

EU-Projekt SUSTRAIL: The sustainable freight railway

Schweizer Fallstudie im Rahmen des EU-Projektes SUSTRAIL

im Auftrag der EU und des Bundesamtes für Verkehr

Schlussbericht

19. November 2014

Impressum

Empfohlene Zitierweise

Autor: Ecoplan
Titel: EU-Projekt SUSTRAIL: The sustainable freight railway
Untertitel: Schweizer Fallstudie im Rahmen des EU-Projektes SUSTRAIL
Auftraggeber: EU / Bundesamt für Verkehr
Ort: Bern
Jahr: 2014

Begleitung seitens BAV

Markus Giger
Christoph Herren
Kjell Kolden

Projektteam Ecoplan

Michael Marti
Philipp Walker
René Neuenschwander

Der Bericht gibt die Auffassung der Autoren wieder, die nicht notwendigerweise mit derjenigen des Auftraggebers oder der Begleitorgane übereinstimmen muss.

Ecoplan AG

Forschung und Beratung
in Wirtschaft und Politik

www.ecoplan.ch

Monbijoustrasse 14
CH - 3011 Bern
Tel +41 31 356 61 61
bern@ecoplan.ch

Schützengasse 1
Postfach
CH - 6460 Altdorf
Tel +41 41 870 90 60
altdorf@ecoplan.ch

Inhaltsverzeichnis

	Glossar	2
1	Einleitung und Ausgangslage	3
1.1	Einleitung.....	3
1.2	Struktur des vorliegenden Berichts.....	3
2	Datengrundlagen.....	4
2.1	Verfügbares Datenmaterial.....	4
2.2	Beschreibung der zu untersuchenden Kosten.....	6
2.3	Unabhängige Variablen.....	8
3	Theorie und Modelldiskussion	11
3.1	Theoretischer Hintergrund.....	11
3.1.1	Schätzung der Kostenfunktion für den Unterhalt und Erneuerung der Schieneninfrastruktur	11
3.1.2	Definition und Berechnung der Grenzkosten.....	13
3.2	Schätzmodell	14
3.2.1	Drei verschiedene Grundmodelle	14
3.2.2	Bestimmung von Lambda.....	16
4	Schätzergebnisse und Grenzkosten bei Betrachtung der Totalkosten	18
4.1	Schätzungen der Unterhalts- und Erneuerungskosten	18
4.2	Berechnung der Grenzkosten.....	22
5	Getrennte Schätzung nach Kostenarten	25
5.1	Besonderheiten der Erneuerungskosten	25
5.2	Schätzergebnisse für Erneuerungskosten	29
5.2.1	Schätzergebnisse	29
5.2.2	Durchschnittliche Grenzkosten	32
5.3	Betrachtung der Unterhaltskosten	34
5.3.1	Schätzergebnisse nur Unterhalt	34
5.3.2	Betrachtung der Grenzkosten für den Unterhalt.....	37
6	Schlussfolgerungen.....	39
7	Anhang A: Übrige Schätzungen	42
	Literaturverzeichnis	50

Glossar

β (Beta)-Koeffizient	Der geschätzte Koeffizient einer Erklärungsvariablen wird β (Beta)-Koeffizient genannt. Der β -Koeffizient entspricht dem Einfluss der Erklärungsvariablen auf die zu erklärende Grösse. Steigt die Erklärungsvariable um eine Einheit, verändert sich die zu erklärende Variable um den β -Koeffizient.
Box-Cox-Modell	Die Box-Cox-Transformation ist eine Verallgemeinerung der log-linearen Transformation. Ein Box-Cox-Modell unterliegt nicht der Restriktion eines log-linearen Modells. Es weist mehr Freiheit bei der Transformation der Daten auf.
Chi-Quadrat-Test	Chi-Quadrat-Test ist eine Weiterentwicklung des t-Tests (siehe t-Test) und wird verwendet, wenn die zugrundeliegenden Residuen nicht normalverteilt sind, sondern einer Chi-Quadrat-Verteilung entsprechen. Bei ausreichenden Beobachtungen entspricht die Chi-Quadrat-Verteilung der Normalverteilung.
Dummy-Variable	Eine Dummy-Variable nimmt entweder den Wert 0 oder 1 an. Dummy-Variablen werden häufig verwendet, um eine nicht numerische Eigenschaft in der Schätzung zu berücksichtigen.
Elastizitäten	In der Ökonomie ist eine Elastizität ein Mass, das die relative Änderung einer abhängigen Grösse auf eine relative Änderung einer ihrer Einflussgrößen angibt.
Grenzkosten	Als Grenzkosten werden in der Ökonomie diejenigen Kosten bezeichnet, die durch die Produktion einer zusätzlichen Einheit eines Produktes entstehen.
Heteroskedastizität	Mit Heteroskedastizität wird in der Statistik eine unterschiedliche Streuung der Residuen innerhalb einer Datenmessung bezeichnet. Heteroskedastizität ist somit das Gegenteil von Homoskedastizität, bei welcher die Varianzen der Residuen konstant sind.
Linearisierung	Bei der Linearisierung wird eine nichtlineare Funktion oder Differentialgleichung durch eine lineare Funktion oder Differentialgleichungen angenähert.
Log-lineares Modell	Log-lineare Modelle gehören zu den multivariaten Verfahren. Eine Linearisierung in der Statistik erfolgt häufig durch eine logarithmische Transformation.
Multikollinearität	Multikollinearität ist ein Problem der Regressionsanalyse und liegt vor, wenn zwei erklärende Variablen eine sehr starke Korrelation miteinander haben. Die Regressoren sind damit inkonsistent und verzerren das Ergebnis.
R^2	Das Bestimmtheitsmass R^2 misst den Erklärungsgehalt der Schätzung, d.h. den Anteil der erklärten Varianz eines Zusammenhangs. Beträgt es für zwei Variablen x (Erklärungsvariable) und y (zu erklärende Variable) beispielsweise $R^2 = 0.5$, dann bedeutet dies, dass die Hälfte (50%) der Streuung von y durch die Variable x erklärt werden kann.
Regression	Die Regressionsanalyse ist ein statistisches Analyseverfahren. Ziel ist es, Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen festzustellen. Bei einer multivariaten Regressionsanalyse wird das Zusammenwirken mehrerer unabhängiger Variablen zugleich analysiert.
Robuster Schätzer	Der robuste Schätzer ermöglicht eine effiziente Schätzung auch bei Vorliegen von Heteroskedastizität.
Signifikanz, -niveau	In einem statistischen Schätzverfahren wird eine Variable bzw. ein Zusammenhang zwischen der Erklärenden Variable und der zu erklärenden Variable (β -Koeffizient) dann als signifikant bezeichnet, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Zusammenhang durch Zufall so zustande kommen würden bzw. null entspricht, nur gering ist. Damit weist Signifikanz auf einen möglichen Zusammenhang zwischen den Messgrößen hin. Die obere Grenze für die Signifikanz, also jener Wert den man noch zu akzeptieren bereit ist, heisst Signifikanzniveau. In dieser Studie unterscheiden wir drei Signifikanzniveaus, mit 1, 5 und 10%.
t-Test, t-Wert	Als t-Test bezeichnet man in der mathematischen Statistik eine bestimmte Stichprobenfunktion, die bei einem Hypothesentest dazu verwendet wird, die Testentscheidung – also Ablehnen oder Nichtablehnen der Nullhypothese – zu treffen. Je höher der t-Wert ist, desto stärker ist die Signifikanz der jeweiligen Variable. Der t-Wert wird durch die Division von Koeffizient und Standardabweichung berechnet.

1 Einleitung und Ausgangslage

1.1 Einleitung

Das Ziel des Projektes SUSTRAIL ist es, einen Beitrag zur Stärkung des Schienengüterverkehrs zu leisten. SUSTRAIL untersucht dabei Verbesserungsvorschläge sowohl im Bereich Rollmaterial wie Schieneninfrastruktur, mit dem Ziel eine erhöhte Zuverlässigkeit des Schienenverkehrs und eine verbesserte Leistungsfähigkeit des Eisenbahnfrachtsystems als Ganzes zu erreichen und damit die Profitabilität für alle Beteiligten zu erhöhen.

Ecoplan und die UNILEEDS (ITS Leeds) führen in Work Package 5 für die Schweiz respektive für Grossbritannien je eine ökonometrische Fallstudie durch; bei diesen Fallstudien sollen die Zusammenhänge zwischen den Kosten der Schieneninfrastruktur und dem Verkehrsaufkommen untersucht werden. Damit knüpft SUSTRAIL an den Arbeiten im Forschungsprojekt CATRIN an. Im Vergleich zu CATRIN ist neu, dass nun die **Gesamtkosten sowie Erneuerungskosten im Mittelpunkt** stehen und nicht mehr die kurzfristigeren Unterhaltskosten.

1.2 Struktur des vorliegenden Berichts

Der vorliegende Bericht fasst die wichtigsten Resultate der Fallstudie Schweiz zusammen und ist wie folgt strukturiert:

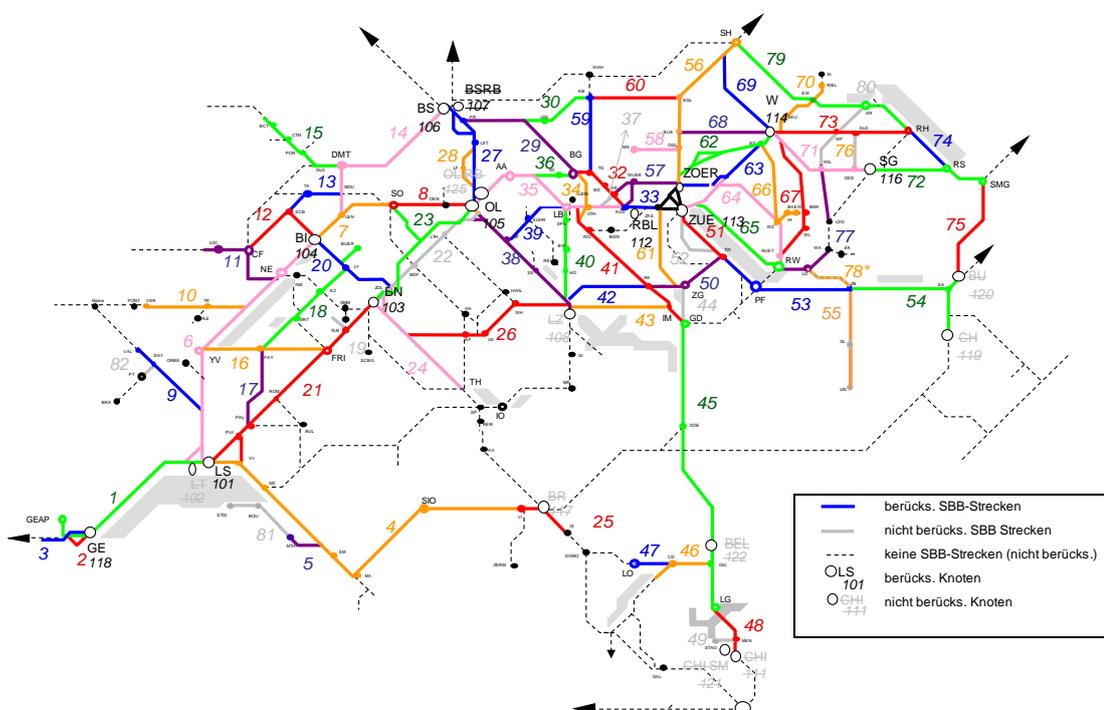
- Kapitel 2: Darstellung der Datengrundlagen;
- Kapitel 3: Darlegung des theoretischen Hintergrundes und Herleitung des Schätzmodells;
- Kapitel 4: Schätzergebnisse und Grenzkosten bei Betrachtung der Totalkosten;
- Kapitel 5: Schätzergebnisse und Grenzkosten bei Betrachtung unterschiedlicher Kostenarten,
- Kapitel 6: Schlussfolgerungen,
- Anhang A enthält eine Liste mit unterschiedlichen Schätzungen.

2 Datengrundlagen

2.1 Verfügbares Datenmaterial

Im ersten Schritt der vorliegenden Fallstudie wurde die bestehende Datengrundlage ausgebaut und auf insgesamt 10 Jahre erweitert. Dank der sehr guten Zusammenarbeit mit den SBB ist es über die drei Projekte GRACE, CATRIN und SUSTRAIL gelungen, trotz zahlreichen Herausforderungen eine umfangreiche und konsistente Datenbank für die ökonomischen Analysen aufzubauen, .

Abbildung 2-1: Berücksichtigte Knoten und Streckenabschnitte



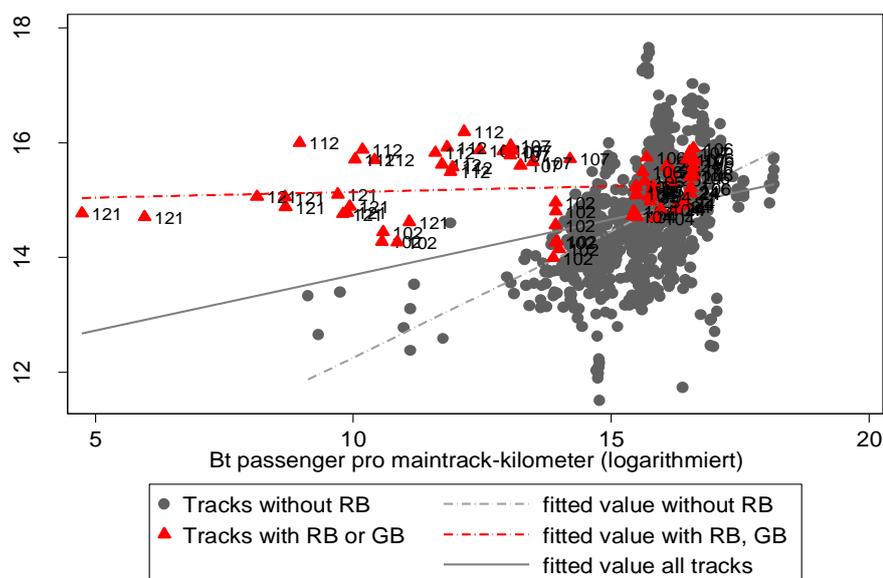
Im Gegensatz zu den bisherigen Arbeiten in den Projekten GRACE und CATRIN werden die Daten auf dem sogenannten 100er Raster bearbeitet und nicht mehr auf dem 400er Raster. Grund hierfür ist, dass auf dieser Aggregationsstufe ausreichend Daten über 10 Jahre zur Verfügung stehen. Zudem wird das 100er Raster sowohl von Seiten SBB wie auch BAV als sinnvoller und kohärenter beurteilt. Das 100er Raster wurde im Jahr 2012 zwar leicht angepasst, dabei wurden allerdings fast ausschliessliche einzelne Knotenpunkte aus bestehenden Strecken herausgenommen und als eigene Streckenabschnitte integriert sowie einzelne neue Streckenabschnitte dem System hinzugefügt. Hierbei blieben die Strecken und deren Nummerierung mehrheitlich identisch. Um bei den 2012 neu kreierten Streckenabschnitten und

Knotenpunkte keine künstlichen Aufteilungen des früheren Verkehrsaufkommens vornehmen zu müssen, erfolgt die Analyse auf dem Linienplan vor den Anpassungen im Jahr 2012¹.

Insgesamt stehen uns vollständige Daten von 80 Strecken² inkl. 9 Knotenpunkte zur Verfügung. Einige der Streckenabschnitte sind allerdings aus spezifischer Gründe für die Analyse nicht verwendbar:

- Für einige Streckenabschnitte stehen keine oder nur teilweise Daten zur Verfügung, beispielsweise aufgrund von Besitzerwechsel oder Teilstilllegungen
- Streckenabschnitte, die reine Rangier- oder Güterbahnhöfe darstellen, wurden aus den Schätzungen ausgeschlossen. Der Verkehr wie auch die Unterhaltsstrategie auf entsprechenden Streckenabschnitten unterscheiden sich deutlich von den übrigen Strecken (vgl. Strecken 102, 107, 112, 121 in Abbildung 2-2).

Abbildung 2-2: Güter- und Rangierbahnhöfe versus übrige Strecken



- Weiter wurden die beiden Neubaustrecken zwischen Bern und Olten (Strecke 22) sowie zwischen Zürich und Thalwil (Strecke 52, Nidelbad) ausgeschlossen. Auf den Neubaustrecken wurde in den ersten Jahren tendenziell zu wenig Unterhalt betrieben, gleichzeitig stellen Sie wichtige Verkehrsachsen mit hohem Verkehrsaufkommen dar. Werden die

¹ Einziger Spezialfall ist Strecke Ziegelbrücke-Linthal. Früher war die Strecke in zwei Teilstrecken unterteilt (55 und 83), mit der Neunummerierung wurden diese beiden Teilstrecken in eine Teilstrecke (55) zusammengefasst. Entsprechend werden die Daten für den gesamten Zeitraum in eine Strecke gemäss der neuen Definition zusammengefasst.

² Bei der getrennten Analyse der Unterhalts und Erneuerungskosten wird zusätzlich die Strecke 78 ausgeschlossen.

Streckenabschnitte nicht ausgeschlossen, ist zu erwarten, dass die Ergebnisse verzerrt werden.

Dank der Mitarbeit der SBB stehen uns über den Zeitraum von 2003 bis 2012 folgende Variablen zur Verfügung:

- **Verkehrsvariablen** – Bruttotonnenkilometer und Zugkilometer per Streckenabschnitt³ – nach 10 verschiedenen Zugskategorien, die bei Bedarf zu Güterverkehr, Regionalverkehr und Personenfernverkehr zusammengefasst werden können.
- **Infrastrukturvariablen** für alle Streckenabschnitte, d.h. Informationen hinsichtlich Gleis- und Streckenlänge, Weichen, Radien, Steigungen, Geschwindigkeit, Schienen, Schotter, Schwellen, Tunneln, Brücken, Perronkanten und der zugelassene maximale Geschwindigkeiten. Die Infrastrukturvariablen basieren auf der Datenbank der festen Anlagen (DfA) und variieren je nach Streckenabschnitt. Die Datenbank wird allerdings nicht historisiert. Die Infrastrukturdaten variieren daher nicht über die Zeit. Wir verwenden die Daten aus dem Projekt Catrin, welche den Stand von 2007 wiedergibt. Somit verwenden wir einen „mittleren“ Stand der Infrastruktur in der Analyse.
- **Kostenvariablen**, unterteilt nach kurzfristigen Unterhaltskosten (Überwachung, Instandhaltung, Störungsmanagement) und Instandsetzung- und Erneuerungskosten, für sämtliche Streckenabschnitte.

