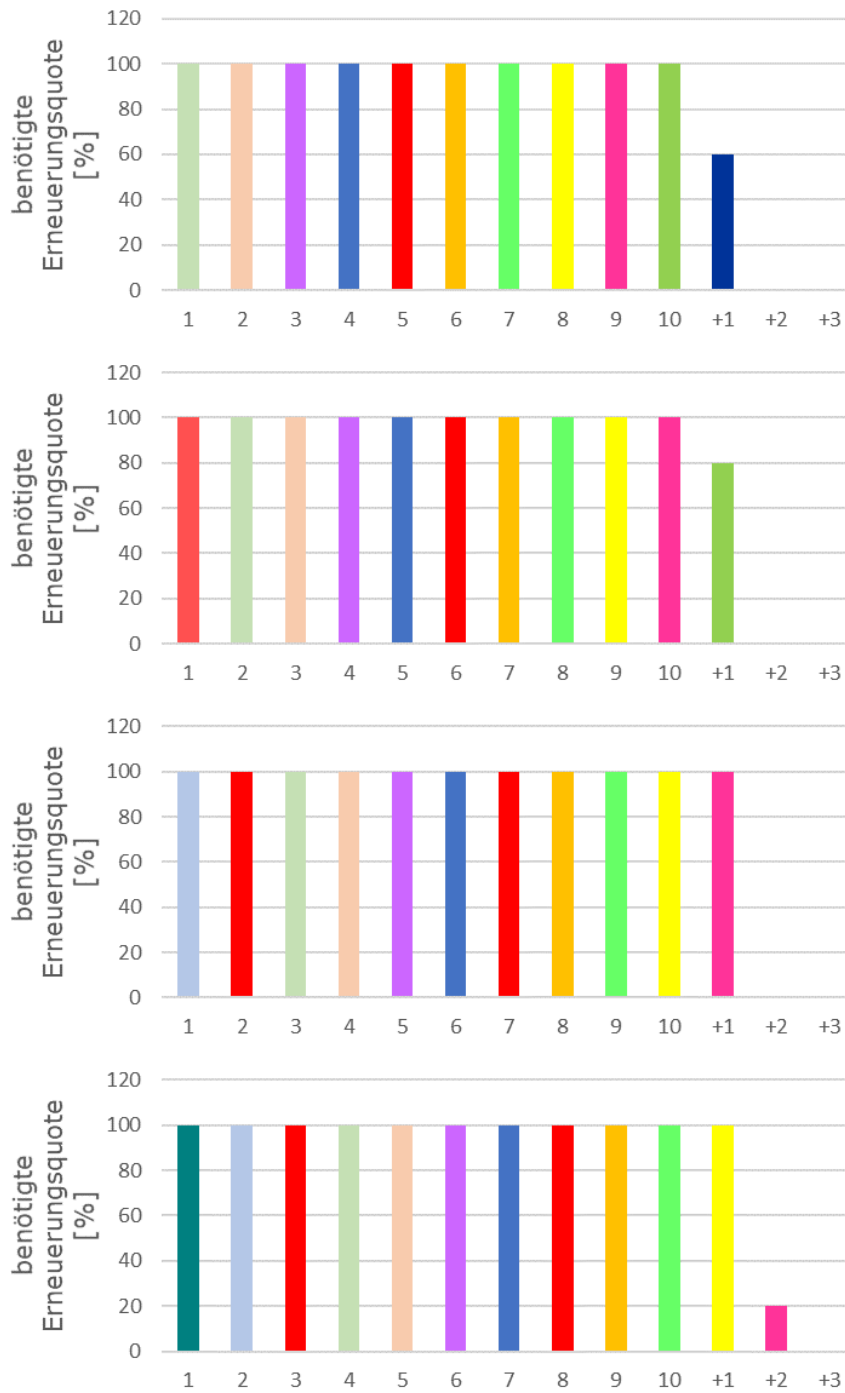


Abbildung 11.11: Altersverteilung im Nachholbedarf nach 6 Jahren und 80 % Erneuerungsquote (Quelle: eigene Darstellung)



## 11.4 Eingangsparmeter für die Modellrechnung

Die Modellrechnung der reduzierten Erneuerungsmenge erfolgt ausgehend vom strategischen Optimum. Das strategische Optimum der Erneuerungsmenge errechnet sich aus Formel 7.1. Der durch eine reduzierte Erneuerungsmenge entstehende Nachholbedarf errechnet sich für das Jahr 0 der Reduktion nach Formel 11.5.

$$L_{NB(i=0)} = L_{Netz} \cdot Red_{Erneuerung} \quad (11.5)$$

$L_{NB(i=0)}$ ...Länge des im Netz vorhandenen Nachholbedarfs im Jahr 0 [km]  
 $L_{Netz}$ ...Gleislänge des Netzes (inkl. Weichenlänge) [km]  
 $Red_{Erneuerung}$ ...Reduktion der Erneuerungsquote (bei 50 % = 0,5)

Ausgehend von dem strategischen Erneuerungsbedarf verändert sich die Bedarfsmenge in den folgenden Jahren nach Formel 11.6.

$$Erneuerung_{NB_i} = \frac{L_{Netz} - L_{NB_i}}{\emptyset ND_{Netz}} + L_{NB_i} \quad (11.6)$$

$Erneuerung_{NB_i}$ ...Erneuerungsmenge inklusive Nachholbedarf im Jahr i  
 $L_{Netz}$ ...Gleislänge des Netzes (inkl. Weichenlänge) [km]  
 $\emptyset ND_{Netz}$ ...durchschnittliche Nutzungsdauer der Fahrbahn nach Formel 7.3  
 $L_{NB_i}$ ...Länge des im Netz vorhandenen Nachholbedarfs im Jahr i [m]

Anschließend an die Berechnung der benötigten Erneuerungsmenge auf Grund einer reduzierten Erneuerungsmenge errechnet sich die Länge des anstehenden Nachholbedarfs ab dem Jahr 1 nach Formel 11.7:

$$L_{NB_i} = Erneuerung_{NB} - L_{NB(i=0)} \quad (11.7)$$

$L_{NB_i}$ ...Länge des im Netz vorhandenen Nachholbedarfs im Jahr i [km]  
 $Erneuerung_{NB}$ ...jährliche Erneuerungsmenge inklusive Nachholbedarf  
 $L_{NB(i=0)}$ ...Länge des im Netz vorhandenen Nachholbedarfs im Jahr 0 [km]

Aufbauend auf der Berechnung des Erneuerungsbedarfs erfolgt anschließend die Berechnung der durch den Nachholbedarf zusätzlich entstehenden Unterhaltskosten. Diese Berechnung unterscheidet sich abhängig von der Ausprägung des Nachholbedarfs. Bei der Entstehung eines ein- bzw. mehrjährigen Nachholbedarfs kann die Zuordnung des Nachholbedarfs in die Altersklassen und damit in die unterschiedlichen Unterhaltskosten durch die Berechnung des Faktors für Nachholbedarf  $k$  nach Formel 11.8 erfolgen.

$$k_{NB} = \frac{L_{NB_i}}{\emptyset \text{ Erneuerung}_{Netz}} \quad (11.8)$$

$k_{NB}$ ...Faktor zur Verteilung des Nachholbedarfs in die Altersklassen

$L_{NB_i}$ ...Länge des im Netz vorhandenen Nachholbedarfs im Jahr  $i$  [km]

$\emptyset \text{ Erneuerung}_{Netz}$ ...jährliche Erneuerungsquote [km/a]

Da pro Jahr maximal nur 100 % der jährlich anstehenden Erneuerungsmenge in den Nachholbedarf rutschen können, ergibt die ganze Zahl die Anzahl der Jahre, die 100 % der jährlichen Erneuerungsmenge als Nachholbedarf aufweisen. Die Dezimalstelle zeigt den prozentuellen Anteil der jährlichen Erneuerungsmenge als Nachholbedarf im Folgejahr an. So zeigt ein  $k$ -Wert von 4,19 beispielsweise, dass die Jahre 1 bis 4 als Nachholbedarf jeweils 100 % der jährlichen Erneuerungsmenge aufweisen und das Jahr 5 19 %. Zur Erhebung des Anstiegs der Unterhaltskosten werden in weiterer Folge die Mengen im Nachholbedarf der jeweiligen Jahre mit den Faktoren für den gestiegenen Unterhaltsbedarf im Nachholbedarf multipliziert. Die Mehrkosten ergeben sich auf Basis der Auswertungen der Annuitäten des Nachholbedarfs des jeweiligen Netzes nach Formel 11.3. Der Abbau des Nachholbedarfs erfolgt dann so lange, bis der jährliche Erneuerungsbedarf wieder auf das strategische Level gesunken ist. Der jährliche Bedarf an Erneuerung während dem Vorhandensein von Nachholbedarf errechnet sich aus Formel 11.9.

$$\text{Erneuerung}_{NB} = \frac{L_{Netz} - L_{NB_i}}{\emptyset ND_{Netz}} + L_{NB_i} \quad (11.9)$$

$\text{Erneuerung}_{NB}$ ...benötigte Erneuerungsmenge pro Jahr

$L_{NB_i}$ ...Länge des im Netz vorhandenen Nachholbedarfs im Jahr  $i$  [km]

$\emptyset ND_{Netz}$ ...durchschnittliche Nutzungsdauer der Fahrbahn nach Formel 7.3

### **11.4.1 Netzweite Auswirkungen einer reduzierten Erneuerungsmenge bei einem einjährigen/mehrjährigen Nachholbedarf**

Die Auswirkungen einer reduzierten Erneuerungsmenge bei einem einjährigen beziehungsweise mehrjährigen Nachholbedarf werden nun anhand des in Kapitel 9 vorgestellten Modellnetzes simuliert. Dies dient dazu, die Erkenntnisse am Einzelabschnitt auf ein Gesamtnetz umzulegen und den langjährigen Kosteneffekt zu berechnen. Dabei wird eine Reduktion der Erneuerungsmenge um 50 % über 10 Jahre und eine gleichzeitige Kompensation des erhöhten Unterhaltsbedarfs angesetzt. Dies führt zu einer Kostensteigerung der jahresspezifischen Gesamtkosten auf bis zu 123 % des strategischen Bedarfs. Der Nachholbedarf wächst jedes Jahr um die fehlende Erneuerungsmenge an. Parallel dazu sinkt die benötigte Erneuerungsmenge im nicht überalterten Teil des Netzes auf Grund der steigenden Nutzungsdauer leicht. Dieser Aspekt darf keinesfalls außer Acht gelassen werden, da die zu erneuernde Menge ansonsten deutlich überschätzt wird.

Es wird davon ausgegangen, dass nach 10 Jahren die Erneuerungsmenge auf 110 % der strategischen Menge erhöht wird. Dies hat zur Folge, dass der anstehende Nachholbedarf nach weiteren 29 Jahren wieder abgebaut werden kann und der Zustand des Netzes wieder auf das Ausgangsniveau gehoben werden kann. Dies errechnet sich unter der Annahme, dass die benötigten zusätzlichen Unterhaltskosten des Nachholbedarfs im ersten Jahr nach „Eintritt in des Nachholbedarfs“ anfallen und der Nachholbedarf sich als einjähriger Nachholbedarf darstellt, wie in Unterkapitel 11.2 dargestellt. Da nur 50 % der Erneuerungsquote erneuert werden, wird in der Modellrechnung nach dem zweiten Jahr der einjährige Nachholbedarf überschritten und 50 % der Erneuerungsmenge erreichen bereits ein Alter von 2 Jahren. Ab dem dritten Jahr entwickelt sich der Nachholbedarf somit als mehrjähriger Nachholbedarf.

In Abbildung 11.12 ist die Kostenentwicklung der Erneuerung dargestellt, wobei „Erneuerung Strategie“ das Kostenlevel anzeigt, das bei einem wirtschaftlich optimierten Unterhaltsregime erreichbar wäre. In Abbildung 11.13 ist die Entwicklung der Unterhaltskosten dargestellt. Auf Grund der fehlenden Erneuerungsmenge steigt der Unterhaltsbedarf bei jenen Abschnitten, die in den Nachholbedarf geschoben werden, an. Nach 10 Jahren wird der Nachholbedarf Stück für Stück abgebaut, wodurch sich auch der Unterhaltsbedarf wieder reduziert. In Abbildung 11.14 ist die Gesamtkostenentwicklung abgebildet. Deutlich zu erkennen ist der Kostensprung in dem Jahr, in dem die Erneuerungsquote wieder erhöht wird. Es wird also sichtbar, wie große Kosten von einem Jahr auf das nächste entstehen können. Eine so große Veränderung im Budgetplan ist nur für sehr wenige Unternehmen finanzierbar und auch auf Grund der zur Verfügung stehenden Ressourcen kaum durchführbar. Mit dem Jahr 39 ist der gesamte Nachholbedarf

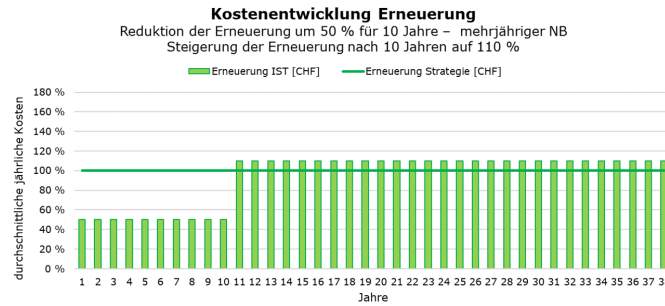


Abbildung 11.12: Kostenentwicklung der Erneuerung bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (mehrjähriger Nachholbedarf) (Quelle: eigene Darstellung)

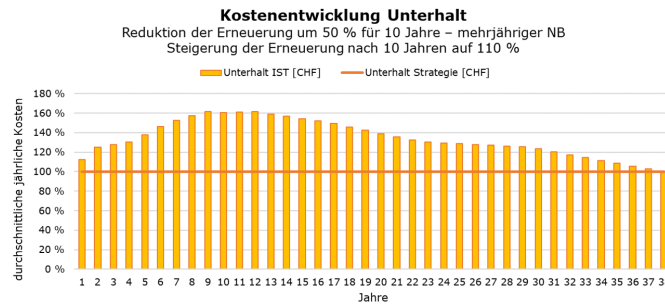


Abbildung 11.13: Kostenentwicklung des Unterhalts bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (mehrjähriger Nachholbedarf) (Quelle: eigene Darstellung)

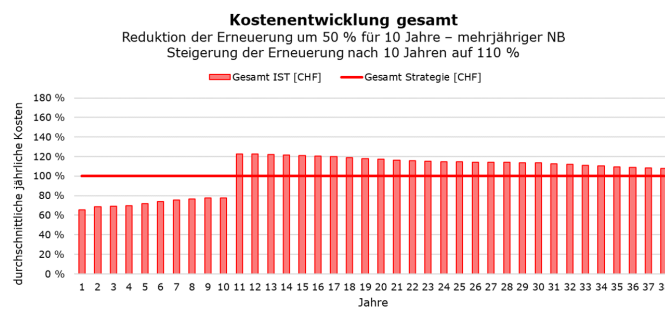


Abbildung 11.14: Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (mehrjähriger Nachholbedarf) (Quelle: eigene Darstellung)

abgebaut und die Gesamtkosten bewegen sich wieder auf dem strategischen Optimum. Durch die Reduktion der Erneuerungsquote um 10 % über 10 Jahre kann über die Jahre bis zum Wiedererreichen der strategischen Kosten eine Rendite von -3,97 % generiert werden. Die Kosten der Erneuerung einzusparen war somit unwirtschaftlich und verursachte höhere Kosten, statt real Kosten einzusparen.

## 11.5 Alternder Nachholbedarf

### 11.5.1 Die Definition von alterndem Nachholbedarf

Bei einem alternden Nachholbedarf wird der Nachholbedarf jedes Jahr um die fehlende Erneuerungsmenge erhöht. Zur Erneuerung werden immer die gerade anstehenden Erneuerungen herangezogen und die Abschnitte im Nachholbedarf werden weiterhin im Nachholbedarf belassen. Die Menge des Nachholbedarfs ist gleich der Summe der jährlich fehlenden Erneuerungsmenge. Der Nachholbedarf altert jedes Jahr um ein Jahr (stufenweise immer um die fehlende Erneuerungsmenge). Diese Art von Nachholbedarf wird dann vorgefunden, wenn aus strategischer Sicht bestimmte Strecken nicht mehr erneuert werden. Einige Bahnen nutzen diese Variante, um die aktuellen Kosten zu reduzieren. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass sich die Erzeugung von Nachholbedarf vorrangig auf Strecken fokussiert, die einen verhältnismäßig geringeren finanziellen Schaden verursachen. Dieses Vorgehen kann wirtschaftlich sogar sinnvoll sein, wenn diese Strecken langfristig stillgelegt werden. Trügerisch ist diese Vorstellung jedoch dann, wenn Strecken nur an andere Gesellschaften verkauft werden, die meist ebenso eine Subvention vom Bund benötigen, um den gewünschten Zustand der Strecke wiederherzustellen. Dann wird die vermeintliche Einsparung auf den Schultern des Steuerzahlers ausgetragen.

Die Berechnung der Altersverteilung des Nachholbedarfs stellt sich als trivial dar: Die Anzahl der Jahre der reduzierten Erneuerungsmenge entsprechen auch dem Alter des ältesten Nachholbedarfs nach der Definition 11.10.

$$n = \text{Anzahl Jahre im NB (je \% EQ)} \quad (11.10)$$

$n$ ...Anzahl der Jahre reduzierter Erneuerungsquote  
 $EQ$ ...Erneuerungsquote

Die Entstehung von einem alternden Nachholbedarf ist in Abbildung 11.15 dargestellt.

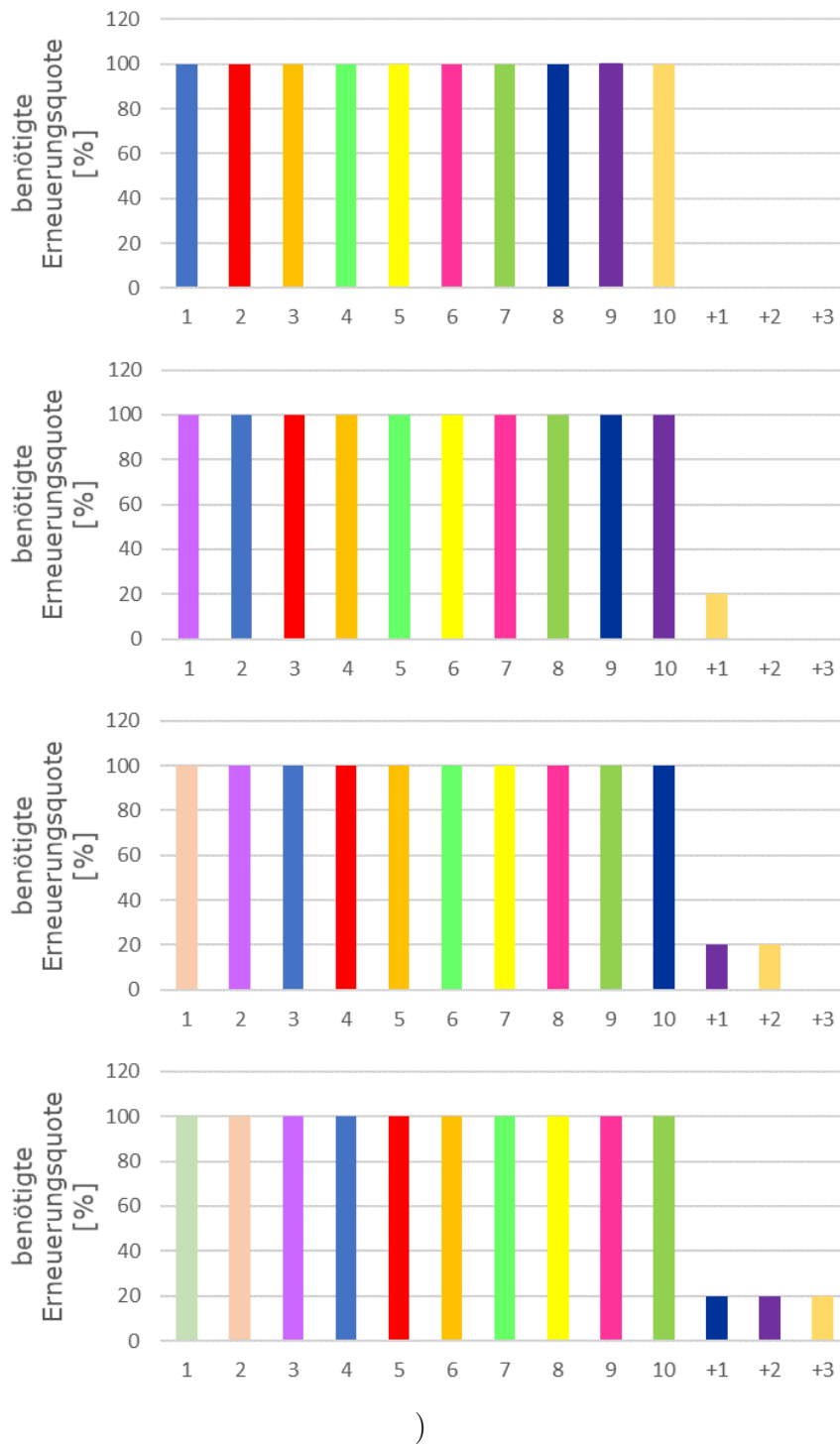


Abbildung 11.15: Entstehung von alterndem Nachholbedarf (Quelle: eigene Darstellung)

### **11.5.2 Die Auswirkungen einer reduzierten Erneuerungsmenge bei einem alternden Nachholbedarf**

Die netzweiten Auswirkungen werden anhand des in Kapitel 9 dargestellten Modellnetzes simuliert. Im Abschnitt 11.4.1 erfolgt eine Reduktion der Erneuerungsquote um 50 % über 10 Jahre. Dabei wurden jährlich jene Abschnitte erneuert, die sich am längsten im Nachholbedarf befanden, um einen einjährigen Nachholbedarf zu erzeugen. In einer weiteren Modellrechnung soll geprüft werden, welchen Einfluss ein anderer Umgang mit dem Nachholbedarf auf die Gesamtkosten hat. Aus diesem Grund wird in einer weiteren Modellrechnung ein alternder Nachholbedarf hinterlegt. Bei der Beschreibung eines alternden Nachholbedarfs wird die erzeugte Menge des Nachholbedarfs pro Jahr jeweils um ein Jahr älter. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 11.16, 11.17 und 11.18 zu sehen.

Durch den alternden Nachholbedarf kann bei ansonsten gleichen Ansätzen für die Modellrechnung eine Rendite von -3,68 % erreicht werden. Dies stellt somit eine geringfügige Verbesserung der Gesamtkosten gegenüber dem Szenario mit einjährigem Nachholbedarf dar. Erreicht werden kann dies, da die Kosten im ersten Jahr des Nachholbedarfs deutlich höher sind als die Kosten in den nachfolgenden Jahren. Daraus kann geschlossen werden, dass ein Abschnitt im Nachholbedarf nicht weiterhin in der Planung für die Erneuerung verbleiben sollte, sondern die Erneuerung auf das Jahr verlegt werden sollte, in dem erneut ein Anstieg der Annuitätenkurve zu erwarten ist. Dies bedeutet, dass, wenn bereits teure Maßnahmen zur Verlängerung der Nutzungsdauer gesetzt wurden, die dadurch gewonnene Nutzungsdauer in jedem Fall ausgenutzt werden sollte. Dieser Effekt stellt sich sowohl bei dem Ergebnis der Kosten des Nachholbedarfs aus Projektsicht, wie es bei der ÖBB zur Anwendung kommt, wie auch bei den Kosten der Nachholbedarfs aus Objektsicht, wie es bei der SBB zur Anwendung kommt, ein.

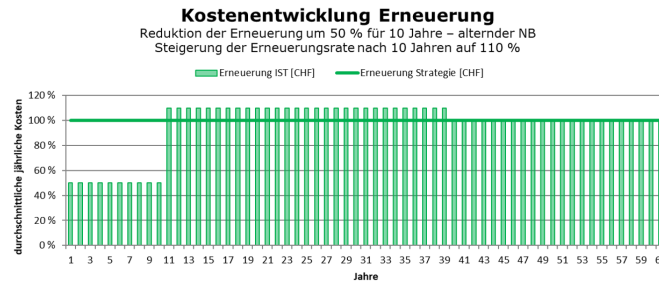


Abbildung 11.16: Kostenentwicklung der Erneuerung bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (alternder NB) (Quelle: eigene Darstellung)

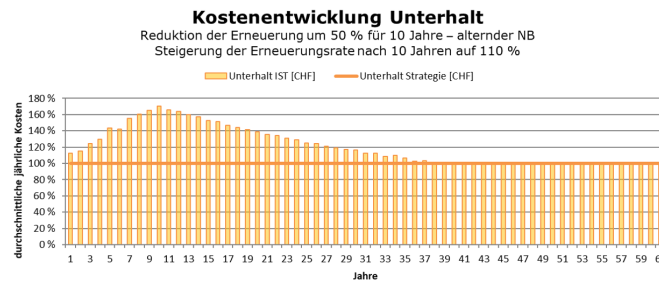


Abbildung 11.17: Kostenentwicklung des Unterhalts bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (alternder NB) (Quelle: eigene Darstellung)

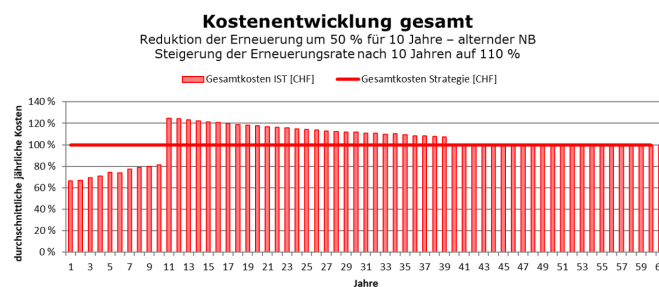


Abbildung 11.18: Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei reduzierter Erneuerungsquote um 50 % für 10 Jahre (alternder NB) (Quelle: eigene Darstellung)



## 11.6 Mischform Nachholbedarf

### 11.6.1 Definition einer Mischform des Nachholbedarfs

Bei der Eisenbahninfrastruktur ist als am häufigsten verwendete Form eine Mischform erkennbar. Bei einer Erneuerungsquote von 80 % und unter der Annahme, dass davon 70 % für die aktuellen Fahrbahnerneuerungen aufgewendet werden und sich die weiteren 10 % gleichmäßig auf den bereits bestehenden Nachholbedarf verteilen, ergibt sich die in Abbildung 11.19 dargestellte Verteilung des Nachholbedarfs.

