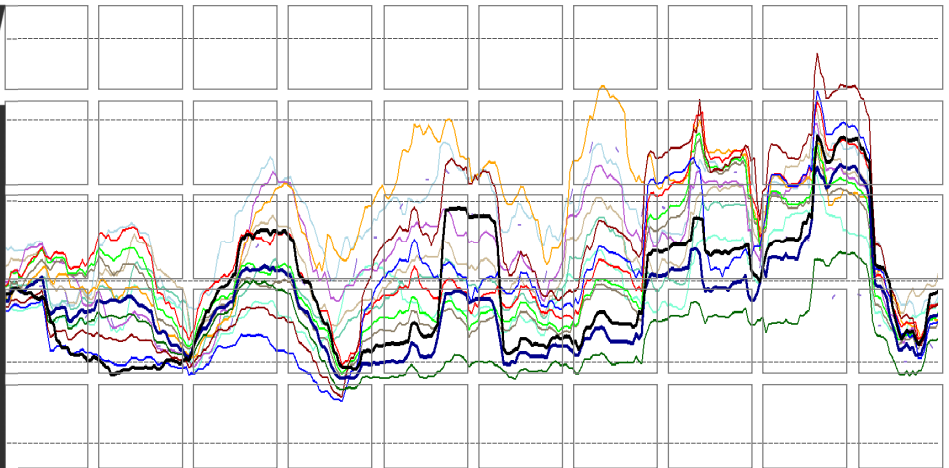


EBW



W

## Der Oberbau der GKB am Prüfstand

Masterarbeit

2014

Monika Stibler

BSc.

0830490

m.stibler@student.tugraz.at

Betreuer:

Stefan Marschnig

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

+43 873 6717

stefan.marschnig@tugraz.at

B

E



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Veit, Leiter des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft an der Technischen Universität Graz, für das Ermöglichen dieser Masterarbeit bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Marschnig für die Unterstützung und Begutachtung meiner Masterarbeit bedanken.

Mein Dank geht an Herrn Dipl.-Ing. Fabian Hansmann, der mir stets Ansprechpartner war, mich durch sein Fachwissen und seine wertvollen Anregungen unterstützt hat und wesentlich zur Erstellung dieser wissenschaftlichen Arbeit beigetragen hat.

Ich danke meinen Freunden und Studienkollegen aus dem Stahlbau- und Wasserbauzeichensaal für eine schöne und prägende Studienzeit. Speziell bedanke ich mich bei Thomas, mit dem ich unzählige Stunden zusammen gelernt habe und der mich mit seiner herzlichen Art bei manch einer Tasse Kaffee motiviert hat.

Ein großer Dank geht an meinen langjährigen Freund Christoph, der mich durch mein gesamtes Studium begleitet hat und in schwierigen Situationen nicht von meiner Seite gewichen ist. Auch während der Anfertigung der Masterarbeit hat er mich mit hilfreichen Anregungen und noch mehr Geduld unterstützt.

Ein besonderer und tiefer Dank gilt meiner Familie. Ich danke meiner Mutter Ljubica und meinem verstorbenen Vater Srečko dafür, dass sie immer an meiner Seite waren, mich in all meinen Vorhaben unterstützt haben und immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatten. Ebenso bedanke ich mich bei meiner Schwester Nadja, die mir stets Mut zugesprochen hat und mir eine wertvolle Stütze war.

## 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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 27.10.2014

\_\_\_\_\_

## Kurzfassung

Einer der wichtigsten Faktoren für Verkehrsunternehmen ist, die Infrastruktur wirtschaftlich bestmöglich zu betreiben. Folglich ist die Kenntnis über die Oberbaukomponenten sowie auch die Unterbausituation von großer Bedeutsamkeit. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der Oberbauzustand der S-Bahn-Strecke S7 von Graz nach Köflach untersucht.

Die von der Graz-Köflacher Bahn und Busbetrieb GmbH (Kurzform GKB) zur Verfügung gestellten Daten beinhalten Informationen über den Oberbau, die Trassierungselemente, die durchgeführten Instandhaltungsarbeiten sowie Messsignale der Strecke Graz-Köflach, die das Fundament der Arbeit bilden. Um die Daten verwenden zu können, werden sie im ersten Teil auf eine einheitliche Form gebracht, auf Plausibilität untersucht und, falls erforderlich, korrigiert.

In der vorliegenden Masterarbeit werden die Oberbaukomponenten des jeweiligen Streckenabschnitts, inklusive des Gleisalters, zuerst mit den Trassierungsinformationen und in späterer Folge mit den seit 2001 durchgeführten Maschineneinsätzen ausgewertet und interpretiert. Des Weiteren werden die Messsignale der Standardabweichung in Längsrichtung beziehungsweise in Richtungslage und der MDZ-a Ziffer der Messfahrten zwischen 2002 und 2012 mit den Oberbaudaten gekoppelt und anschließend analysiert.

Die Daten werden grafisch aufbereitet, um eine schnelle Übersicht über die vorhandenen Informationen und Besonderheiten des Streckenbestandes zu ermöglichen und Aufschluss über die Gleislagequalität zu geben.

Nach Abschluss der Analyse werden Nutzungsdauern, die auf Erfahrungswerten beruhen, verwendet, um mittels des durchschnittlichen Oberbualters eine Restnutzungsdauer bestimmen zu können. Damit wird weiterführend ein möglicher Re-Investitionsbedarf für die nächsten 25 Jahre abgeschätzt.

## Abstract

One of the most important factors for transport companies is to operate the infrastructure as economically as possible. Consequently, the knowledge of the track superstructure as well as the substructure is necessary. The aim of this thesis is to examine the condition of the track superstructure of the railway line S7 from Graz to Köflach.

The data provided by the Graz-Köflacher Bahn und Busbetrieb GmbH (GKB) includes information about the superstructure, the route alignment, the maintenance operations since 2001 and the measurement signals between 2002 and 2012 of the route. In the first step all data is formed to a unified base for further analysis and corrected, if necessary.

In the main part of the thesis all the gathered information of the railway line S7 are evaluated and interpreted. The outcome is represented graphically to allow a quick overview of the characteristics of the railway line and to lead to a track quality evaluation.

In the final chapter the useful life, which is based on empirical values, is used to determine the remaining useful life by calculating the average age of the superstructure. Subsequently, it is possible to estimate the reinvestment demand for the next 25 years.

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	2
Eidesstattliche Erklärung .....	3
Kurzfassung.....	4
Abstract .....	5
Inhaltsverzeichnis.....	6
1 Einleitung .....	7
2 Strecke Graz-Köflach .....	8
3 Oberbaustoffe .....	9
3.1 Datenbearbeitung der Oberbauinformation.....	9
3.2 Schiene .....	11
3.2.1 Schienenprofil.....	12
3.2.2 Schienengüte.....	15
3.3 Schwelle .....	19
3.3.1 Schwellentyp .....	19
3.4 Schienenbefestigung .....	24
3.5 Oberbauform.....	26
4 Trassierungsinformation .....	29
4.1 Charakteristik der Holzschwelle im Streckenbereich Graz-Köflach .....	41
5 Instandhaltung.....	42
6 Gleislagequalität.....	50
6.1 Messung der Gleisgeometrie.....	53
6.2 Globalanalyse.....	54
6.2.1 SIGMA-h .....	55
6.2.2 SIGMA-r.....	61
6.2.3 MDZ-a Ziffer .....	66
6.3 Zeitreihenanalyse .....	74
6.3.1 Ausbau- und Einbauqualität .....	74
6.3.2 Streckenquerschnitt.....	79
6.3.3 Gütekriterium .....	84
6.3.4 Gleisverhalten.....	86
7 Re-Investition .....	92
7.1 Re-Investitionsbedarf mit angenommenem Einbaujahr der unbekanntenen Schwellen .....	92
7.2 Re-Investitionsbedarf – Sensitivitätsanalyse.....	95
8 Zusammenfassung .....	96
Abkürzungsverzeichnis .....	98
Abbildungsverzeichnis .....	99
Tabellenverzeichnis.....	100
Literaturverzeichnis .....	101

# 1 Einleitung

Die Graz-Köflacher Bahn und Busbetrieb GmbH (Kurzform GKB) ist ein Eisenbahnverkehrsunternehmen in der Süd- und Weststeiermark. Das Unternehmen besteht seit über 150 Jahren und wurde für den Kohletransport gegründet. Heute besteht die primäre Aufgabe darin, öffentlichen Personennahverkehr abzuwickeln und mit den drei S-Bahnlinien S6, S61 und S7 die Bezirke Deutschlandsberg und Voitsberg mit der Landeshauptstadt Graz zu verbinden. Jährlich befördert das Unternehmen rund vier Millionen Passagiere mit der Eisenbahn. Mit der stetig steigenden Fahrgastanzahl ist sie „*ein wichtiger Motor für die wirtschaftliche Entwicklung einer ganzen Region*“. [1]

Die Bahnanlagen müssen einer regelmäßigen Instandhaltung unterzogen werden, damit der Verkehr reibungslos und vor allem sicher abgewickelt werden kann. Daher ist es notwendig, einen Überblick über die Oberbausituation der Infrastrukturanlage zu haben. Aus diesem Grund besteht zwischen der GKB und dem Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der Technischen Universität Graz eine Forschungs Kooperation.

Die GKB hat dafür alle oberbaurelevanten Informationen, die für die Anfertigung der Arbeit notwendig sind, bereitgestellt. Dazu gehören Daten zu den Oberbaustoffen, den Trassierungselementen, den durchgeführten Stopfgängen sowie die Messsignalauswertung der letzten zehn Jahre.

Das Ziel der Arbeit ist es, die Informationen über die verwendeten Oberbaustoffe, wie Schienen und Schwellen mit Befestigungssystemen, grafisch aufzubereiten und festzustellen, welcher Oberbau in den einzelnen Trassierungselementen eingebaut ist. Des Weiteren geben Informationen zu den Maschineneinsätzen Auskunft, welche Oberbauform besonders oft instandgesetzt werden muss. Anschließend wird das Gleisverhalten der Strecke mittels Messsignalauswertung bestimmt und eine Abschätzung des Re-Investitionsbedarfs vorgenommen.

Die Programmiersprache und Entwicklungsumgebung „R“ kann speziell für statistische Berechnungen, wie statistische Tests, lineare und nicht lineare Modelle, Clusteranalysen, und für grafische Auswertungen angewendet werden. Die Software steht zur freien Verfügung und ist plattformunabhängig. [2]

In der vorliegenden Arbeit werden alle vorhandenen Daten mittels der Software „R-Project“ einer statistischen Analyse unterzogen, um die daraus resultierenden Ergebnisse grafisch abzubilden und anschließend zu interpretieren.

## 2 Strecke Graz-Köflach

Der Streckenverlauf der S-Bahnlinie S7 von Graz-Köflach führt von Graz Hauptbahnhof über die Bahnhöfe Graz Köflacherbahnhof und Lieboch nach Köflach. Die Strecke ist in Normalspur geführt und eingleisig ausgebaut. [3]

Die Trasse weist eine Gesamtlänge von 47,019 km auf, davon fallen knapp über 85 % auf das Hauptgleis. Die zusätzliche Gleislänge im Bahnhofsbereich (Bahnhofsgleis) beträgt rund 7 km.

In der Abbildung 2.1 ist die Aufteilung der Gleislängen grafisch dargestellt.

### Graz-Köflach Gesamtstrecke

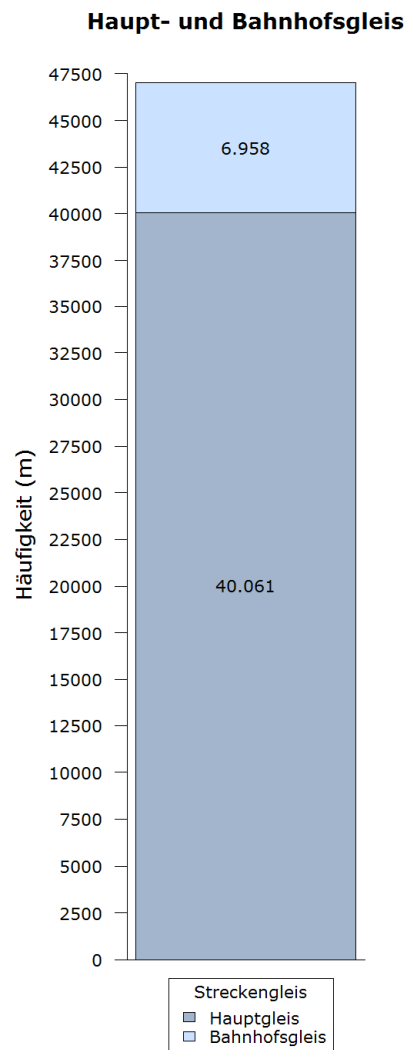


Abbildung 2.1 Haupt- und Bahnhofsgleislänge



### 3 Oberbaustoffe

#### 3.1 Datenbearbeitung der Oberbauinformation

Bevor eine Auswertung aller Streckeninformationen durchgeführt werden kann, müssen die zur Verfügung stehenden Daten des Streckenabschnittes Graz-Köflach auf Plausibilität untersucht und, wenn nötig, korrigiert werden.

Es werden folgende, für die Auswertung relevante Informationen aus der Oberbaudatei der GKB bearbeitet:

- Kilometrierung
- Gleisnummer
- Stationierung der Bahnhöfe
- Schieneninformation
- Schwelleninformation
- Befestigungsinformation

Damit eine einheitliche Datei als Basis dienen kann, werden die ursprünglichen Schienen- und Schwellenbezeichnungen der GKB-Datei durch die genormten Bezeichnungen laut ÖNORM EN 13674-1 [4] ersetzt (Tabelle 1 bis Tabelle 3). In Tabelle 4 sind die eingesetzten Schienenbefestigungen aufgelistet.

#### I Schienenprofil

ursprüngliche Bezeichnung	genormte Bezeichnung
49 E1	49E1
60 E1	60E1
B	49E1
BVC	49E1
S 49	49E1
S 49 / B	49E1
S 49 E1	49E1

Tabelle 1 verwendetes Schienenprofil

#### I Schienengüte

ursprüngliche Bezeichnung	genormte Bezeichnung
700	R200
900	R260
900A	R260
900B	R260Mn

Tabelle 2 verwendete Schienengüte

## I Schwellenart

ursprüngliche Bezeichnung	genormte Bezeichnung
HOLZ	Holz
Be - 14	BE 14
Be - 14a	BE 14a
Be - 14c	BE 14c
Be - 16	BE 16
Be - 19	BE 19
Be - 19a	BE 19a
Be - L1	L1
Be - L2	L2
Be - L3	L3
L1	L1
L2	L2
L2 - 01	L2
L2 - 04	L2
L2 - 99	L2

Tabelle 3 verwendete Schwellenart

## I Schienenbefestigung

Befestigungsart	Schwellen-schraube	Befestigungsinfor-mation
SKL	SS 22-130-6	
SKL	SS 23	WFP 14K
SKL	SS 25	
SKL	SS 25	WFP 14K
SKL	SS 25	WFP 14K 12
SKL	SS 25	WFP 3b
SKL	SS 25	WFP 14
SKL	SS 35	WFP 14K
SKL	SS 35	WFP 14K 12
SKL	SS 73	WFP 3b
SKL	SS 90	WFP 3
SKL	SS 90	HS, KP, FE
SKL	SS 90	WFP 3b
SKL	SS 90	WFP 2
SKL	SS 90	WFP 14K
RP	SS 1535	HS, KP, FE
RP	SS 1537	HS, KP, FE
RP	SS 16	HS, KP, FE
RP	SS 5	HS, KP, FE
RP	SS 73	HS, KP, FE
RP	SS 76	HS, KP, FE
FBE P		

Tabelle 4 verwendete Schienenbefestigung

Es kommt zu einer Unterscheidung zwischen linkem und rechtem Schienenstrang, da teilweise Schieneninformationen fehlen, beziehungsweise Schienenstränge an einem Querschnitt nicht dasselbe Walzzeichen aufweisen. Es muss darauf geachtet werden, dass eine Durchgängigkeit der Kilometrierung gewährleistet ist.

Mit Hilfe des Statistikprogramms „R-Project“ wird die bearbeitete Oberbaudatei eingelesen und ein Kilometerband in 1-Meter-Abständen erstellt, damit in späterer Folge die Häufigkeiten der Oberbaukomponenten der Strecke Graz-Köflach ermittelt werden können.

Die Österreichischen Bundesbahnen (Kurzform ÖBB) haben Vorschriften und Behelfe erarbeitet, nach denen ihre Infrastruktur gebaut und betrieben wird. [5]

In der vorliegenden Arbeit wird die Vorschrift der ÖBB Infrastruktur B 50 - Teil 1 Oberbauformen [6] verwendet, da sich die GKB ebenso an diesem Richtwerk orientiert.

### 3.2 Schiene

Die Schiene ist eine wesentliche Komponente des Oberbaus mit der Aufgabe, das Fahrzeug auf der Fahrfläche zu führen und die Lasten auf die Schwellen zu übertragen. [7]

Beanspruchungen der Schiene erfolgt durch:

- I vertikale Radlast
- I Führungskräfte
- I dynamische Kräfte, die aufgrund von Oberflächen- und Geometriefehlern des Gleises erzeugt werden
- I Längskräfte, die durch Temperaturänderungen und Anfahr-, beziehungsweise Bremskräfte entstehen

Durch die oben genannten Beanspruchungen der Schiene können Schienenfehler, wie Risse an der Schienenoberfläche durch Rollkontaktermüdung (Head Checks), Riffelbildung und Verschleiß entstehen. Dabei werden Oberflächenrisse, die sich an der Fahrkante der Bogenaußenschiene durch den dort auftretenden Schlupf ausbilden, als Head Checks bezeichnet.

„Riffel sind kurzweilige Fehler auf der Schienenoberfläche“ und „ ... kommen vor allem dort vor, wo ein Sinuslauf der Fahrzeuge stattfindet, wie in Geraden und Bögen mit großem Halbmesser.“

Im Bogen bildet sich der Schienenverschleiß an der Außen- und Innenschiene unterschiedlich aus. Dabei wird die Außenschiene nicht nur in der Höhe, wie es bei der Innenschiene der Fall ist, sondern vor allem seitlich abgenutzt. Somit ist die Liegedauer der Schiene in engen Bögen vor allem durch den Schienenverschleiß limitiert.

Gründe für die Beanspruchung der Bogeninnenschiene können durch zu große Überhöhungen der Bogenaußenschiene oder durch das Befahren des Bogens mit zu geringer Geschwindigkeit erfolgen.

Die technische Liegedauer der Schiene kann unter Berücksichtigung der Dauerfestigkeit abgeschätzt werden. Nach Erreichen der Dauerfestigkeit ist mit Schienenbrüchen zu rechnen. Jedoch werden die Schienen in der Regel aufgrund von Schienenoberflächenfehlern oder Verschleiß ausgetauscht.

### 3.2.1 Schienenprofil

In Österreich wird die Vignolschiene mit den Schienenprofilen 49E1, 54E2 und 60E1 eingesetzt. [6] Dabei setzt sich die Bezeichnung der Schienenform aus dem Metergewicht (kg/m) und der genormten Profilnummer zusammen. [4]

Im GKB-Netz sind jedoch nur die Schienenformen 49E1 und 60E1 zu finden.

Allgemeiner Vergleich der Schienenformen:

#### I Profil 49E1

Diese Schienenform verfügt über ein Metergewicht von 49,39 kg/m. Durch die Berücksichtigung der Dauerfestigkeit von Schienen kann eine technische Liegedauer der Schienenprofile abgeschätzt werden. Dabei beträgt die Liegedauer der 49E1-Schiene rund 280 Millionen Gesamtbruttotonnen, das entspricht einem Zehntel des Schienenprofils 60E1. [7]

#### I Profil 60E1

Mit einem Metergewicht von 60,21 kg/m und einer Liegedauer unter dem Aspekt der Dauerfestigkeit von ca. 2780 Millionen Gesamtbruttotonnen besitzt diese Schienenform die höchste Dauerfestigkeit. Die 60E1-Schiene wird auf stark belasteten Strecken der ÖBB verwendet. [6] [7]

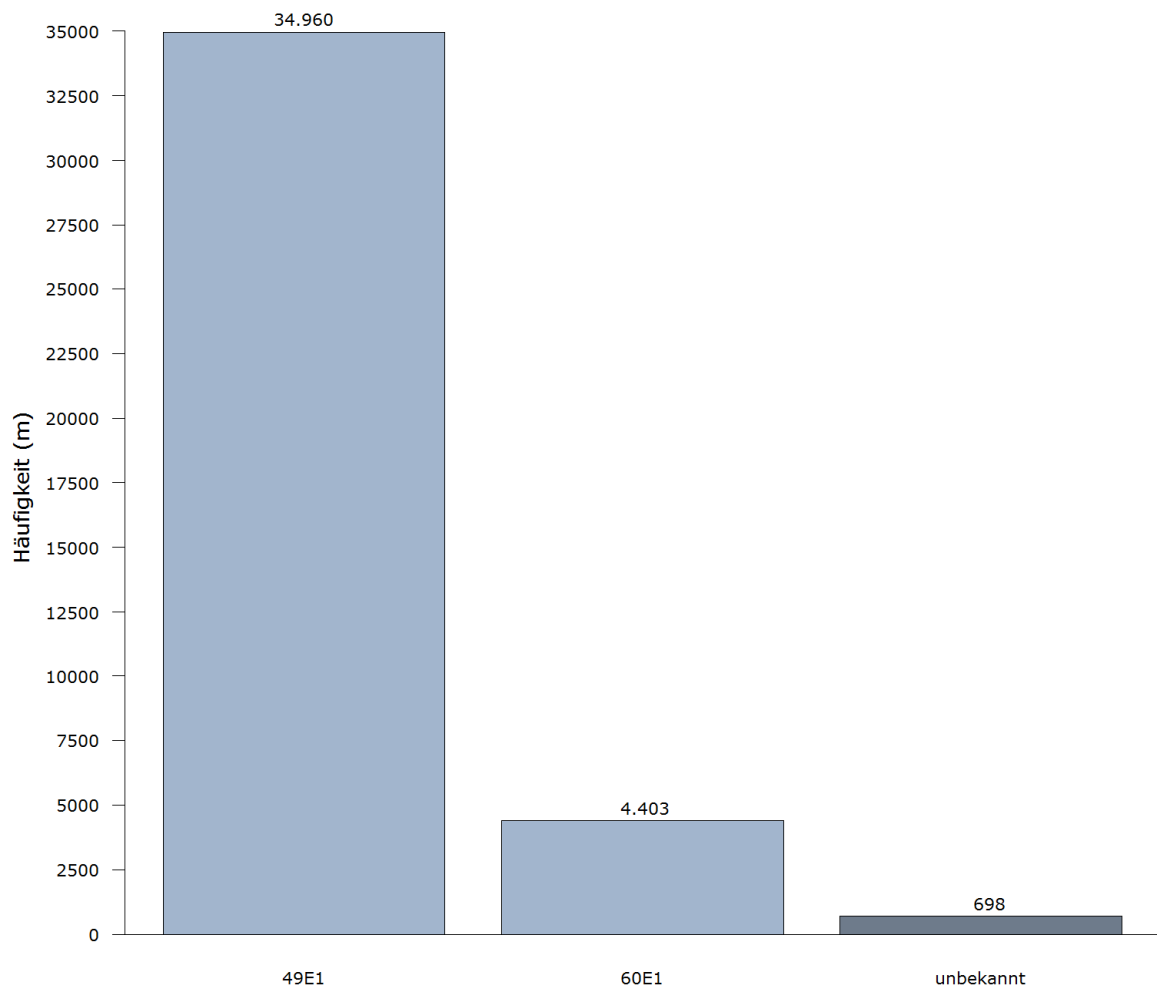
**Graz-Köflach  
Hauptgleis****Schienenprofil**

Abbildung 3.1 Schienenprofil Hauptgleis

Wie in Abbildung 3.1 zu erkennen, wird hauptsächlich das Profil 49E1 verwendet. Das Schienenprofil 60E1 wird lediglich bei zirka 10 % der Hauptstrecke eingesetzt, wobei im Bahnhofs- und Haltestellenbereich ausschließlich 49E1-Profile zu finden sind.

Anmerkung: Alle grafischen Darstellungen der Schiene werden mit den Informationen des rechten Schienenstranges erstellt, vorausgesetzt es besteht kein deutlicher Unterschied zum linken Schienenstrang.

## Graz-Köflach Hauptgleis

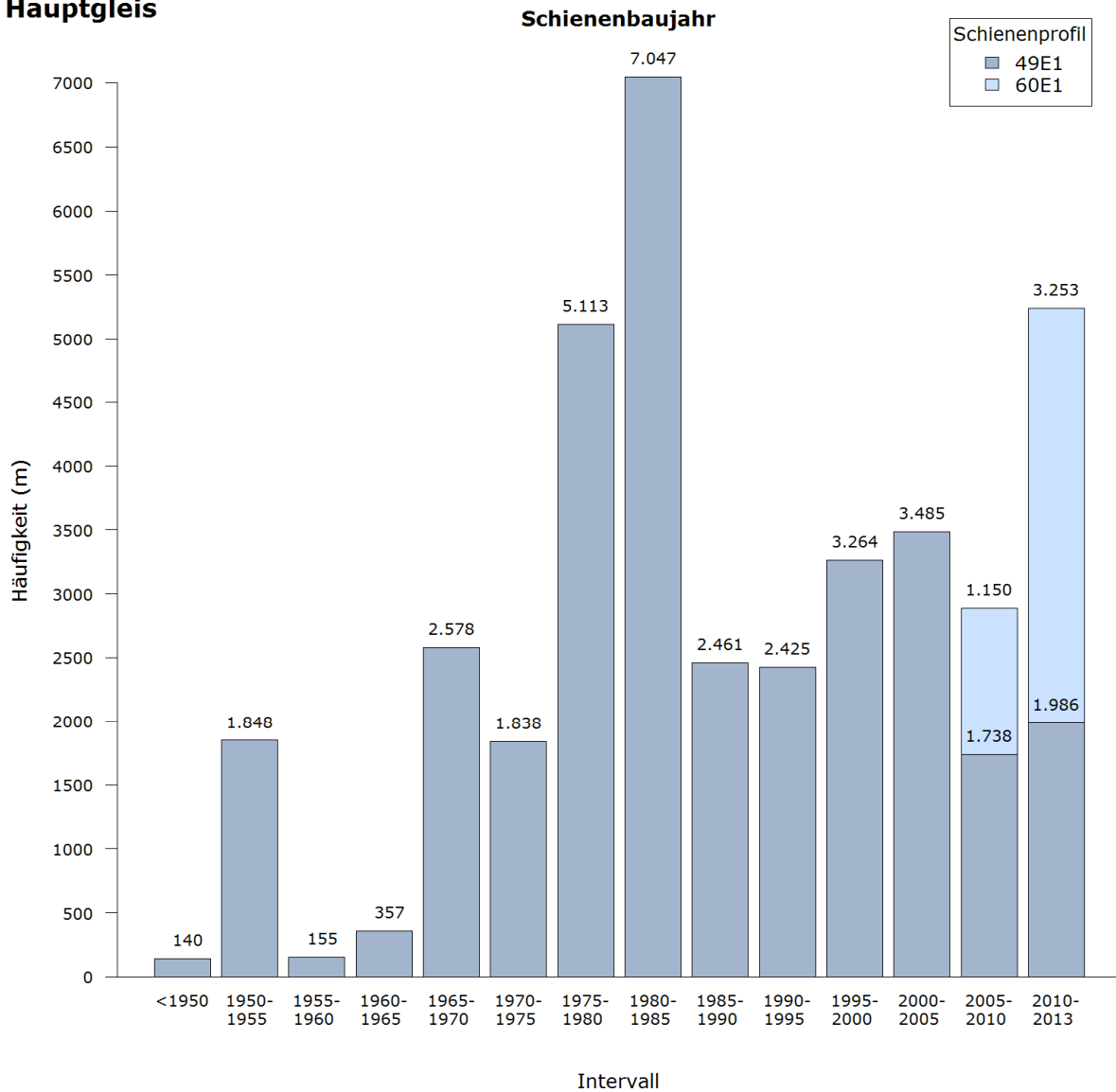


Abbildung 3.2 Einbaujahr Schienenprofil Hauptgleis

In der Abbildung 3.2 ist ein Balkendiagramm mit dem Schieneneinbaujahr und der Schienenform dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass seit zehn Jahren vermehrt 60E1-Schienen eingebaut werden. In den Jahren 2010 bis 2013 beläuft sich der Anteil der neu verlegten Schienenform 60E1 bereits auf über 60 %.

Vergleicht man das Verlegejahr der Außenschiene mit jedem der Innenschiene, so lässt sich erkennen, dass bei einem Schientausch, bis auf wenige Ausnahmen, beide Schienenstränge erneuert werden. Dabei weisen sie dasselbe Schienenprofil auf, lediglich die Schienengüte ist an einigen Stellen nicht ident.

Wie bereits erwähnt, bildet sich der Schienenverschleiß oder -fehler an Bogenaußenschiene- und innenschiene unregelmäßig aus. [7] Nachdem von der GKB beide Schienenstränge im Bogenbereich gleichzeitig ausgetauscht werden, kann daraus geschlossen werden, dass die Schienen nicht immer aufgrund des Verschleißes ausgetauscht werden.

### 3.2.2 Schienengüte

Ein weiterer Parameter der Schiene ist die Schienengüte. Durch Änderung der chemischen Zusammensetzung können verschiedene Stahlsorten mit unterschiedlichen Festigkeiten hergestellt werden. [7]

Ursprünglich erhielt die Stahlgüte ihre Bezeichnung aufgrund ihrer Zugfestigkeit (z.B. Stahlgüte 700 mit der Zugfestigkeit von 680 MPa). Durch die neu erarbeitete Norm (EN 13674-1:2011 [4]) wird die alte Bezeichnung durch die Schienenhärte (HBW) ersetzt. Der Härtewert bezieht sich auf die Mittellinie der Fahrfläche. [4]

Folgende drei Stahlsorten finden bei der GKB Verwendung:

#### I Schienengüte R200

Diese Stahlsorte wird im naturharten Zustand geliefert und besitzt eine Härte von 200 bis 240 HBW. [4] [7]

Der ÖBB Vorschrift B 50 – Teil 1 [6] folgend, wird diese Stahlsorte seit 2009 nicht mehr eingebaut.

#### I Schienengüte R260

Die naturharte Schiene wird als verschleißfeste Güte bezeichnet und als Standardgüte eingesetzt. Der Härtebereich dieser Stahlsorte reicht von 260 bis 300 HBW. [4] [7]

#### I Schienengüte R260Mn

Die Schienengüte weist einen niedrigeren Kohlenstoff- und höheren Mangan-Gehalt als die Standardgüte R260 auf, jedoch besitzt sie denselben Härtewert wie die Stahlsorte R260. [4]

## Graz-Köflach Hauptgleis

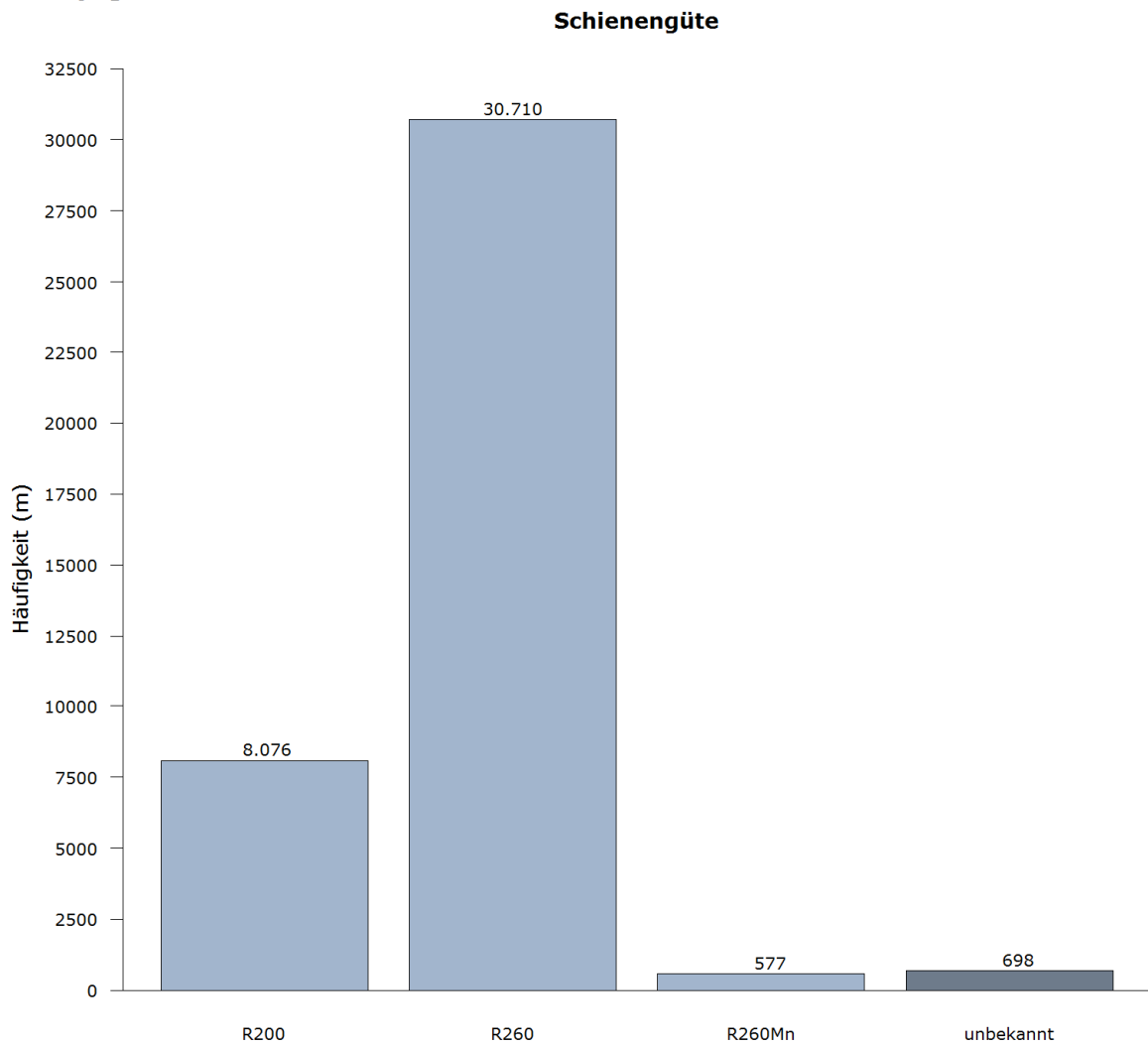


Abbildung 3.3 Schienenlänge Hauptgleis

Aus der Abbildung 3.3 lässt sich entnehmen, dass auf der Hauptstrecke die Stahlsorte R260 ebenfalls als standardisierte Güte eingesetzt wird und lediglich 20 % auf die Güte R200 sowie nur knapp über 1 % auf R260Mn fallen.

Betrachtet man das zweite Gleis im Bahnhofsbereich, so beträgt der Anteil an R200-Schienen über 40 %. Dieser Anteil der Stahlsorte R200 ist größtenteils vor 1970 eingebaut worden (siehe Abbildung 3.5).



## Graz-Köflach Hauptgleis

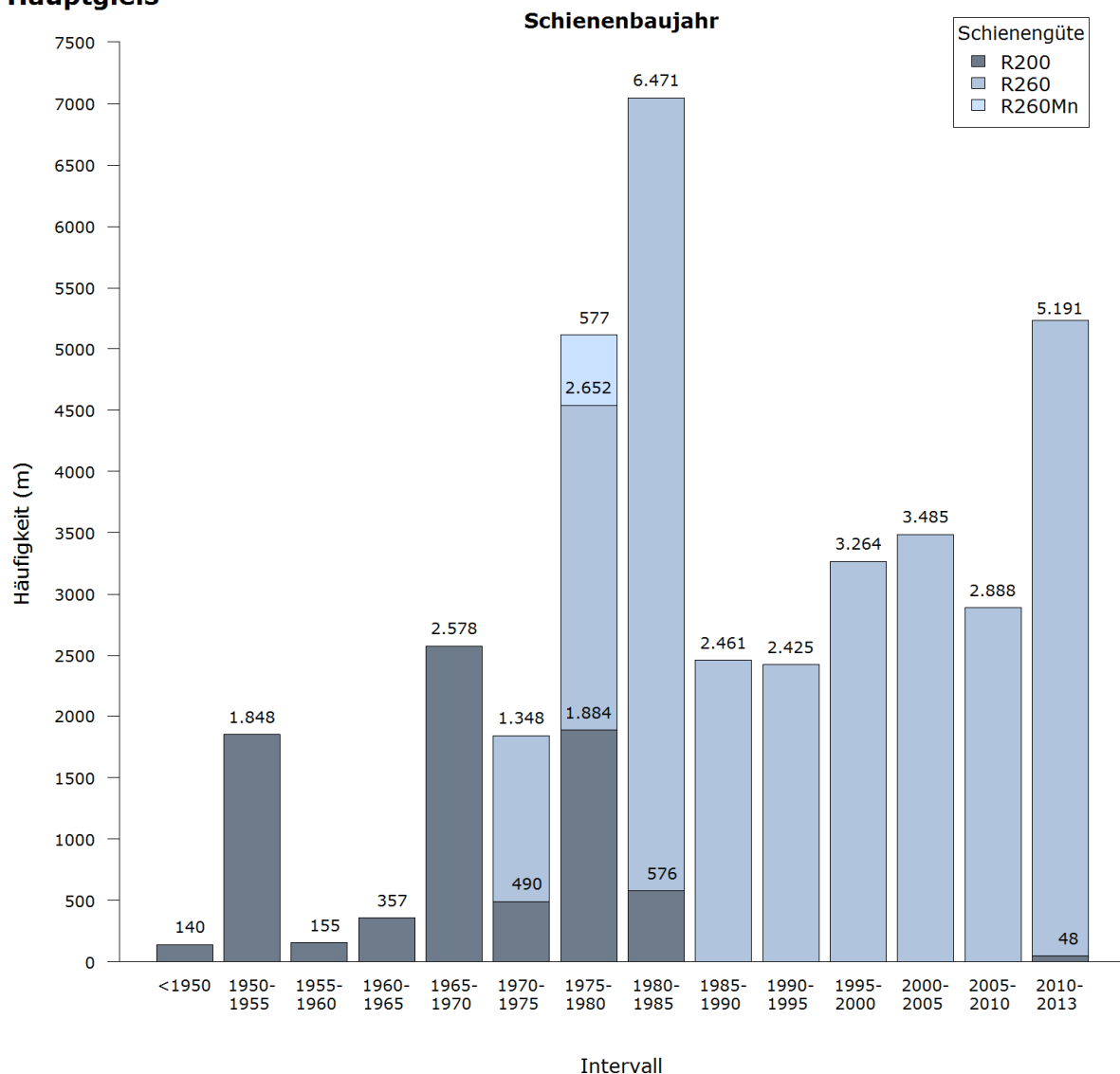


Abbildung 3.4 Einbaujahr Schienengüte Hauptgleis

Aus der Abbildung 3.4 ist zu entnehmen, dass die Schienengüte R260 erstmals im Jahr 1970 eingebaut wurde und wird seit den 80er Jahren am Hauptgleis der GKB standardmäßig verwendet. Die ÖBB Vorschrift B 50 – Teil 1 [6] sieht die Schienengüte R260 als Mindeststandard vor. Die 48 m eingebaute Schienenlänge der Güte R200 im 2011 könnten vom Einsatz altbrauchbarer Gleisstoffe herrühren.

In den Jahren 1975 bis 1980 wurden versuchsweise Schienen der Güte R260Mn eingebaut. In den weiteren Kapiteln wird der Einsatzort dieser Güte genauer betrachtet.

Nachdem jährlich im Durchschnitt rund 1.230 m Schienen im Hauptgleis (614 m je Schienenstrang) neu verlegt werden, ergibt sich daraus eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 63 Jahren, wobei die momentane Schienenliegedauer im Mittel bei 27 Jahren liegt.

Wird eine Berechnung der Liegedauer unter dem Aspekt der Dauerfestigkeit durchgeführt, ergibt sich für das Hauptgleis, unter der Annahme einer täglichen Verkehrsbelastung von 10.000 Gesamtbruttotonnen pro Tag, eine geschätzte mittlere Liegedauer der Schiene von 77 Jahren.

