

Bernhard Lichtberger

Das Große Handbuch der
Gleisinstandhaltung

Bernhard Lichtberger

Das Große Handbuch der Gleisinstandhaltung

Setzung · Stabilisierung
Schotter · Abnutzung · Reinigung · Profilierung
Planumsverbesserung
Oberleitung
Vegetationskontrolle
Oberbaumaschinentechnik · Klein- und Sondermaschinen
Zulassung
Strategien Gleisinstandhaltung
Life Cycle Costs · Reliability · Availability · Maintainability · Safety
Umwelt · Ökologie
Digitalisierung

Band 2

IMPRESSUM

Autor: Univ.-Doz. Dr. techn. Bernhard Lichtberger,
Landstrasser Hauptstrasse 64/3, 1030 Wien

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie: Detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-347-90888-8

E-Book-ISBN: 978-3-347-90898-7

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung der System7 railtechnology GmbH in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm, digital oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Bernhard Lichtberger

Internet: <https://www.s7-rail.com>

Layout und Satz: Reihs Satzstudio, Lohmar, Deutschland

Umschlaggestaltung: Marlene Posch, Wien, Österreich

Druck und Distribution im Auftrag von System7 railtechnology GmbH:

tredition Verlag GmbH, Halenreihe 40–44, 22359 Hamburg

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	23
--------------------------	----

8

Die Setzung des Gleises und seine Stabilisierung

ZUSAMMENFASSUNG	25
8.1 Der Gleisschotter	26
8.2 Das endlos verschweißte Gleis	27
8.3 Querverschiebewiderstand	29
8.3.1 Der Querverschiebewiderstand verschiedener Schwellen	32
8.3.2 Erhöhung des QVW durch Sicherungskappen	33
8.3.3 Querverschiebewiderstand und Instandhaltungsarbeiten	34
8.3.4 Einflussfaktoren auf den Querverschiebewiderstand	35
8.3.5 Schwellenhohllagen	36
8.4 Der Längsverschiebewiderstand	37
8.5 Setzungsverhalten	38
8.6 Bodenverdichtung	40
8.6.1 Unterschiede der lagenweisen Verdichtung zwischen Straßen- und Eisenbahnbau	43
8.6.2 Statische und dynamische Verdichtung	44
8.6.3 Ermittlung Verformungsmodul	46
8.7 Schwingungsausbreitung im Boden	48
8.8 Schotterflug	51
8.8.1 Maßnahmen zur Vermeidung des Schotterfluges	51
8.9 Die Verfahren/Methoden der QVW-Wiederherstellung	52
8.9.1 Zwischenfachverdichtung	53
8.9.2 Die dynamische Gleisstabilisation	53
8.9.3 Einflussparameter der dynamischen Gleisstabilisierung auf die Setzung	54
8.9.3.1 Stabilisierungsfrequenz	54
8.9.3.2 Arbeitsgeschwindigkeit	54
8.9.3.3 Exzentermasse	56
8.9.3.4 Setzung abhängig von Hebung	56
8.9.3.5 QVW und DGS	57
8.9.3.6 Auswirkung auf die Gleisgeometrieparameter	57
8.9.3.7 Auswirkungen des DGS auf die Umwelt	58

8.9.4	Flankenverdichtung	58
8.9.5	Vorkopfverdichtung	58
8.9.6	Vergleich Zwischenfachverdichtung und dynamischer Gleisstabilisation . .	59
8.10	Die Maschinentechnik	61
8.10.1	Stopfaggregate als Verdichtgeräte	61
8.10.2	Dynamischer Gleisstabilisator	61
8.10.2.1	DGS-Einsatz in Weichen	63
8.10.2.2	DGS-Einsatz auf Brücken	63
8.10.2.3	Die Messung des dynamischen QVW mit dem DGS	64
8.10.2.4	Lagenweise Stabilisierung	64
8.10.2.5	Auswirkungen auf den Untergrund	65
8.10.2.6	Optimale Betriebsparameter des DGS	65
8.10.3	Vorkopfverdichter	66
8.10.4	Zwischenfachverdichter	67
8.11	Beanspruchung des Planums durch Verdichtgeräte	68
8.12	Die Praxis	70
	FAZIT	70
	LITERATURVERZEICHNIS	71