Die Länge des Nachholbedarfs nach  $x$  Jahren mit dem Alter  $a$  errechnet sich nach Formel 11.11.

$$Anteil_{NB} = Red \emptyset Erneuerung_{FB} \cdot 100 + \sum_{i=(x-a)+1}^x - \frac{Abbau_{NB}}{i} \cdot 100 \quad (11.11)$$

$Anteil_{NB}$ ...Länge des Nachholbedarfs mit dem Alter  $a$  [%]

$Red \emptyset Erneuerung_{FB}$ ...Reduktion der durchschnittlichen jährlichen Erneuerungsmenge

$x$ ...Anzahl der Jahre mit reduzierter Erneuerungsmenge

$a$ ...Alter des Nachholbedarfs

$Abbau_{NB}$ ...Anteil der durchschnittlichen jährlichen

Erneuerungsmenge, die zum Abbau des Nachholbedarfs genutzt wird

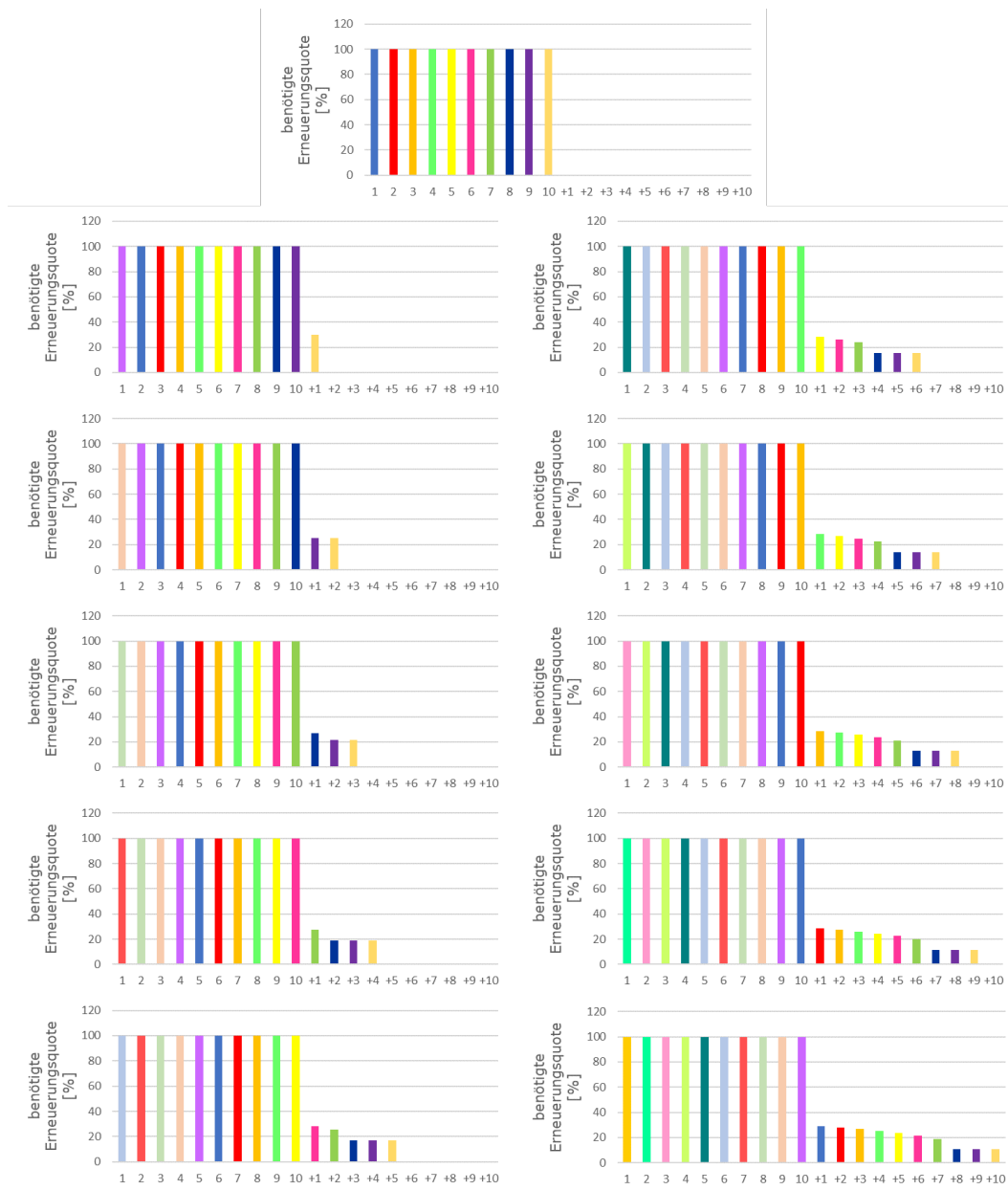


Abbildung 11.19: Entstehung der Mischform des Nachholbedarfs nach 10 Jahren bei einer Erneuerungsrate von 80 % (Quelle: eigene Darstellung)

## 11.7 Stetiger Nachholbedarf

### 11.7.1 Die Definition von stetigem Nachholbedarf

Ein stetiger Nachholbedarf ergibt sich dann, wenn sich generell alle Abschnitte im Netz systematisch im Nachholbedarf befinden. Diese Situation besteht beispielsweise im untergeordneten Netz der Société nationale des chemins de fer français (SNCF) oder im Netz der Japan Railway Company (JR). Die Strategie der SNCF zielt darauf ab, unwirtschaftliche Strecken nicht mehr zu bewirtschaften. Bei den JR-Bahnen begründet sich diese Strategie einerseits in der Finanzierungsform: Privat finanzierten Infrastrukturbetreibern fehlt die Möglichkeit, langfristige Investitionen für mehrere Jahrzehnte zu tätigen. Dieses große Investitionsvolumen kann ohne staatliche Subventionen nicht getätigt werden und so ist ein privat organisierter Infrastrukturbetreiber zu kurzfristigen und damit kleineren Investitionen gezwungen. Ein stetiger Nachholbedarf verursacht über mehrere Jahrzehnte deutlich höhere, jedoch planbare Kosten ohne große Schwankungen und mit einem kalkulierbaren Risiko. Andererseits sind die betrieblichen Randbedingungen der JR-Bahnen mit in Betracht zu ziehen. Bei einem Ausfall der Züge führen die hohen Fahrgastzahlen und der dichte Fahrplan zu so großen Betriebserschwerungskosten, dass eine Einschränkung des Fahrplans auf Grund von Bautätigkeiten unwirtschaftlich ist. Daher wird der Substanzerhalt der Fahrbahn in Japan in sehr kurzen nächtlichen Sperrpausen mit viel Personal und verhältnismäßig kleinen Maschinen durchgeführt. Es erfolgt ausschließlich ein Einzelkomponentenwechsel und keine Fahrbahnerneuerung des gesamten Oberbaus oder womöglich sogar von Ober- und Unterbau. Die Auswirkungen dieser Unterhaltsstrategie auf die Kosten der Infrastruktur sind in einer UIC-Studie [81] ersichtlich. In Abbildung 11.20 ist zu erkennen, dass die Kosten pro gefahrener Tonne pro Kilometer Hauptstrecke deutlich höher sind als im Vergleich zu Europa. Bei den vier ostasiatischen Bahnen handelt es sich um JR West, JR East, JR Central und Kowloon-Canton Railway Corporation (KCRC). Sie stehen im Vergleich mit einigen westeuropäischen Bahnen. Bei diesen Bahnen handelt es sich unter anderen um die SNCF, SBB, DB und ÖBB. [53][81]

In Abschnitt 7.2.6 wurde bereits auf den Einfluss der Strategie auf die Lebenszykluskosten eingegangen. Dabei wurde eine Erhöhung der Gesamtkosten bei einem permanenten Einzelkomponentenwechsel und damit bei der Erzeugung eines stetigen Nachholbedarfs von 159 % am Beispiel der Standardelemente der ÖBB [91] ausgewiesen. Auch wenn die beiden Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind, kommen doch beide Studien zu dem Schluss, dass ein stetiger Nachholbedarf jedenfalls unwirtschaftlich ist.

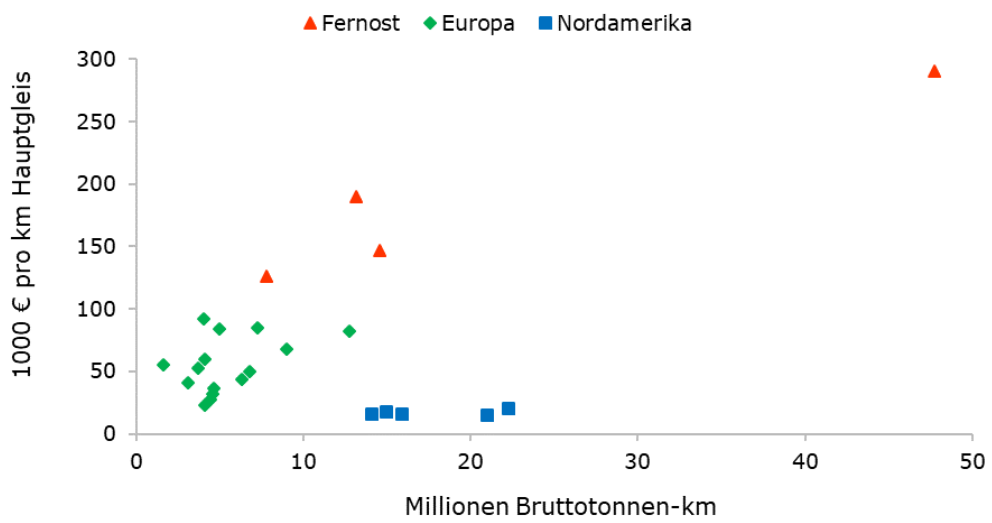
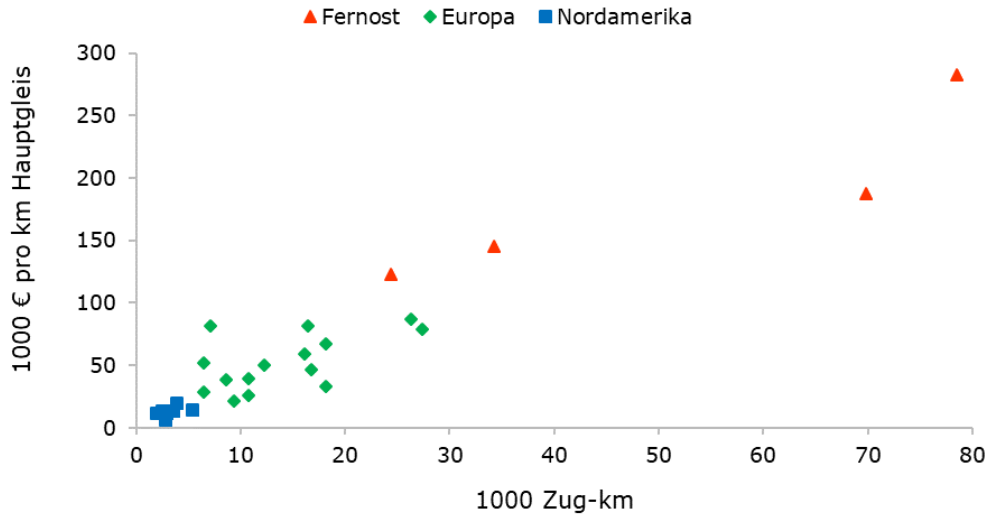


Abbildung 11.20: LCC pro Zugkilometer und Bruttotonnen-km (bezogen auf Hauptgleise) (Quelle: eigene Darstellung nach [53][81])

### 11.7.2 Erhebung der Verteilung des Nachholbedarfs in einem Gleisnetz

Der reale Nachholbedarf eines Netzes kann mit zwei verschiedenen Methoden berechnet werden. Einerseits kann auf Basis einer Investitionsrechnung für jeden Abschnitt im Netz eine Annuitätenkurve berechnet werden, was beispielhaft an der Fahrbahnerneuerung 2017 der SBB gezeigt wurde. [44] Die Herausforderung bei dieser Methode ist die Kenntnis der Unterhalts- und Erneuerungskosten über Jahrzehnte hinweg, eine Information, die bei einer Bahn nur sehr selten vorhanden ist. Zusätzlich stellt die Zuordnung dieser Kosten auf exakte Segmente im Gleisnetz eine große Herausforderung dar. Dabei muss darauf geachtet werden, dass ausschließlich die Vergangenheit bewertet werden kann. Somit kann ein rechnerisches Minimum der Annuitätenkurve in der Vergangenheit in Zukunft noch unterboten werden. Ohne eine Prognose in die Zukunft ist es somit nicht möglich, zu erkennen, ob ein Minimum in der Annuität nicht nur ein lokales Minimum darstellt. Für eine Prognose in die Zukunft muss, zusätzlich zu den Kostendaten der Vergangenheit, eine genaue Kenntnis des realen Zustandes der Anlage vorhanden sein, aus dem zukünftig anfallende Kosten abgeleitet werden können.

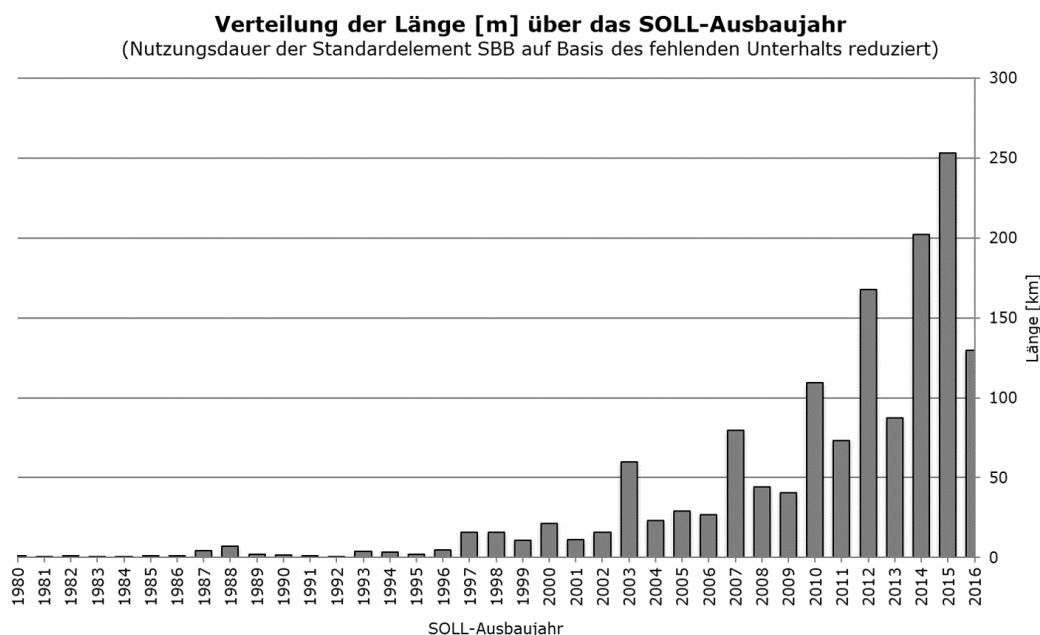


Abbildung 11.21: Längen über das Soll-Ausbaujahr – Nachholbedarf SBB (Datenstand 06.01.2017) (Quelle: eigene Darstellung)

Eine vereinfachte Berechnung kann durch einen Modellansatz erfolgen. Basierend auf der Zuordnung der Standardelemente [94] auf das Gleisnetz kann der

strategische Nachholbedarf erhoben werden, wodurch eine statistisch signifikante Aussage zu Menge und Altersverteilung des Nachholbedarfs getroffen werden kann. Die Differenz zwischen aktueller und strategischer Nutzungsdauer aus dem Standardelement zeigt die Menge des Nachholbedarfs. Auf diesem Modell basiert die Ermittlung des Nachholbedarfs der SBB. In Abbildung 11.21 ist die Auswertung der Längen der sich im Nachholbedarf befindenden Abschnitte zu erkennen. Auf Grund der Verteilung wird ersichtlich, dass sich der Nachholbedarf als Mischform darstellt. Der Verlauf des Nachholbedarfs stellt sich jedoch nicht wie in Unterkapitel 11.6 als konkav, sondern als konvex dar. Dies zeigt, dass eher die Abschnitte im Nachholbedarf erneuert werden, die bereits mehrere Jahre im Nachholbedarf sind und auf ein zweites Minimum in der Annuitätenkurve hinsteuern. Diese Annahme lässt sich auch durch die Auswertungen der Projektarbeit der ETH Zürich von Holland und Odermatt [44] bestätigen.

Die folgenden Auswertungen in Abbildung 11.22 und Abbildung 11.23 zeigen die Altersverteilung der sich rechnerisch auf Grund des Annuitätenmonitorings im Nachholbedarf befindenden Gleise und Weichen in Metern im Netz der SBB. Zu beachten ist hier die vorliegende Datenbasis. In das Annuitätenmonitoring mit eingerechnet werden können ausschließlich Unterhaltsarbeiten, welche auch in der DfA erfasst wurden. Für den Nachholbedarf ausschlaggebende Unterhaltsarbeiten wie der Einzelschwellenwechsel, Kleinunterhalt, Spurstangen, 8-Loch-Platten und Betriebserscherniskosten werden aktuell nicht erhoben. Dies führt zu einem deutlich niedrigeren Ergebnis als real im Netz vorhanden. Erkennen lässt sich nichtsdestotrotz die Altersverteilung im NB. Deutlich sichtbar ist die abflachende Altersverteilung sowie die Begrenzung des Nachholbedarfs bei Gleisen auf 10 Jahre und bei Weichen auf 7 Jahre. Vereinzelt Werte, die sich danach darstellen, weisen eine Länge von unter einem Meter auf und werden somit als Überschneidungen von Daten in der DfA angesehen.

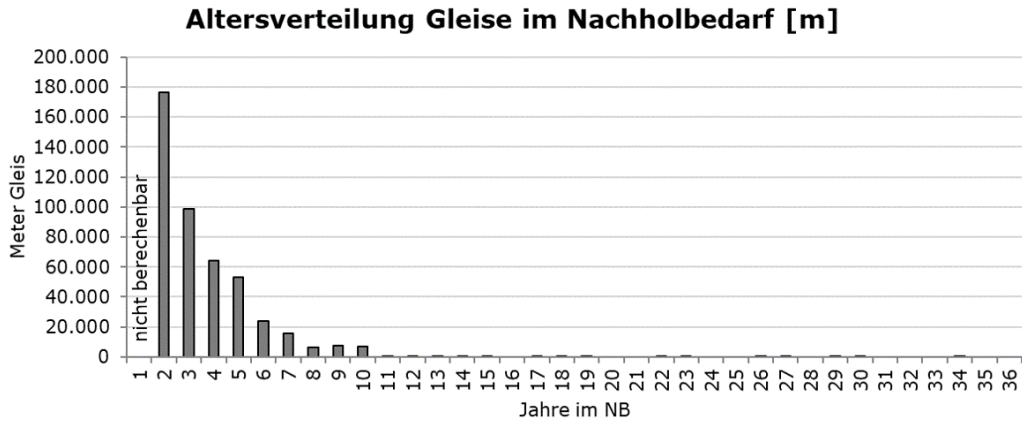


Abbildung 11.22: Altersverteilung der Gleise im NB im Netz der SBB (Datenstand 06.01.2017)

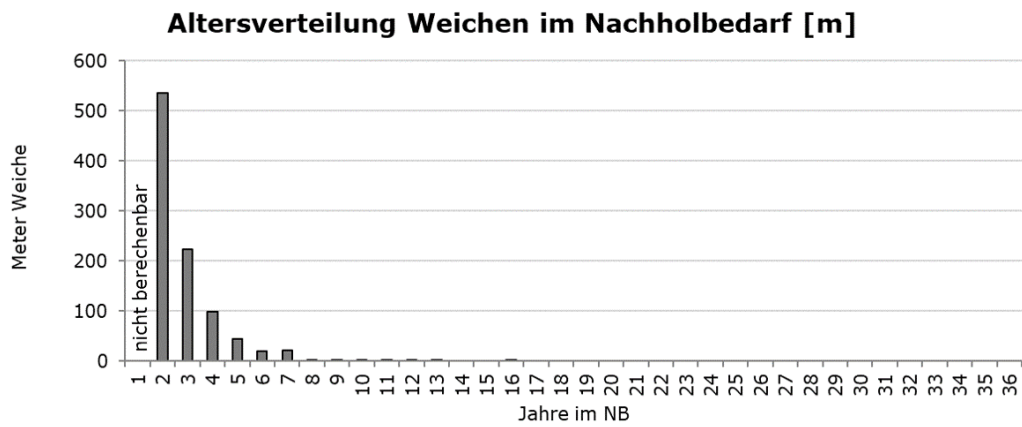


Abbildung 11.23: Altersverteilung der Weichen im NB im Netz der SBB (Datenstand 06.01.2017)

## 11.8 Reduktion der Unterbausanierungen

Eine Reduktion der Unterbausanierungen, um kurzfristig Kosten zu sparen, ist eine gerne praktizierte Methode. Grundlegend werden dadurch die Kosten der Erneuerung reduziert. In weiterer Folge reduziert sich die zu erwartende Nutzungsdauer der Fahrbahn. Ein schlechter Unterbau führt zu einer höheren Verschlechterungsrate der Gleislage und damit zu einem höheren Stopfbedarf. Dieser entsteht vor allem durch das Aufsteigen von Feinteilen aus dem Unterbau, wodurch die Nutzungsdauer des Schotterbetts deutlich verkürzt wird. Wie negativ sich dieser Effekt auf die Gesamtkosten der Fahrbahn auswirkt, hängt stark von der tatsächlich zu erreichenden Nutzungsdauer ab und wird durch mehrere geotechnische Faktoren beeinflusst. Auch die Wahl des Oberbaumaterials verändert die erreichbare Nutzungsdauer bei schlechtem Unterbau. Dieser Tatsache wird auch in den Standardelementen der SBB [94] Rechnung getragen. In diesem Projekt werden Unterbauklassen (A, B, C, D) definiert, die sich nicht auf technische Messwerte beziehen, sondern auf den Einfluss des Unterbaus auf die Nutzungsdauer und den Unterhalt eines Gleises. Auf Basis der Unterbauklasse C (Betonschwellen 50 % sowie erhöhter Stopfbedarf, Stahl- und Holzschwellen 75 % Nutzungsdauer), der unterschiedlichen Schwellentypen und einem geraden Gleis werden die wirtschaftlichen Auswirkungen eines nicht sanierten Unterbaus anhand der Annuität aufgezeigt. Das Ergebnis ist in Abbildung 11.24 dargestellt. Die definierten Zyklen der Standardelemente werden durch Zyklen ergänzt, welche bei einer fehlenden Unterbausanierung noch eine zusätzliche Reduktion der Nutzungsdauer ansetzen (Betonschwellen 25 %, Stahl- und Holzschwellen 50 %). Dieser abgewandelte Zyklus dient einer Sensitivitätsanalyse bezüglich der zu erwartenden Nutzungsdauer bei unsaniertem Unterbau. Die Erfahrungen der SBB zeigen, dass primär Betonschwellengleise deutlich sensibler auf einen schlechten Unterbau reagieren als Stahl- oder Holzschwellengleise.



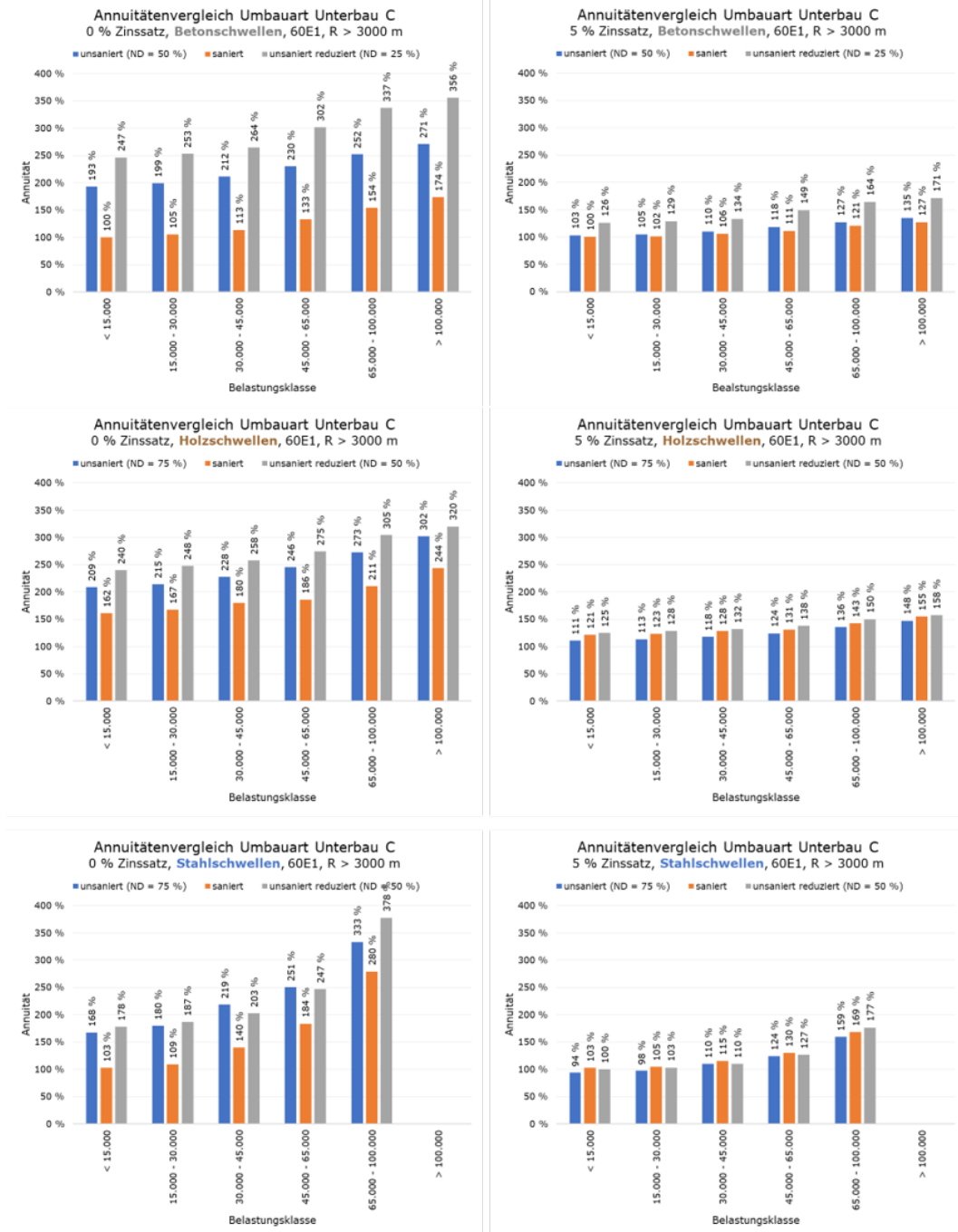


Abbildung 11.24: Annuitäten bei Unterbau C saniert / unsaniert / unsaniert mit reduzierter Nutzungsdauer (Quelle: eigene Darstellung)

Das Ergebnis zeigt, dass Gleise auf einem Unterbau der Klasse C bei einem Zinssatz von 0 % grundsätzlich zu sanieren und Betonschwellen zu wählen sind. Die Sensitivitätsanalyse der Nutzungsdauer zeigt zudem, dass das Resultat sehr sensibel auf die tatsächlich erreichbare Nutzungsdauer reagiert. Sollten bei einem unsanierten Betonschwellengleis nur 25 % der Nutzungsdauer erreicht werden können, so ist eine Stahlschwelle auf saniertem Unterbau zu verbauen. Kann der Unterbau aus finanziellen Gründen nicht saniert werden, dann ist die Holzschwelle der Stahlschwelle und auch der Betonschwelle vorzuziehen. Wird der Zinssatz auf 5 % erhöht, so sind in den unteren Belastungsklassen – bis 30.000 GesBt/Tag und Gleis – Stahlschwellen den Betonschwellen vorzuziehen. Diese können damit auch unsaniert verlegt werden. Ab 65.000 GesBt/Tag und Gleis sind jedenfalls Holzschwellen auf unsaniertem Unterbau zu verbauen. Es wird deutlich, dass sich die Sanierung des Unterbaus von Stahl- und Holzschwellengleisen bei einem Zinssatz von 5 % auf keinen Fall wirtschaftlich lohnt. Bei Betonschwellengleisen ist bei einem schlechten Unterbau jedenfalls eine Sanierung des Unterbaus durchzuführen. Um eine Strategie zu formulieren, ist damit das Ergebnis sehr sensibel, da sowohl der Zinssatz als auch die Definition der real erreichbaren Nutzungsdauer bei unsaniertem schlechten Unterbau sehr volatil sind. Umso mehr gerät die Unterbausanierung bei Budgetengpässen gerne unter Beschuss, da die Entscheidungsgrundlage zu vielen Diskussionen führt und die Einsparungen bei der Investition bei einem Verzicht kurzfristig enorm sind. Erfahrungen aus dem Jahr 2017 bei der SBB zeigten, dass Einsparungen im Bereich der Unterbausanierung große finanzielle Schäden verursachen können: Bereits zwei Jahre nach der Fahrbahnerneuerung waren neue Gleise teilweise sanierungsbedürftig.