**Graz-Köflach  
Bahnhofsgleis**

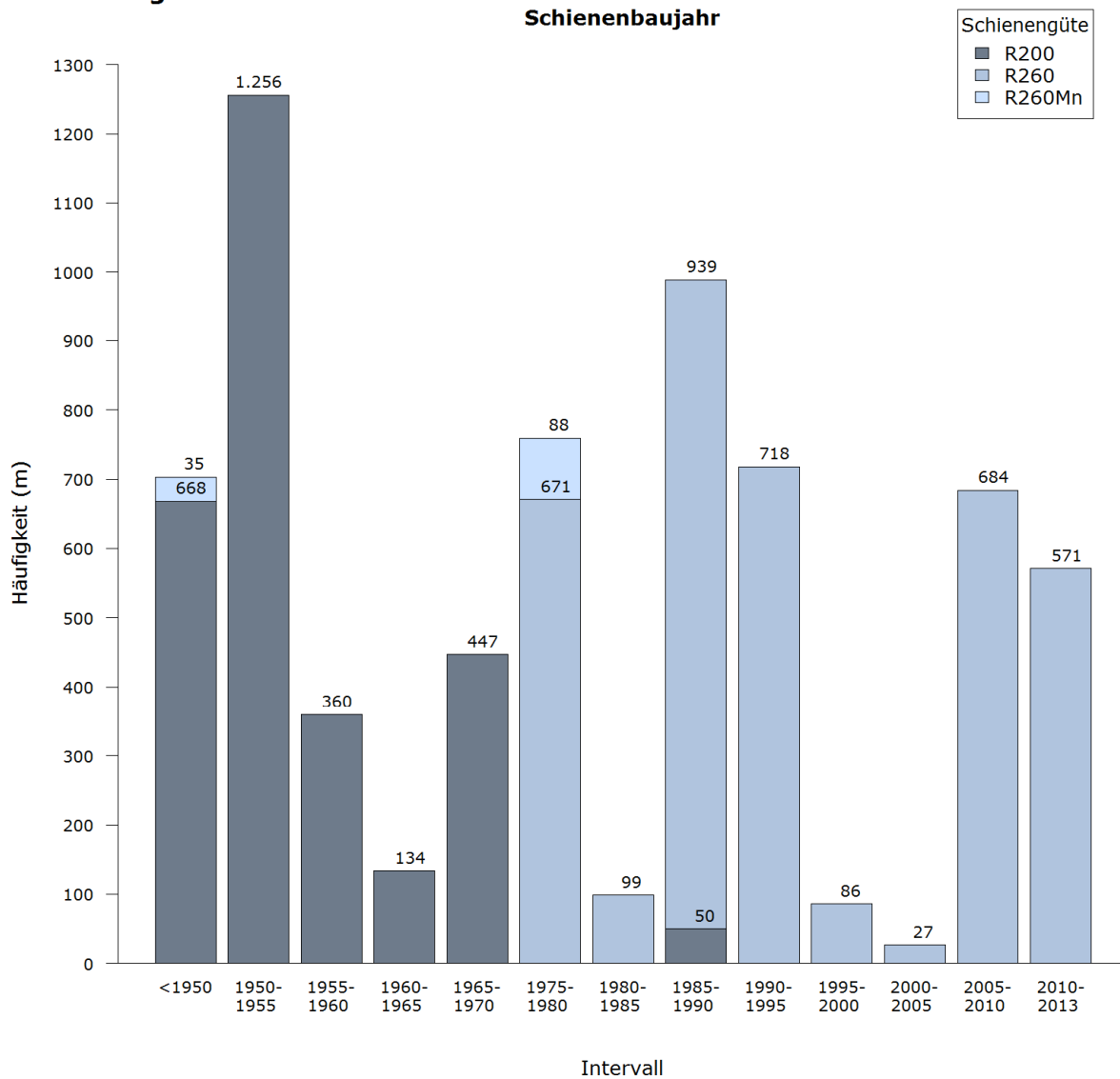


Abbildung 3.5 Einbaujahr Schienengüte Bahnhofsgleis

Die Schienengüte im Bahnhofsgleis weist im Vergleich zum Hauptgleis ein deutlich früheres Verlegejahr auf. Mehr als 50 % dieser Schienen sind älter als 35 Jahre.

Es werden durchschnittlich im Jahr rund 200 m Schienen (97 m je Schienenstrang) im Bahnhofsbereich des Hauptgleises eingebaut, demnach wird die Schiene im Durchschnitt alle 76 Jahre neu verlegt. Die 35 m Schienen der Güte R260Mn, die vor 1950 eingebaut wurden, werden als Datenfehler angesehen, da diese Schienengüte erstmals 1977 verlegt wurde.

### 3.3 Schwelle

Die Schwelle dient in erster Linie als Stützung der Schiene vor Horizontal- und Vertikalkräften, um die Spurweite beizubehalten und um die Funktion der Lastverteilung auf die Bettung zu übernehmen. [7]

#### 3.3.1 Schwellentyp

Die GKB verwendet ausschließlich Gleisschwellen aus Holz und Beton. Auf die Gesamtstrecke bezogen besitzen Betonschwellen einen Anteil von 85 %. Betrachtet man das Streckenband entlang des Hauptgleises (Abbildung 3.6), so erkennt man, dass vereinzelt Holzschwellen im Gleis liegen. Dieser Anteil beläuft sich auf etwa 10 %. Hingegen sind im Bahnhofsgleis über 45 % der Schwellen aus Holz. Die Gleisbereiche mit Holzschwellen werden im Kapitel 4 genauer erläutert.

Im Folgenden wird auf die Eigenschaften der Holzschwelle eingegangen:

Je nach Art und Qualität des Holzes besitzt die Schwelle eine Lebensdauer von 25 bis 45 Jahren und ist in der Anschaffung teuer. Durch ihr relativ geringes Gewicht wird zwar der Einbau einzelner Holzschwellen erleichtert, jedoch weisen die Schwellen dadurch einen bis zu 15 % geringeren Querverschiebewiderstand, im Vergleich zu Betonschwellen, auf. Aufgrund der hohen Elastizität verhalten sie sich bei Längshöhenfehlern günstiger und auch beim Schwellenreiten kommt es zu keinen sichtbaren Schäden der Schwelle. Sie werden vor allem dort eingesetzt, wo Steifigkeitsunterschiede ausgeglichen werden müssen, zum Beispiel als Übergangskonstruktion bei Brückenbauwerken, Eisenbahnkreuzungen usw. Jedoch eignen sie sich nicht bei Hochgeschwindigkeitsstrecken über 160 km/h. Die Kontaktfläche der Holzschwellenunterseite mit dem Schotterbett beträgt 4-5 %, damit verfügt die Holzschwelle über ein besseres Lastabtragungsverhalten als die Betonschwelle. [7]

Hingegen weist die Betonschwelle folgende Vor- und Nachteile auf:

Sie besitzt eine längere Lebensdauer (bis zu 50 Jahre) und ist in der Anschaffung günstiger als die Holzschwelle. Die Wartung der Befestigung kann praktisch vernachlässigt werden. Aufgrund ihres hohen Gewichts verfügt sie über einen höheren Querverschiebewiderstand, jedoch wird dadurch der Einbau erschwert und ist nur mehr mit Hilfe von Maschinen möglich. Betonschwellen weisen eine geringe Elastizität auf und sind beim Schwellenreiten bruchanfällig. Die Kontaktfläche der Betonschwellenunterseite mit dem Schotterbett beträgt 2-9 %, der Anteil verringert sich nach einer Gleisneulage auf 0,5-3 %, weswegen es bei Betonschwellen zu höheren Anfangssetzungen kommt. Diese Setzungen können mit

Hilfe des Dynamischen Gleisstabilisators gedämpft werden und führen zu einer Erhöhung der Kontaktflächen um 40 %. [7]

Bei der Monoblockbetonschwelle kommen bei der GKB verschiedene Arten zum Einsatz:

I BE 14-, 14a- und 14c-Schwelle

I BE 16-Schwelle

I BE 19- und 19a-Schwelle

I L1

Die L1-Schwelle ist eine Spannbetonschwelle und dient laut den Technischen Daten der Firma MABA Track Solution GmbH [8] zur Unterstützung der 49E1-Schienen.

I L2-Schwelle

Die L2-Schwellen können hingegen für 49E1- und 60E1-Schienen verwendet werden. [8]

I L3-Schwelle

Diese Schwellenart dient als Unterstützung der Weichen.

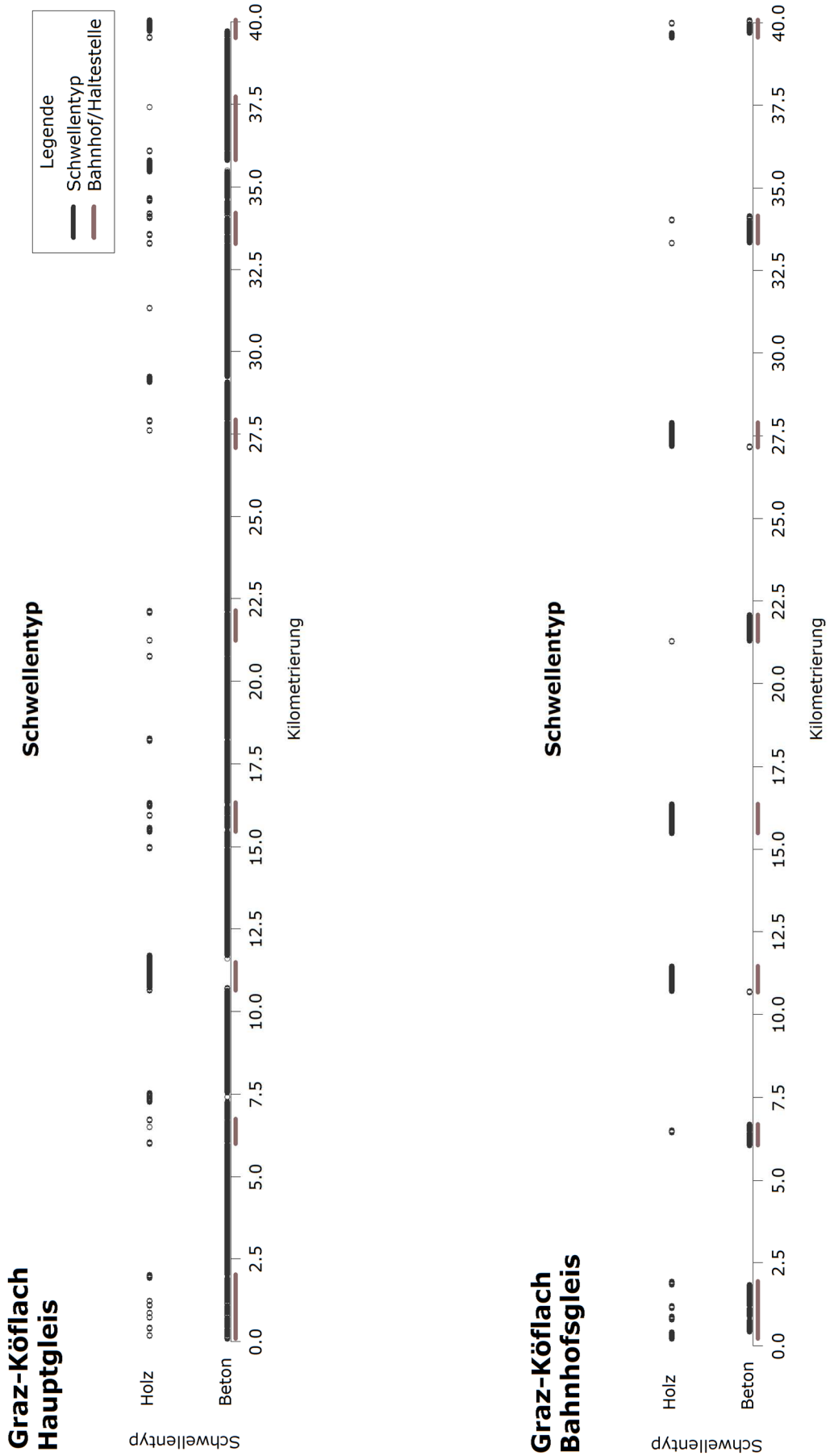


Abbildung 3.6 Schwellentyp im Haupt- und Bahnhofsgleis

In der untenstehenden Abbildung 3.7 ist ein Balkendiagramm mit dem Schwelleneinbaujahr in Abhängigkeit der Schwellenart abgebildet. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass diese Grafik mit den vorhandenen Daten erstellt wurde, wobei knapp ein Drittel der Schwelleneinbaujahre unbekannt ist. Davon sind vor allem ältere Schwellenarten, wie BE 14-, 16-, 19- und Holz-Schwellen betroffen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass seit den 90er Jahren kein größerer Informationsmangel bezüglich des Schwelleneinbaujahres vorliegt, da seit 1995 neue Betonschwellenarten (L1 und L2) zur Anwendung kommen. Die dritthäufigste verwendete Art ist die BE 19a-Schwelle, die zu einem geringen Teil heute noch eingebaut wird. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass seit 2010 vermehrt Schwellen getauscht werden.

**Graz-Köflach  
Hauptgleis**

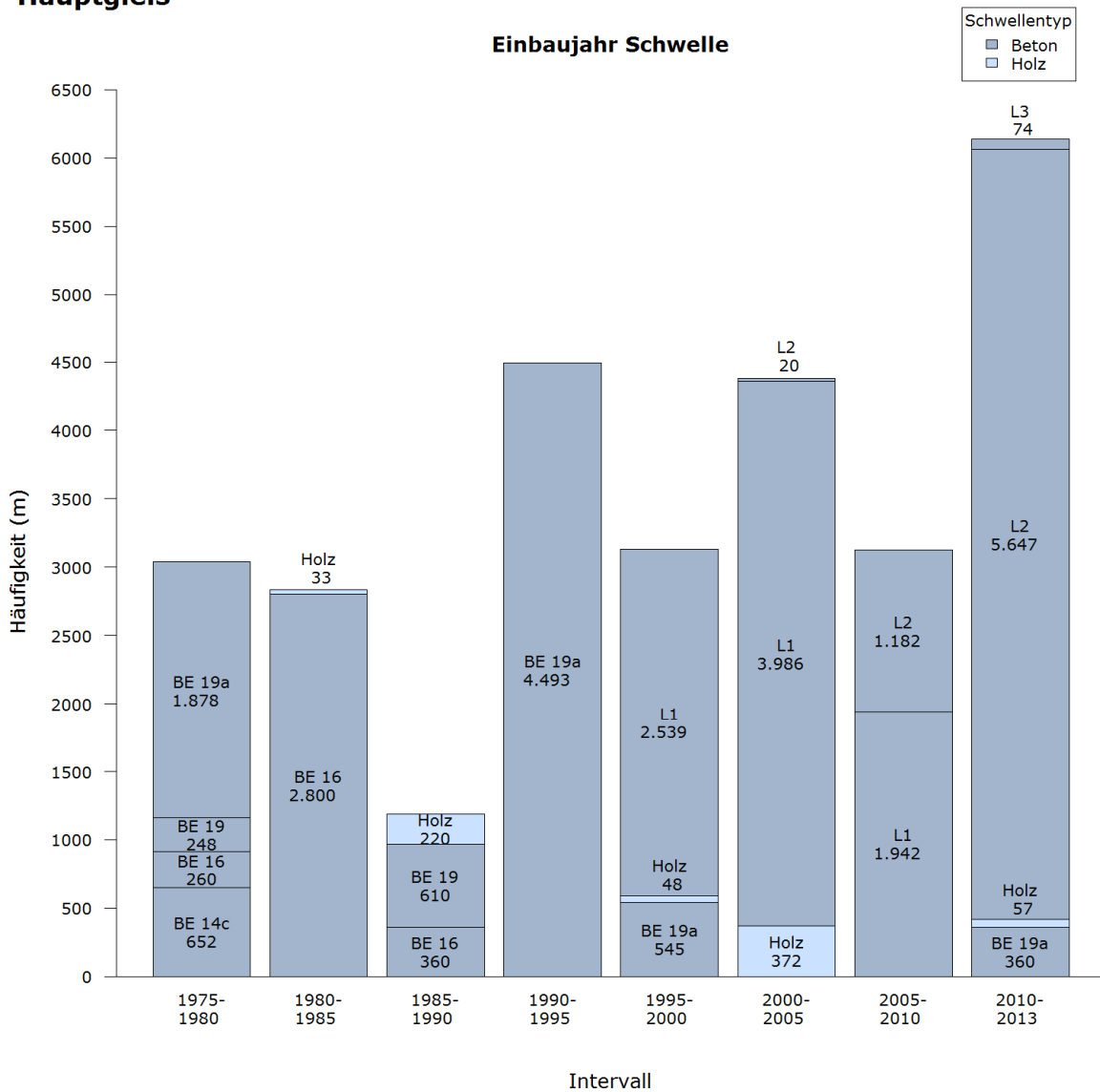


Abbildung 3.7 Schwelleneinbaujahr Hauptgleis

Betrachtet man nur die Schwellenformen, unabhängig vom Einbaujahr, so befinden sich laut Abbildung 3.8 Betonschwellen der Form BE 16, L1, L2 und BE 19a vermehrt im Hauptgleis:

### Graz-Köflach Hauptgleis

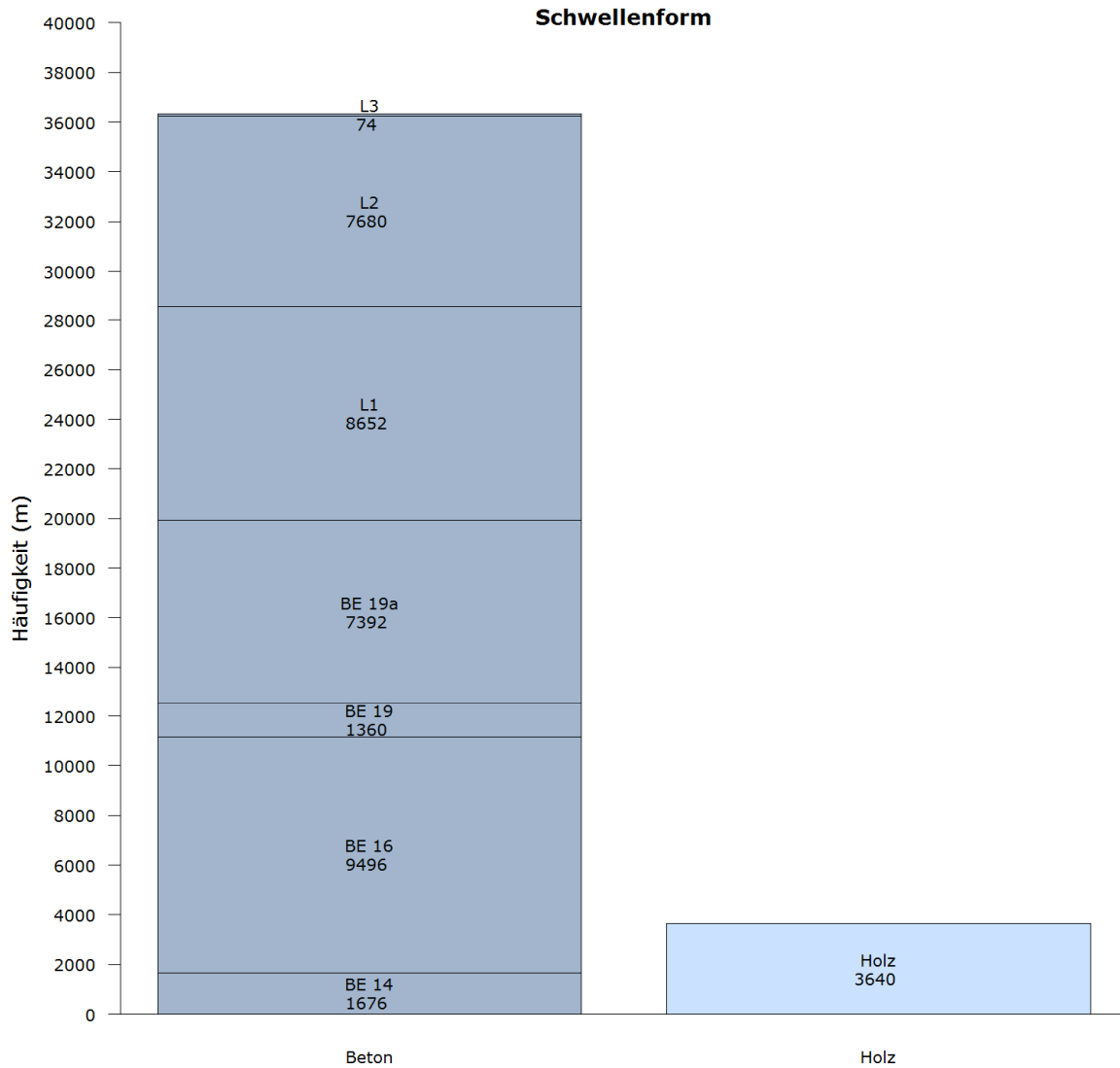


Abbildung 3.8 Schwellenform Hauptgleis

Anmerkung: Die Schwellentypen BE 14, 14a und 14c wurden in dieser Abbildung zu BE 14 zusammengefasst, da sie gleiche Eigenschaften aufweisen.

### 3.4 Schienenbefestigung

*„Die Schienenbefestigung hat die Aufgabe die Spurweite zu halten und auf die Schienen und in diesen wirkenden Kräfte auf die Unterschwellung (Quer-, Längsschwellen, Betonplatten u.a.m.) zu übertragen.“ [7]*

Durch elastische Zwischenlagen auf der Unterseite des Schienenfußes können die auftretenden Lasten gedämpft werden. Unter der Verkehrslast erfolgt in vertikaler Richtung eine Aufwärts- und Abwärtsbewegung der Schiene (Abhebewelle). Um die Schiene vor einer Spurerweiterung zu sichern, müssen die Befestigungselemente die Querkräfte von der Schiene auf die Schwelle kraftschlüssig übertragen. [7]

Je nach Schwellenart werden verschiedene direkte und indirekte Befestigungssysteme im GKB-Netz verwendet:

- Holzschwelle

Die GKB verwendet bei der Holzschwelle den sogenannten K-Oberbau. Dieser besteht aus einer Rippenplatte (RP), einer Zwischenlage, Schwellenschrauben (SS), Klemmplatten (KP), Hakenschrauben (HS) und Federringen (FE). Der K-Oberbau zählt zum indirekten Befestigungssystem. Hierbei wird die Schiene nicht direkt auf der Holzschwelle befestigt.

- Befestigungssystem bei Monoblockbetonschwelle:

Bei den Betonschwellen kommen verschiedene direkte Befestigungssysteme zum Einsatz:

- ┆ Federbügel einfach – Pandrol (FBE P):

Die Pandrol-Befestigung gehört zu den elastischen, direkten Befestigungen auf Betonschwellen und besteht aus einem Mittelteil, einem Federclip, einer Zwischenlage und einem Isolierstück. [7]

Dieses Befestigungssystem wird im GKB-Netz vor allem bei der BE 16-Schwelle verwendet.

- ┆ Vossloh Befestigung:

Dieses Befestigungssystem besteht aus folgenden Komponenten: Spannklemme (SKL), zwei Winkelführungsplatten (WFP) und Schwellenschrauben (SS). Diese Befestigungsform wird als Oberbau W14 bezeichnet und befestigt die Schiene direkt auf der Betonschwelle. [7]



Die Kreisdiagramme (Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10) veranschaulichen die Aufteilung der Befestigungsarten. Da sich auf der Hauptstrecke zum größten Teil Betonschwellen befinden, werden vor allem Spannklemmen- und Pandrol-Befestigungen bei der GKB eingesetzt. Rippenplatten-Befestigungen auf Betonschwellen werden vernachlässigt, da nur eine geringe Anzahl im Gleis zu finden ist und sich diese Befestigungsart mit 10 % hauptsächlich auf Holzschwellen bezieht. Aufgrund der vermehrten Holzschwellen im Bahnhofsbereich ergibt sich eine andere Verteilung der Befestigungsarten. Dabei fallen etwa 46 % auf Holzschwellen mit Rippenplatten-Befestigung und über 40 %, beziehungsweise 13 % auf Befestigungssysteme für Betonschwellen.

### Graz-Köflach Hauptgleis

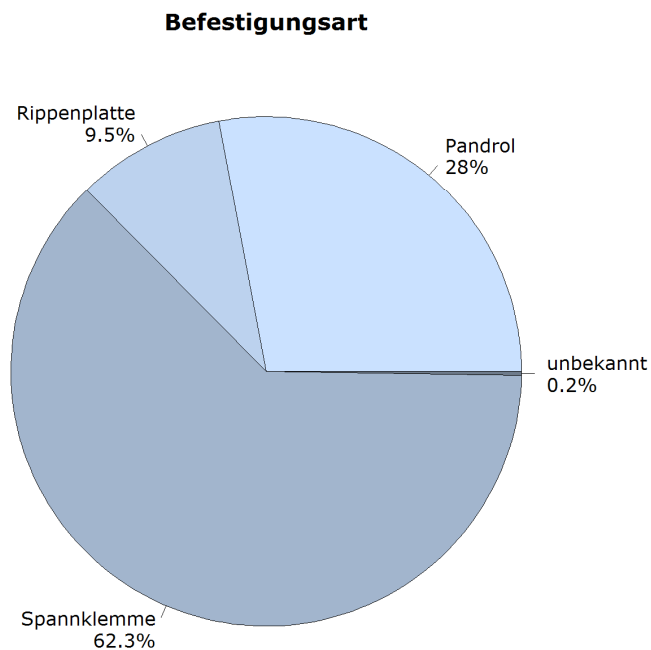


Abbildung 3.9 Befestigungsart Hauptgleis

## Graz-Köflach Bahnhofsgleis

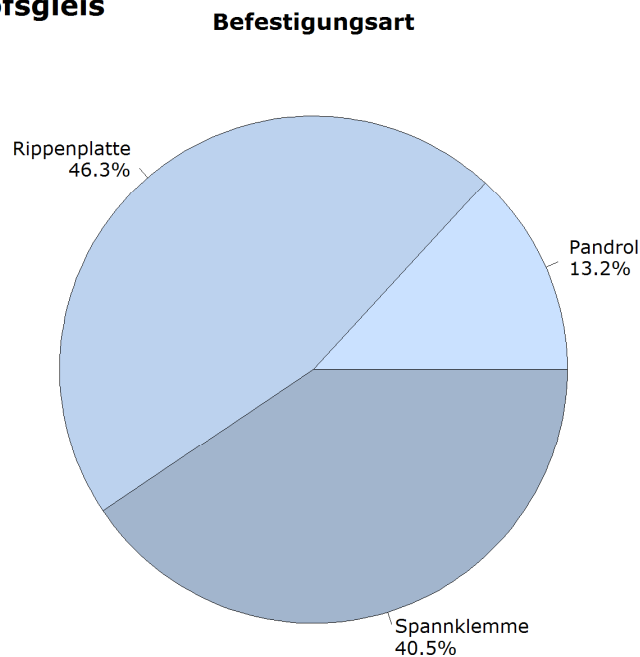


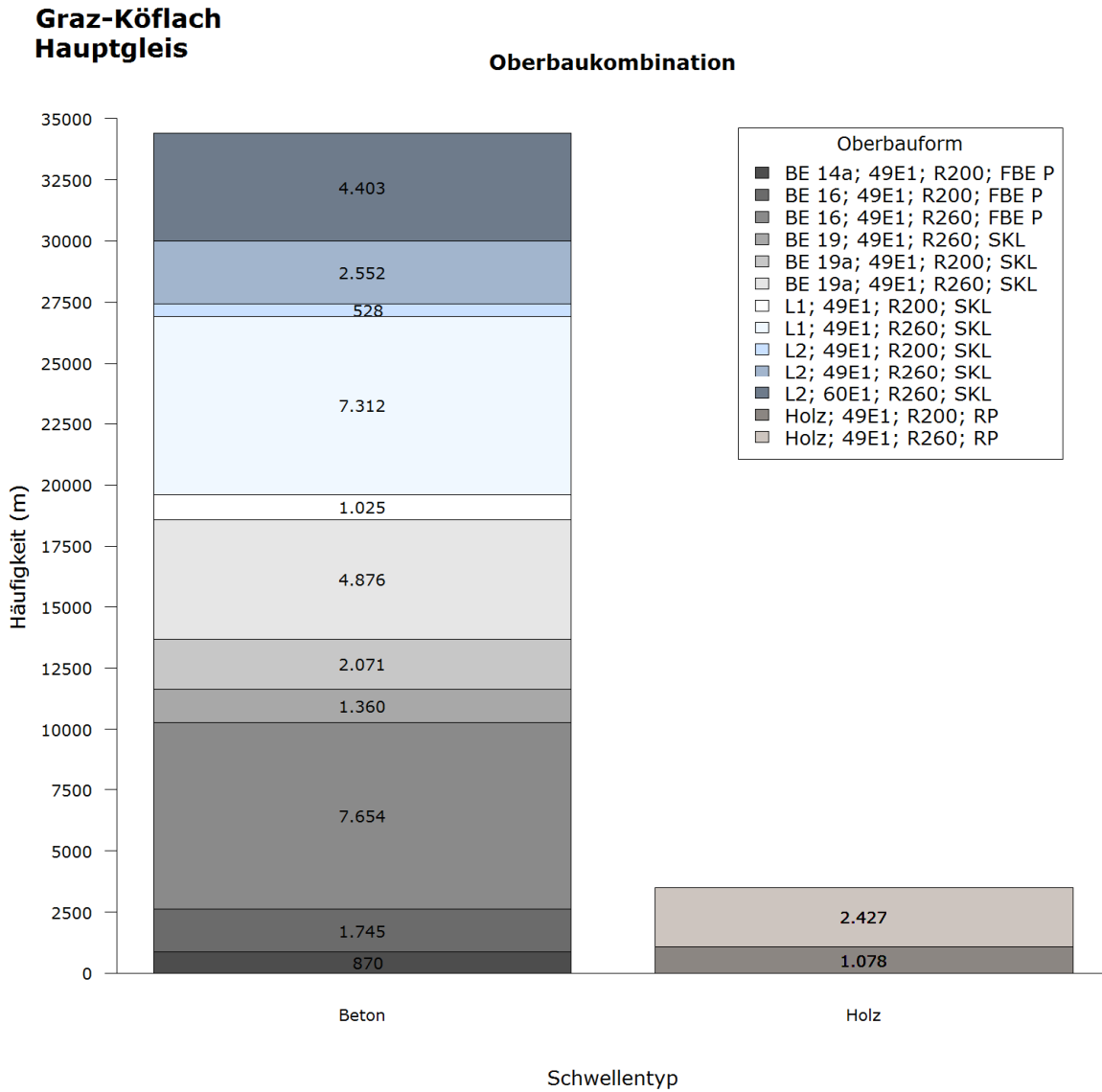
Abbildung 3.10 Befestigungsart Bahnhofsgleis

### 3.5 Oberbauform

Um eine Gliederung der Oberbauform vornehmen zu können, werden Informationen, wie Schwellenart, Schienenprofil, Schienengüte und Befestigungsart, betrachtet.

In der Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12 sind die verschiedenen Oberbaukombinationen im Hauptgleis bzw. Bahnhofsgleis grafisch dargestellt. Hierbei werden nur Oberbaukombinationen mit einer Häufigkeit größer 500 m und/oder mit vollständigen Informationen berücksichtigt, das heißt aufgrund einer fehlenden Eigenschaft, wie beispielsweise der Schienengüte, wird diese Oberbaukombination in der weiteren Betrachtung vernachlässigt. Mit Hilfe dieser Randbedingungen können die häufigsten Oberbauformen ermittelt werden. Wie bereits die grafischen Auswertungen im vorherigen Kapitel 3.3.1 Schwellentyp ergeben haben, ist die Oberbaukombination mit den BE 16-Schwellen am häufigsten anzutreffen. Dabei wird vor allem die Schienengüte R260 mit dem Befestigungssystem Pandrol verwendet. Weitere häufige Formen sind L1-, BE 19a- und L2-Schwellen, ebenfalls mit R260-Schienen und Spannklemmensystem, wobei auf L2-Schwellen sowohl 49E1- als auch 60E1-Schienen befestigt werden.

Aufgrund der geringen Menge an R260Mn wird diese Güte nicht in den Oberbaukombinationen berücksichtigt, jedoch wird R260Mn zu drei Viertel auf Betonschwellen, vor allem auf BE 14c mit Pandrol, beziehungsweise L1-Schwellen mittels Spannklemmen, montiert.

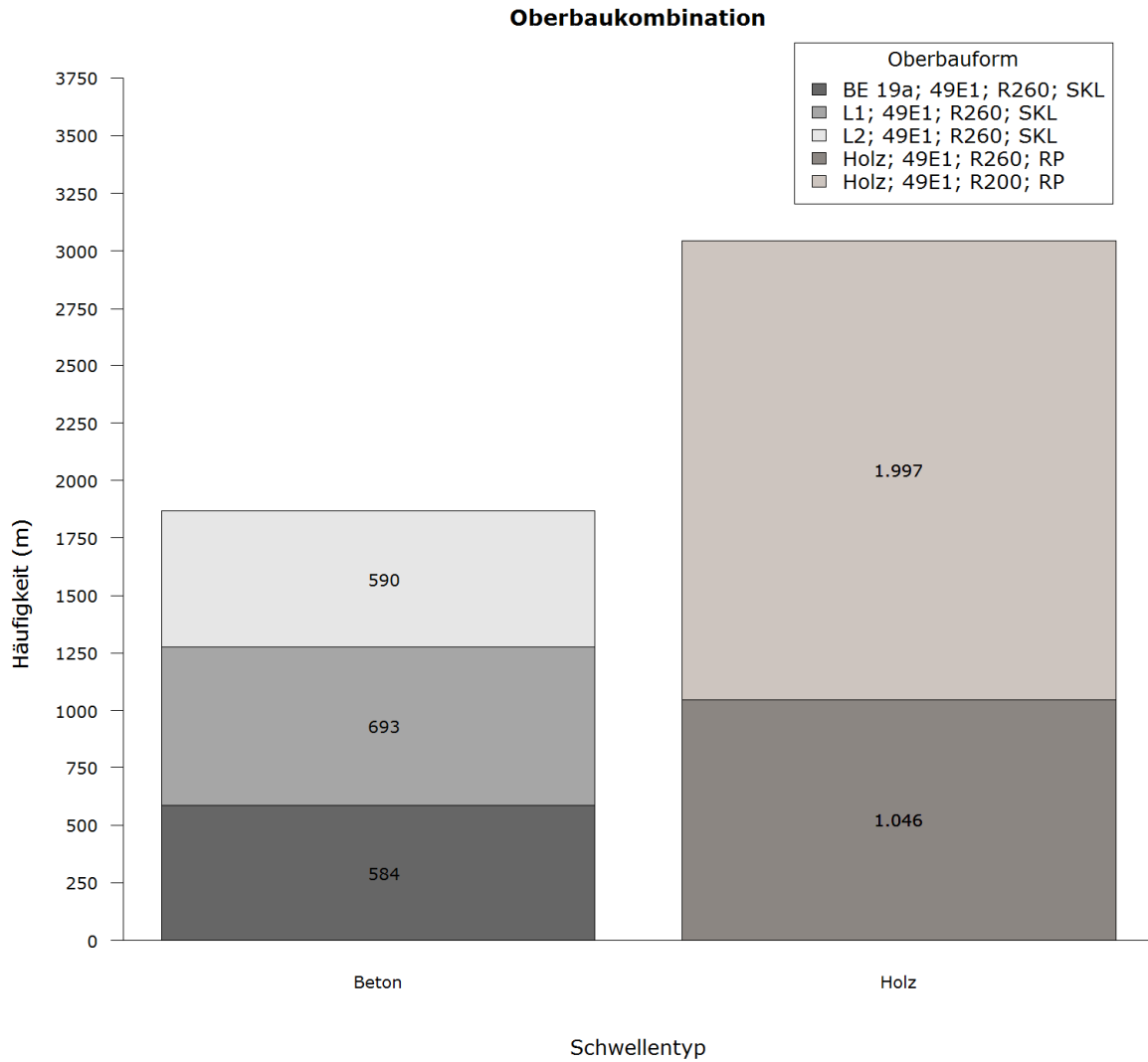


Anmerkung: Oberbaukombinationen mit einer Häufigkeit <500m werden nicht berücksichtigt!

Abbildung 3.11 Oberbauform Hauptgleis

Im Bahnhofsbereich wird hauptsächlich der K-Oberbau (Holzschwellen), jeweils mit der Schienengüte R200 und R260, verwendet. Betonschwellen mit Spannklemmenbefestigungen werden alternativ eingebaut.

**Graz-Köflach  
Bahnhofsgleis**



Anmerkung: Oberbaukombinationen mit einer Häufigkeit <500m werden nicht berücksichtigt!

Abbildung 3.12 Oberbauform Bahnhofsgleis

## 4 Trassierungsinformation

Im Bogenverzeichnis der GKB befinden sich folgende Trassierungsinformationen, die für die spätere Auswertung benötigt werden:

- Kilometrierung
- Trassierungselement
- Links- und Rechtsbogen
- Radius
- Krümmung
- Überhöhung

Die Kilometrierung bezieht sich in diesem Fall auf das Hauptgleis, jedoch geht man davon aus, dass das zusätzliche Gleis im Bahnhofsbereich die gleichen Eigenschaften aufweist.

Nachdem die Trassierungselemente überprüft und auf eine einheitlich definierte Form, wie bei der Oberbaudatei, gebracht wurden, kann das Bogenverzeichnis der Strecke in „R-Project“ eingelesen, die Kilometrierung auf 1-Meter-Abstände bearbeitet und mit der Datei der Oberbaustoffe kombiniert werden. Durch das Zusammenfügen dieser Informationen kann eine Auswertung des Oberbaus hinsichtlich der Trassierung vorgenommen werden.

Folgende Elemente werden bei der Trassierung benötigt:

### I Bogen

Der Bogen wird durch den Radius (R) in Meter angegeben und weist eine Krümmung ( $1/R$ ) sowie eine Überhöhung ungleich Null auf. [7]

In dieser Arbeit werden die Radien in vier Radienklassen gegliedert:  $R < 250\text{m}$ ,  $250\text{m} < R < 400\text{m}$ ,  $400\text{m} < R < 600\text{m}$  und  $R > 600\text{m}$ .

Dabei kommt es auch zu einer Unterscheidung zwischen Links- und Rechtsbogen, wobei der Linksbogen mit negativem Vorzeichen und der Rechtsbogen mit positivem Vorzeichen definiert ist.

### I Gerade

Die Gerade weist weder Überhöhung noch Krümmung auf, da der Radius unendlich groß ist. [7]

### I Übergangsbogen

Dieses Trassierungselement wird zwischen Gerade und Bogen angewandt. Für die Konstruktion eines Übergangsbogens wird die Klothoide verwendet, da sie über eine linear

ansteigende Krümmung verfügt. Wird der Übergangsbogen zwischen Gerade und Bogen nicht eingebaut, so erfährt das Fahrzeug durch den plötzlichen Krümmungsanstieg eine Änderung der Seitenbeschleunigung, der auch als Ruck bezeichnet wird und sich auf den Fahrkomfort der Passagiere auswirkt. [7]

Auf der Hauptstrecke Graz-Köflach ist das am häufigsten verwendete Trassierungselement die Gerade mit über 65 %, mit 20 % der Bogen und mit 14 % der Übergangsbogen. Der Bogen kann ebenso in Links- und Rechtsbogen gegliedert werden. Die Auswertung ergibt, dass die Strecke 9 % Linksbögen und 11 % Rechtsbögen aufweist.

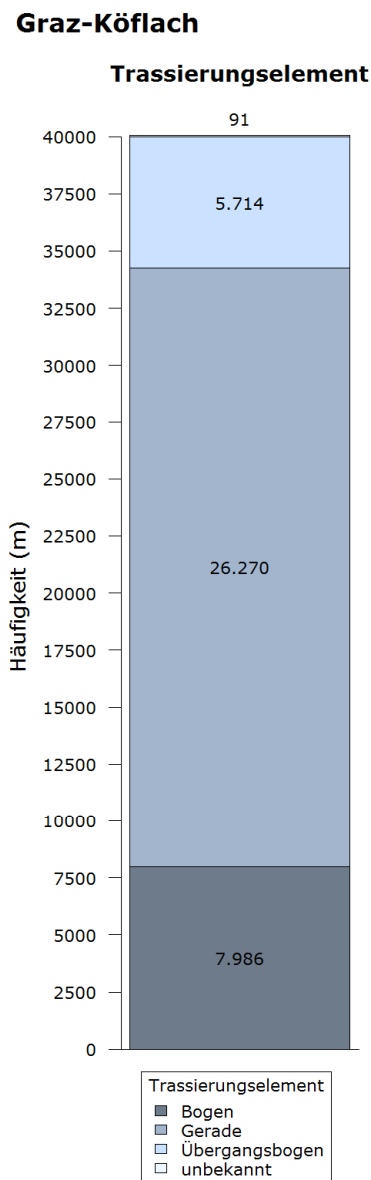


Abbildung 4.1 Trassierungselement

Nachstehend ist das Streckenband mit den Trassierungselementen abgebildet und soll einen Überblick über die Strecke verschaffen.