2.2 Beschreibung der zu untersuchenden Kosten

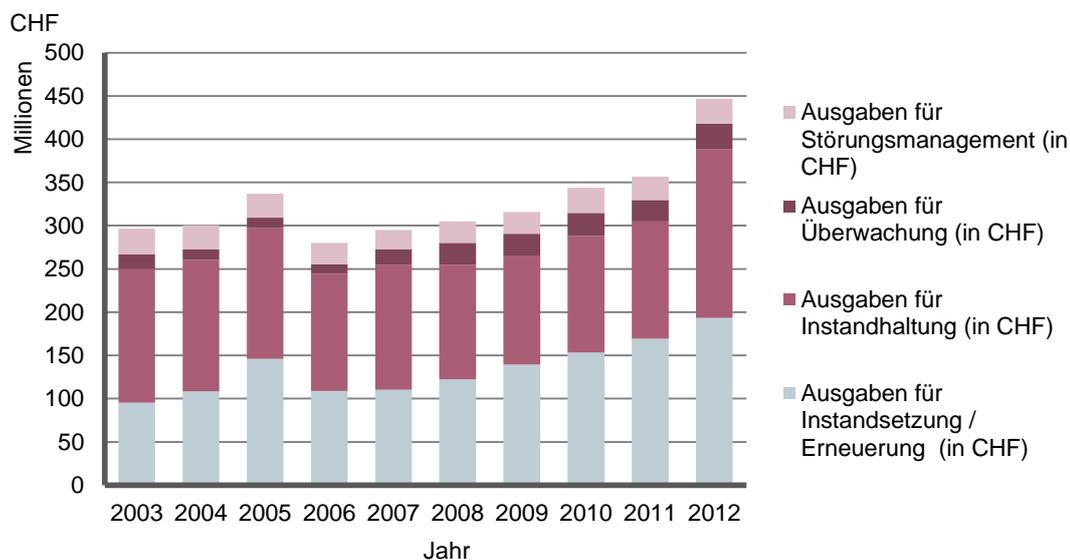
In den Daten der SBB, die in der vorliegenden Studie verwendet werden, sind verschiedene Kostenkomponenten enthalten. Folgende Kostenkomponenten fliessen in die Modelle ein:

Abbildung 2-3: Übersicht über die Kostenkomponenten

Variable	Beobachtungen	Mittelwert	Standard-Abweichung	Minimum	Maximum
Ausgaben für Unterhalt und Erhaltung [in CHF]	800	4'096'505	4'933'082	99'834	46'880'460
Ausgaben für Überwachung [in CHF]	800	249'917	338'711	7'496	3'509'633
Ausgaben für Störungsmanagement [in CHF]	800	335'321	358'461	8'321	2'880'904
Ausgaben für Instandhaltung [in CHF]	800	1'828'098	1'919'987	59'266	16'279'349
Ausgaben für Instandsetzung / Erneuerung [in CHF]	800	1'683'168	2'556'785	0	26'245'112

³ Diese Daten stehen für den 120er Raster zur Verfügung. Gemäss Abklärungen mit SBB und BAV ist die Aggregation vom 400er Raster auf das 120er Raster (120 verschiedene Strecken und Knoten) in jedem Fall sinnvoll.

Abbildung 2-4 Entwicklung der Total-Ausgaben in den vier Kostenkomponenten zwischen 2003 und 2012 [in CHF]



Nachfolgend sind die verschiedenen Ausgabenkategorien kurz erläutert:

- **Störungsmanagement:** Unter den Ausgaben im Bereich des Störungsmanagement versteht werden vor allem Tätigkeiten zur Behebung von Störungen bei Sicherungsanlagen und Fahrstromanlagen verstanden.
- **Überwachung:** Die Ausgaben für Überwachung umfassen Streckenbegehungen (u.a. bei Fahrbahn, Fahrleitung, Stützmauern etc.) durch Streckenwärter, inkl. Extrawachen bei Hochwasser, Lawinengefahr, aussergewöhnlichen Bedingungen.
- **Instandhaltung:** Die Ausgaben für Instandhaltung umfassen einerseits Tätigkeiten im Bereich Schnee- und Eisräumung sowie andererseits den Kleinunterhalt und die Mängelbehebung.
- **Instandsetzung:** Unter den Ausgaben zur Instandsetzung werden grössere Reparaturtätigkeiten zur Instandsetzung sowie Teilerneuerungen (u.a. im Bereich Gleise und Weichen) verstanden.

In den Daten ist seit 2006 eine stetige Zunahme insbesondere der Instandsetzungskosten und Erneuerungskosten zu beobachten. Die Ausgaben für Instandhaltung blieben bis 2011 auf ähnlichem Niveau. 2012 steigen die Ausgaben deutlich an. Die SBB hat in den Netzzustandsberichten der letzten Jahre wiederholt aufgezeigt, dass die Instandhaltungsausgaben in den Vorjahren zu gering waren. Im Netzzustandsbericht 2013 (SBB, 2013) weist der Bericht erneut auf den zu niedrigen Unterhalt in den Jahren 1995 bis 2010 hin, welcher sich insbesondere auf die Lebensdauer der Fahrbahn negativ auswirkt.⁴

⁴ Eine gewisse Relativierung der Verschlechterung der Noten und Kenngrössen vom Bericht aus dem Jahr 2012 zu jenem aus dem Jahr 2013 ist jedoch angebracht. Die Verschlechterung ist primär auf neue und verbesserte Messsysteme, auf zuverlässigere Daten sowie auf weiterentwickelte Prognosemethoden zurückzuführen.

2.3 Unabhängige Variablen

Der Fokus unserer Schätzungen liegt auf den Bruttotonnenkilometern als wichtigste Kostentreiber. Dabei wird analog zu früheren Studien (u.a. Johansson und Nilsson, 2004; Marti und Neuenschwander, 2006) die Verkehrsleistung aufgeteilt in Bruttotonnen (Verkehrsdichte) sowie die Länge der Strecke. Dadurch können die Kosteneffekte der Bruttotonnen von den Effekten der Streckenlänge isoliert werden.

In den Schätzungen zu Kapitel 4 wird die Verkehrsleistung zudem für einzelne Verkehrstypen betrachtet.⁵ Abbildung 2-5 gibt einen Überblick über alle verwendeten Variablen zur Verkehrsleistung.

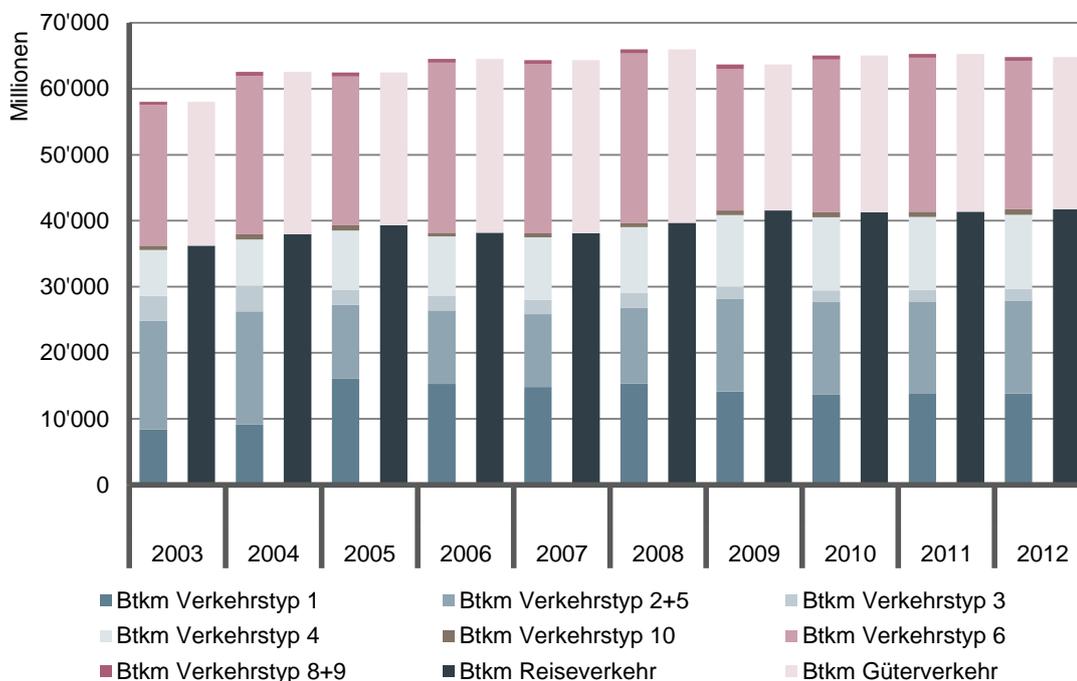
Abbildung 2-5: Übersicht verwendeter Variablen zur Verkehrsleistung

Variable	Beobachtungen	Mittelwert	Standard-Abweichung	Minimum	Maximum
Bruttotonnen gesamt	800	795'871	1'223'230	16'084	9'432'588
Bruttotonnen Reiseverkehr	800	494'418	627'525	4'654	2'696'181
Bruttotonnen Güterverkehr	800	301'453	781'089	33	7'153'129
Bruttotonnen Verkehrstyp 1	800	168'304	326'385	0	1'827'545
Bruttotonnen Verkehrstyp 2+5	800	167'793	305'435	3	1'869'133
Bruttotonnen Verkehrstyp 3	800	29'733	51'560	0	354'367
Bruttotonnen Verkehrstyp 4	800	119'595	174'401	0	1'189'821
Bruttotonnen Verkehrstyp 6	800	294'181	773'661	0	7'086'827
Bruttotonnen Verkehrstyp 8+9	800	7'272	9'323	2	66'301
Bruttotonnen Verkehrstyp 10	800	8'992	12'484	0	102'899

Anm.: Verkehrstyp 1: Intercity/Eurocity; Verkehrstyp 2+5: Schnellzug, Interregio, Regioexpress; Verkehrstyp 3: Regionalzug; Verkehrstyp 4: S-Bahn; Verkehrstyp 6: Fern- und Nahgüterzüge; Verkehrstyp 8+9: Traktorgüterzüge, Lokzug; Verkehrstyp 10: Leermaterialzüge

⁵ Aufgrund einer unzureichenden Datenmenge wird der Dienstleistungsverkehr nur in der gesamten Verkehrsmenge berücksichtigt.

Abbildung 2-6: Übersicht über Entwicklung der Gesamtverkehrsleistung [in Mio. Btkm] zwischen 2003 bis 2012 differenziert nach verschiedenen Verkehrsarten (nur auf Strecken im Sample)



Anm.: Verkehrstyp 1: Intercity/Eurocity; Verkehrstyp 2+5: Schnellzug, Interregio, Regioexpress; Verkehrstyp 3: Regionalzug; Verkehrstyp 4: S-Bahn; Verkehrstyp 6: Fern- und Nahgüterzüge; Verkehrstyp 8+9: Traktorgüterzüge, Lokzug; Verkehrstyp 10: Leermaterialzüge

Die übrigen erklärenden Variablen, welche als Kontrollvariablen dienen, wurden hauptsächlich aus der bestehenden Literatur abgeleitet. Die aussergewöhnlich gute Datensituation in der Schweiz hat uns zusätzlich erlaubt, einzelne weitere Kontrollvariablen auf deren Einfluss zu testen. Für die einzelnen Schätzungen wurden letztendlich immer die gleichen Infrastruktur- und Dummy-Variablen als Kontrollvariablen berücksichtigt.⁶ Eine Übersicht über die verwendeten Variablen wird in Abbildung 2-7 gegeben.

⁶ Ausnahme bilden einzelne Dummy-Variablen, die in unterschiedlichen Schätzungen aufgrund von Kollinearität aus den Schätzungen ausgeschlossen wurden sowie einzelne Jahresdummies bei Schätzungen von Durchschnittswerten, insbesondere bei den Erneuerungskosten.

Abbildung 2-7: Übersicht Infrastrukturvariablen

Variable	Beobachtungen	Mittelwert	Standard-Abweichung	Minimum	Maximum
Gleislänge HG und NG1 [in km]	800	54.081	56.709	3.862	338.493
Durchschnittliche maximale Reisegeschwindigkeit Zugstyp R	800	108.329	16.513	65.681	147.261
Anteil Weichenmeter an Gleislänge [%]	800	0.114	0.120	0.000	0.704
Anteil Brückenmeter an Gleislänge [%]	800	0.021	0.018	0.003	0.104
Anteil Tunnelmeter an Streckenlänge [%]	800	0.070	0.132	0.000	0.913
Gleisanteil mit Radien <500m [%]	800	0.184	0.119	0.017	0.578
Gleisanteil mit > 20 Promille Steigung [%]	800	0.110	0.154	0.001	0.853
Gleisanteil mit Brand- und Lärmschutzwänden [%]	800	0.045	0.075	0.000	0.397
Stützmauern (in m2) pro Streckenkilometer	800	510.753	455.397	11.123	2117.913
Anteil Schwellen > 25 Jahre [%]	800	0.233	0.190	0.000	0.714
Gleisanteil mit Perronkanten [%]	800	0.140	0.090	0.037	0.517
Dummy für grosser Rangierbahnhof auf Strecke [0/1]	800	0.050	0.218	0.000	1.000
Dummy für eingleisige Strecken [0/1]	800	0.425	0.495	0.000	1.000
Dummy Jahr 2003 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy Jahr 2004 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy Jahr 2005 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy Jahr 2006 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy Jahr 2007 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy Jahr 2008 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy Jahr 2009 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy Jahr 2010 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy Jahr 2011 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy Jahr 2012 [0/1]	800	0.100	0.300	0.000	1.000
Dummy für VS-Niederlassungen	800	div.	div.	0.000	1.000
Gleislänge HG und NG1 (in km)	800	54.081	56.709	3.862	338.493

3 Theorie und Modelldiskussion

3.1 Theoretischer Hintergrund

3.1.1 Schätzung der Kostenfunktion für den Unterhalt und Erneuerung der Schieneninfrastruktur

Mit Hilfe statistisch-ökonomischer Schätzmodelle, sogenannter Top-Down-Modellen, kann der Einfluss verschiedener Verkehrs- und Infrastrukturvariablen auf die Unterhalts- und Erneuerungskosten untersucht werden. Die Literatur zu Schätzungen der Infrastrukturkosten ist sehr umfangreich, obwohl das Thema erst seit der EU-Direktive bezüglich klarer Abtrennung von Infrastrukturbetreiber von den nationalen Eisenbahn-Unternehmen intensiv behandelt wurde.⁷ Dazu beigetragen haben insbesondere auch die beiden EU-Forschungsprojekte GRACE⁸ und CATRIN⁹, in welchen die Grenzkosten für den Unterhalt der Verkehrsinfrastrukturen genauer untersucht wurden.

Translog und log-lineare Modelle als Grundlage

Als wichtige Grundlage für die Europäische Forschung dient die Studie von Johansson und Nilsson (2001) zu den Grenzkosten im Schienenunterhalt und Erneuerung in Schweden und Finnland. Für die Schätzung der Kostenfunktion verwenden Johansson und Nilsson Translog-Modelle, die neben der Streckenlänge und der Verkehrsleistung in Bruttotonnen auch diverse Infrastrukturvariablen (darunter Anzahl Weichen, Brücken und Tunnels) berücksichtigen. Die entsprechenden Schätzgleichungen können wie folgt zusammengefasst werden:

$$\ln C_{ijt} = \alpha + \alpha_t + \alpha_j + \beta_y y_{ijt} + \beta_u u_{ijt} + \beta_{y^2} y_{ijt}^2 + \beta_{u^2} u_{ijt}^2 + \beta_{yu} y_{ijt} u_{ijt} + \beta_I I_{ijt} + \beta'_z z_{ijt} + \varepsilon_{jt} \quad (1)$$

, wobei y = Streckenlänge, u = Bruttotonnen, z = diverse Infrastrukturvariablen und I = Dummy-Variablen entsprechen.

Mit diesem Modell können Johansson und Nilsson in beiden Ländern je gut 80% der Unterschiede in den Unterhaltskosten erklärt werden. Ähnliche Translog-Modelle kamen in weiteren Studien und für mehrere Länder zum Einsatz, unter anderen bei Johansson und Nilsson (2004), Tervonen und Idström (2004), Quinet und Gaudry (2010), Wheat und Smith (2008).

Anstelle eines Translog-Modells wird in der Literatur häufig auch auf log-lineare Modelle zurückgegriffen. Beispiele für Log-Lineare Schätzgleichungen finden sich bei: Munduch et al. (2004), Andersson (2006), Marti und Neuenschwander (2006), Marti et al (2009), Maocec (2007), Quinet und Gaudry (2010), Wheat und Smith (2008).

⁷ Europäische Kommission, 2001/14/EC

⁸ Generalisation of Research on Accounts and Cost Estimation, Sixth Framework Programme

⁹ Cost Allocation of TRansport INfrastructure cost, Sixth Framework Programme

$$\ln(C_{it}) = \alpha + \beta_k \ln(q_{kit}) + \delta_m \ln(x_{mit}) + \gamma_n z_{nit} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Ein Beispiel für ein log-lineares Regressionsmodell ist in obiger Gleichung (2) gegeben, wobei

- $C_{(it)}$ den Kosten der Strecke (i) zum Zeitpunkt (t),
- $q_{(kit)}$ der Outputvariable (k) auf der Strecke (i) zum Zeitpunkt (t),
- $x_{(mit)}$ der Infrastrukturvariable (m) der Strecke (i) zum Zeitpunkt (t) und
- $z_{(nit)}$ der Dummyvariable oder Anteilsvariable (n) für die Strecke (i) zum Zeitpunkt (t)

entsprechen. Die Parameter $\beta_{(k)}$, $\delta_{(m)}$ und $\gamma_{(n)}$ werden wie die Konstante α und der Fehlerterm ε aus der Regression geschätzt.

Das log-lineare Modell bildet die logarithmierte Cobb-Douglas Kostenfunktion ab und hat den Vorteil, dass die Kostenelastizitäten¹⁰ einfach aus der Schätzung abgelesen werden können. Beinhaltet das Modell weder quadrierte noch multiplikative Terme, entspricht die Elastizität gleich dem geschätzten β -Koeffizienten (vgl. Gleichung (3)).

$$\frac{\partial \ln(\hat{C}_{it})}{\partial \ln(q_{kit})} = \hat{\beta}_k = \hat{\phi}_k^{ll} \quad (3)$$

Weiterentwicklung mit Box-Cox

Ein log-lineares Schätzmodell unterstellt, dass die beste Linearisierung der verwendeten Daten durch den Logarithmus erreicht wird. In der Realität ist es allerdings möglich, dass eine andere Transformation zu einer besseren Linearität der Daten und somit zu besseren Schätzergebnissen führen kann. Eine populäre alternative bzw. flexiblere Transformation ist die Box-Cox-Transformation (Box und Cox, 1964). Die Formel für die Transformation lautet

$$w^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{(w+c)^\lambda - 1}{\lambda} & \text{für } \lambda \neq 0 \\ \ln(w+c) & \text{für } \lambda = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Der grosse Vorteil der Box-Cox-Transformation ist, dass die log-lineare Transformation als Spezialfall in der Box-Cox-Transformation integriert ist. Werden die beobachteten Daten durch eine log-lineare Verteilung am besten abgebildet, entspricht der Transformationskoeffizient Lambda λ gleich Null.