### **11.8.1 Die Auswirkungen reduzierter Unterbausanierung bei der Erneuerung**

Für die Modellrechnung bei einer Reduktion der Unterbausanierung werden die Eingangswerte aus dem Projekt „Standardelemente SBB“ [94] herangezogen. Die Berechnung erfolgt bei einem Zinssatz von 0 %. In dem Beispiel wird davon ausgegangen, dass 80 % des Netzes eine Unterbauklasse A und 20 % eine Unterbauklasse C aufweisen. Dies stellt einen vereinfachten Ansatz der Erfahrungen der SBB dar. Da sich der Einfluss der fehlenden Unterbausanierung auf die Schwellentypen unterschiedlich auswirkt, wird für die erste Berechnung die Verteilung des Modellnetzes, eine gleichmäßige Verteilung der Unterbauklasse C wie auch der Wahl der Erneuerungsabschnitte hinterlegt. Die Fahrbahnerneuerungskosten werden mit 152 % (siehe Unterkapitel 9.8) im Vergleich zu einer Fahrbahnerneuerung ohne Unterbausanierung angesetzt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird dieses Kostenverhältnis variiert. Da der Zinssatz bei 0 % angesetzt wird, ist eine Reduktion der Unterbausanierung in jedem Fall die unwirtschaftliche Lösung, wie die Ergebnisse aus Abbildung 11.24 zeigten. Die Modellrechnung soll nun nicht

nur die Frage nach der Wirtschaftlichkeit, sondern auch die nach dem Kostenfluss beantworten. Dabei ist vor allem auch die Unterscheidung eines einzelnen Gleises zu einer netzweiten Analyse, bei der nur ein gewisser Prozentsatz des Netzes einen schlechten Unterbau aufweist, relevant.

In der Berechnung wird eine Reduktion der Unterbausanierungen über 10 Jahre auf 0 % hinterlegt. Dadurch können über 10 Jahre die Kosten für die Erneuerung reduziert werden. Die Reduktion der Kosten der Erneuerung hängt stark von dem Kostenunterschied zwischen einer Erneuerung mit bzw. ohne Unterbausanierung ab. Jedoch kann keine nennenswerte Reduktion der Erneuerungskosten über die 10 Jahre erreicht werden. Mit jedem Abschnitt, der ohne Unterbausanierung erneuert wird, obwohl er einer Unterbauklasse C entspricht, steigen die Kosten beim Stopfen und bei der Mängelbehebung an. Diese Kostensteigerung löst nur einen sehr geringen Effekt in den Gesamtkosten aus, da es sich um günstige Unterhaltsarbeiten handelt. In den ersten 10 Jahren überwiegen somit die Einsparungen durch die reduzierten Laufmeterkosten der Erneuerung. In den darauffolgenden Jahren erfolgen Erneuerung und Unterhalt nach Bedarf. Nach Ablauf der durch die fehlende Unterbausanierung reduzierten Nutzungsdauer steigt der Bedarf an Erneuerung und vor allem an Unterbausanierungen über die 10 Jahre leicht an. Erst nach dieser Zeit befinden sich die Gesamtkosten wieder auf dem strategischen Level.

Die Rendite liegt bei -4,08 %. Das Kostenverhältnis zwischen den Gesamtkosten nach Strategie und den Gesamtkosten IST liegt bei 104 %. Der Einfluss einer Reduktion der Unterbausanierung über einige Jahre ist somit auch bei einer netzweiten Betrachtung relevant. Bei den angewendeten Parametern bezüglich Kostenverhältnis der Erneuerung mit und ohne Unterbausanierung, der Reduktion der Nutzungsdauer und dem Bedarf an Unterbausanierungen im Netz ist die Rendite somit schlechter als in der Modellrechnung aus Abschnitt 11.5.2. Dabei ist zu beachten, dass der finanzielle Bedarf im Unterhalt steigt und diese finanziellen Mittel und auch die benötigten Intervalle für diesen Unterhalt jedenfalls zur Verfügung stehen müssen. Im Netz der SBB wird schnell deutlich, dass zudem die Verfügbarkeit ein sehr hohes Gut ist und Unterbausanierungen dazu beitragen, diese stabil gewährleisten zu können.

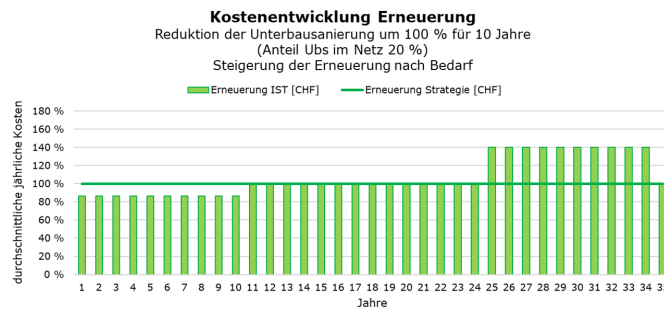


Abbildung 11.25: Kostenentwicklung der Erneuerungskosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre (Quelle: eigene Darstellung)

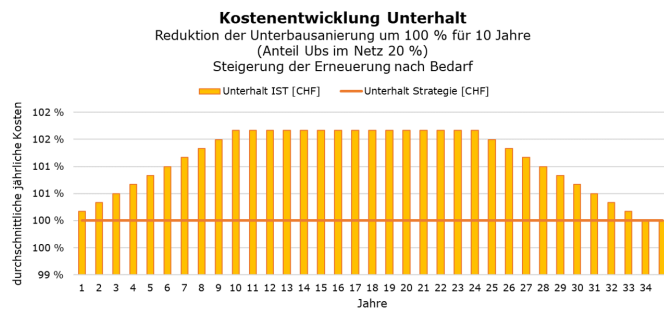


Abbildung 11.26: Kostenentwicklung der Unterhaltskosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre (Quelle: eigene Darstellung)

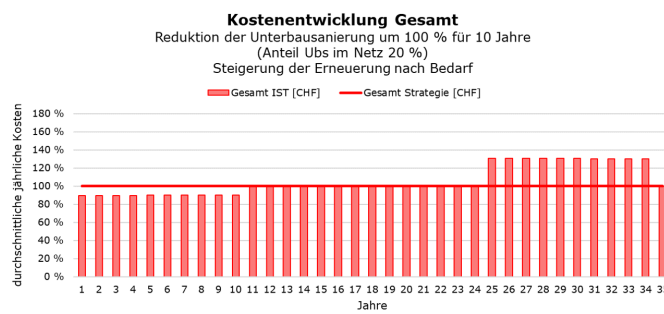


Abbildung 11.27: Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre (Quelle: eigene Darstellung)

## 11.8.2 Sensitivitätsanalyse zur Reduktion der Unterbausanierung

Die Annahmen zum Bedarf an Unterbausanierungen und den Auswirkungen auf die Nutzungsdauer von nicht durchgeführten Unterbausanierungen sind sehr volatil. Um die Bandbreite des Ergebnisses zur Reduktion von Unterbausanierungen besser abzustützen, wird in weiterer Folge eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei werden im Rahmen einer globalen Sensitivitätsanalyse die Eingangsparameter

- Schwellenart für die Unterbausanierung,
- Reduktion der Nutzungsdauer bei nicht durchgeführter Unterbausanierung,
- Anteil des Bedarfs an Unterbausanierungen im Netz und
- Kostenverhältnis zwischen einer Fahrbahnerneuerung mit und ohne Unterbausanierung

variiert. In den Abbildungen 11.28, 11.29 und 11.30 ist die Kostenentwicklung bei veränderten Einflussparametern dargestellt. In diesem Beispiel wurde angenommen, dass die 20 % Unterbausanierungen im Netz ausschließlich Betonschwellengleise betreffen und diese nicht eine Reduktion der Nutzungsdauer um 50 %, sondern von 75 % der Nutzungsdauer erfahren. Es zeigt sich, dass die Rendite sich mit -4,03 % nur minimal verändert. Das Kostenverhältnis zwischen den Gesamtkosten nach Strategie und den Gesamtkosten IST liegt jedoch weiterhin bei 104 %. Entscheidend ist jedoch, dass die Folgekosten durch die zusätzlich reduzierte Nutzungsdauer deutlich früher erwartet werden. Da es sich aber um dieselbe Länge an reduzierten Unterbausanierungen handelt, steigen die Folgekosten nicht an.

Wird das Kostenverhältnis zwischen einer Fahrbahnerneuerung mit und ohne Unterbausanierung von 152 % auf 200 % erhöht, so ergibt sich mit 3,85 % eine niedrigere Rendite. Das Kostenverhältnis zwischen den Gesamtkosten nach Strategie und den Gesamtkosten IST liegt ebenso bei 104 %. Damit ist die Entscheidung für oder gegen eine Unterbausanierung unabhängig von den mittleren Kosten einer Unterbausanierung im Vergleich zu den Kosten einer Fahrbahnerneuerung ohne Unterbausanierung. Der Anteil der benötigten Unterbausanierungen verändert die Rendite und das Kostenverhältnis annähernd linear. Bei einem Bedarf an nur 10 % Unterbausanierungen sinkt die Rendite auf nur -2,16 % und das Kostenverhältnis zwischen Gesamtkosten nach Strategie und Gesamtkosten IST sinkt auf 102 %. Liegt der Bedarf an Unterbausanierungen um 10 % höher, also auf 30 %, kommen die Rendite bei -5,81 % und das Kostenverhältnis bei 106 % zu liegen.

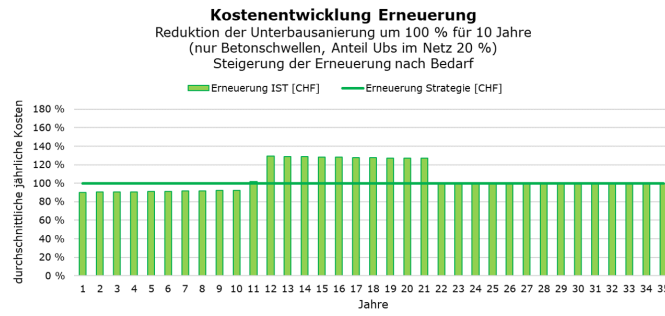


Abbildung 11.28: Kostenentwicklung der Erneuerungskosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre bei Betonschwellen und einer zusätzlichen Reduktion der erwarteten Nutzungsdauer auf 25 % (Quelle: eigene Darstellung)

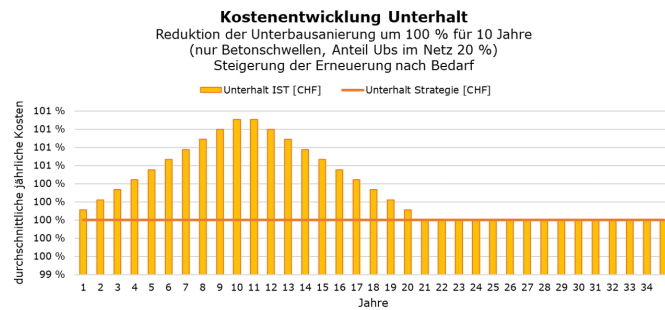


Abbildung 11.29: Kostenentwicklung der Unterhaltskosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre bei Betonschwellen und einer zusätzlichen Reduktion der erwarteten Nutzungsdauer auf 25 % (Quelle: eigene Darstellung)

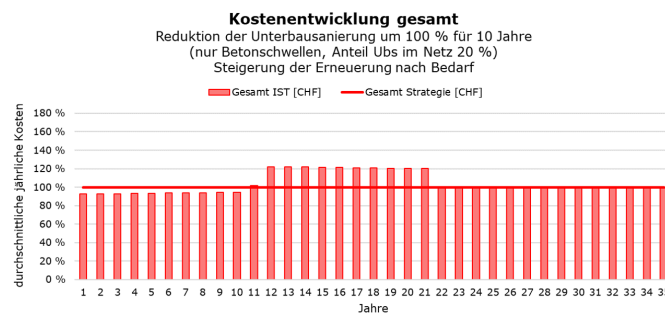


Abbildung 11.30: Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei einem Fehlen der Unterbausanierungen über 10 Jahre bei Betonschwellen und einer zusätzlichen Reduktion der erwarteten Nutzungsdauer auf 25 % (Quelle: eigene Darstellung)

## 11.9 Priorisierung bei der Erzeugung von Nachholbedarf

Bei einem reduzierten Budget für Fahrbahnerneuerungen empfiehlt es sich, eine Art Priorisierung für Erneuerungen einzuführen, um den verursachten Schaden möglichst gering zu halten. Idealerweise wäre in diesem Fall ein Annuitätenmonitoring [28] durchzuführen. Zum heutigen Zeitpunkt fehlt jedoch in allen europäischen Bahnen die datenseitige Grundlage, um eine derartige Berechnung netzweit und jährlich automatisiert durchführen zu können. Das System der Standardelemente, das sowohl in der Schweiz [94] wie auch in Österreich [91] zur Anwendung kommt, bietet dafür die strategische Grundlage. In Deutschland wird ein ähnliches System angewendet: das von der DB entwickelte 3i-Modell [15], das jedoch nur für ganze Strecken und nicht für spezifische Streckenabschnitte gültig ist, was eine Priorisierung von Erneuerungsprojekten nicht oder nur gering detailliert ermöglicht.

Besteht kein automatisiertes Annuitätenmonitoring über alle Anlagen, so muss eine strategische Priorisierung erfolgen, die auf gemittelten Ansätzen basiert. Hierzu werden die Einflüsse von unterschiedlichen Parametern untersucht. Grundlegend gilt, dass jene Abschnitte prioritär erneuert werden, die den größten Schaden bei einer ausbleibenden Erneuerung auslösen. In einem ersten Schritt geht es um die Frage, welche Abschnitte in den Nachholbedarf geschoben und welche Abschnitte in jedem Fall zum wirtschaftlichsten Zeitpunkt erneuert werden sollen. Dabei ist davon auszugehen, dass Abschnitte dann einen größeren Schaden auslösen, je höher ihre Annuität nach Standardelement ist. Bei einem Vergleich der Annuitäten können die größten Kostentreiber eruiert werden, nach denen in weiterer Folge eine Priorisierung erfolgen kann.

Die Wahl des Oberbaumaterials (Schiene und Schwelle) erzeugt bei der SBB maximal eine Erhöhung der Annuität um 84 % im Vergleich zum jeweils wirtschaftlichsten Objekt mit derselben Belastungs- und Radienklasse. Bei dieser maximalen Differenz handelt es sich um den Unterschied zwischen Betonschwellen mit einem Schienenprofil 60E1 im Vergleich zu Stahlschwellen mit einem Schienenprofil 54E2 in einer Belastungsklasse von 65.000 bis 100.000 GesBt/Tag und Gleis. Auf Grund der Belastung entsteht im Maximum eine Steigerung der Annuität um 177 % im Vergleich zwischen niedrigster und höchster Belastungsklasse der jeweiligen Oberbauform und Radienklasse. Diese maximale Steigerung ergibt sich bei einem Oberbau mit Stahlschwellen und Schienenprofil 54E2 in der kleinsten Radienklasse unter 300 m. Durch den Einfluss des Radius in ein und derselben Belastungsklasse wie auch demselben Oberbaumaterial entsteht die maximale Steigerung der Annuität um 121 % bei Holzschwellen mit einem Schienenprofil 60E1 zwischen der Radienklasse größer 3.000 m und kleiner 300 m.

In Abbildung 11.31 sind beispielhaft der Einfluss der Belastung (GesBt/Tag

und Gleis) sowie des Radius auf die Annuität abgebildet. Es wurden hierfür Holzschwellen mit einem 54E2-Schienenprofil gewählt, da diese durch alle Belastungs- und Radienklassen verbaut werden. Es ist nicht nur der deutliche Anstieg der Annuität in Abhängigkeit von der Belastung erkennbar, sondern auch der Einfluss der Radienklasse. Je höher die Belastung ist, umso stärker entwickelt sich auch der Einfluss des Radius. Dieser Vergleich lässt eine eindeutige Priorisierung zu. Grundlegend sind hoch belastete Gleise für die Wahl des wirtschaftlichsten Erneuerungszeitpunktes zu bevorzugen. Den zweitwichtigsten Parameter stellt der Radius dar. Erst in dritter Stufe folgt das Oberbaumaterial.

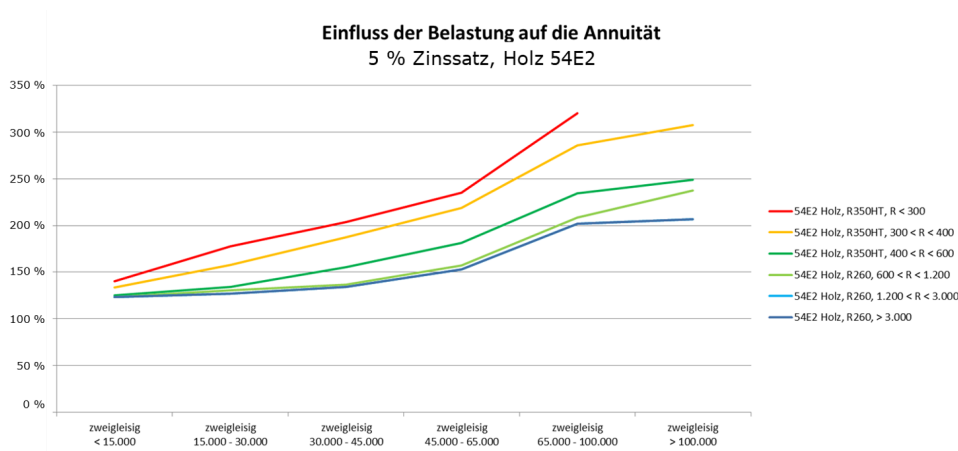


Abbildung 11.31: Einfluss der Belastung auf die Annuität am Beispiel von Holzschwellen bei einem Zinssatz von 5 % im Netz der SBB auf Basis der Standardelemente [94] (Quelle: eigene Darstellung)

Diese Methode kann jedoch nur einen ersten Anhaltspunkt bieten, da der Effekt der Unterhaltsmaßnahme, die den Nachholbedarf auslöst, nicht abgebildet werden kann. Es kann somit vorkommen, dass eine Unterhaltsarbeit zur Verlängerung der Nutzungsdauer auf einem hoch belasteten Abschnitt einen deutlich niedrigeren Sprung in der Annuitätenkurve auslöst als eine nutzungsdauerverlängernde Maßnahme auf einem niedrig belasteten Gleis. Eine Unterhaltsarbeit auf einem hoch belasteten Gleis ist jedoch meist kostenintensiver als auf einem niedrig belasteten Gleis. Dies begründet sich vor allem durch die günstigeren Sperren und die niedrigeren Betriebserschwerungskosten. Bei gleichen Unterhaltsmaßnahmen als Auslöser ist eindeutig der erwähnten Priorisierung zu folgen.



## 11.10 Schlussfolgerungen zur Reduktion des Erneuerungsbudgets

Bei einem Vergleich der dargestellten Szenarien, mit denen im Bereich der Erneuerung finanzielle Mittel über einen gewissen Zeitraum reduziert werden können, stellt sich abschließend die Frage, welches Szenario bei einem Budgetengpass die strategisch sinnvollste Wahl wäre. Um dies festzustellen, werden in Folge die drei Szenarien miteinander verglichen. In Abbildung 11.32 ist das Ergebnis der finanziellen Einsparungen nach 10 Jahren in Grün dargestellt. Diese 10 Jahre entsprechen in allen drei Szenarien dem Zeitraum, über den versucht wurde, finanzielle Mittel zu reduzieren. Ab dem Jahr 11 wurde jeweils wieder der anstehende Bedarf durchgeführt bzw. der anstehende Nachholbedarf mit einem maximalen Wert pro Jahr abgebaut. In Rot ist die Summe der Mehrkosten ab dem Jahr 11 bis zum Wiedererreichen des strategischen Levels von 100 % dargestellt. In Grau ist die Differenz zwischen dem grünen und dem roten Balken gekennzeichnet und zeigt damit die gesamten Mehrkosten nach dem Wiedererreichen des strategischen Levels. Alle drei Szenarien führen am Ende zu Mehrkosten. Aus einer strategischen Sicht spielt es jedoch eine Rolle, ob durch ein Szenario kurzfristig Mittel für etwas anderes eingesetzt werden können und die Mehrkosten in weiterer Folge möglichst niedrig sind. Es wird deutlich, dass das Verhältnis zwischen Einsparungen und Mehrkosten bei der Reduktion der Fahrbahnerneuerungsmenge deutlich besser ist als bei der Reduktion der Unterbausanieerung. Während der graue Balken in allen drei Szenarien in etwa gleich groß ist, werden bei einer Reduktion der Unterbausanieerung im Verhältnis nur wenige Mittel für eine andere Verwendung frei. Wenn bei der Fahrbahnerneuerungsmenge eingespart werden soll, dann anhand eines alternden Nachholbedarfs. Der Unterschied zwischen dem Szenario mit einem einjährigen oder einem alternden Nachholbedarf ist indes nur gering. Der Wert der Rendite in Abbildung 11.33 führt zu derselben Priorisierung, allerdings ist die Differenz zwischen den drei Szenarien weniger stark ausgeprägt. Dies liegt daran, dass die Rendite auf die Gesamtkosten bezogen wird und nicht auf die strategischen Kosten, welche in allen drei Szenarien gleich sind. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Rendite als Vergleichswert ein korrektes Ergebnis zeigt, allerdings der Vergleich der Einsparungen gegenüber den Mehrkosten für eine strategische Steuerung mehr Informationen enthält.

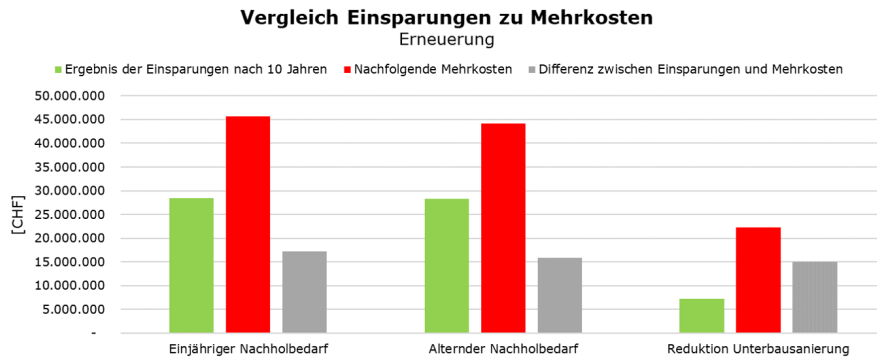


Abbildung 11.32: Vergleich der finanziellen Einsparungen über 10 Jahre zu den Mehrkosten bis zum Erreichen der strategischen Kosten (Quelle: eigene Darstellung)

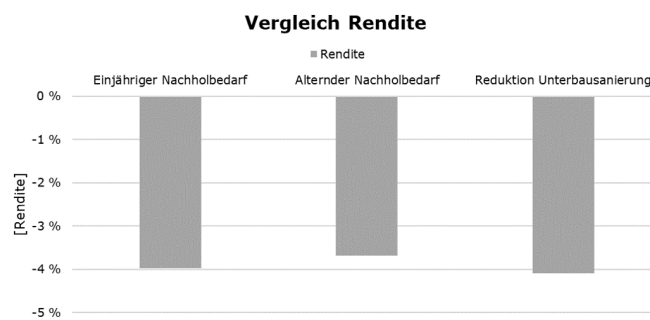


Abbildung 11.33: Vergleich der Rendite (Quelle: eigene Darstellung)

# 12 Reduktion des Unterhaltsbudgets

Der Unterhalt umfasst alle Maßnahmen der Instandhaltung und Instandsetzung sowie der Überwachung. Dies beinhaltet Stopfen, Schienenbearbeitung, Schienenwechsel und vieles mehr. Bei einer Reduktion des Unterhalts ist es somit für die Abschätzung des Effektes entscheidend, welche Maßnahme reduziert wird. Aus diesem Grund erfolgen in diesem Kapitel eine Definition der betrachteten Unterhaltsmaßnahmen sowie eine Analyse ihrer Auswirkungen. Danach erfolgt die Berechnung dieses Effekts auf das Modellnetz und damit die Untersuchung der Auswirkungen auf die Gesamtkosten des Gleises. Die Überwachung wird dabei als sicherheitsrelevante Maßnahme eingestuft und wird nicht reduziert.

Bei einem nicht ausreichenden Budget stellt sich die Frage, worin die geringen Finanzmittel am besten investiert werden, um einen möglichst geringen Schaden zu verursachen. Der Schaden einer nicht getätigten Unterhaltsmaßnahme entsteht entweder durch den ansteigenden Bedarf teurerer Unterhaltsmaßnahmen oder durch die Reduktion der realen Nutzungsdauer. Der ansteigende Bedarf teurerer Unterhaltsmaßnahmen ist beispielsweise bei einer Reduktion von Schienenbearbeitungsmaßnahmen zu erkennen. Als Folge steigt der Bedarf für Schienenwechsel bzw. Couponwechsel an. Ein Schienenwechsel ist jedoch um ein Vielfaches teurer als Schleifen und ist eine sicherheitskritische Maßnahme, welche nicht verzögert werden kann. Fehlende Stopfarbeiten führen grundsätzlich zu einer Verkürzung der Nutzungsdauer des Schotterbettes und damit zu einer Reduktion der wirtschaftlichen Nutzungsdauer des Gleises.

## 12.1 Strategische Priorisierung

Ähnlich der unterschiedlichen Altersstruktur des Nachholbedarfs kann auch bei reduziertem Unterhalt die Verteilung der zu geringen Menge auf unterschiedliche Arten erfolgen. Ziel dabei ist es, die zur Verfügung stehenden Mengen so zu verteilen, dass der geringste Schaden entsteht. Eine Möglichkeit ist es, die für eine Unterhaltsmaßnahme zur Verfügung stehenden Mittel gesamtheitlich über alle Anlagen in gleichem Maß zu reduzieren. Ebenso ist es jedoch möglich, eine Priorisierung der fehlenden finanziellen Mittel nach der Belastung der Gleise vorzunehmen. Wird davon ausgegangen, dass die Reduktion der Nutzungsdauer

eines Gleises, welche durch eine ausbleibende Unterhaltsmaßnahme verursacht wird, in Abhängigkeit zur Nutzungsdauer im Verhältnis auf allen Anlagen gleich groß ist, dann wird der größte Schaden auf den Gleisen mit den höchsten LCCs erzeugt. Dabei ist zudem zu beachten, dass vor allem Gleise mit einer hohen Belastung auch eine hohe Annuität aufweisen. Maßnahmen auf höher belasteten Gleisen haben auf Grund der Intervallsituation und der Betriebserschwerungskosten höhere Einheitskosten als Maßnahmen auf schwach belasteten Gleisen. In einer netzweiten Betrachtung führt das dazu, dass mit denselben finanziellen Mitteln weniger Maßnahmen durchgeführt werden können. Oft ist eine weitere Variante zur Priorisierung von Unterhaltsmaßnahmen zu erleben. Da neue Gleise meist noch über mehr Zeitreserven bis zum Systemversagen verfügen, wird vor allem der Unterhalt auf neuen Gleisen sowie der präventive Unterhalt reduziert. Dies führt zu einer deutlichen Verlagerung des Problems in die Zukunft, da der Effekt der Nutzungsdauerverkürzung erst spät sichtbar wird.

Aus diesem Zusammenhang ergeben sich somit drei Varianten, Unterhaltsmaßnahmen im Netz zu verteilen:

- gleichverteilt über das Netz
- Priorisierung nach der Höhe der Annuität
- Priorisierung nach der Dringlichkeit bezüglich der Verfügbarkeit (Alter der Anlagen)

Bei der Ausarbeitung des Effekts von reduziertem Unterhalt bedarf es somit einer Unterscheidung nach Belastung und dem Zeitpunkt der Reduktion. Ebenso erfolgt eine Unterscheidung in präventiven und kurativen Unterhalt. Eine gleichverteilte Reduktion des Unterhalts über das Netz bedarf keiner zusätzlichen Erläuterung. Die Priorisierung nach der Höhe der Annuität wurde bereits in Unterkapitel 11.9 behandelt. In weiterer Folge wird auf die Priorisierung nach der Dringlichkeit bezüglich der Verfügbarkeit detaillierter eingegangen.