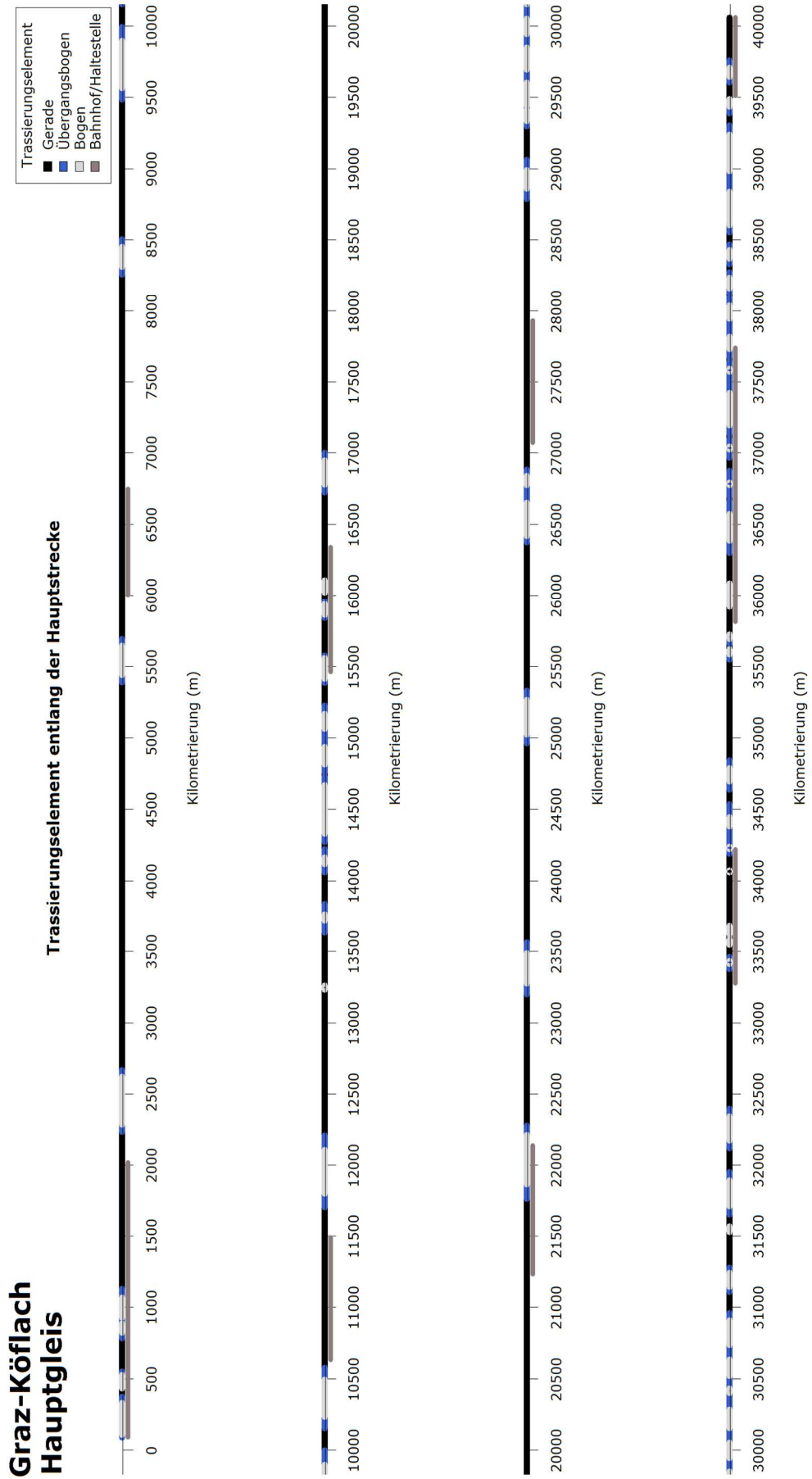


Abbildung 4.2 Streckenband mit Trassierungselementen

Wird eine Gliederung der Trasse in Radienklassen vorgenommen (siehe Abbildung 4.3), so ist ersichtlich, dass die eingebauten Radien, bezogen auf die Radienklassen  $R < 250\text{m}$  bis  $400\text{m} < R < 600\text{m}$ , sehr ausgeglichen sind, wobei die Radien größer  $600\text{m}$  deutlich häufiger vorkommen, da das Element Gerade in diese Radienklasse einbezogen wird.

In dieser und auch in den weiteren Abbildungen werden Übergangsbögen vernachlässigt, da der Übergangsbogen aufgrund der stetigen Krümmungsänderung und somit der Radienänderung nicht auf die verschiedenen Klassen aufgeteilt werden kann. Aufgrund dieser Problematik wird der Übergangsbogen in den Darstellungen nicht berücksichtigt.

### Graz-Köflach

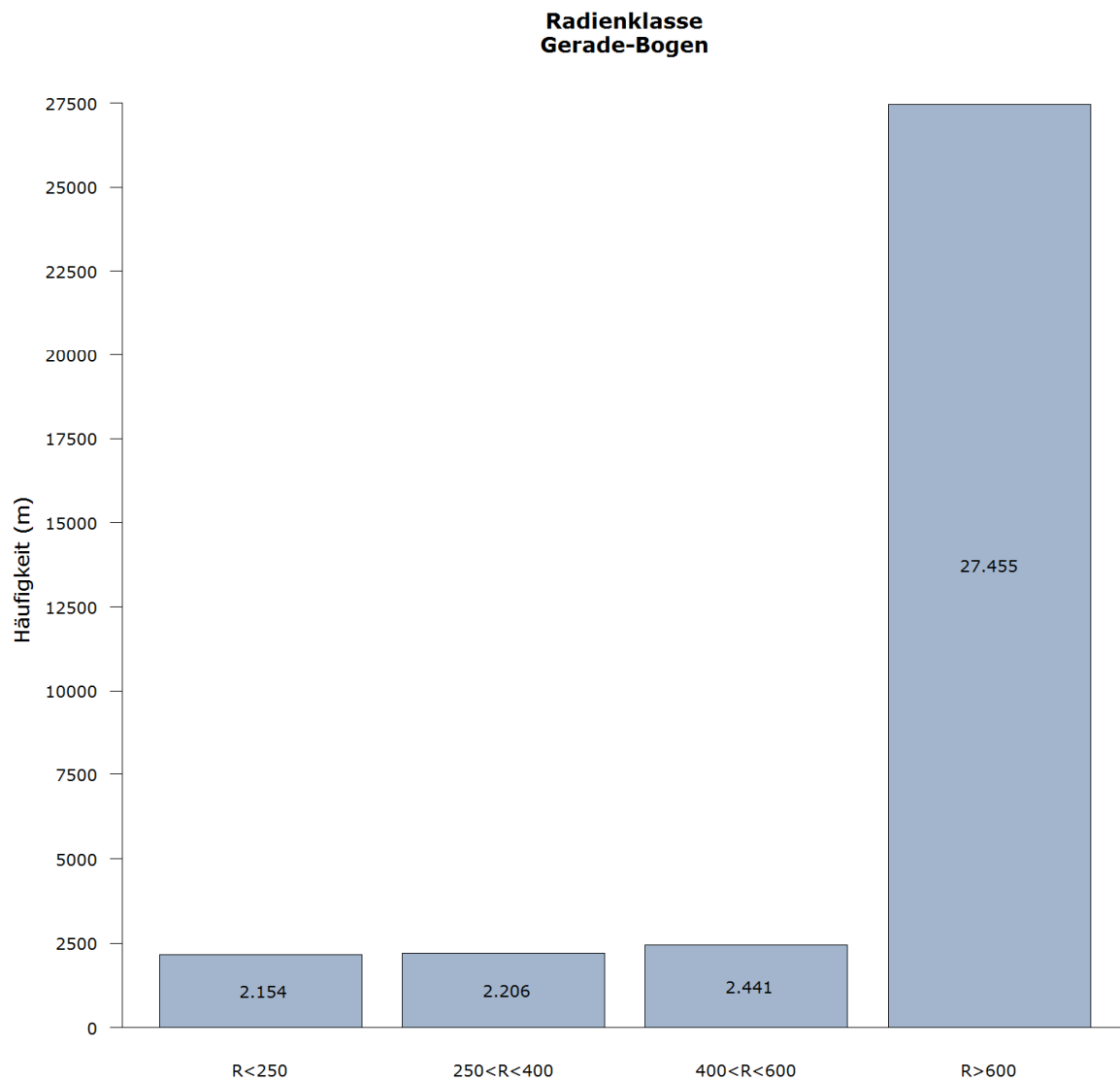


Abbildung 4.3 Radienklasse



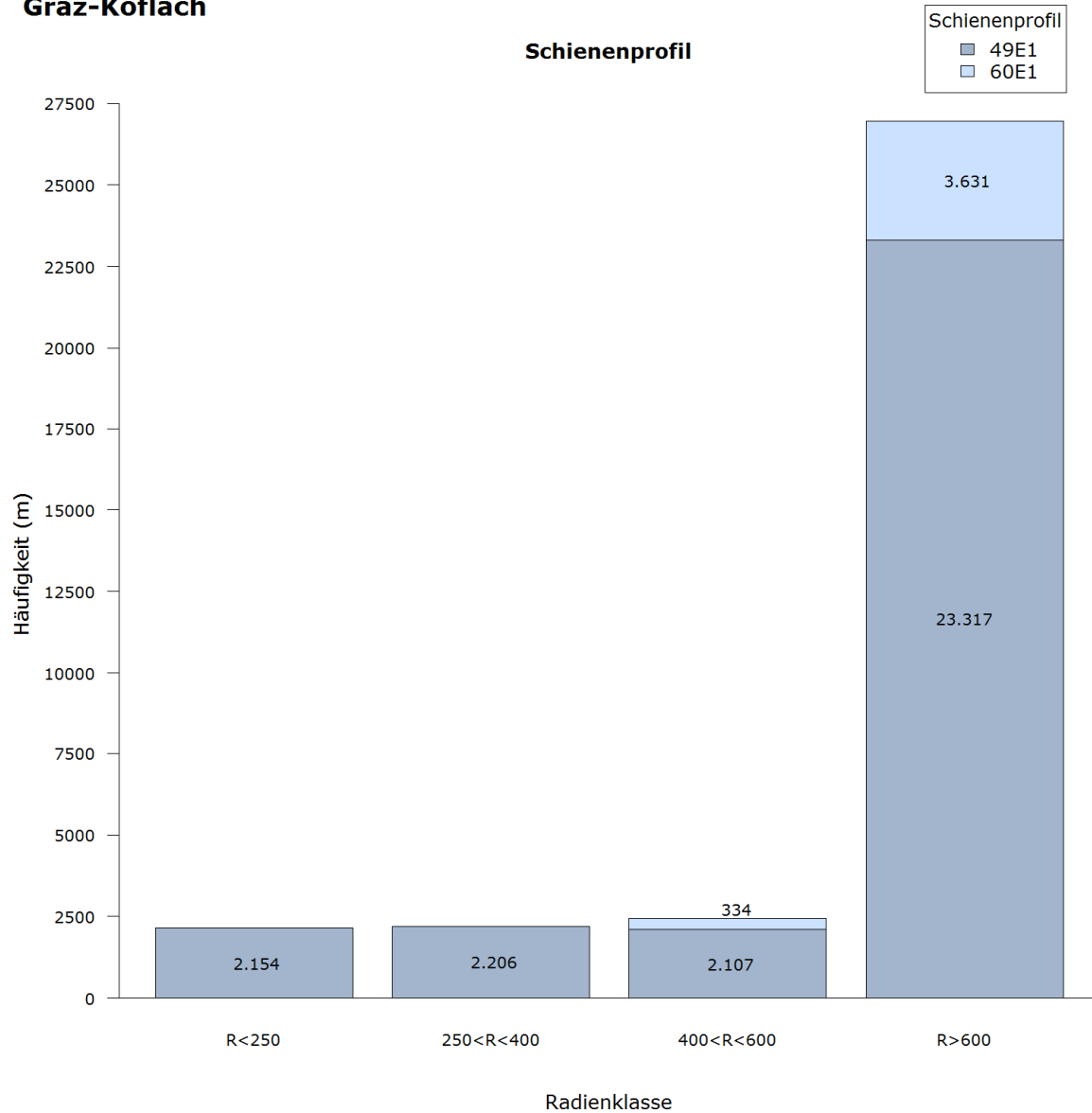
**Graz-Köflach**

Abbildung 4.4 Radienklasse Schienenprofil

Wie bereits im Kapitel 3.2 erwähnt wurde, kommt es in engen Bögen an der Außenschiene zum seitlichen Schienenverschleiß. Laut ÖBB Vorschrift B 50 – Teil 1 [6] können dort die kostengünstigen leichteren Schienen, wie 54E2 oder 49E1, eingebaut werden.

Bei der GKB wird das Schienenprofil 60E1 erst ab einem Radius von 570 m eingesetzt. Auf allen weiteren Radien sowie auf der geraden Strecke dominiert die Schienenform 49E1.

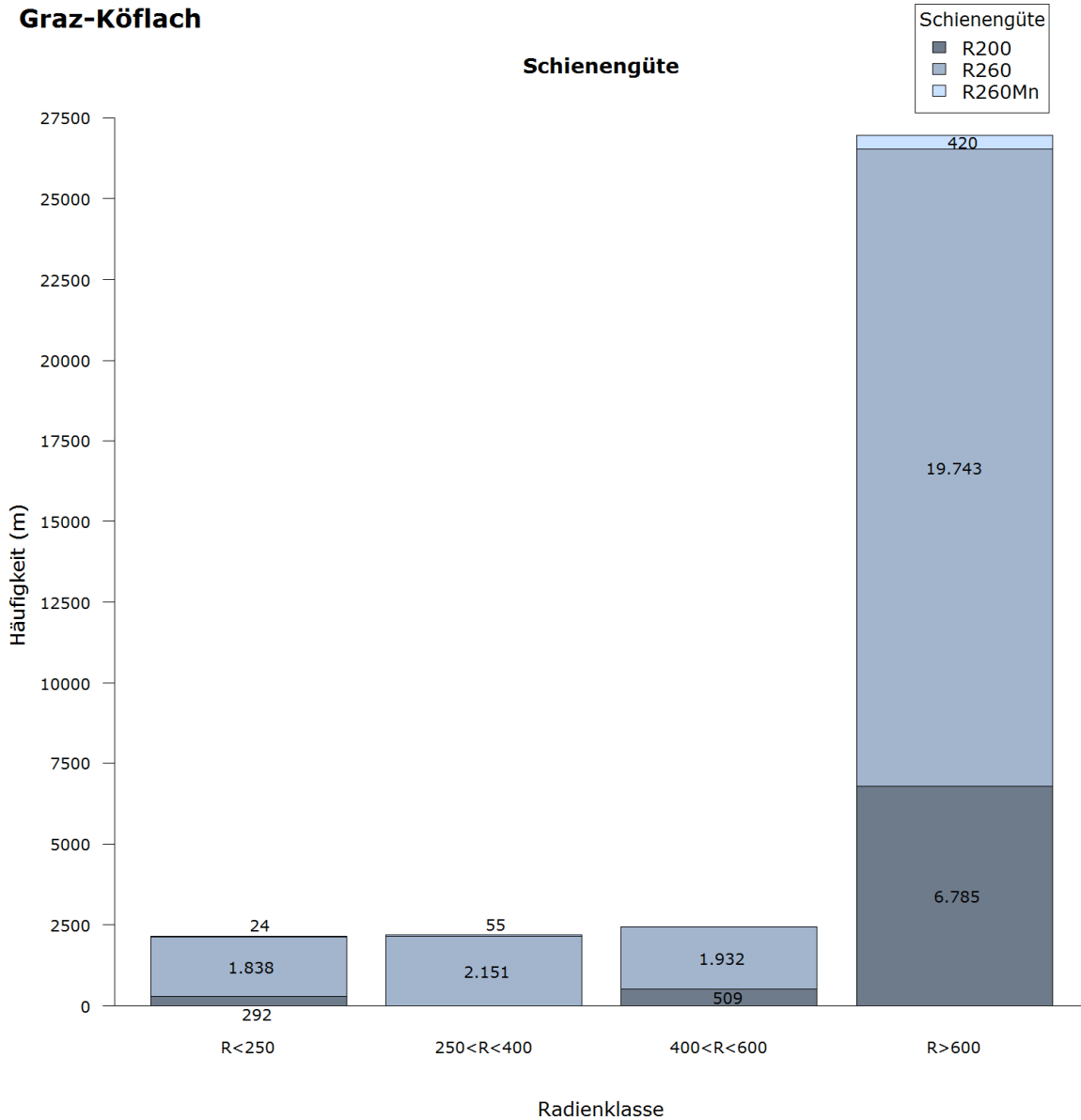


Abbildung 4.5 Radienklasse Schienengüte

In der oberen Abbildung wird die Schienengüte in Radienklassen dargestellt. Auffällig ist hierbei die vermehrte Güte R200 in der Radiengruppe größer 600 m. Vergleicht man jedoch die Abbildung 4.5 mit dem nachstehenden Boxplot, Abbildung 4.6, erkennt man, dass diese Güte im Bogenbereich sowie in der Geraden vor den 80er Jahren eingebaut worden ist und vor allem im Trassierungselement Bogen bedeutend älter ist als die Standardgüte R260. Ebenso wird die Schienengüte R200 zu einem Drittel im Bahnhofsbereich verwendet, dabei handelt es sich um alte Schienen, die vor den 80er Jahren eingebauten wurden (vergleiche Abbildung 4.6).

In der Radiengruppe  $R > 600\text{m}$  befinden sich über 80 % der R260Mn-Schienen auf der Geraden. Vor beziehungsweise im Bahnhof Lieboch wurde zuerst mit einem Radius von 800 m

und anschließend mit einem Radius von 220 m trassiert. Die restlichen 55 m der Radiengruppe  $250\text{m} < R < 400\text{m}$  werden mit einem Radius von 300 m vor dem Bahnhof Köflach verwendet. Aufgrund der verstreuten R260Mn-Schienen, auf der geraden Strecke, lässt sich kein Zusammenhang erkennen.

### Graz-Köflach

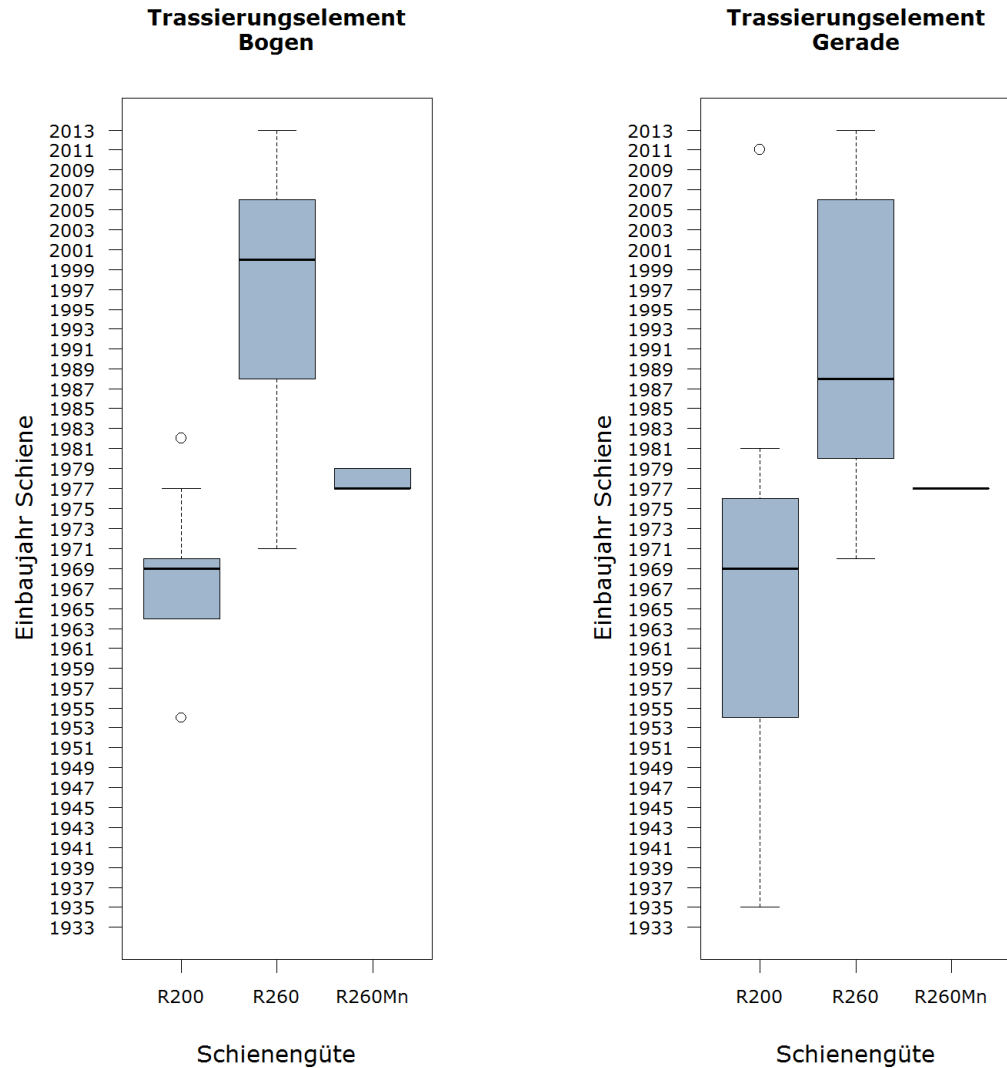


Abbildung 4.6 Boxplot Schienengüte

Mit Hilfe der obenstehenden Boxplot-Darstellung soll ein rascher Überblick gegeben werden, in welchen Zeiträumen die einzelnen Schienengüten eingebaut wurden. Nach dem Einbau der Güte R200 wurde die Güte R260Mn in den Jahren 1977 bis 1979 und danach fast ausschließlich die Standardgüte verwendet. Des Weiteren erkennt man, dass die Schiene im Bogen jünger ist, da sie aufgrund des höheren Verschleißes öfters getauscht werden muss, als es in der Geraden der Fall ist.

## Graz-Köflach

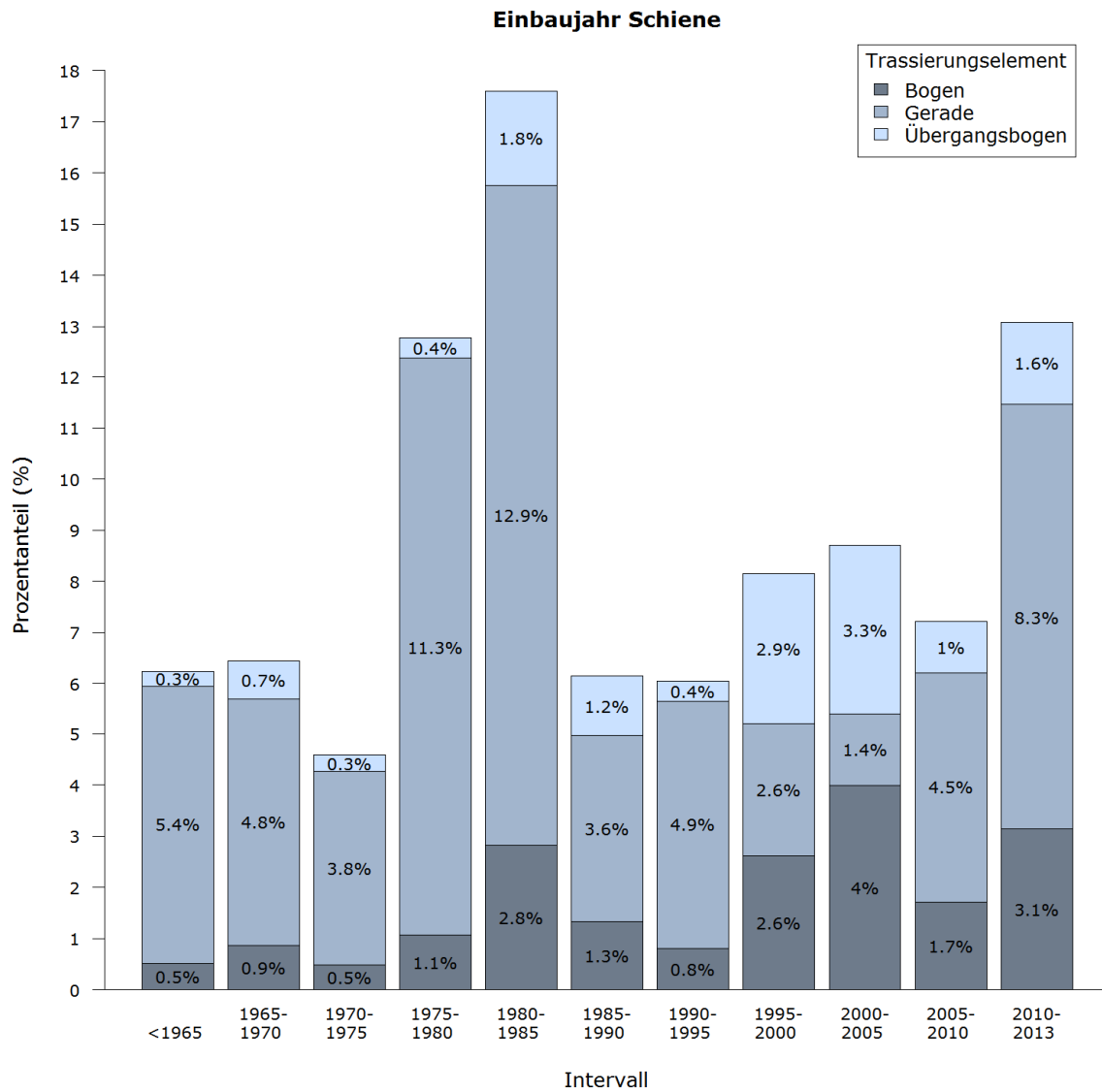


Abbildung 4.7 Schieneneinbaujahr - Trassierungselement

In der Abbildung 4.7 ist der Prozentanteil des Schienenbaujahres, bezogen auf die Hauptgleislänge, dargestellt. Das Balkendiagramm ist außerdem in Trassierungselemente gegliedert. Es zeigt, dass in den Jahren 1980 bis 1985 intensiv Schienen getauscht wurden. Seitdem ist jedoch der Einbau neuer Schienen um mehr als die Hälfte zurückgegangen. Seit dem Jahr 2010 werden wieder vermehrt Schienen getauscht, da im Hauptnetz noch Schienen aus den 40er und 50er Jahren zu finden sind.

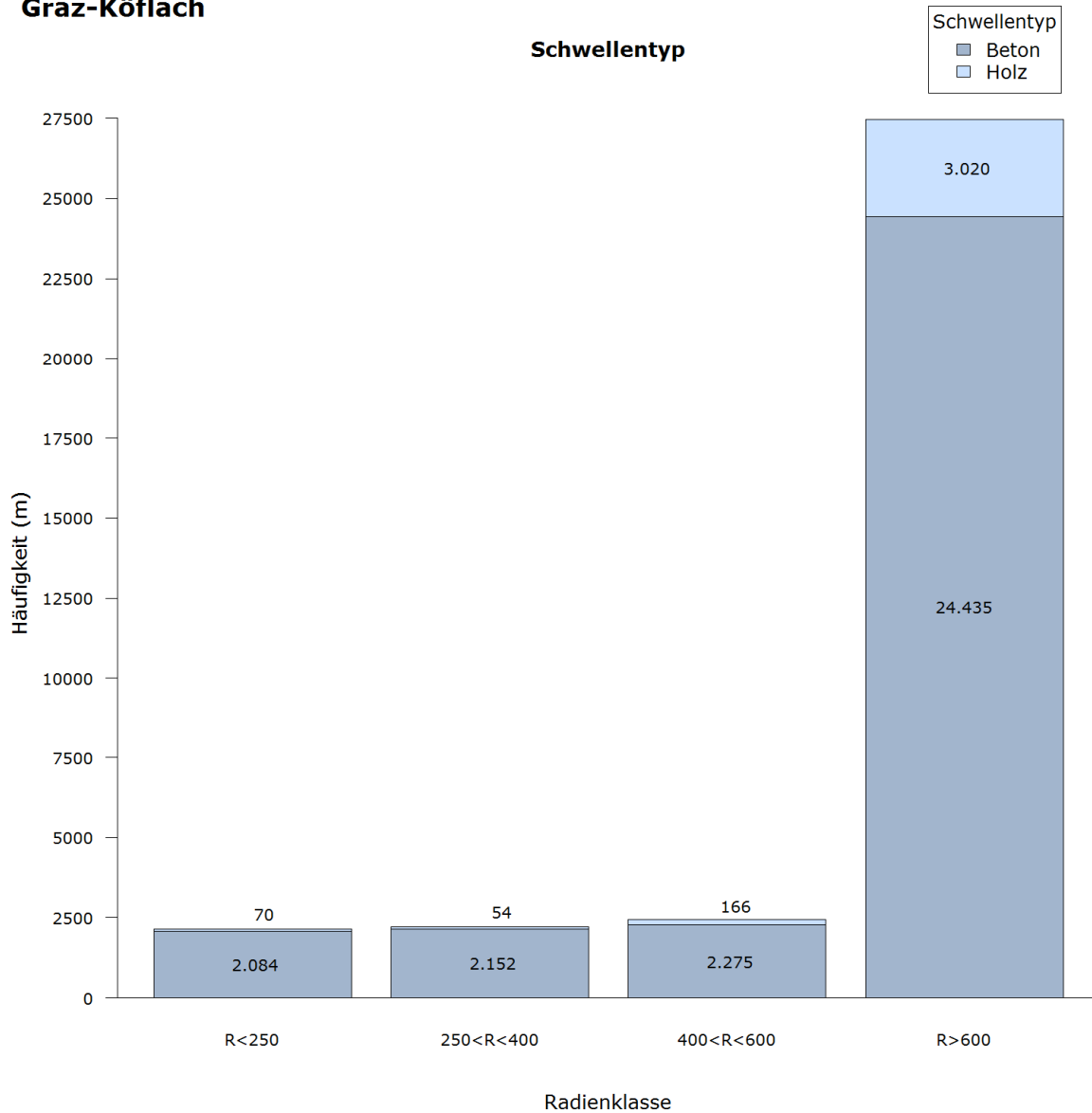
**Graz-Köflach**

Abbildung 4.8 Radienklasse Schwellentyp

Die vorliegende Grafik gibt Auskunft über die Verteilung der Schwellentypen auf die jeweiligen Radiengruppen. Dabei lässt sich erkennen, dass Betonschwellen bei Radien kleiner 250 m eingesetzt werden, jedoch laut ÖBB Vorschrift B 50 – Teil 1 [6] nicht eingebaut werden dürfen, da keine Schienenstöße vorhanden sein dürfen. Diese Ausnahmen wurden mittels Einzelgenehmigungen erteilt. [6]

Betrachtet man die Daten der GKB, geht hervor, dass zirka ein Viertel der Betonschwellen mit einem Radius kleiner 250 m in den Bahnhöfen Graz Köflacherbahnhof, Lieboch und Köflach und die restlichen 75 % auf freier Strecke zu finden sind. Auf freier Strecke handelt es sich zum größten Teil um Bereiche vor und nach Bahnhöfen. Unterteilt man die Radien dieser Klasse auf die Schwellenarten, so fallen rund 60 % auf die L2-Schwelle.

Der Anteil der Holzschwellen bei Radien kleiner 600 m fällt sehr gering aus, was zum einen daran liegen könnte, dass bei extremen Belastungen, wie enge Radien, Betonschwellen mit verstärkter Spannklemme eingesetzt werden können. [6] Ab einem Radius von 550 m verwendet die GKB neben der Spannklemmenbefestigung auch Pandrol-Befestigungen auf Betonschwellen.

Etwa 8 % der Holzschwellen werden bei der Radienklasse  $R > 600\text{m}$  verwendet, dabei kommt die Holzschwelle fast ausschließlich in der Geraden zum Einsatz. Gründe dafür sind, dass Holzschwellen in lärmsensiblen Gebieten anstelle der Betonschwellen eingebaut werden, beziehungsweise bei Eisenbahnkreuzungen, Weichen und Brücken zur Anwendung kommen können [6]. Eine Auswertung diesbezüglich ergibt, dass 94 % aller Weichen im Hauptgleis mit Holzschwellen und nur knapp 6 % mit Betonschwellen des Typs L3 ausgeführt sind. Weiters ergibt eine Stichprobe, dass bei den Eisenbahnkreuzungen alte Betonschwellen, anstelle von Holzschwellen, verwendet werden.

Eine Auswertung der Brückendaten führt zu dem Ergebnis, dass 1.260 m Holzschwellen auf freier Strecke (ohne Weichenbereiche) verwendet werden. Davon kommen rund 45 % auf Brücken zum Einsatz, die restlichen Holzschwellen werden als Übergangskonstruktion verwendet.

**Graz-Köflach**

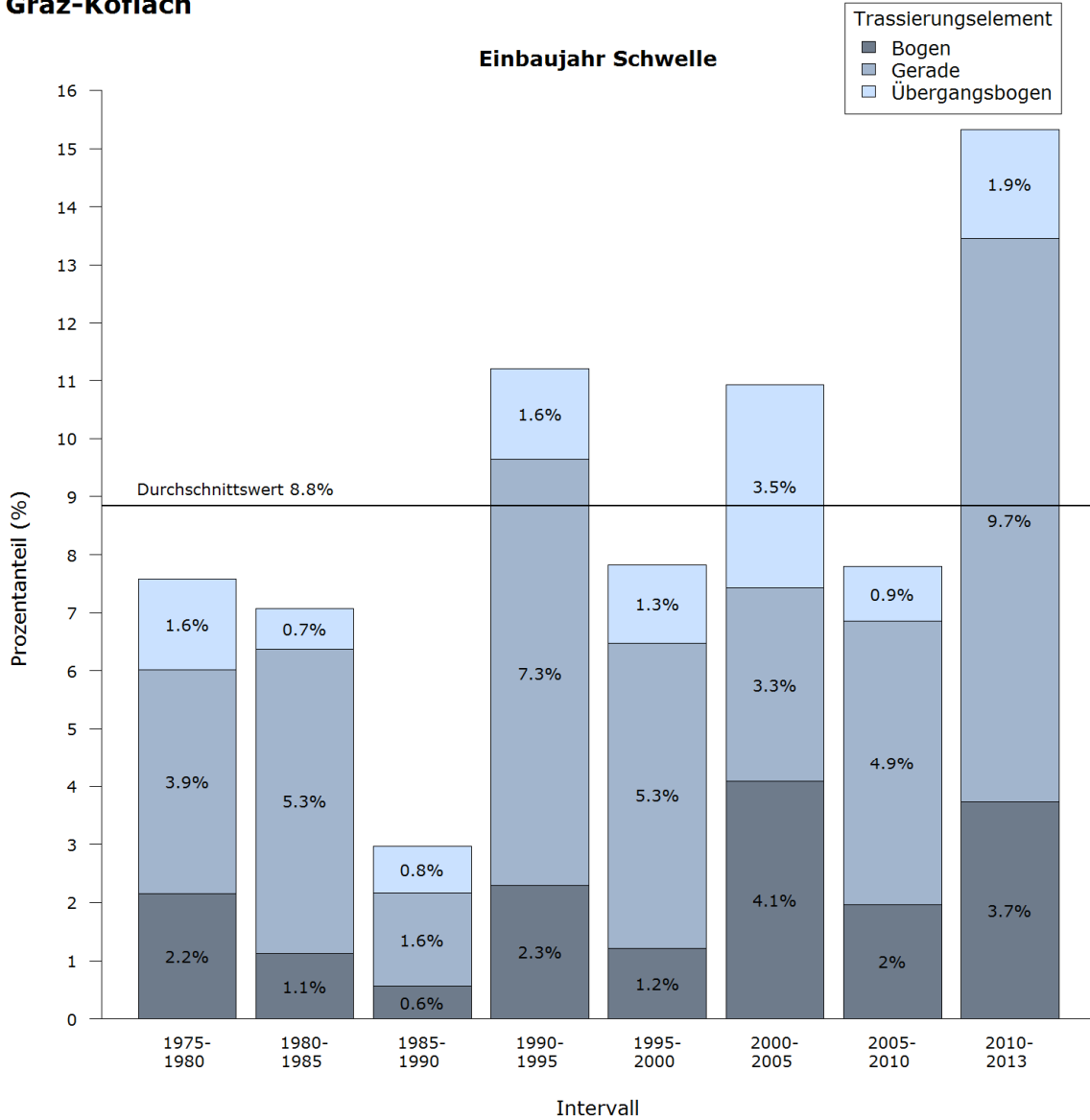


Abbildung 4.9 Schwelleneinbaujahr - Trassierungselement

Abbildung 4.9 zeigt den Prozentanteil der Schwellenerneuerung bezogen auf die Hauptgleislänge inklusive Gliederung in Trassierungselemente. Seit den 90er Jahren werden immer häufiger Schwellen getauscht. Die durchschnittliche Schwellenerneuerung ist in den letzten Jahren von knapp 9 % auf 15 % gestiegen und zugleich wurde die höchste Erneuerungsrate auf dem Hauptgleis verzeichnet.

## Graz-Köflach

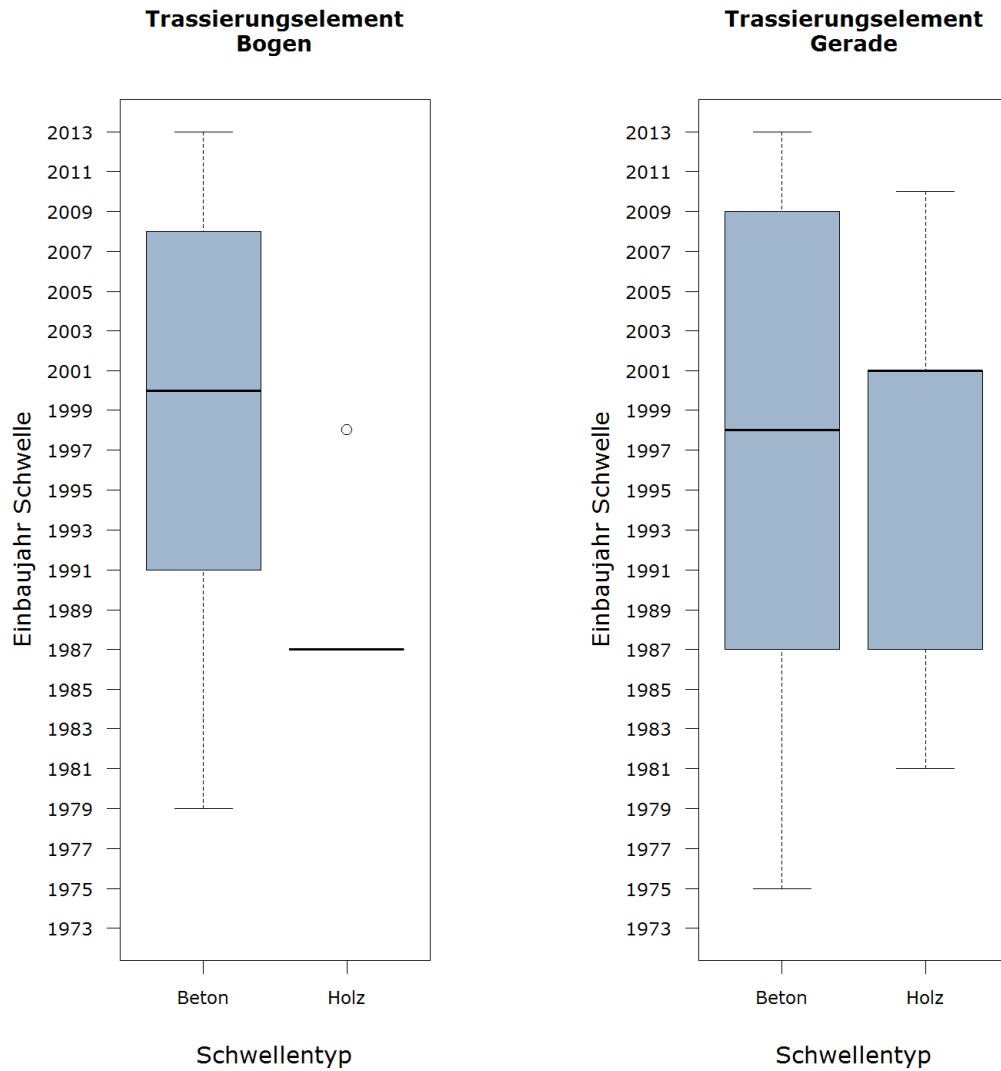


Abbildung 4.10 Boxplot Schwellentyp

Im Bogenbereich wurde die Hälfte der Betonschwellen zwischen 1979 und 2000 eingebaut. Das Einbaujahr der Holzschwellen ist bei dieser Darstellung nicht repräsentativ, da im Bogen nur 16 % der Daten vorhanden sind.