Box-Cox-Transformationen anstelle von der einfacheren Logarithmus-Transformation wurden insbesondere in den Arbeiten von Gaudry und Quinet (2005, 2010) verwendet. Diese haben

¹⁰ Die Kostenelastizität einer Variablen zeigt an, wie gross die prozentuale Veränderung der Kosten ist, falls die entsprechende Variable um 1% steigt. Mathematisch ausgedrückt entspricht die Kostenelastizität der ersten Ableitung der logarithmierten Kostenfunktion nach der logarithmierten Variable.

gezeigt, dass aufgrund der Daten in Frankreich die Unterhaltskosten durch Box-Cox-Schätzmodelle besser abgebildet werden können als mit log-lineare Schätzmodelle. Im Rahmen des EU-Projekt CATRIN konnte zudem nachgewiesen werden, dass Box-Cox-Schätzungen auch in Schweden (Anderson 2009), Schweiz (Marti, Neuenschwander, Walker 2008) und Österreich (Link 2009) den einfacheren Log-Linearen Schätzungen vorzuziehen sind.¹¹

Die ökonometrische Modellspezifikation einer Box-Cox-Regression ist in Gleichung (5) gegeben:

$$C_{it}^{(\lambda)} = \alpha + \beta_k q_{kit}^{(\lambda)} + \delta_m x_{mit}^{(\lambda)} + \gamma_n z_{nit} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

Die Kosten (C), die Verkehrsleistung (q) sowie vereinzelte Infrastrukturvariablen (x) sind transformiert, während Anteilsvariablen und Dummies unverändert in die Schätzung einfließen

In der einfachsten Variante von Box-Cox-Schätzungen wird davon ausgegangen, dass λ (Lambda) für alle Variablen identisch ist (z.B. Marti, Neuenschwander, Walker (2008), Anderson (2009)). In weiterentwickelten Regressionsmodellen sind auch unterschiedliche λ für die Linkshand und die Rechtshand-Variablen sowie unterschiedliche λ für jede einzelne Variable denkbar (insbesondere z.B. Quinet und Gaudry, 2009). In der vorliegenden Arbeit werden lediglich die Rechthandvariablen Verkehrsleistung und Streckenlänge mit einer Box-Cox-Transformation linearisiert. Die Kosten werden hingegen nur logarithmiert.¹²

3.1.2 Definition und Berechnung der Grenzkosten

Die Grenzkosten sind sowohl in der Betriebswirtschaftslehre als auch in der Mikroökonomie eine bedeutende Grösse. Sie entsprechen den Kosten, die durch die Produktion einer zusätzlichen Einheit eines Produktes entstehen. Übertragen auf unser Forschungsdesign zeigen die Grenzkosten demnach die Unterhalts- beziehungsweise Erneuerungskosten, die durch einen zusätzlichen Bruttotonnenkilometer auf der entsprechenden Strecke entstehen. Mathematisch gesehen entsprechen die Grenzkosten der ersten Ableitung der Kostenfunktion nach den Bruttotonnenkilometern gemäss Gleichung (6).

$$MC = \frac{\partial C}{\partial q^{km}} = \frac{\partial C}{\partial q} \frac{1}{km}, \text{ wobei } q^{km} = \text{Bruttotonnenkilometer} \quad (6)$$

Aufgrund des in dieser Studie verwendeten Schätzmodells entsprechen die geschätzten Betas nicht den Grenzkosten, sondern den Elastizitäten.¹³ Aus diesen lassen sich jedoch relativ

¹¹ In England liefern hingegen Loglineare Modelle bessere Schätzungen der Kosten, vgl. hierzu Wheat und Smith (2008).

¹² Dies ist notwendig, damit das Grid-Search-Verfahren angewendet werden kann.

¹³ Elastizität des Produktes X gibt den prozentualen Anstieg der Kosten an, wenn die Produktion des Gutes X um ein Prozent verändert wird.

einfach die Grenzkosten berechnen. Analog zu Johansson und Nilsson (2004) lautet die Gleichung (7) für die Grenzkosten einer Strecke wie folgt:

$$MC_{it}^j = \frac{\partial \hat{C}_{it}}{\partial q_{it}^{km}} = \frac{\partial \hat{C}_{it}}{\partial q_{it}} \frac{1}{km_{it}} = \frac{\partial \ln(\hat{C}_{it})}{\partial \ln(q_{it})} \frac{\hat{C}_{it}}{q_{it}} \frac{1}{km_{it}} = \phi_{it}^j \frac{\hat{C}_{it}}{q_{it}^{km}} \quad (7)$$

wobei \hat{C}_{it} die geschätzten Kosten, q_{it} den Bruttotonnen bzw. q_{it}^{km} den Bruttotonnenkilometer und ϕ_{it}^j den geschätzten Elastizitäten entsprechen.

Die Grenzkosten entsprechen somit dem Produkt von Kostenelastizität und Durchschnittskosten. Die Grenzkosten werden in Box-Cox und log-linearen Modellen identisch berechnet. Allerdings sind die Elastizitäten unterschiedlich.

Aus den Grenzkosten für die einzelnen Streckenabschnitte werden anschliessend die durchschnittlichen Grenzkosten für das gesamte Netz berechnet. Hierfür werden die Grenzkosten der einzelnen Streckenabschnitte entsprechend der darauf erbrachten Verkehrsleistung gewichtet. Die Formel ist in Gleichung (8) gegeben.

$$MC_{gew}^j = \sum \left[MC_{it}^j \frac{q_{it}^{km}}{\sum q_{it}^{km}} \right] \quad (8)$$

In den Ergebnistabellen werden neben den Grenzkosten jeweils auch die geschätzten Durchschnittskosten pro Bruttotonnenkilometer sowie die Kostendeckungsgrade aufgeführt. Letztere entsprechen dem Anteil der geschätzten Grenzkosten an den geschätzten Durchschnittskosten.

3.2 Schätzmodell

3.2.1 Drei verschiedene Grundmodelle

Das anschliessend verwendete Schätzmodell basiert auf den bisherigen Arbeiten von Catrin (vgl. Marti et al 2009). Wie bereits in Catrin werden die Kosten daher über die Streckenlänge und die Verkehrsleistung gemessen in Bruttotonnen regressiert. Zusätzlich werden diverse Infrastrukturvariablen als Kontrollvariablen berücksichtigt. Des Weiteren fließen auch Dummyvariablen für das Beobachtungsjahr und die Unterhaltsregion in die Schätzungen mit ein.

Die Auswahl der erklärenden Variablen wird aus bisherigen Studien abgeleitet. Dabei sind insbesondere Johansson und Nilsson (2001) sowie Murdoch (2004) massgebend. Aufgrund der guten Datenlage in der Schweiz wurden zudem weitere Variablen getestet. Eine Übersicht über die in der Regression verwendeten erklärenden Variablen wird in Abschnitt 2.3 gegeben.

Die bestehenden wissenschaftlichen Analysen zeigen, dass die Funktion zur Schätzung der Unterhalts- und Erneuerungskosten nicht linear ist. Für die statistische Schätzung muss die

nicht-lineare Kostenfunktion deshalb in eine lineare Schätzfunktion umgewandelt werden. Wie im Kapitel 3.1 aufgezeigt, werden in der Literatur zu diesem Zweck am häufigsten log-lineare bzw. Translog-Schätzgleichungen sowie Box-Cox-Modelle verwendet. Aufgrund der bisherigen Studien für die Schweiz ist eine Box-Cox-Transformation einer loglinearen Transformation vorzuziehen.

Insgesamt werden für die Gesamtkosten drei Modelle getestet. Die Modelle unterscheiden sich ausschliesslich bezüglich des Differenzierungsgrades der Verkehrsleistung. Während das erste Modell das Total der Verkehrsleistung berücksichtigt, werden im zweiten Modell die Verkehrsleistung von Reiseverkehr und Güterverkehr getrennt betrachtet. Im dritten Modell folgt eine noch stärkere Differenzierung der Verkehrsleistung in insgesamt fünf verschiedene Reiseverkehrstypen¹⁴ und zwei verschiedene Güterverkehrstypen. Die einzelnen Verkehrsleistungsvariablen werden in Abschnitt 2.2 beschrieben.

Die drei Modelle lassen sich somit wie folgt umschreiben:

Model 1: Gesamtverkehr

$$C_{it}^{(ln)} = \begin{cases} \beta + \beta km_{it}^{(\lambda)} + \beta (km_{it}^{(\lambda)})^2 + \beta q_{it}^{(\lambda)} + \sum \beta x_{it} & \text{für } \lambda \neq 0 \\ \beta + \beta km_{it}^{(ln)} + \beta (km_{it}^{(ln)})^2 + \beta q_{it}^{(ln)} + \sum \beta x_{it} & \text{für } \lambda = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Model 2: Personen und Güterverkehr getrennt

$$C_{it}^{(ln)} = \begin{cases} \beta + \beta km_{it}^{(\lambda)} + \beta (km_{it}^{(\lambda)})^2 + \sum_{N=1}^6 \beta q_{Nit}^{(\lambda)} + \beta (q_{Pit}^{(\lambda)} \times q_{Git}^{(\lambda)}) + \sum \beta x_{it} & \text{für } \lambda \neq 0 \\ \beta + \beta km_{it}^{(ln)} + \beta (km_{it}^{(ln)})^2 + \sum_{N=1}^6 \beta q_{Nit}^{(ln)} + \beta (q_{Pit}^{(ln)} \times q_{Git}^{(ln)}) + \sum \beta x_{it} & \text{für } \lambda = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Model 3: Verkehrsleistung differenziert nach 6 Verkehrstypen

$$C_{it}^{(ln)} = \begin{cases} \beta + \beta km_{it}^{(\lambda)} + \beta (km_{it}^{(\lambda)})^2 + \sum_{N=1}^6 \beta q_{Nit}^{(\lambda)} + \sum_{M>N}^6 \sum_{N=1}^6 \beta (q_{Nit}^{(\lambda)} \times q_{Mit}^{(\lambda)}) + \sum \beta x_{it} & \text{für } \lambda \neq 0 \\ \beta + \beta km_{it}^{(ln)} + \beta (km_{it}^{(ln)})^2 + \sum_{N=1}^6 \beta q_{Nit}^{(ln)} + \sum_{M>N}^6 \sum_{N=1}^6 \beta (q_{Nit}^{(ln)} \times q_{Mit}^{(ln)}) + \sum \beta x_{it} & \text{für } \lambda = 0 \end{cases} \quad (11)$$

, wobei km = Streckenlänge, q = Verkehrsleistung, x = Kontrollvariablen, (λ) = Box-Cox-Transformation und (ln)= Logarithmustransformation

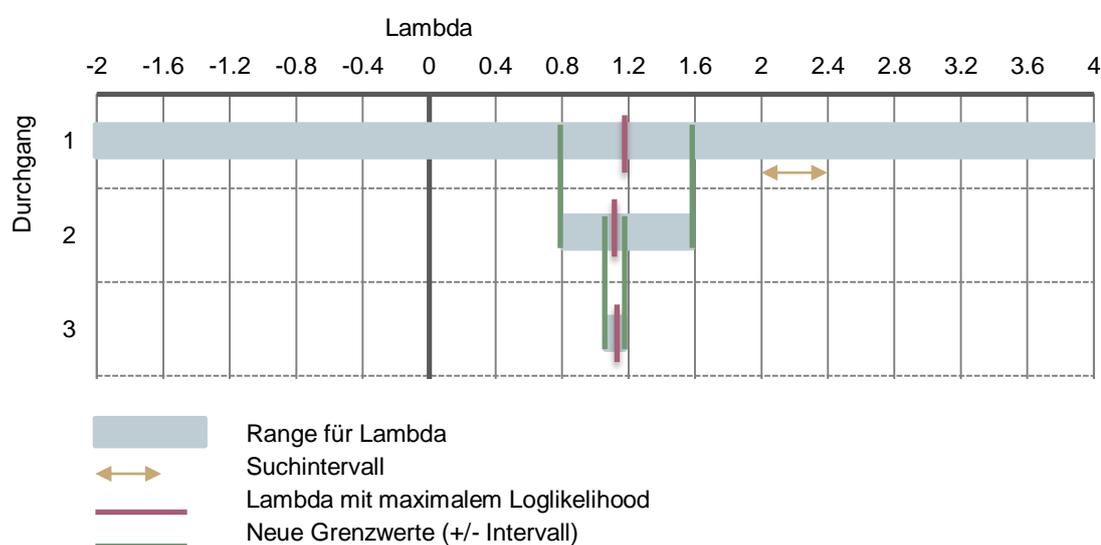
Wie aus den Gleichungen hervorgeht, werden nur die Streckenlänge und die Verkehrsleistungen transformiert, nicht hingegen die Kontrollvariablen. In den Schätzungen mit differenzierten Verkehrsleistungen werden zudem Interaktionsterme zwischen den einzelnen Verkehrsleistungen berücksichtigt.

¹⁴ Die Kategorie Leerzüge besteht werden gemäss unseren Unterlagen sowohl dem Reiseverkehr als auch dem Güterverkehr zugeordnet. Für die Studie haben wir diese Kategorie umfassend dem Reiseverkehr zugeteilt.

3.2.2 Bestimmung von Lambda

Mit welchem Lambda-Wert die beste Transformation und damit die besten Schätzergebnisse erreicht werden, kann einerseits aus den Daten geschätzt werden, oder aber andererseits mit einer heuristischen Vorgehensweise (Grid-Search) ermittelt werden. Die Schätzung über die Daten kann aber bei Berücksichtigung von Interaktionen und quadratischen Termen in der Schätzung äussert komplex sein und ist deshalb vielfach nur für einfachere Schätzgleichungen in den Standardstatistiksoftwares integriert. Wir ermitteln das optimale Lambda daher über die heuristische Methode. Hierfür werden Schätzungen für unterschiedliche Lambdas durchgeführt und den Wert für Lambda mit der maximalen Loglikelihood-Ratio ermittelt.

Abbildung 3-1: Grid-Search Vorgehensprinzip für Bestimmung von Lambda



Dies geschieht in mehreren Schritten, wobei der mögliche Wertebereich für Lambda immer stärker eingegrenzt wird (vgl. Abbildung 3-1):

1. Wir definieren in einem ersten Schritt einen Wertebereich (-2 und +4), in welchem Lambda liegen darf und bestimmen für einem festen Intervall (0.4) jeden möglichen Wert von Lambda innerhalb des Bereichs. Dadurch erhalten wir einen Vektor A mit sämtlichen möglichen Werten für Lambda [$A=(-2, -1.6, -1.2, \dots, +3.2, +3.6, +4)$].
2. Für jedes Lambda in Vektor A berechnen wir die transformierten Werte für Streckenlänge und Verkehrsleistung und führen die Schätzung gemäss den oben aufgeführten Schätzmodellen aus (OLS-Schätzungen). Dadurch erhalten wir für jede Schätzung eine Loglikelihood-Ratio.
3. Im nächsten Schritt ermitteln wir über alle Schätzungen diejenige mit der höchsten Loglikelihood-Ratio und der dazugehörige Wert für Lambda (z.B. 1.2).

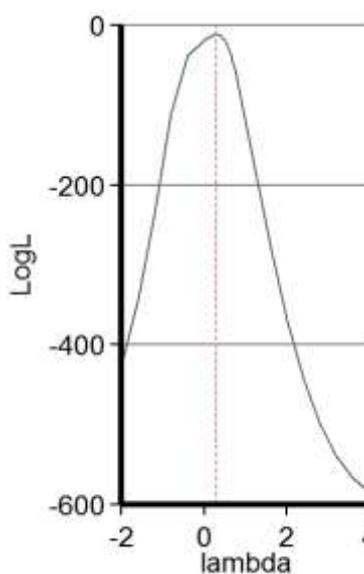
4. Ausgehend vom besten Lambda und dem Suchintervall setzen wir neue Grenzwerte für Lambda (1.2 ± 0.4). Wiederum bestimmen wir für ein festes Intervall, welches nun beispielsweise einem Zehntel des vorhergehendem entspricht (0.04), jeden möglichen Wert für Lambda innerhalb der Grenzwerte.
5. Die Schritte 2 bis 4 werden anschliessend mehrfach wiederholt (fünf Durchgänge). Dadurch wird der Wert für das beste Lambda weiter eingegrenzt.

Aus diesem Verfahren erhalten wir einen auf fünf Kommastellen exakten Wert für das optimale Lambda. Nachfolgende Abbildung zeigt die Log-Likelihood Ratios für die drei Schätzmodelle in Abhängigkeit von Lambda. Bereits aus der Abbildung ist klar ersichtlich, dass die Lambdas signifikant von 0 unterschiedlich sind und somit Box-Cox-Modelle gegenüber Loglinearen Modellen zu bevorzugen sind. Dies wird durch entsprechende Tests (Chi2-Test) bestätigt.

Abbildung 3-2: Wahl für Lambda, Gesamtkosten

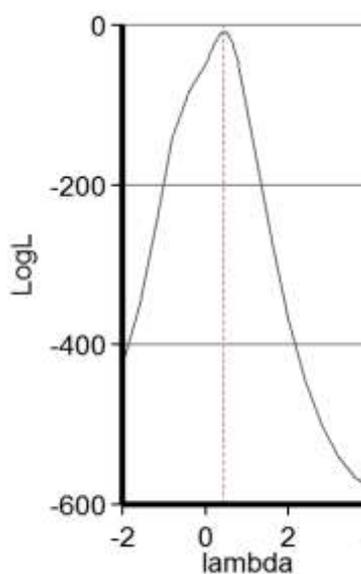
Modell 1: Verkehr Total

Lambda max.= 0.291



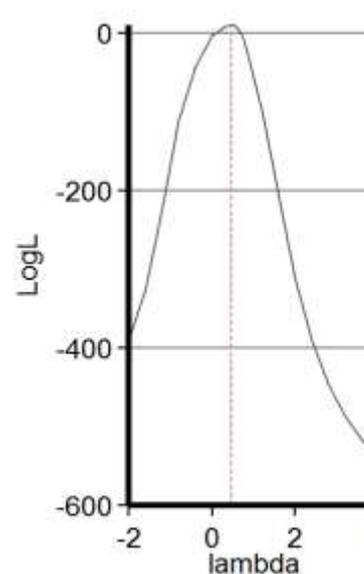
Modell 2: Personen und Güterverkehr

Lambda max.= 0.443



Modell 3: Differenzierte Verkehrstypen

Lambda max.=0.453



4 Schätzergebnisse und Grenzkosten bei Betrachtung der Totalkosten

4.1 Schätzungen der Unterhalts- und Erneuerungskosten

Wie oben erläutert werden für die Schätzung die Daten von 80 Strecken und Knotenpunkte aus 10 Jahren verwendet. Insgesamt stehen somit 800 Beobachtungen zur Verfügung. Um erwartungsuntreue Ergebnisse aufgrund von Heteroskedastizität¹⁵ zu vermeiden, wurden sämtliche Schätzungen mit robusten Schätzern berechnet.

