

## Leistungsmaßzahlen für die Straßenerneuerung

VON CRAIG RICHMOND; CLEMENS KIELHAUSER UND BRYAN T. ADEY,  
ZÜRICH

### 1. EINLEITUNG

Im folgenden Beitrag werden Methoden untersucht, wie Leistungen des Erneuerungsmanagements von Straßennetzen so gemessen werden können, dass die resultierenden Maßzahlen zwischen Verwaltungseinheiten vergleichbar werden. Im Unterschied zu anderen Ansätzen mit ähnlicher Zielsetzung (Cook, Kazakov, & Roll, 1993; Deller, Chicoine, & Walzer, 1988; Kalb, 2009; Rouse, Putterill, & Ryan, 1997) wird hier ein „bottom-up“ Ansatz gewählt. Unter Zuhilfenahme physischer Verhaltensfunktionen werden die Leistungsmaßzahlen der Straßennetzwerkverwaltung (SNV) basierend auf extensiven Datensätzen von Merkmalen der einzelnen Straßenabschnitte errechnet. Der Ansatz ist in vielerlei Hinsicht mit der Erneuerungsplanung in modernen Pavement Management Systemen (PMS) verwandt. Soweit den Verfassern bekannt, ist die Anwendung dieser Berechnungsmöglichkeiten für einen Leistungsvergleich neu.

Insbesondere werden Maßzahlen gesucht, die Antworten auf zwei Fragen liefern: ob das Netzwerk ausreichend unterhalten wird und ob das Netzwerk effizient erhalten wird. Das Ziel ist eher pragmatisch, da Methoden gesucht werden, die mit heute zur Verfügung stehenden Daten gerechnet werden können. Die Schweizerischen Kantonsstraßennetze, die den zwischenörtlichen Verkehr sicherstellen, werden als Kontext verwendet. Dafür werden hier mögliche Maßzahlen vorgeschlagen und beispielhaft an Hand einer Fallstudie mit fünf Kantonen berechnet. Darüber hinaus wird eine Reihe zusätzlicher Maßzahlen vorgeschlagen, die ebenfalls berechnet werden sollten, um ungewollte Anreize zu bekämpfen, die dann entstehen, wenn nur einzelne Aspekte einer komplexen Leistung gemessen werden.

Leistungsmaßzahlen werden insbesondere benötigt, da die Bereitstellung der meisten Straßinfrastrukturdienste ein öffentliches Monopol ist und somit in Bezug auf die Effizienz

---

#### Anschriften der Verfasser:

Dr. Craig Richmond  
ETH Zürich  
Insitut für Bau- und Infra-  
strukturmanagement (IBI)  
Stefano-Francini-Platz 5  
8093 Zürich

Clemens Kielhauser  
ETH Zürich  
Insitut für Bau- und Infra-  
strukturmanagement (IBI)  
Stefano-Francini-Platz 5  
8093 Zürich

Prof. Dr. Bryan T. Adey  
ETH Zürich  
Insitut für Bau- und Infra-  
strukturmanagement (IBI)  
Stefano-Francini-Platz 5  
8093 Zürich

richmond@ibi.baug.ethz.ch

kielhauser@ibi.baug.ethz.ch

adey@ibi.baug.ethz.ch

die disziplinierende Wirkung des Marktes fehlt. Die Öffentlichkeit bestimmt über das Mengengerüst und Qualität der Dienste, was entsprechende Maßzahlen erfordert, um festzustellen, ob die Ansprüche an Menge und Qualität ausreichend erfüllt werden. Des Weiteren sind vergleichbare Maßzahlen auch für die Straßeninfrastrukturverwaltung selbst von großem Nutzen, um die eigene Leistung und/oder Organisation besser zu kennen und zu steuern.

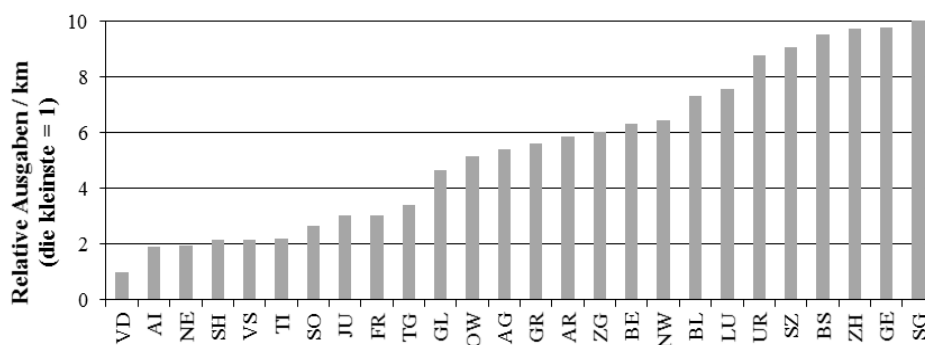
Obwohl eine SNV für viele verschiedene Aufgaben verantwortlich ist, liegt der Fokus dieses Beitrags jedoch fast ausschließlich auf Leistungen im Bereich Erneuerung, womit hier die periodische gänzliche Ersetzung der Deckschicht, oder je nachdem auch die darunterliegenden Schichten, über einen längeren Straßenabschnitt gemeint ist. Kleinere Maßnahmen, die zu einer Verlängerung der Dienstleistungszeit führen, werden je nach Systematik als Reparaturen, Instandhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen bezeichnet. In diesem Beitrag werden diese im Allgemeinen der einfacheren Lesbarkeit wegen unter dem Begriff „Instandsetzung“ zusammengefasst. Auf einzelne spezifische Kategorien wird nur dann eingegangen, wenn ein Bezug zu spezifischen externen Datenreihen herzustellen ist. Empirisch lässt sich bei den Ausgabendaten keine kategorische Trennung zwischen Erneuerungsmaßnahmen und Instandsetzungsmaßnahmen durchführen. In den schweizerischen Statistiken, sowie in den dort gültigen Normen (VSS Norm 640900a) wird zwischen den Begriffen „Betrieblicher Unterhalt“, „Baulicher Unterhalt“, „Ausbau und Verbesserungen“, sowie „Neubau“ unterschieden. Diese Begriffstrennung ist für die vorliegende Arbeit von erheblicher Bedeutung, da die empirische Modellierung, der die Kosten-Effizienzmaßzahl – eine der hier vorgestellten Maßzahlen – unterliegt, sich dieser Begriffstrennung anzupassen hat. Für die anderen vorgestellten Maßzahlen, die ohne Kostendaten auskommen, besteht diese Einschränkung nicht und dort können Maßzahlen vorgestellt werden, die tatsächlich nur einzelne Maßnahmentypen betreffen, wie zum Beispiel die Erneuerungsmaßnahmen. Als empirische Annäherung an die Erneuerung wird für die Kosten-Effizienzmaßzahl die Kategorie Baulicher Unterhalt in den Ausgabendaten verwendet.