Werden in der zweiten Abbildung die Mediane betrachtet, so fällt auf, dass Holzschwellen ein jüngeres Einbaujahr besitzen als Betonschwellen. Jedoch muss auch an dieser Stelle vermerkt werden, dass ein Drittel der Schwelleneinbaujahre unbekannt sind und höchstwahrscheinlich ein älteres Einbaujahr aufweisen.



#### 4.1 Charakteristik der Holzschwelle im Streckenbereich Graz-Köflach

Für die Holzschwellen werden folgende Dateninformationen zusammengefasst:

- Holzschwellen befinden sich vorwiegend im Bahnhofsbereich
- Sie dienen größtenteils als Weichenschwellen
- Holzschwellen werden auch auf Brücken, als Brückenhölzer und als Übergangskonstruktion verwendet
- Knapp 80 Prozent der Holzschwellen im Hauptgleis besitzen kein Einbaujahr:  
Es wird die Annahme getroffen, dass sie vor 1975 eingebaut wurden, da die Aufzeichnung der Schwelleneinbaujahre nur bis 1970 reicht und seit dem Jahr 1975 hauptsächlich Betonschwellen eingebaut werden.

## 5 Instandhaltung

Die Instandhaltung wird laut EN 13306:2001-09 wie folgt definiert:

*„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustands oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.“* [9]

Die Instandhaltung kann in weitere Teilbereiche gegliedert werden. Diese umfassen die Wartung, Inspektion, Schwachstellenbeseitigung und Instandsetzung. [9]

Folgende Maßnahmen werden von der GKB zur Instandhaltung des Oberbaus eingesetzt [7]:

- Mechanisierter Durcharbeitszug (MDZ): [10]  
In Österreich besteht der MDZ aus einer Stopfmaschine (z.B. Stopfexpress 09-4x Dynamic) und einem System zur Schotterbewirtschaftung (BDS 2000).  
Die Stopfmaschine ist für den Stopf-Richt- und Hebevorgang des Gleises verantwortlich und ist mit einem Dynamischen Gleisstabilisator versehen, um *„ein stabilisiertes, sicheres und dauerhaftes Gleis“* zu garantieren.  
Das BDS-System verfügt über eine Schotterdosiereinrichtung, Mittel- und Flankenpflüge und ein Schottersilo mit Förderbändern. Diese Maschine dient dazu, die optimale Menge an Gleisschotter einzubauen.
- Gleisneulage  
Hierbei werden Schotterbett, Gleiskörper und eventuell der Untergrund erneuert.
- Schwellentausch  
Beim Schwellentausch werden einzelne Schwellen, die ihre technische Nutzungsdauer erreicht haben, ausgetauscht, dabei bleibt der restliche Oberbau erhalten.
- Schienenbearbeitung  
Aufgrund der hohen Beanspruchung der Schiene entstehen Schienenoberflächenfehler beziehungsweise Schienenverschleiß. Damit dennoch die Liegedauer der Schiene verlängert werden kann, werden Maschinen zur Berichtigung der Schienenfehler eingesetzt.  
Um Schienenfehler zu beseitigen, verwendet die GKB zwei Methoden:
  - I Schienenschleifen: Schleifzüge werden bei Schienenfehlern mit geringer Tiefe von 0,15-0,2 mm (Riffelbildung) eingesetzt.

- I Schienenfräsen: Bei diesem Verfahren ist ein höherer Materialabtrag (Abtragate 1,5 mm) als beim Schienenschleifen, möglich.

Die Daten der Maschineneinsätze für die Strecke Graz-Köflach beinhalten folgende Informationen:

- Art des Maschineneinsatzes
- Start- und Endkilometer
- Durchführungsjahr
- Gleisnummer

Die Informationen zu den verwendeten Maschineneinsätzen sind für die Jahre 2001 bis 2011 vorhanden. Nach der Bearbeitung und Überprüfung der Daten werden die Informationen einzeln in die vorhandene Oberbau- und Trassierungsdatei eingefügt und anschließend analysiert.

Eine Auswertung der Instandhaltungsarbeiten von 2001 bis 2011 durch einen Mechanisierten Durcharbeitungszug auf dem Haupt- und Bahnhofsgleis ergibt einen jährlichen mittleren Stopfeinsatz von über 12 km. Die Gesamtstrecke wird durchschnittlich alle vier Jahre gestopft.

Nachstehend ist ein Streckenband mit allen Stopfeinsätzen seit 2001 grafisch dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass einige Bereiche besonders stopfintensiv sind. Diese umfassen bei den Holzschwellen vor allem Weichenbereiche. Bei den Betonschwellen fällt nur ein geringer Anteil auf den Bahnhofsbereich, da zum größten Teil Stopfgänge auf freier Strecke durchgeführt werden. Darunter zählen sechs Brücken, die in den letzten Jahren fast jährlich gestopft wurden.

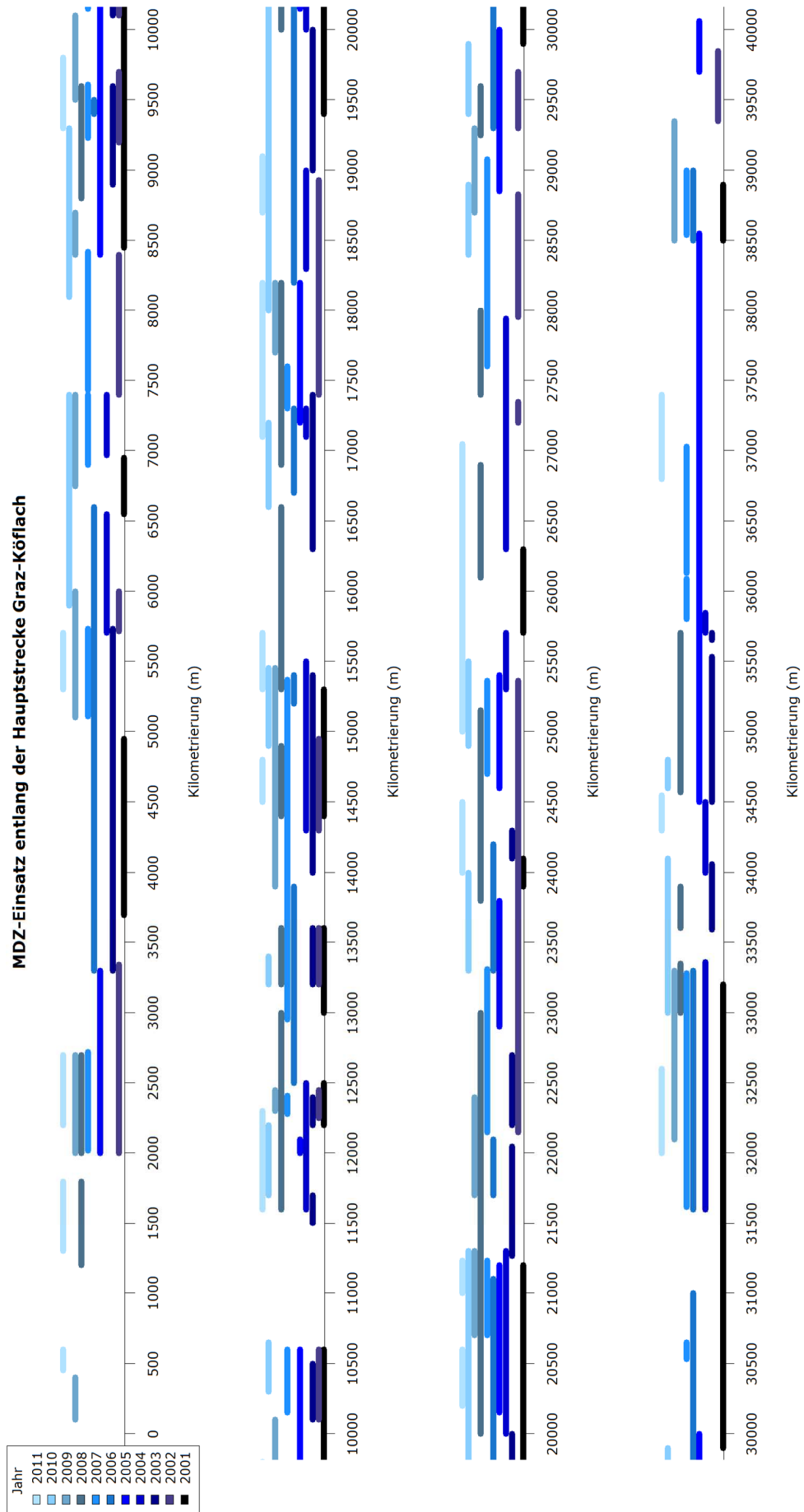


Abbildung 5.1 Streckenband MDZ-Einsatz Hauptgleis

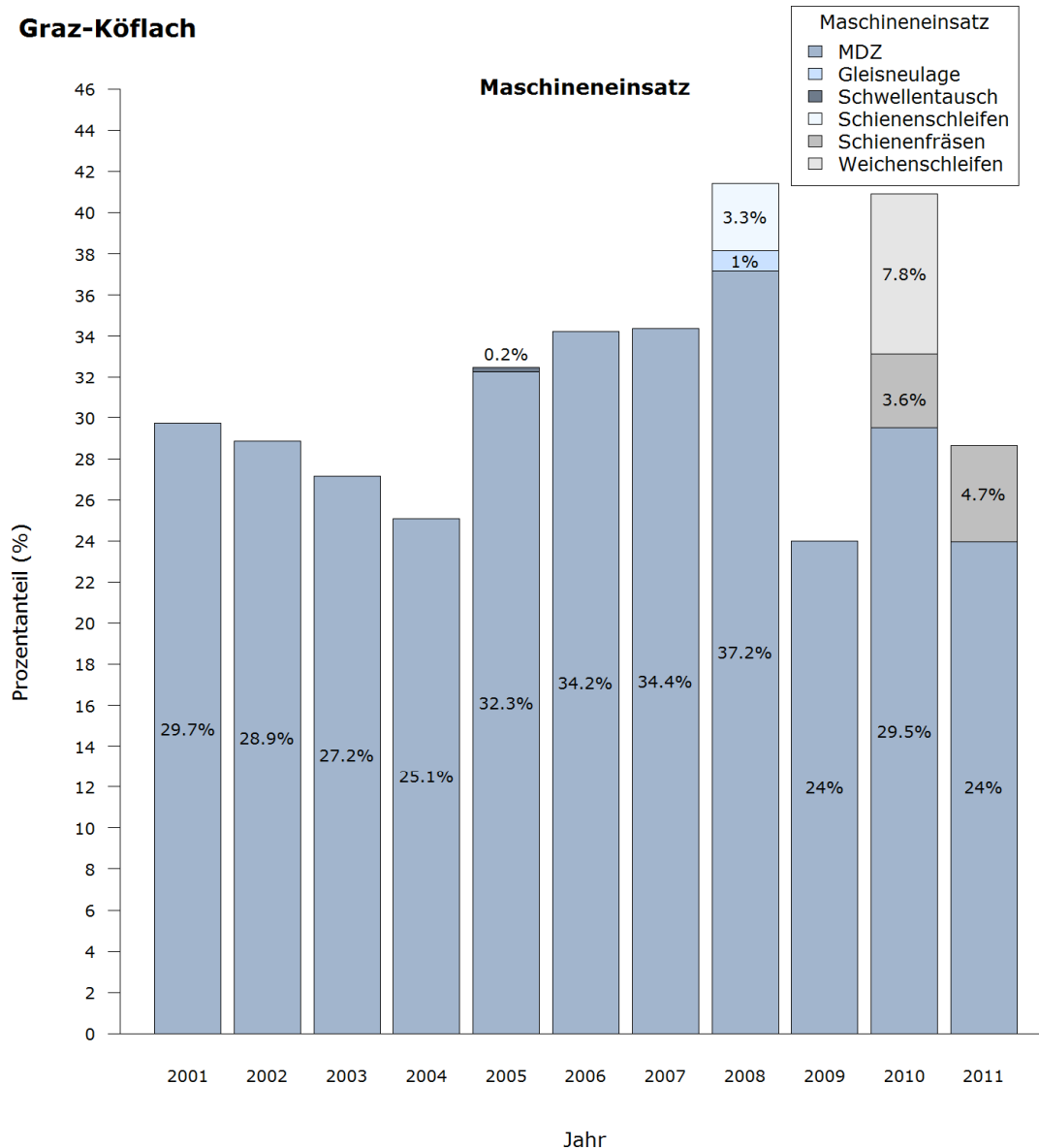
**Graz-Köflach**

Abbildung 5.2 Maschineneinsatz

In dem Balkendiagramm (Abbildung 5.2) sind alle Maschineneinsätze im Zeitraum 2001 bis 2011 abgebildet. Der jährliche Prozentanteil bezieht sich auf die Länge des Hauptgleises und beinhaltet keine Instandsetzung des Bahnhofsgleises, da nur knapp 2 % der gesamten Stopfeinsätze auf das Bahnhofsgleis fallen und damit in den weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden können. Im Durchschnitt wird jährlich etwa ein Drittel der Hauptstrecke gestopft. Vor allem in den Jahren 2008 und 2010 wurden über 40 % des Hauptgleises durchgearbeitet.

Im Jahr 2005 wurde auf einer Länge von 90 m ein Schwellentausch und im Jahr 2008 eine Gleisneulage vorgenommen. In den letzten Jahren wurden Weichenschienen und Schienen geschliffen beziehungsweise gefräst. Jedoch sind sehr wenige Schleifdaten vorhanden. Wertet man den Schientausch der Jahre 2010 und 2011 aus, so wurden im Jahr 2010

2,5 % und im Jahr 2011 7,5 % der Schienen im Hauptgleis neu verlegt. In Abbildung 5.2 beträgt der Anteil beim Schienenschleifen 2011 4,7 %, wobei mehr Schienen erneuert wurden. Das liegt zu einem daran, dass seit 2009 überdurchschnittlich oft Schienen getauscht werden.

### Graz-Köflach

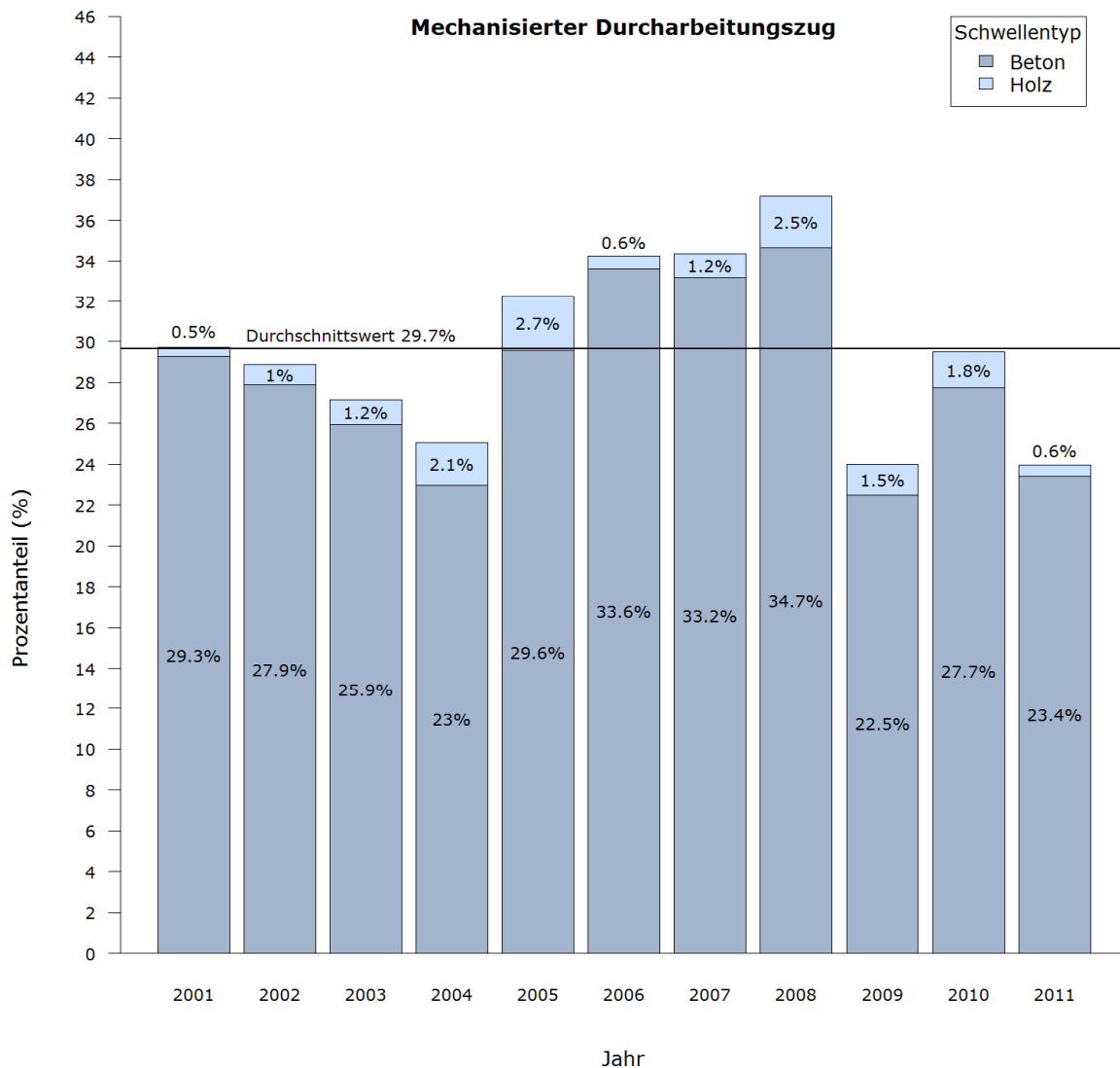
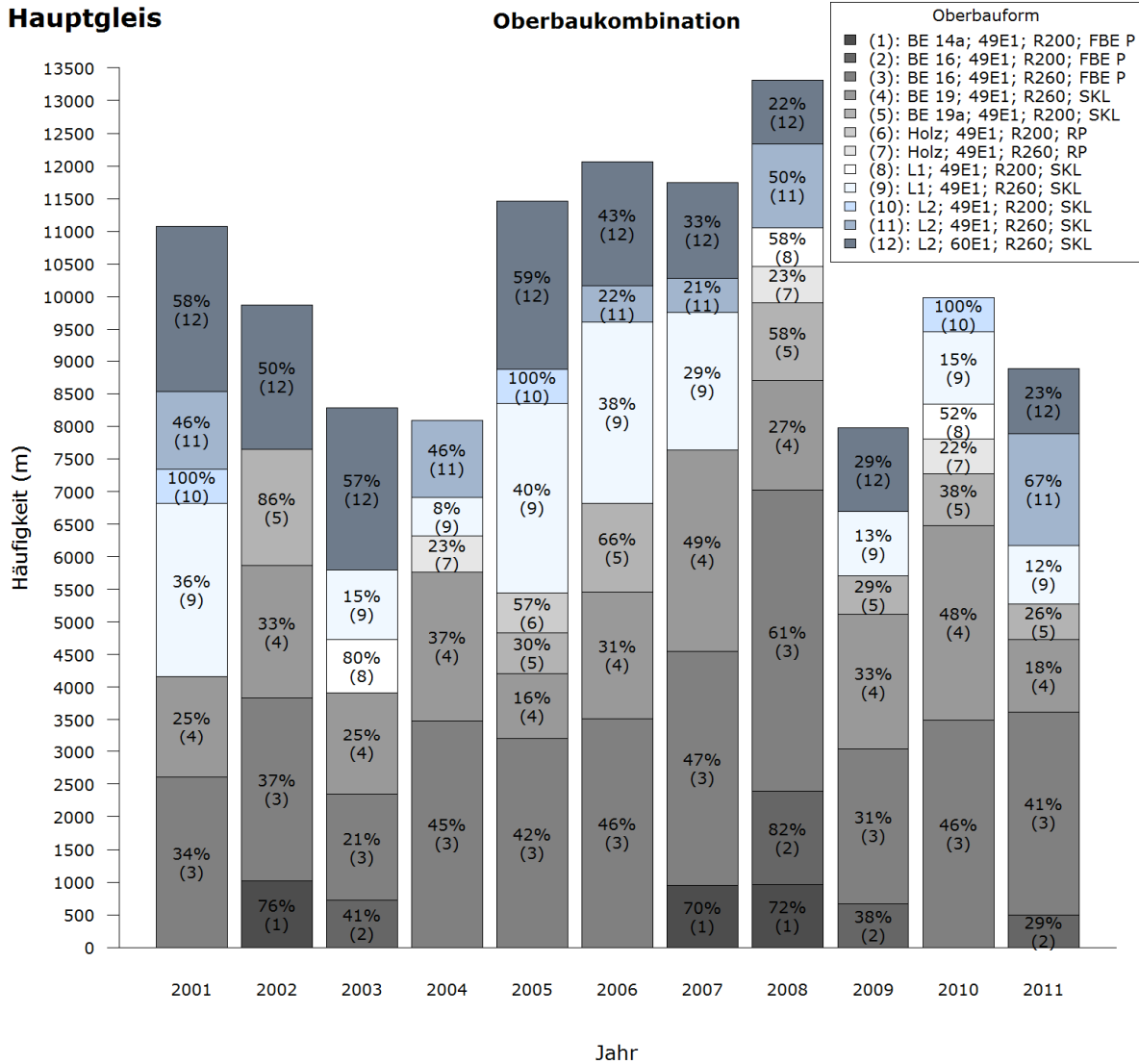


Abbildung 5.3 MDZ-Einsatz Schwellentyp

In der obenstehenden Abbildung ist der jährliche MDZ-Einsatz prozentuell auf den Schwellentyp aufgeteilt. Dabei ist ersichtlich, dass im Durchschnitt rund 30 % des Hauptgleises pro Jahr gestopft werden. Somit ergibt sich ein durchschnittliches, jährliches Stopfintervall von drei Jahren. Berücksichtigt man den Schwellentyp, so wird der größte Teil der Stopfarbeiten auf Betonschwellen durchgeführt. Es werden jährlich über 30 % der Betonschwellen und rund 16 % der Holzschwellen auf dem Hauptgleis durch einen Mechanisierten Durcharbeitungszug instandgesetzt.

**Graz-Köflach Hauptgleis**



Anmerkung: Oberbaukombinationen mit einer Häufigkeit <500m werden nicht berücksichtigt!

Abbildung 5.4 MDZ-Einsatz Oberbauform

Durch die Kombination der unterschiedlichen Oberbauformen mit den Einsätzen der mechanisierten Durcharbeitungszüge kann folgende Abbildung 5.4 erstellt werden.

Dabei wurden im Vorfeld Oberbauformen mit BE 14a und BE 14c sowie BE 19 und BE 19a zu BE 14a und BE 19 zusammengefasst, dafür mussten alle weiteren Oberbauinformationen ident sein. Diese Zusammenfassung der Schwellenarten kann aufgrund der ähnlichen Eigenschaften der Betonschwelle vorgenommen werden. Ebenso werden nur Kombinationen mit vollständigen Oberbauinformationen und/oder mit einer Häufigkeit über 500 m (>1,2 %) berücksichtigt.

Auf der Abszisse sind die Jahre der Stopfeinsätze und auf der Ordinate die Gleislängen, die durch einen Mechanisierten Durcharbeitungszug instandgesetzt wurden, aufgetragen. In den Balken sind die relativen Prozentanteile, bezogen auf die Häufigkeit der Oberbauform,

dargestellt. Anhand der Prozentangaben kann nachgewiesen werden, welche Oberbauform im Verhältnis zu seiner Länge (vergleiche Abbildung 3.11) vermehrt gestopft wurde. So wurden im Jahr 2010 knapp die Hälfte der Oberbauform (3) und (4), beziehungsweise die gesamte Länge der Oberbauform (10), gestopft.

Seit dem Jahr 2008 ist ein Rückgang der MDZ-Einsätze zu verzeichnen. Ein Grund dafür ist der gleichzeitige Anstieg der Schwellenerneuerung bzw. Gleisneulage.

Eine Auswertung ergab, dass die Trassierungselemente Bogen und Gerade gleich häufig gestopft werden. Dabei beläuft sich der Anteil der Betonschwellen auf rund ein Drittel und der Anteil der Schwellen aus Holz auf 14 %.



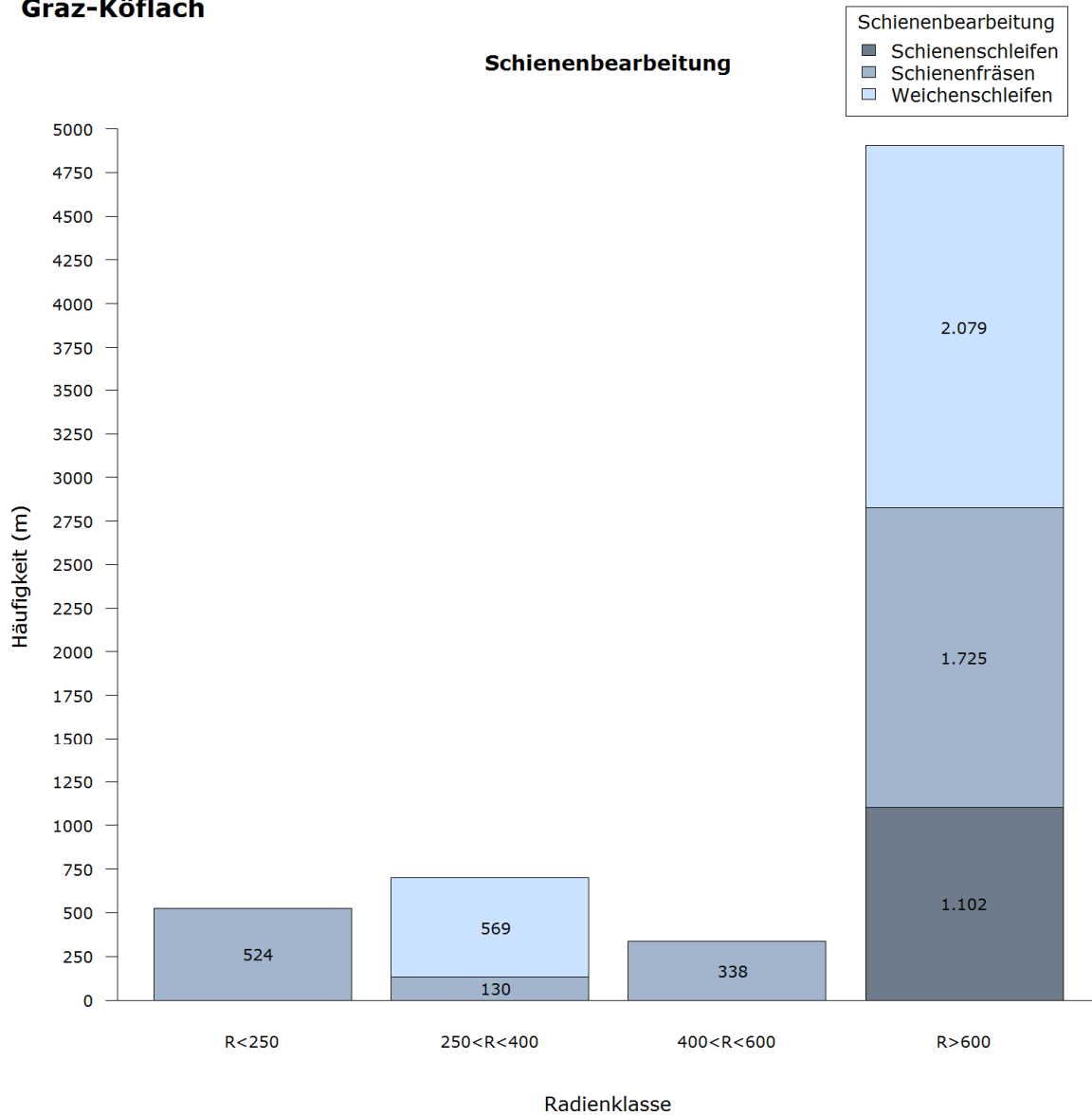
**Graz-Köflach**

Abbildung 5.5 Radienklasse Schienenbearbeitung

Die Schienenbearbeitungen werden auf verschiedene Radiengruppen aufgeteilt, dabei lässt sich erkennen, dass aufgrund von Schienenoberflächenfehlern in engen Bögen ausschließlich Schienenfräsmaschinen zum Einsatz kommen. In den letzten Jahren wurde ein Viertel der Schienenlänge in der Radienklasse  $R < 250\text{m}$  mittels Schienenfräsmaschine instandgesetzt, wobei die Schienenfräsmaschine auch bei größeren Radien verwendet wird. Wird der Einsatz von Weichenschleifmaschinen mitberücksichtigt, so werden diese bei Weichen mit einem Radius von 250 m bis 400 m, beziehungsweise bei Radien größer 600 m, eingesetzt.

## 6 Gleislagequalität

Die Gleisanlage wird einer Vielzahl von Einflüssen ausgesetzt. Neben der dynamischen Krafteinwirkung, die ein Fahrzeug durch seine Bewegung auf die Schwelle und damit in den Untergrund injiziert, beeinflussen auch Witterung, Vegetationen, weitere Beanspruchungen, zum Beispiel chemischer Art, und Unebenheiten der Schienenoberfläche (Schienenfehler) die Gleislage. Durch die oben erwähnten Belastungen kommt es zu unregelmäßigen Setzungen, Gleislagefehler sind die Folge. Die Größe des Gleislagefehlers wird solange zugelassen, bis eine Eingriffsschwelle erreicht wird. Diese wird oftmals mit dem gewünschten Fahrkomfort in Verbindung gebracht. [7] [11]

Um eine Verbesserung der Gleislage zu erzielen, wird der Gleisfehler durch den Stopfeinsatz deutlich gesenkt, somit erhält man eine Anfangsqualität nach dem MDZ-Einsatz. Wird der Betrieb wieder fortgesetzt, kommt es zu einem raschen Anwachsen des Gleislagefehlers in Form einer exponentiellen Kurve. Lichtberger [7] erklärt sich dieses Verhalten, wie folgt: „Diese Phase ist durch das Abbrechen der Kornspitzen und das Umlagern der Körner in eine dichtere Lage gekennzeichnet und nach etwa einer Periode von 0,5-2 Mio.t abgeschlossen“ und wird als Anfangssetzung nach der Gleisneulage definiert. [7] [11]

Die Anfangsqualität nach jedem Stopfgang sinkt. Die Folge sind immer kürzere Stopfintervalle mit immer schlechter werdenden Anfangsqualitäten, bis hin zu einer Liegedauerverkürzung und einer frühzeitig anstehenden Re-Investition der Gleiskonstruktion. [7]

Die Gleislagequalität kann mit verschiedenen Berechnungsansätzen beschrieben werden:

I Exponentielle Darstellung [12]:

$$Q = Q_0 \cdot e^{b \cdot t} \quad (\text{Formel 6.1})$$

mit:

Q	aktuelle Gleisqualität
Q <sub>0</sub>	Anfangsqualität
b	Verschlechterungsrate
t	Zeit

I Lineare Darstellung [7]:

$$Q = Q_0 + b \cdot M \quad (\text{Formel 6.2})$$

mit:

M Betriebslast

I Halblogarithmische Darstellung [7]:

$$Q = Q_0 + b \cdot \log M/M_0 \quad (\text{Formel 6.3})$$

mit:

M<sub>0</sub> 2 Mio. Lasttonnen

Um die Gleislagequalität nachstehend qualitativ beurteilen zu können, ist es notwendig, folgende Qualitätsparameter zu definieren [7]:

- Anfangssetzung
 

Wie bereits erwähnt wurde, kommt es innerhalb der ersten 0,5-2 Mio. Lasttonnen zu einer raschen Verschlechterung der Gleislage. Durch Anwendung eines dynamischen Gleisstabilisators lassen sich die Anfangssetzungen vermindern.
- Anfangsqualität Q<sub>0</sub>

Als Anfangsqualität Q<sub>0</sub> wird die Qualität der Gleislage zum Zeitpunkt t=0 (Gleisneulage) verstanden, die sich nach den Anfangssetzungen einstellt. Je höher Q<sub>0</sub> ist, desto größer sind die Instandsetzungsintervalle voneinander entfernt. Damit eine hohe Anfangsqualität erreicht wird, kann sie durch folgende Punkte beeinflusst werden:

  - I Arbeitstechnologien und -methoden nach Stand der Technik
  - I optimale Wahl der Baumaschinen und durch hochwertige Baumaterialien
  - I zur Verfügung stehendes Budget und durch qualifizierte Baufirmen
- Verschlechterungsrate b
 

Betrachtet man die Messpunkte in einem Gleisquerschnitt und legt eine Regressionsgerade (linearer Berechnungsansatz) hinein, so entspricht die Verschlechterungsrate b der Steigung der Geraden. Sie wird auch als innere Qualität bezeichnet.

Lichtberger [7] beschreibt folgende negative Einflüsse auf die Verschlechterungsrate:

### I Dynamische Krafteinwirkung

Die vertikale Last, die durch das bewegende Fahrzeug erzeugt wird, verursacht eine ungleichmäßige Belastung der Schwelle, was wiederum zu unregelmäßigen Setzungen führt.

### I Schienenoberflächenfehler und Schienenprofil

Schienenfehler in Längsrichtung, wie beispielsweise Riffel und Schlupfwellen, verursachen durch dynamische Reaktionen auf das Gleis unregelmäßige Setzungen. Das Schienenprofil und die Wellenlänge der Schienenfehler beeinflussen die Laufeigenschaft der Schiene stark. Denn *„je kleiner die Wellenlängen, umso größer ist ihr Einfluss auf die unregelmäßigen Setzungen.“* [7]

### I Unregelmäßige Schwellenteilung

Durch unterschiedliche Schwellenabstände werden die Radlasten unterschiedlich auf die Schwellen aufgeteilt. Bei einem größeren Schwellenabstand kommt es zu höheren Lastanteilen und in Folge zu größeren Setzungen. Der Einfluss der unregelmäßigen Schwellenteilung kann heutzutage durch gleichbleibende Abstände vernachlässigt werden.

### I Unterschiedliche Schwellenaufleger

Werden bei den Schwellenauflagern verschiedene Federkennziffern verwendet, können Schwellen die Radlasten nicht zu gleichen Anteilen aufnehmen. Unterschiedliche Setzungen sind die Folge.

### I Unregelmäßige Schottersetzungen

Schottersetzungen werden durch unterschiedliche Steifigkeiten hervorgerufen. Die Steifigkeit wird zum Beispiel durch variierende Reibungskräfte zwischen den Schotterkörnern und unterschiedlichen Schotterbetthöhen beeinflusst. Die durch den Steifigkeitsunterschied entstandenen Setzungen verursachen *„einen langwelligen Verlauf an der Schienenoberkante“*. [7]

### I Unregelmäßige Setzungen des Untergrundes

In Folge einer unzureichenden Tragfähigkeit des Untergrundes werden Setzungen des Untergrundes ausgelöst. Die Steifigkeiten nehmen von oben nach unten ab, somit fallen die Belastungen im Untergrund und die daraus resultierenden Setzungen geringer aus als im Schotterbett.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Gleislagequalität direkt von der Einbauqualität und der Verschlechterungsrate abhängt. Hat sich im Laufe der Liegedauer des Gleises eine innere Qualität eingestellt, kann sie nicht mehr verändert werden. Nach den MDZ-Einsätzen wird die Gleislagequalität zwar verbessert, jedoch kann die Neigung der Verschlechterungsrate nicht mehr abgeflacht werden. Diese bleibt unverändert und das Gleis hat das Bestreben, wieder in die ursprüngliche Fehlerlage zurückzukehren. Hierbei spricht man im Eisenbahnwesen vom „Gedächtnis des Gleises“. Werden nach einem Stopfgang gezielte Überhebungen des Gleises durchgeführt, so ergeben sich verbesserte Gleislagequalitäten nach den Anfangssetzungen, jedoch ist es nicht möglich, die aktuelle Gleislagequalität über die Einbauqualität zu heben. [7] [12]

Ergänzend ist zu erwähnen, dass gezielte Instandhaltungsmaßnahmen die Nutzungsdauer des Gleises drastisch beeinflussen. Um dennoch einen längerfristigen Instandhaltungsplan zu entwickeln, muss der Verlauf der Gleisqualität über die Nutzungsdauer betrachtet werden. Nur mit Hilfe von Messwerten kann eine Regressionskurve (exponentieller Ansatz: Formel 6.1) beziehungsweise eine Regressionsgerade (linearer Ansatz: Formel 6.2) berechnet, das Gleisverhalten beschrieben und eine Prognose erstellt werden. [12]

## 6.1 Messung der Gleisgeometrie

Ein zentraler Bereich der Instandhaltung ist die Inspektion der Gleisanlage durch den Infrastrukturbetreiber, um vor allem sicherheitskritische Streckenabschnitte zu orten und vor Erreichen der Grenzwerte gezielt Maßnahmen zu setzen. [7]

Die GKB verwendet für die Inspektion ihres Streckennetzes den Oberbaumesswagen EM250 der ÖBB.

Der Messwagen verfügt über ein Gleisgeometriesystem, das auf dem POS/TG (Position and Orientation System for Track Geometry) basiert. Dieses Computersystem enthält vier Messsensoren [13]:

- eine Inertialmesseinheit (IMU) mit Beschleunigungsmessern
- einen GPS-Empfänger für die Standortbestimmung
- einen Messabstandsanzeiger (DMI), um die gefahrene Streckenlänge aufzuzeichnen und um eine Verbesserung der Navigationsdaten zu erzielen, vor allem bei GPS-Ausfällen
- und ein optisches Spurweitenmesssystem (OGMS), das die genaue Lage der Schienen misst.

Der Gleismesswagen befährt das GKB-Netz ein bis zwei Mal pro Jahr, daraus resultieren Daten über den momentanen Gleiszustand. Dieser wird mit Hilfe folgenden Aufzeichnungssystemen beschrieben: [7]

- Schienenmessung (Riffelmessung, Schienenprofilmessung)
- Videoaufzeichnungen des Gleisumfeldes sowie der Schienenoberfläche inklusive Befestigungsmittel
- Gleisgeometrieparameter, wie Spurweite, Überhöhung, Verwindung, Neigung, Höhen- und Richtungslage

Aus den Messdaten, die vor Ort ermittelt werden, stehen weitere Kennwerte zur Beschreibung der Gleislagequalität zu Verfügung: [14]

- Standardabweichung Längshöhe (SIGMA-h)
- Standardabweichung Richtungslage (SIGMA-r)
- Komfortziffer (MDZ-a)

Diese Kennwerte werden in den Kapiteln 6.2.1 bis 6.2.3 näher beschrieben.

Für die GKB werden die berechneten Qualitätskennziffern einer Messfahrt in 5-Meter-Abständen ausgegeben. Die Daten aller Messfahrten von 2002 bis 2012 werden in die bereits vorhandene Datei mit Hilfe von „R-Project“ integriert und von 1-Meter- auf 5-Meter-Abstände erhöht.

Von 2002 bis 2008 wurde eine Messfahrt pro Jahr durchgeführt und seit 2009 wurde auf zwei Messfahrten pro Jahr erhöht.

## 6.2 Globalanalyse

Bei der Globalanalyse werden nur die Qualitätskennwerte der Messfahrten auf der gesamten Strecke von Graz nach Köflach betrachtet. Dabei lässt sich erkennen, dass sich nur bei rund einem Drittel der jährlichen Messfahrten Fehlerwerte ergeben, jedoch beläuft sich die Fehlerquote seit 2008 nur auf 10 %.

Nach einer kurzen Erläuterung der Qualitätsziffern werden mit Hilfe von grafischen Auswertungen Entwicklungen über die vorhandenen Jahre dargestellt und beschrieben. Dazu werden Darstellungen in Form von Boxplots, Balkendiagrammen und Summenhäufigkeiten verwendet und anschließend einer Analyse unterzogen.