Der Erklärungsgehalt der verschiedenen Schätzungen ist in allen vier Kostenmodellen sehr hoch: Über 92% der Unterschiede in den Unterhalts- und Erneuerungskosten können durch die in den Modellen enthaltenen Variablen erklärt werden. Zudem sind die Ergebnisse insgesamt sehr stabil, d.h. durch das Hinzufügen oder Weglassen einzelner Variablen oder Beobachtungen bleiben die Signifikanzen und die Vorzeichen der einzelnen Koeffizienten grundsätzlich gleich.

Abbildung 4-1: Ergebnisse der Schätzungen für die Gesamtkosten

		Model 1: Gesamtverkehr	Model 2: Personen und Güterverkehr getrennt	Model 3: Verkehrsleistung differenziert nach 6 Verkehrstypen
	Anzahl Beobachtungen	800	800	800
	λ (Lambda)	0.29148	0.44276	0.4528
	Konstante	11.05199 ***	11.57001 ***	11.57663 ***
Transformierte Variablen (Verkehr und Streckenlänge)	Gleislänge [km]	0.51467 *** [16.866]	0.31529 *** [22.141]	0.30756 *** [19.459]
	Gleislänge quadriert [km]	-0.014 *** [-6.771]	-0.00648 *** [-10.387]	-0.00644 *** [-9.369]
	Bruttotonnen alle Verkehrsarten [Bt]	0.00435 *** [13.199]		
	Bruttotonnen nur Reiseverkehr [Bt]		0.00046 *** [9.432]	
	Bruttotonnen nur Güterverkehr [Bt]		0.00049 *** [9.185]	
	Interaktion zw. Güterverkehr und Reiseverkehr [Bt]		0.00000 ***	

¹⁵ Eine der Grundannahmen einer Regression besagt, dass die Varianz der Fehlerterme über alle Beobachtungen konstant ist (Homoskedastizität). Dies ist in der Realität selten gegeben. Bei unterschiedlichen Varianzen der Fehlerterme über die Beobachtungen spricht man von Heteroskedastizität. Für weitere Informationen zu Heteroskedastizität insbesondere über die Folgen von Heteroskedastizität siehe bspw. Wooldridge (2005), S.257ff.

			[-5.254]	
	Bruttotonnen nur Intercity/Eurocity [Bt]			0.00023 *** [3.249]
	Bruttotonnen nur Schnellzug, Interregio, Regioexpress [Bt]			0.00012 * [1.690]
	Bruttotonnen nur Regionalzug [Bt]			0.00016 [1.525]
	Bruttotonnen nur S-Bahn [Bt]			0.00025 *** [3.112]
	Bruttotonnen nur Fern- und Nahgüterzüge [Bt]			0.00014 [1.585]
	Bruttotonnen nur Traktorgüterzüge, Lokzug [Bt]			-0.00001 [-0.026]
	Bruttotonnen nur Leermaterialzüge [Bt]			0.00089 *** [3.244]
	Diverse Interaktionen zwischen den obigen Verkehrstypen	div.	div.	div.
Nicht transformierte Variablen	Durchschnittliche Geschwindigkeit Reisezüge	-0.01074 *** [-7.943]	-0.01046 *** [-7.874]	-0.00912 *** [-5.737]
	Anteil Weichenmeter an Gleislänge [%]	1.62248 *** [6.389]	1.2798 *** [4.910]	1.58701 *** [4.753]
	Anteil Brückenmeter an Gleislänge [%]	0.47599 [0.589]	0.27572 [0.330]	-0.33406 [-0.337]
	Anteil Tunnelmeter an Streckenlänge [%]	0.59302 *** [4.951]	0.5759 *** [4.530]	0.31181 ** [2.206]
	Gleisanteil mit Radien <500m [%]	0.80629 *** [4.938]	0.90846 *** [5.482]	0.72099 *** [3.493]
	Gleisanteil mit mehr als 20 Promille Steigung [%]	0.1029 [1.083]	0.19986 * [1.960]	0.17336 [1.338]
	Gleisanteil mit Brand- und Lärmschutzwänden [%]	0.66195 *** [3.008]	1.01001 *** [4.398]	1.38331 *** [4.679]
	Stützmauern (in m2) pro Streckenkilometer	-0.00001 [-0.272]	0.00002 [0.511]	0.00004 [0.843]
	Anteil Schwellen, die älter als 25 Jahre sind [%]	0.16582 * [1.673]	0.20071 ** [2.043]	0.3775 *** [3.271]
	Gleisanteil mit Perronkanten [%]	1.47019 *** [5.615]	1.51769 *** [5.734]	1.17759 *** [3.640]
	Dummy Strecke mit grossem Rangierbahnhof [0/1]	0.10097 ** [2.082]	0.09852 * [1.948]	0.10744 * [1.665]
	Dummy für eingleisige Strecken [0/1]	0.15592 *** [3.770]	0.19657 *** [4.647]	0.19998 *** [3.577]

Dummy verschiedene Jahre [0/1]	div.	div.	div.
Regionendummies [0/1]	div.	div.	div.
Log-Likelihood	-43.795	-46.481	-10.411
R2 adjusted	0.923	0.922	0.927

***/**/* kennzeichnen signifikante Variablen auf dem 1/5/10% Niveau. Die Werte in den Klammern entsprechen den t-Statistiken.

Die Resultate der drei Schätzungen sind in Abbildung 4-1 abgebildet. Die Vorzeichen und die Signifikanz der einzelnen erklärenden Variablen entsprechen im Wesentlichen den Erwartungen und bleiben über die drei Modelle konstant. Nachfolgend kurz die wichtigsten Erkenntnisse:

Die **Gleislänge** weist in allen drei Modellen einen hochsignifikanten und positiven Zusammenhang zu den Kosten auf. Dieser Zusammenhang scheint aber mit zunehmender Gleislänge abnehmend zu sein (negativer signifikanter Einfluss der quadrierten Gleislänge). Ob diese Abnahme tatsächlich auf Skaleneffekte bei längeren Streckenabschnitten zurückzuführen ist, ist eher fraglich, da die Gleislänge keinen Zusammenhang mit den effektiven Unterhaltsstrategien hat. Skaleneffekte wären allenfalls denkbar, wenn die Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten über die gesamte Strecke erfolgen. Meist werden diese aber nur über einzelne Teilabschnitte gemacht. Wahrscheinlicher ist, dass der Einfluss der quadrierten Gleislänge einen anderen Aspekt korrigiert, der mit der Einteilung in die einzelnen Streckenabschnitte in Zusammenhang steht.

Auch das **Verkehrsaufkommen** weist grundsätzlich den erwarteten positiven und hoch signifikanten Einfluss auf. Im Model 2 mit differenzierter Betrachtung zwischen Reise- und Güterverkehr sind die Koeffizienten für die beiden Verkehrsarten beinahe identisch.¹⁶ Der signifikante negative Effekt des Interaktionsterms entspricht ebenfalls den Erwartungen: Je höher der Reiseverkehr auf einer Strecke ist, desto weniger fällt eine zusätzliche Bruttotonne Güterverkehr ins Gewicht.

Die Effekte für die einzelnen Verkehrstypen in Model 3 sind hingegen nicht direkt aus den Koeffizienten zu interpretieren, da mehrere Interaktionsterme zwischen den Verkehrsarten in der Schätzung mitberücksichtigt werden. Aufgrund dieser Interaktionsterme ist die Interpretation des reinen Haupteffektes direkt aus den Schätzergebnissen nicht möglich.

Bei den **Infrastrukturvariablen** sind zwischen den einzelnen Modellen kleinere Abweichungen festzustellen. Insgesamt entsprechen aber auch die Infrastrukturvariablen bezüglich Vorzeichen und Signifikanz mehrheitlich den Erwartungen:

¹⁶ Ein Vergleich zu den anderen Modellschätzungen ist nicht angebracht, da die Lambda-Parameter sich voneinander unterscheiden.

- Eine höhere **durchschnittliche maximal erlaubte Reisegeschwindigkeit** für Reisezüge verringert die Kosten für Unterhalt und Erneuerung- Langsamere Geschwindigkeiten sind in erster Linie in engen Kurven, Bergstrecken und besiedeltem Gebiet zu erwarten. Diese Aspekte sind aber bereits durch andere Faktoren in der Schätzung berücksichtigt. Weisen zwei Strecken trotz sonst identischer Voraussetzung unterschiedliche maximale Geschwindigkeiten auf, kann dies ein Indiz für geringere Qualität der Infrastruktur sein (je schlechter die Qualität, desto geringer ist die Reisegeschwindigkeit). Unter diesem Gesichtspunkt ist der negative Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Kosten plausibel, da auf qualitativ bereits guten Strecken weniger Unterhalt und Erneuerung geleistet werden muss.
- Einen erwarteten positiven und signifikanten Zusammenhang zu den Unterhaltskosten zeigen zudem folgende Variablen:
 - Anteil Weichenmeter an Gleislänge
 - Anteil Tunnelmeter an Streckenlänge
 - Gleisanteil mit Radien <500m
 - Gleisanteil mit Brand- und Lärmschutzwänden (als IV für urbanes und besiedeltes Gebiet)
 - Anteil Schwellen, die älter als 25 Jahre sind
 - Gleisanteil mit Perronkanten
 - Streckenabschnitte mit grossem Rangierbahnhof
- Höhere Unterhaltskosten sind auf **ingleisigen Strecken** beobachtbar. Eine mögliche Erklärung für dieses Ergebnis könnte darin bestehen, dass auf eingleisigen Strecken keine Ausweichmöglichkeiten bestehen. Unterhaltsarbeiten sind in solchen Fällen nur in Randzeiten oder mit ständigen Unterbrüchen möglich, wodurch diese verteuert werden.
- Unterschiede bestehen zudem zwischen den einzelnen Niederlassungen sowie zwischen den Erhebungsjahren.
- Einzelne Erklärungsfaktoren weisen je nach Modell einen **unterschiedlichen Einfluss** auf die Unterhaltskosten aus. Insbesondere gewinnt das Alter der Schwellen mit zunehmender Differenzierung des Verkehrs an Bedeutung. Hingegen verliert der Dummy für Strecken mit grossem Rangierbahnhof¹⁷ seinen bereits schwach-signifikant positiven Einfluss mit einer stärkeren Differenzierung im Verkehr. Die Mehrkosten werden durch die entsprechend höhere Güterverkehrsleistung abgebildet. Der Gleisanteil mit mehr als 20 Promille Steigung ist zudem nur im Modell 2 schwach signifikant und positiv.

Keinen Einfluss auf die Unterhalts- und Erneuerungskosten haben gemäss Modellschätzungen folgende Parameter:¹⁸

¹⁷ Dabei handelt es sich um ausschliesslich vier Strecken, da reine Rangierbahnhofs-Strecken aus der Schätzung ausgeschlossen wurden.

¹⁸ Die Resultate der Schätzungen werden von diesen Variablen nur geringfügig beeinflusst. Für die Schätzung ist demnach irrelevant, ob diese berücksichtigt werden oder nicht.

- Anteil Brückenmeter an Gleislänge
- Stützmauern (in m²) pro Streckenkilometer

Mehrheitlich stimmen die oben aufgeführten Ergebnisse mit den Erwartungen und den früheren Schätzergebnissen überein. Zudem zeigt eine weiterführende Analyse der Schätzergebnisse (Residuenanalyse), dass die Modellvoraussetzungen erfüllt sind. Durch die stärkere Aggregation der Strecken auf das 100er Raster sind zudem einige eher unerwarteten Resultate der bisherigen Schätzungen nicht mehr beobachtbar (insbesondere die negativen Zusammenhänge bei Lärm- und Brandschutzwänden sowie bei Tunnelanteil pro Strecke). Insgesamt sind die vorliegenden Schätzungen somit Verbesserungen der bisherigen Schätzungen.

4.2 Berechnung der Grenzkosten

Ziel des Forschungsprojektes ist die Herleitung und die Interpretation unterschiedlicher Grenzkosten pro Bruttotonnenkilometer für einzelne Verkehrstypen bez. Unterhalt und Erneuerung. Die Herleitung der Grenzkosten erfolgt auf Basis der obigen Schätzergebnisse und wird in Abschnitt 3.1.2 genauer beschrieben. Die Ergebnisse der Grenzkosten gemäss den drei Modellen sind in Abbildung 4-2 gegeben.

Abbildung 4-2: Grenzkosten pro Bruttotonnen nach unterschiedlichen Verkehrsarten (Box-Cox-Modelle)

		Grenzkosten [CHF/Btkm]	Ø-Kosten [CHF/Btkm]	Deckungs- grad [in %]
Modell 1	Alle Verkehrsarten	0.00270	0.00505	0.53455
Modell 2	Personenverkehr	0.00251	0.00812	0.30842
	Güterverkehr	0.00226	0.01332	0.16991
Modell 3	Intercity/Eurocity	0.00130	0.02096	0.06196
	Schnellzug, Interregio, Regioexpress	0.00150	0.02397	0.06247
	Regionalzug	0.00320	0.10459	0.03059
	S-Bahn	0.00299	0.03074	0.09714
	Fern- und Nahgüterzüge	0.00164	0.01364	0.12031
	Traktorgüterzüge, Lokzug	0.04051	0.55307	0.07324
	Leermaterialzüge	0.01887	0.44707	0.04222

Aus der Abbildung geht hervor, dass die **Grenzkosten für den Gesamtverkehr** (Modell 1) rund 0.00270 CHF/Btkm betragen. Gegenüber den bisherigen Grenzkostenberechnungen auf Basis von Box-Cox-Modellen - Marti, Neuenschwander, Walker 2008 weisen Grenzkos-

ten für Unterhalt und Erneuerung von 0.00132 CHF/Btkm aus – sind die aktuellen Werte deutlich höher. Eine mögliche Ursache für diesen Unterschied dürfte in der stärker aggregierten Basiseinheit (100er statt 400er Streckennetz) liegen. Aufgrund des höheren Aggregationslevels der Daten sind die Ergebnisse weniger anfällig auf Ausreiser. Zudem dürfte die Kostenaufteilung auf die einzelnen Streckenabschnitte präziser sein.

Grenzkosten in Höhe von 0.00270 CHF/Btkm entsprechen rund 53% der Durchschnittskosten pro Bruttotonnenkilometer. Im internationalen Vergleich liegen die Grenzkosten auf einem ähnlichen Niveau wie in Österreich (Grenzkosten nur Unterhalt: ~0.00226 CHF/Btkm) und Grossbritannien (Grenzkosten nur Unterhalt: ~0.00326 CHF/Btkm), sind aber vergleichsweise immer noch tief.¹⁹

Aus Modell 2 lassen sich die **Grenzkosten getrennt für Reiseverkehr und Güterverkehr** berechnen. Es zeigt sich, dass ein zusätzlicher Bruttotonnenkilometer im Reiseverkehr nur unwesentlich höhere Kosten verursacht als ein zusätzlicher Bruttotonnenkilometer im Güterverkehr. Mit 0.00251 CHF/Btkm im Reiseverkehr und 0.00226 CHF/Btkm im Güterverkehr sind die beiden Werte jedoch leicht unter den Ergebnissen aus Modell 1 für den Gesamtverkehr. Aufgrund fehlender Vergleichswerte ist eine Plausibilisierung dieser Ergebnisse schwierig. Ein Hinweis auf die Plausibilität liefern die durchschnittlichen Elastizitäten (Deckungsgrade). Im Verhältnis entsprechen die Deckungsgrade mit 17% im Güterverkehr und 31% im Reiseverkehr in etwa dem Verhältnis des effektiven Verkehrsaufkommens der beiden Verkehrsarten (ein Drittel zu zwei Drittel). Addiert entsprechen die beiden Deckungsgrade zudem wiederum in etwa dem Deckungsgrad für den Gesamtverkehr aus Modell 1 (vgl. Abbildung 4-3).

Eine stärkere Differenzierung der **Grenzkosten für verschiedene Verkehrsarten** kann aufgrund der Schätzung zu Modell 3 vorgenommen werden. Dabei zeigt sich folgendes Bild:

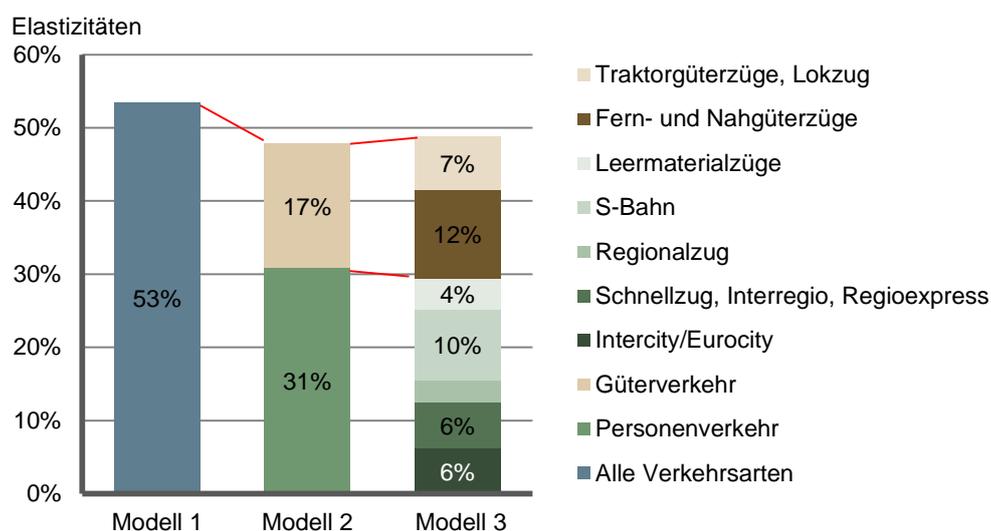
- Die Grenzkosten für Intercity/Eurocity Züge und internationale Züge liegen mit rund 0.00130 CHF/Btkm auf ähnlichem Niveau wie die Grenzkosten für Schnellzüge, Interregio und RegioExpress (0.00150 CHF/Btkm).
- Ebenfalls ähnliches Niveau haben die Grenzkosten für Regionalzüge (0.00320 CHF/Btkm) und S-Bahn-Züge (0.00299 CHF/Btkm). Im Vergleich zu den übrigen Personenzugskategorien sind diese Grenzkosten aber deutlich höher (Faktor zwei). Mögliche Hypothesen für diese Unterschiede sind:
 - Im Vergleich zu den Schnell-Zügen und den internationalen Zügen verursachen die Regionalzüge stärkeren Schaden aufgrund häufigerer Brems- und Beschleunigungsvorgängen.
 - Insbesondere S-Bahnzüge verkehren in dichtem Siedlungsgebiet und auf Netzen mit starken Verkehrsaufkommen. Beide Aspekte verteuern die Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten (kurze Unterhaltsfenster, Nacharbeit, etc.)