### **12.1.1 Priorisierung nach Dringlichkeit bezüglich der Verfügbarkeit (Alter der Anlagen)**

Bei einer Verteilung der Unterhaltskosten ist das Alter der Anlage meist noch deutlich einflussreicher als ein Kosten-Nutzen-Verhältnis. Während die Verteilung der finanziellen Mittel nach einem Kosten-Nutzen-Verhältnis aktiv gesteuert werden muss, erfolgt die Verteilung nach dem Alter der Anlagen intuitiv. Gleise sind am Anfang der Nutzungsdauer in einem sehr guten und stabilen Zustand.

Abhängig von der Belastung fallen in den ersten Jahren kaum Unterhaltstätigkeiten an. Die ersten Unterhaltsarbeiten sind dann meist präventiv und so wird bei Budgetknappheit vorrangig gerade auf diese Unterhaltsarbeiten verzichtet. Ein Gleis, das am Ende der Nutzungsdauer steht, ist meist jedoch schon in so einem schlechten Zustand, dass der Unterhalt ausschließlich kurativ erfolgt. Eine unterlassene Unterhaltstätigkeit führt somit zwangsläufig zu einer Langsamfahrstelle oder kann nur durch eine Fahrbahnerneuerung kompensiert werden. Da eine Fahrbahnerneuerung jedoch deutlich höhere Kosten auslöst als eine Unterhaltstätigkeit, wird der generelle Fokus primär auf den Unterhalt alter oder sogar überalterter Anlagen gelegt.

## 12.2 Eingangsparameter für die Modellrechnung

Die außergewöhnlich detaillierte Dokumentation der Unterhaltstätigkeiten bei der SBB, welche in Abbildung 4.1 bereits vorgestellt wurde, zeigt zweifellos auf, dass eine Reduktion der Unterhaltsmenge bei einem gleichzeitigen Anstieg der Belastung nicht dem realen Bedarf entsprechen kann. Es bleibt jedoch die Frage offen, wie hoch genau der reale Bedarf war, um auf einen etwaigen Einfluss auf die heutige Bedarfsmenge zurückrechnen zu können. Dies ist bei der SBB auf Basis der heutigen Standardelemente und der vergangenen Belastungen auf Basis der Information der damaligen Infrastruktur gut möglich. Aufbauend darauf wurden erste Abschätzungen getroffen, wie der Einfluss der in der Vergangenheit reduzierten Unterhaltsmenge auf den heutigen und zukünftigen Bedarf abgeschätzt werden kann. Auf diese Abschätzung wird im Folgenden genauer eingegangen.

Für das in dieser Arbeit erstellte Modell wird der Ansatz gewählt, nicht von einem bestehenden Bedarf in die Vergangenheit zu rechnen, sondern den Modellansatz jeweils von einem eingespielten und optimal unterhaltenen Gleisnetz zu beginnen und davon ausgehend in die Zukunft zu rechnen. Der Blick in die Vergangenheit kann hierbei ausschließlich der Bedarfsanalyse heutiger Netze dienen. Für eine Entscheidungsfindung in der Zukunft ist jedoch eine Berechnung in die Zukunft entscheidend und nicht ein möglichst exaktes Abbild der Vergangenheit.

Stopfen dient als Unterhaltsmaßnahme der Verbesserung der Gleislage. Neben dem Einfluss auf die sicherheitstechnischen Grenzwerte der Gleislage beeinflusst das Verhalten der Gleislage über die Zeit auch die erreichbare Nutzungsdauer des Gleises. Grundlegend sind zur Bewertung des Erfolgs von Stopfmaßnahmen zwei Sichtweisen zu unterscheiden. Es kann einerseits der einzelne Gleisquerschnitt für sich betrachtet werden, was neben der zeitlichen Betrachtung des Verhaltens eines Querschnitts auch der sicherheitstechnischen Kontrolle dient. Zur Beurteilung einer netzweiten Qualität der Gleislage wird andererseits oft eine Art der Mittelung der Qualität aller Querschnitte über ein Netz durchgeführt. Hierfür existieren in den verschiedenen Ländern die unterschiedlichsten Qualitätskennzahlen, meist wird jedoch die Standardabweichung der Längshöhe herangezogen. In der Schweiz besteht allerdings auch der Ansatz einer Gleislagenote, welche die unterschiedlichsten Messparameter (Längshöhe, Richtung, Verwindung etc.) zu unterschiedlichen Anteilen aufsummiert. Für den Verlauf der Gleislage über die Zeit ist neben der Anzahl der Stopfarbeiten auch von Bedeutung, bei welchem Qualitätswert eingegriffen wird. Als Qualitätswert wird dafür üblicherweise die Längshöhe für sicherheitstechnische Grenzwerte oder die Standardabweichung der Längshöhe für strategische Grenzwerte herangezogen. In Abbildung 12.1 wird der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Eingriffsschwellen und der erreichbaren Nutzungsdauer dargestellt. Nach der Neulage beginnt sich die Längshöhe nach einer bestimmten Funktion zu verschlechtern. Neben einem linearen Verschlechterungsverhalten wird in der Literatur meist eine exponentielle Verschlechterung angesetzt. Diese verhält sich laut Veit wie folgt [93]:

$$Q = Q_0 \cdot e^{b \cdot t} \quad (12.1)$$

$Q$ ...aktuelle Qualität

$Q_0$ ...Qualität zum Zeitpunkt  $t = 0$  (entspricht der Ausgangsqualität)

$b$ ...Verschlechterungsrate

$t$ ...Zeit

Dabei ist davon auszugehen, dass eine „mitlaufende“ oder „konforme“ Eingriffsschwelle das beste Ergebnis und damit die längste wirtschaftliche Nutzungsdauer zur Folge hat. [93] Wird ein neues Gleis betrachtet, dann ist bei einem Unterlassen der Stopfarbeiten der Lebenszyklus mit dem ersten Erreichen der Soforteingriffsschwelle (SES) beendet. Dies resultiert daraus, dass bei einer Überschreitung des Sicherheitsgrenzwertes eine Langsamfahrstelle einzurichten oder der Bahnbetrieb einzustellen ist. Betrachtet man die Anzahl der Jahre bis zum ersten Stopfeinsatz in den Standardelementen der SBB, so ist zu erkennen, dass der erste Stopfeinsatz nach 2 bis 10 Jahren erfolgt. Wäre also das gesamte Netz der SBB neu und würde auf jegliche Stopfarbeiten verzichtet werden, dann wäre nach spätestens 10 Jahren

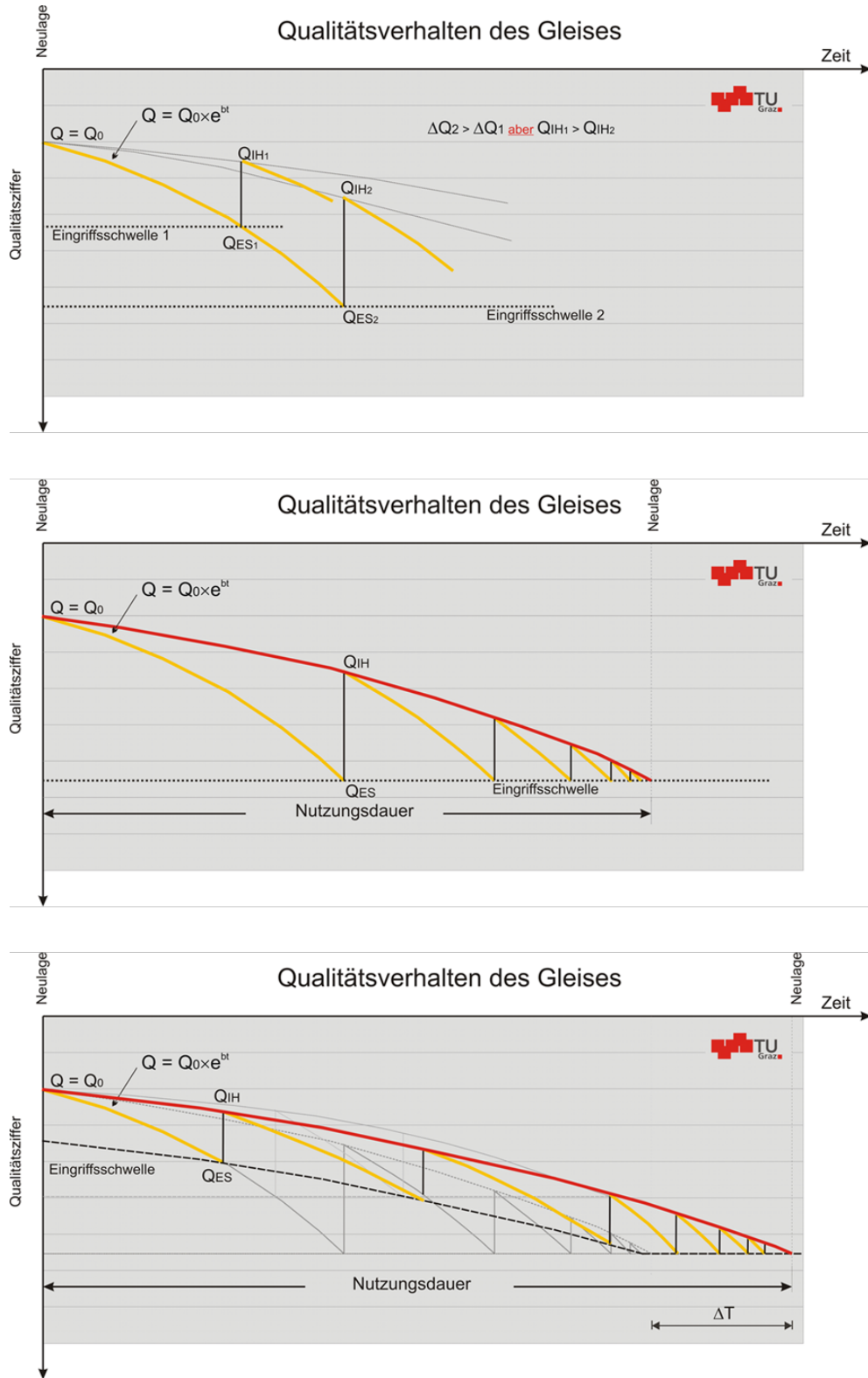


Abbildung 12.1: Qualitätsverhalten des Gleises in Abhängigkeit von der Eingriffsschwelle [93]

die Substanz des gesamten Netzes zunichte gemacht.

Eine Auswertung der im Jahr 2009 zur Verfügung stehenden Gleislagedaten der ÖBB von Humitzsch [46] zeigt den Effekt einer verlängerten Nutzungsdauer durch eine mitlaufende Eingriffsschwelle. Erfolgen Stopfeinsätze ausschließlich auf dem Level einer SES, reduziert sich die erreichbare wirtschaftliche Nutzungsdauer um 10 % bei einer Reduktion der Stopfeinsätze um nur 2 %. Abbildung 12.2 zeigt die Möglichkeit der Verlängerung der Nutzungsdauer durch das Stopfen bei einer mitlaufenden Eingriffsschwelle. Das bedeutet, dass nicht erst beim Erreichen der SES gestopft wird, sondern je nach Alter des Gleises u. U. schon deutlich früher.

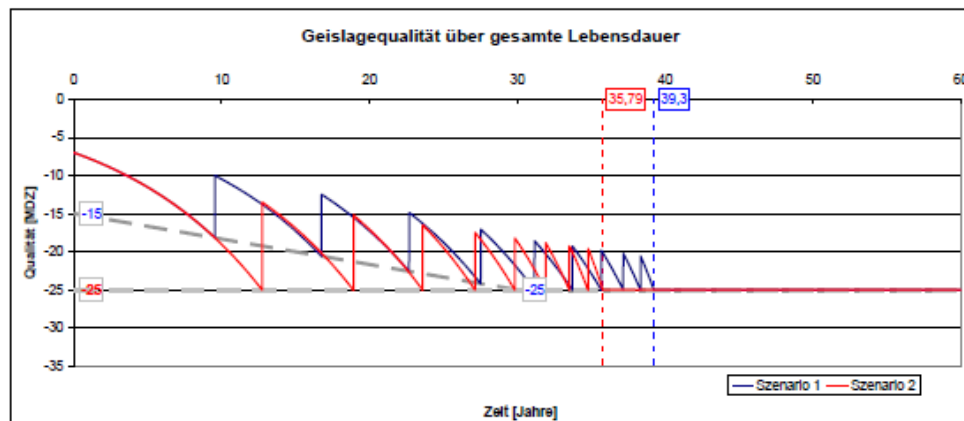


Abbildung 12.2: Verlängerung der Nutzungsdauer durch eine präventive Eingriffsschwelle [46]

Im Rahmen eines Vortrags im Jahr 2019 stellt Neuhold [60] eine andere Version einer angepassten Eingriffsschwelle für Stopfungen vor. Er weist nach, dass eine konforme Eingriffsschwelle, und damit eine dem Alter des Gleises angepasste Eingriffsschwelle, nur bei Gleisen mit einer grundlegend guten Gleislage zu der gewünschten Verlängerung der Nutzungsdauer führt. So kann durch eine konforme Eingriffsschwelle nach zehn Stopfungen eine Verlängerung der Nutzungsdauer von 49 auf 53 Jahre und damit um 8 % erreicht werden. Dabei geht Neuhold jedoch nicht wie Veit von einer exponentiellen Anpassung der Eingriffsschwelle oder wie Humitzsch von einer linearen Anpassung der Eingriffsschwelle aus, sondern er passt die Eingriffsschwelle sprunghaft innerhalb der Nutzungsdauer an. Bei Gleisen mit einer generell schlechten Gleislage führt der Ansatz der konformen Eingriffsschwelle von Neuhold zu einer Verkürzung der Nutzungsdauer und wird aus diesem Grund nicht als sinnvoll erachtet.

Steht netzweit eine geringere Menge an Stopfarbeiten zur Verfügung als mindestens benötigt wird, führt dies zwangsläufig zu Langsamfahrstellen. Dies führt



unabwendbar zu Kosten, welche auf den ersten Blick jedoch nicht leicht zu erkennen sind. Sie zeigen sich in einer Erhöhung der Betriebserschwerungskosten (siehe Unterkapitel 8.17), welche stark von der Fahrplanstabilität abhängen.

Für den Netzzustandsbericht der SBB wurde im Jahr 2010 eine Abschätzung von Experten erhoben, um eine Reduktion der Nutzungsdauer auf Grund von fehlendem Unterhalt ausweisen zu können. Das Ergebnis dieser Expertenmeinungen ist in Abbildung 12.3 zu erkennen. Sie beziehen sich ausschließlich auf die Stopfarbeiten und halten fest, dass bei 0 % umgesetzten Unterhalt bezogen auf den erhobenen Bedarf nur mehr eine Nutzungsdauer von 40 % erreicht werden kann. Werden 100 % Unterhalt ausgeführt, so können auch 100 % der Nutzungsdauer erreicht werden. Der Verlauf zwischen 0 % und 100 % wird als linear beschrieben.

Unterhalt	Nutzungsdauer
100 %	100 %
75 %	85 %
50 %	70 %
25 %	55 %
0 %	40 %

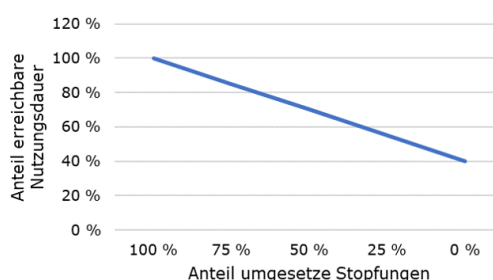


Abbildung 12.3: Reduktion der Nutzungsdauer bei reduzierter Stopfquote

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird versucht, einen detaillierteren Ansatz zu finden, um den Einfluss von nicht durchgeführten Stopfarbeiten netzweit abbilden zu können. Mit in Betracht gezogen wird, dass die Reduktion der Nutzungsdauer stark davon abhängt, in welchem Abschnitt der Nutzungsdauer sich der Gleisabschnitt befindet. Beispielsweise kann die Reduktion auf die Nutzungsdauer eines sehr alten Gleises nur äußerst gering sein, da der größte Teil der Nutzungsdauer bereits verstrichen ist. Bei einem neuen Gleis hat das Ausbleiben von Stopfarbeiten einen deutlichen Einfluss auf die Nutzungsdauer. Diese Tatsache wird nun dafür herangezogen, um den Einfluss auf die Nutzungsdauer genauer zu spezifizieren. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass Stopfarbeiten auf einem spezifischen Abschnitt nur ausgeführt werden können oder nicht ausgeführt werden können. Eine prozentuale Reduktion der Stopfarbeiten um 50 % führt beispielsweise dazu, dass auf 50 % der Abschnitte die Stopfarbeiten zu 100 % durchgeführt werden und auf den anderen 50 % der Abschnitte 0 % der Stopfarbeiten durchgeführt werden. Unter der Annahme, dass bereits ein ausschließlich kuratives Ausmaß an Stopfarbeiten durchgeführt wird, führt eine nicht durchgeführte Stopfarbeit bei der nächsten Überschreitung einer SES zu einer Langsamfahrstelle oder einer Sperrung der Strecke. Da es sich in dem Modell immer um den Ansatz der wirtschaftlichen Nutzungsdauer handelt, beendet eine

Langsamfahrstelle in weiterer Folge diese Nutzungsdauer.

Zur Modellierung dieser komplexen Fragestellung wird das Modell der Standardelemente der ÖBB [91] herangezogen. Die erreichbaren Nutzungsdauern werden dabei in Quadranten geteilt. Im jeweiligen Quadranten der Nutzungsdauer wird dann das mittlere Stopfintervall ermittelt und damit die Anzahl der Jahre bis zum Erreichen der SES bei einer Reduktion der Stopfquote auf 0 %. In Abbildung 12.4 ist die Reduktion der Nutzungsdauer, abhängig vom Anteil des Stopfens im Netz sowie der bis dahin prozentuell verbrauchten Nutzungsdauer dargestellt.

Die Auswertung basiert auf den Standardelementen der ÖBB [91] und wurde nach der Längenverteilung der Standardelemente des Modellnetzes nach Marschnig [54] gewichtet berechnet. Pro Quadrant wird das mittlere Stopfintervall ermittelt. Durch eine Halbierung dieses mittleren Stopfintervalls wird eine mittlere Altersverteilung des Standardelements in diesem Quadranten erreicht. In einem weiteren Schritt erfolgt eine gewichtete Mittelwertbildung nach der Länge des im Netz vorhandenen Standardelements nach Formel 12.2.

$$a_{0\%} = \frac{\sum \frac{\emptyset \text{ Stopfintervall}}{2} \cdot \text{Länge}}{\sum \text{Länge}} \quad (12.2)$$

$a_{0\%}$ ...restliche ND nach Eintreten von 0 % Stopfung  
 $\emptyset \text{ Stopfintervall}$ ...durchschn. Stopfintervall in Quadranten der ND  
 $\text{Länge}$ ...Länge des Standardelements

Das Ergebnis dieser Formel sind die verbleibenden Jahre nach Beendigung der jährlichen Stopfmaßnahmen. Nach Formel 12.3 folgt die Berechnung der erreichbaren Nutzungsdauer in Prozent. Dazu erfolgt in einem ersten Schritt die Ermittlung der Anzahl der Jahre eines Quadranten für das netzweite Mittel. Dieses netzweite Mittel wird zu der Anzahl der Jahre nach Beendigung der Stopfungen addiert und in weiterer Folge wird der prozentuale Anteil der mittleren Nutzungsdauer errechnet.

$$ND = \frac{\emptyset ND_{Netz} \cdot k_Q + a_{0\%}}{ND} \cdot 100 \quad (12.3)$$

$ND$ ...erreichbare Nutzungsdauer [%]  
 $\emptyset ND_{Netz}$ ...mittlere ND nach StElm im Netz nach Formel 7.3  
 $k_Q$ ...Faktor für den Quadranten (0, 0,25, 0,5, 0,75, 1)

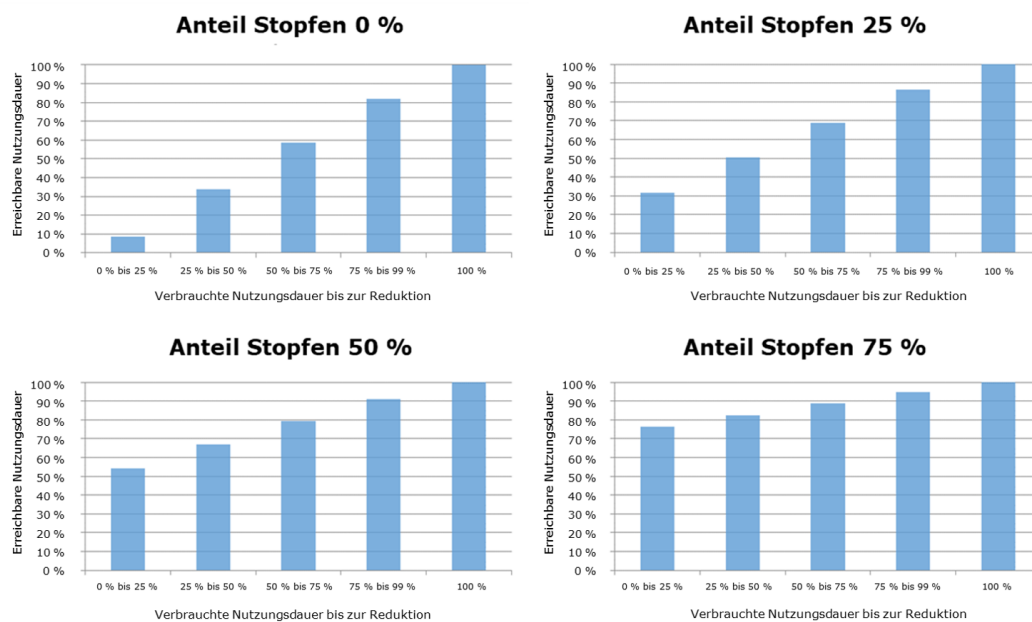


Abbildung 12.4: Reduktion der Nutzungsdauer bei reduzierter Stopfquote nach den Standardelementen der ÖBB und dem Modellnetz nach [54] (Quelle: eigene Darstellung)

Diese Betrachtung ist eine Extremwertbetrachtung und dient zur Veranschaulichung der unterschiedlich wirkenden Effekte. Es wird davon ausgegangen, dass jede Stopfmaßnahme in einem Standardelement bei Unterlassung der Stopfung zu einer SES führt. In vielen europäischen Eisenbahnnetzen werden Stopfmaßnahmen jedoch wie vorab beschrieben bereits vor Erreichen der SES-Grenze durchgeführt, um die Nutzungsdauer des Gleises zu verlängern. Im Laufe der Nutzungsdauer nähert sich der auslösende Wert für die Stopfung immer mehr der SES an. Somit wird in dieser Berechnung vor allem die Reduktion der Nutzungsdauer im ersten und zweiten Quadranten überbewertet, da der präventive Einsatz einer Stopfmaßnahme nur dann bewertet werden kann, wenn das Ausmaß des präventiven Ansatzes bekannt ist. Ist die Menge an präventiven Stopfungen bekannt, dann lässt sich aus der Analyse der Gleislagedaten die Stopfmenge berechnen, welche als Minimum benötigt wird, um die Gleise immer kurz vor dem Erreichen der SES zu stopfen. Vorab kann dann für diese Analyse die zu erwartende Nutzungsdauer durch den Ansatz von Humitzsch [46] oder Neuhold [60] bereits reduziert werden.

Bei einer realitätsnäheren Annahme führt eine Reduktion der Stopfmenge dazu, dass ausschließlich sicherheitskritische Abschnitte gestopft werden, womit zu einem Modus übergegangen wird, bei dem grundlegend Einzelfehlerstopfungen durchgeführt werden. Präventive Stopfarbeiten beim Erreichen einer Eingriffsschwelle (ES) oder das wirtschaftliche Verlängern von Stopfabsechnitten fällt aus

Kostengründen aus. Je nach Vertragskonstrukt für Stopfleistungen führt dies zu unterschiedlichen Effekten bei den Kosten. Grundlegend unterscheiden sich die Verträge danach, ob die Leistung pro Schicht oder pro Meter abgerechnet wird. Zudem besteht natürlich auch die Möglichkeit, dass die Leistung intern erbracht wird und damit nur die tatsächlich anfallenden Kosten verbucht werden. Werden nun Stopfmaßnahmen ausschließlich beim Erreichen der SES durchgeführt, so führt dies bei einer Abrechnung nach Schichtleistungen zu einer schlechten Auslastung der Stopfmaschine und erhöht somit die durchschnittlichen Kosten [CHF/lfm] und damit scheinbar die Instandhaltungskosten. Die durchführbare Stopfmenge reduziert sich dadurch auf Grund von Effizienzeinbußen zusätzlich. Werden Stopfleistungen nach Meter abgerechnet, so ist meist eine abzurechnende Mindestleistung pro Schicht definiert. Bei einer kurzfristigen Reduktion der Stopfmenge muss somit nur die tatsächlich erbrachte Leistung beziehungsweise diese Mindestleistung bezahlt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei einer dauerhaft tiefen Stopfmenge der Lieferant bei einem erneuten Vertragsabschluss die Bedingungen an diese niedrige Stopfmenge anpassen wird und der Stopfmeter damit langfristig ebenfalls teurer wird.

In den Abbildungen 12.5 und 12.6 ist die Zusammenstellung der ausgewerteten Parameter zu sehen. Es ist zu erkennen, dass das Ergebnis um rund 10 % höher liegt als die Abschätzungen in Abbildung 12.3. Dies lässt sich durch die beiden unterschiedlich gewählten Ansätze erklären. Während in der Abschätzung für den Netzzustandsbericht von einem Mix aus kurativen und präventiven Stopfmaßnahmen ausgegangen wird, wird in der Modellannahme davon ausgegangen, dass jede Stopfmaßnahme kurativ ist und eine fehlende Maßnahme zu einer Langsamfahrstelle führen muss. Die Differenz von 10 % zwischen den beiden Ansätzen entspricht den Ergebnissen der Auswertungen von Hummitzsch [46], welche in Unterkapitel 12.2 erläutert werden.

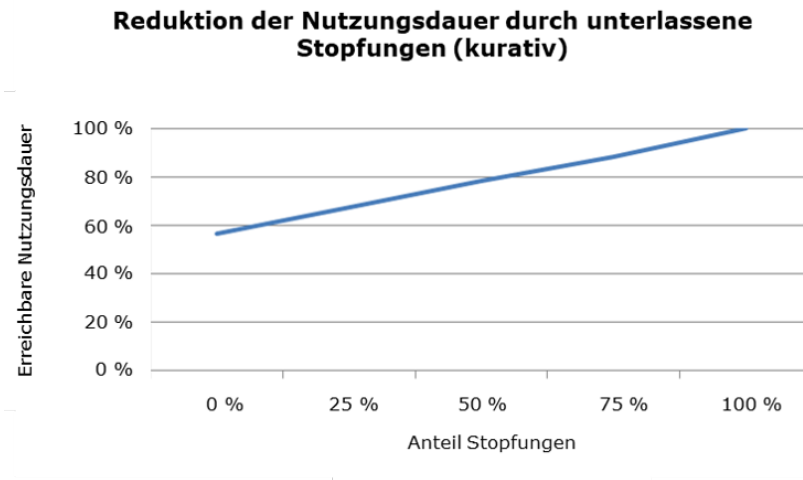


Abbildung 12.5: Reduktion der Nutzungsdauer bei reduzierter Stopfquote nach Modellrechnung 2D (Quelle: eigene Darstellung)

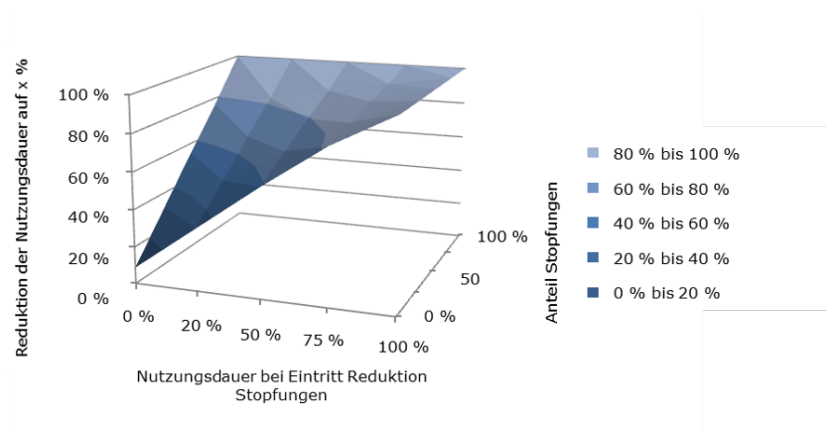


Abbildung 12.6: Reduktion der Nutzungsdauer bei reduzierter Stopfquote nach Modellrechnung 3D (Quelle: eigene Darstellung)

### 12.2.1 Netzweite Auswirkungen einer reduzierten Stopfmenge

Für eine netzweite Modellrechnung für die Reduktion von Stopfarbeiten ist vor allem der Kostenanteil der Stopfarbeiten an den gesamten Unterhaltskosten relevant. In dem gewählten Modellnetz konnte der Anteil der Stopfkosten mit 20 % quantifiziert werden. Dieser Anteil verteilt sich unterschiedlich auf die verschiedenen Abschnitte im Netz. Diese Aufteilung wurde in der Habilitationsschrift von Marschnig [54] analysiert. Das Ergebnis ist aus Abbildung 12.7 ersichtlich: Der Anteil der Stopfarbeiten am gesamten Unterhalt ist in der Geraden deutlich höher, während in Bögen vor allem der planmäßige Schienenwechsel die Unterhaltskosten dominiert.