## 6.2.1 SIGMA-h

„Aus dem aktuellen Längshöhensignal wird eine gleitende Standardabweichung über eine Analyselänge von 100 m gebildet. Punktuelle Unregelmäßigkeiten ergeben daher eine 100 m-Stufe in der gleitenden Standardabweichung.“ [15]

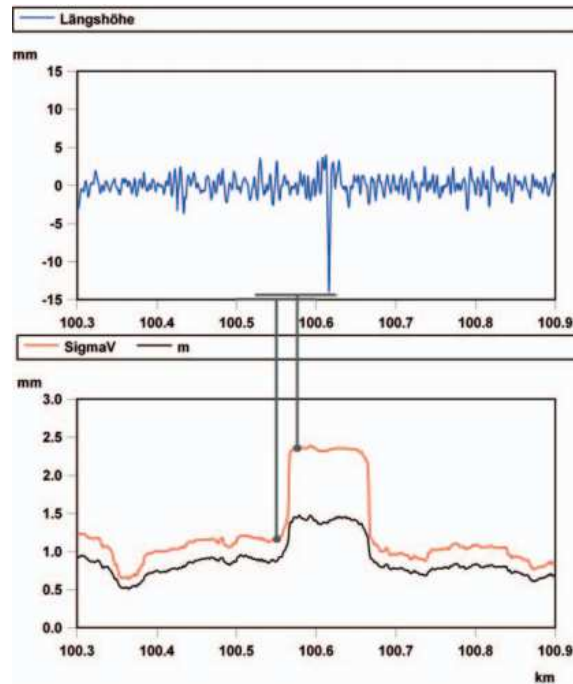


Abbildung 6.1 Einzelfehlereinfluss auf SIGMA-h (Anlehnung an [15])

Ebenso ist zu erkennen, „dass der Einzelfehler im Längshöhensignal einen großen Einfluss auf die Standardabweichung hat.“ [15]

Diese Kennziffer wird standardmäßig in Europa zur Bewertung der Gleislagequalität herangezogen. [12]

Die Abbildung 6.2 zeigt den jährlichen Verlauf der Summenhäufigkeit von SIGMA-h. Die Summenkurve erhält man, wenn man die Messwerte einer Messfahrt nach ihrer Größe ordnet und summiert. Für die Darstellung der kumulierten Häufigkeit der Standardabweichung in Längshöhe wird ab 2009 aus Übersichtsgründen nur die erste Messfahrt eines Jahres (Messfahrt im April) herangezogen.

Je steiler eine Summenkurve ist, desto kleiner ist ihr Streubereich. Anhand der Abbildung 6.2 wird sichtbar, dass sich die minimale vertikale Standardabweichung zwischen 0,2 mm bis 0,4 mm bewegt und ihr Maximum bei über 4 mm aufweist, ebenso ist eine Median-Schwankung bei jeder Messfahrt ersichtlich.

Die Messfahrt 2011 (braunrote Linie) wird als Beispiel verwendet, da über 95 % der Messsignale vom Oberbaumesswagen EM250 aufgezeichnet werden könnten. Am Beispiel ist erkennbar, dass 50 % der Messwerte (Median-Wert) kleiner 1 mm sind.

### Graz-Köflach Hauptgleis

### SIGMA-h

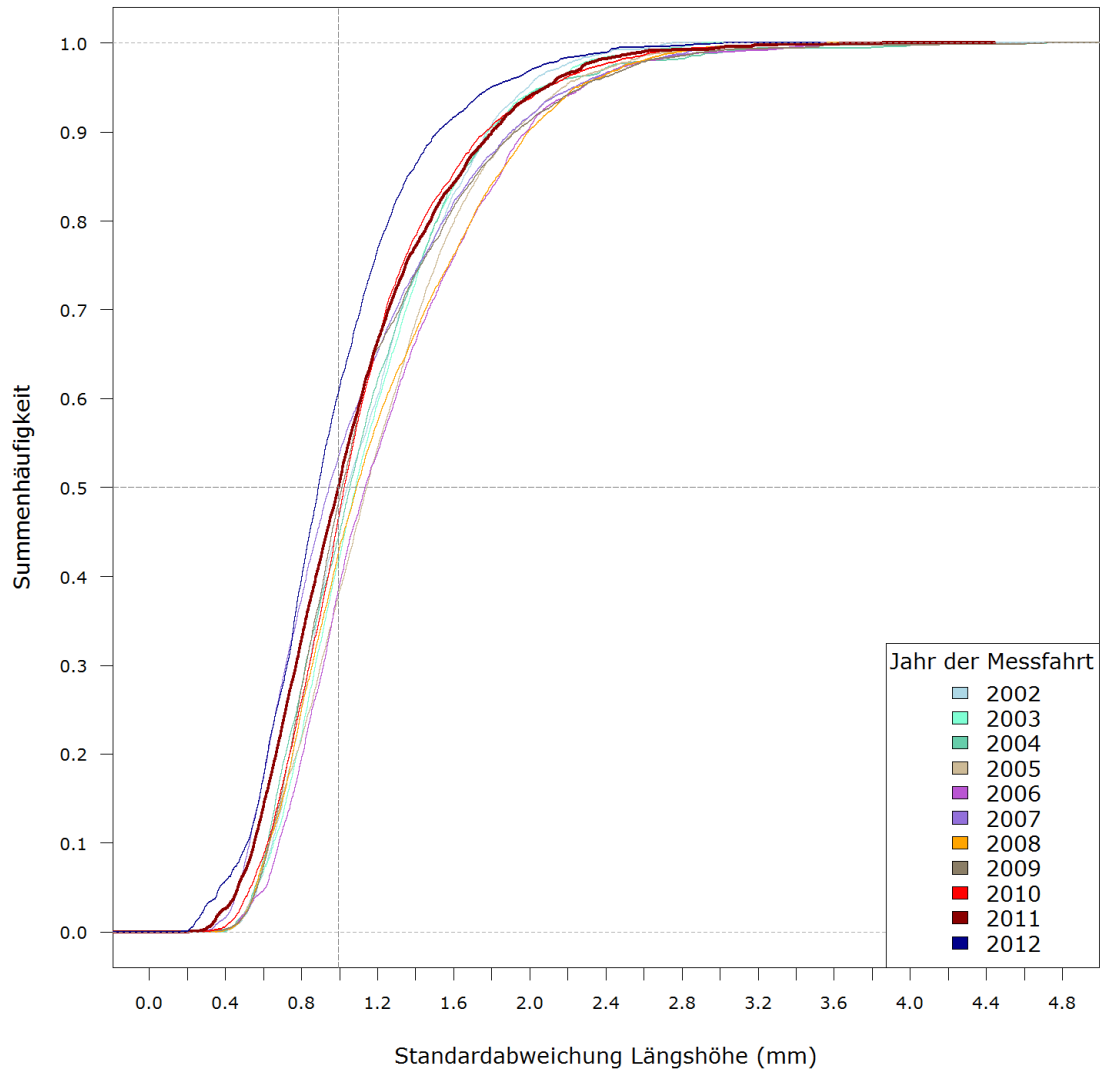


Abbildung 6.2 Summenhäufigkeit SIGMA-h



Graz-Köflach  
Hauptgleis

## SIGMA-h

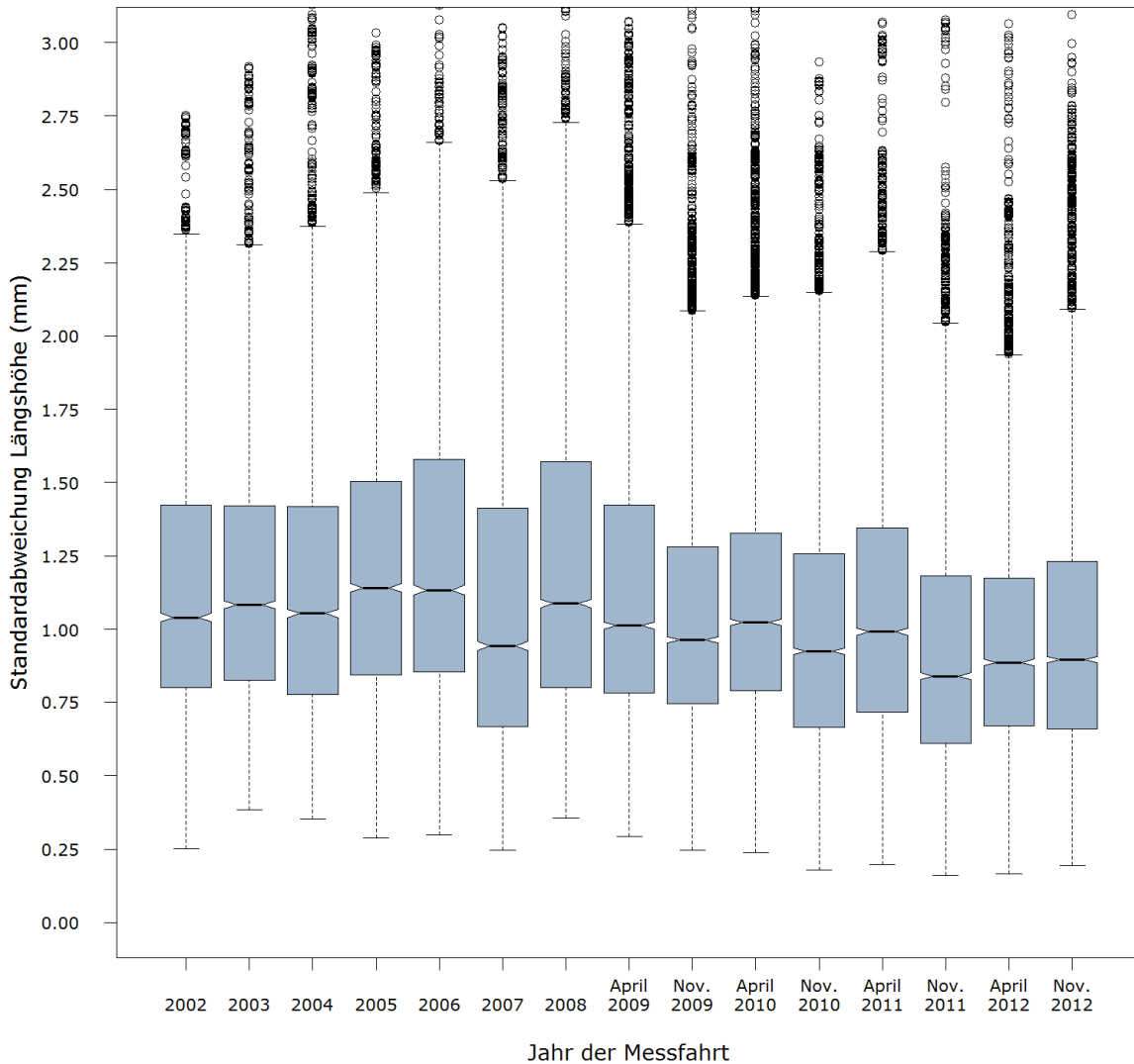


Abbildung 6.3 Jährlicher SIGMA-h Verlauf

In der obigen Abbildung 6.3 wird der jährliche Verlauf der vertikalen Standardabweichung dargestellt. Es ist erkennbar, dass zwischen den Jahren 2002 und 2005 eine Verschlechterung der Gleislage erfolgt ist. Die Messfahrt 2007 wird als Ausreißer definiert, da ab einer Kilometrierung von km 17.000 nur alle 10 m Signale gemessen wurden und sich das Ergebnis dadurch verfälscht. Ebenso sei angemerkt, dass 2007 keine Informationen über eventuelle Schwellenerneuerungen, die eine Gleislageverbesserung mit sich ziehen, vorliegen. Ab 2008 kann eine tendenzielle Verbesserung der Gleislage verzeichnet werden. Bemerkbar ist, dass sich in den Wintermonaten, ab der Messfahrt im November bis zur nächsten Messfahrt im April, die Gleislage verschlechtert. Der Medianwert der Messungen im April, in den Jahren 2009 bis 2011, kommt wiederholt bei einer Standardabweichung in Längshöhe von 1 mm zu liegen.

Vergleicht man nun Abbildung 5.3 (Seite 46) und Abbildung 6.4 mit dem Boxplot oben, so können daraus Gründe für eine Verschlechterung beziehungsweise Verbesserung des Gleiszustandes interpretiert werden: Die durchschnittlich jährliche Instandsetzung (MDZ-Einsatz und Gleisneulage) beträgt rund 30 % der Streckengesamtlänge. Global betrachtet, wurden die Stopfeinsätze von 2001 bis 2004 jährlich vermindert und bis auf 2004, nur auf wenigen hundert Metern Schwellen getauscht. Ab 2005 wurde das Hauptgleis überdurchschnittlich oft instandgesetzt, wobei erst ab dem Jahr 2009 vermehrt Schwellen erneuert wurden.

### Graz-Köflach Hauptgleis

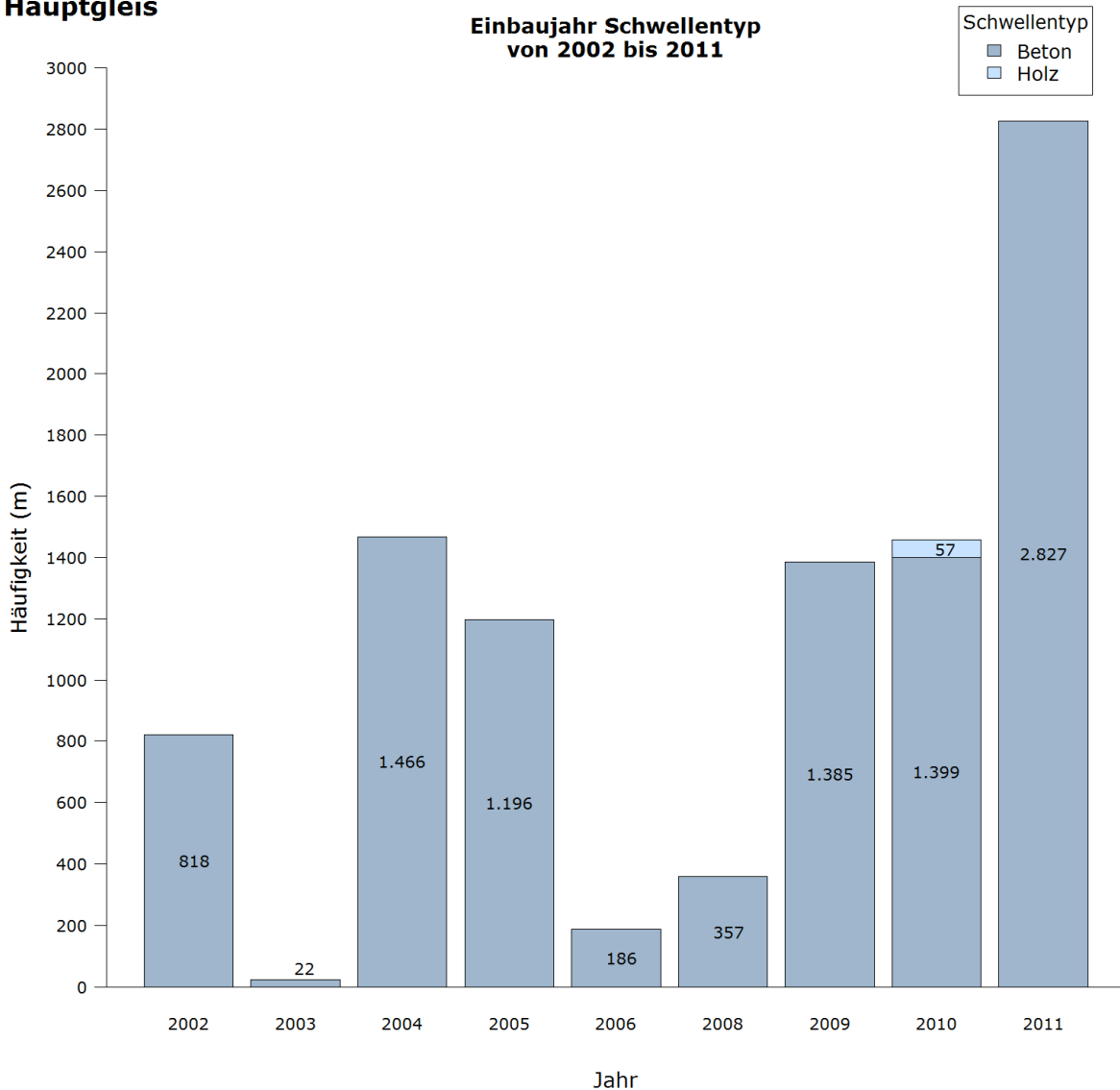


Abbildung 6.4 Einbaujahr Schwellentyp von 2002 bis 2011

Nachstehend wird eine Hypothese aufgestellt, um die Auswirkung der zwei Schwellentypen Holz und Beton auf die Gleislage zu untersuchen.

**Hypothese 1:** „Holzschwellen wirken sich durch ihre elastischen Eigenschaften besser auf SIGMA-h aus als Betonschwellen.“

Um diese Vermutung zu bestätigen oder gegebenenfalls zu widerlegen, wird der Zusammenhang zwischen der vertikalen Standardabweichung und den einzelnen Schwellentypen analysiert. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass keine alten Holzschwellen mit neuen Betonschwellen verglichen werden, da ein derartiger Vergleich keine gültige Aussage über den Einfluss auf die vertikale Gleislage zulässt.

Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 werden mit der Bedingung erstellt, dass der Bahnhofsbereich nicht berücksichtigt wird, da er zu den Störstellen zählt. Für die Berechnung des Durchschnittswertes wird das Jahr der Messfahrt 2007 nicht mitberücksichtigt, da diese Messfahrt im Vorfeld als Ausreißer definiert wurde.

Da Holzschwellen keine Information zum Einbaujahr besitzen, jedoch vermutet wird, dass es sich vor allem um ältere Schwellen (siehe Kapitel 4.1) handelt, sind alle Holzschwellen in die Betrachtung eingegangen. Wie bereits erwähnt wurde, werden nur 16 % der Holzschwellen im Hauptgleis jährlich instandgesetzt, aufgrund dieser niedrigen Rate ist die Formulierung der Hypothese gerechtfertigt. Laut Abbildung 6.5 weist die Standardabweichung der Längshöhe einen Durchschnittswert von 1,3 mm auf.

### Graz-Köflach Hauptgleis

### SIGMA-h Holzschwellen

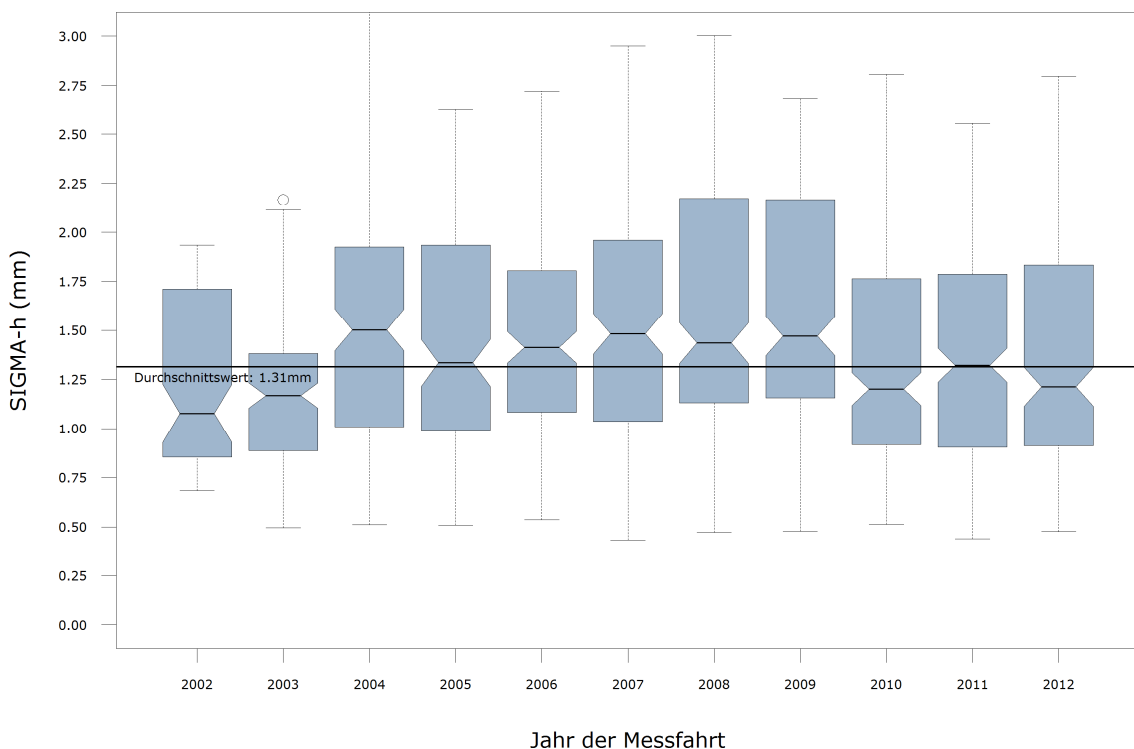


Abbildung 6.5 Jährlicher SIGMA-h Verlauf von Holzschwellen

Bei den Betonschwellen wird eine Vereinfachung getroffen: Es werden nur Schwellen mit einem Einbaujahr kleiner gleich 2000 miteinbezogen, somit kann gewährleistet werden, dass keine neuen Schwellen in die Betrachtung einfließen. Mit Hilfe dieser Randbedingungen kann ein Durchschnittswert von 1 mm berechnet und folgende Abbildung erstellt werden:

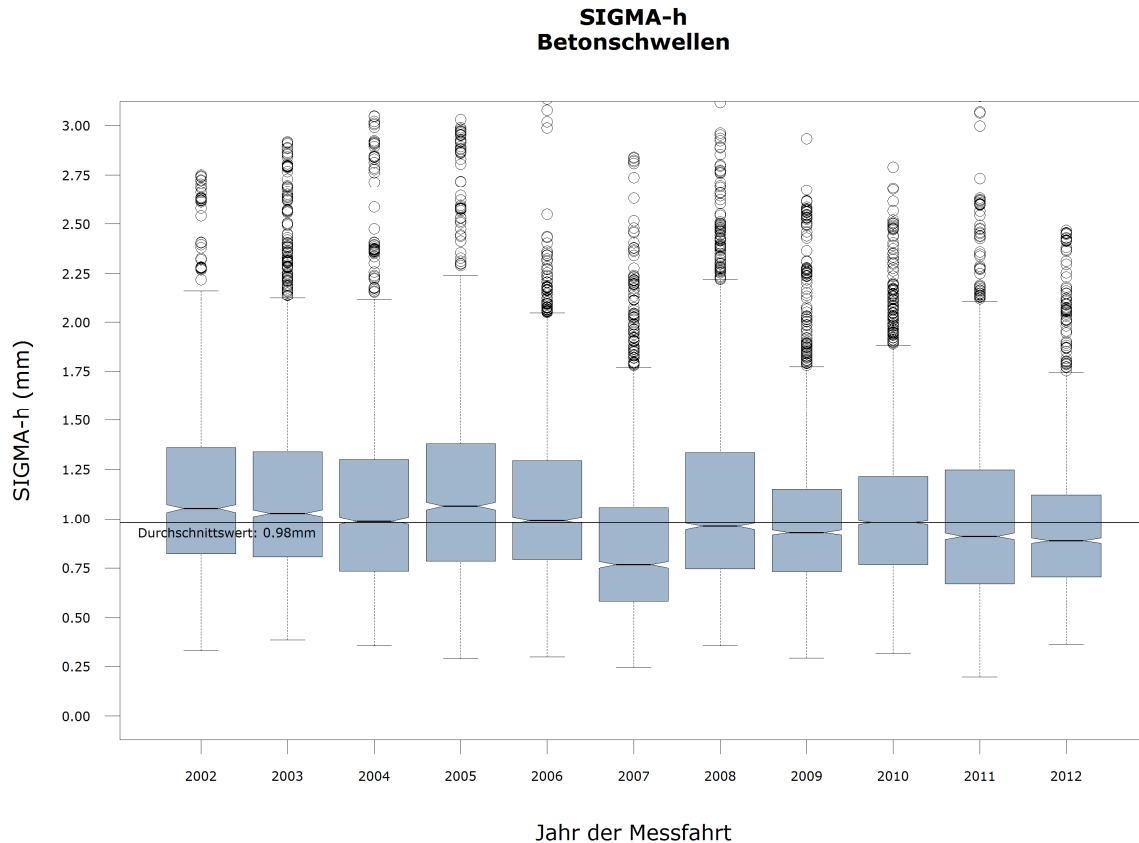


Abbildung 6.6 Jährlicher SIGMA-h Verlauf von Betonschwellen

Wird nun der Verlauf der Standardabweichung der Längshöhe von Holzschwellen mit dem der Betonschwellen gegenüber gestellt, so lässt sich erkennen, dass die vertikale Standardabweichung bei der Betonschwelle eine bessere Gleislage in Längshöhe aufweist als bei der Holzschwelle auf freier Strecke, die ein älteres Einbaujahr aufweisen. Dabei kann der Längshöhenfehler bei Holzschwellen durch häufigere Stopfintervalle kompensiert werden.

## 6.2.2 SIGMA-r

Betrachtet man anstelle des Längshöhensignals das Signal in Richtungslage, so ergibt sich eine gleitende horizontale Standardabweichung (SIGMA-r). Dieser Qualitätskennwert wird durch den Richtungsfehler des Gleises bestimmt. Der Richtungsfehler tritt auf, wenn ein zu geringer Querverschiebewiderstand herrscht. Vor allem in der Bogenfahrt führt es zu einer erhöhten Führungskraft  $Y$ , die die Schwelle bei geringem Widerstand nach außen drückt und so einen Gleislagefehler verursacht. [7]

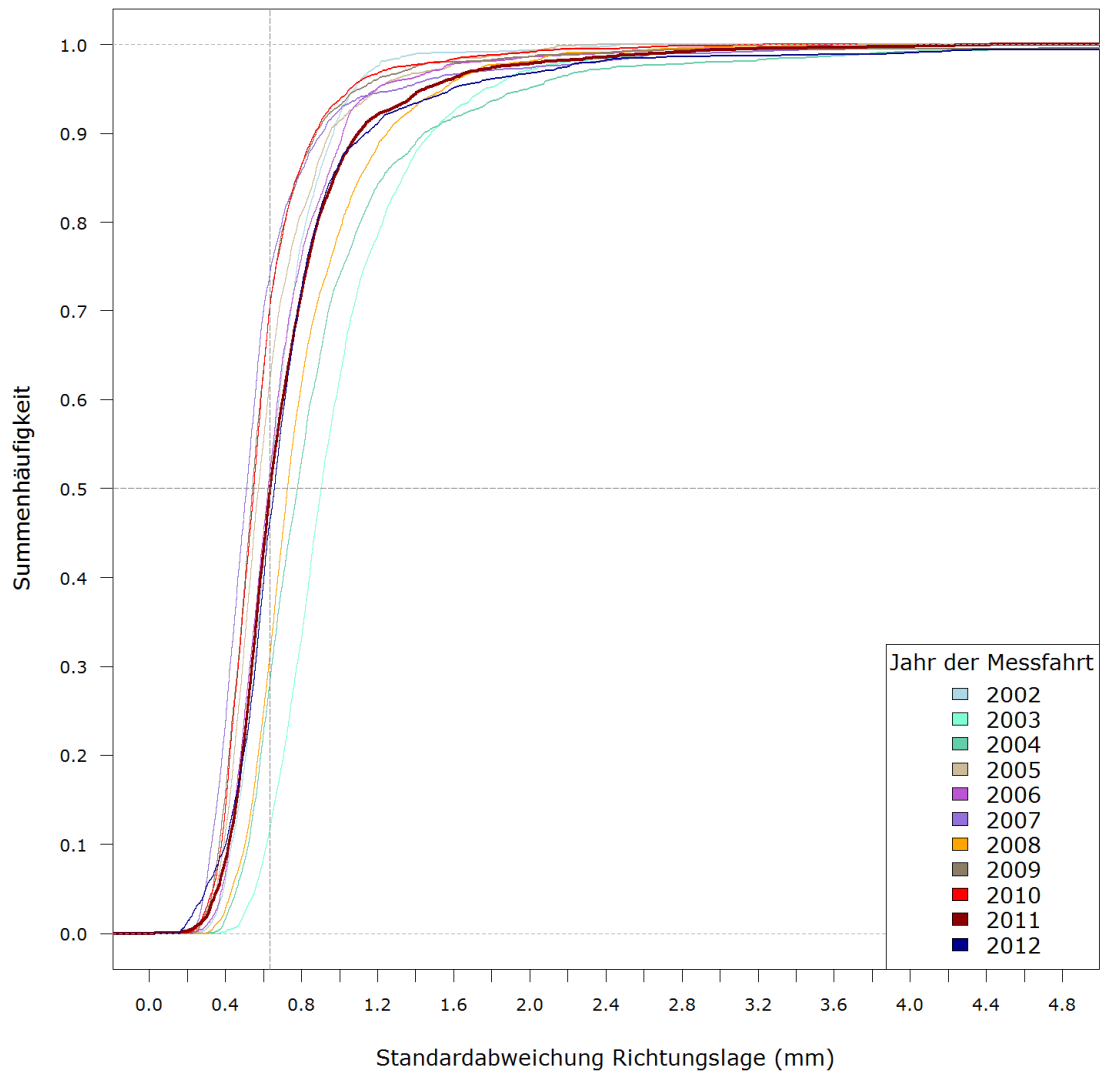
**Graz-Köflach  
Hauptgleis**
**SIGMA-r**


Abbildung 6.7 Summenhäufigkeit SIGMA-r

Vergleicht man Abbildung 6.2 mit der obenstehenden Abbildung 6.7, so ist eine viel steilere Kurve ersichtlich. Wird ebenfalls die Messfahrt 2011 als Beispiel verwendet, so kommt der Medianwert dieser Messung bei knapp über 0,6 mm zu liegen. Somit ist der 50 %-Anteil bei SIGMA-r um zirka ein Drittel geringer als bei SIGMA-h. Beachtet man jedoch nur den Medianwert jeder Messfahrt, so erkennt man, dass er einen größeren Streubereich als bei SIGMA-h aufweist.

Nachstehend (Abbildung 6.8) ist der jährliche Verlauf von SIGMA-r dargestellt. Anhand dieser grafischen Auswertung und der vorherigen Abbildung 6.7 wird die Streuung einzelner Messfahrten ersichtlich. Der Schwankungsbereich von SIGMA-r ist zwar größer, jedoch fallen die Richtungsfehler geringer aus als bei SIGMA-h. Eine Gegenüberstellung dieser zwei Qualitätskenngrößen wird in der Hypothese 3 behandelt.

### Graz-Köflach Hauptgleis

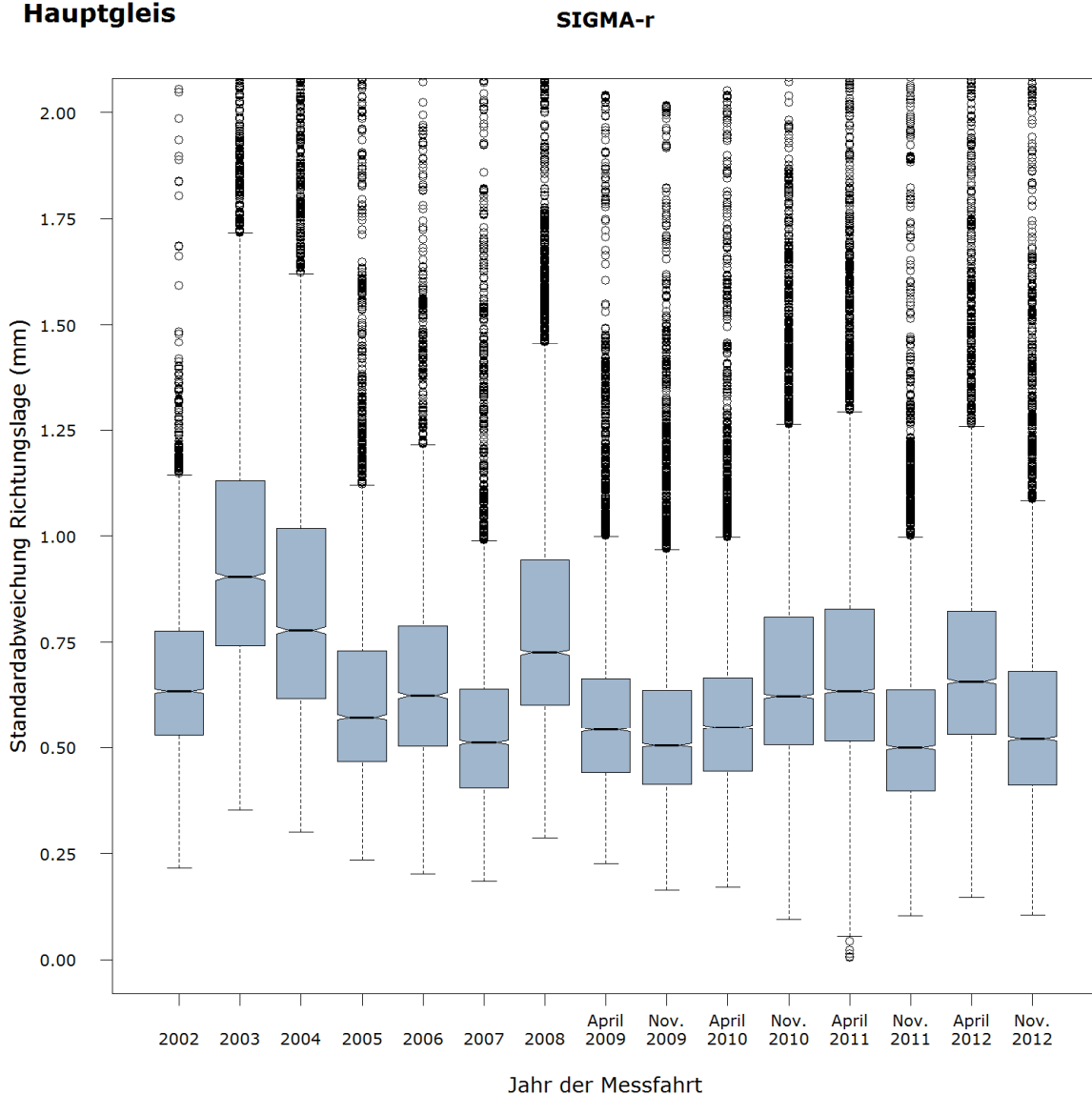


Abbildung 6.8 Jährlicher SIGMA-r Verlauf

**Hypothese 2:** „Aufgrund des höheren Querverschiebewiderstandes von Betonschwellen ist SIGMA-r im Bogen besser als bei Holzschwellen“, da Holzschwellen ein geringeres Eigengewicht und laut Lichtberger „einen um 15 % geringeren Querverschiebewiderstand aufweisen“. [7]

Damit eine Auswertung diesbezüglich erfolgen kann, wird die Strecke in Radienklassen sowie in Schwellentyp aufgeteilt. Für die Darstellungen werden die Messwerte auf freier Strecke ohne Bahnhofsbereiche und ohne Störstellen, wie Weichen, Eisenbahnkreuzungen und Brücken, vom April 2011 verwendet.

### Graz-Köflach Hauptgleis

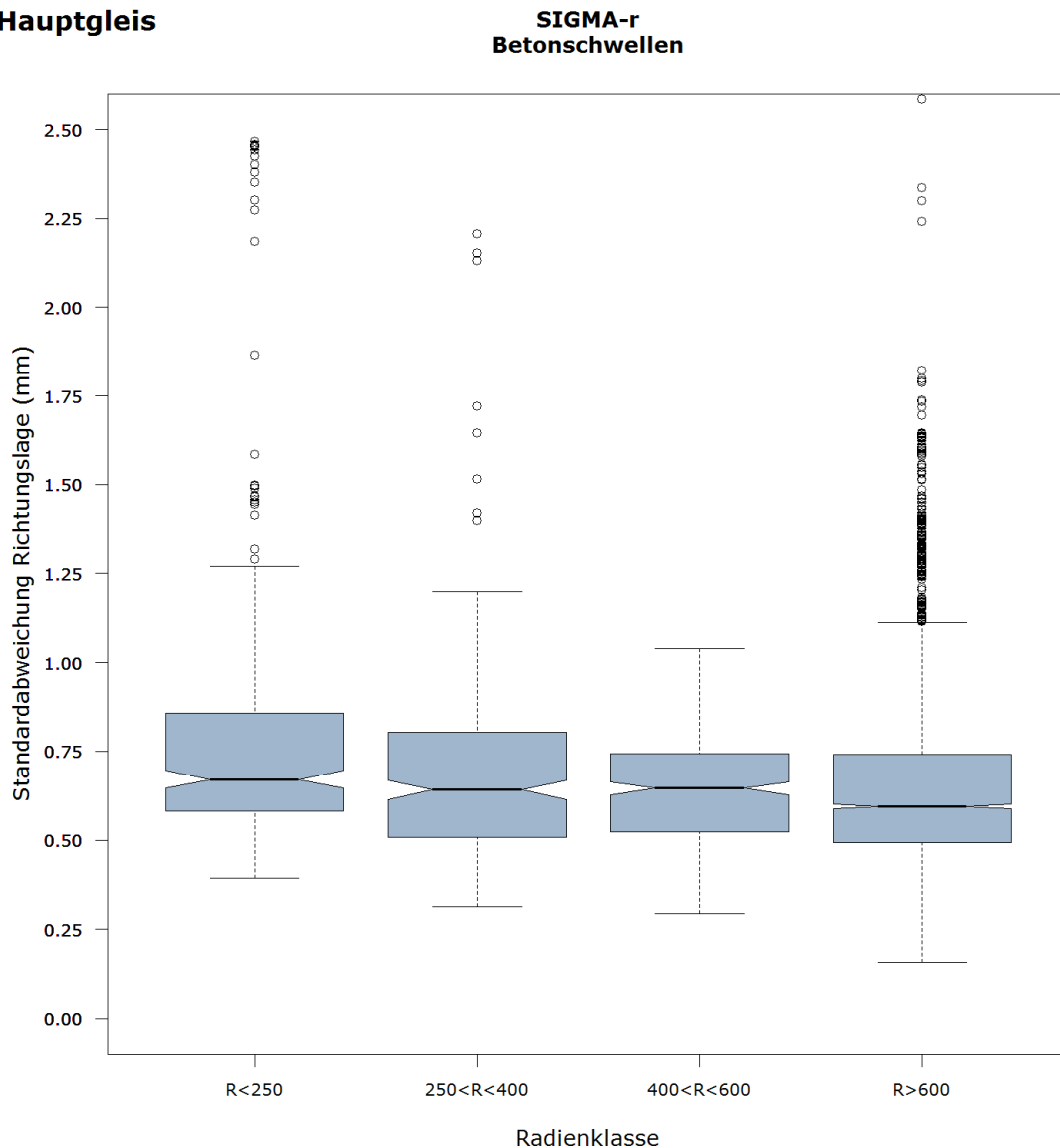


Abbildung 6.9 SIGMA-r abhängig von Radienklassen und Betonschwellen

Bei den Betonschwellen ist erkenntlich, dass bei geringeren Radien die SIGMA-r Werte abnehmen. Durch die hohe Beanspruchung im Bogen bei Radien kleiner 250 m kommt es zu einem gering erhöhten Richtungsfehler. Da die Holzschwellen einen geringeren Quer-verschiebewiderstand aufweisen, werden bei der GKB keine Holzschwellen in engen Bögen eingesetzt. Laut Abbildung 6.10 sind sie erst ab einer Radienklasse  $400\text{m} < R < 600\text{m}$  zu finden. Ein Vergleich mit der Abbildung 6.9 lässt erkennen, dass die SIGMA-r Werte der Holzschwelle höher liegen als der, der Betonschwelle. Durch diese Gegenüberstellung kann die Hypothese 2 bestätigt werden.