¹⁹ Vgl. hierzu Wheat, Smith, Nash (ITS), CATRIN (Cost Allocation of TRansport INfrastructure cost), Deliverable 8 – Rail Cost Allocation for Europe. Funded by Sixth Framework Programme. VTI, Stockholm, 2009.

- Unterschiede im Fahrwerk (Ingenieursansatz): Intercity/Eurocityzüge und Schnellzüge verfügen über besseres Rollmaterial, die weniger Schäden an den Gleisen verursachen.
- Mit 0.00164 CHF/Btkm sind die Grenzkosten für Fern- und Nahgüterverkehrszüge, welche im Schnitt über 95% des gesamten Güterverkehrs ausmachen, leicht unterhalb der Grenzkosten für den gesamten Güterverkehr aus Schätzmodell 2.
- Hohe Grenzkosten weisen hingegen die Traktorgüterzüge und Lokzüge sowie die Leermaterialzüge auf. Der Anteil der beiden Kategorien am Gesamtverkehr ist jedoch sehr klein. Die entsprechenden Werte sind daher begrenzt aussagekräftig.

Die obigen Überlegungen deuten darauf hin, dass die berechneten Grenzwerte durchaus plausibel sind. Allerdings ist eine vertiefte Plausibilisierung aufgrund fehlender nationaler oder internationaler Vergleichswerte für verschiedene Verkehrstypen schwierig.

Abbildung 4-3: Durchschnittliche Elastizitäten, Gesamtkosten



5 Getrennte Schätzung nach Kostenarten

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die Auswirkungen der Verkehrsdichte für die Unterhaltskosten inklusive die Instandsetzungskosten untersucht. In einem weiteren Schritt werden nun die Effekte der Verkehrsleistung ausschliesslich auf die Instandsetzungskosten bzw. Erneuerungskosten analysiert. Ergänzend hierzu werden auch die Unterhaltskosten ohne Erneuerungskosten betrachtet.

5.1 Besonderheiten der Erneuerungskosten

Der Einfluss der Verkehrsleistung auf die Erneuerungskosten wurde bereits im Europäischen Forschungsprojekt CATRIN²⁰ untersucht. Obwohl die Datenqualität für die Fallstudie der Schweiz vergleichsweise gut war, zeigte sich im Forschungsprojekt CATRIN doch, dass für eine Betrachtung der Erneuerungskosten die Zeitreihe tendenziell zu kurz waren und einzelne Streckenabschnitte kaum Erneuerungskosten aufwiesen.

Mit dem hier verwendeten Datensatz werden diesbezüglich zwei Verbesserungen erzielt.

1. Die Strecken werden auf einer höheren Aggregationsstufe verwendet (100er statt 400er Raster). Dadurch wird die Zahl der Beobachtungen ohne Erneuerungsaufwände reduziert.
2. Die Datengrundlage umfasst nun 10 Jahre und somit wird die Wahrscheinlichkeit grösser, dass in allen Streckenabschnitten einzelne Teilbereiche der Infrastruktur erneuert wurden.

Die Datengrundlage konnte insgesamt auf eine solidere Basis gestellt werden.

Für die Schätzung der Auswirkungen der Verkehrsleistung auf die Kosten und die Berechnung der Grenzkosten werden grundsätzlich die gleichen Schätzmodelle und Berechnungen wie für die Gesamtkosten verwendet (vgl. Gleichungen 9-11 in Abschnitt 3.2.1). Im Zusammenhang mit den Erneuerungskosten stellen sich aber weitere besondere Herausforderungen. Insbesondere fallen im Gegensatz zum Unterhalt die Instandsetzungsarbeiten nicht jährlich an, sondern tendenziell eher unregelmässig über längere Zeitabstände. Dies führt dazu, dass sowohl bei der abhängigen Variablen als auch bei den erklärenden Variablen einige zusätzliche Überlegungen bezüglich der Schätzmodelle notwendig sind:

- Da die Instandhaltungsarbeiten nicht jährlich anfallen, ist zu prüfen, ob eine jährliche Betrachtung der Erneuerungskosten sinnvoll ist oder als erklärende Variable nicht eher die durchschnittlichen Erneuerungskosten über die vergangenen Jahre betrachtet werden sollten.

²⁰ vgl. Marti, Neuenschwander, Walker (2008), «Unterhalts- und Erneuerungskosten des Schienenverkehrs in der Schweiz, Schweizer Fallstudie im Rahmen des EU-Projektes CATRIN „Cost Allocation of Transport Infrastructure „ »

- Neben dem aktuellen Verkehrsaufkommen ist der Bedarf für Instandsetzungsarbeiten auch vom früheren Verkehrsaufkommen abhängig, ein entsprechender Einbezug in Form von Lag-Variablen bzw. als durchschnittlichen Verkehrsaufkommens der letzten Jahre ist daher zu prüfen.
- Eine Hypothese besteht darin, dass der Erneuerungsbedarf mitunter von den in den vergangenen Jahren geleisteten Unterhaltsarbeiten abhängig²¹ ist. Der Einbezug der Kosten für Unterhalt in den vergangenen Jahren als erklärende Variable ist zu prüfen.

Die zusätzlichen Überlegungen werden nachfolgend kurz andiskutiert.

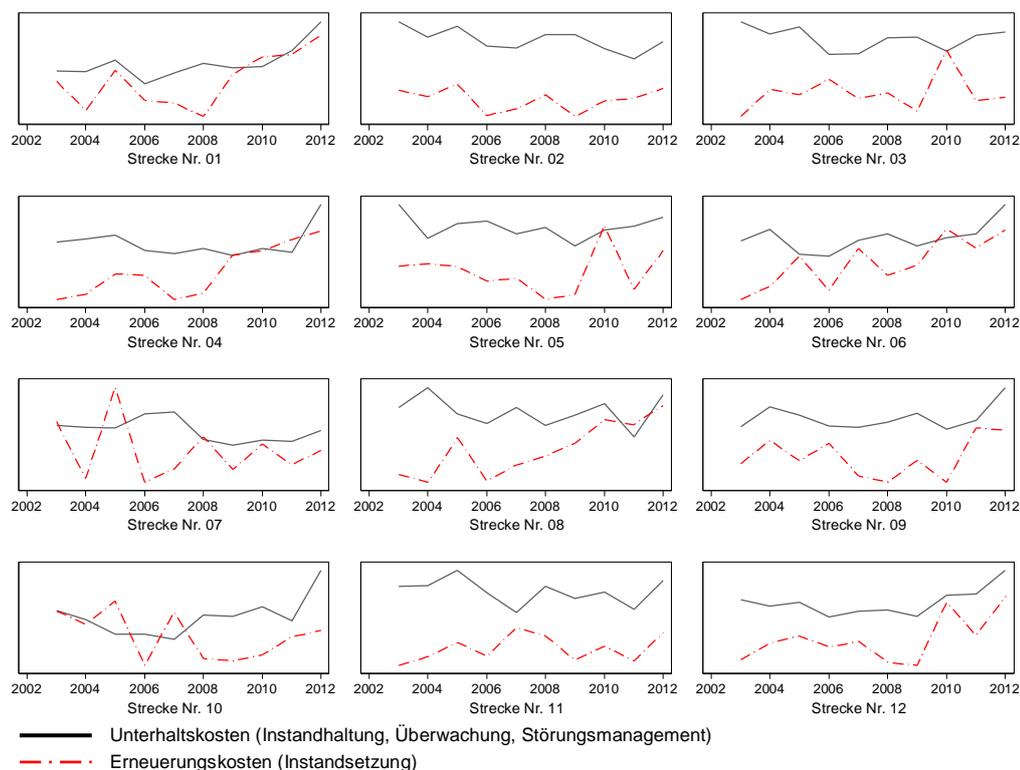
a) Rollende Durchschnittskosten versus jährliche Kosten

Im Gegensatz zu den Unterhaltsarbeiten, die häufig jährlich wiederkehrende Arbeiten umfassen, werden Instandsetzungsarbeiten eher in längeren periodischen Abständen wiederholt. Daher ist eine Schätzung der jährlichen Erneuerungskosten auf den jährlichen Verkehr nur bedingt sinnvoll. Es stellt sich die Frage, wie damit umzugehen ist.

Naheliegender wäre, anstelle der jährlichen Kosten die zyklischen Kosten zu verwenden und die aggregierte Verkehrsleistung bzw. die aggregierten Kosten innerhalb der Zyklen zu betrachten. Hierfür wäre allerdings notwendig, dass eindeutige Erneuerungszyklen identifizierbar sind. Idealerweise würden die Erneuerungskosten in einem Jahr hoch und in den darauffolgenden Jahren eher gering ausfallen. Eine kurze graphische Analyse der Erneuerungskosten der 80 Streckenabschnitte (vgl. Abbildung 5-1) zeigt jedoch, dass jährliche Unterschiede aber keine eindeutigen Zyklen zu erkennen sind. Häufig folgt zwar auf ein Jahr mit hohen Ausgaben für die Instandsetzung tendenziell eher ein Jahr mit geringeren Ausgaben. Die Ausgaben haben jedoch nur relative Peaks, welche auch eher in unregelmässigen Abständen anstehen. Dies entspricht den Erwartungen, da die Instandsetzungskosten einerseits die gesamte Infrastruktur umfassen, daher unterschiedliche Elemente mit unterschiedlichen Lebenszyklen beinhaltet. Andererseits sind die Strecken in sich nicht homogen. Sie bestehen vielmehr aus unterschiedlichen Teilabschnitten, deren Infrastruktur sich sowohl bezüglich der Zusammensetzung (z.B. Teilabschnitte mit Holzschwellen mit einer Lebensdauer von 25 Jahren und Teilabschnitte mit Betonschwellen mit einer Lebensdauer von 40 Jahren) sowie deren Alter unterscheidet.

²¹ Vgl. hierzu bspw.: Walter Jäggi 2014, Das Schweizer Schienennetz ist überstrapaziert, in: Der Bund, 5. August 2014.

Abbildung 5-1: Entwicklung der Unterhalts und Erneuerungskosten in einzelnen Strecken



Eine entsprechend zyklische Betrachtung ist daher in diesem Top-Down-Ansatz nicht machbar. Hierzu wäre eine stärkere Differenzierung der Erneuerungskosten auf einzelne Infrastrukturbestandteile sowie eine homogenere Zusammensetzung der Streckenabschnitte notwendig. Um die zyklischen Bewegungen trotzdem aufzufangen, wird zusätzlich zur Schätzung für die jährlichen Ausgaben eine Schätzung mit einem Mittelwert der letzten drei, fünf oder sieben Jahre durchgeführt. Zudem wird eine Schätzung der gesamten Kosten zwischen 2003 bis 2012 gemacht. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass die Zahl der Beobachtungen mit nur 79 im Verhältnis zu den geschätzten Koeffizienten des Modells für eine korrekte Interpretation der Ergebnisse zu klein ist. Entsprechend sind deren Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren.

b) Welche Verkehrsleistung verursacht die Erneuerungsarbeiten

Aus den gleichen Überlegungen wie im obigen Abschnitt (zyklisches Anfallen der Erneuerungsarbeiten) lässt sich argumentieren, dass sich nicht die Verkehrsleistung zum Zeitpunkt t für die Erneuerungskosten verantwortlich zeichnen, sondern das gesamte Verkehrsaufkommen seit der letzten Erneuerung. Der aktuellen Datensatz stößt hierfür an seine Grenzen, da er keine Rückschlüsse darüber zulässt, welche Bestandteile im Rahmen der Erneuerungsarbeiten ausgebaut oder ersetzt wurden und wie viel Verkehr seit diesem Zeitpunkt die Infrastruktur genutzt hat.

Aus technischer Sicht ist es aber unbestreitbar, dass – unabhängig von der Art der ersetzten Infrastruktur oder des exakten Streckenabschnittes, an welchem der Ersatz stattfindet – nicht nur die aktuelle Verkehrsleistung zu den entsprechenden Erneuerungskosten geführt hat, sondern die gesamte Verkehrsleistung aus den letzten Jahren. Daher werden in den Schätzungen die vergangenen Verkehrsleistungen ebenfalls mitberücksichtigt. Hierzu wird der Einbezug der durchschnittliche Verkehrsleistung²² der letzten drei Jahre²³ geprüft.

c) **Unterhaltskosten als erklärende Variablen**

In der aktuellen Diskussion wird häufig aufgeführt, dass der Unterhalt in den vergangenen Jahren vernachlässigt wurde. Dadurch seien irreparable Schäden entstanden, was wiederum zu einem vorzeitigem Ersatzbedarf führe. Daraus lässt sich die Hypothese formulieren, dass die Erneuerungskosten tiefer ausfallen, wenn in den vorhergehenden Jahren die notwendigen Unterhaltsarbeiten geleistet wurden.

Aus den Daten ist jedoch nicht zu erkennen, inwiefern die Ausgaben dem effektiven Bedarf entsprechen. Hierzu fehlen schlicht die Angaben beispielsweise zur Qualität der Infrastruktur. Auch Vergleiche zu durchschnittlichen Unterhaltsaufwänden, sei es über alle Strecken innerhalb eines Jahres oder über alle Jahre innerhalb der gleichen Strecke lassen keine Rückschlüsse zu, ob der geleistete Unterhalt dem tatsächlichen Bedarf entspricht. Hierfür sind die Bedürfnisse innerhalb der einzelnen Streckenabschnitte und auch zwischen den einzelnen Jahren zu verschieden.

Hinzu kommt, dass die vergangenen Unterhaltskosten von ähnlichen Einflussfaktoren bestimmt werden wie die Erneuerungskosten, insbesondere auch die Verkehrsleistung. Entsprechend sind Endogenitätsprobleme (die erklärenden Variablen sind voneinander nicht unabhängig) zu erwarten. Aus diesem Grund wird auf einen Einbezug der Unterhaltskosten verzichtet.

d) **Folgerung für Modelle**

Aufgrund obiger Überlegungen werden die Schätzmodelle für die Erneuerungskostenschätzung um folgende Aspekte ergänzt:

- Abhängige Variable: Analysiert werden folgende Erneuerungskosten
 - Erneuerungskosten zum Zeitpunkt t
 - Durchschnittliche Erneuerungskosten der vergangenen drei / fünf / sieben Jahre
 - Total Erneuerungskosten zwischen 2003 bis 2012

²² Technisch gesehen macht es keinen Unterschied, ob die durchschnittliche oder die summierte Verkehrsleistung in der Schätzung verwendet wird, da es sich hierbei lediglich um eine lineare Transformation handelt (Durchschnitt = Summe / Anzahl Jahre). Entscheidend ist jedoch, dass die Kostenvariable und die Verkehrsvariable gleich transformiert werden.

²³ Wiederum wurden auch durchschnittliche Werte von bis zu 7 Jahren geprüft. In der Analyse der gesamten Erneuerungskosten wurde ebenfalls die Verkehrsleistung der gesamten Jahre berücksichtigt.

- Die unabhängigen Variablen werden um folgende Faktoren ergänzt:
 - Vergangene Verkehrsleistung (als Durchschnitt)²⁴
 - Hingegen wird auf einen Einbezug der Unterhaltskosten aus Endogenitätsüberlegungen verzichtet.

Im nachfolgenden wird nicht auf sämtliche Ergebnisse eingegangen, sondern es werden nur die zentralen Ergebnisse erläutert.

5.2 Schätzergebnisse für Erneuerungskosten

5.2.1 Schätzergebnisse

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, wurden für die Schätzung der Erneuerungskosten im Wesentlichen identische Schätzmodelle verwendet wie für die Gesamtkosten. Wiederrum werden drei Schätzungen mit jeweils unterschiedlich stark differenzierten Verkehrsleistungen in den erklärenden Variablen durchgeführt. Unterschieden wird dabei zwischen:

- Gesamtverkehr (Modell 1)
- Personen- und Güterverkehr (Modell 2)
- sowie sieben unterschiedlichen Verkehrstypen (Modell 3)

Im Gegensatz zu den Schätzungen der Gesamtkosten (und der Unterhaltskosten) werden bei den Erneuerungskosten nicht die Verkehrsleistungen des aktuellen Jahres, sondern jeweils die durchschnittliche Verkehrsleistung der letzten Jahre²⁵ berücksichtigt. Die übrigen erklärenden Faktoren bleiben identisch, da diese – wie bisher – über die Zeit konstant sind (zeitinvariante Variablen). Auch die für den Einbezug der einzelnen Variablen verantwortlichen Hypothesen werden übernommen. So ist zu erwarten, dass spezifische Infrastrukturmerkmale der Strecken zu höheren Erneuerungskosten führen (u.a. Länge, Anteil Steigungen, Anteil Kunstbauten, Anteil in Bahnhöfen oder Anteil älterer Infrastrukturen). Zudem dürften die Erneuerungskosten aufgrund von externen Faktoren (bspw. strategische Planung, Wirtschaftsentwicklung, politische Entscheide etc.) sowohl jährlich wie auch zwischen den Regionen schwanken.

Die abhängige Variable (Erneuerungskosten) wird in fünf unterschiedlichen Varianten geschätzt:

- Erneuerungskosten zum Zeitpunkt t

²⁴ Zusätzlich wurde der Einbezug von gelagerten Verkehrsleistungen geprüft (d.h. Einbezug der Verkehrsleistungen der vergangenen Jahre als eigene Variable). Eindeutige Muster konnten hierbei nicht gefunden werden. Daher beschränken wir uns in der Analyse auf die Durchschnittlichen werte.

²⁵ Für die Schätzung der aktuellen Erneuerungskosten wurde die Verkehrsleistung der letzten drei Jahre verwendet. Bei den Schätzungen für die durchschnittlichen Erneuerungskosten wurde der durchschnittliche Verkehr über den gleichen Zeitraum (daher drei, fünf oder sieben Jahre) verwendet.