9

Schotterabnutzung und Gleisreinigung

	ZUSAMMENFASSUNG	75
9.1	Lockergesteine	77
9.2	Die Schotterbettung der Eisenbahn	77
9.2.1	Die Aufgaben der Schotterbettung	78
9.2.2	Siebkurven von Eisenbahnschotter	79
9.2.3	Die Festigkeit des Schottergesteins	80
9.2.4	Nachweis der Festigkeitseigenschaften von Schotter	83
9.2.5	Die wichtigsten Schottergesteine	86
9.3	Verunreinigung des Schottergleises	86
9.4	Wasserdurchlässigkeit der Bettung	89
9.5	Schotterverschmutzung und Tragfähigkeit	91
9.6	Die Herkunft der Schotterverschmutzung	94
9.6.1	Schlamm- und Spritzstellen	97
9.6.2	Schotterzerkleinerung durch Stopfen	98
9.6.3	Schotterschädigung an Stellen starker Steifigkeitsänderungen	100
9.7	Die Setzung des Gleises	103
9.8	Die Auswirkung der Setzung auf die Gleislage	104
9.8.1	Verringerung des Schotterverschleißes	107

9.9	Verbesserung der Schotterbettung durch neue Methoden	107
9.9.1	Einsatz elastischer Elemente	107
9.9.1.1	Elastische Zwischenlagen	107
9.9.1.2	Schwellenbesohlungen	107
9.9.1.3	Unterschottermatten	108
9.9.1.4	Elastisch gebundener Schotter	109
9.9.1.5	Neoballast	109
9.9.1.6	Mischung des Schotters mit Gummipartikeln	110
9.9.2	Verwendung von Geogittern	110
9.9.3	Verwendung von Asphaltlagen	111
9.9.4	Schotter-Stabilisierungsmethoden durch Zuschläge	112
9.9.4.1	Elastotrack	112
9.9.4.2	XiTRACK	112
9.9.4.3	Polyurethan-stabilisierter Schotter	113
9.9.5	Schotterbindung durch Kunstharzkleber	113
9.9.6	Schottervermischung mit Bitumen	114
9.9.7	Schotterverkleben mit einer wässrigen Polymerlösung	115
9.9.8	Einbringen von Feinzementmörtel in die Schotterschicht	115
9.9.9	Probleme bei der maschinellen Instandhaltung	115
9.10	Verbesserung der Schotterbettung durch Instandhaltungsmethoden	118
9.11	Die Siebung	119
9.11.1	Aushubeinrichtung	125
9.12	Die Reinigungsmaschinentechnologien	127
9.12.1	Methoden der Schotterbettreinigung	129
9.12.2	Bauablauf	131
9.12.3	Einsiebmaschinen	131
9.12.4	Mehrteilige Bettungsreinigungsmaschinen mit Doppelsieben	133
9.12.5	Schulter- oder Flankenreinigungsmaschinen	140
9.12.6	Weichenreinigungsmaschine	142
9.12.7	Einschotterung	143
9.12.8	Vakuumreinigungsmaschine	143
9.13	Maschinelle Drainageverbesserung	144
9.14	Die Verwendung von Geokunststoffen	145
9.15	Die Beseitigung von Schlammstellen	145
9.16	Schotterrecycling	146
	FAZIT	146
	LITERATURVERZEICHNIS	147

ZUSAMMENFASSUNG	153
10.1 Die Aufgaben der Schotterbettung	154
10.2 Bettungsquerschnitte	154
10.3 Drainage des Gleisbetts	156
10.4 Schotterparameter	158
10.4.1 Kohäsion und innerer Reibungswinkel	158
10.4.2 Der Schüttwinkel	159
10.4.3 Dichte des Schotters	159
10.4.4 Auflockerungsfaktor	160
10.5 Die Schnittkraft am Pflugschild	161
10.6 Die universelle Erdbewegungsgleichung	163
10.7 Aggregate einer Planier- und Schotterverteilmaschine	163
10.7.1 Der Mittelpflug	163
10.7.2 Der Flankenpflug	166
10.7.3 Der Stirnpflug	167
10.7.4 Kkehrbürste	169
10.7.5 Silo mit Einschotterung	173
10.7.6 Kleineisenbürsten	173
10.7.6.1 Rotierende Kleineisenbürsten	173
10.7.6.2 Rotierende Kleineisenfeinbürste	174
10.7.6.3 Statische Kleineisenbürsten	174
10.7.7 Feinkehrbesen	175
10.7.8 Staubbiederschlagung	176
10.7.9 Überdruckkabinen	176
10.7.10 Schotterprofilmesseinrichtung	176
10.7.11 Planung von Planierarbeiten mit dem Schottergeometrieindex	177
10.7.12 Verschleiß von Pflugschwertern	178
10.8 Hindernisse im Gleis	178
10.9 Arbeitsablauf	182
10.9.1 Neu- und Umbau	182
10.10 Die Maschinentechnik	183
10.10.1 Schotterverteil- und Schotterplaniermaschinen	183
10.11 Materialtransport- und Fördereinheiten	189
10.11.1 Materialförder- und Siloeinheiten	189
10.11.2 Schotterverteilssysteme	191
10.11.3 Beladestationen	192
10.12 Betriebsparameter von Schotterplaniermaschinen	193
FAZIT	193
LITERATURVERZEICHNIS	193