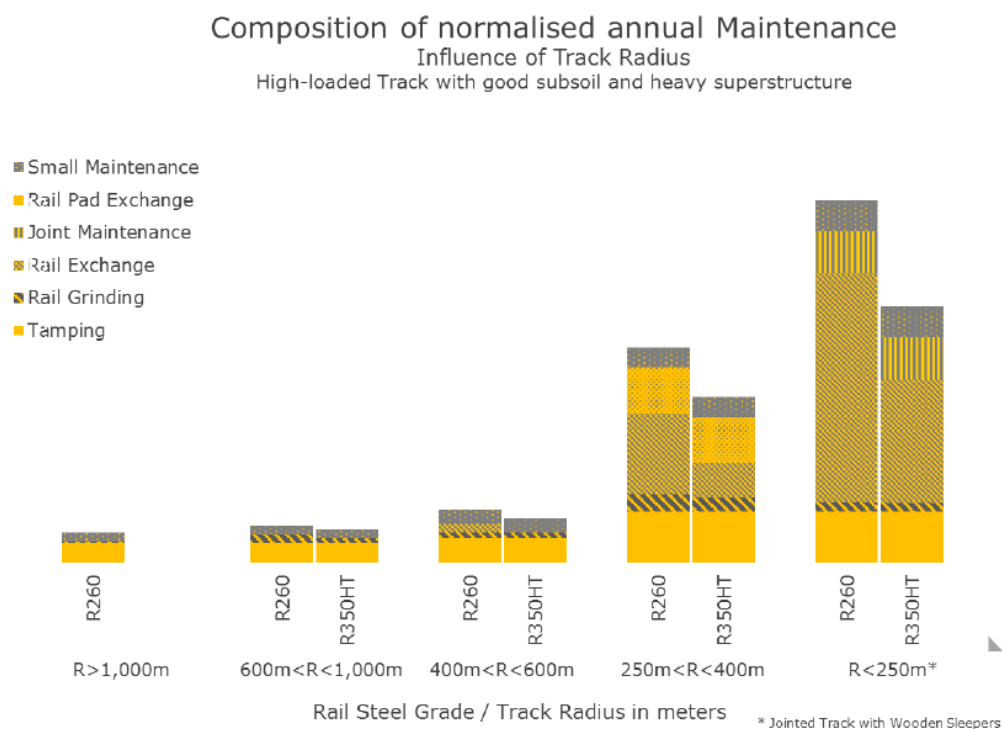


Abbildung 12.7: Kostenanteile der Unterhaltsarbeiten [54]

Die Modellrechnung folgt dem Ansatz der Nutzungsdauerreduktion aus Unterkapitel 12.2. Die Basis für die Berechnung bildet die maximale Reduktion der Nutzungsdauer, abhängig vom Ausmaß der Reduktion der Stopfarbeiten, bei einem neuen Gleis. Nach Ablauf der erreichbaren Nutzungsdauer der zum Zeitpunkt der Reduktion neu eingebauten Gleise ist der Maximalwert der Erhöhung der Erneuerungsmenge erreicht. Somit lässt sich als Erneuerungsmenge zum Jahr 0 der strategische Bedarf ansetzen und am Ende der maximalen Nutzungsdauerreduktion der Erneuerungsbedarf nach Formel 7.1 mit der reduzierten Nutzungsdauer.

Die Berechnung des Anstiegs der Erneuerungsmenge dazwischen wird als linear angesetzt. Die erneute Reduktion der Erneuerungsmenge nach einem erneuten Anheben der Stopfmenge wird ebenfalls linear über die strategische Nutzungsdauer angesetzt. Bei der Berechnung ist darauf zu achten, dass es einen überlappenden Bereich gibt, in dem sowohl eine weitere Erhöhung der Erneuerungsmenge stattfindet wie auch eine Reduktion. Die beiden Effekte müssen in diesem Bereich addiert werden.

Als Annahme für eine Reduktion der Stopfrate werden 50 % über 10 Jahre angesetzt. Dies hat auf Grund des geringen Anteils der Stopfkosten an den gesamten Unterhaltskosten nur eine geringe Reduktion der Kosten zur Folge. In Abbildung 12.8 ist die Reduktion der Stopfmenge dargestellt. Nach den angesetzten 10 Jahren mit reduzierter Stopfmenge wird die Menge wieder auf 100 % angehoben. Ein Anheben über 100 % ist bei Stopfleistungen nicht zielführend, da nach einer Stopfung das Gleis im Allgemeinen die bestmögliche Gleislage bereits erreicht. Durch zusätzliche Stopfungen kann die Gleislage nicht noch zusätzlich verbessert werden. Somit kann kein Mehrwert erzielt werden. Es kann jedoch sehr wohl ein negativer Effekt durch zu viel Stopfen erreicht werden, da jede Stopfung auch eine mechanische Beanspruchung des Gleisschotters mit sich bringt und dies zu Brüchen der Schotterkörner führen kann. Werden die Schotterkörner zu stark gebrochen, kann keine nachhaltig stabile Gleislage mehr erreicht werden, da eine entsprechende Verzahnung der Schotterkörner unmöglich wird. Somit ist die Nutzungsdauer, welche durch die Reduktion der Stopfmenge vermindert wurde, jedenfalls verloren und kann nicht wieder erbracht werden. Für die Modellrechnung wird die Reduktion der Stopfmenge gleichverteilt über die Altersstruktur des Netzes und unabhängig einer Kosten-Nutzen-Verteilung über das Netz angesetzt.

Auf Grund der reduzierten Stopfmenge steigt der Bedarf an Erneuerungen in Folge des unterlassenen Unterhalts an. Gleise am Ende der Nutzungsdauer stehen damit kurzerhand zur Erneuerung an. Neuere Gleise haben noch einen entsprechenden Puffer im Zustand zur Verfügung, bis die Substanz angegriffen wird. In Abbildung 12.9 ist die Entwicklung der Erneuerungskosten bei einer reduzierten Stopfquote um 50 % über 10 Jahre abgebildet. Auffallend ist der Effekt, dass trotz erneuten Hochfahrens der Stopfleistung auf 100 % der Effekt der steigenden Erneuerungsquote erst weitere 10 Jahre später umgekehrt werden kann. Erst ab dem Jahr 20 kann der Erneuerungsbedarf wieder gesenkt werden. Der Bereich zwischen den Jahren 10 und 20 entspricht dem Bereich, in dem sich die beiden Effekte von Erhöhung und Reduktion der Erneuerungsquote überlagern. Aus diesem Grund verändert sich die Neigung des Anstiegs der Erneuerungsquote. Die Reduktion der Erneuerungsquote ist in diesem Beispiel rund halb so groß wie der Anstieg der Erneuerungsquote. Dies ergibt sich aus dem Einfluss der unterschiedlichen Nutzungsdauern. Nach insgesamt 47 Jahren ist der Einfluss der reduzierten Stopfmenge nicht mehr ersichtlich und das Netz hat wieder seinen optimalen Zustand erreicht.

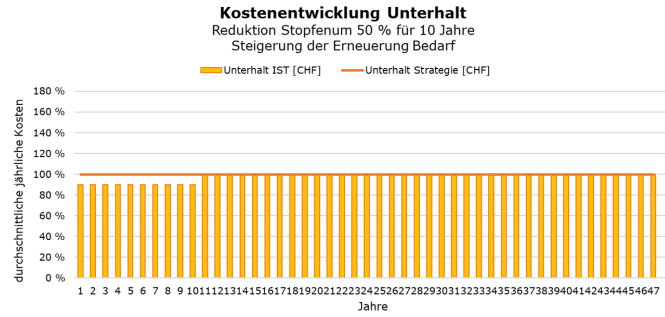


Abbildung 12.8: Kostenentwicklung der Unterhaltskosten bei reduzierter Stopfquote um 50 % für 10 Jahre und einem darauffolgenden Anstieg der Erneuerungsquote nach Bedarf (Quelle: eigene Darstellung)

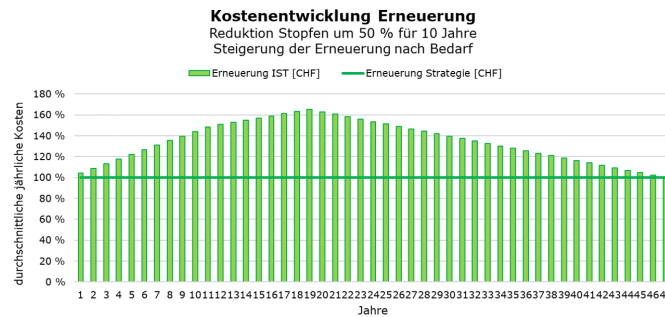


Abbildung 12.9: Kostenentwicklung der Erneuerungskosten bei reduzierter Stopfquote um 50 % für 10 Jahre und einem darauffolgenden Anstieg der Erneuerungsquote nach Bedarf (Quelle: eigene Darstellung)

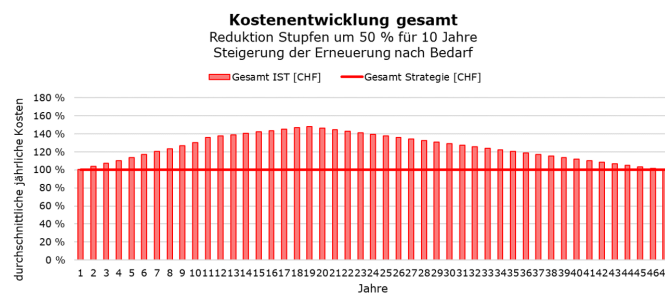


Abbildung 12.10: Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei reduzierter Stopfquote um 50 % für 10 Jahre und einem darauffolgenden Anstieg der Erneuerungsquote nach Bedarf (Quelle: eigene Darstellung)



Wird die Summe aus Unterhalts- und Erneuerungskosten gebildet, so ergibt sich die Kostenentwicklung der Gesamtkosten. Die Betriebserschwerungskosten sind in diesem Modell jeweils in den Unterhalts- und Erneuerungskosten enthalten, jedoch nicht gesondert ausgewiesen. Das Bild der Gesamtkosten stellt sich, auf Grund des nur kleinen Anteils der Stopfkosten an den Gesamtkosten, sehr ähnlich der Entwicklung der Erneuerungskosten dar. Nur die Höhe der Kosten ist um den Anteil der Unterhaltskosten erhöht – im Gegensatz zu den Erneuerungskosten. Aus Abbildung 12.10 wird dies ersichtlich.

Die Rendite liegt in diesem Beispiel bei -20 % und erreicht damit einen außerordentlich hohen negativen Wert. Eine Reduktion der Stopfmenge ist somit keinesfalls zu empfehlen. Durch die nur sehr geringen Einsparungen beim Stopfen wird eine große Reduktion der Nutzungsdauer erreicht. Der dadurch steigende Erneuerungsbedarf zieht hohe Kosten nach sich.

## 12.3 Schienenbearbeitung und Schienenwechsel

Als Schienenbearbeitung werden die Maßnahmen Schleifen, Fräsen und High-Speed-Grinding bezeichnet. Die benötigte Schienenbearbeitungsmenge ist stark an die Beanspruchung der Fahrbahn eines Gleisnetzes gekoppelt. [54] Genauer gesagt bestimmt sich die benötigte Schleifmenge in einem Netz neben der Trassierung durch Anzahl, Geschwindigkeit sowie Gewicht der Fahrzeuge, den spezifischen Kräfteintrag eines Fahrzeuges und den Fahrplan bzw. den Bedarf an Traktion (enge Pufferzeiten und ein Ansetzen knapper Fahrzeiten führt im Mittel zu einer Erhöhung der Traktionsleistung). Zudem hat ein Benchmark der drei DACH-Bahnen im Jahr 2019 [61] gezeigt, dass auch die Instandhaltungsstrategie der jeweiligen Bahn die Schienenbearbeitungsmenge stark beeinflusst. Aus strategischer Sicht sind zu den oben genannten Einflussgrößen die Abtragungstiefe, die Vertragskonstrukte mit den Gleisbaumaschinenlieferanten und die betriebliche Situation dafür entscheidend, wie viele Kilometer pro Jahr geschliffen werden. Vor allem durch die Abtragungstiefe kann ein und dasselbe Risswachstum auf einem Netz mit einer unterschiedlichen Schleifmenge behoben werden.

Eine Reduktion der benötigten Schienenbearbeitungsmenge führt zu einer Erhöhung von Schienenfehlern (Head Checks, Riffel, Schlupfwellen, Squats, Schienenbrüche) und diese führt wiederum zu einer Erhöhung von Schienenwechseln und gegebenenfalls zu Langsamfahrstellen, falls die Schienenfehler nicht zeitnah durch einen Schienenwechsel behoben werden können. Neben den Schienenfehlern werden Schleif- oder Fräsarbeiten auch auf Grund von Schienenverschleiß zur Reprofilierung der Schiene ausgeführt. Diese Maßnahme dient der Verbesserung des Rad-Schiene-Kontakts. Wird auf diese Maßnahme verzichtet, so ist eine Erhöhung der Kosten kaum nachweisbar, da sie sich ausschließlich in der höheren Dynamik des Gesamtsystems zeigt und damit einen Einfluss auf die Lebensdauer von Rad, Schiene, Schienenbefestigung, Zwischenlagen, Schwellen, Schotter und Unterbau hat. Eine Quantifizierung dieses Effekts ist jedoch nach heutigem Wissensstand nicht möglich. Bei der Beurteilung der finanziellen Auswirkungen von Riffel und Schlupfwellen stellt sich dieselbe Herausforderung, da sich ihr Ausbilden ausschließlich in einer erhöhten Dynamik des Gleises auswirkt. Inwieweit dies die Komponenten schneller verschleißt lässt, ist nicht quantifizierbar. Um eine Abschätzung der Folgekosten von zu niedrigen Schienenbearbeitungsraten zu treffen, wird somit die generelle Erhöhung der Dynamik im Gleis nicht quantifiziert. Vielmehr wird der Fokus darauf gelegt, welchen Kosteneffekt die reduzierte Menge der Schienenbearbeitung auf die Kosten des Schienenwechsels hat.

Die Gesamtmenge an Schienenwechseln in einem Netz hängt dabei nicht nur davon ab, wie schnell Schienenfehler entstehen und wie konsequent diese durch eine Schienenbearbeitung behoben werden, sondern auch von der reglementarischen Verschleißgrenze der Schienen einer Bahn und vor allem davon, welche Schienenprofile in einem Netz zum Einsatz kommen. Der Benchmark der drei

DACH-Bahnen [61] hat aufgezeigt, dass die niedrigen Verschleißgrenzen der SBB dazu beitragen, dass deutlich mehr Schienenwechsel auf Grund von einem Erreichen der Verschleißgrenze durchgeführt werden müssen als in anderen Ländern.

Die Maßnahme eines Schienenwechsels kann auf Grund von Budgetengpässen nur reduziert werden, wenn im Gegenzug eine Langsamfahrstelle oder eine Gleisperrung gestellt wird. Ein Schienenwechsel wird immer aus sicherheitskritischen Ursachen, wie einem Schienenbruch, zu tiefe Schienenfehler oder das Erreichen der Verschleißgrenze der Schienen, ausgelöst. Eine Reduktion des Schienenwechsels wird nicht als Variation in der Modellrechnung angesetzt. Präventive Schienenwechsel sind aus wirtschaftlicher Sicht grundlegend zu unterbinden. Der Effekt einer reduzierten Schienenbearbeitung wird jedoch durch eine Erhöhung des Schienenwechsels ausgedrückt. Die Reaktionszeit bei einer Reduktion oder einer erneuten Steigerung der Schleifmengen ist deutlich kürzer als bei einer Reduktion der Stopfmaßnahmen. Um diesen Zusammenhang darzustellen, wird die Entwicklung der Schleifmengen, des Schienenwechsels und der Schienenfehler der vergangenen Jahre der SBB in Abbildung 12.11 dargestellt. Innerhalb von 5 Jahren konnten die Schleifmengen im Vergleich zum Jahr 2013 auf 273 % gesteigert werden, was innerhalb eines Jahres eine Trendumkehr bei der Entwicklung der Anzahl der Schienenfehler zur Folge hatte.

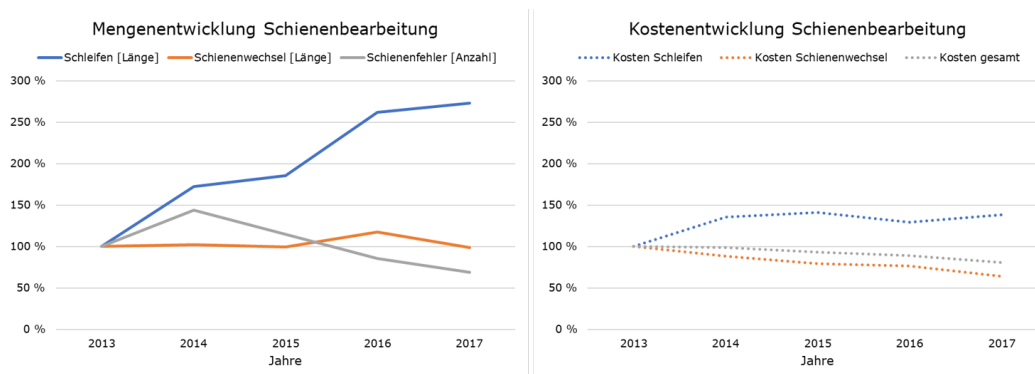


Abbildung 12.11: Entwicklung der Mengen und Kosten der Schienenbearbeitung sowie Anzahl der Schienenfehler nach [43] und [78] (Quelle: eigene Darstellung)

Bei einer Betrachtung der Kosten der Schienenbearbeitung und des Schienenwechsels wird deutlich, dass die Gesamtkosten aus den beiden Maßnahmen reduziert werden konnten. Dies wurde allerdings ausschließlich durch eine Effizienzsteigerung erreicht und nicht durch eine Reduktion der Mengen des Schienenwechsels. So konnten beispielsweise die Einheitskosten (EhK) beim Schleifen durch die Mengensteigerung und die damit entstandene bessere Schichtauslastung um 50 % reduziert werden. Die Menge des Schienenwechsels bleibt über die Jahre

grundlegend stabil. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei der SBB nicht jede Art von Schienenwechsel auch als Schienenwechsel verbucht wird. Schienenstücke unter 72 m Länge gelten als Coupon und werden gesondert in einer Sammelposition mit anderen Maßnahmen verrechnet. Aus diesem Grund ist die reale Veränderung der Menge der Schienenwechsel nicht klar aus den offiziellen Management-KPIs abbildbar. Um einen Vergleich mit den real ausgebauten Schienenlängen herzustellen, wird ein Datenvergleich zwischen den offiziellen Managementinformationen aus dem Blauen Blatt 2017 [78] und den Informationen aus dem Schienenfehlerbericht der SBB aus dem Jahr 2016 [84] durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 12.12 zu erkennen. Dabei stellen die orange und die graue Linie die modellierte Schienenausbaulänge auf Grund von Schienenfehlern dar. Die blaue Linie beinhaltet ausschließlich den realen Langschienenwechsel (bei der SBB 108 m) und damit grundsätzlich Schienenwechsel, welche auf Grund von dem Erreichen der Verschleißgrenze durchgeführt werden. Bei einem Schienenwechsel auf Grund von Erreichen der Verschleißgrenze werden grundsätzlich auch Schienenfehler behoben, welche sich auf den ausgebauten Schienen befinden. Die Daten sind bezogen auf den Wert des Schienenwechsels im Jahr 2013.

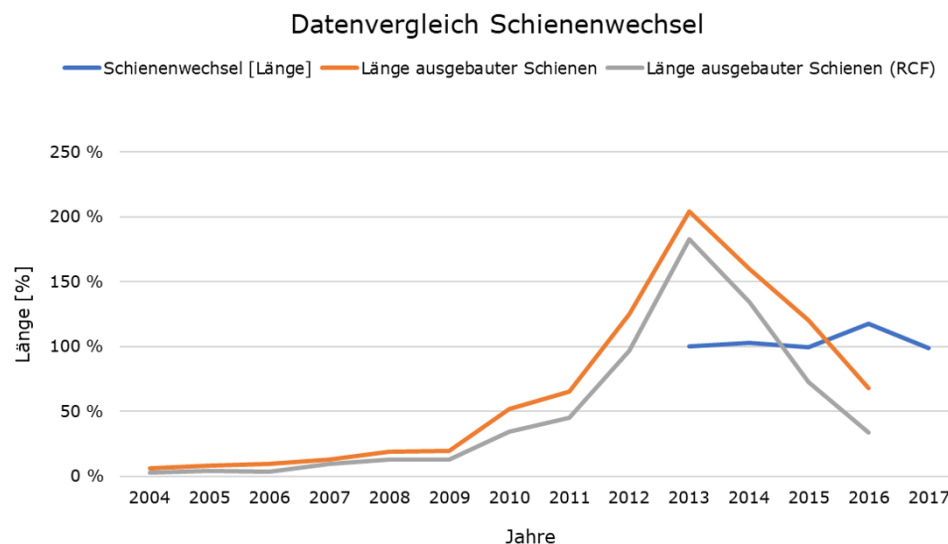


Abbildung 12.12: Datenvergleich zu den Längen der Schienenwechsel nach [78] und [84] (Quelle: eigene Darstellung)

Durch den Datenvergleich wird sichtbar, dass eine Reduktion der effektiven Länge ausgebauter Schienen über die Jahre erst durch die zusätzliche Information aus dem Schienenfehlerbericht deutlich wird. Es ist ein klarer Anstieg der Länge auszubauender Schienen auf Grund von Schienenfehlern bis zum Jahr 2013 zu erkennen. Der größte Teil der auszubauenden Schienen wird durch Fehler durch Rollkontaktermüdung (RCF) verursacht. Ab dem Jahr 2013 sinkt dann die aus-

zubauende Menge hinsichtlich der Schienenfehler. Diese Trendumkehr ist auf die erhöhten Schleifmengen und die Umsetzung einer präventiven Schleifkampagne zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass sich die Gesamtmenge an Schienenwechseln bei der SBB als Teilmenge aus der Summe von Schienenwechseln und der modellierten Länge der Schienenwechsel auf Grund von Schienenfehlern errechnet.

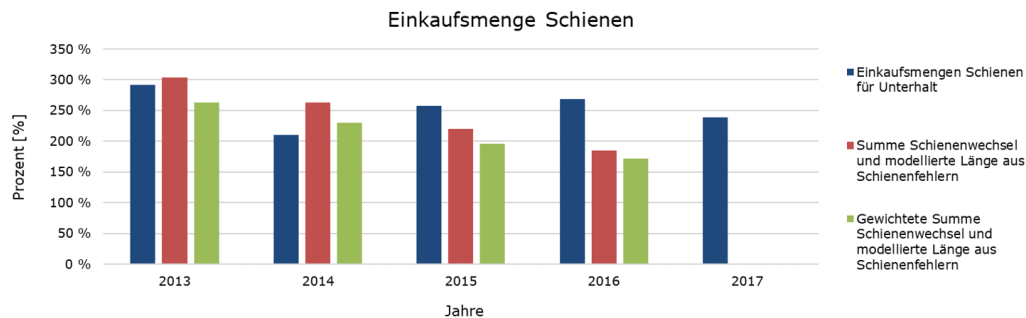


Abbildung 12.13: Einkaufsmengen Schienen, abzüglich der Menge für die Fahrbahnerneuerung (Quelle: eigene Darstellung)

Ein Vergleich mit den eingekauften Schienenmengen der SBB zwischen 2013 und 2017 ist aus Abbildung 12.13 ersichtlich. Darin sind die Mengen abzüglich der benötigten Schienenmenge für die Fahrbahnerneuerung dargestellt. Grundsätzlich müssen eingekaufte Schienen nicht immer in demselben Jahr verbaut werden, in dem sie erworben werden; durch den Abbau von Lagerbeständen und dem Einsatz gebrauchter Schienen kann es hier zu Abweichungen kommen. Die Mengen wurden auf die 100 % aus Abbildung 12.12 normiert. In Rot ist im Vergleich die Summe aus Schienenwechsel und der modellierten Länge der Schienenwechsel auf Grund von Schienenfehlern dargestellt. In Grün wurde eine gewichtete Summe gebildet, bei der die modellierte Länge auf Grund von Schienenfehlern nur zu 80 % einbezogen wird, da auch durch den normalen Schienenwechsel eine gewisse Menge an Schienenfehlern behoben wird. Es ist zu erkennen, dass bei den Einkaufsmengen sowohl der in Abbildung 12.12 ersichtliche starke Abfall vom Jahr 2013 auf das Jahr 2014 als auch der Anstieg im Jahr 2016 ersichtlich werden. Im Vergleich mit der Gesamtmenge stimmen die Längen des Jahres 2013 sehr gut mit der Summe aus Schienenwechsel und modellierter Länge durch Schienenfehler überein. Der leichte Anstieg im Jahr 2016 wird jedoch durch die starke Reduktion der Schienenfehler kompensiert und führt damit in der Summe der Schienenwechsel und der modellierten Länge aus den Schienenfehlern zu einem kontinuierlichen Rückgang der Schienenwechsel bis ins Jahr 2016. Da die eingekaufte Menge an Schienen jedoch in den Jahren 2015 und 2016 deutlich über dieser Summe lag, ist davon auszugehen, dass mehr Schienenwechsel durchgeführt wurden als sich aus der Summe ableiten lässt.