- Durchschnittliche Erneuerungskosten der vergangenen drei/fünf/sieben Jahren
- Erneuerungskosten über den gesamten Beobachtungszeitraum (10 Jahre)

Insgesamt können die Modelle die Variabilität der Erneuerungskosten gut erklären und weisen einen hohen Determinationskoeffizienten auf (Bestimmtheitsmass R^2). Die tiefen R^2 werden erwartungsgemäss in den Schätzungen für die Erneuerungskosten zum Zeitpunkt t erreicht. Wenn die Kosten und Verkehr über mehrere Jahre im Durchschnitt betrachtet werden, steigt auch der Erklärungsgehalt. Dies ist mitunter darauf zurückzuführen, dass bei einer Durchschnittsbetrachtung die Variabilität grundsätzlich kleiner ausfällt und die Erneuerungskosten auch weniger Extremwerte (Ausreisser) aufweisen können. Für die Drei-Jahres-Durchschnittswerte liegt der Erklärungsgehalt bei ca. 87%, bei Fünf-Jahres-Durchschnittswerten bei ca. 92% und bei Sieben-Jahres-Durchschnittswerten bei ca. 94%. Der höchste Erklärungsgehalt wird bei der Betrachtung der gesamten Erneuerungskosten über die 10 Jahre erreicht. Insbesondere beim Einbezug der differenzierten Verkehrstypen (Modelltyp 3) beträgt dieser 98%. Generell sind die Schätzergebnisse für Modell 3 mit Vorsicht zu interpretieren, da in Anbetracht der hohen Anzahl zu schätzenden Variablen die Anzahl Beobachtungen zu gering sind.

Abbildung 5-2 zeigt die Schätzergebnisse für die durchschnittlichen Erneuerungskosten der vergangenen drei Jahre. Die weiteren Schätzergebnisse werden im Anhang aufgeführt.

Abbildung 5-2: Schätzergebnisse durchschnittliche Erneuerungskosten (Ø 3 Jahre)

		Model 1: Gesamtverkehr	Model 2: Personen und Güterverkehr getrennt	Model 3: Verkehrsleistung differenziert nach 6 Verkehrstypen
	Anzahl Beobachtungen	632	632	632
	λ (Lambda)	0.14652	0.41236	0.47728
	Konstante	5.81443 ***	9.14045 ***	10.86478 ***
Transformierte Variablen (Verkehr und Streckenlänge)	Gleislänge [km]	0.85973 *** [8.699]	0.35835 *** [11.948]	0.23795 *** [9.377]
	Gleislänge quadriert [km]	-0.03336 *** [-3.471]	-0.00837 *** [-5.895]	-0.0044 *** [-4.230]
	Bruttotonnen alle Verkehrsarten (Ø 3 Jahre) [Bt]	0.0851 *** [12.664]		
	Bruttotonnen nur Reiseverkehr (Ø 3 Jahre) [Bt]		0.00141 *** [9.523]	
	Bruttotonnen nur Güterverkehr (Ø 3 Jahre) [Bt]		0.00116 *** [7.017]	
	Interaktion zw. Güterverkehr und Reiseverkehr (Ø 3 Jahre) [Bt]			0 *** [-4.573]

Nicht transformierte Variablen	Bruttotonnen nur Intercity/Eurocity (Ø 3 Jahre) [Bt]			0.00063 *** [6.630]
	Bruttotonnen nur Schnellzug, Interregio, Regioexpress (Ø 3 Jahre) [Bt]			0.00011 [1.172]
	Bruttotonnen nur Regionalzug (Ø 3 Jahre) [Bt]			0.00029 ** [2.084]
	Bruttotonnen nur S-Bahn (Ø 3 Jahre) [Bt]			0.00028 *** [2.885]
	Bruttotonnen nur Fern- und Nahgüterzüge (Ø 3 Jahre) [Bt]			0.00035 *** [2.651]
	Bruttotonnen nur Traktorgüterzüge, Lokzug (Ø 3 Jahre) [Bt]			-0.00172 ** [-2.304]
	Bruttotonnen nur Leermaterialzüge (Ø 3 Jahre) [Bt]			0.00115 *** [2.801]
	Diverse Interaktionen zwischen den obigen Verkehrstypen	div.	div.	div.
	Durchschnittliche Geschwindigkeit Reisezüge	-0.01373 *** [-6.313]	-0.01417 *** [-6.350]	-0.01981 *** [-7.205]
	Anteil Weichenmeter an Gleislänge [%]	1.03811 ** [2.216]	0.75585 [1.587]	1.27478 ** [2.145]
	Anteil Brückenmeter an Gleislänge [%]	-3.5992 *** [-2.644]	-4.61684 *** [-3.094]	-5.04693 *** [-3.021]
	Anteil Tunnelmeter an Streckenlänge [%]	0.76337 *** [3.882]	0.63735 *** [2.991]	0.62687 ** [2.528]
	Gleisanteil mit Radien <500m [%]	1.24253 *** [4.115]	1.40677 *** [4.628]	0.84546 ** [2.192]
	Gleisanteil mit mehr als 20 Promille Steigung [%]	0.07911 [0.432]	0.10999 [0.574]	-0.07724 [-0.327]
	Gleisanteil mit Brand- und Lärmschutzwänden [%]	1.89389 *** [4.709]	2.43106 *** [5.878]	2.9856 *** [5.172]
Stützmauern (in m2) pro Streckenkilometer	0.00005 [0.849]	0.00006 [1.025]	-0.00002 [-0.228]	
Anteil Schwellen, die älter als 25 Jahre sind [%]	0.71467 *** [3.693]	0.69446 *** [3.567]	0.90276 *** [4.361]	
Gleisanteil mit Perronkanten [%]	2.42952 *** [4.998]	2.14245 *** [4.340]	0.81452 [1.507]	
Dummy Strecke mit grossem Rangierbahnhof [0/1]	0.14555 * [1.751]	0.19934 ** [2.282]	0.10924 [0.878]	
Dummy für eingleisige Strecken [0/1]	0.20055 *** [3.096]	0.24688 *** [3.773]	0.33323 *** [3.739]	
Dummy verschiedene Jahre [0/1]	div.	div.	div.	

Regionendummies [0/1]	div.	div.	div.
Log-Likelihood	-262.00	-270.81	-232.15
R2 adjusted	0.87398	0.86997	0.87979

***/**/* kennzeichnen signifikante Variablen auf dem 1/5/10% Niveau. Die Werte in den Klammern entsprechen den t-Statistiken.

Die geschätzten Koeffizienten sowie deren Vorzeichen entsprechen den Erwartungen und weichen sowohl innerhalb der drei Schätzmodelle als auch zwischen den unterschiedlichen Durchschnittswerten bei den Erneuerungskosten nur geringfügig voneinander ab. Die Ergebnisse können somit als robust bezeichnet werden.

Das Verkehrsaufkommen hat den erwarteten positiven und hochsignifikanten Einfluss auf die Unterhaltskosten. Bei einem getrennten Einbezug zwischen Personenverkehr und Güterverkehr sind die geschätzten Koeffizienten für den Personenverkehr jeweils rund 20% höher als die Koeffizienten für den Güterverkehr. Eine Zunahme an Personenverkehr führt demnach zu einem höheren Erneuerungsbedarf als entsprechende Zunahmen beim Güterverkehr. Erwartungsgemäss ist die Grenzwirkung abhängig vom übrigen Verkehr: Ist eine Strecke bereits stark durch den Personenverkehr frequentiert, verursacht ein zusätzlicher Güterzugskilometer weniger Erneuerungskosten.

Von den Infrastrukturvariablen den bedeutendsten Einfluss hat wiederum die Streckenlänge. Wenig überraschend steigen die Erneuerungskosten mit der Streckenlänge an. Weiter steigen die Kosten mit einem steigenden Streckenanteile mit älterer Infrastruktur (über 25 Jahre), engen Radien, Weichen, Lärm und Brandschutzwände, Perronkanten sowie Tunnels. Im Gegensatz hierzu haben Strecken mit hohen Brückenanteilen eher geringere Erneuerungskosten. Wie bereits bei den Gesamtkosten sind die Erneuerungskosten zudem wiederum geringer in Strecken mit höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten.

Einspurige Strecken sowie Strecken mit einem grösseren Rangier- und Güterbahnhof weisen ebenfalls höhere Erneuerungskosten auf. Aus der Schätzung geht zudem hervor, dass - unter Berücksichtigung der Verkehrsleistung - die Ausgaben für Erneuerung in den vergangenen Jahren (2010 bis 2012) überdurchschnittlich hoch waren, während zwischen 2007 und 2010 eher unterdurchschnittlich erneuert wurde.

5.2.2 Durchschnittliche Grenzkosten

Abbildung 5-3: Grenzkosten Erneuerung

Grenzkosten [CHF/Btkm]	Grenzkosten [CHF/Btkm]	Grenzkosten [CHF/Btkm]	Grenzkosten [CHF/Btkm]	Grenzkosten [CHF/Btkm]
---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

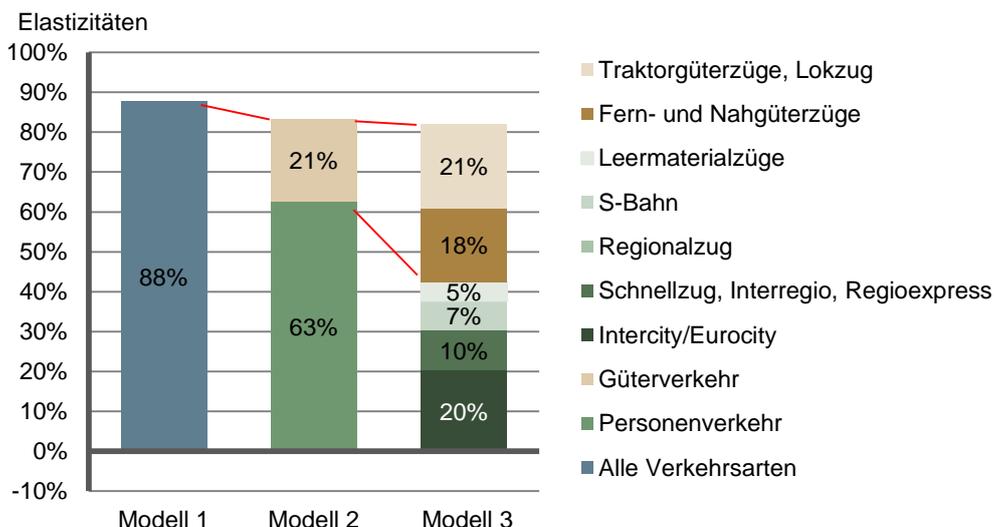
Erneuerungskosten		effektiv	Ø 3 Jahre	Ø 5 Jahre	Ø 7 Jahre	Ø 10 Jahre
Modell 1	alle Verkehrsarten	0.00192	0.00176	0.00178	0.00186	0.00190
Modell 2	Personenverkehr	0.00224	0.00202	0.00206	0.00215	0.00216
	Güterverkehr	0.00093	0.00108	0.00108	0.00112	0.00125
Modell 3	Intercity/Eurocity	0.00039	0.00172	0.00240	0.00249	
	Schnellzug, Interregio, Regioexpress	0.00037	0.00101	0.00097	0.00134	
	Regionalzug	0.00214	-0.00029	-0.00167	0.00096	
	S-Bahn	0.00233	0.00094	0.00091	0.00119	
	Fern- und Nahgüterzüge	0.00067	0.00099	0.00140	0.00160	
	Traktorgüterzüge, Lokzug	0.05991	0.04612	0.04711	0.04611	
	Leermaterialzüge	-0.02668	0.00829	0.00385	-0.01910	

Anm.: hellblau schattiert = Grenzkosten für die im obigen Abschnitt vorgestellten Schätzungen

Abbildung 5-3 fasst die Grenzkosten pro Bruttotonnenkilometer für die unterschiedlichen Schätzungen zusammen. Die Ergebnisse sind über die unterschiedlichen Erneuerungskosten zumindest für Modell 1 und Modell 2 äusserst robust. Die Grenzkosten für den Gesamtverkehr liegen zwischen 0.00176 CHF und 0.00192 CHF und entsprechen somit rund 70% der Grenzkosten für die gesamten Ausgaben. Im Vergleich zu bisherigen Grenzkostenschätzungen sind die Werte deutlich höher. Marti et al (2009) weisen Grenzkosten von rund 0.00077 CHF/Btkm aus. Die damaligen Modellschätzungen berücksichtigen jedoch nicht die vergangene Verkehrsleistung, sondern nur die Verkehrsleistung des entsprechenden Jahres. Zudem konnte die Datenbasis für die vorliegenden Schätzungen gerade auch im Hinblick auf die Erneuerungskosten verbessert werden.

Im Gegensatz zu den Gesamtkosten unterscheiden sich bei den Erneuerungskosten die Grenzkosten für Personen- und Güterverkehr deutlich. Für den Personenverkehr liegen die Grenzkosten zwischen 0.00202 CHF und 0.00224 CHF, die Grenzkosten im Güterverkehr sind rund halb so hoch und variieren zwischen 0.00093 CHF und 0.00125 CHF. Mit einem Blick auf die geschätzten Elastizitäten und die Durchschnittskosten sind die berechneten Grenzkosten für die beiden Verkehrsträger durchaus plausibel.

Abbildung 5-4: Durchschnittliche Elastizitäten, Erneuerungskosten (Ø 3 Jahre)



5.3 Betrachtung der Unterhaltskosten

Analog zu den Erneuerungskosten werden spezifische Schätzungen zu den Unterhaltskosten (Instandhaltungskosten, Ausgaben für Überwachung und Ausgaben für Störungsmanagement) durchgeführt. Hier werden wiederum die jährlichen Unterhaltsausgaben als abhängige Variable verwendet. Die erklärenden Variablen entsprechend dem Schätzmodell für die Gesamtkosten (vgl. Gleichungen 9-11 in Abschnitt 3.2.1). Auf einen Einbezug der vergangenen Unterhaltskosten und vergangener Verkehrsleistungen wird verzichtet. Insgesamt werden somit drei Schätzmodelle mit dem Einbezug unterschiedlicher Verkehrsvariablen gerechnet.

5.3.1 Schätzergebnisse nur Unterhalt

Abbildung 5-5 fasst die Ergebnisse zusammen. Wiederum weisen alle Schätzungen einen hohen Erklärungsgehalt von rund 94% auf. Die einzelnen geschätzten Koeffizienten stimmen mehrheitlich mit den bisherigen Schätzungen überein. Allerdings sind insbesondere in Modell mit stärker differenzierten Verkehrstypen einige Unterschiede gegenüber den ersten beiden Modellen erkennbar.

Abbildung 5-5: Schätzergebnisse Unterhaltskosten

	Modell 1: Gesamtverkehr	Modell 2: Personen und Güterverkehr getrennt	Modell 3: Verkehrsleistung differenziert nach 6 Verkehrstypen
Anzahl Beobachtungen	790	790	790
λ (Lambda)	0.42936	0.40224	0.37228

	Konstante	11.65466 ***	11.1467 ***	10.71466 ***
Transformierte Variablen (Verkehr und Streckenlänge)	Gleislänge [km]	0.32016 *** [24.126]	0.34856 *** [25.586]	0.40972 *** [22.539]
	Gleislänge quadriert [km]	-0.00655 *** [-11.037]	-0.00754 *** [-11.402]	-0.01008 *** [-10.070]
	Bruttotonnen alle Verkehrsarten [Bt]	0.00027 *** [9.181]		
	Bruttotonnen nur Reiseverkehr [Bt]		0.00050 *** [6.931]	
	Bruttotonnen nur Güterverkehr [Bt]		0.00067 *** [8.565]	
	Interaktion zw. Güterverkehr und Reiseverkehr [Bt]		0.00000 *** [-4.483]	
	Bruttotonnen nur Intercity/Eurocity [Bt]			0.00013 [0.723]
	Bruttotonnen nur Schnellzug, Interregio, Regioexpress [Bt]			0.00022 [1.303]
	Bruttotonnen nur Regionalzug [Bt]			0.00028 [0.973]
	Bruttotonnen nur S-Bahn [Bt]			0.00046 ** [2.099]
	Bruttotonnen nur Fern- und Nahgüterzüge [Bt]			-0.00017 [-0.696]
	Bruttotonnen nur Traktorgüterzüge, Lokzug [Bt]			0.00165 * [1.789]
	Bruttotonnen nur Leermaterialzüge [Bt]			0.00109 * [1.898]
	Diverse Interaktionen zwischen den obigen Verkehrstypen	div.	div.	div.
	Nicht transformierte Variablen	Durchschnittliche Geschwindigkeit Reisezüge	-0.00597 *** [-5.204]	-0.00575 *** [-5.282]
Anteil Weichenmeter an Gleislänge [%]		2.14333 *** [10.314]	1.68295 *** [8.072]	2.19078 *** [8.239]
Anteil Brückenmeter an Gleislänge [%]		1.68956 ** [2.517]	1.55533 ** [2.343]	0.4056 [0.528]
Anteil Tunnelmeter an Streckenlänge [%]		0.25105 *** [2.797]	0.43193 *** [4.660]	0.14884 [1.375]
Gleisanteil mit Radien <500m [%]		0.60762 *** [4.721]	0.71804 *** [5.537]	0.59426 *** [4.146]
Gleisanteil mit mehr als 20 Promille Steigung [%]		0.09276 [1.032]	0.26203 *** [2.916]	0.23968 ** [2.282]

Gleisanteil mit Brand- und Lärmschutzwänden [%]	-0.10729 [-0.586]	0.20539 [1.106]	0.56905 ** [2.449]
Stützmauern (in m2) pro Streckenkilometer	0.00000 [-0.163]	0.00001 [0.273]	0.00007 ** [2.184]
Anteil Schwellen, die älter als 25 Jahre sind [%]	0.0129 [0.167]	0.03463 [0.465]	0.21538 ** [2.435]
Gleisanteil mit Perronkanten [%]	0.64106 *** [2.746]	1.10155 *** [4.881]	0.8923 *** [3.440]
Dummy Strecke mit grossem Rangierbahnhof [0/1]	0.06553 * [1.771]	0.03585 [0.992]	0.08472 * [1.776]
Dummy für eingleisige Strecken [0/1]	0.13162 *** [4.187]	0.16891 *** [5.203]	0.16922 *** [4.053]
Dummy verschiedene Jahre [0/1]	div.	div.	div.
Regionendummies [0/1]	div.	div.	div.
Log-Likelihood	178.81	204.16	251.94
R2 adjusted	0.93929	0.94291	0.94765

***/**/* kennzeichnen signifikante Variablen auf dem 1/5/10% Niveau. Die Werte in den Klammern entsprechen den t-Statistiken.

Das Verkehrsaufkommen hat erwartungsgemäss einen starken signifikanten Einfluss auf die Unterhaltskosten. Je höher das Verkehrsaufkommen einer Strecke ist, desto höher sind auch die Unterhaltskosten. Im Gegensatz zu den Erneuerungskosten ist der geschätzte Beta-Koeffizient im Güterverkehr leicht höher als im Personenverkehr. Die Interaktion zwischen den beiden Verkehrstypen ist wiederum negativ signifikant (eine zusätzliche Einheit von Güterverkehr verursacht geringere Kosten, wenn bereits viel Personenverkehr auf der Strecke vorhanden ist). Die Effekte für die differenziertere Verkehrsleistungen können aufgrund der zahlreichen Interaktionen nicht direkt aus den einzelnen Koeffizienten abgeleitet werden.