### Graz-Köflach Hauptgleis

### SIGMA-r Holzschwellen

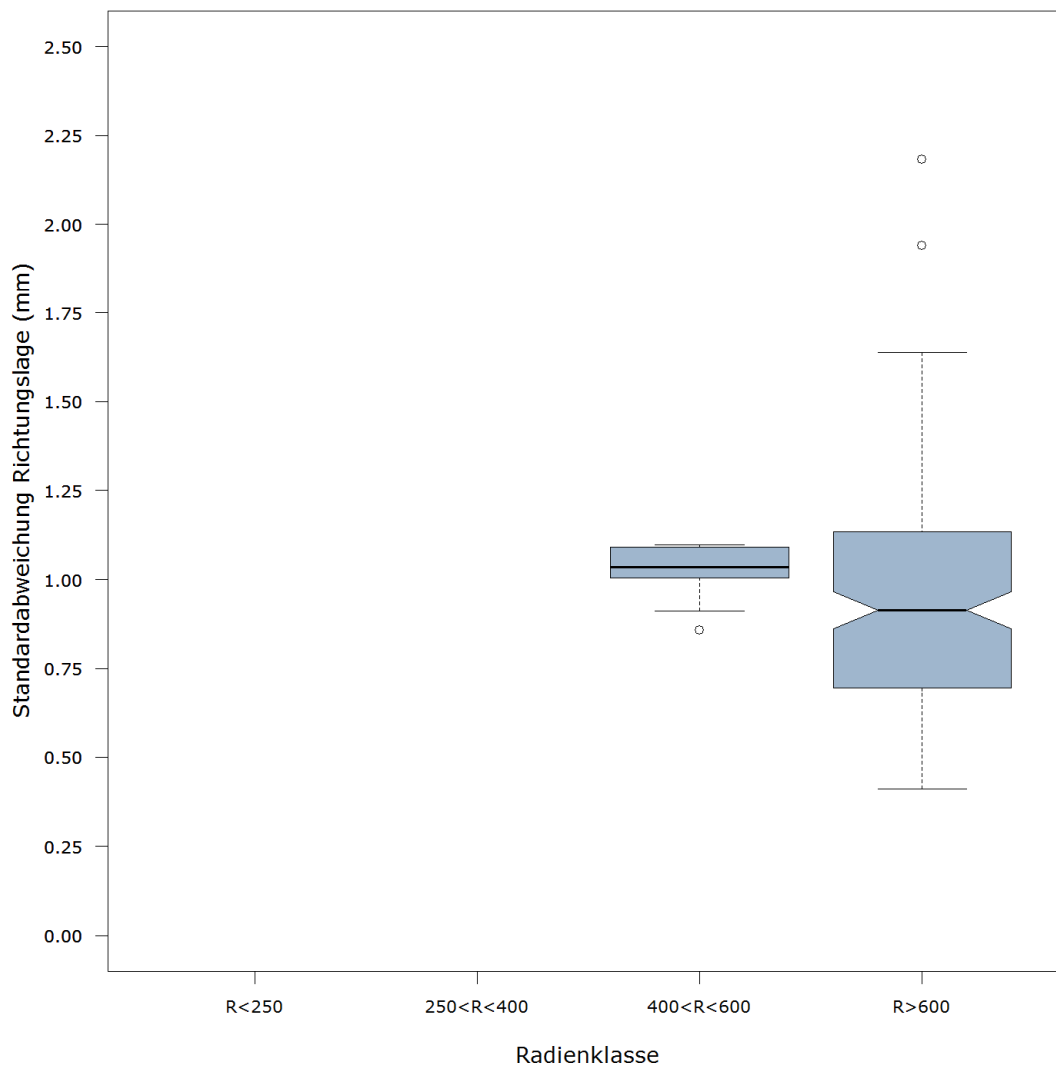


Abbildung 6.10 SIGMA-r abhängig von Radienklassen und Holzschwellen



Strebt man den Vergleich zwischen dem Höhenfehler (SIGMA-h) und dem Richtungsfehler (SIGMA-r) an, so kann eine dritte Hypothese formuliert werden:

**Hypothese 3:** „Durch einen Höhenfehler wird automatisch ein Richtungsfehler und umgekehrt verursacht.“

Mit Hilfe der Abbildung 6.11 kann ein Zusammenhang festgestellt werden. Bei einer erhöhten horizontalen Standardabweichung kann ebenso eine vertikale Verschiebung des Gleises erfolgen.

### Graz-Köflach Hauptgleis

### SIGMA-r ~ SIGMA-h

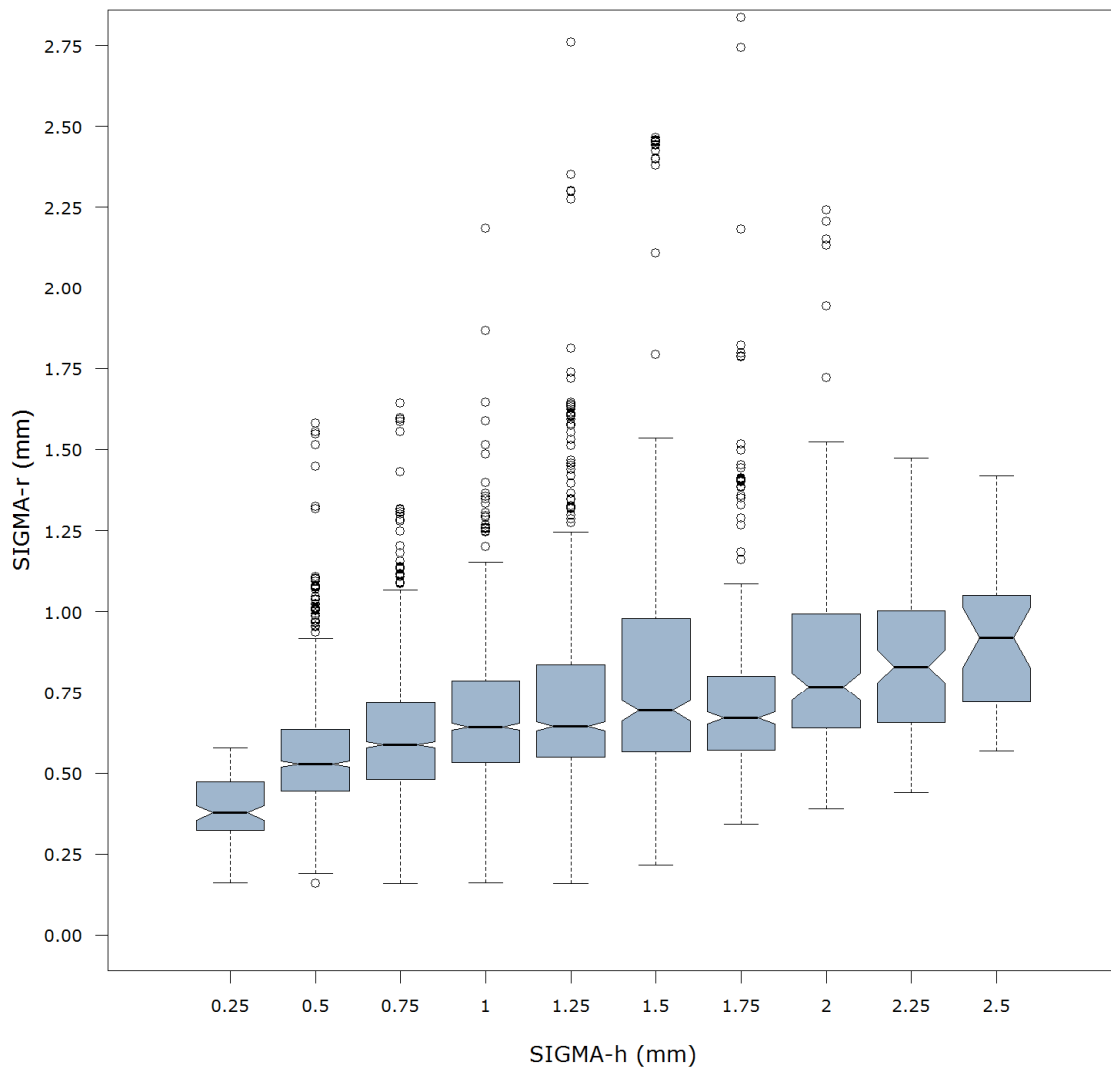


Abbildung 6.11 SIGMA-r ~ SIGMA-h

### 6.2.3 MDZ-a Ziffer

In die Berechnung der MDZ-Zahl fließen Einflusslänge, die zulässige Höchstgeschwindigkeit (VzG) und die Auswirkung der Gleisgeometriedaten, wie mittlere Höhen- und Richtungslage und die gegenseitige Höhendifferenz der Schiene, auf das Fahrzeug mit ein und wird in der Formel 6.4 mathematisch abgebildet. Mit den Gleisgeometriedaten können Beschleunigungen, die im Wagenschwerpunkt eines einfachen Wagenmodells auftreten, berechnet werden (siehe Abbildung 6.12). Obwohl in das Gleisanalysesystem ADA II die Geschwindigkeit einwirkt, ist der berechnete gleitende Wert MDZ-a über eine Einflusslänge von 100 m geschwindigkeitsunabhängig, d.h., dass die MDZ-a Ziffern entlang der Strecke mit unterschiedlichem VzG vergleichbar sind.

Die MDZ-a Ziffer wird, wie folgt, berechnet: [14]

$$MDZ - a = c * \frac{1}{L} * V^{0,65} * \sum_{i=1}^L \sqrt{(v')^2 + (\Delta h + \Delta \ddot{u})^2} \quad (\text{Formel 6.4})$$

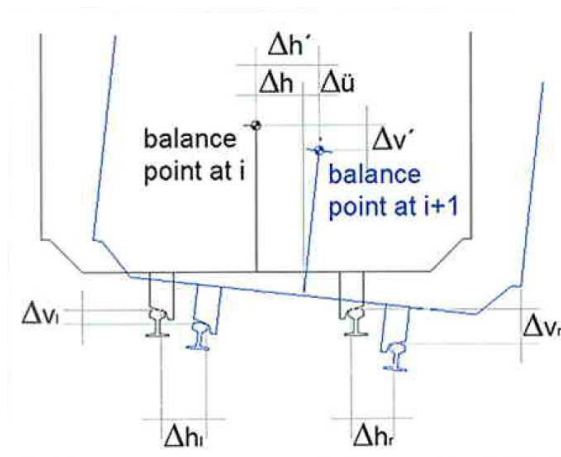


Abbildung 6.12 ADA II – Prinzipskizze zur Berechnung von MDZ-a (Anlehnung an [14])

Hingegen ist bei den vertikalen und horizontalen Standardabweichungen ein solcher Vergleich nicht zulässig, da sie von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abhängen. Herrscht auf einem Abschnitt ein kleiner SIGMA-h Wert, so kann der Abschnitt mit einer höheren Geschwindigkeit befahren werden als bei größerem SIGMA-h [14].

Anhand der Abbildung 6.13 sind die kumulierten Häufigkeiten der Messungen für die MDZ- a Ziffer grafisch dargestellt. Durch die Summenkurve ist die große Spannweite des Wertebereichs ersichtlich. Dieser Wertebereich erstreckt sich von -4 bis -30 (-), dadurch verflachen sich die Kurven der Messfahrten. Exemplarisch wird wieder die Messfahrt von April 2011 näher betrachtet. 50 % der MDZ-a Werte sind größer als -10,5 (-).

### Graz-Köflach Hauptgleis

### MDZ-a Ziffer

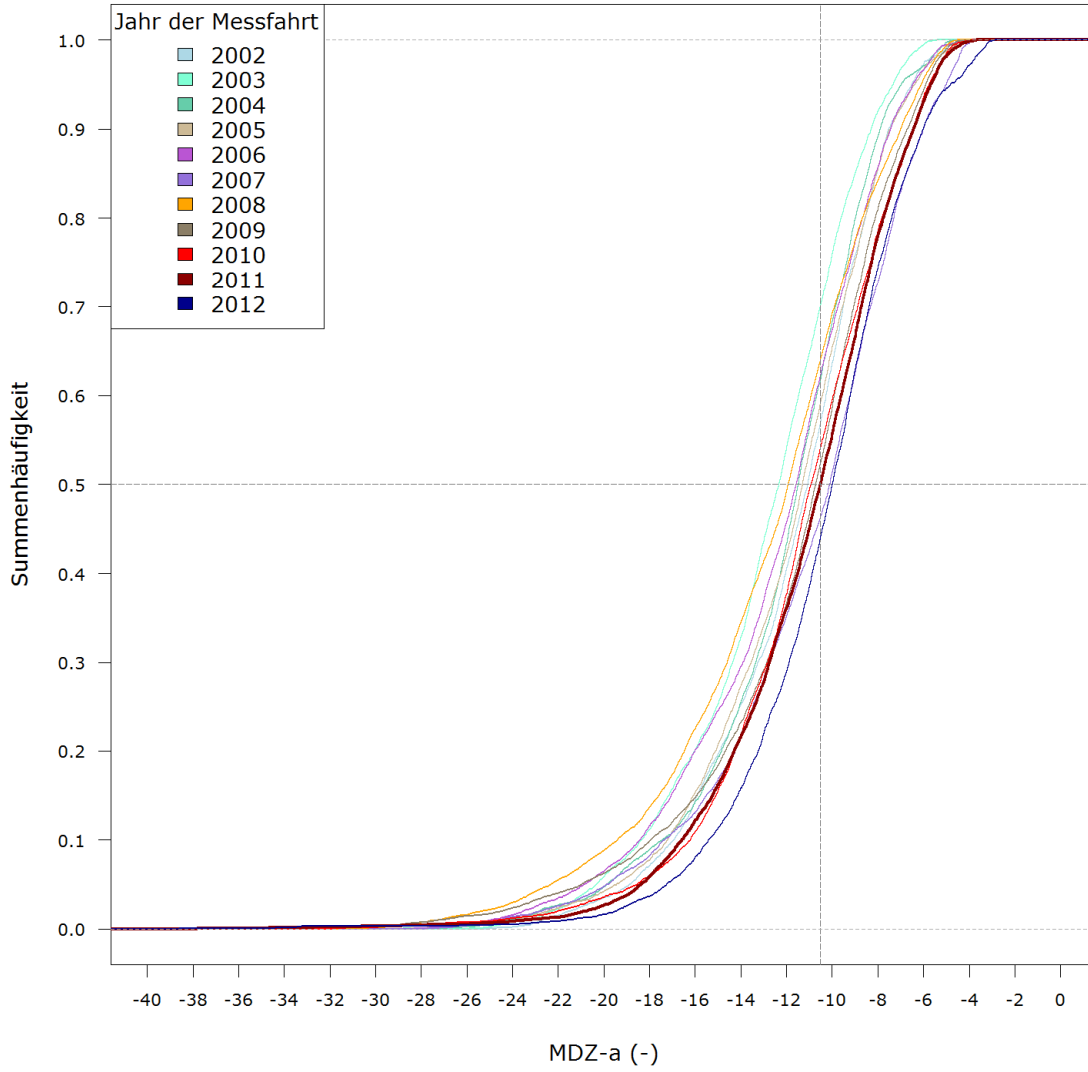


Abbildung 6.13 Summenhäufigkeit MDZ-a

## Graz-Köflach Hauptgleis

### MDZ-a Ziffer

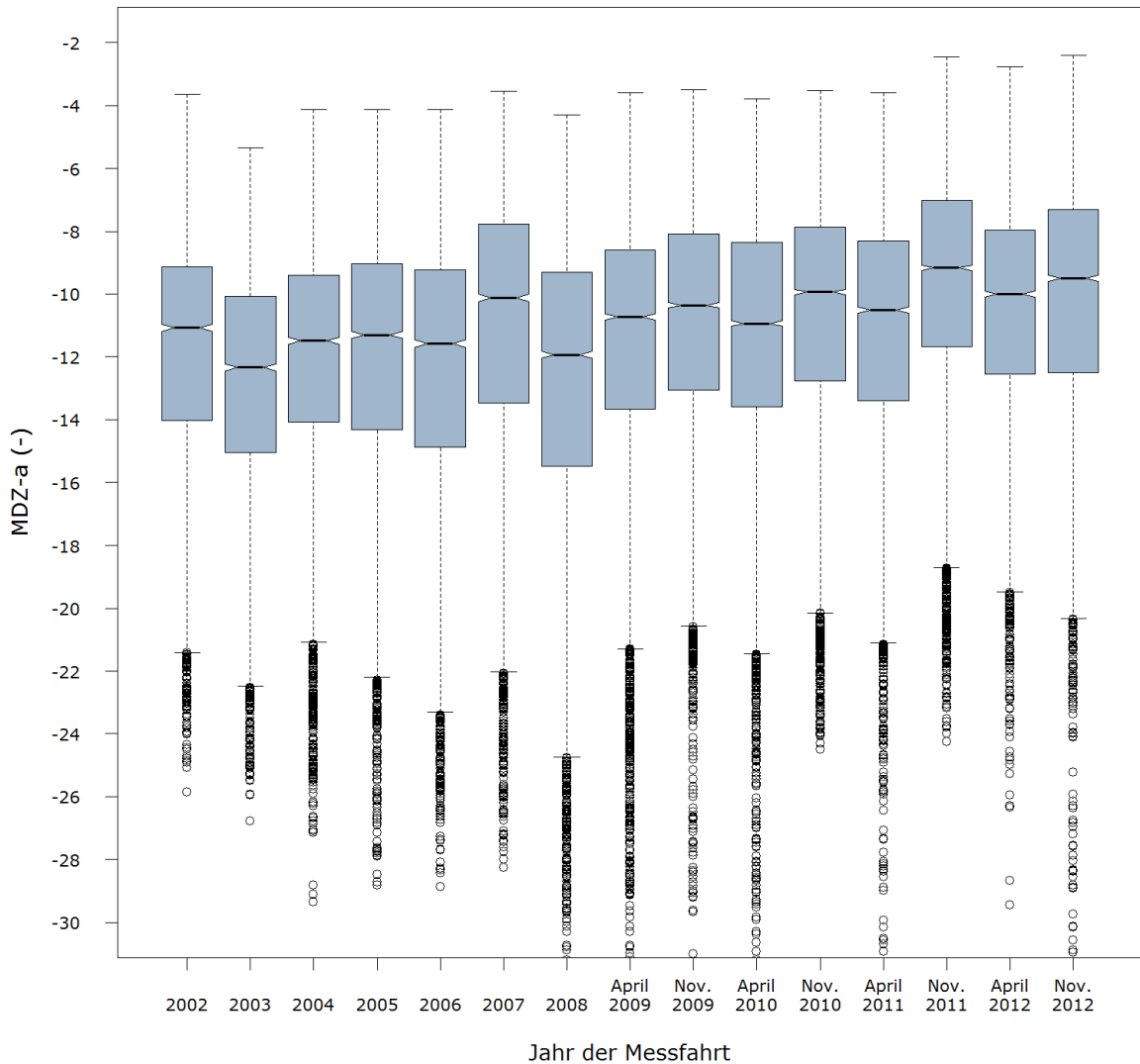


Abbildung 6.14 Jährlicher MDZ-a Verlauf

Obenstehend (Abbildung 6.14) wird in einer Boxplot-Darstellung der jährliche MDZ-a Verlauf abgebildet. Da, sowohl Höhen- wie auch Richtungslage des Gleiskörpers in die MDZ-a Ziffer eingehen, erhält man von 2002 bis 2006 eine Verschlechterung und ab 2008 eine Verbesserung der Gleislage. Wie bereits im Vorfeld erläutert wurde, ist die Messfahrt 2007 als Ausreißer definiert. Auswirkungen auf den Gleiszustand wurden im Kapitel 6.2.1 beschrieben.

Nach der Auswertung der Qualitätskennwerte kann eine Gleisübersicht in 2.500 Meter-Abschnitte erstellt werden. Die Gleisübersicht wird auf zwei Blättern dargestellt. Das erste Blatt enthält das Jahr der Messfahrt mit den SIGMA-h, SIGMA-r und MDZ-a Werten sowie Informationen über den MDZ-Einsatz aller bekannten Jahre und Oberbaudaten, wie Schwellentyp, Trassierungselement und gegebene Störstellen. Zu den Störstellen zählen:

- Bahnhof
- Brücke
- Weiche
- Tunnel
- Eisenbahnkreuzung (EK)

Diese Einbauten verursachen durch eventuelle Steifigkeitsunterschiede Einzelfehler. Mit Hilfe ihrer Lokalisation, kann ein Ausschlag der Qualitätskenngrößen erklärt werden.

Die Vorgehensweise und die Berechnung der Qualitätswerte wird im Kapitel 6.3.2 näher erörtert.

Um einen Überblick über die grafische Auswertung zu erhalten, wird ein Ausschnitt aus den Blättern 1 und 2, im Bereich von km 7.500 bis km 10.000, auf den Seiten 70 und 71 dargestellt.

Das erste Blatt der Übersicht beinhaltet die Messsignale aller Messfahrten, die durchgeführten Stopfgänge und Oberbauinformationen, wie Schwellentyp, Trassierungselement mit Radienangabe und Störstellen.

Auf dem Blatt 2 werden die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, das Krümmungsband, und das Schwelleneinbaujahr abgebildet.

Gleislagequalität

**Graz-Köflach - Blatt 1**  
**km 7.500 - km 10.000**

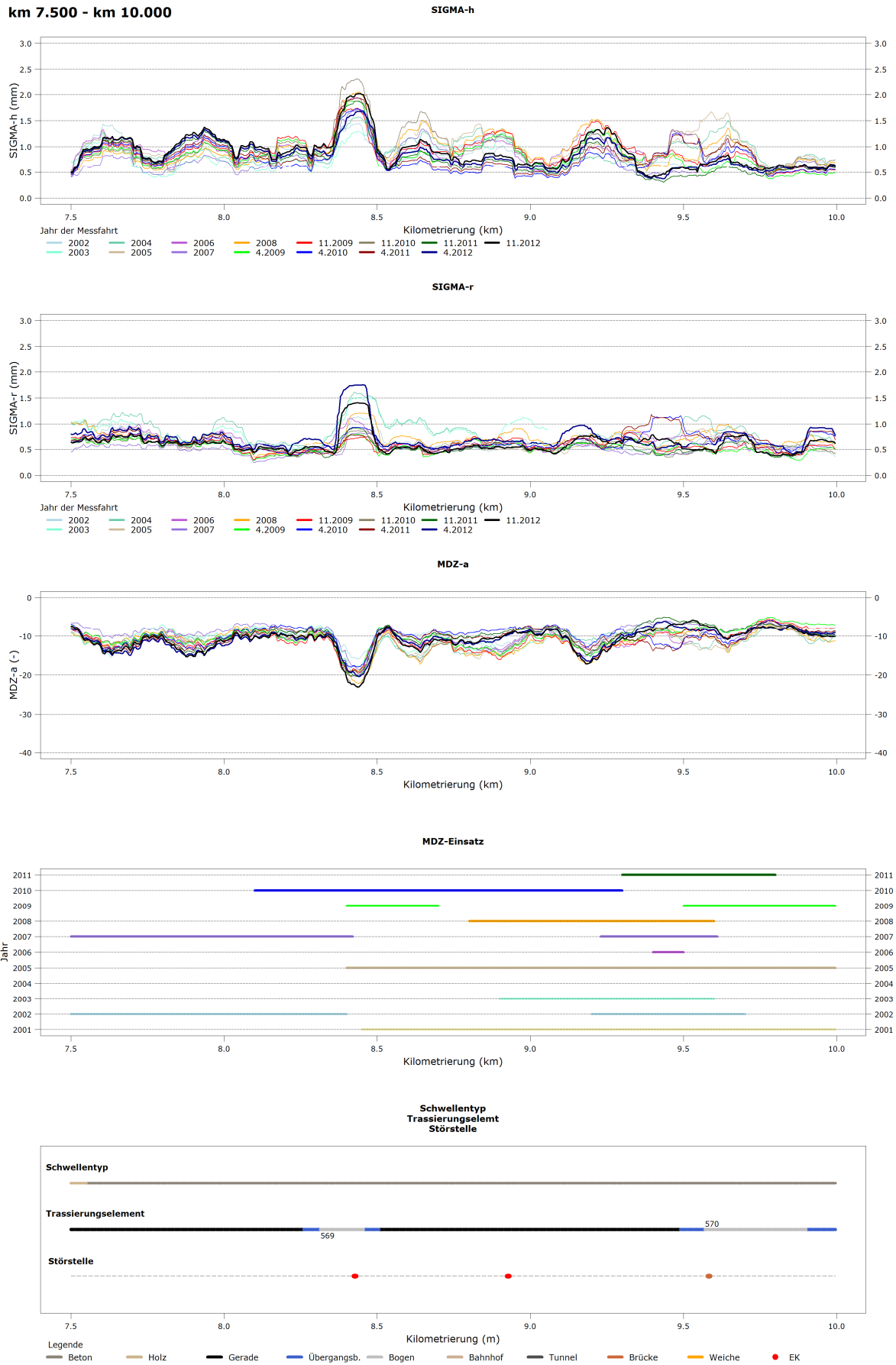
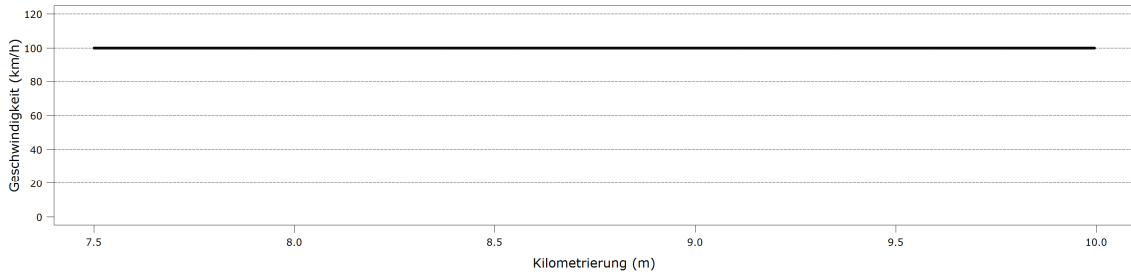


Abbildung 6.15 Übersicht Gleislage km 7.500 - km 10.000 (Blatt 1)

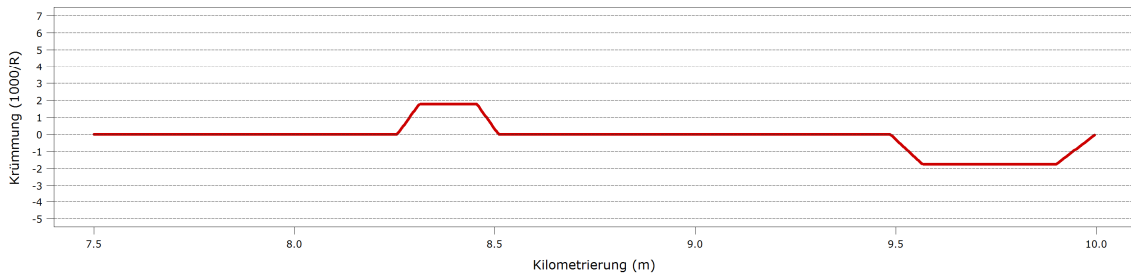
Gleislagequalität

**Graz-Köflach - Blatt 2**

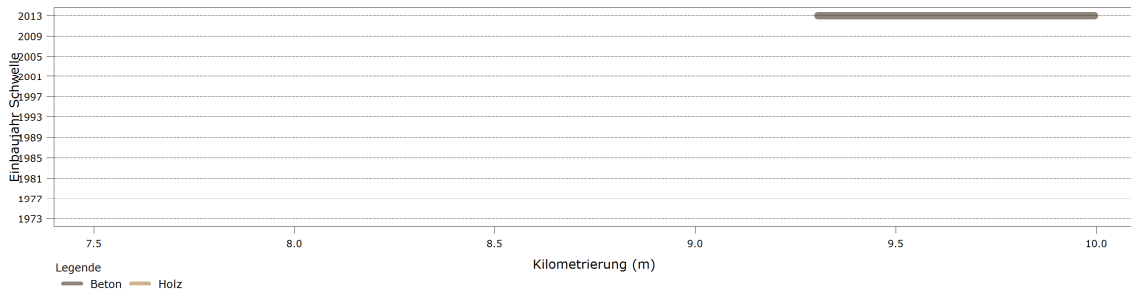
Vz6



Kümmungsband



Schwelleneinbaujahr



Legende  
— Beton — Holz

Abbildung 6.16 Übersicht Gleislage km 7.500 - km 10.000 (Blatt 2)

Werden die SIGMA-h Verteilungen in den unterschiedlichen Streckenbereichen miteinander verglichen, erhält man die unten angeführte Darstellung. Auf freier Strecke ist der Gleisfehler in Längshöhe am geringsten, hingegen im Weichenbereich, da er als Störstelle definiert wird, am größten.

### Graz-Köflach Hauptgleis

#### Standardabweichung Längshöhe

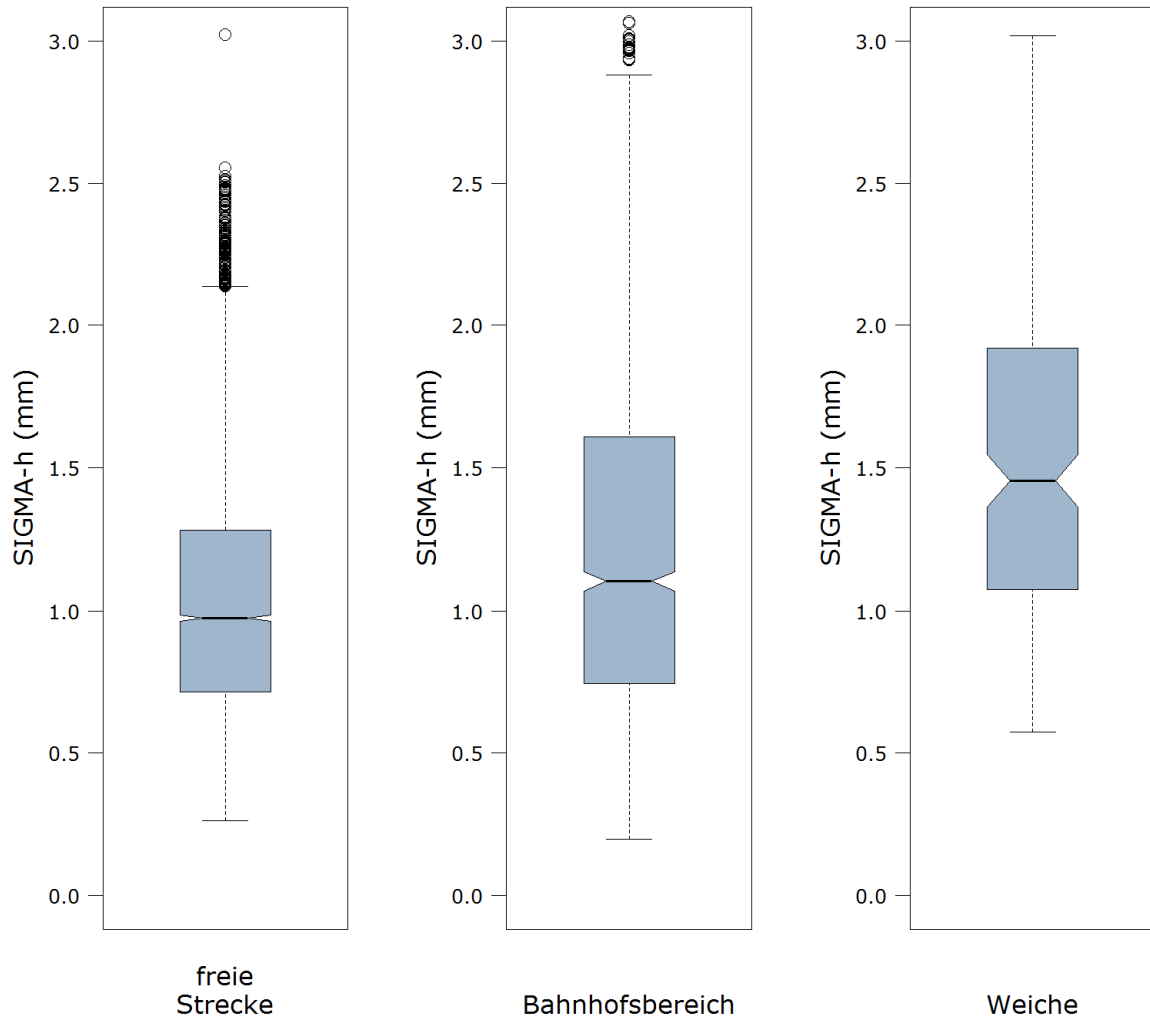


Abbildung 6.17 SIGMA-h Messjahr April 2011 – Streckenbereiche



Vergleicht man nun die Boxplot-Auswertungen der Komfortziffer MDZ-a (Abbildung 6.18), erkennt man, dass die Bahnhofsbereiche eine bessere Gleislagequalität aufweisen als auf freier Strecke. Das liegt vor allem daran, dass der Bahnhofsbereich mit niedrigeren Geschwindigkeiten angefahren wird, was sich in der MDZ-a Ziffer widerspiegelt.

## Graz-Köflach Hauptgleis

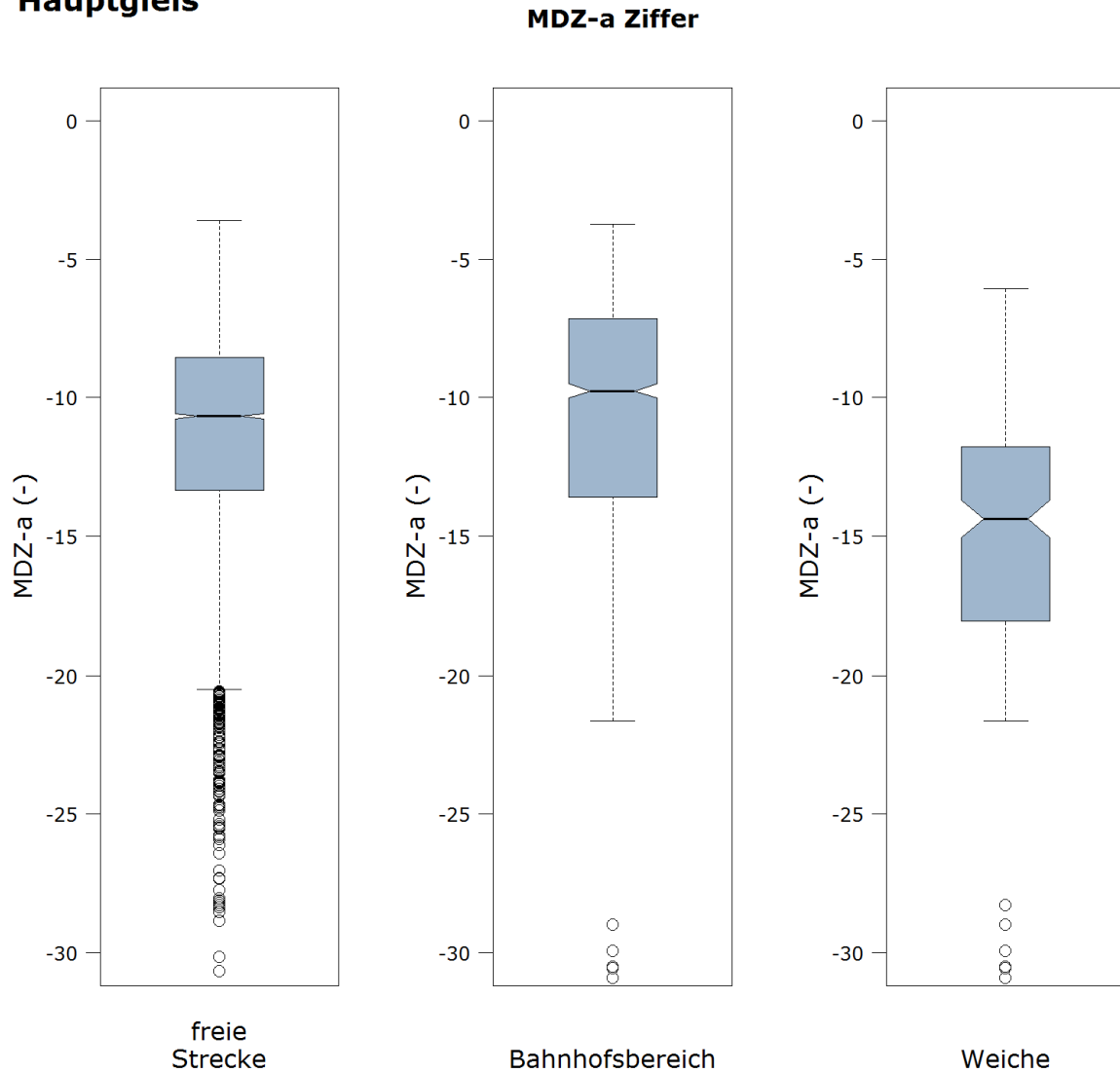


Abbildung 6.18 MDZ-a Messjahr April 2011 - Streckenbereiche

## 6.3 Zeitreihenanalyse

Für die Durchführung der Zeitreihenanalyse werden folgende Informationen der Strecke Graz-Köflach herangezogen:

- I Ausbau- und Einbauqualitäten von SIGMA-h, SIGMA-r und MDZ-a auf Beton- und Holzschwellen
- I Querschnittsbetrachtung mit Qualitätskennwerten SIGMA-h und MDZ-a
- I Gleisverhalten abhängig vom Oberbualter

### 6.3.1 Ausbau- und Einbauqualität

Der Vergleich der Ausbau- und Einbauqualität anhand von Querschnitten stellt den Versuch dar, die Qualität nach einer Gleisneulage bewerten zu können.

Für diese Beurteilung werden alle Kennziffern in Bezug auf die Ausbau- und Einbauqualität genauer untersucht. Da keine Informationen über den Schwellentyp vor einer Gleisneulage bekannt sind, wird die Qualität nach Einbau der Schwelle für Beton- und Holzschwellen bestimmt. Dazu wird die Datei nach Schwelleneinbaujahren zwischen 2003 und 2011 gefiltert, da nur diese Gleisneulagen mit den vorhandenen Messfahrten zusammenhängen.

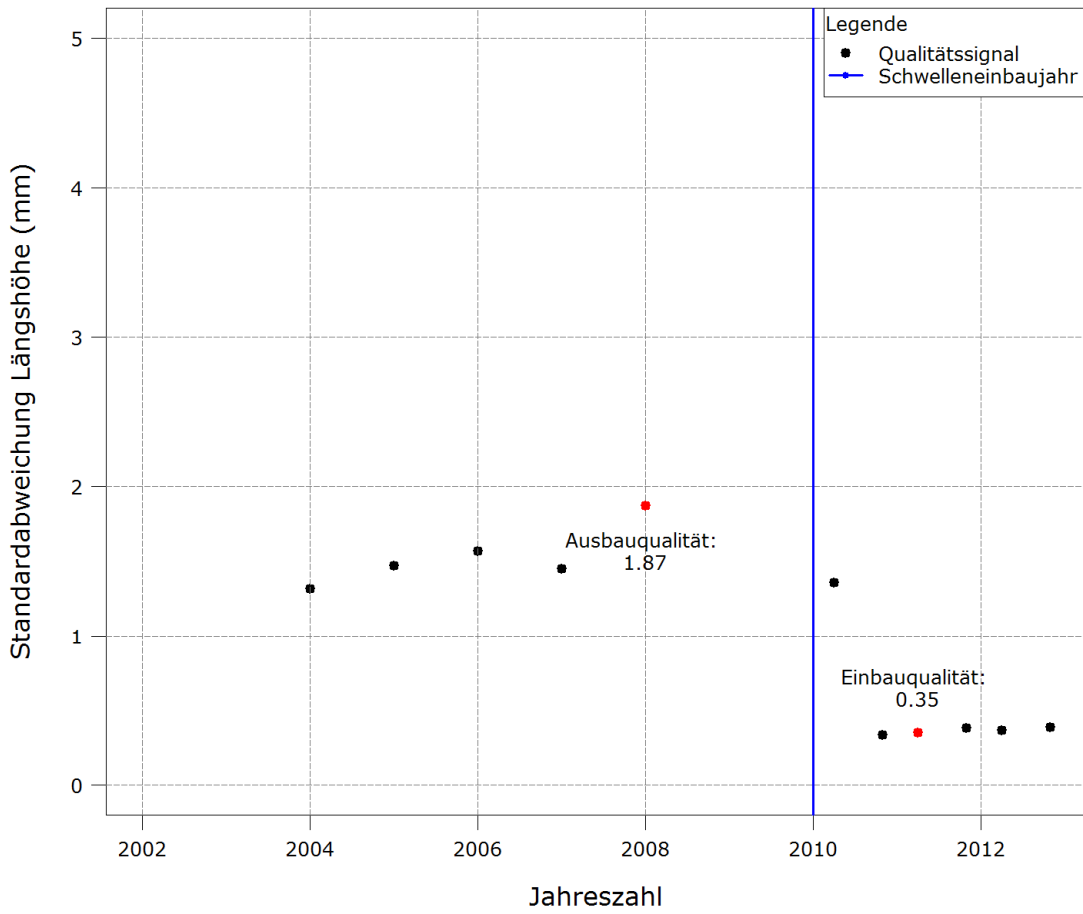
Nachstehende Abbildung 6.19 soll die schriftliche Erläuterung grafisch veranschaulichen. Für die Bestimmung der Ausbau- und Einbauqualität wird normalerweise der Mittelwert der Qualitätssignale bestimmt, jedoch ist diese Methode in diesem Fall nicht möglich, da die Anzahl der Messpunkte nicht immer ausreichend ist beziehungsweise auf die Ortung einer Gleislageverbesserung durch den MDZ-Einsatz aus Gründen der Vereinfachung verzichtet wird.