ZUSAMMENFASSUNG	195
11.1 Der Boden und seine Eigenschaften	196
11.2 Der Bahnkörper	198
11.3 Berechnung der Verteilung der Vertikalkräfte	200
11.3.1 Die Vertikalspannung im Unterbau	204
11.4 Dynamische Belastung des Gleisaufbaus	205
11.4.1 Die Scherdehnung	206
11.5 Schutzschichten	209
11.5.1 Planumsschutzschicht	209
11.5.1.1 Korngemische	210
11.5.2 Frostschutzschicht	211
11.5.3 Schutzschichten mit Zusatzmaßnahmen	211
11.5.4 Bestimmung der Dicke von Schutzschichten	212
11.5.5 Filter- und Trennstabilität	215
11.5.6 Schutzschichten mit Zusatzmaßnahmen	216
11.5.6.1 Geokunststoffe	216
11.5.6.2 Bodenbehandlung mit Bindemitteln	218
11.5.6.3 Bodenverfestigung	221
11.5.6.4 Bodenverbesserung und qualitative Bodenverbesserung	221
11.5.7 Tragschichten aus Asphalt	222
11.5.8 Bitumenstabilisierter Schotter	223
11.6 Die Untersuchung und Messung der Eigenschaften des Unterbaus	224
11.6.1 Betrachtung der Mischzone Schotter-Planum	224
11.7 Die mechanisierte gleisgebundene Planumsverbesserung	224
11.7.1 Planumsverbesserungsmaschinen	226
11.7.1.1 Planumsverbesserungsmaschine PM200	227
11.7.1.2 Planumsverbesserungsmaschine AHM800R	227
11.7.1.3 Planumsverbesserungsmaschine PM200-2R	229
11.7.1.4 Planumsverbesserungsmaschine RPM 2002/RPMW 2002-2	229
11.7.1.5 Planumsverbesserungsmaschine RPM-RS-900	230
11.7.1.6 Planumsverbesserungsmaschine PM1000URM	231
11.7.1.7 Überblick über gleisgebundene PLV-Maschinen	234
11.7.1.8 Bodenverbesserung mit der PM150-FS	236
11.7.2 Fräs-Misch-Injektionsmaschine	236
11.8 Konventionelle und gleislose Verfahren	238
11.8.1 Gleislose Planumsverbesserung mit Schottertausch nach Wiebe	238
11.8.2 Baumischverfahren	239
11.8.3 PUSCAL	241
11.8.4 Mechanische Bodenverbesserung	243
11.8.5 Bodenaustausch	243

11.8.6	Schadstoffbelasteter Schotter	243
11.8.7	Abdichtungsmaßnahmen	244
11.9	Felsinjektionen	245
	FAZIT	246
	LITERATURVERZEICHNIS	246

12

Die Instandhaltung der Oberleitung

	ZUSAMMENFASSUNG	251
12.1	Bahnstromarten	252
12.2	Bahnenergieversorgung	254
12.3	Die Oberleitung	255
12.3.1	Das Längskettenwerk	255
12.3.2	Der Fahrdrabt	262
12.3.3	Fahrdrabtwelligkeit	263
12.4	Stromabnehmer	266
12.4.1	Mastarten nach Ausführung und Material	269
12.5	Isolatoren	270
12.6	Strom und Spannung im Fahrleitungsnetz	270
12.7	Sicherheitsabstände zu Fahrdrabtleitungen	272
12.8	Elektrische Interaktion zwischen Fahrleitung und Fahrzeug	273
12.9	Verfahren und Methoden des Neubaus und der Instandhaltung	274
12.9.1	Mechanisierte Montagemethoden	274
12.10	Die Maschinentechnik	275
12.10.1	Konventioneller Umbau/Neubau von Fahrleitungsanlagen	276
12.10.2	Mechanisierte Montagemethoden	280
12.10.3	Messen des Fahrdrabtes	282
12.10.4	Mastsetzen	283
12.11	Grundlagen und Normen	283
	FAZIT	284
	LITERATURVERZEICHNIS	284

13

Vegetationskontrolle

	ZUSAMMENFASSUNG	287
13.1	Allgemeines	288
13.2	Maßnahmen zur Vegetationsbekämpfung	291
13.3	Umweltverträgliche Vegetationskontrolle	294