Neben dem Verkehrsaufkommen sind wiederum einige Infrastruktureigenschaften wesentlich für die Höhe der Unterhaltskosten verantwortlich. Ein zentraler Faktor spielt die Streckenlänge. Weiter wirken hohe Anteile Weichen, Brücken, Tunnel, enger Radien und Perronkanten kostensteigernd. Höhere Unterhaltskosten haben zudem Einspurige Streckenabschnitte sowie – wenn auch nur geringfügig – Streckenabschnitte mit einem grösseren Güter-/Rangierbahnhof.

Besonders spannend ist der positive Einfluss der Anteil Brücken auf die Unterhaltskosten. Zwar scheint dies den Erwartungen zu entsprechen. Werden nur die Ausgaben für Instandsetzung geschätzt, wirken Brückenkilometer jedoch kostensenkend. In der Gesamtkostenbetrachtung heben sich die beiden Effekte auf und der geschätzte Koeffizient für Brückenanteile unterscheidet sich nicht signifikant von Null. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass Arbei-

ten an Brücken weniger im Rahmen von Erneuerungsarbeiten sondern vielmehr bei Gesamtrennovationen (Investitionskosten) durchgeführt werden.

Keinen signifikanten Einfluss auf die Unterhaltskosten haben hingegen Strecken mit starker Steigung, Lärm- und Brandschutzwände, Stützmauern und auch ein höherer Anteil an älterer Infrastruktur, zumindest nicht in den Modell 1 und 2. Beim Einbezug einer stärker differenzier- ten Verkehrsleistung verlieren Brücken und Tunnels an Bedeutung, während die oben ge- nannten Infrastrukturvariablen einen signifikanten Einfluss aufweisen.

5.3.2 Betrachtung der Grenzkosten für den Unterhalt

Abbildung 5-6: Grenzkosten Unterhalt

		Grenzkosten [CHF/Btkm]	Ø-Kosten [CHF/Btkm]	Deckungs- grad [in %]
Modell 1	alle Verkehrsarten	0.00097	0.00299	0.32557
Modell 2	Personenverkehr	0.00074	0.00481	0.15359
	Güterverkehr	0.00113	0.00789	0.14331
Modell 3	Intercity/Eurocity	-0.00007	0.01220	-0.00595
	Schnellzug, Interregio, Regioexpress	0.00071	0.01419	0.04967
	Regionalzug	0.00183	0.06235	0.02940
	S-Bahn	0.00100	0.01804	0.05519
	Fern- und Nahgüterzüge	0.00070	0.00808	0.08709
	Traktorgüterzüge, Lokzug	0.01789	0.32759	0.05460
	Leermaterialzüge	0.00514	0.26478	0.01940

Die ermittelten Grenzkosten für den Gesamtverkehr betragen rund 0.00097 CHF. Wie bereits bei den Gesamtkosten sind die ermittelten Grenzkosten somit deutlich höher als in den bisherigen Grenzkostenberechnungen auf Basis von Box-Cox-Modellen (Marti, Neuenschwander, Walker 2008 weisen Grenzkosten für Unterhalt von 0.00061 CHF/Btkm aus). Die Grenzkosten entsprechen rund 32.5% der Durchschnittskosten.

Wie aus Abbildung 5-6 zu entnehmen ist, sind die Grenzkosten für den Unterhalt im Güterverkehr mit 0.00113 CHF/Btkm höher als im Personenverkehr (0.00074 CHF/Btkm). Allerdings zeigt eine spezifischere Betrachtung der einzelnen Verkehrstypen, dass die höheren Grenzkosten im Güterverkehr hauptsächlich auf die Traktorzüge und Lokzüge zurückzuführen sind. Die Fern- und Nahgüterzüge weisen ähnliche Grenzkosten auf wie die Schnell-, Interregio- und Regioexpress-Züge. Unter den spezifischen Zugstypen weisen insbesondere Regionalzüge und S-Bahnen höhere Grenzkosten auf. Dies deckt sich mit den Erwartungen, da für die Abnutzung nicht nur das Gewicht eine Rolle spielt, sondern insbesondere Beschleunigungs- und Bremsvorgänge die Schienen besonders stark beeinflussen. Höhere Grenzkosten pro Bruttotonnenkilometer für Nahverkehrszüge sind aus dieser Sicht plausibel.

Nicht plausibel sind hingegen die Grenzkosten für Intercity- und Eurocity-Züge. Zwar dürften erwartungsgemäss IC- und EC-Züge geringere Grenzkosten ausweisen, negative Grenzkosten sind jedoch unwahrscheinlich. Allerdings sind die ausgewiesenen Grenzkosten nicht signifikant von null unterschiedlich. Die wahren Grenzkosten sind daher leicht oberhalb von 0 zu vermuten.

Abbildung 5-7: Vergleich der Grenzkosten für Unterhalt, Erneuerung und Gesamtkosten

		Grenzkosten Unterhalt	Grenzkosten Erneuerung (effektiv)	Grenzkosten Erneuerung (Ø 3-Jahre)	Grenzkosten Gesamtkosten
		[CHF/Btkm]	[CHF/Btkm]	[CHF/Btkm]	[CHF/Btkm]
Model 1	alle Verkehrsarten	0.00097	0.00192	0.00176	0.00270
Model 2	Personenverkehr	0.00074	0.00224	0.00202	0.00251
	Güterverkehr	0.00113	0.00093	0.00108	0.00226
Model 3	Intercity/Eurocity	-0.00007	0.00039	0.00172	0.00130
	Schnellzug, Interregio, Regioexpress	0.00071	0.00037	0.00101	0.00150
	Regionalzug	0.00183	0.00214	-0.00029	0.00320
	S-Bahn	0.00100	0.00233	0.00094	0.00299
	Fern- und Nahgüterzüge	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Traktorgüterzüge, Lok- zug	0.00070	0.00067	0.00099	0.00164
	Leermaterialzüge	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Obwohl die Unterhaltskosten zwischen 50-70% der gesamten Ausgaben ausmachen und daher mehrheitlich höher sind als die Ausgaben für Instandsetzung, sind die Grenzkosten pro Bruttotonnenkilometer im Gesamtverkehr mit 0.00097 CHF deutlich tiefer als die Grenzkosten für Instandsetzung (0.00192 CHF/Btkm bzw. 0.00176 CHF/Btkm). Demnach wirkt sich das Verkehrsaufkommen weniger stark auf den Unterhalt aus als auf den Instandsetzungsbedarf. Dieser Umstand ist auch bereits aus den Schätzungen zu erkennen. Der Einfluss der Verkehrsvariablen in den Schätzungen der Unterhaltskosten ist geringer als in den Schätzungen der Erneuerungskosten. Stattdessen gewinnen im Unterhalt einzelne Infrastrukturmerkmale an Bedeutung. Insbesondere wirken ein hoher Weichenanteil und ein hoher Anteil enger Radien kostentreibend bezüglich Unterhaltskosten.

Die unterschiedlichen Grenzkosten sind hauptsächlich auf den Personenverkehr zurückzuführen. Während im Güterverkehr die Grenzkosten sowohl bei Unterhalt wie Erneuerung in etwa identisch sind, sind die Grenzkosten für Erneuerung im Personenverkehr rund dreimal höher als die Grenzkosten für den Unterhalt. Addiert ergeben die Grenzkosten für Erneuerung und Unterhalt annähernd die Werte für die Gesamtkosten. Die Werte scheinen insgesamt plausibel.

Im Gegensatz zu Modell 1 und 2 sind die Ergebnisse in Modell 3 weniger kohärent. Aufgrund der grossen Anzahl von Interaktionstermen unter Berücksichtigung der bereits grossen Anzahl von Variablen stösst das Modell vermutlich an seine Grenzen.

6 Schlussfolgerungen

Mit dem Ziel, die Preissetzung im Verkehr vermehrt am Grenzkostenansatz zu orientieren, hat die EU seit 2001 mehrere Forschungsprojekte zum Thema Grenzkostenberechnung im Verkehr lanciert. Mit der vorliegenden Arbeit setzten Ecoplan in Zusammenarbeit mit der Uni Leeds die Diskussion bezüglich der Grenzkosten im Schienenverkehr fort. Dabei bauen wir auf bereits frühere Arbeiten auf, insbesondere der beiden EU-Forschungsprojekte GRACE und CATRIN. Dank der guten Zusammenarbeit mit der SBB konnte im Laufe der Jahre die Datengrundlage verbessert werden. Inzwischen stehen Daten zu Kosten und Verkehrsaufkommen auf den einzelnen Strecken für zehn Jahre zur Verfügung. Dieser verbesserte Datensatz erlaubt uns, einzelne Aspekte der Grenzkosten vertieft zu betrachten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden insbesondere folgende Aspekte genauer untersucht:

- Diskussion der funktionellen Form der Schätzmodelle (Box-Cox-Transformation versus Log-Linear und prüfen von Translog-Modellen)
- Ermittlung der Grenzkosten für Erneuerungskosten
- Ermittlung der Grenzkosten für verschiedene Verkehrstypen

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse zu den drei Aspekten kurz zusammengefasst.

a) Modelldiskussion

Für die Entwicklung der Modelle für die Unterhalts- und Erneuerungskosten konnte auf die Grundlagen der bisherigen Arbeiten zurückgegriffen werden. Allerdings wurde die Diskussion bewusst nochmals geöffnet, wobei die Verwendung der Box-Cox Transformation statt der sonst häufig verwendeten Logarithmustransformation vertieft analysiert wurde. Dabei wurde bewusst darauf verzichtet, dass Lambda ebenfalls aus den Daten zu schätzen. Stattdessen wurden in einem Grid-Search-Verfahren die unterschiedlichen Transformationen geprüft. Das Grid-Search-Verfahren ermöglichte zudem für die Kostenfunktion ein vollständiges Translog-Modell zu prüfen. Die Berechnung vollständiger Translog-Modelle ist aufgrund methodischer Probleme bei den meisten Statistikprogrammen nicht umsetzbar, wenn die Lambda aus den Daten geschätzt werden.

Aus der Modelldiskussion können zwei zentrale Erkenntnisse gewonnen werden:

- Es zeigt sich, dass die Unterhalts- und Erneuerungskosten der SBB-Infrastruktur durch eine Schätzung mit Box-Cox-transformierten Verkehrsleistungen besser wiedergegeben werden als bei einer Schätzung mit logarithmierten Variablen. Für sämtliche Schätzungen werden im Grid-Search-Verfahren Lambda-Werte ermittelt, die sich signifikant von Null unterscheiden.
- Hingegen zeigt sich, dass ein vollständiges Translog-Modell nicht zu besseren Schätzungen führen. Zwar kann durch ein Einbezug von Interaktionsvariablen zwischen Verkehr und Streckenlänge die Güte des Modells leicht gesteigert werden. Diese Steigerung ist aber nicht ausreichend um die deutlich komplexeren Schätzmodelle zu gerecht fertigen.

Komplexere Modelle sind nicht nur schwieriger zu interpretieren, sie sind auch instabiler (aufgrund von Endogenitätsproblemen und Kollinearität).

Die verwendeten Modelle sind robust. Die Ergebnisse sind mit bisherigen Schätzungen vergleichbar und die geschätzten Parameter für die einzelnen Einflussfaktoren entsprechen grundsätzlich den Erwartungen. Mit Grenzkosten für die Gesamtkosten in Höhe von 0.0027 CHF/Btkm sind die Grenzkosten im europäischen Vergleich jedoch nach wie vor eher tief.

b) Analyse der Erneuerungskosten

Die erweiterte Datenbasis auf 10 Jahre ermöglichen bessere Schätzungen der Erneuerungskosten. Dabei werden – je nach Definition der Erneuerungskosten – Grenzkosten zwischen 0.0017 CHF/Btkm und 0.0019 CHF/Btkm ermittelt. Die Grenzkosten für Instandsetzung liegen somit deutlich höher als die Grenzkosten für den Unterhalt der Infrastruktur (Instandhaltung, Überwachung, Störungsmanagement). Diese betragen nur 0.00097 CHF/Btkm. Obwohl die Unterhaltskosten verhältnismässig höher sind als die Erneuerungskosten, entsprechen die tieferen Grenzkosten für zusätzlichen Verkehr den Erwartungen. Die Unterhaltsarbeiten sind deutlich stärker von externen Faktoren (Wetter, Störungen, etc.) abhängig als die Erneuerungsarbeiten. Dies wird auch bereits aus den Schätzungen ersichtlich. Der Einfluss der Verkehrsvariablen ist bei den Schätzungen zu den Erneuerungskosten stärker als in den Schätzungen zu den Unterhaltskosten. Hingegen haben einzelne Infrastrukturelemente wie bspw. Weichen oder Kunstbauten einen stärkeren Einfluss auf die Unterhaltskosten.

c) Grenzkostenschätzung für differenzierter Verkehr

Zusätzlich zur differenzierten Betrachtung der einzelnen Kostenarten werden die Grenzkosten auch für unterschiedliche Verkehrstypen berechnet. Hierbei zeigt sich, dass die Grenzkosten für den Personenverkehr leicht höher sind als die Grenzkosten für den Güterverkehr. Der Unterschied kommt insbesondere bei den Erneuerungskosten zum Tragen. Im Unterhalt sind die Grenzkosten zwischen Personenverkehr und Güterverkehr - insbesondere der Fern- und Nahgüterzüge - in etwa identisch. Bei den Erneuerungskosten liegen die Grenzkosten für den Personenverkehr deutlich höher.

Eine stärkere Differenzierung der Grenzkosten nach sieben verschiedenen Verkehrstypen gelingt nur noch bedingt. Bereits die Modelle für den Gesamtverkehr bzw. für die zwei Verkehrskategorien Güter- und Personenverkehr weisen eine sehr hohe Anzahl erklärende Variablen auf. Diese Zahl wird durch die zusätzlichen Verkehrstypen und deren Interaktionsvariablen nochmals deutlich erhöht. Das Modell stösst hier an seine Grenzen. Nichtsdestotrotz zeigen die Resultate der Grenzkostenberechnungen durchaus auch plausible Werte. Beispielsweise zeigt sich, dass der Nahverkehr – gemessen am Gewicht – höhere Grenzkosten aufweist als der Fernverkehr und der Güterverkehr. Dies ist aufgrund der häufigeren Brems- und Beschleunigungsvorgänge, welche zu starken Abnutzung der Infrastruktur führen, plausibel.

d) Schlusswürdigung

Mit dem Projekt SUSTRAIL konnte die bisherigen Arbeiten zum Thema Grenzkosten im Schienenunterhalt weitergeführt und ergänzt werden. Dank der erweiterten und verbesserten Datenbasis konnten nicht nur die Schätzungen zu den Unterhalts- und den Gesamtkosten verbessert werden, sondern erstmals auch plausible Schätzungen zu den Erneuerungskosten durchgeführt werden.

Trotz dieser Verbesserungen zeigt sich im Rahmen der Arbeit aber auch, dass wir mit den Top-Down-Modellen bezüglich spezifischen Fragestellungen an die Grenzen kommen. Während wir bei der Betrachtung der Grenzwerte für den Gesamtverkehr und allenfalls für die beiden Kategorien Güterverkehr und Personenverkehr robuste und plausible Resultate erhalten, so führt eine zu starke Differenzierung der Verkehrsarten und der Kostenarten zumindest teilweise zu nicht erklärbaren Resultaten.

Letztlich muss darauf hingewiesen werden, dass eine rückwärtsgerichtete Betrachtung der Grenzkosten auf Basis der effektiv in der Vergangenheit aufgewendeten Unterhalts- und Erneuerungskosten nicht die wahren Grenzkosten für eine zusätzliche Verkehrsleistung wiedergeben kann. Hierzu spielen zu viele Faktoren mit rein, die in den Schätzungen nicht ausreichend korrigiert werden können. Insbesondere müsste aus Grundvoraussetzung gegeben sein, dass sich das Schienennetz am Anfang der Beobachtungsperiode auf dem Idealzustand befindet und die geleisteten Arbeiten den effektiv benötigten Arbeiten entsprechen, um die durch das Verkehrsaufkommen verursachten Schäden wieder auszubessern. Dies ist aber beides nicht gegeben. Vielmehr spiegeln die jährlichen Ausgaben die heutige und auch die vergangene Unternehmenspolitik bezüglich Unterhaltsarbeiten, welche wiederum stark durch strategische, regionale oder politische Einflüsse geprägt ist. Die effektiven Grenzkosten können daher weder durch den hier angewendeten Top-Down-Ansatz noch über einen Bottom-Up-Ansatz, wie er von Ingenieuren angewendet wird, exakt ermittelt werden. Gemeinsam liefern die beiden Ansätze aber spannende Ergebnisse.

7 Anhang A: Übrige Schätzungen

Abbildung 7-1: Schätzergebnisse durchschnittliche Erneuerungskosten (Jahreswerte)

	Model 1: Gesamtverkehr	Model 2: Personen und Güterverkehr getrennt	Model 3: Verkehrsleistung differenziert nach 6 Verkehrstypen	
Anzahl Beobachtungen	632	632	632	
λ (Lambda)	0.07876	0.3046	0.07948	
Konstante	1.84986 *	6.75345 ***	2.50802	
Transformierte Variablen (Verkehr und Streckenlänge)	Gleislänge [km]	1.36126 *** [4.760]	0.68427 *** [6.564]	1.40241 *** [3.673]
	Gleislänge quadriert [km]	-0.06939 ** [-2.150]	-0.02395 *** [-3.643]	-0.07249 * [-1.705]
	Bruttotonnen alle Verkehrsarten (\emptyset 3 Jahre) [Bt]	0.24781 *** [6.892]		
	Bruttotonnen nur Reiseverkehr (\emptyset 3 Jahre) [Bt]		0.00935 *** [5.479]	
	Bruttotonnen nur Güterverkehr (\emptyset 3 Jahre) [Bt]		0.00719 *** [3.977]	
	Interaktion zw. Güterverkehr und Reiseverkehr (\emptyset 3 Jahre) [Bt]		-0.00001 *** [-3.111]	
	Bruttotonnen nur Intercity/Eurocity (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.05393 [0.869]
	Bruttotonnen nur Schnellzug, Interregio, Regioexpress (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.08685 [1.450]
	Bruttotonnen nur Regionalzug (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.16294 *** [2.655]
	Bruttotonnen nur S-Bahn (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.03558 [0.526]
	Bruttotonnen nur Fern- und Nahgüterzüge (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.00534 [0.033]
	Bruttotonnen nur Traktorgüterzüge, Lokzug (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.37029 [1.587]
	Bruttotonnen nur Leermaterialzüge (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			-0.21323 [-1.247]
	Diverse Interaktionen zwischen den obigen Verkehrstypen	div.	div.	div.