Infolgedessen wird für die Ausbauqualität nur das letzte Qualitätssignal vor einer Gleisneulage herangezogen. Hingegen muss für die Einbauqualität folgende Bedingung gelten: Nachdem das genaue Datum der Gleisneulage nicht bekannt ist, werden Qualitätswerte, die sich innerhalb eines Jahres nach der Gleisneulage befinden, vernachlässigt. Somit kann auch gewährleistet werden, dass die Anfangssetzungen nach dem Einbau der Schwellen abklingen und die Einbauqualität nicht negativ beeinflussen.

**Graz-Köflach**

**Querschnitt  
km 2.1**

**SIGMA-h**



Schwellentyp: Beton

Abbildung 6.19 Ausbau- Einbauqualität SIGMA-h Querschnitt km 2.100

## 6.3.1.1 SIGMA-h

Die Standardabweichung in Längsrichtung wird in den Boxplot-Auswertungen (Abbildung 6.20) in Form von Ausbau- und Einbauqualität dargestellt. Die Einbauqualität wird jeweils für Beton- und Holzschwellen bestimmt, dabei weisen die Betonschwellen eine bessere Gleislagequalität nach der Gleisneulage auf als Holzschwellen. Allerdings handelt es sich bei den Holzschwellen um einen kurzen Bereich im Graz Köflacherbahnhof.

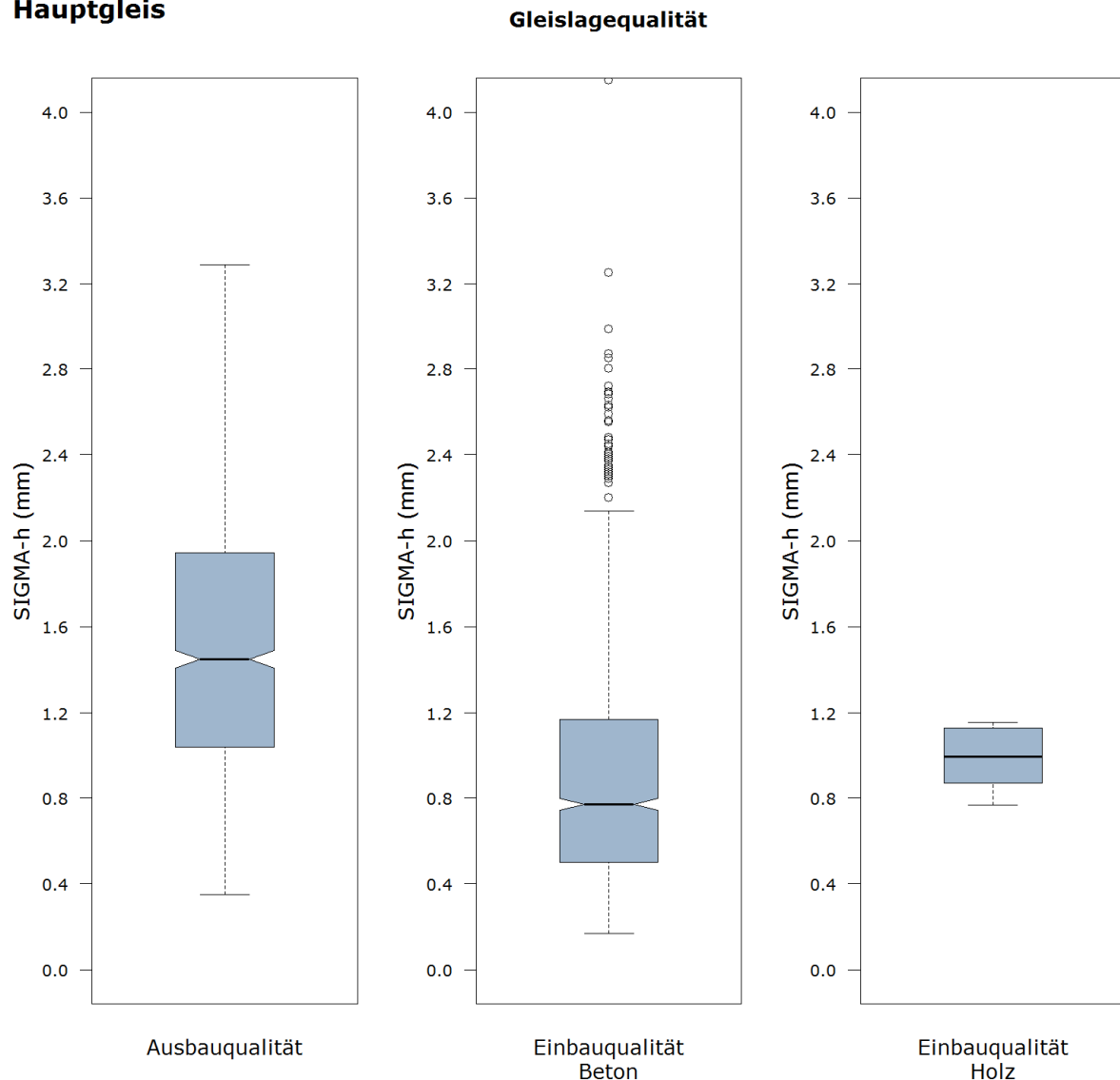
**Graz-Köflach  
Hauptgleis**


Abbildung 6.20 Boxplot Ausbau- und Einbauqualität - SIGMA-h

## 6.3.1.2 SIGMA-r

Betrachtet man nun die Auswertung der Ausbau- und Einbauqualität der Standardabweichung in Richtungslage (Abbildung 6.21), lässt sich auf Anhieb die schlechte Einbauqualität von Holzschwellen erkennen. Da sich jedoch die Holzschwellen zur Gänze im Bahnhofsbereich befinden und vor allem als Weichenschwellen verwendet werden, reagieren Gleisfelder in Richtungslage besonders sensibel im Weichenbereich. Aus diesem Grund wird die Boxplot-Darstellung für die Einbauqualität der Holzschwellen mit einem Stern gekennzeichnet und ist für einen Vergleich nicht aussagekräftig.

Der Richtungsfehler vor der Gleisneulage hat sich nach Einbau der Betonschwellen um die Hälfte minimiert.

### Graz-Köflach Hauptgleis

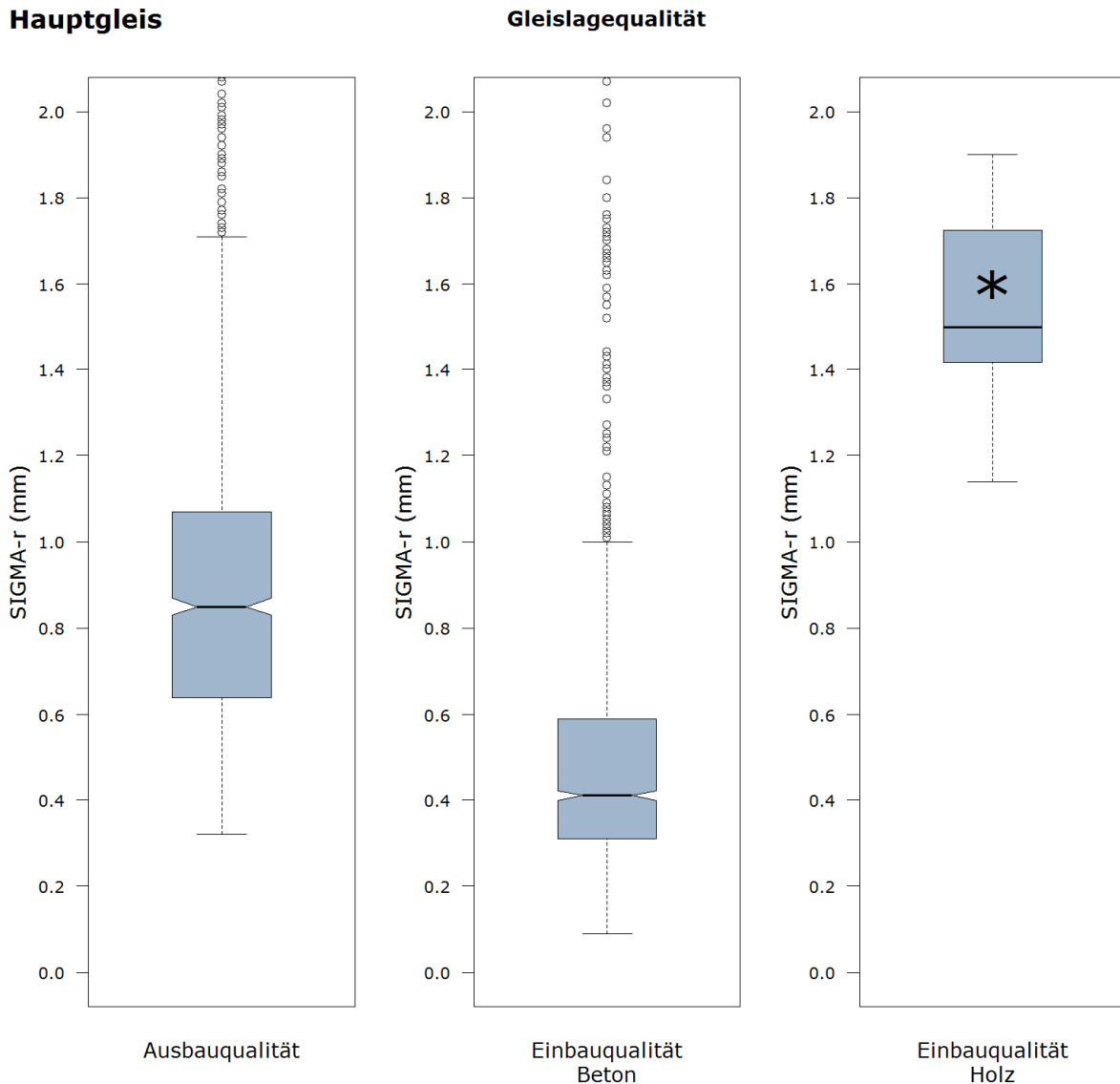


Abbildung 6.21 Boxplot Ausbau- und Einbauqualität - SIGMA-r

### 6.3.1.3 MDZ-a

Nachstehend wird die MDZ-a Ziffer vor und nach einer Gleisneulage untersucht. Eine Gegenüberstellung der Ausbau- und der Einbauqualität von Betonschwellen lässt eine deutliche Verbesserung verzeichnen.

#### Graz-Köflach Hauptgleis

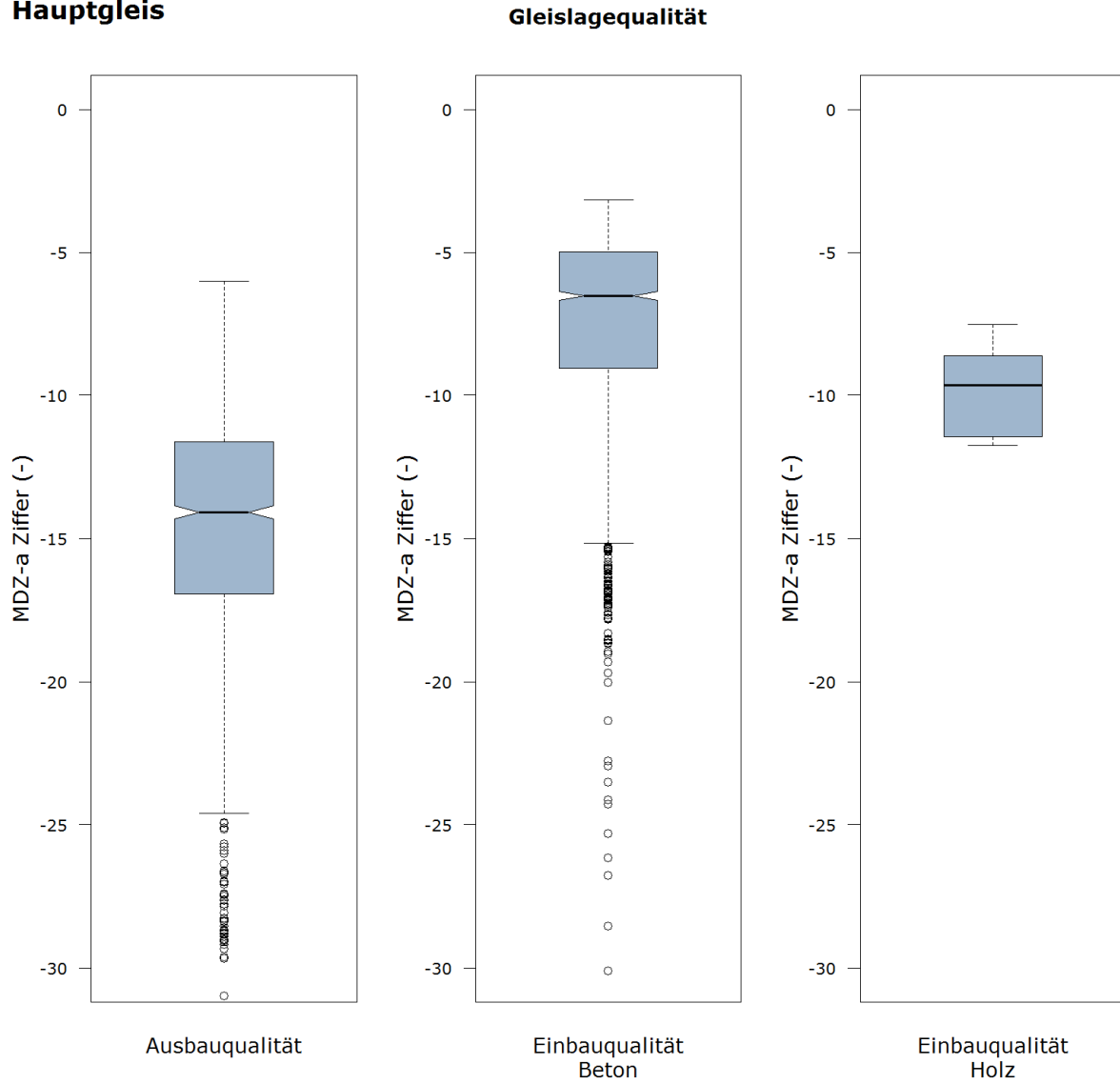


Abbildung 6.22 Boxplot Ausbau- und Einbauqualität - MDZ-a

### 6.3.2 Streckenquerschnitt

Betrachtet man die Gleislage nicht global, sondern anhand von Querschnitten über die Zeit, so kann der Verlauf der Qualitätskennwerte sowie die Veränderung der Gleislagequalität mittels Messjahre dargestellt werden. Dabei werden in „R-Project“ Querschnitte in 50-Meter-Abständen erstellt. In einer Querschnittsbetrachtung wird immer nur eine Kennziffer berücksichtigt.

#### 6.3.2.1 SIGMA-h

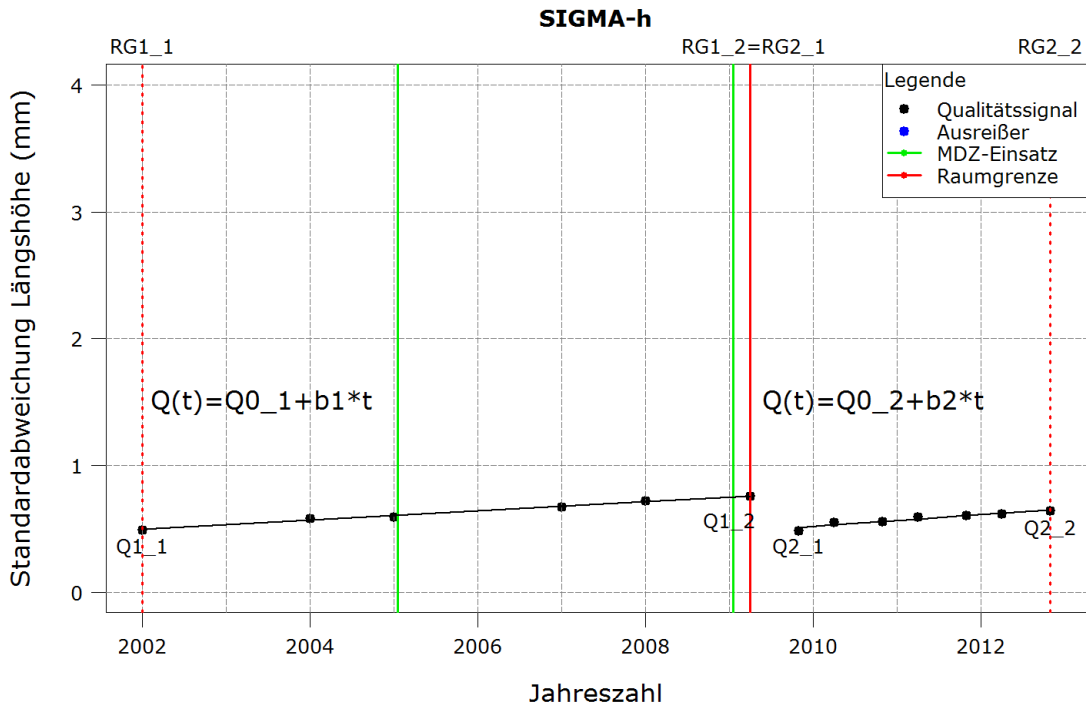
Abbildung 6.23 soll als Beispiel für eine Querschnittsbetrachtung dienen. Auf der Abszisse sind die Messjahre und auf der Ordinate die dazugehörigen SIGMA-h Werte in Millimeter dargestellt. Ebenso werden alle querschnittsrelevanten Daten, wie Schwellen- und Schieneninformationen, Störstellen, die zulässige Höchstgeschwindigkeit und die Anzahl der Stopfgänge, aufgelistet. Somit lassen sich Gleislagefehler in Längsrichtung, die durch - beispielsweise Störstellen, wie Eisenbahnkreuzungen hervorgerufen werden - schneller verifizieren.

Nach Eingabe der Gleisinformationen sowie der Qualitätssignale werden sogenannte Raumgrenzen hinzugefügt, da bei den MDZ-Einsätzen keine genauen Durchführungsdaten vorliegen und viele Stopfgänge keine deutliche Auswirkung auf die Gleislage haben. Ein Grund dafür kann ein auftretender Fehlerwert in der Messfahrt sein, demzufolge der tatsächliche Verlauf der Gleislagequalität nicht bestimmt werden kann. Des Weiteren können aufgrund von Verwindungsfehlern zusätzliche Stopfgänge durchgeführt werden. Diese Ursache für den MDZ-Einsatz wurde bislang in dieser Masterarbeit außer Acht gelassen. Werden die Verwindungsfehler behoben, führt das zu keiner zusätzlichen Verbesserung der Standardabweichung in Längshöhe und Richtungslage, wie es beim Querschnitt, siehe Abbildung 6.23, der Fall ist.

Aufgrund dieser Problematik dienen Raumgrenzen dem Zweck, mögliche Stopfgänge, die eine Verbesserung der Gleislagequalität aufweisen, zu ersetzen.

### Graz-Köflach

### Querschnitt km 10



- |                           |               |
|---------------------------|---------------|
| Schwellentyp: Beton       | VzG: 100 km/h |
| Schwelleneinbaujahr: 2013 | Brücke: -     |
| Schienenbaujahr: 2013     | Weiche: -     |
| Schienenprofil: 60E1      | EK: -         |
| Schienengüte: R260        | Tunnel: -     |
| Anzahl MDZ-Einsatz: 2     | Bahnhof: -    |
| Anzahl Raumgrenze: 1      |               |
| Gütekriterium: -1         |               |

Abbildung 6.23 SIGMA-h - Querschnitt km 10.000 mit Begriffsdefinition

Die Raumgrenze wird unter der Voraussetzung erstellt, dass zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messsignalen eine Differenz ( $M_n - M_{n+1}$ ) von größer 0,15 mm als Grenzwert dient. Des Weiteren werden die erste und die letzte Messfahrt als Raumgrenze angesehen, um einen klaren Raum zu definieren. Diese werden nicht als rote Linie gekennzeichnet. Zur besseren Veranschaulichung werden sie in der Abbildung 6.23 zusätzlich als unterbrochene Linien gesetzt. Die Grafik soll außerdem dazu dienen, die wichtigsten Begriffe, die zur weiteren Analyse und zur Berechnung des Verlaufes der Gleislagequalität benötigt werden, grafisch zu erläutern:



## Gleislagequalität

- I RG1\_1: Raumanfang des 1. Raums
- I RG1\_2: Raumende des 1. Raums
- I RG2\_1: Raumanfang des 2. Raums (Raumende des 1. Raums ist gleichzeitig Raumanfang des 2. Raums)
- I RG2\_2: Raumende des 2. Raums
- I Q0\_1: Gleislagequalität zum Zeitpunkt  $t=0$  des 1. Raums (entspricht dem y-Achsenabschnitt  $d$  in der allgemeinen Geradengleichung)
- I Q0\_2: Gleislagequalität zum Zeitpunkt  $t=0$  des 2. Raums (entspricht dem y-Achsenabschnitt  $d$  in der allgemeinen Geradengleichung)
- I b1: Verschlechterungsrate des 1. Raums
- I b2: Verschlechterungsrate des 2. Raums
- I Q1\_1: Raumanfangsqualität des 1. Raums
- I Q1\_2: Raumendqualität des 1. Raums
- I Q2\_1: Raumanfangsqualität des 2. Raums
- I Q2\_2: Raumendqualität des 2. Raums

Auf die Darstellung von tiefgestellten Indizes ist verzichtet worden, da eine solche Schreibweise nicht mit dem Softwareprogramm „R-Project“ kompatibel ist.

Nachdem der Raumanfang (RG1\_1 bzw. RG2\_1) und das Raumende (RG1\_2 bzw. RG2\_2) definiert wurden, kann mit der Berechnung der Regressionsgeraden und der Qualitätswerte, unter Verwendung des linearen Ansatzes (Formel 6.2), begonnen werden. Laut Formel 6.2 ist die Regressionsgerade von der Betriebslast  $M$  abhängig, in diesem Fall jedoch vom Zeitpunkt  $t$ . Mit Hilfe der Gleichung der 1. Regressionsgeraden  $Q(t)=Q0\_1+b1\cdot t$  können die Qualitätswerte  $Q1\_1$  und  $Q1\_2$ , jeweils zum Raumanfangszeitpunkt  $t=2002$  und Raumendzeitpunkt  $t=2009.25$ , wie folgt, berechnet werden:

$$\text{Raumanfangsqualität:} \quad Q_{1\_1} = Q(t = 2002) = Q_{0\_1} + b_1 \cdot t$$

$$\text{Raumendqualität:} \quad Q_{1\_2} = Q(t = 2009.25) = Q_{0\_1} + b_1 \cdot t$$

Für die Berechnung der Raumanfangsqualität  $Q_{2\_1}$  und Raumendqualität  $Q_{2\_2}$  des 2. Raums wird die Gleichung der 2. Regressionsgerade  $Q(t)=Q_{0\_2}+b_2 \cdot t$  herangezogen. Dabei muss beachtet werden, dass zwar das Raumende des 1. Raums dem Raumanfang des 2. Raums entspricht, jedoch ist die Raumendqualität  $Q_{1\_2}$  nicht gleich die Raumanfangsqualität  $Q_{2\_1}$ . Somit darf nicht die  $RG_{2\_1}$  als Zeitpunkt  $t$  eingesetzt werden, sondern das erste darauffolgend gültige Jahr der Messfahrt ( $Q_{2\_1}$  zum Zeitpunkt  $t=2009.83$ ).

Das Ziel der Erstellung der Querschnitte in 5-Meter-Abständen ist, für jede Stationierung der Strecke, die Verschlechterungsraten und die Anfangs- und Endqualitäten innerhalb der Raumgrenzen zu berechnen, um in weiterer Folge mit Hilfe dieser Qualitätsparameter und des dazugehörigen Oberbualters, das Gleisverhalten (siehe Kapitel 6.3.4) bestimmen zu können.

Nach Berechnung der Qualitätswerte für jeden Querschnitt in 5-Meter-Abständen der Strecke, kann die Querschnittserstellung für die MDZ-a Ziffer begonnen werden.

### 6.3.2.2 MDZ-a

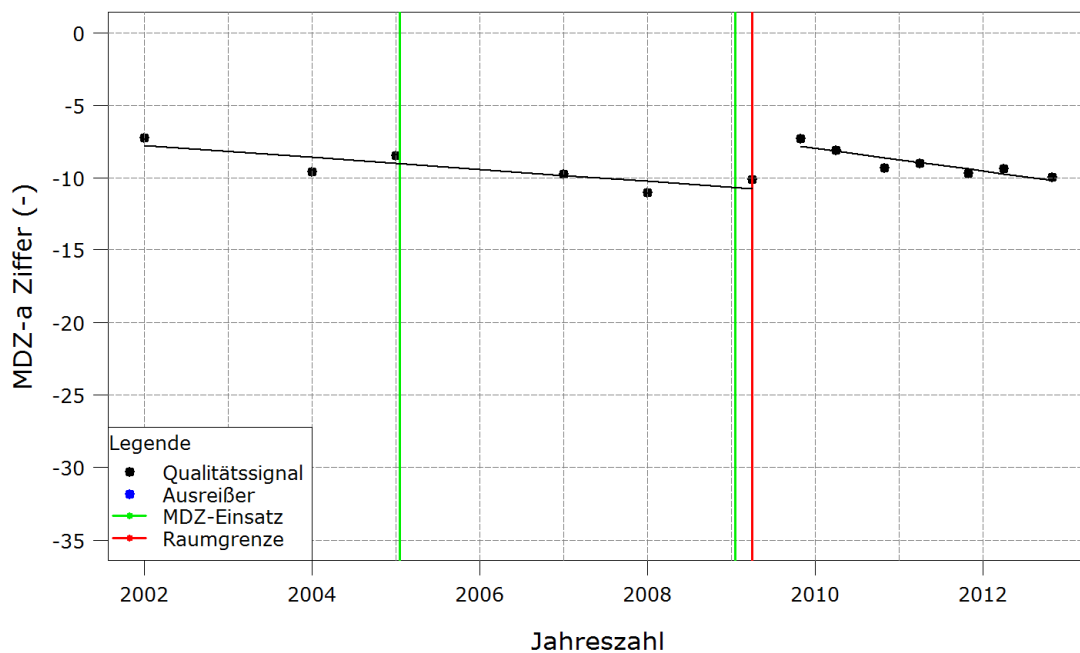
Die Querschnitte mit der MDZ-a Ziffer werden unter den gleichen Voraussetzungen erstellt, wie im Kapitel 6.3.2.1. beschrieben, lediglich der Grenzwert für die Raumgrenze wird mit -2,5 beziffert. Alle weiteren Komponenten werden im gleichen Zusammenhang verwendet.

Der Querschnitt ohne Begriffserklärung, der in der Abbildung 6.24 dargestellt wird, soll als Beispiel dienen.

## Graz-Köflach

### Querschnitt km 10

#### MDZ-a



Schwellentyp: Beton

VzG: 100 km/h

Schwelleneinbaujahr: 2013

Brücke: -

Schienenbaujahr: 2013

Weiche: -

Schienenprofil: 60E1

EK: -

Schienengüte: R260

Tunnel: -

Anzahl MDZ-Einsatz: 2

Bahnhof: -

Anzahl Raumgrenze: 1

Abbildung 6.24 MDZ-a - Querschnitt km 10.000

### 6.3.3 Gütekriterium

Um die Stopfeinsätze, die keine Auswirkung auf die Messwerte haben, bewerten zu können, wird ein Gütekriterium eingeführt. Das Gütekriterium wird pro Querschnitt, wie folgt, bestimmt:

$$\text{Gütekriterium} = \text{Anzahl Raumgrenzen} - \text{Anzahl Stopfgänge}$$

- Gütekriterium = 0

Beträgt die Anzahl der gewählten Raumgrenzen der Anzahl der tatsächlichen Stopfgänge, so erhält man ein Gütekriterium von 0. Das weist darauf hin, dass die Raumgrenzen optimal an das Gleisverhalten angepasst wurden und dadurch das berechnete Regressionsmodell treffend beschrieben wurde.

- Gütekriterium > 0

Ein positives Gütekriterium kann dadurch erreicht werden, wenn mehr Raumgrenzen gewählt wurden als aufgezeichnete MDZ-Einsätze innerhalb eines Querschnittes durchgeführt wurden. Eine Differenz in der Qualitätsziffer kann durch händisches Stopfen, wie beispielsweise im Weichenbereich, erfolgen. Ebenso ist es auch möglich, dass sich in diesen Streckenbereichen das Gleis nach einer Gesetzmäßigkeit verhält, die nicht beschrieben werden kann.

- Gütekriterium < 0

Weist der Querschnitt ein negatives Gütekriterium auf, so werden mehr Stopfeinsätze, die keine deutliche Auswirkung auf die Gleislage haben, durchgeführt, als Raumgrenzen gesetzt. Mögliche Gründe wurden im Kapitel 6.3.2.1 erläutert. Dadurch kann ein negatives Gütekriterium erklärt werden.

Nachfolgend wird das Gütekriterium mit Hilfe der Boxplot-Darstellung ausgewertet. Dabei liegen 50% aller Werte unter -1. Demnach sind in der Querschnittsbetrachtung mehr Stopfeinsätze eingetragen als definierte Raumgrenzen.

Das Gütekriterium wurde zwar zusätzlich für die nachstehenden Boxplot-Auswertungen auf Querschnitte mit einem Gütekriterium von +3 bis -3 eingegrenzt, jedoch konnte keine maßgebende Veränderung zu den Abbildungen (Abbildung 6.26 bis Abbildung 6.29) ohne Einschränkung des Gütekriteriums festgestellt werden. Daher dient es nur zur Bewertung der gesetzten Raumgrenzen und wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

### Graz-Köflach Hauptgleis

#### Gleisverhalten Gütekriterium

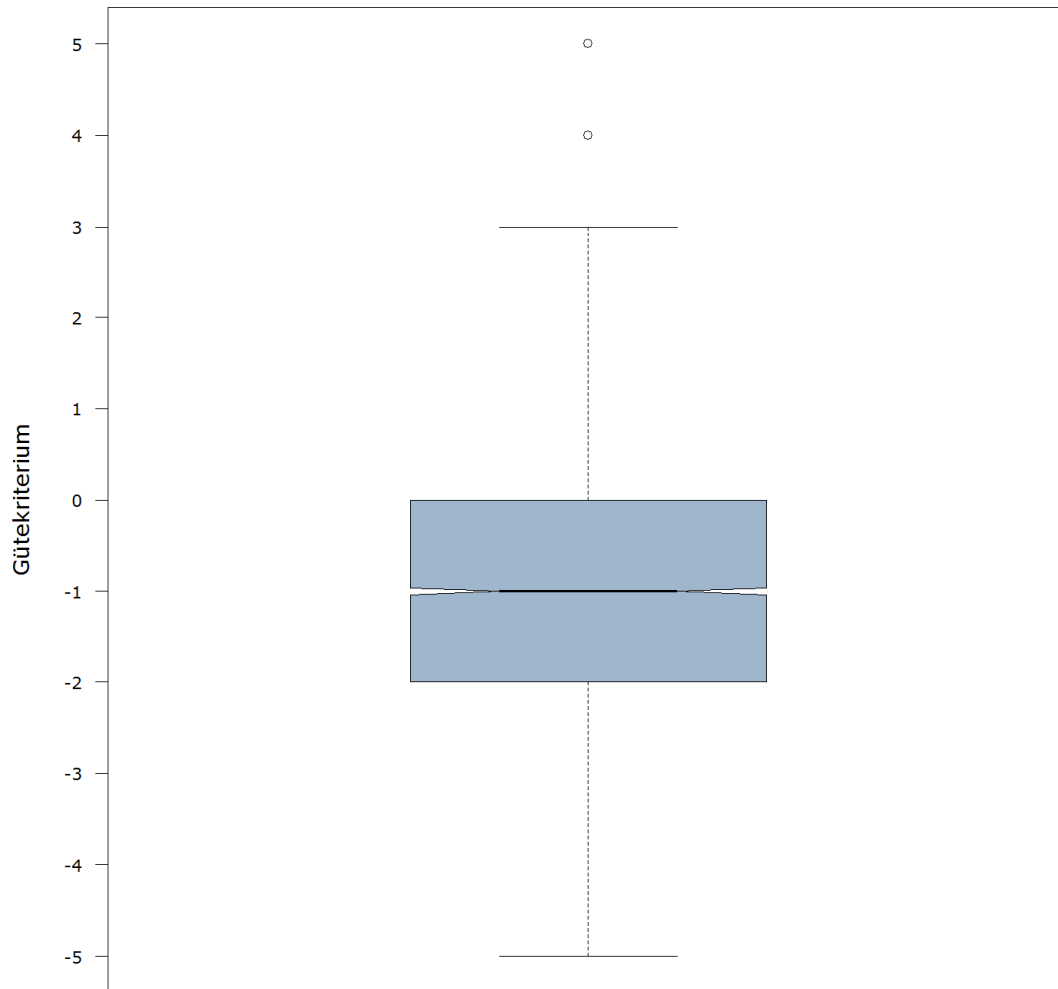


Abbildung 6.25 Boxplot Gütekriterium

### 6.3.4 Gleisverhalten

Nachdem alle Qualitätsparameter für die Kennziffern SIGMA-h und MDZ-a in Kapitel 6.3.2 berechnet wurden, kann das Gleisverhalten abhängig vom Oberbualter bestimmt werden.

In die Boxplot-Auswertungen fließen die gesamten Qualitätsparameter, die jeweils für einen Querschnitt berechnet wurden, mit ein. Das heißt, werden anhand eines Querschnitts verschiedene Verschlechterungsraten beziehungsweise Qualitäten für unterschiedliche Anfangszeitpunkte berechnet, können daraus unterschiedliche Oberbualter hergeleitet werden. Infolge dieser Herleitung kann das Gleisverhalten durch die Verschlechterungsrate  $b$  und durch die Anfangsqualität  $Q_1$  grafisch dargestellt werden.

#### 6.3.4.1 Verschlechterungsrate $b$

Abbildung 6.26 zeigt den Verlauf der Verschlechterungsrate von SIGMA-h über das Alter des Oberbaus. Ab der Gleisneulage ist eine kontinuierliche Verschlechterung der Gleislagequalität über die Nutzungsdauer zu erkennen. Bei Schwellen älter 30 Jahre wird jedoch eine Verbesserung verzeichnet. Eine nähere Betrachtung dieses Bereiches in der vorliegenden Datei ergibt, dass es sich um Bahnhofsbereiche beziehungsweise um Abschnitte vor Bahnhöfen handelt, die zum größten Teil BE 16-Schwellen aufweisen. Besonders gute Untergrundverhältnisse können ein Indiz für eine niedrige Verschlechterungsrate sein.

**Graz-Köflach  
Hauptgleis**

**Gleisverhalten  
SIGMA-h**

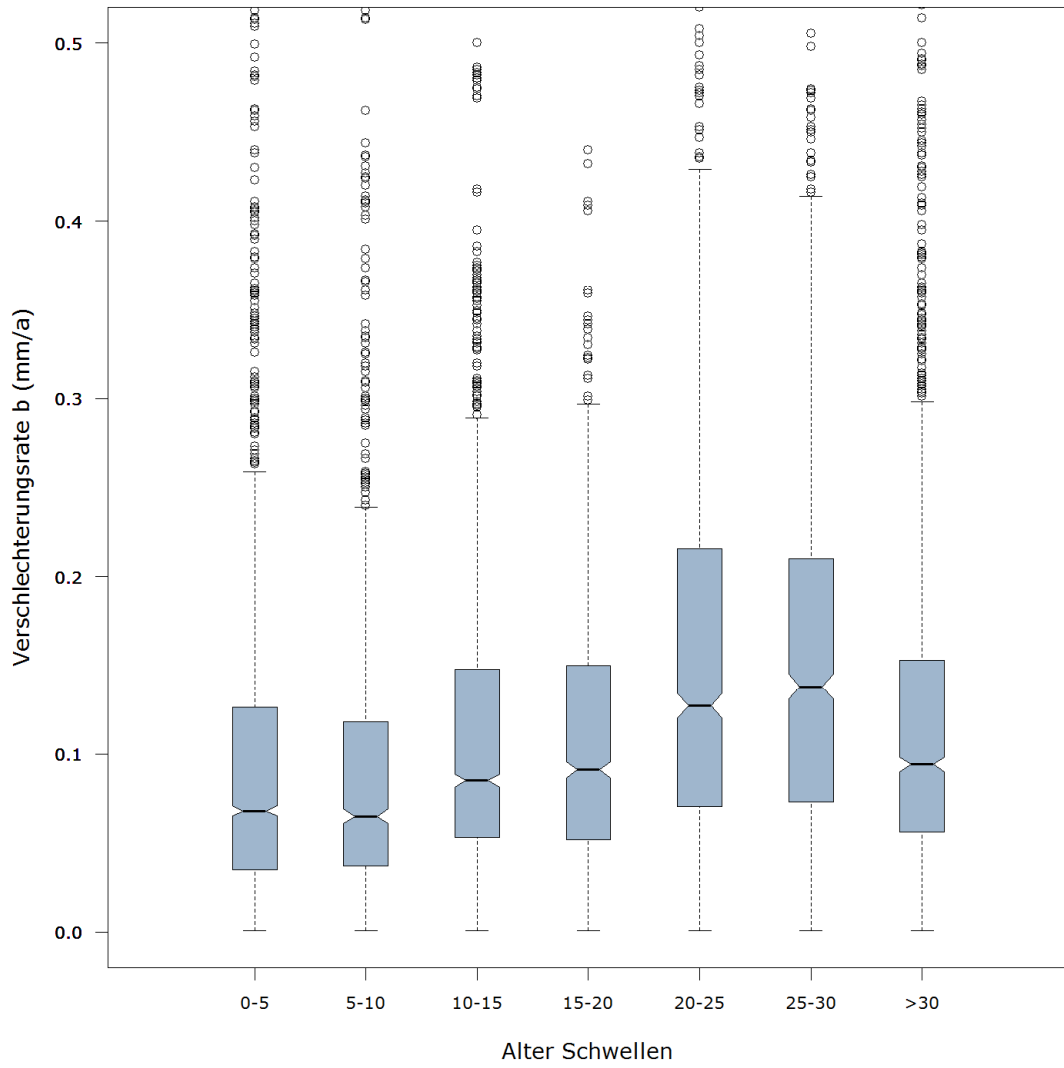


Abbildung 6.26 Boxplot Verschlechterungsrate von SIGMA-h

**Graz-Köflach  
Hauptgleis**

**Gleisverhalten  
MDZ-a**

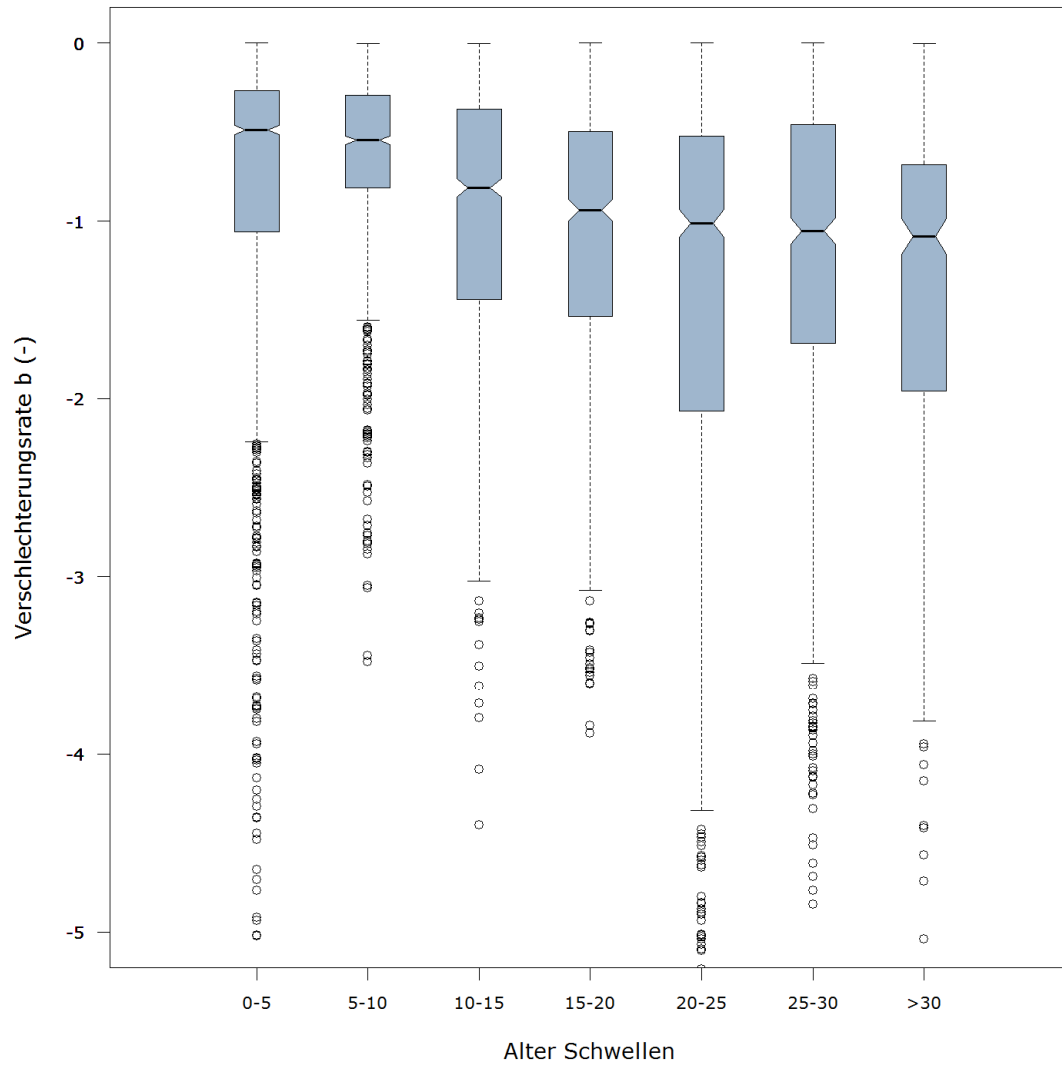


Abbildung 6.27 Boxplot Verschlechterungsrate von MDZ-a

Wird die Verschlechterungsrate der Komfortziffer MDZ-a betrachtet, erhöht sich die Verschlechterungsrate mit zunehmendem Oberbaualter.