Abbildung 12.14: Entwicklung der Schienenfehler der SBB 2004 bis 2017 [43]

Da somit keine definitive Aussage über die Entwicklung des Schienenwechsels auf Grund der Schleifmengen getroffen werden kann, wird für den Ansatz für die Modellrechnung in weiterer Folge die Entwicklung zwischen Schleifmenge und Schienenfehlerlänge und der daraus modellierten Schienenwechsellänge herangezogen. Das Zusammenspiel der Veränderung der Schleifstrategie und der Entwicklung der Schienenfehler bei der SBB wurde detailliert im Rahmen einer Certificate of Advanced Studies (CAS)-Arbeit von Grossmann [38] aufgearbeitet. In Abbildung 12.14 ist die Entwicklung der Schienenfehler in Abhängigkeit von Anzahl und Länge abgebildet. Dabei auffallend ist der signifikante Anstieg der Schienenfehler im Jahr 2013. Dieser ist jedoch auf die Einführung eines neuen Schienenprüfzuges zurückzuführen [38][43]. Im Jahr 2013 entgleiste ein S-Bahn-Zug [80] bei Schwerzenbach auf Grund eines Trümmerbruchs, der durch Squats ausgelöst wurde. Diese beiden Tatsachen führten zu einer Erhöhung der Schleifmenge. Dies spiegelt sich zwei Jahre später auch in der Statistik der Schienenfehler wider. Das erste Mal seit vielen Jahren konnte eine Trendumkehr der Entwicklung der Schienenfehler vermerkt werden. Aus dem Vergleich der Schienenbearbeitungsmenge sowie der Länge der effektiv ausgebauten Schienen zwischen den Jahren 2013 und 2017 lässt sich eine Trendentwicklung bei einer Erhöhung der Schleifmengen ableiten. Mit dem Jahr 2018 wurde bei der SBB erneut ein Wechsel der Auswertemethodik der Schienenfehler vorgenommen, wodurch die Möglichkeit einer Zeitreihenanalyse endet. In Abbildung 12.15 ist das Ergebnis der linearen Regressionsanalyse zu erkennen. Dabei ist darauf zu achten, dass für die Entwicklung des Schienenwechsels ein Jahr weniger zur Analyse zur Verfügung steht. Mit einem Bestimmtheitsmaß

$R^2$  von 0,9434 und 0,9967 gilt der lineare Zusammenhang als nachgewiesen. Ebenso liegen die beiden Steigungen von 0,4253 und -0,4501 auffallend nah beieinander.

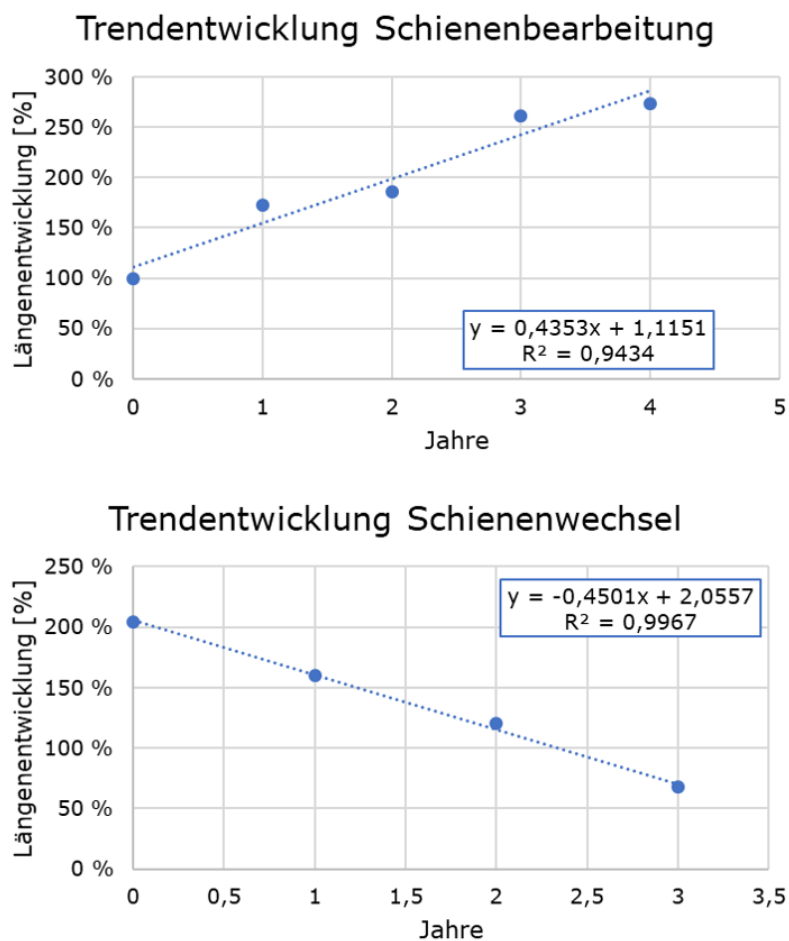


Abbildung 12.15: Entwicklung der Schienenfehler der SBB 2004 bis 2017 basierend auf [43] (Quelle: eigene Darstellung)

Eine Auswertung der Daten vor dem Jahr 2013 stellt sich als deutlich schwieriger heraus, da davon auszugehen ist, dass die Auswertemethodik der Schienenfehler vor der Anschaffung des neuen Prüfzuges nicht ausreichend genau war, um einen realistischen Zusammenhang abzuleiten. Es ist jedoch anzunehmen, dass die gegensätzlichen Trendlinien und damit die Entwicklung bei einer Reduktion der Schleifmengen sich deutlich flacher ausbildet. Bei einer historischen Betrachtung der Schleifmengen der SBB ist zu erkennen, dass zwischen den Jahren 1998 und 2012 rund 50 % der im Jahr 2013 durchgeführten Schleifmenge absolviert wurde. Bis zum Jahr 2013 hat es somit 16 Jahre gebraucht, bis der effektive Zustand des Netzes so schlecht war, dass dieser durch den Unfall von Schwerzenbach

eskalierte und zu einer Trendumkehr bei der Unterhaltsstrategie führte. Dabei ist die Erhöhung der Verkehrsbelastung keineswegs außer Acht zu lassen. Da die Prognosen der Verkehrsbelastung in den meisten europäischen Ländern jedoch weiterhin im Steigen begriffen sind, wird diese bei einer Implementierung der berechneten Funktionen in ein Modell somit indirekt hinterlegt.

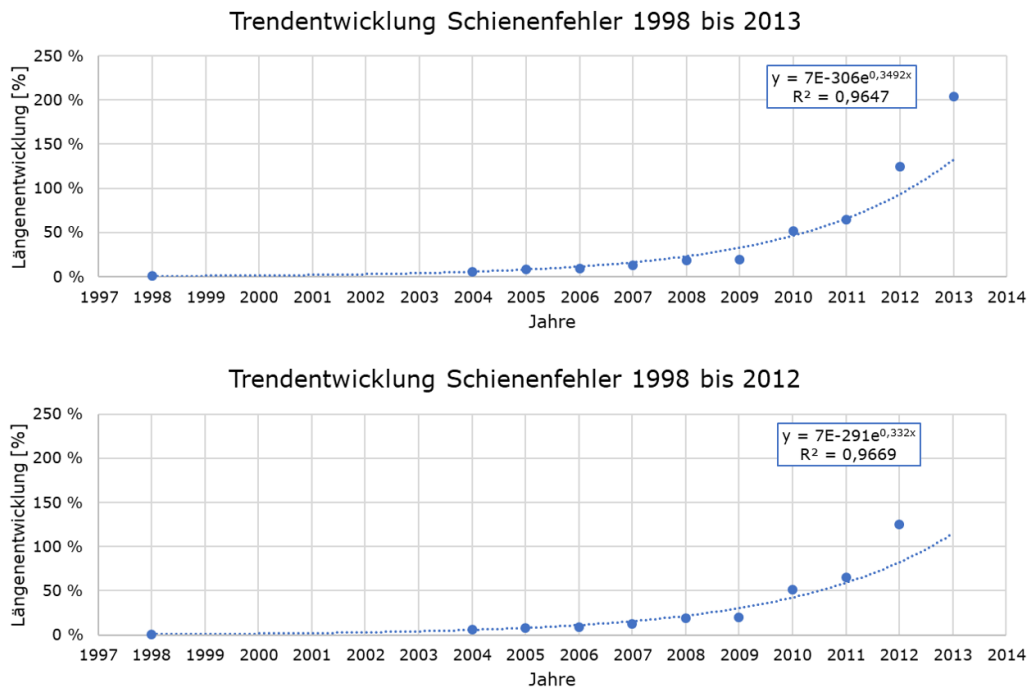


Abbildung 12.16: Entwicklung der Schienenfehler der SBB 1998 bis 2013 bzw. 2012 basierend auf Daten von [43] (Quelle: eigene Darstellung)

In Abbildung 12.16 ist zu erkennen, dass das Ergebnis einer Regressionsanalyse der Entwicklung der Schienenfehler der Jahre 1998 bis 2013 einer exponentiellen Funktion folgt. Das Jahr 2013 beinhaltet bereits den neuen Messzug und stellt damit jedenfalls eine Veränderung im Trend dar. Durch die Elimination des Wertes des Jahres 2013 wird eine Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  von 0,9647 auf 0,9669 erreicht. Die Exponentialfunktion verändert sich ebenfalls nur minimal. Es ist somit davon auszugehen, dass der Einfluss des neuen Messmittels auf die Ermittlung der Funktion als eher gering einzustufen ist. Trotzdem zeigt die Funktion, dass gerade in den letzten beiden Jahren die Anpassung an den gemessenen Wert sehr schlecht ist. Dieser Effekt ist in einer netzweiten Modellierung der Auswirkungen reduzierter Schleifmengen zu berücksichtigen. Die Trendanalysen der Entwicklung der Schienenfehler entsprechen einem Trend bei der bestehenden Belastungs- und Beanspruchungssituation des Netzes der SBB. Bei einer entsprechend niedrigeren Belastung sollte der Effekt verzögert einsetzen. Das Maß der



Verzögerung kann mit der bestehenden Datengrundlage jedoch nicht abgeschätzt werden, hierzu müssten entsprechende Daten auch aus anderen vergleichbaren Eisenbahnnetzen zur Verfügung stehen.

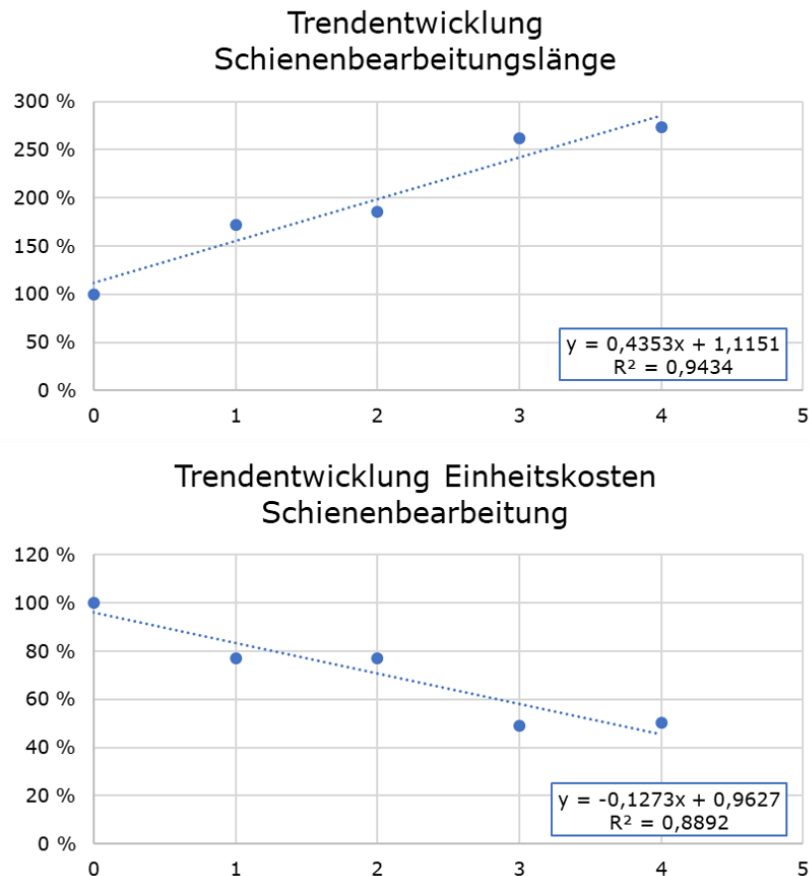


Abbildung 12.17: Entwicklung der Einheitskosten für die Schienenbearbeitung in Bezug auf die jährliche Schienenbearbeitungslänge der SBB der Jahre 2013 bis 2017 basierend auf den Daten aus [78] (Quelle: eigene Darstellung)

Bei der Schienenbearbeitung besteht bei Gleisbaumaschinenverträgen, welche pro Schicht abrechnen, durch eine gute Auslastung der Schleif- und Fräsmaschinen ein großes Potential zur Senkung der Einheitskosten, was in Abbildung 12.11 bereits gezeigt werden konnte. Dieser Einfluss darf bei der Modellrechnung nicht außer Acht gelassen werden. Es wird versucht, auch diesen Zusammenhang aus den Jahren 2013 bis 2017 der SBB abzuleiten. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass die Trendlinie nach einer hundertprozentigen Auslastung der Maschinen wieder abflachen muss und annähernd waagrecht verläuft. Zudem ist es nicht möglich, zusätzliche Einflüsse auf die Einheitskosten der Schienenbearbeitung herauszukris-

tallisieren. Die Trendlinie ist damit sehr stark von den Maschinenverträgen des jeweiligen EIUs, dem Gleisnetz sowie der unternehmerischen Situation abhängig. In Abbildung 12.17 ist das Ergebnis der Regressionsanalyse der Entwicklung der Schienenbearbeitungslänge und der Einheitskosten für die Schienenbearbeitung ersichtlich. Es lässt sich feststellen, dass sich bei einer Verdreifachung der Schienenbearbeitungslänge die Einheitskosten in etwa halbieren. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ergibt sich zu 0,9434 bei der Trendentwicklung der Schienenbearbeitungslänge und zu 0,8892 bei der Trendentwicklung der Einheitskosten der Schienenbearbeitung.

### 12.3.1 Netzweite Auswirkungen einer reduzierten Schleifmenge

Zur Modellberechnung der Auswirkungen einer reduzierten Schienenbearbeitungsmenge werden die Erkenntnisse aus Unterkapitel 12.3 herangezogen. Zum Abbilden der Kosteneffekte werden die Unterhaltskosten um die Reduktion der Schleifmenge reduziert. Um den Effekt reduzierter Schleifmengen auf die Einheitskosten miteinzubeziehen, werden die verbleibenden Kosten für die Schienenbearbeitung mit dem entsprechenden Faktor aus Abbildung 12.17 multipliziert. Zusätzlich zu den Kosten für die Schienenbearbeitung erhöht sich auch die Menge der Schienenwechsel. Diese werden nach der Regressionsanalyse in Abbildung 12.16 in das Modell miteinbezogen. Um die gesamte Erhöhung der Schienenwechsel bis hin zur Entgleisung in Schwerzenbach abbilden zu können, wird der Zeitraum der Reduktion der Schienenbearbeitung auf 15 Jahre gesetzt.

In Abbildung 12.18 wird die Auswirkung der reduzierten Schleifmenge auf die Unterhaltskosten ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass durch die Reduktion der Schleifmengen kaum Einsparungen generiert werden können. Dies liegt daran, dass die Kosten für die Schienenbearbeitung rund 6-8 % des jährlichen Unterhaltsbudgets betragen. In dem aufgezeigten Beispiel wurden 8 % als Ansatz gewählt. Nach 10 Jahren werden die zudem geringen Einsparungen durch die Erhöhung der Einheitskosten der Schienenbearbeitung und vor allem durch den Anstieg der Schienenwechsel kompensiert. Der Anstieg der Schienenwechsel wird bis zum Jahr 15 aufgezeigt. Nach 15 Jahren endet die berechnete Kurve bei der SBB durch einen signifikanten detektierten Anstieg an Schienenfehlern und den Trümmerbruch von Schwerzenbach. Die Grafik ist somit keineswegs als unproblematisch zu verstehen, da der Anstieg der Unterhaltskosten auf 120 % erst nach 15 Jahren erreicht wird und in weiterer Folge die zusätzlichen Kosten für den Schienenunterhalt innerhalb von vier Jahren wieder reduziert werden kann. Mit der Trendumkehr einhergeht vorrangig ein Sicherheitsproblem, das zu Entgleisungen, Todesfällen und einem Imageverlust führen kann. Die vermeintliche Einsparung durch die Reduktion von Schleifmengen, welche nur zu einem vergleichsmäßig geringen Anstieg der Gesamtkosten führt, sollte demnach tunlichst vermieden werden.

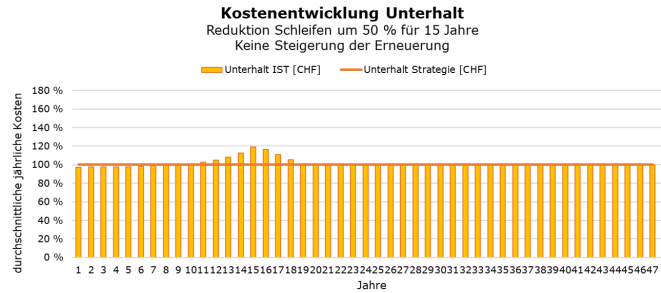


Abbildung 12.18: Kostenentwicklung der Unterhaltskosten bei reduzierter Schienenbehandlungsquote um 50 % für 15 Jahre, Anstieg der Erneuerung ist nicht abgebildet (Quelle: eigene Darstellung)

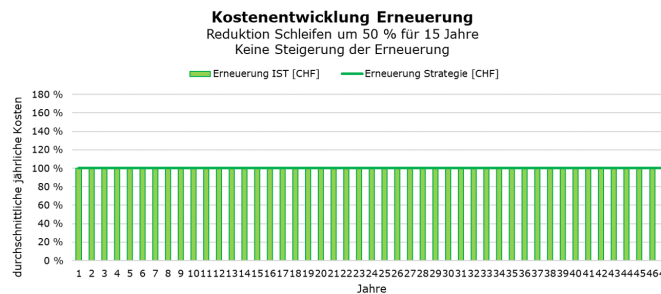


Abbildung 12.19: Kostenentwicklung der Erneuerungskosten bei reduzierter Schienenbehandlungsquote um 50 % für 15 Jahre, Anstieg der Erneuerung ist nicht abgebildet (Quelle: eigene Darstellung)

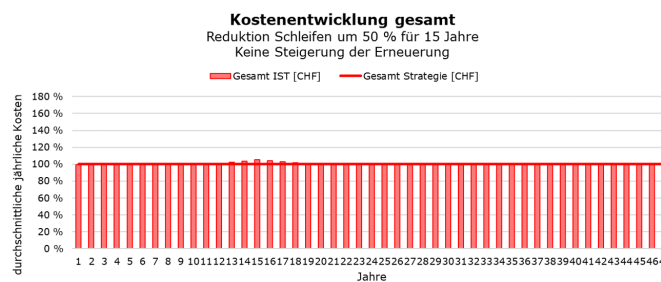


Abbildung 12.20: Kostenentwicklung der Gesamtkosten bei reduzierter Schienenbehandlungsquote um 50 % für 15 Jahre, Anstieg der Erneuerung ist nicht abgebildet (Quelle: eigene Darstellung)

In Abbildung 12.19 sind die Auswirkungen auf die Erneuerungskosten dargestellt. Wie bereits in Unterkapitel 12.3 sind die Auswirkungen auf die Nutzungsdauer auf Grund der gesteigerten Dynamik heute nicht quantifizierbar. Ein Gleichbleiben der Erneuerungskosten bildet somit nicht die Realität ab. Durch einen wissenschaftlichen Nachweis der Auswirkungen kann diese Berechnung verbessert werden. Es ist jedenfalls davon auszugehen, dass die Auswirkungen erst stark verspätet nach rund 75 % der strategischen Nutzungsdauer eintreten. Die Erhöhung der Erneuerungsmenge sollte dabei bei rund 10 % liegen.

In Abbildung 12.20 wird der Effekt auf die Gesamtkosten der Fahrbahn abgebildet. Die Erhöhung der Gesamtkosten beträgt im Maximum 5 %.

Die Rendite liegt in diesem Beispiel bei -0,88 % und erreicht damit einen sehr geringen Wert. Dieses Ergebnis verharmlost den negativen Effekt reduzierter Schienenbearbeitung, da die Auswirkung weniger finanziell als viel mehr sicherheitskritisch ist. Selbst die direkten finanziellen Auswirkungen einer Entgleisung sind im Vergleich zum Gesamtbudget der Fahrbahn von mehreren hundert Millionen pro Jahr gering. Die Vermeidung von Entgleisungen ist damit vor allem eine Frage der Verantwortung gegenüber den Passagieren und hat einen großen Einfluss auf das Image eines Unternehmens.

## 12.4 Schraublochanierung (SLS)

Bei der Schraublochanierung handelt es sich um eine Maßnahme, die die Nutzungsdauer von Holzschwellen verlängern soll. Durch die dauerhafte Beanspruchung bei der Überfahrt eines Zuges lockert sich mit der Zeit die Schienenbefestigung. Ein Wiederanziehen der Schwellenschraube führt nach einer gewissen Zeit zu keiner Verbesserung des Halts der Schraube in der Schwelle, da die Gewindegänge der Bohrung einer Abnutzung unterlegen sind. Durch ein rechtzeitiges Vergießen mit Epoxidharz kann der Halt der Schraube um 5 bis 10 Jahre verlängert werden [94].

Bei der SBB wurde diese Maßnahme bei Weichen generell als wirtschaftlich nachgewiesen [94]. Im Gegensatz dazu steht die Schraublochanierung in Gleisen. Der Grund hierfür ist in den hohen Investitionskosten und den verhältnismäßig eher geringen Nutzungsdauern einer Weiche zu finden. Durch die hohen Investitionskosten führt die Verlängerung der ohnedies kurzen Nutzungsdauern zu einer Reduktion der Lebenszykluskosten. Eine Schraublochanierung bei Weichen zählt damit zu den Standardmaßnahmen bei der SBB. Da dieses Vorgehen generell für alle Holzschwellenweichen zur Anwendung kommt, ist eine Erhöhung der Mengen, um die Erneuerungsmenge zu reduzieren, nicht durchführbar.

Schraubblochsaniierungen in Gleisen werden bei der SBB strategisch nicht durchgeführt. Fehlt jedoch das Budget zur Erneuerung von Gleisen, so kann diese Maßnahme als Mittel zur Verlängerung der Nutzungsdauer dienen und somit den Erneuerungsbedarf senken. Es handelt sich jedoch nicht um eine Maßnahme, die großflächig zum Einsatz kommt. Aus diesem Grund wird die Schraubblochsaniierung in der Modellrechnung nicht gesondert behandelt. Sie ist in der Auswertung des Nachholbedarfs und damit in der Berechnung der reduzierten Erneuerungsmengen implizit enthalten.

## 12.5 Schotter(bett)reinigung

Eine Schotterreinigung kann im Rahmen einer Gleiserneuerung oder als Instandsetzungsmaßnahme zur Verlängerung der Nutzungsdauer bei Betonschwellengleisen ohne Schwellenbesohlung durchgeführt werden. Die Wirtschaftlichkeit einer Schotterreinigung innerhalb der Nutzungsdauer wurde durch Neuhold im Jahr 2016 [59] anhand des Gleisnetzes der ÖBB analysiert. Neuhold kommt auf Basis einer Lebenszykluskostenberechnung zu dem Schluss, dass eine Schotterreinigung vor Erreichen von 68 % der strategischen Nutzungsdauer bei einer statischen Berechnung und vor 74 % der strategischen Nutzungsdauer bei einer dynamischen Berechnung (5 % kalkulatorischer Zinssatz) wirtschaftlich ist. Voraussetzung ist hierbei die technische Notwendigkeit einer Schotterreinigung. Die technische Notwendigkeit leitet Neuhold ab, indem er festlegt, dass Gleise dann aus technischer Sicht eine Schotterreinigung benötigen, wenn ein jährliches Stopfintervall benötigt wird. Bei seiner Analyse geht Neuhold nicht von einer möglichen Verlängerung der strategischen Nutzungsdauer aus, sondern von Gleisen, welche auf Grund ihres schlechten Zustands die strategische Nutzungsdauer ansonsten nicht erreichen würden und bei Auftreten eines jährlichen Stopfintervalls erneuert werden müssten. Zur Beurteilung des netzweiten technischen Zustands bedient sich Neuhold der Methode der Fraktalanalyse. [41] Bei einem Vergleich seiner Ergebnisse mit dem Zustand des Schotterbetts im Netz der ÖBB stellt er fest, dass für 11 % der ausgewerteten Abschnitte eine Schotterreinigung als Instandsetzungsmaßnahme wirtschaftlich und technisch sinnvoll wäre.

Bei einer Anwendung der Erkenntnisse von Neuhold auf ein anderes Gleisnetz sind grundlegende Unterschiede zu beachten. Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist von den in einem Netz erreichten Kosten für die Erneuerungs- und Unterhaltsmaßnahmen der Fahrbahn und der strategischen Nutzungsdauer abhängig. Kann beispielsweise eine Schotterreinigung als Unterhaltsmaßnahme deutlich günstiger durchgeführt werden, so steigt der Prozentsatz der erreichten strategischen Nutzungsdauer, bei dem sich eine Schotterreinigung noch aus wirtschaftlicher Sicht rechnet. Zudem müssen die technischen Aspekte zwischen den unterschiedlichen Bahnnetzen betrachtet werden. Die Widerstandsfähigkeit des

Schotter sowie die Stopfstrategie beeinflussen den Anteil der Menge an Gleisen, welche sich in einem Netz so ausprägen, dass bei ihnen eine Schotterreinigung als technisch notwendig erachtet wird. Die unterschiedlich ausgeprägte Widerstandsfähigkeit des Bahnschotter wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Load Labs“ [4] aus dem Jahr 2015 herausgearbeitet. Diese Erkenntnisse spiegeln sich auch in den unterschiedlichen Ausprägungen der strategischen Nutzungsdauern der unterschiedlichen Länder wider.

Neuhold hält fest, dass die Schotterreinigung zur Erreichung der strategischen Nutzungsdauer und nicht zur Verlängerung dieser dient, da auch die anderen Gleiskomponenten begrenzend auf die strategische Nutzungsdauer wirken. Dieser Fakt ist im Vergleich mit anderen Ergebnissen von großer Bedeutung. Bei der SBB kommt eine Schotterreinigung als Unterhaltsmaßnahme aus strategischer Sicht nicht zum Einsatz. Diese strategische Stoßrichtung basiert auf einer Sensitivitätsanalyse, welche im Rahmen der Erstellung der Standardelemente durchgeführt wurde. [94] Die Arbeiten von Veit und Marschnig basieren dabei auf den Erkenntnissen der Fachleute der SBB. Diese halten fest, dass eine Schotterreinigung zu einer Verlängerung der strategischen Nutzungsdauer um 4 Jahre bei einer Gleisbelastung über 30.000 GesBt/Tag und Gleis führt. Die Schotterreinigung wird dabei bei rund 70 % der strategischen Nutzungsdauer angesetzt. Diese Annahme führt zu dem Schluss, dass eine Schotterreinigung grundsätzlich nicht als wirtschaftlich erachtet werden kann. Ausnahmen bilden auf Grund des knappen Ergebnisses Betonschwellengleise mit Belastungen über 100.000 GesBt/Tag und Gleis. Der kritische Wert der Nutzungsdauerverlängerung gegenüber dem Basisstandardelement ergibt sich dabei bei 7 Jahren. Neuhold vergleicht in seiner Forschungsarbeit die Annuität des Zyklus mit der Schotterreinigung nicht mit dem Basisstandardelement, sondern mit einem Gleis mit einer reduzierten Nutzungsdauer und kommt somit zu der Erkenntnis, dass eine Schotterreinigung bis zu einem gewissen Prozentsatz der Nutzungsdauer wirtschaftlich ist. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde zur Validierung des Ergebnisses von Neuhold dieselbe Analyse anhand der Standardelemente der SBB durchgeführt. Dabei wurde das im Netz der SBB am häufigsten vorkommende Standardelement ausgewählt. Gerade Hauptgleise mit Betonschwellen, einem 60E1-Schienenprofil und einer Belastung zwischen 45.000 und 65.000 GesBt/Tag und Gleis machen 4,65 % des Gesamtnetzes aus. In Abbildung 12.21 ist die Verteilung der Standardelemente im Gleisnetz der SBB mit mehr als 1 % dargestellt.