Nicht transformierte Variablen	Durchschnittliche Geschwindigkeit Reisezüge	-0.01472 *** [-3.311]	-0.01545 *** [-3.515]	-0.01264 *** [-2.603]
	Anteil Weichenmeter an Gleislänge [%]	1.62895 ** [2.148]	1.52962 * [1.820]	4.53978 *** [4.767]
	Anteil Brückenmeter an Gleislänge [%]	-4.44728 * [-1.885]	-5.67373 ** [-2.319]	0.16822 [0.067]
	Anteil Tunnelmeter an Streckenlänge [%]	0.93326 ** [2.485]	0.87044 ** [2.193]	1.08597 ** [2.542]
	Gleisanteil mit Radien <500m [%]	1.02101 ** [2.048]	1.15675 ** [2.264]	-0.56288 [-0.982]
	Gleisanteil mit mehr als 20 Promille Steigung [%]	0.07744 [0.211]	0.15404 [0.405]	0.14034 [0.304]
	Gleisanteil mit Brand- und Lärmschutzwänden [%]	2.00714 *** [3.022]	2.69914 *** [4.004]	1.62007 ** [2.010]
	Stützmauern (in m2) pro Streckenkilometer	0.00012 [1.039]	0.00012 [1.056]	0.00017 [1.349]
	Anteil Schwellen, die älter als 25 Jahre sind [%]	0.7231 ** [2.254]	0.68557 ** [2.128]	0.71398 ** [2.201]
	Gleisanteil mit Perronkanten [%]	2.79076 *** [2.924]	2.32063 ** [2.402]	0.45994 [0.535]
	Dummy Strecke mit grossem Rangierbahnhof [0/1]	0.19255 [1.557]	0.25457 ** [1.994]	0.20891 [1.200]
	Dummy für eingleisige Strecken [0/1]	0.26151 ** [2.070]	0.31621 ** [2.453]	0.30448 * [1.804]
	Dummy verschiedene Jahre [0/1]	div.	div.	div.
	Regionendummies [0/1]	div.	div.	div.
	Log-Likelihood	-657.70	-658.02	-621.48
	R2 adjusted	0.71097	0.70969	0.72983

***/**/* kennzeichnen signifikante Variablen auf dem 1/5/10% Niveau. Die Werte in den Klammern entsprechen den t-Statistiken.

Abbildung 7-2: Schätzergebnisse durchschnittliche Erneuerungskosten (Ø 5 Jahre)

		Model 1: Gesamtver- kehr	Model 2: Personen und Güterverkehr getrennt	Model 3: Ver- kehrsleistung differenziert nach 6 Verkehrs- typen
	Anzahl Beobachtungen	395	395	395
	λ (Lambda)	0.11196	0.39376	0.49328
	Konstante	4.45094 ***	8.67861 ***	11.38606 ***
Transformierte Variablen (Verkehr und Streckenlänge)	Gleislänge [km]	0.88318 *** [8.819]	0.36589 *** [12.711]	0.1829 *** [9.976]
	Gleislänge quadriert [km]	-0.03128 *** [-2.982]	-0.00847 *** [-5.960]	-0.00265 *** [-3.489]
	Bruttotonnen alle Verkehrsarten (Ø 5 Jahre) [Bt]	0.14075 *** [14.077]		
	Bruttotonnen nur Reiseverkehr (Ø 5 Jahre) [Bt]		0.00209 *** [10.868]	
	Bruttotonnen nur Güterverkehr (Ø 5 Jahre) [Bt]		0.00175 *** [7.940]	
	Interaktion zw. Güterverkehr und Reiseverkehr (Ø 5 Jahre) [Bt]		0 *** [-5.553]	
	Bruttotonnen nur Intercity/Eurocity (Ø 5 Jahre) [Bt]			0.0006 *** [7.745]
	Bruttotonnen nur Schnellzug, Interregio, Regioexpress (Ø 5 Jahre) [Bt]			0.00014 ** [2.251]
	Bruttotonnen nur Regionalzug (Ø 5 Jahre) [Bt]			0.0001 [1.020]
	Bruttotonnen nur S-Bahn (Ø 5 Jahre) [Bt]			0.0002 *** [2.903]
	Bruttotonnen nur Fern- und Nahgüterzüge (Ø 5 Jahre) [Bt]			0.00041 *** [3.521]
	Bruttotonnen nur Traktorgüterzüge, Lokzug (Ø 5 Jahre) [Bt]			-0.00195 *** [-3.001]
	Bruttotonnen nur Leermaterialzüge (Ø 5 Jahre) [Bt]			0.00117 *** [4.206]
	Diverse Interaktionen zwischen den obigen Verkehrstypen	div.	div.	div.

Nicht transformierte Variablen	Durchschnittliche Geschwindigkeit Reisezüge	-0.01369 *** [-6.943]	-0.01428 *** [-6.988]	-0.02513 *** [-10.218]
	Anteil Weichenmeter an Gleislänge [%]	0.92032 ** [2.094]	0.56257 [1.272]	0.23784 [0.450]
	Anteil Brückenmeter an Gleislänge [%]	-4.01502 *** [-3.243]	-5.27015 *** [-3.712]	-6.06596 *** [-4.156]
	Anteil Tunnelmeter an Streckenlänge [%]	0.92075 *** [6.487]	0.84295 *** [5.317]	0.98451 *** [4.783]
	Gleisanteil mit Radien <500m [%]	1.38552 *** [5.481]	1.60065 *** [6.295]	1.12569 *** [3.479]
	Gleisanteil mit mehr als 20 Promille Steigung [%]	0.0829 [0.581]	0.12685 [0.832]	0.04469 [0.264]
	Gleisanteil mit Brand- und Lärmschutzwänden [%]	1.98501 *** [5.289]	2.59507 *** [6.663]	3.31407 *** [6.029]
	Stützmauern (in m2) pro Streckenkilometer	0.00006 [1.351]	0.00007 [1.363]	-0.00006 [-0.938]
	Anteil Schwellen, die älter als 25 Jahre sind [%]	0.74877 *** [4.007]	0.7251 *** [3.904]	0.88208 *** [4.786]
	Gleisanteil mit Perronkanten [%]	2.39256 *** [5.684]	2.19117 *** [5.175]	1.19549 ** [2.501]
	Dummy Strecke mit grossem Rangierbahnhof [0/1]	0.14536 ** [2.031]	0.2078 *** [2.734]	0.06333 [0.550]
	Dummy für eingleisige Strecken [0/1]	0.25191 *** [5.039]	0.30591 *** [5.901]	0.39247 *** [4.865]
	Dummy verschiedene Jahre [0/1]	div.	div.	div.
	Regionendummies [0/1]	div.	div.	div.
	Log-Likelihood	-51.053	-62.050	11.636
	R2 adjusted	0.92463	0.92068	0.93826

***/**/* kennzeichnen signifikante Variablen auf dem 1/5/10% Niveau. Die Werte in den Klammern entsprechen den t-Statistiken.

Abbildung 7-3: Schätzergebnisse durchschnittliche Erneuerungskosten (Ø 7 Jahre)

		Model 1: Gesamtver- kehr	Model 2: Personen und Güterverkehr getrennt	Model 3: Ver- kehrsleistung differenziert nach 6 Verkehrs- typen
	Anzahl Beobachtungen	237	237	237
	λ (Lambda)	0.13252	0.41768	0.45136
	Konstante	5.18437 ***	8.95932 ***	11.57368 ***
Transformierte Variablen (Verkehr und Streckenlänge)	Gleislänge [km]	0.82964 *** [8.562]	0.33358 *** [12.146]	0.24059 *** [10.283]
	Gleislänge quadriert [km]	-0.02927 *** [-3.048]	-0.00728 *** [-5.891]	-0.00469 *** [-4.136]
	Bruttotonnen alle Verkehrsarten (Ø 7 Jahre) [Bt]	0.10254 *** [12.556]		
	Bruttotonnen nur Reiseverkehr (Ø 7 Jahre) [Bt]		0.00145 *** [10.080]	
	Bruttotonnen nur Güterverkehr (Ø 7 Jahre) [Bt]		0.00122 *** [7.477]	
	Interaktion zw. Güterverkehr und Reiseverkehr (Ø 7 Jahre) [Bt]		0 *** [-5.351]	
	Bruttotonnen nur Intercity/Eurocity (Ø 7 Jahre) [Bt]			0.00105 *** [6.886]
	Bruttotonnen nur Schnellzug, Interregio, Regioexpress (Ø 7 Jahre) [Bt]			0.00023 ** [2.081]
	Bruttotonnen nur Regionalzug (Ø 7 Jahre) [Bt]			-0.00008 [-0.442]
	Bruttotonnen nur S-Bahn (Ø 7 Jahre) [Bt]			0.00015 [1.116]
	Bruttotonnen nur Fern- und Nahgüterzüge (Ø 7 Jahre) [Bt]			0.00066 *** [2.787]
	Bruttotonnen nur Traktorgüterzüge, Lokzug (Ø 7 Jahre) [Bt]			-0.00417 *** [-3.882]
	Bruttotonnen nur Leermaterialzüge (Ø 7 Jahre) [Bt]			0.00275 *** [5.654]
	Diverse Interaktionen zwischen den obigen Verkehrstypen	div.	div.	div.

Nicht transformierte Variablen	Durchschnittliche Geschwindigkeit Reisezüge	-0.01425 *** [-6.945]	-0.01495 *** [-6.996]	-0.02676 *** [-12.209]
	Anteil Weichenmeter an Gleislänge [%]	0.79554 [1.598]	0.42177 [0.828]	1.1431 ** [2.221]
	Anteil Brückenmeter an Gleislänge [%]	-3.7974 *** [-2.876]	-5.0824 *** [-3.276]	-4.62551 *** [-3.331]
	Anteil Tunnelmeter an Streckenlänge [%]	0.84998 *** [5.904]	0.76594 *** [4.689]	0.85696 *** [4.141]
	Gleisanteil mit Radien <500m [%]	1.42068 *** [5.272]	1.64438 *** [5.984]	0.73314 ** [2.466]
	Gleisanteil mit mehr als 20 Promille Steigung [%]	0.1073 [0.679]	0.13275 [0.803]	0.09449 [0.543]
	Gleisanteil mit Brand- und Lärmschutzwänden [%]	1.98675 *** [4.602]	2.5867 *** [5.736]	2.56989 *** [4.496]
	Stützmauern (in m2) pro Streckenkilometer	0.00004 [0.854]	0.00005 [0.875]	-0.00003 [-0.482]
	Anteil Schwellen, die älter als 25 Jahre sind [%]	0.70416 *** [3.312]	0.68193 *** [3.223]	0.74684 *** [4.141]
	Gleisanteil mit Perronkanten [%]	2.41041 *** [5.227]	2.21271 *** [4.728]	0.50927 [1.121]
	Dummy Strecke mit grossem Rangierbahnhof [0/1]	0.18051 *** [3.349]	0.24836 *** [4.394]	0.08776 [0.925]
	Dummy für eingleisige Strecken [0/1]	0.24706 *** [4.661]	0.30218 *** [5.430]	0.31119 *** [3.606]
	Dummy verschiedene Jahre [0/1]	div.	div.	div.
	Regionendummies [0/1]	div.	div.	div.
	Log-Likelihood	20.47	11.11	109.68
	R2 adjusted	0.94225	0.93828	0.96356

***/**/* kennzeichnen signifikante Variablen auf dem 1/5/10% Niveau. Die Werte in den Klammern entsprechen den t-Statistiken.

Abbildung 7-4: Schätzergebnisse durchschnittliche Erneuerungskosten (10 Jahre)

		Model 1: Gesamtver- kehr	Model 2: Personen und Güterverkehr getrennt	Model 3: Ver- kehrsleistung differenziert nach 6 Verkehrs- typen
	Anzahl Beobachtungen	79	79	79
	λ (Lambda)	0.2022	0.46264	0.35088
	Konstante	7.42912 ***	9.67968 ***	8.79754 ***
Transformierte Variablen (Verkehr und Streckenlänge)	Gleislänge [km]	0.66944 *** [4.536]	0.28608 *** [6.062]	0.55364 *** [9.181]
	Gleislänge quadriert [km]	-0.02064 * [-1.722]	-0.00545 *** [-3.097]	-0.01981 *** [-5.249]
	Bruttotonnen alle Verkehrsarten (\emptyset 3 Jahre) [Bt]	0.03178 *** [5.394]		
	Bruttotonnen nur Reiseverkehr (\emptyset 3 Jahre) [Bt]		0.00066 *** [4.482]	
	Bruttotonnen nur Güterverkehr (\emptyset 3 Jahre) [Bt]		0.00057 *** [3.357]	
	Interaktion zw. Güterverkehr und Reiseverkehr (\emptyset 3 Jahre) [Bt]		0 ** [-2.351]	
	Bruttotonnen nur Intercity/Eurocity (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.00476 *** [4.252]
	Bruttotonnen nur Schnellzug, Interregio, Regioexpress (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			-0.0023 * [-1.803]
	Bruttotonnen nur Regionalzug (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.0049 ** [2.770]
	Bruttotonnen nur S-Bahn (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.00202 [1.614]
	Bruttotonnen nur Fern- und Nahgüterzüge (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			-0.00129 [-0.637]
	Bruttotonnen nur Traktorgüterzüge, Lokzug (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			-0.00292 [-0.375]
	Bruttotonnen nur Leermaterialzüge (\emptyset 3 Jahre) [Bt]			0.01518 *** [4.428]
	Diverse Interaktionen zwischen den obigen Verkehrstypen	div.	div.	div.

Nicht transformierte Variablen	Durchschnittliche Geschwindigkeit Reisezüge	-0.01513 *** [-3.630]	-0.016 *** [-3.651]	-0.02084 *** [-6.418]
	Anteil Weichenmeter an Gleislänge [%]	0.70491 [0.588]	0.27638 [0.216]	4.21506 *** [3.936]
	Anteil Brückenmeter an Gleislänge [%]	-1.61337 [-0.549]	-2.73444 [-0.800]	1.88189 [0.913]
	Anteil Tunnelmeter an Streckenlänge [%]	0.87892 *** [2.887]	0.80582 ** [2.301]	0.69907 * [1.929]
	Gleisanteil mit Radien <500m [%]	1.41395 ** [2.394]	1.62909 ** [2.577]	-0.2133 [-0.462]
	Gleisanteil mit mehr als 20 Promille Steigung [%]	0.04353 [0.117]	0.0861 [0.223]	-0.12414 [-0.563]
	Gleisanteil mit Brand- und Lärmschutzwänden [%]	2.05636 ** [2.072]	2.58692 ** [2.400]	1.39562 [1.695]
	Stützmauern (in m2) pro Streckenkilometer	0.00001 [0.143]	0.00003 [0.242]	0.00014 [1.389]
	Anteil Schwellen, die älter als 25 Jahre sind [%]	0.51412 [1.002]	0.49781 [0.960]	0.87158 *** [3.747]
	Gleisanteil mit Perronkanten [%]	2.30466 ** [2.157]	2.16034 * [1.912]	-1.32168 [-1.314]
	Dummy Strecke mit grossem Rangierbahnhof [0/1]	0.17712 [1.539]	0.23276 ** [2.094]	-0.0294 [-0.178]
	Dummy für eingleisige Strecken [0/1]	0.26897 ** [2.201]	0.32795 ** [2.601]	0.08645 [0.575]
	Dummy verschiedene Jahre [0/1]	div.	div.	div.
	Regionendummies [0/1]	div.	div.	div.
	Log-Likelihood	21.49	20.31	122.72
	R2 adjusted	0.92922	0.92314	0.98227

***/**/* kennzeichnen signifikante Variablen auf dem 1/5/10% Niveau. Die Werte in den Klammern entsprechen den t-Statistiken.

Literaturverzeichnis

- Andersson Mats (2006)
Marginal cost pricing of railway infrastructure operation, maintenance and renewal in Sweden – from policy to practice via existing data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.
- Commission of the European Communities (2001)
White Paper: European Transport Policy for 2010: Time to Decide, COM (2001)370, Brussels.
- Ecoplan (2004)
Unterhaltskosten von Schienen- und Strassen-Infrastrukturprojekten. Überprüfung der Kostensätze für Zweckmässigkeitsbeurteilungen. Bern.
- Johansson P., Nilsson, J.-E. (2004)
An economic analysis of track maintenance costs. Transport Policy, Vol. 11, 2004, pp. 277-286.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2006)
Halbzeitbilanz zum Verkehrsweißbuch der Europäischen Kommission von 2001. KOM(2006) 314, Brüssel.
- Marti Michael, Neuenschwander René – Ecoplan (2006)
Track Maintenance Costs in Switzerland. Case study 1.2E des Forschungsprojekts GRACE, FP6-006222, Generalisation of Research on Accounts and Cost Estimation. Bern.
- Marti Michael, Neuenschwander René – Ecoplan (2006b)
Unterhaltskosten des Schienenverkehrs in der Schweiz. Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus dem EU-Projekt GRACE, Bern.
- Marti Michael, Neuenschwander René, Walker Philipp (2008)
Unterhalts- und Erneuerungskosten des Schienenverkehrs in der Schweiz, Schweizer Fallstudie im Rahmen des EU-Projektes CATRIN „Cost Allocation of Transport Infrastructure“
- Michael Marti, René Neuenschwander and Philipp Walker (2008b)
CATRIN (Cost Allocation of TRansport INfrastructure cost), Deliverable 8, Rail Cost Allocation for Europe – Annex y – Track maintenance and renewal costs in Switzerland. Funded by Sixth Framework Programme. Bern, February 2009
- Munduch G., Pfister A., Sögner L. und Stiassny A. (2005)
An Econometric Analysis of Maintenance Costs as a Basis for Infrastructure Charges for the Austrian Railway System. Mimeo. Vienna.
- SBB (2013)
Netzzustandsbericht 2013. Bern.
- Tervonen J., Idström T. (2004)
Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997 – 2002. Finnish Rail Administration, Publication A 6/2004, Helsinki, Finland.

Wheat Phill, Smith Andrew (2008)

Assessing the Marginal Infrastructure Maintenance Wear and Tear Costs for Britain's Railway Network, Journal of Transport Economics and Policy, Volume 42, Number 2, May 2008 , pp. 189-224(36).

Wheat Phill, Smith Andrew and Chris Nash (2009)

CATRIN (Cost Allocation of TRansport INfrastructure cost), Deliverable 8 - Rail Cost Allocation for Europe. Funded by Sixth Framework Programme. VTI, Stockholm, 2009

Wooldridge Jeffrey M. (2005)

Intruductory Econometrics: A Modern Approach. Ohio.

Das Literaturverzeichnis wird im definitiven Schlussbericht ergänzt.