13.4	Bauliche Maßnahmen zur Vegetationshemmung	295
13.4.1	Bituminöse Sperrschichten	295
13.4.2	Bankettgestaltung	295
13.4.3	Seitliche Hindernisse	295
13.4.4	Einbau von Folien	295
13.5	Biologische Aufwuchsbekämpfung	296
13.6	Mechanische Maßnahmen	296
13.6.1	Schotterbettreinigung	296
13.6.2	Absaugverfahren	297
13.6.3	Maschinelles Jäten	297
13.7	Chemisches Bekämpfung der Vegetation	297
13.7.1	Eingesetzte chemische Wirkstoffe	298
13.7.2	Glyphosat	300
13.7.3	Triclopyr	300
13.7.4	Flumioxazin	300
13.8	Thermische Vegetationsbekämpfung	301
13.9	Übersicht über die verschiedenen Verfahren zur Vegetationsbekämpfung	301
13.10	Instandhaltungskonzept nachhaltiger Vegetationspflege	302
13.11	Problempflanzen	303
13.11.1	Invasive Arten	304
13.11.2	Artenschutz auf Bahnanlagen	305
13.12	Inspektion	306
13.13	Messen der Vegetation	307
13.13.1	Messung der Vegetation mittels Lichtraumscannerdaten	307
13.13.2	Bewuchsanalyse mit autonom fliegenden Drohnen	308
13.13.3	Die Bedeutung von Geografischen Informationssystemen für die Vegetationskontrolle	309
13.14	Die Maschinentechnik	310
13.14.1	Spritzzüge	310
13.14.2	Motormanuelle Arbeitsverfahren	312
13.14.3	Anbaugeräte an Zwei-Wege-Fahrzeuge	312
13.14.4	Elektrojäten	312
13.14.5	Gleisungebundene Maschinen und Zwei-Wege-Fahrzeuge	313
13.14.6	Heißwasserdampfprototyp	313
13.15	Manuelle Herbizideinbringung	315
	FAZIT	316
	LITERATURVERZEICHNIS	316

ZUSAMMENFASSUNG	319
14.1 Allgemeines	320
14.2 Zwei-Wege-Fahrzeuge	320
14.2.1 Funktionale Aspekte von Zwei-Wege-Fahrzeugen	321
14.3 Zwei-Wege-Bagger	322
14.4 Zwei-Wege-Fahrzeuge mit Lkw als Trägerfahrzeug	325
14.5 Zwei-Wege-Bagger mit Basisfahrzeug Unimog	327
14.6 Spezielle Zwei-Wege-Fahrzeuge	330
14.7 Sonderfahrzeuge	330
14.7.1 Oberleitungsinstandhaltungsgerät auf Trägerwaggon	331
14.7.2 Schneeschleudernfahrzeug	331
14.7.3 Schneepflug	332
14.7.4 Kippmulden auf Containerträgerwaggon	332
14.7.5 Mobile Instandhaltungseinheit	333
14.7.6 Rangiergeräte	334
14.8 Anbaumodule und Anbaugeräte	334
14.8.1 Schnellwechselsystem	334
14.8.2 Anbau-Stopfaggregat	335
14.8.3 Schotterausräumer und Schwellengreifgerät	335
14.8.4 Anbau-Schotterkehrbürste	336
14.8.5 Anbau-Schotterpflug	336
14.8.6 Anbau-Schwellenfachräumbalken	337
14.8.7 Anbau-Schwellenpaketgreifer	337
14.8.8 Rissbehandlung von Spannbetonschwellen	338
14.8.9 Schienengreifer	338
14.9 Kleinmaschinen	339
14.9.1 Gleishebe- und -richtmaschine	339
14.9.2 Anbau-Stopfaggregat THA 8 4.0	340
14.9.3 Gleishebe- und -richtgerät LLU	342
14.10 Kleingeräte	343
14.10.1 Schienenmanipulationsgeräte	343
14.10.2 Fahrdrathwerkzeuge	344
14.10.2.1 Fahrdrathschneider	344
14.10.2.2 Fahrdrathrichtwerkzeug	344
14.10.3 Schienenbohrmaschine	345
14.10.4 Holzschwellenbohrmaschine	345
14.10.5 Kernlochbohrung zum Ersatz abgerissener Schwellenschrauben	346
14.10.6 Schlagschrauber	347
14.10.7 Schientrenner	347