Das Ergebnis dieser Berechnung zeigt, dass auch bei der SBB unter den Annahmen von Neuhold die Ergebnisse ähnlich sind. Eine Schotterreinigung ist vor Erreichen von 75 % der strategischen Nutzungsdauer bei einer statischen Berechnung und vor 84 % der strategischen Nutzungsdauer bei einer dynamischen Berechnung (kalkulatorischer Zinssatz von 5 %) wirtschaftlich. Jedoch gilt diese Annahme nur für Betonschwellengleise, welche somit die strategische Nutzungsdauer ohne eine Schotterreinigung jedenfalls deutlich unterschreiten würden. Diese

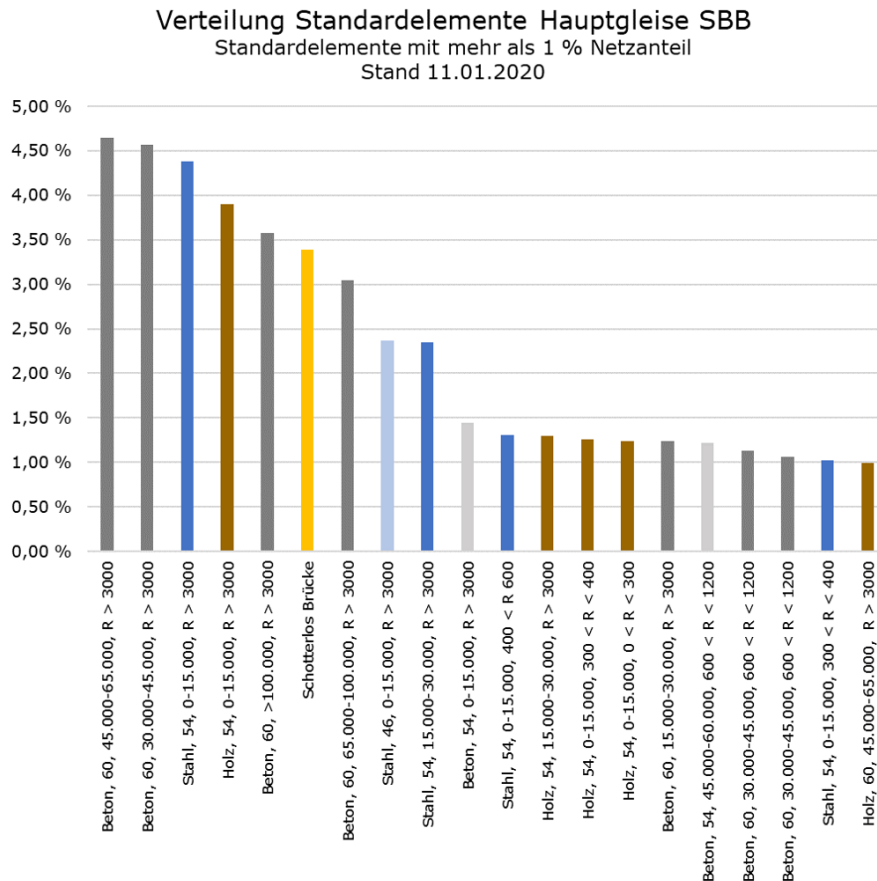


Abbildung 12.21: Verteilung der Standardelemente der Hauptgleise im Netz der SBB, Standardelemente mit einem Netzanteil über 1 %, Stand: 11.01.2020 (Quelle: eigene Darstellung)

reduzierte Nutzungsdauer darf ausschließlich auf Grund des schlechten Zustands des Schotterbettes liegen. Dies bedeutet, dass es zu keinem zusätzlichen Schienenwechsel kommen darf oder die erreichbare Nutzungsdauer durch den Zustand der Schwelle reduziert wird. Es stellt sich somit die Frage, wie oft dieser Fall im Netz tatsächlich vorkommt. Lebenszykluskostenberechnungen für den Erneuerungszeitpunkt von ausgewählten Gleisen bei der SBB haben gezeigt, dass selbst bei einer Verlängerung der realen Nutzungsdauer die Maßnahme der Schotterreinigung nicht wirtschaftlich war. Dabei wurden jeweils der Zustand der Schiene und der Schwelle mit in Betracht gezogen. Die generell sehr gute Gleislagequalität bei der SBB führt dazu, dass das Element Schotter nur in Ausnahmefällen alleinig das nutzungsdauerbegrenzende Element darstellt.

Abschließend stellt sich die Frage, ob eine Schotterreinigung als Unterhaltsmaßnahme aus strategischer Sicht bei einem reduzierten Erneuerungsbudget

eingesetzt werden kann. Durch die Verlängerung der realen Nutzungsdauer könnte damit die benötigte Menge an Erneuerungen reduziert werden. Im Jahr 2020 kommt es bei der SBB auf Grund von Budgetengpässen zur Schiebung von rund 50 km Fahrbahnerneuerung. Um dies zu ermöglichen, wurden die Erneuerungsprojekte für das Jahr 2020 auf ihren Zustand analysiert. Dabei ist kein Projekt aufgetreten, bei dem die Nutzungsdauer ausschließlich auf Grund des Zustands des Schotters ausgelöst wurde. Betonschwellen weisen neben Schienen mit einer zu geringen Verschleißreserve meist eine Abnutzung der Rippen sowie verschlissene Zwischenlagen auf. Zudem führt das häufige Stopfen zu einer Abnutzung an der Unterseite der Schwellen und damit zu einer Lageinstabilität. Auch gerissene Betonschwellen kommen häufig vor. Dies führt zu dem Schluss, dass Schotterreinigungen bei der SBB nicht als Maßnahme dienen können, um in einem größeren Ausmaß zu einer Verzögerung der Fahrbahnerneuerung beizutragen. Aus den angeführten Gründen wird die Schotterbettreinigung in der Modellrechnung nicht behandelt. Bei Bahnen mit einem grundlegend schlechteren Zustand des Schotters könnte dies jedoch zutreffend sein. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weitergehend untersucht.

## 12.6 Umbau kleiner Längen (UKL)

Ein Umbau kleiner Längen bezeichnet eine Gleiserneuerung auf so kurzen Längen, dass sie meist mit Bagger und Kran durchgeführt werden kann. Diese Maßnahme kommt zur Anwendung, wenn die Gleislage in einem kurzen Abschnitt nicht mehr haltbar ist, jedoch die angrenzenden Abschnitte noch nicht zur Erneuerung anstehen. Diese Maßnahme erhöht somit die Wirtschaftlichkeit des Gesamtnetzes. Es entstehen zwar punktuell hohe Kosten, jedoch können in weiterer Folge durch die lange Baulänge niedrige Einheitskosten bei einem Erneuerungsprojekt erreicht werden. Die Kosten für den Umbau kleiner Längen liegen auf den Meter rund 30 % über den Kosten einer durchschnittlichen Fahrbahnerneuerung. Somit handelt es sich dabei keinesfalls um eine Maßnahme, welche über größere Längen hinweg zu einer Verlängerung der Nutzungsdauer führt. Es stellt sich somit die Frage, bei welcher Prozentzahl eines Erneuerungsprojektes die Nutzungsdauer des gesamten Erneuerungsprojektes wirtschaftlich sinnvoll durch den Umbau kleiner Längen gestreckt werden kann.

Um diese Frage zu beantworten, wird wiederum der Zyklus des Standardelements eines geraden Hauptgleises mit Betonschwellen, einem 60E1-Schienenprofil und einer Belastung zwischen 45.000 und 65.000 GesBt/Tag und Gleis gewählt. Mit diesem Standardelement werden drei Szenarien berechnet:

- Szenario 1: Zum Zeitpunkt des Bedarfs eines Umbaus kleiner Längen wird die gesamte Länge des Gleises gemeinsam erneuert.



- Szenario 2: Zum Zeitpunkt des Bedarfs eines Umbaus kleiner Länge wird dieser durchgeführt und am Ende der strategischen Nutzungsdauer wird die gesamte Länge des Gleises erneuert.
- Szenario 3: Zum Zeitpunkt des Bedarfs eines Umbaus kleiner Längen wird dieser Abschnitt erneuert. Die restliche Länge des Gleises wird am Ende der strategischen Nutzungsdauer erneuert.

Die Berechnung erfolgt für ein 1.000 m langes Gleis. Dabei wird sowohl das Jahr für den Umbau kleiner Längen wie auch die Abschnittslänge für den Umbau kleiner Längen variiert. Die Berechnung erfolgt über zwei Zyklen, um die Effizienz bei den Einheitskosten der Fahrbahnerneuerung durch die verlängerte Baulänge abbilden zu können. Der zweite Zyklus wird jedoch nicht variiert, sondern unterscheidet sich ausschließlich in der Baulänge und den dadurch erreichten Einheitskosten. Die von der Baulänge abhängigen Einheitskosten werden einem internen Projekt aus dem Jahr 2016 der SBB [6] entnommen, auf welches bereits in Unterkapitel 8.4 Bezug genommen wurde. Darin wurde auf Basis einer Kalkulation der Einfluss der Baulänge auf die Einheitskosten ermittelt. Es konnte festgehalten werden, dass eine Verfünffachung der Baulänge zu einer Kostenreduktion um 20 % führt.

In Abbildung 12.22 ist das Ergebnis für 100 m UKL zu unterschiedlichen Prozent der Nutzungsdauer und einem Zinssatz von 0 %, 2 % und 5 % dargestellt. Das Ergebnis der Berechnung der Wirtschaftlichkeit vom Umbau kleiner Längen zeigt, dass sich bei einem Zinssatz von 0 % Szenario 3 am wirtschaftlichsten darstellt. Eine Ausnahme bildet ein Umbau im letzten Jahr der Nutzungsdauer. Dieses Ergebnis zeigt sich auf Grund der hohen Kosten des Umbaus kleiner Längen, welche mit 173 % deutlich über den Kosten einer Fahrbahnerneuerung ohne Unterbausanierung liegen. Diese Mehrkosten werden durch die Effizienzsteigerung durch die Baulänge nicht kompensiert. Bis zu 73 % der Nutzungsdauer ist es sogar wirtschaftlicher, das gesamte Gleis zu erneuern, wenn kleinere Abschnitte einen Umbau kleiner Längen bedingen würden. Bei einem Zinssatz von 2 % ist Szenario 1 bis zu 91 % der Nutzungsdauer die wirtschaftlichste Lösung. Davor ist weiterhin Szenario 3 zu bevorzugen. Wird der Zinssatz weiter auf 5 % erhöht, so ist Szenario 1 bis zu einer Nutzungsdauer von 82 % zu verfolgen.

Die Berechnung zeigt, dass ein Umbau kleiner Längen weder wirtschaftlich ist noch zum Sparen von finanziellen Mitteln dient. Es handelt sich dabei grundsätzlich um eine Maßnahme, die der Verfügbarkeit von Gleisen dient, wenn Erneuerungen nicht durchgeführt werden können. Die Modellierung des Umbaus kleiner Längen wird aus diesem Grund in dieser Arbeit nicht betrachtet. Die Maßnahme ist indirekt in der Modellierung bei der Reduktion der Erneuerungsmengen durch den Anstieg des Unterhaltsbedarfs abgebildet. Zudem werden im Modellansatz die effektiv zu erneuernden Abschnitte und nicht die Erneuerungsprojekte betrachtet. Ungeachtet der Länge des Abschnittes wird somit jeder Gleisabschnitt

zum rechnerischen Ende der Nutzungsdauer erneuert oder in den Nachholbedarf geschoben.

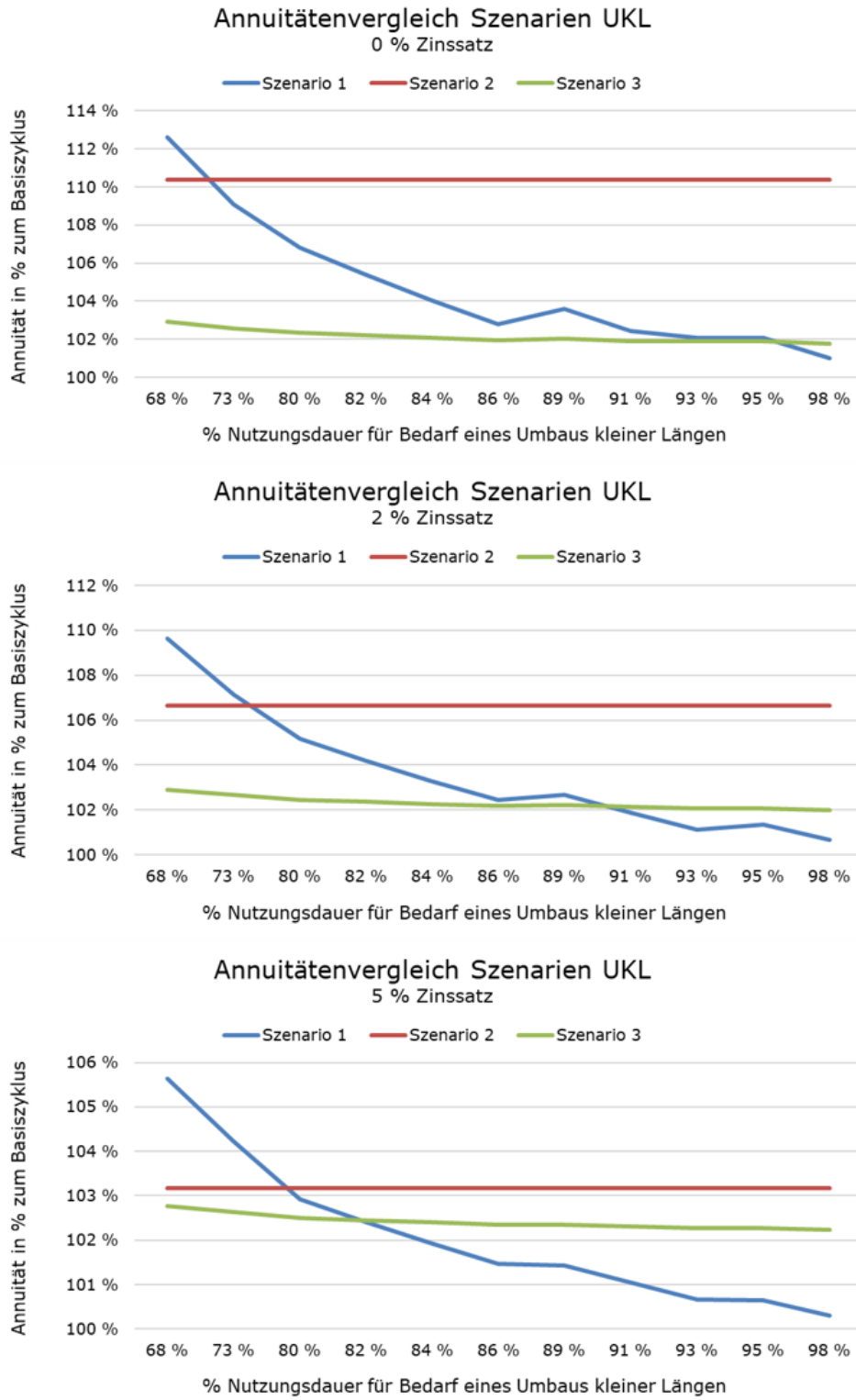


Abbildung 12.22: Berechnung der Wirtschaftlichkeit vom Umbau kleiner Längen (Quelle: eigene Darstellung)

## 12.7 Schwellenwechsel

Der Zustand der Schwelle definiert bei der SBB meist das Ende der Nutzungsdauer eines Gleises. Weisen nicht genug Schwellen eine ausreichende Tragfähigkeit oder Spurhaltung auf, so müssen die Schwellen gewechselt werden. Der Einzelschwellenwechsel kostet im Vergleich zu einer durchschnittlichen Fahrbahnerneuerung 33 % mehr. Die Wirtschaftlichkeit eines Einzelschwellenwechsels vor Erreichen der strategischen Nutzungsdauer wird in dem vorliegenden Beispiel untersucht. Die Frage nach einem Einzelschwellenwechsel stellt sich bei der SBB sowohl bei Betonschwellengleisen durch gerissene Betonschwellen oder Abplatzungen an Schwellen als auch bei Holzschwellengleisen durch ein Verfaulen der Schwellen oder eine fehlende Spurhaltung. Wie bereits in den vorherigen Analysen wird die Wirtschaftlichkeit auf Basis des Standardelements eines geraden Hauptgleises mit Betonschwellen, einem 60E1-Schienenprofil und einer Belastung zwischen 45.000 und 65.000 GesBt/Tag und Gleis untersucht. In Abbildung 12.23 ist das Ergebnis für einen Schwellenwechsel auf 10 % des Gleises dargestellt. Aus Abbildung 12.24 ist dieselbe Berechnung mit einem Schwellenwechsel über einen Anteil von 20 % ersichtlich. Die dargestellten Szenarien entsprechen den Annahmen aus Unterkapitel 12.6:

- Szenario 1: Zum Zeitpunkt des Bedarfs eines teilweisen Schwellenwechsels wird die gesamte Länge des Gleises gemeinsam erneuert.
- Szenario 2: Zum Zeitpunkt des Bedarfs eines teilweisen Schwellenwechsels wird dieser durchgeführt und am Ende der strategischen Nutzungsdauer wird die gesamte Länge des Gleises erneuert.
- Szenario 3: Zum Zeitpunkt des Bedarfs eines teilweisen Schwellenwechsels wird dieser Abschnitt erneuert. Die restliche Länge des Gleises wird am Ende der strategischen Nutzungsdauer erneuert.

Das Ergebnis bei einem benötigten Schwellenwechsel von 10 % zeigt, dass ein Einzelschwellenwechsel bei einem Zinssatz von 0 % bis zum Erreichen von 73 % der Nutzungsdauer wirtschaftlich ist. Danach ist Szenario 3 fast bis zum Ende der Nutzungsdauer wirtschaftlicher, bis es ganz am Ende von Szenario 1 überholt wird. Die Ergebnisse liegen jedoch so knapp beieinander, dass keine klare Aussage gemacht werden kann. Bei einem Zinssatz von 2 % oder 5 % wird das Ergebnis deutlicher. Ein Einzelschwellenwechsel ist demnach bis zu einer Nutzungsdauer von rund 92 % wirtschaftlich. Auch bei einem Schwellenwechsel von 20 % ist ein Schwellenwechsel je nach Zinssatz bis zu einer Nutzungsdauer von rund 85 % wirtschaftlich. Hat das Gleis diese Nutzungsdauer bereits überschritten, dann ist Szenario 1 und damit eine Erneuerung des gesamten Gleises wirtschaftlicher.

Das Ergebnis zeigt damit auch, dass ein Einzelschwellenwechsel nach dem Erreichen der strategischen Nutzungsdauer keinesfalls mehr wirtschaftlich ist. Die

Maßnahme ist indirekt in der Modellierung bei der Reduktion der Erneuerungsmengen durch den Anstieg des Unterhaltsbedarfs abgebildet. Im Modellansatz werden die effektiv zu erneuernden Abschnitte und nicht die Erneuerungsprojekte betrachtet. Ungeachtet der Länge des Abschnittes wird somit jeder Gleisabschnitt zum rechnerischen Ende der Nutzungsdauer erneuert oder in den Nachholbedarf geschoben.

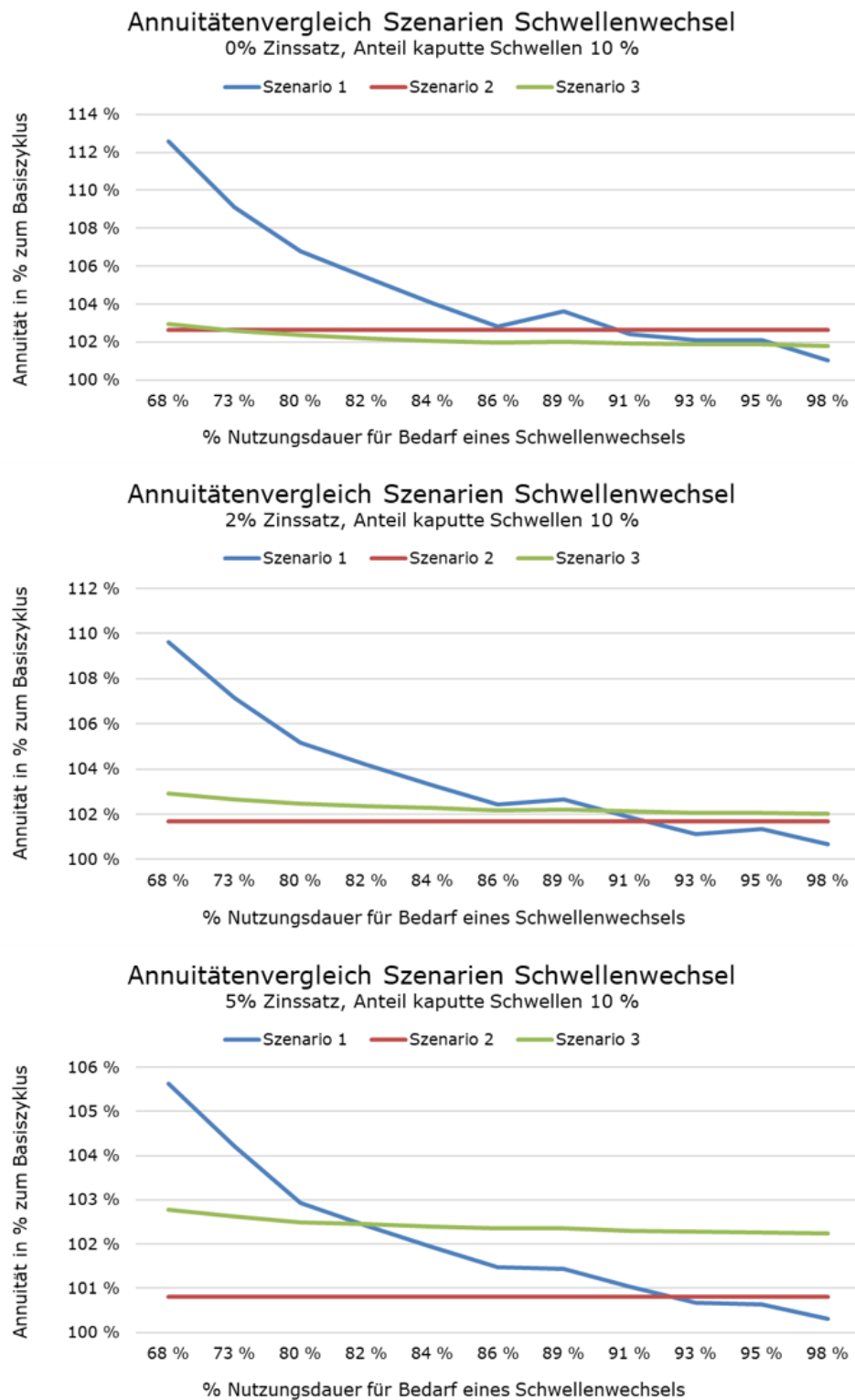


Abbildung 12.23: Berechnung der Wirtschaftlichkeit eines Einzelschwellenwechsels über einen Anteil von 10 % (Quelle: eigene Darstellung)

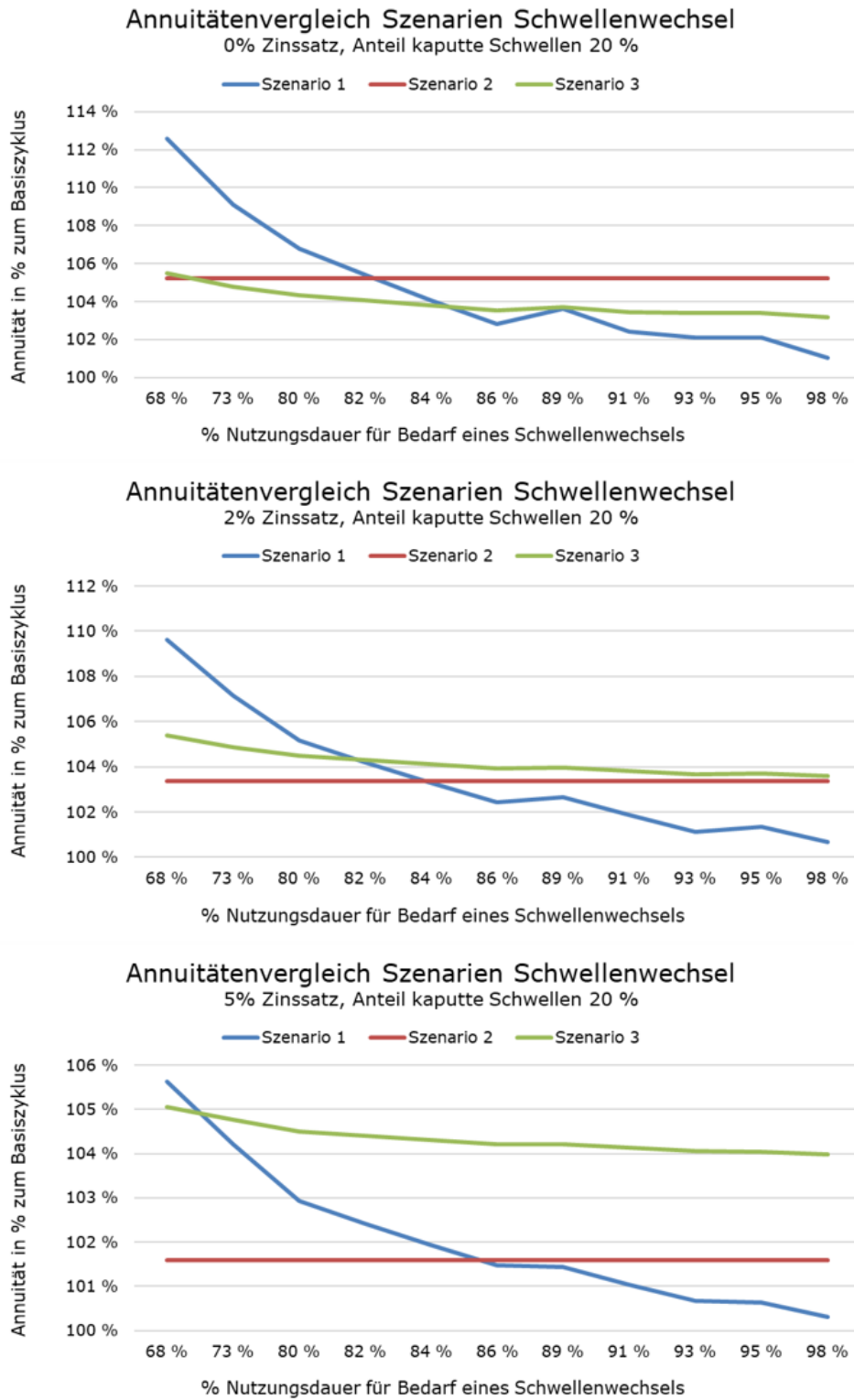


Abbildung 12.24: Berechnung der Wirtschaftlichkeit eines Einzelschwellenwechsels über einen Anteil von 20 % (Quelle: eigene Darstellung)

## 12.8 Schlussfolgerungen zur Reduktion des Unterhaltsbudgets

Die Reduktion des Unterhaltsbudgets führt grundsätzlich immer zu Mehrkosten. Im Gegensatz zur Reduktion des Erneuerungsbudgets können zudem nicht einmal kurzfristig Einsparungen realisiert werden, da die Kosten des Unterhalts im Vergleich zum Gesamtbudget gering sind und die Folgen von steigenden Einheitskosten und zusätzlich benötigten teureren Unterhaltsmaßnahmen nur wenige Jahre darauf eintreten. Wenn fehlende Unterhaltsmaßnahmen zudem eine quantifizierbare Auswirkung auf die Nutzungsdauer aufweisen, steigen die Folgekosten umso mehr an. Ein Vergleich der Folgekosten durch die Reduktion der Stopfmaßnahmen in Abbildung 12.25 zeigt, dass das Ergebnis der vermeintlichen Einsparungen (in Grün dargestellt) bereits nach den 10 Jahren der Reduktion der Stopfmaßnahmen negativ ist. Dies bedeutet, dass die Einsparungen innerhalb dieses Zeitraums bereits durch die Mehrkosten kompensiert werden. In Rot sind die Mehrkosten ab dem Jahr 11 dargestellt. Die Mehrkosten der ersten 10 Jahre und die darauffolgenden Mehrkosten ergeben damit die Mehrkosten nach dem Erreichen der strategischen Kosten (in Grau dargestellt). Diese sind auffallend hoch, zumal nicht einmal kurzfristig finanzielle Mittel für ein anderes Einsatzgebiet frei gemacht werden konnten. Auch beim Schienenunterhalt zeigt die Abbildung 12.26 ein vergleichbares Bild. Auch hier können real während der Zeit der Reduktion der Schleifmaßnahmen keine Einsparungen generiert werden und die Folgekosten bis zum Erreichen der strategischen Kosten sind groß. Beim Schienenunterhalt stellt sich die Konsequenz jedoch weniger dramatisch dar als beim Stopfen, da hier keine Reduktion der Nutzungsdauer abgebildet werden konnte. Dieser Einfluss findet im Gleis jedoch statt und würde die Spreizung noch verstärken.