#### 6.3.4.2 Qualität Q1

*„Die Qualität des Gleises während seiner gesamten Lebensdauer hängt direkt vom Anfangsniveau nach der Gleisverlegung ab. Sie kann daher durch die nachfolgenden Stopfarbeiten in ihrer charakteristischen inneren Qualität nicht verändert werden.“* [7] Nach den MDZ-Einsätzen wird die Gleislagequalität zwar verbessert, jedoch kann die Neigung der Verschlechterungsrate nicht mehr abgeflacht werden. Demnach ist der Infrastrukturbetreiber bestrebt, eine möglichst hohe Anfangsqualität  $Q_0$  nach der Gleisneulage zu erreichen. [7]

Geht man von der Anfangsqualität Q1 nach einer Gleislageverbesserung aus, so sinkt die erreichbare Anfangsqualität über die Jahre.

Betrachtet man nun die Boxplot-Darstellungen (Abbildung 6.28 Boxplot Anfangsqualität von SIGMA-h und Abbildung 6.29 Boxplot Anfangsqualität von MDZ-a), so lässt sich erkennen, dass vor allem nach einer Gleisneulage eine Verschlechterung der Anfangsqualität zu verzeichnen ist, diese stellt jedoch nicht den Regelfall dar. Dabei kann bei der GKB die schlechte Anfangsqualität bei Schwellen kleiner fünf Jahre, nur aufgrund einer möglichen Konsolidierung des Untergrundes, erklärt werden. Dieser Effekt wird besonders durch Verwendung von Betonschwellen vergrößert.

Nachdem sich stabile Untergrundverhältnisse eingestellt haben, bleibt das Qualitätsniveau annähernd gleich.

**Graz-Köflach  
Hauptgleis**

**Gleisqualität  
SIGMA-h**

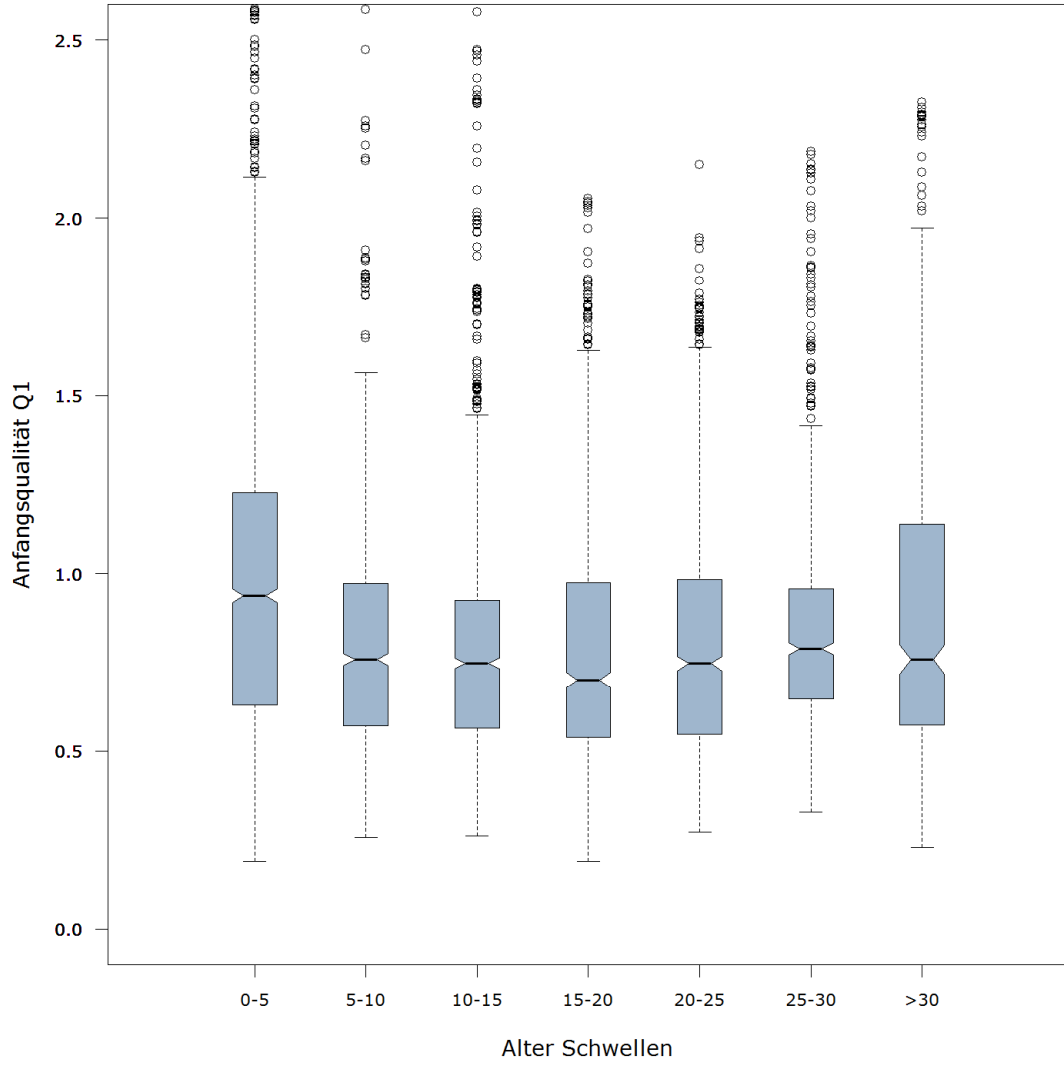


Abbildung 6.28 Boxplot Anfangsqualität von SIGMA-h

**Graz-Köflach  
Hauptgleis**

**Gleisqualität  
MDZ-a**

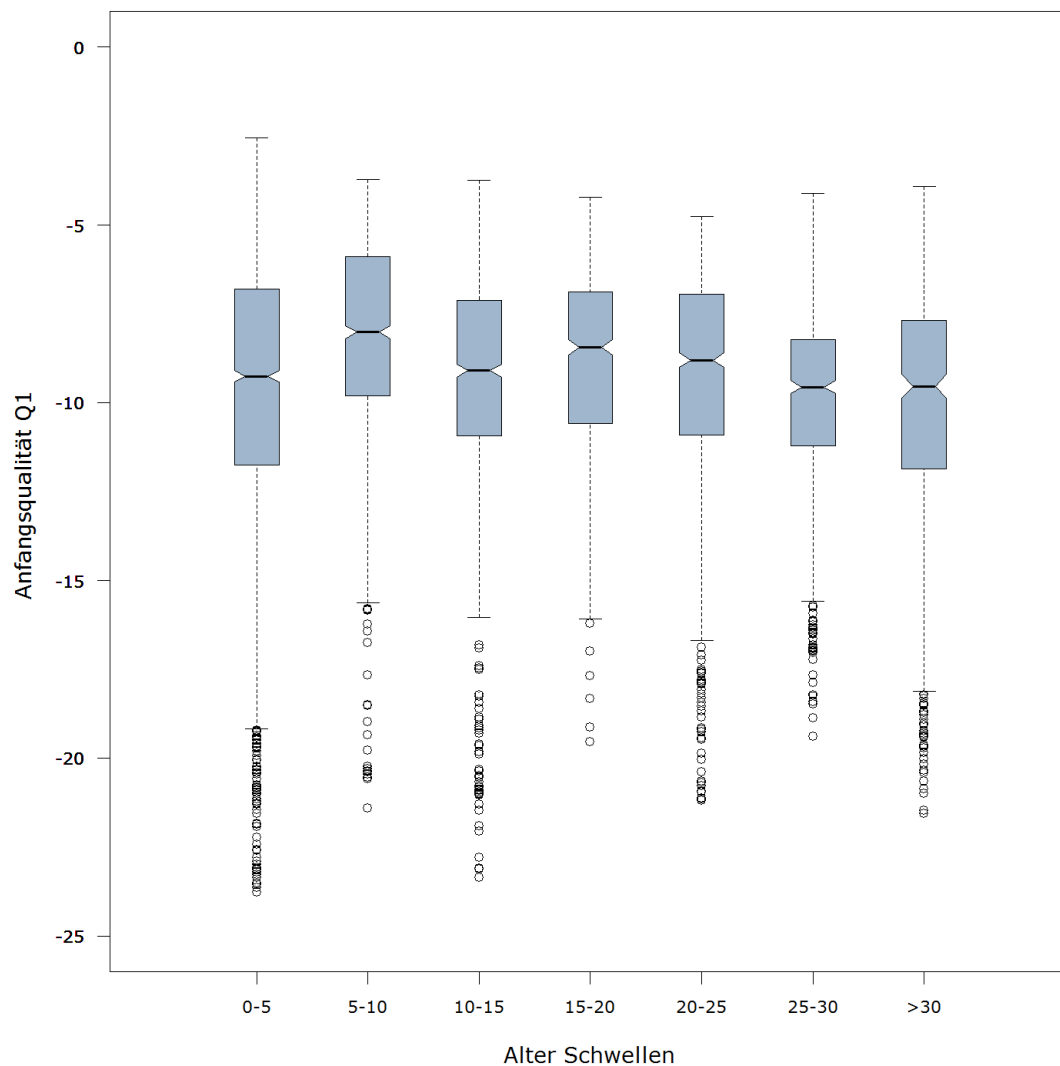


Abbildung 6.29 Boxplot Anfangsqualität von MDZ-a

## 7 Re-Investition

Erreicht das Gleis seine technische Nutzungsdauer, können Instandsetzungsmaßnahmen keine Verbesserung der Gleislagequalität und somit Verlängerung der Liegedauer bewirken. Damit die Verkehrsinfrastruktur wirtschaftlich betrieben werden kann, sollte nach „*Berechnung des optimalen Einsatzzeitpunktes*“ eine Re-Investition angestrebt werden. [12]

Um den Re-Investitionsbedarf der GKB bestimmen zu können, werden Nutzungsdauern, die auf Erfahrungswerten beruhen, verwendet. Die Nutzungsdauer des Gleises ist von folgenden Eigenschaften abhängig:

- I Verkehrsbelastung
- I Radienklasse
- I Schwellentyp
- I Schienenprofil und-güte

Für die eingleisige GKB-Strecke Graz-Köflach wird eine räumlich gleichbleibende Verkehrsbelastung von 8.000-15.000 Gesamtbruttotonnen/Tag (GBT/d) angenommen.

### 7.1 Re-Investitionsbedarf mit angenommenem Einbaujahr der unbekanntem Schwellen

Wie bereits mehrmals in der vorliegenden Arbeit erwähnt wurde, betragen die unbekanntem Schwelleneinbaujahre rund ein Drittel der vorhandenen Daten. Aus diesem Grund werden Annahmen zu den Einbaujahren getroffen, um den Re-Investitionsbedarf für die gesamte Strecke Graz-Köflach abschätzen zu können.

Betrachtet man die Verteilung der Einbaujahre der bekannten Betonschwellenarten inklusive Befestigungsinformation, so lässt sich mit Hilfe der vorhandenen Verteilung die annähernde Verteilung der unbekanntem feststellen und die Einbaujahre berechnen. Bei diesen Annahmen werden Radienklassen und Schieneneigenschaften vernachlässigt.

Für knapp 3 km der unbekanntem Holzschwellen wurde die Annahme getroffen, dass sie im Jahr 1970 eingebaut wurden. Gründe dafür können im Kapitel 4.1 entnommen werden.

Nach Bestimmung der zusätzlichen Einbaujahre (in beige gekennzeichnet) geht folgende Abbildung 7.1, mit einer Erhöhung der durchschnittlichen Erneuerung auf 820 m/Jahr, hervor:

### Graz-Köflach Hauptgleis

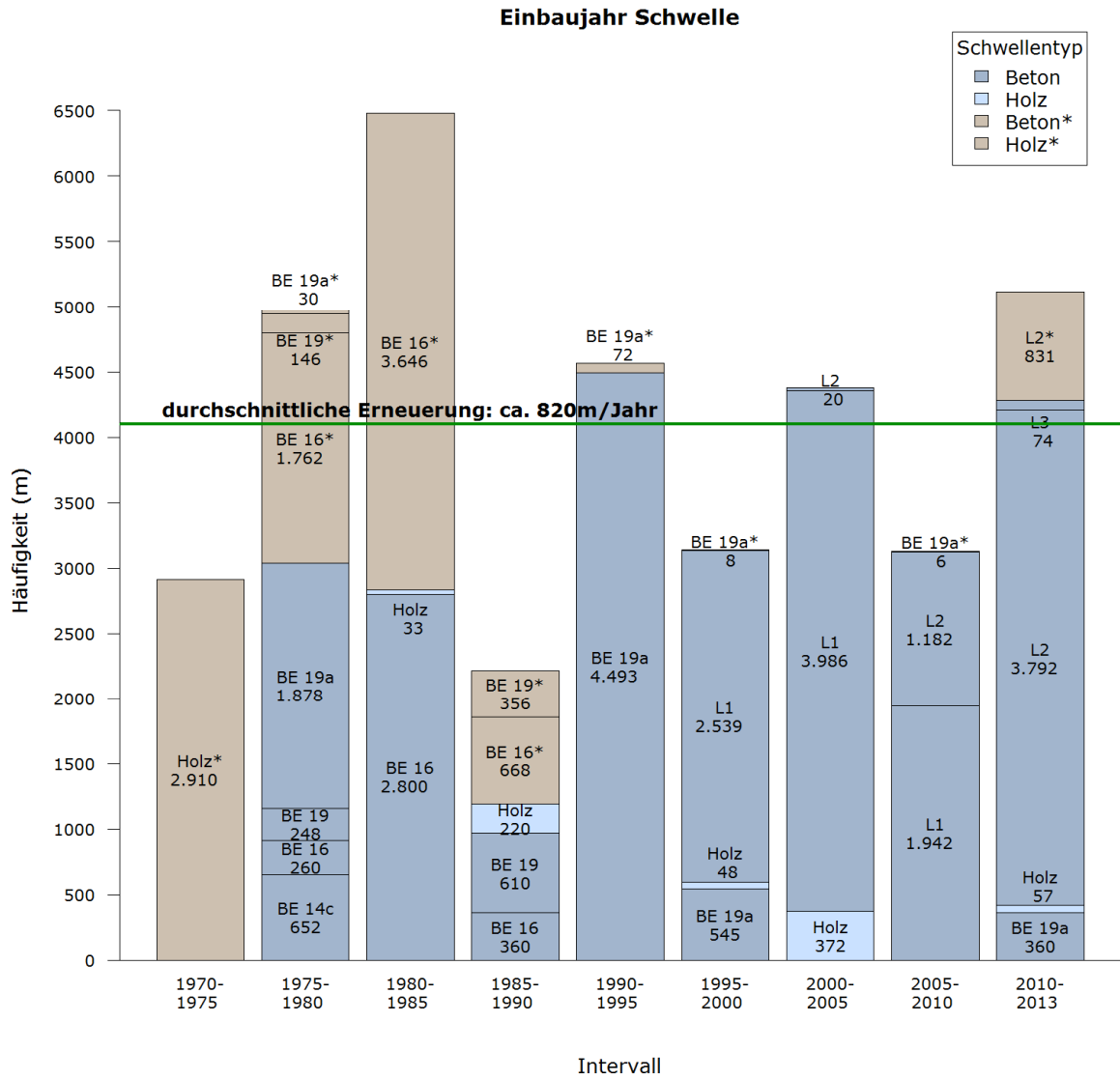


Abbildung 7.1 Schweleneinbaujahr im Hauptgleis mit angenommenem Einbaujahr

Re-Investition

Abbildung 7.2 weist einen deutlichen, theoretischen Nachholbedarf infolge der Annahme des Holzschwelleneinbaujahres auf. Dieser theoretische Nachholbedarf ist in den nächsten fünf Jahren fällig.

Da bei der Annahme des Einbaujahres vor allem Schwellen mit einem Einbaujahr vor 1985 betroffen sind, führt das zu einer maßgeblichen Erhöhung des Re-Investitionsbedarfs bis zum Jahr 2034. Dabei steigt nicht nur die durchschnittliche Erneuerung von rund 700 m/Jahr auf 820 m/Jahr, sondern auch der durchschnittliche Re-Investitionsbedarf auf 960 m/Jahr. Ein erneuter Vergleich führt zu der Erkenntnis, dass die durchschnittliche Erneuerung angehoben werden muss, damit es zu keiner Überalterung des Oberbaus kommt.

**Graz-Köflach  
Hauptgleis**

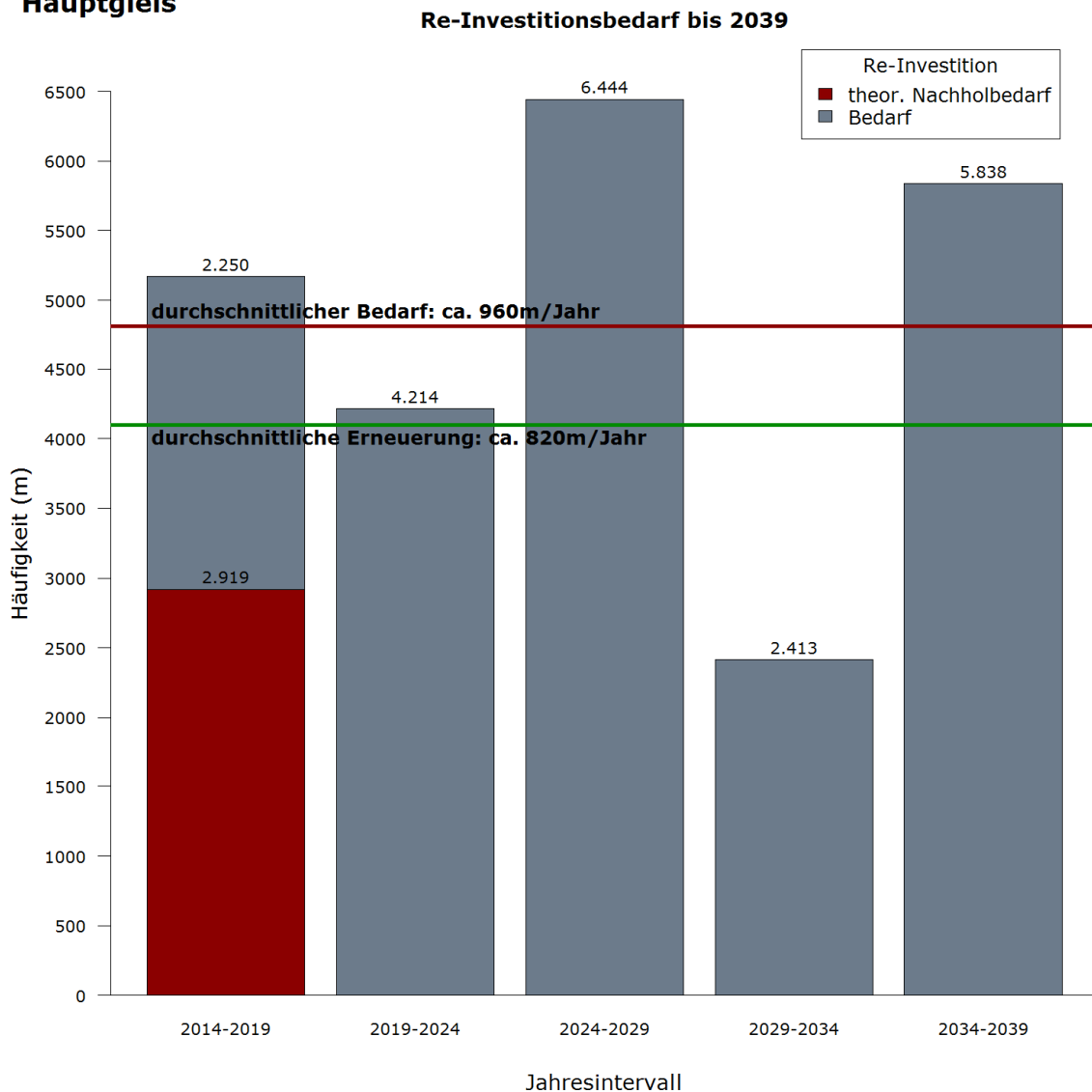


Abbildung 7.2 Re-Investitionsbedarf bis 2039 mit angenommenem Einbaujahr

## 7.2 Re-Investitionsbedarf – Sensitivitätsanalyse

Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse kann abgeschätzt werden, ob die Nutzungsdauern des Oberbaus der GKB korrekt angenommen wurden. Dabei wird ein neuer Re-Investitionsbedarf mit einer Erhöhung der Nutzungsdauer um 9,3 % (kritischer Wert) berechnet und in der Abbildung 7.3 grafisch dargestellt.

Dies führt zu einer deutlichen Umlagerung des Re-Investitionszeitpunktes und zu einem geringeren mittleren Bedarf von 850 m/Jahr, der sich der durchschnittlichen Erneuerung von 820 m/Jahr annähert. Aufgrund dieses Resultats, kann man von einer treffenden Abschätzung der Nutzungsdauern ausgehen.

### Graz-Köflach Hauptgleis

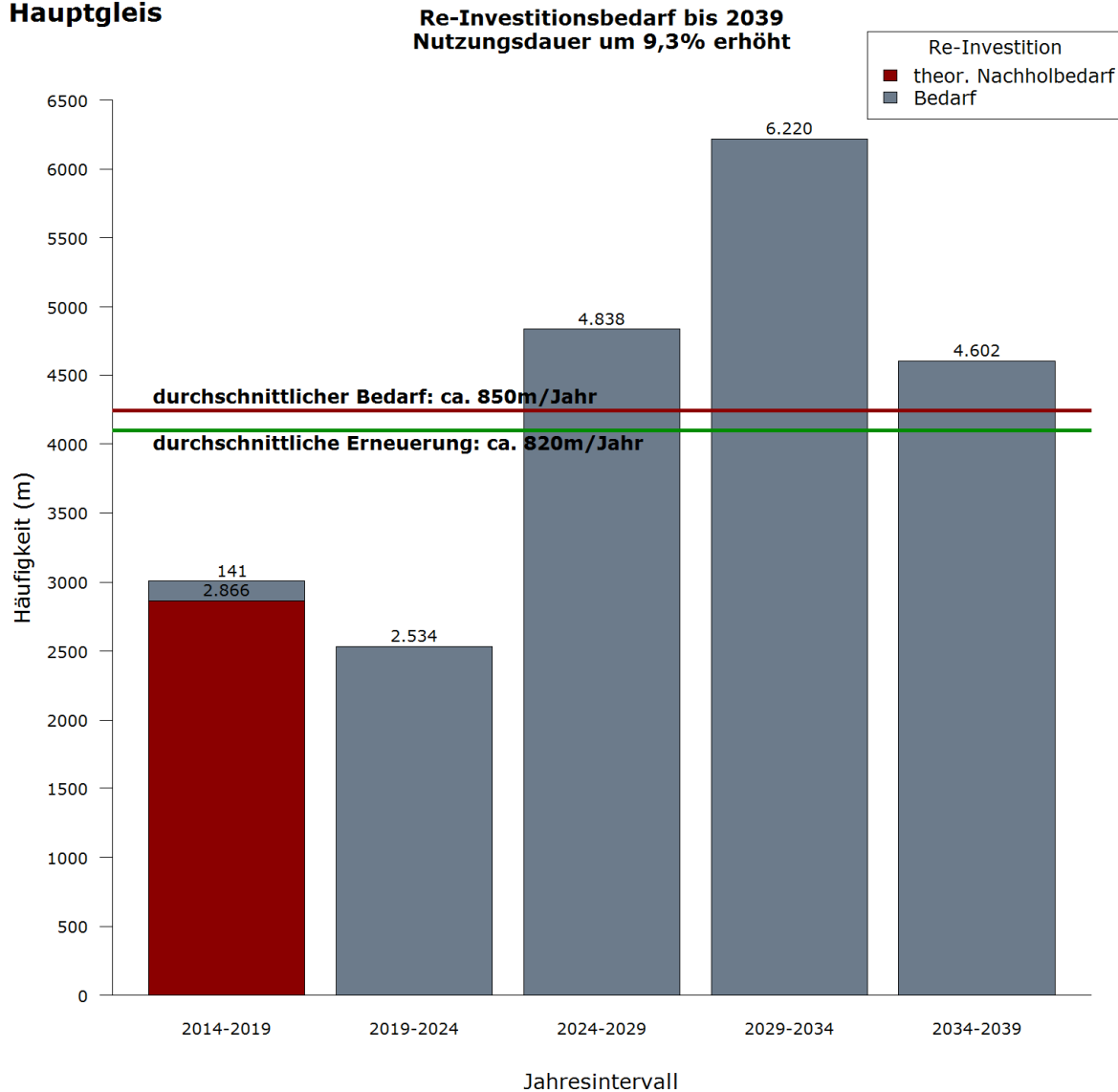


Abbildung 7.3 Sensitivitätsanalyse: Re-Investitionsbedarf bis 2039

## 8 Zusammenfassung

Die Auswertungen der eingebauten Oberbaustoffe führen zu dem Ergebnis, dass sich vor allem alte BE 16- und BE 19-Schwellen im Hauptgleis befinden. Erst seit 1995 werden neue L1- und L2-Schwellen verlegt. Im Bahnhofsgleis befinden sich hingegen vermehrt Holzschwellen. Die durchschnittliche Erneuerungsrate seit 1975 beträgt 700 m/Jahr und stieg besonders in den letzten Jahren an.

Werden zu den Oberbauinformationen Trassierungselemente hinzugefügt, erhält man Auskunft darüber, in welchen Radiengruppen die einzelnen Oberbaukomponenten eingesetzt werden. Dabei fällt auf, dass Betonschwellen ebenso in Radienklassen kleiner 250m zu finden sind, diese jedoch laut ÖBB Vorschrift B 50 – Teil 1 [6] nicht ohne Genehmigung eingebaut werden dürfen, da in diesen Bereichen keine Schienenstöße vorhanden sein dürfen. Aus diesem Grund wurden Sondergenehmigungen für diese Bereiche erteilt.

Jährlich werden durchschnittlich rund 26 % der Haupt- und Bahnhofsgleislänge durch den Mechanisierten Durcharbeitungszug instandgesetzt. Im Streckenband (Abbildung 5.1) mit allen eingetragenen Stopfgängen seit 2011 erkennt man einige Bereiche, die besonders stopfintensiv sind, diese umfassen bei den Holzschwellen vor allem Weichenbereiche. Bei den Betonschwellen fällt nur ein geringer Anteil auf den Bahnhofsbereich, da zum größten Teil Stopfgänge auf freier Strecke durchgeführt werden. Darunter zählen sechs Brücken, die in den letzten Jahren fast jährlich gestopft wurden.

Ein Vergleich der Stopfgänge mit den Einbaujahren der Schwellen ergibt, dass seit 2008 ein Rückgang der MDZ-Einsätze und ein gleichzeitiger Anstieg der Schwellenerneuerungen zu verzeichnen ist.

Für die Globalanalyse werden die Daten des Oberbaus mit den Messsignalen SIGMA-h, SIGMA-r und der MDZ-a Ziffer kombiniert. Dadurch können Gründe für eine Verschlechterung beziehungsweise Verbesserung im SIGMA-h Verlauf (Abbildung 6.3) ermittelt werden. Eine Verbesserung der Standardabweichung in Längshöhe wird vor allem durch die steigende Schwellenerneuerung erzielt.

Betrachtet man nun einzelne Streckenquerschnitte mit den dazugehörigen Messsignalen, so können mit Hilfe angenommener Raumgrenzen, Regressionsberechnungen durchgeführt werden, die folglich das Gleisverhalten mittels Verschlechterungsrate  $b$  und Anfangsqualität  $Q_1$  abbilden können. Eine Auswertung der Verschlechterungsrate von MDZ-a (Abbildung 6.27) über das Oberbaualter ergibt eine Erhöhung der Verschlechterungsrate mit zunehmendem Gleisalter.



Laut der Boxplot-Auswertungen (Abbildung 6.28 und Abbildung 6.29) liegt nach einer Gleisneulage eine schlechtere Anfangsqualität vor als bei älteren Schwellen. Das kann im Falle der GKB aufgrund einer möglichen Konsolidierung des Untergrundes erklärt werden. Nachdem sich stabile Untergrundverhältnisse eingestellt haben, nimmt die Anfangsqualität nach dem Stopfgang ab.

Im letzten Teil der Arbeit wird der Re-Investitionsbedarf der Strecke für die kommenden 25 Jahre ermittelt. Dafür werden zwei unterschiedliche Ansätze gewählt:

I Re-Investitionsbedarf mit angenommenem Einbaujahr der unbekanntenen Schwellen: Durch die Annahme von rund 30 % der Schwellen, deren Einbaujahr nicht bekannt ist, konnte die durchschnittliche Erneuerung von 700 auf 820 m/Jahr gesteigert werden. Da vor allem Schwellen mit einem Einbaujahr vor 1985 betroffen sind, kommt es zu einer zusätzlichen Erhöhung des theoretischen Nachholbedarfs und des Re-Investitionsbedarfs auf 960 m/Jahr. Somit muss die mittlere Erneuerung angehoben werden, um eine Überalterung des Oberbaus zu vermeiden.

I Sensitivitätsanalyse des Re-Investitionsbedarfs:

Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse kann abgeschätzt werden, ob die Nutzungsdauern des Oberbaus der GKB korrekt angenommen wurden. Dabei wurde die Nutzungsdauer um 9,3 % erhöht, mit der Folge, dass der durchschnittliche Bedarf und die durchschnittliche Erneuerungsrate annähernd gleich sind. Die 9,3 % entsprechen somit dem kritischen Wert der Nutzungsdauerverlängerung.

## Abkürzungsverzeichnis

<b>GKB</b>	Graz-Köflacher Bahn und Busbetrieb GmbH
<b>ÖBB</b>	Österreichische Bundesbahnen
<b>u.a.m</b>	und andere(s) mehr
<b>MDZ</b>	Mechanisierter Durcharbeitungszug
<b>BDS</b>	Schotterbewirtschaftungssystem (engl. Ballast Distribution System)
<b>SIGMA-h</b>	Standardabweichung Längshöhe
<b>SIGMA-r</b>	Standardabweichung Richtungslage
<b>MDZ-a</b>	Komfortziffer
<b>VzG</b>	Verzeichnis zulässiger Geschwindigkeiten
<b>GBT/d</b>	Gesamtbruttotonnen pro Tag

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Haupt- und Bahnhofsgleislänge	8
Abbildung 3.1	Schienenprofil Hauptgleis	13
Abbildung 3.2	Einbaujahr Schienenprofil Hauptgleis	14
Abbildung 3.3	Schienenengüte Hauptgleis	16
Abbildung 3.4	Einbaujahr Schienenengüte Hauptgleis	17
Abbildung 3.5	Einbaujahr Schienenengüte Bahnhofsgleis	18
Abbildung 3.6	Schwellentyp im Haupt- und Bahnhofsgleis	21
Abbildung 3.7	Schwelleneinbaujahr Hauptgleis	22
Abbildung 3.8	Schwellenform Hauptgleis	23
Abbildung 3.9	Befestigungsart Hauptgleis	25
Abbildung 3.10	Befestigungsart Bahnhofsgleis	26
Abbildung 3.11	Oberbauform Hauptgleis	27
Abbildung 3.12	Oberbauform Bahnhofsgleis	28
Abbildung 4.1	Trassierungselement	30
Abbildung 4.2	Streckenband mit Trassierungselementen	31
Abbildung 4.3	Radienklasse	32
Abbildung 4.4	Radienklasse Schienenprofil	33
Abbildung 4.5	Radienklasse Schienenengüte	34
Abbildung 4.6	Boxplot Schienenengüte	35
Abbildung 4.7	Schieneneneinbaujahr - Trassierungselement	36
Abbildung 4.8	Radienklasse Schwellentyp	37
Abbildung 4.9	Schwelleneinbaujahr - Trassierungselement	39
Abbildung 4.10	Boxplot Schwellentyp	40
Abbildung 5.1	Streckenband MDZ-Einsatz Hauptgleis	44
Abbildung 5.2	Maschineneinsatz	45
Abbildung 5.3	MDZ-Einsatz Schwellentyp	46
Abbildung 5.4	MDZ-Einsatz Oberbauform	47
Abbildung 5.5	Radienklasse Schienenbearbeitung	49
Abbildung 6.1	Einzelfehlereinfluss auf SIGMA-h (Anlehnung an [15])	55
Abbildung 6.2	Summenhäufigkeit SIGMA-h	56
Abbildung 6.3	Jährlicher SIGMA-h Verlauf	57
Abbildung 6.4	Einbaujahr Schwellentyp von 2002 bis 2011	58
Abbildung 6.5	Jährlicher SIGMA-h Verlauf von Holzschwellen	59
Abbildung 6.6	Jährlicher SIGMA-h Verlauf von Betonschwellen	60
Abbildung 6.7	Summenhäufigkeit SIGMA-r	61
Abbildung 6.8	Jährlicher SIGMA-r Verlauf	62
Abbildung 6.9	SIGMA-r abhängig von Radienklassen und Betonschwellen	63

Abbildung 6.10	SIGMA-r abhängig von Radienklassen und Holzschwellen .....	64
Abbildung 6.11	SIGMA-r ~ SIGMA-h .....	65
Abbildung 6.12	ADA II – Prinzipskizze zur Berechnung von MDZ-a (Anlehnung an [14]) .....	66
Abbildung 6.13	Summenhäufigkeit MDZ-a .....	67
Abbildung 6.14	Jährlicher MDZ-a Verlauf .....	68
Abbildung 6.15	Übersicht Gleislage km 7.500 - km 10.000 (Blatt 1).....	70
Abbildung 6.16	Übersicht Gleislage km 7.500 - km 10.000 (Blatt 2).....	71
Abbildung 6.17	SIGMA-h Messjahr April 2011 – Streckenbereiche.....	72
Abbildung 6.18	MDZ-a Messjahr April 2011 - Streckenbereiche .....	73
Abbildung 6.19	Ausbau- Einbauqualität SIGMA-h Querschnitt km 2.100 .....	75
Abbildung 6.20	Boxplot Ausbau- und Einbauqualität - SIGMA-h .....	76
Abbildung 6.21	Boxplot Ausbau- und Einbauqualität - SIGMA-r .....	77
Abbildung 6.22	Boxplot Ausbau- und Einbauqualität - MDZ-a .....	78
Abbildung 6.23	SIGMA-h - Querschnitt km 10.000 mit Begriffsdefinition.....	80
Abbildung 6.24	MDZ-a - Querschnitt km 10.000 .....	83
Abbildung 6.25	Boxplot Gütekriterium .....	85
Abbildung 6.26	Boxplot Verschlechterungsrate von SIGMA-h.....	87
Abbildung 6.27	Boxplot Verschlechterungsrate von MDZ-a .....	88
Abbildung 6.28	Boxplot Anfangsqualität von SIGMA-h .....	90
Abbildung 6.29	Boxplot Anfangsqualität von MDZ-a .....	91
Abbildung 7.1	Schwelleneinbaujahr im Hauptgleis mit angenommenem Einbaujahr.....	93
Abbildung 7.2	Re-Investitionsbedarf bis 2039 mit angenommenem Einbaujahr.....	94
Abbildung 7.3	Sensitivitätsanalyse: Re-Investitionsbedarf bis 2039.....	95

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	verwendetes Schienenprofil.....	9
Tabelle 2	verwendete Schienengüte .....	9
Tabelle 3	verwendete Schwellenart .....	10
Tabelle 4	verwendete Schienenbefestigung .....	10

## Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.oebb.at/infrastruktur/de/ p 3 0 fuer Kunden Partner/3 4 EVU am Netz/Gueterverkehrs EVU/GKB/index.jsp>, entnommen am 8.10.2014
- [2] <http://www.r-project.org>, entnommen am 16.10.2014
- [3] <http://www.gkb.at/diegkbgruppe/geschichtedergkb/derstreckenverlauf/index.html>, entnommen am 24.06.2014
- [4] ÖNORM EN 13674-1:2011: Bahnanwendungen - Oberbau - Schienen - Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m, Austrian Standards Institute, 2011
- [5] <http://www.oebb.at/infrastruktur/de/ p 3 0 fuer Kunden Partner/3 2 Schienennutzung/3 2 7 Regelwerke/>, entnommen am 16.10.2014
- [6] ÖBB Infrastruktur: *B 50 - Teil 1: Oberbauformen*, ÖBB Infrastruktur, 2009
- [7] Bernhard, Lichtberger: *Handbuch Gleis: Unterbau-Oberbau-Instandhaltung-Wirtschaftlichkeit*, DVV Media Group GmbH, 2010, Hamburg
- [8] <http://www.mabatrack.com/de/Produkte/productcat/0/product/0.html>, entnommen am 08.07.2014
- [9] DIN EN 13306:2010-12: *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*, DIN, 2010
- [10] Peter Josef, Flatscher: *Wirtschaftliche Fahrweginstandhaltung für hohe Verfügbarkeit des Fahrweges*, Zeitschrift: Der Eisenbahningenieur, April 2009, Hamburg
- [11] Erwin, Klotzinger: *Der Oberbauschotter Teil 2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen*, Zeitschrift: ETR, Seite 120-125, März 2007, Hamburg
- [12] Peter, Veit: *Instandhaltung und Anlagenmanagement des Fahrwegs*, in Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Seite 1009-1054, Springer Vieweg, 2013, Berlin Heidelberg
- [13] Jan, Zywieli; Günther, Oberlechner: *POS/TG - Innovation auf dem Gebiet der Gleisgeometriemessungen*, Zeitschrift: Der Eisenbahningenieur, Seite 6-9, September 2001, Hamburg
- [14] Jochen, Holzfeind; Robert, Hummitzsch: *Qualitätsverhalten von Gleisen*, Zeitschrift: ZEVrail, Seite 212-224, Juni-Juli 2008, Berlin

- [15] Florian, Auer: *Gleislagequalitätsanalyse zur Instandhaltungsoptimierung*,  
Zeitschrift: ETR Austria, Seite 838-844, Januar 2004, Hamburg

WISSEN ▪ TECHNIK ▪ LEIDENSCHAFT



Institut für Eisenbahnwesen  
und Verkehrswirtschaft  
Technische Universität Graz  
Rechbauerstrasse 12/II  
8010 Graz  
+43 316 873 6216  
office.ebw@tugraz.at  
▶ [www.ebw.tugraz.at](http://www.ebw.tugraz.at)