14.11 Automatische Warnsysteme	348
FAZIT	349
LITERATURVERZEICHNIS	349

15

Maschinentechnik

ZUSAMMENFASSUNG	351
15.1 Maschinenkategorien	353
15.2 Mechanische Einrichtungen der Oberbaumaschinen	353
15.2.1 Antriebsstrang mit Arbeits-Hydraulik	353
15.2.2 Synthetische Kraftstoffe	356
15.2.3 Hybridantriebe	357
15.2.4 Vorteile und Nachteile der Hybridantriebe	358
15.2.5 Diesel-Batterie-Hybridantrieb	359
15.2.6 Oberleitung-Batterie-Diesel-Hybridantrieb	359
15.2.7 Wasserstoff-Batterie-Hybridantrieb	360
15.2.8 Batteriezüge	363
15.2.9 Vergleich Batterie-/Oberleitungsantriebe mit Wasserstoffantrieb	364
15.2.10 Hybride Antriebskonzepte für Oberbaumaschinen	366
15.2.10.1 Oberbaumaschine als Akkufahrzeug?	367
15.2.10.2 Oberbaumaschinen mit Oberleitungsversorgung und Verbrennungskraftmaschine	368
15.2.10.3 Oberbaumaschinen mit Wasserstoffantrieb	368
15.2.10.4 Realisierbarkeit und ökonomische Sicht von Hybridantrieben bei Nebenfahrzeugen	368
15.2.10.5 Umrüstung von konventionellen Oberbaumaschinen auf nachhaltige Antriebe	368
15.2.11 Entwicklung	370
15.3 Hydraulikanlagen in Bahnbaumaschinen	371
15.3.1 Offener Hydraulikkreislauf	371
15.3.2 Geschlossener Hydraulikkreislauf	372
15.3.3 Wegeventile	372
15.3.4 Hydraulikspeicher – Druckabfederung – Druckausgleich	373
15.3.5 Filterung der Hydraulikkreise	374
15.3.6 Hydrauliktank	376
15.3.7 Ölkühler	377
15.3.8 Hydraulikleitungen	377
15.3.9 Berechnungsformeln für Hydraulikanlagen	378
15.4 Pneumatik	380
15.4.1 Druckluft für die pneumatische Fahrzeugbremse	380
15.4.1.1 Die direkte Druckluftbremse	380
15.4.1.2 Die indirekte Druckluftbremse	381
15.4.1.3 Druckluftfreies Bremssystem	382

15.4.1.4	Die Feststellbremse (Parkbremse)	382
15.4.1.5	Drucklufterzeugung	383
15.4.1.6	Druckluft für Maschinenkomponenten	385
15.4.2	Sandung	385
15.5	Elektrik/Elektronik	386
15.5.1	Stromversorgung – Bordnetz	386
15.5.2	Hilfsgenerator	387
15.5.3	Schutzeinrichtungen	388
15.5.4	Masseverbindung – Erdung	389
15.5.5	Signal- und Warnanlagen	389
15.5.6	Automatische Warnsysteme	390
15.5.6.1	Brandschutz	391
15.5.6.2	Brandgefahr bei alternativen Antrieben	394
15.5.7	Beleuchtung	395
15.5.8	Frei programmierbare Steuerung	397
15.5.9	Fehlerdiagnose	397
15.5.10	Remote Diagnostic and Analysis	401
15.6	Zustandsmonitoring	403
15.7	Zugbeeinflussung – Zugfunk – Signalrecorder	407
15.7.1	Indusi	409
15.7.2	Linienförmige Zugbeeinflussung	410
15.7.3	ETCS	411
15.7.4	Sicherheitsfahrschaltung	411
15.7.5	Gleisstromkreise	411
15.7.6	Achszähler	412
15.7.7	Heißläuferortung	412
15.7.8	Fahrdatenrecorder	412
15.7.9	Zugfunk	412
15.8	Mechanik	414
15.8.1	Rahmen	414
15.8.2	Drehgestellrahmen	415
15.8.3	Anbauteile	415
15.8.4	Kabinen	415
15.8.4.1	Frontscheiben	416
15.8.4.2	Seitenscheiben	416
15.8.4.3	UIC-Sicht	416
15.8.4.4	Staubvermeidung in Kabinen durch Überdruckvorrichtung	416
15.8.5	Zug- und Stoßeinrichtungen	417
15.8.6	Lichtraumprofil	419
15.8.7	Begrenzung des Arbeitsbereiches	419
15.8.8	Freizuhaltende Räume an den Maschinenenden	421
15.8.9	Verriegelung beweglicher Maschinenteile	422
15.8.10	Auf- und Abrüsten – Elektronische Checkliste	422

15.9	Fahrwerke	423
15.9.1	Radprofile	424
15.9.2	Klotzbremsen oder Scheibenbremsen	424
15.9.3	Radsatzanordnung und Radsatzlasten	424
15.10	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit und Sicherheit	425
15.10.1	Zuverlässigkeit	425
15.10.2	Verfügbarkeit	427
15.10.3	Wartbarkeit	427
15.10.4	Sicherheit	428
15.11	Umweltaspekte	428
15.11.1	Reduzierte Staubentwicklung bei Stopfarbeiten	428
15.11.2	Lärmreduktion durch vollhydraulischen Stopfantrieb von System7	429
15.11.3	Biologisch abbaubares Hydrauliköl	430
15.11.4	Hilfsgenerator	430
15.11.5	Photovoltaik	431
15.12	Notbetriebsarten	432
15.12.1	Redundanz der Antriebssysteme	432
15.12.2	Hydrauliknotpumpe	432
15.12.3	Hilfsantrieb bei Dieselmotorausfall	432
15.12.4	Überbrückung defekter Sensoren	433
	FAZIT	433
	LITERATURVERZEICHNIS	434