**Vergleich Einsparungen zu Mehrkosten**  
Stopfen

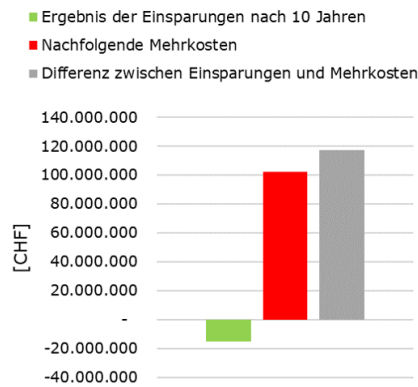


Abbildung 12.25: Vergleich der finanziellen Einsparungen zu den Mehrkosten bei der Reduktion von Stopfen bis zum Erreichen der strategischen Kosten (Quelle: eigene Darstellung)

**Vergleich Einsparungen zu Mehrkosten**  
Schienenunterhalt

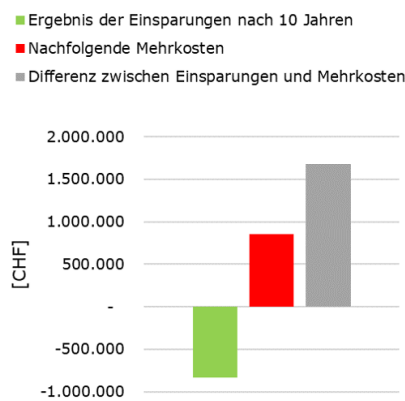


Abbildung 12.26: Vergleich der finanziellen Einsparungen zu den Mehrkosten bei der Reduktion des Schienenunterhalts bis zum Erreichen der strategischen Kosten (Quelle: eigene Darstellung)



# 13 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit soll die wirtschaftliche Bedeutung einer gesicherten Finanzierung der Eisenbahninfrastruktur aufzeigen, was anhand der historischen Entwicklung sowie an konkreten Beispielen erfolgt. Die erarbeitete Methodik der netzweiten Berechnung der finanziellen Auswirkungen geht, ergänzend zur Frage der Wirtschaftlichkeit auf einzelnen Gleisabschnitten, auf die Entwicklung des Gesamtbudgets der Fahrbahn über mehrere Jahre ein. Dieses Vorgehen beantwortet die oft gestellte Frage, ob kurzfristige Einsparungen langfristig doch zu denselben Kosten führen. Das vorgestellte Modell dient als Grundlage, um dies bei den jeweiligen Eisenbahninfrastrukturunternehmen in die spezifischen und netzweiten Prognosemodelle für den Substanzerhalt zu integrieren.

Zur Definition der Parameter des Modells werden eingangs die unterschiedlichen Definitionen der Nutzungsdauer eines Gleises sowie die Begriffe des Zustands und der Substanz eines Gleises beleuchtet. Dabei ist die Tatsache von Bedeutung, dass die Optimierung des Substanzerhalts eines Gleises grundlegend eine wirtschaftliche Frage darstellt. Welcher strategische Weg von dem EIU gewählt wird, hängt von der externen Finanzierungssituation sowie den strategischen Zielen des Unternehmens ab. Die Bewertung der Performance eines EIUs stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Die große Komplexität entsteht aus der unzähligen Fülle an Anforderungen an die Performance sowie der Tatsache, dass eine Momentaufnahme des Zustands eines Gleisnetzes auf Grund der langen Nutzungsdauer der Gleise kein vollständiges Bild der Effizienz des Managements eines EIUs abbilden kann. Dies führt zu der Erkenntnis, dass ausschließlich eine Zeitreihenanalyse die Auswirkungen von bestimmten Handlungen auf den Zustand der Fahrbahn abbilden kann. Dabei stellt alleinig die Ermittlung des Substanzerhaltungsbedarfs der Fahrbahn eine Hürde dar, für die im Laufe der Arbeit unterschiedliche Modelle vorgestellt und in Bezug auf die Charakteristik eines spezifischen Netzes analysiert werden.

Darüber hinaus wird im Rahmen der Arbeit das Thema der Einheitskosten vertieft behandelt. Um den Effekt von vermeintlichen Einsparungen auf den langjährigen finanziellen Bedarf der Fahrbahn abbilden zu können, wird nicht nur die reine Reduktion der Menge, sondern auch der Einfluss dieser Mengenreduktion auf die Einheitskosten einer Maßnahme definiert. Dieser Einfluss ist deutlich von der vertraglichen Situation des EIUs mit seinen Lieferanten geprägt und kann über einen längeren Zeitraum aktiv gelenkt und beeinflusst werden. Das Bewusstsein darüber ist ein entscheidendes Kriterium zur aktiven Steuerung der Kosten des

Unternehmens.

Die erarbeitete Methodik zur netzweiten Berechnung der Folgekosten beginnt mit der Analyse einzelner Substanzerhaltungsmaßnahmen und der Analyse der Konsequenz bei einer Einsparung dieser Maßnahmen auf einem spezifischen Gleis und in der Gesamtmenge auf dem Netz. Dies erfolgt getrennt nach der Erneuerung der Gleise und dem Unterhalt der Gleise. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Einsparungen können aufgezeigt und in das Modell implementiert werden, um den netzweiten Effekt abzubilden. Dabei ist das vorliegende Modell keinesfalls abschließend, sondern kann zukünftig individuell für weitere Fragestellungen adaptiert werden.

Eines der weiteren Ziele ist die Implementierung des Modells in die Prognosemodelle für den Substanzerhalt der EIUs. Bei der SBB wird aktuell bereits die Kenntnis über den Annuitätenverlauf im Nachholbedarf für die Priorisierung von Erneuerungsmaßnahmen über einen generischen Ansatz implementiert. Zukünftig müssen zur Verbesserung der Informationen die Kosten pro Gleisabschnitt systematisch auswertbar werden. Damit wird eine automatisierte Auswertung der Annuitätenkurve eines Gleises und damit die Berechnung der Mehrkosten im Nachholbedarf möglich. Auch die Analyse der wirtschaftlichen Nutzungsdauer kann dadurch eingeführt werden. Um das gesamte Netz abbilden zu können, sind die Weichen nach aktuellem Wissensstand noch nicht ausreichend erforscht. Die finanziellen Auswirkungen des Nachholbedarfs können quantifiziert werden, während die Auswirkungen bei schlechtem Unterbau und fehlenden Unterhaltsmaßnahmen noch kaum quantifiziert wurden. Vor allem Bahnen mit einem hohen Anteil an Weichen im Netz wird klar empfohlen, den Fokus auf die Analyse dieser Effekte zu legen, da sie meist einen bedeutenden Anteil der Gesamtkosten der Fahrbahn ausmachen.

Als Erkenntnis der vorliegenden Arbeit kann eine klare Handlungsempfehlung abgegeben werden. Als EIU, welches in der Hand des Bundes ist und damit das Ziel eines langfristigen Werterhalts auch für zukünftige Generationen verfolgt, ist das oberste Ziel die Sicherstellung der Finanzierung der Fahrbahn, um die Kosten langfristig auf einem möglichst niedrigen Stand zu halten. Die Bahn kann gegenüber anderen Verkehrsträgern nur konkurrenzfähig bleiben, wenn keine hohen Folgekosten auf Grund von unwirtschaftlichen Einsparungen getragen werden müssen. Dabei dürfen die langfristigen Auswirkungen nicht unterschätzt werden. Auf Grund des hohen Werts der Infrastruktur ist ein Umkehren des Trends nur schwer finanzierbar. Dabei ist es zu empfehlen, die Erfahrungen in Europa abzuholen, welche eindrücklich die Folgen von finanziellen Einsparungen und damit den Kollaps eines funktionierenden Eisenbahnsystems aufzeigen. Bei finanziellen Engpässen sind jedenfalls die Mittel für den Unterhalt in einem ausreichenden Maß zur Verfügung zu stellen. Beim Unterhalt besteht weder ein Potential zur kurzfristigen noch langfristigen Einsparung. Anders stellt sich hier die Erneuerung dar. Durch eine Reduktion der Menge der Erneuerung kann das Budget kurzfristig

gedrückt werden. Langfristig führt dies jedenfalls zu höheren Kosten. Eine große Herausforderung entsteht, da die Auswirkungen über Jahrzehnte nicht kompensiert werden können. Das entscheidende Kriterium stellt dabei der Ressourcenengpass bezüglich finanzieller Mittel genauso wie der Wunsch nach der Verfügbarkeit des Netzes dar. Das Zusammenspiel zwischen der Verfügbarkeit des Netzes und den Kosten für den Substanzerhalt kann dabei nicht ignoriert werden. Werden sowohl die Verfügbarkeit als auch der Wunsch nach niedrigen Kosten gleichermaßen prioritär behandelt, so führt dies zwangsläufig zu einer Kompromisslösung, da sich diese beiden Aspekte gegenseitig ausschließen.

Mit dieser Dissertation wurde nachgewiesen, dass jede Sparmaßnahme im Substanzerhalt langfristig zu Mehrkosten führt, welche die kurzfristigen Einsparungen deutlich übersteigen.



# Literaturverzeichnis

- [1] *Kapitel* Motive und Instrumente der Bahnreform von 1994. In: ABERLE, G.: *Eisenbahn zwischen Markt und Staat in Vergangenheit und Gegenwart*. Mohr Siebeck, Tübingen, 2015, S. 49-65
- [2] BAUER, M.: *Langsamfahrstellen im Netz der ÖBB-Infrastruktur*. Graz, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2013
- [3] BAUMOL, W.; PANZAR, J.; WILLIG, R.: Contestable Markets: An Uprising in the Theory of Industry Structure: Reply. In: *American Economic Review* 73 (1983), 02, S. 491-496
- [4] BERGHOLD, A.: *Load Labs*. Technische Universität Graz, 2015
- [5] BERTSCHY, M.; FILLIGER, P.; FRISEE, A.; ZEIER, R.: *Abschlussbericht Einheitskosten Fahrbahnerneuerung (EhK FbE)*. Bern: Schweizerische Bundesbahnen (SBB AG), 2016
- [6] BERTSCHY, M.; FRISEE, A.; ZEIER, R.; FILLIER, P.: *Abschlussbericht Einheitskosten Fahrbahnerneuerung (EhK FbE)*. SBB, 2016
- [7] BODENSCHATZ, H.: Eisenbahn und Städtebau im 19. Jahrhundert. In: *Die Stadt* (Heft 2/1985)
- [8] BSI: *Maintenance – Maintenance Key Performance Indicators, BS EN 15341:2007*. BSI – British Standards, April 2007
- [9] BUNDESAMT FÜR VERKEHR (BAV): *FABI: So erfolgt die Finanzierung*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2. Dezember 2013
- [10] BUNDESAMT FÜR VERKEHR (BAV): *Die FABI-Vorlage im Überblick*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2. Dezember 2013
- [11] BUNDESAMT FÜR VERKEHR (BAV): *BAHN 2000 Erste Etappe Schlussbericht*. Bern: Bundesamt für Verkehr, 2006
- [12] BUNDESAMT FÜR VERKEHR (BAV) – ABTEILUNG POLITIK: *FinöV-Fonds: Zahlen von 1998 bis 2015*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, unbekannt

- [13] BUNDESKANZLEI: *Volksabstimmungen*. BK  
<https://www.bk.admin.ch/ch/d/pore/va/19871206/index.html>
- [14] BUNDESRAT SCHWEIZ: *Volksabstimmung vom 6. Dezember 1987 – Abstimmungserläuterungen des Bundesrates*. Bern: Bundesrat Schweiz, 1987
- [15] DB NETZ AG: *Handbuch 3-i Strategie*. DB Netz AG, 2014
- [16] DER RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: Richtlinie des Rates vom 29. Juli 1991 zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft (91/440/EWG). In: *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft* (1991)
- [17] DER RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN: *75/327/EWG: Entscheidung des Rates vom 20. Mai 1975 zur Sanierung der Eisenbahnunternehmen und zur Harmonisierung der Vorschriften über die finanziellen Beziehungen zwischen diesen Unternehmen und den Staaten*. Im Namen des Rates: Der Präsident Ryan R., 20.05.1975
- [18] DEUTSCHE BAHN (DB); ÖSTERREICHISCHE BUNDESBAHNEN (ÖBB); SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN (SBB): *DACH Fahrwegtechnik TP7 – Planung & Erhaltung*. DACH, 2019
- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG (DIW) IN BERLIN: *Verkehr in Zahlen*. Der Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1991
- [20] DIETHELM, E.: *Die Verstaatlichung der schweizerischen Privatbahnen durch den Bund und ihre finanziellen Auswirkungen auf die schweizerischen Bundesbahnen*. Fakultät der Rechts- und Staatswissenschaften der Universität Zürich zur Erlangung der Würde eines Doktors der Volkswirtschaft, 1930
- [21] DUMONT, A.; TILLE, M.; FONTANA, M.: *Gestion de la maintenance des infrastructures de transports*. EPFL – LITEP, édition mars, 2000
- [22] DURANTON, S.; AUDIER, A.; HAZAN, J.; LANGHORN, M.; GAUCHE, V.: BCG – Global Management Consulting. (18.04.2017). <https://www.bcg.com/publications/2017/transportation-travel-tourism-2017-european-railway-performance-index.aspx>
- [23] DURANTON, S.; AUDIER, A.; HAZAN, J.; LANGHORN, P.; GAUCHE, V.: *The 2017 European Railway Performance Index*. Boston Consulting Group, 2017
- [24] EBNETER, F.: *Die Datenbank der festen Anlagen: Das geographische Informationssystem der SBB*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik: VPK; Heft 12: Vermessung und Eisenbahn, 1990
- [25] *Kapitel Betriebswirtschaftliche Probleme der Kostenregulierung in den Bereichen Eisenbahn und Telekommunikation*. In: EHRMANN, T.: *Die Zukunft der Bahn*. Michael Rodi, 2008, S. 84-85



- [26] EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION: *Beschlussvorlage FABI*. UVEK <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/verkehr/investitionen/fabi.html>
- [27] EMMENEGGER, D.: *Programmerstellung – Abschlussbericht AP3 zur Anlagenstrategie Fahrbahn*. Bern: Schweizerische Bundesbahnen (SBB AG), 2014
- [28] ENZI, M.: Der optimale Re-Investitionszeitpunkt für das Gleis unter dem Aspekt der Lebenszykluskosten. In: *ZEVrail* (2012), S. 68-75
- [29] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT: *Richtlinie 2001/12/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2001*. EG, 2001
- [30] FENDRICH, L.; FENGLER, W.: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Springer Berlin Heidelberg, 2014 (SpringerLink : Bücher). – ISBN 9783642300219
- [31] FER, U. internationale des chemins d.: *Lasting Infrastructure Cost Benchmarking LICB – 15 years of benchmarking 1996-2010*. Paris: Rail System Department, International Union of Railways (UIC), 2013
- [32] FRISEE, A.: *Auswirkungen erhöhter Längsneigungen auf die LCC*. SBB (nicht veröffentlicht), 2015
- [33] FRISEE, A.; LINDER, S.; SCHNETZER, C.: *SBB Track Renewal – Cost Forecast and Analysis*. UNI Bern (unveröffentlicht), 2017
- [34] FRISEE, A.; MARSCHNIG, S.: *Zustand und Substanz, Stellungnahme im Auftrag der ÖBB Infrastruktur*. 2013. – Technische Universität Graz
- [35] GENERALDIREKTION INTERNE POLITIKBEREICHE – FACHABTEILUNG B STRUKTUR- UND KOHÄSIONSPOLITIK; FORSCHUNGSBERICHT (Hrsg.): *Die Auswirkungen der Trennung von Infrastrukturbetrieb und Verkehrsleistungen auf den EU-Eisenbahnsektor*. Europäisches Parlament, 2011
- [36] GLEICH, R.; KLEIN, A.: *Gemeinkostencontrolling – Instrumente und Fallbeispiele für die erfolgreiche Umsetzung*. Haufe-lexware GmbH & Co. KG, 2012
- [37] GROSSE, W.: *Ergebnisse der Privatisierung der Japanischen Staatsbahn*. 1992
- [38] GROSSMANN, M.: *Bisherige und zukünftige Schienenbearbeitungsstrategien*. Hochschule für Technik und Architektur Freiburg, 2019

- [39] GULDENFELS, R.; SCHENK, K.: *Gleisaushubrichtlinie – Planung von Gleisaushubarbeiten, Beurteilung und Entsorgung von Gleisaushub*. Bundesamt für Verkehr (BAV) in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft (BUWAL), 2002
- [40] GUTZWILLER, R.; SCHEIDEGGER, P.; SCHLUNEGGER, H. ; STALDER, O.: *Die Japanischen Eisenbahnen aus Schweizer Sicht*. 1996
- [41] HANSMANN, F.; LANDGRAF, M.: Wie fraktal ist die Eisenbahn? In: *ZEVrail* (2013)
- [42] HÜBNER, R.: Geplante Obsoleszenz. In: *Working Papers, Verbraucherpolitik, Verbraucherforschung; Arbeiterkammer Wien* (Mai 2013)
- [43] HELFENBERGER, R.: *Physischer Zustand Fahrbahn 2017*. SBB (interner Bericht), 2017
- [44] HOLLAND, J.; ODERMATT, I.: *Auswertung des Nachholbedarfs von Fahrbahnerneuerungsprojekten bei der SBB*. Zürich, ETH Zürich, Diplomarbeit, 2017
- [45] HOLZFEIND, J.; NERLICH, I.; GIGER, M.; MARSCHNIG, S.: Verschleißabhängige Komponente im Trassenpreissystem der Schweiz – Ein Anreiz zur Rückbesinnung auf ein Gesamtoptimum. In: *ZEVrail* (2015)
- [46] HUMMITZSCH, R.: *Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen*. Technische Universität Graz, 2009
- [47] INFRASTRUKTUR, S.: *Netzzustandsbericht 2010 SBB Infrastruktur*. SBB, 2011
- [48] JERRA, W.: *1967-2007, 40 Jahre Netzentwicklung der SBB, Rückblick und Ausblick*. Referat vor der Gesellschaft der Ingenieure der SBB, 2007
- [49] KELLERHALS, A.; TANNER, A.: *Netze: Verkehr – Telekommunikation – Energie*. Schweizerisches Bundesarchiv, 14. Mai - 18. Juli 1997
- [50] KOESTER, K.: *Privatisierung von Staatsunternehmen in Japan*. Baden-Baden, Institut für Ostasienwissenschaften der Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule Duisburg, Diss., 1998. – Nomos Verlagsgesellschaft
- [51] KUTTELWASCHER, C.: *Oberbauschotter – Kompendium für Österreich*. Eisenbahningenieurkalender, 2013
- [52] LEUTHARD, D.; CASANOVA, C.; GYGI, U.; MEYER, A.: *Leistungsvereinbarung zwischen der Schweizerischen Eidgenossenschaft und der Aktiengesellschaft Schweizerische Bundesbahnen (SBB) für die Jahre 2011–2012*. Schweizerischer Bundesrat, 2011

- [53] LICHTBERGER, B.: *Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. Tetzlaff, 2004
- [54] MARSCHNIG, S.: *iTAC – innovative Track Access Charges*. 2016
- [55] MARX, K.: *Das Kapital Band 2*. Berlin DDR : Dietz Verlag, 1963
- [56] MÜLLER, A.: *Netzzustandsbericht, Anlagengattung Fahrbahn*. SBB, 2010
- [57] NERLICH, I.; MEYER, M.: Ermittlung örtlicher Zug-Bremskraftkollektive für das SBB-Netz und verbesserte Prognosen von Rollkontakt-Ermüdungsschäden. In: *Schienenfahrzeugtagung Graz*, SBB, Emkamatik, 2017
- [58] NETRLICH, I.; MENTH, S.: Sichtbare Zusammenhänge zwischen dem dynamischen Adhäsionsverhalten von Antrieben und Schienenschäden. In: *Schienenfahrzeugtagung Graz*, 2019
- [59] NEUHOLD, J.: Schotterbettreinigung als Instandhaltungsmaßnahme? In: *ZEVrail* (2016)
- [60] NEUHOLD, J.: Oberbauprogramme auf Basis Trendanalysen – Entwicklung eines automatischen Stopfprogrammes, 2019
- [61] NEUPER, G.: *DACH Fahrwegtechnik – TP 7 Planung und Erhaltung – Benchmark Gleisinstandsetzung*. DB, ÖBB und SBB (interner Bericht), 2019
- [62] NORM, D.: *DIN EN 13306 Begriffe der Instandhaltung*. Normenausschuss Instandhaltung (NIN) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2001
- [63] NORM, S.: *SIA469 Erhaltung von Bauwerken*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 1997
- [64] NORM, S.: *SIA 480:2016 Bauwesen – Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2016
- [65] NORMENAUSSCHUSS TECHNISCHE GRUNDLAGEN (NATG) IM DIN: *DIN 31051 Grundlagen der Instandhaltung*. Deutsche Norm, 2012
- [66] OPRANDI, A.: Langfristauswirkungen zu geringer Erneuerungsmengen der Fahrbahn. In: *ZEVrail* (2019)
- [67] PETER, M.; MAIBACH, M.; SUTTER, D.: *Volkswirtschaftliche Bedeutung des öffentlichen Verkehrs in der Schweiz*. Verband öffentlicher Verkehr, 2004

- [68] PFUND, C.: *Die Trennung des Verkehrs von der Infrastruktur der Bahn oder die Trennungsphilosophie der Europäischen Union EU*. LITRA Informationsdienst für den öffentlichen Verkehr, 2002
- [69] PFUND, C.; URECH, P.: *Die öffentliche Personenverkehrsbedienug Japans mit besonderer Berücksichtigung der Privatisierung*. 1993
- [70] RENGGLI, R.; HOLZFEIND, J.; MARSCHNIG, S.: Netzweite Investitions- und Instandhaltungsstrategien im Bereich Fahrbahnoberbau der SBB. In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* (Juni 2012)
- [71] SCHMIDT, S.; SCHNEIDER, J.: *Netzzustandsbericht 2011 SBB Infrastruktur*. SBB, 2012
- [72] SCHWABE, H.: *Der Staatsbetrieb der schweizerischen Eisenbahnen in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft*. Juristische Fakultät der Universität Bern zur Erlangung der Würde eines Doctor rerum politicarum, 1948
- [73] SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN: *Statistik der Gleisarbeiten*. SBB, 1997
- [74] SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN: *Reglement 220.41 – Lückenlose Gleise, lückenlos verschweisste Weichen und verlaschte Gleise Normalspur*. Verband öffentlichen Verkehrs, 2003
- [75] SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN: *AS 1998 2847 – Bundesgesetz über die Schweizerischen Bundesbahnen*. Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, 20.03.1998
- [76] SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN: *Substanzerhalt der Bahn-Infrastruktur der Schweiz*. Bundesamt für Verkehr, 2010
- [77] SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN: *Bahninfrastruktur: Unterhalt und Finanzierung kurz erklärt*. Bern: SBB AG, 2016
- [78] SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN: *Blaues Blatt Fahrbahnkosten – Stand per 31.12.2017*. SBB (internes Dokument), 2017
- [79] SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN: SBB Geschäfts- und Nachhaltigkeitsbericht 2016. In: *Eigenverlag* (2017)
- [80] SCHWEIZERISCHE UNFALLUNTERSUCHUNGSSTELLE: *Schlussbericht der Schweizerischen Unfalluntersuchungsstelle SUST über die Entgleisung eines S-Bahn Zuges am Samstag, 16. Februar 2013 zwischen Schwerzenbach und Nänikon-Greifensee (ZH); Reg.-Nr.: 2013021601*. Bern : SUST, 2013
- [81] STALDER, O.: Die Life-Cycle-Costs (LCC) von Bahnen: Ein internationaler Vergleich. In: *Rail International* (4/2001, S. 26-31)

- [82] STATISTIK, B. für: *Schweizerische Eisenbahnrechnung 2011*. Neuchâtel: BFS, 2013
- [83] STENSTRÖM, C.; PARIDA, A.; GALAR, D.: Performance Indicators of Railway Infrastructure. In: *International Journal of Railway Technology* (2012)
- [84] STRAUCH, A.; HELFENBERGER, R.: *Schienenfehlerbericht – Bericht über 2016*. SBB (interner Bericht), 2016
- [85] THEILER, A.: Die geniale Idee aus dem Spinnerclub. In: *Info Forum Pro Bahn Schweiz* (März 2014)
- [86] UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER: *Lasting Infrastructure Cost Benchmarking (LICB) – 10 years of Benchmarking 1996-2005*. Paris : International Union of Railways (UIC), 2007
- [87] UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER: *Lasting Infrastructure Cost Benchmarking – 20 years of benchmarking (1996-2015)*. Paris: UIC, 2017
- [88] VAN DE VELDE, D.; FINGER, M.; PUTALLAZ, Y.: *Solid Infrastructure financing for an efficient rail system – The performance of the rail network*. TU Delft, 2015
- [89] VEIT, P.: *Wirtschaftliche Bewertungen – Beispiel Schwellenbesohlungen*. ÖVG Arbeitskreis Eisenbahntechnik, 2008
- [90] VEIT, P.: *Innovationen im Instandhaltungsmanagement*. iaf Münster, 2015
- [91] VEIT, P.; MARSCHNIG, S.; GRAZ, T. U. (Hrsg.): *Projekt Strategie Komponenten Schiene*. Technische Universität Graz : ÖBB Infrastruktur, 2005
- [92] VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: *Betrieberschwerniskosten*. Technische Universität Graz, 2006
- [93] VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: Technische und wirtschaftliche Aspekte zum Thema Schwellenbesohlung – Teil 2: Wirtschaftlichkeit im Netz der ÖBB. In: *ZEVrail* (2009)
- [94] VEIT, P.; MARSCHNIG, S.; GRAZ, T. U. (Hrsg.): *Standardelemente SBB – Gleise und Weichen*. Technische Universität Graz: Schweizerische Bundesbahnen SBB AG, 2014
- [95] VÖV VERBAND ÖFFENTLICHER VERKEHR: *D RTE 29900 Netzzustandsbericht Minimalanforderungen*. 2014
- [96] WEIDMANN, U.; RIEDER, M.: *Europäische Eisenbahnregulierung im Wandel: Organisationsformen und Bestimmungsgrößen vom 19. bis zum 21. Jahrhundert*. Institute für Verkehrsplanung und Transportsysteme, 2012

- [97] WEISSENBACH, P.: *Das Eisenbahnwesen der Schweiz*. Art. Institut Orell Füssli, 1913
- [98] WENK, T.: *Die Datenbank der festen Anlagen als verteiltes Informationssystem*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik: VPK; Heft 12: Vermessung und Eisenbahn, 1990
- [99] WINDISCH, R.: *Privatisierung natürlicher Monopole im Bereich von Bahn, Post und Telekommunikation*. J.C.B. Mohr Tübingen, 1987 (Untersuchungen zur Ordnungstheorie und Ordnungspolitik)
- [100] WINKLEHNER, D.: *Modell für die strategische Mengenprognose vom Substanzerhalt der Fahrbahn*. ZEVrail, 2015
- [101] WINKLEHNER, D.: *Auswirkungen von Vorgaben, die ab 2015 für den Netzzustandsbericht gelten, auf Kennzahlen der Fahrbahn*. SBB, 2016 (nicht veröffentlicht)
- [102] WOLF, W.: *Eisenbahn und Autowahn: Personen- und Gütertransport auf Schiene und Straße: Geschichte, Bilanz, Perspektiven*. Rasch und Röhrling, 1992