16

Zulassung von Gleisinstandhaltungsmaschinen

	ZUSAMMENFASSUNG	437
16.1	Die Eisenbahnpakete	438
16.1.1	Das 1. Eisenbahnpaket	438
16.1.2	Das 2. Eisenbahnpaket	439
16.1.3	Das 3. Eisenbahnpaket	439
16.1.4	Das 4. Eisenbahnpaket	439
16.1.5	Horizont Europa	440
16.1.6	Shift to Rail	441
16.1.7	Nationale Sicherheitsvorschriften	441
16.2	Die Institutionen	442
16.2.1	Europäische Eisenbahnagentur	442
16.2.2	Eisenbahn-Bundesamt	443
16.2.3	Internationale Union der Eisenbahnen (UIC)	443
16.3	Zertifizierte Stellen und Einrichtungen	444
16.3.1	Notified Body	444
16.3.2	Assessment Body	444

16.3.3	Konformitätsbewertungsstellen	444
16.3.4	International zertifizierte Prüfstellen für Eisenbahnzulassungsmessungen	445
16.4	Regelwerk	448
16.4.1	Europäische Normung	448
16.4.2	Group Standards	449
16.4.3	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität	449
16.5	Gesetzliche Grundlagen	450
16.5.1	Europäisches Recht	450
16.5.2	Nationales Recht	451
16.5.3	Europäisches Register genehmigter Fahrzeugtypen	451
16.5.4	Die Maschinenrichtlinie	451
16.5.5	Arbeitsschutz	452
16.5.6	Brandschutz	455
16.6	Zulassung von Oberbaumaschinen und Schienenfahrzeugen	455
16.6.1	Typgenehmigung und Genehmigung zum Inverkehrbringen von Fahrzeugen	456
16.6.1.1	<i>Verfahren zur Ausstellung der EG-Prüferklärung</i>	<i>457</i>
16.6.2	Zuständige Stelle für die Instandhaltung	462
16.6.3	Safety – Sicherheit	463
16.6.3.1	<i>Sicherheitsnachweis Fahrzeug</i>	<i>464</i>
16.6.4	Beispiel der Zulassung einer Bahnbaumaschine	467
16.7	Zulassungsmessungen	474
16.7.1	Sicherheit gegen Entgleisung	474
16.7.2	Fahrdynamische Prüfungen von Nebenfahrzeugen	475
16.7.3	Dynamische und statische Bremsversuche	475
16.7.4	Zulassungskosten	476
FAZIT		476
LITERATURVERZEICHNIS		477

17

Strategien der Gleisinstandhaltung

ZUSAMMENFASSUNG	479
17.1 Der Infrastrukturmanager und die Instandhaltungsstrategien	480
17.2 Problemstellungen der Planung und Koordinierung der Instandhaltung und des Zugverkehrs	483
17.2.1 Infrastrukturzugang und Planungsprozess	483
17.2.2 Strategische Probleme	484
17.2.2.1 <i>Dimensionierung der Instandhaltung</i>	<i>484</i>
17.2.2.2 <i>Vertragsgestaltung</i>	<i>484</i>
17.2.2.3 <i>Dimensionierung und Lokalisierung von Wartungsressourcen</i>	<i>484</i>
17.2.3 Taktische Probleme	485
17.2.3.1 <i>Planung der Gleissperrungen für größere Bauvorhaben</i>	<i>485</i>
17.2.3.2 <i>Einsatzplanung für Oberbaumaschinen und Arbeitsteams</i>	<i>485</i>
17.2.3.3 <i>Planänderungen</i>	<i>485</i>

17.2.4	Betriebliche Probleme	486
17.2.4.1	Planung von Instandhaltungsprojekten	486
17.2.4.2	Zeit- und Ressourcenplanung der Arbeiten	486
17.2.4.3	Gleisnutzungsplanung	486
17.3	Gleislageverschlechterung nach Instandhaltungsmaßnahmen	486
17.4	Modelle	489
17.4.1	Mechanistische Modelle	501
17.4.1.1	Mechanistisches Modell nach Sato	501
17.4.2	Statistische Modelle	501
17.4.2.1	Deterministische Modelle	502
17.4.2.2	Wahrscheinlichkeitsmodelle	526
17.4.2.3	Stochastische Modelle	531
17.4.3	Instandhaltungsmodelle mit Künstlicher Intelligenz	536
17.4.3.1	Künstliche neuronale Netze	536
17.4.3.2	Adaptive, neuronale Fuzzy-Interferenzsysteme	538
17.4.3.3	Decision-Support-Systeme	540
17.4.3.4	Maschinenlernsysteme	542
17.4.4	Vergleich der Modelle der gewählten unabhängigen und abhängigen Variablen	547
17.5	Track Quality Indices	549
17.5.1	Kanadische Methode	549
17.5.2	Methode »Straßenbahn Melbourne«	550
17.5.3	Schwedischer Gleisqualitätsindex	550
17.5.4	Der amerikanische Gleisqualitätsindex der FRA	551
17.5.5	Track Roughness Index (Amtrak)	551
17.5.6	Polnischer kombinierter Gleisqualitätsindex	551
17.5.7	Indischer kombinierter Gleisqualitätsindex	552
17.5.8	Chinesischer kombinierter Gleisqualitätsindex	552
17.5.9	Iranischer Gleisqualitätsindex	552
17.5.10	Österreichischer Gleisqualitätsindex	552
17.5.11	Gleisqualitätsindex von ProRail, Niederlande	553
17.5.12	Französischer Gleisqualitätsindex	553
17.5.13	Zusammenhang zwischen Gleisqualitätsindex und Powerdichtespektrum	553
17.6	Die Gleisgeometriefehlerberichtigung durch Stopfen	554
17.6.1	Verfälschter Strategieansatz: Reduktion der Stopfarbeiten	554
17.6.2	Die optimale Eingriffsschwelle für das Stopfen	557
17.7	Kombination von Gleisinstandhaltungsarbeiten	563
17.7.1	Kombination aus Stopfen mit Schleifen/Fräsen	563
17.8	Vergabe von Gleisbauarbeiten	564
17.8.1	Mehrjährig laufende Unternehmerverträge bei den ÖBB	564
	FAZIT	564
	LITERATURVERZEICHNIS	565

ZUSAMMENFASSUNG	571
18.1 Lebenszykluskosten (LCC)	572
18.1.1 Formen der Investitionsrechnungen	575
18.1.1.1 Kapitalwertmethode	575
18.1.1.2 Annuitätenmethode	576
18.1.1.3 Interner-Zinssatz-Methode	576
18.1.2 Die verschiedenen LC-Kostenanteile bei der Bahn	576
18.1.2.1 Instandhaltungskosten	577
18.1.2.2 Erneuerungskosten	577
18.1.2.3 Betriebserschwerungskosten	579
18.1.2.4 Überstellkosten – Fahrkosten	580
18.1.2.5 Kosten der ungenutzten Lebensdauer	580
18.1.2.6 Verspätungs- und Verkehrsunterbrechungskosten	580
18.1.2.7 Umweltbezogene Kosten	580
18.1.2.8 Andere Kostenfunktionen	581
18.1.2.9 Externe Kosten	581
18.2 Life-Cycle-Management	581
18.3 RAMS	582
18.3.1 Bedeutung der Begriffe	583
18.3.2 Funktionale Sicherheit	584
18.3.3 Technische Spezifikationen Interoperabilität	585
18.3.4 Wichtige RAMS-Parameter	586
18.3.5 Vergleichende LCC für die Infrastruktur	586
18.3.6 Das österreichische Modell	586
18.3.6.1 Der Normkilometer	587
18.3.6.2 Normalisierte Jahreskosten	587
18.3.6.3 Einfluss der Liegedauerverlängerung	588
18.3.6.4 LCC von Weichen	588
18.3.6.5 Einfluss von Bauabschnittslängen/Sperrpausen	591
18.3.6.6 Einfluss von Bogenradien auf die LCC	593
18.3.6.7 Wirtschaftlichkeit besohlter Schwellen	593
18.3.7 Das Modell der SBB	594
18.3.8 Auswirkungen von Budgetrestriktionen	595
18.3.9 Ganzheitliches englisches LCC-Modell	597
18.3.10 LCC/RAMS im Bereich der Infrastruktur	598
18.3.11 Nachhaltigkeitsaspekte und LCC	603
18.3.12 Optimaler Abstand von Überleitstellen	604
18.3.13 LCC/RAMS für Schienenfahrzeugtechnik	604
18.3.13.1 Verfügbarkeit von Schienenfahrzeugen	607
18.3.13.2 Wartbarkeit von Schienenfahrzeugen	609
18.3.13.3 Zuverlässigkeit von Oberbaumaschinen	609
18.3.13.4 Verfügbarkeit von Oberbaumaschinen	611

18.3.13.5	Wartbarkeit von Oberbaumaschinen	613
18.3.13.6	Sicherheit von Oberbaumaschinen	614
18.3.14	Safety – Sicherheit von Bahnanlagen	615
18.4	LCC-Vergleich Schotteroberbau und Feste Fahrbahn	616
18.4.1	Möglichkeiten der Reduktion der Instandhaltungskosten	617
18.4.1.1	Verbesserungen der Infrastruktur	617
18.4.1.2	Verbesserungen am Rollmaterial	617
18.5	Ländervergleich	618
18.5.1	Railway Performance Index	619
18.6	Kostentreiber	621
18.7	Kostentabelle	625
	FAZIT	629
	LITERATURVERZEICHNIS	630

19

Umweltaspekte und ökologischer Fußabdruck

	ZUSAMMENFASSUNG	635
19.1	Der Klimawandel	637
19.1.1	Der Anteil des Verkehrs an den Treibhausgasemissionen	640
19.1.2	Wachstum und Anteil des Schienenverkehrs	642
19.1.3	Die umweltfreundliche Bahn	644
19.1.4	Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Eisenbahn	645
19.2	Die Vorhaben der EU – die Dekarbonisierung mit Hilfe der Eisenbahn	646
19.3	Dekarbonisierung beim Eisenbahnverkehr	647
19.3.1	Kreislaufwirtschaft	647
19.3.1.1	Laufzeitverlängerung von Hochgeschwindigkeitszügen	649
19.3.2	Maßnahmen beim Verkehrswegebau	650
19.3.3	Nachhaltigkeit von Systembahnsteigen in Betonfertigteil-Bauweise	651
19.3.4	Verwendung von Geokunststoffen	651
19.3.5	Bahnschwellen aus recyceltem Kunststoff	652
19.3.6	Fahrerassistenzsysteme	652
19.3.7	Energieeffiziente Fahrweise der Triebfahrzeuge	652
19.3.8	Bahnreise statt Kurzstreckenflüge	653
19.3.9	Gewichtsreduktion der Schienenfahrzeuge	653
19.3.10	Berechnung des Energiebedarfs von Zügen	653
19.3.11	Alternative Antriebe	654
19.3.11.1	Wasserstoffantriebe	655
19.3.11.2	Batterieantriebe	656
19.3.11.3	Hybridantriebe	657
19.3.12	Photovoltaikanlagen auf Bahngebäuden	657
19.3.13	Klimawandeleinfluss auf die Eisenbahn	658
19.3.13.1	Maßnahmen	659

19.4	THG-Emissionen bei Instandhaltungs- und Erneuerungsarbeiten	661
19.4.1	THG-Emissionen für den Transport	661
19.4.2	Typische Kennwerte von THG-Emissionen	662
19.4.3	Feinstaubemissionen	665
19.4.4	Entstaubungsanlage einer Bettungsreinigungsmaschine	667
19.4.5	THG-Emissionen der Infrastruktur	667
19.4.6	Landverbrauch	668
19.4.7	Gleisabwasserbelastung	668
19.4.8	Imprägnierte Schwellen	669
19.4.9	Vegetationskontrolle	669
19.4.10	Bahnlärm	669
19.5	Störungen und Auswirkungen des Bahnverkehrs auf Wildtierarten	673
19.5.1	Landschaftspflegerische Maßnahmen	674
19.6	Ökologischer Fußabdruck	674
19.7	Ökobilanz	675
19.8	Umweltbelastungspunkte – Methode der ökologischen Knappheit	677
19.8.1	Umweltbilanz Gleisumbau	680
19.9	Berechnung von THG-Kosten	681
19.9.1	THG-Kosten der Schienenoberflächenbearbeitung und des Schienenwechsels	682
19.9.2	Einfluss der Schienengüte auf THG-Emissionen	682
19.9.3	Externe Kosten der Bahn im Vergleich zur Straße	683
19.10	Informationssysteme für Umweltdaten	683
19.11	Reduktion von Lichtemissionen	684
19.12	Vogelschutz an Bahnüberleitungen	685
	FAZIT	686
	LITERATURVERZEICHNIS	687

20

Die Digitalisierung der Eisenbahn

	ZUSAMMENFASSUNG	691
20.1	Die Bahn im Zeitalter der Industrie 4.0	693
20.2	Internet of Things	695
20.3	Building Integration Model	697
20.3.1	Instandhaltung von Eisenbahnen mit BIM	698
20.3.2	Strategien zur Einführung von BIM	699
20.3.3	LiDAR-Messsysteme	701
20.3.3.1	Airborne Laserscanning	701
20.3.3.2	Terrestrisches Laserscanning	701
20.3.3.3	Mobiles Laserscanning	702
20.3.4	Mobile Mapping zur Überprüfung des lichten Raums	702