Aus theoretischer Sicht bietet die Einschränkung auf Erneuerungsmaßnahmen gewisse Vorteile. Zum einen ist die empirische Identifikation der Erneuerungsmaßnahmen relativ einfach. Die Erneuerung findet in geographisch klar abgegrenzten Projekten statt, bewirkt eine eindeutige Verbesserung des Straßenzustands und wird in der Schweiz fast ausschließlich durch Drittfirmen durchgeführt, was klar ersichtliche Einträge in den Finanzdatenstämmen zur Folge hat. Deshalb sind diese Maßnahmen sowohl in den physischen Daten als auch in den Finanzdaten eher erkennbar, was bei betrieblichem Unterhalt, Instandhaltung oder Instandsetzung nicht der Fall ist. Zum anderen ist bei Erneuerungsmaßnahmen eine relative endogene Bestimmung des Mengengerüsts möglich, was bei Verbesserungen, Ausbau oder Neubau nicht gegeben ist. Dort gibt es viele externe beeinflussende Faktoren, wie z.B. das wirtschaftliche Wachstum. Das Mengengerüst an benötigten Erneuerungsmaßnahmen wird in erster Linie durch das vorhandene Netzwerk bestimmt. Die Modellierbarkeit der geforderten Menge an Erneuerung stellt für die Konstruktion von vergleichbaren Maßzahlen einen großen Vorteil dar.

Dass die Vergleichbarkeit eine nicht zu unterschätzende Herausforderung darstellt, zeigt sich eindeutig an Hand der Ausgabendaten der Schweizerische Straßenrechnung in Abbildung 1. Die Schweiz sammelt diese Daten systematisch seit 1913 auf Gemeinde- und Kantonebene, und – etwas verspätet – auch auf nationaler Ebene (Swiss Federal Statistical Office, 2014). Ein zwar einfaches, aber doch naheliegendes Konzept für eine vergleichende Maßzahl sind die Ausgaben pro Kilometer Straße. Beispiele von Anwendungen dieser Maßzahl findet man in BAKBASEL (2013) bezüglich der Effizienz oder Koch & Forster (2010) bezüglich der Hinlänglichkeit. Da beide Verfasser gute Kenner der schweizerischen Verhältnisse sind, darf man daraus schließen, dass bessere Maßzahlen für die Schweiz nicht zu Verfügung stehen. Damit tritt das Ausmaß an fehlender Vergleichbarkeit deutlich zu Tage (wie in Abbildung 1 gezeigt) und kann als Ausgangslage angesehen werden.

Abbildung 1 zeigt die Ausgaben pro Kilometer Länge als 15-jährigen Durchschnitt für die Kategorie des baulichen Unterhalts der Straßen und Kunstbauten für die 26 Kantone. Überraschenderweise scheint es, dass St. Gallen (SG) etwa zehnmal so viel pro Kilometer ausgibt wie der Kanton Waadt (VD). Nicht weniger überraschend sind die Vergleiche zwischen den benachbarten Kantonen Solothurn (SO) und Basel-Landschaft (BL) mit einem Verhältnis von 1:4 oder zwischen Solothurn (SO) und Aargau (AG) mit fast 1:3. Natürlich ist es kaum zu glauben, dass die Effizienz der Kantone derart stark voneinander abweichen könnte, und das Gegenteil wird von den Verfassern vermutet. Dennoch belegt die Grafik, dass große Differenzen in der Effizienz unbemerkt existieren können, woraus abgeleitet wird, dass bessere Messmethoden entwickelt werden sollten.

**Abbildung 1: Die Vergleichbarkeit von bloßen Ausgaben pro Kilometer scheint nicht gegeben zu sein: Index der jährlichen kantonalen Ausgaben für baulichen Unterhalt pro km; 1994 - 2011<sup>1</sup>**



Quelle: Eigene Berechnung aus der Schweizerischen Straßenrechnung des BFS, inflationsangepasst mit dem LIK

Eine Liste von möglichen Erklärungen für die Unterschiede in Abbildung 1 würde Einflussfaktoren aufführen, die in dieser Maßzahl nicht berücksichtigt werden: Kunstbauten müssen von Straßen getrennt behandelt werden; Erneuerungskosten fallen nicht proportional zur Länge sondern zur Fläche an; Innerortsstraßen haben Entwässerungsanlagen, Beleuchtungen, Randsteine und Gehwege; auf manchen Untergründen ist das Bauen schwieriger als auf anderen; steile Gegenden verlangen viele Kunstbauten; usw. Netzwerke, die von diesen Schwierigkeiten besonders betroffen sind, müssten daher höhere Ausgaben haben. Des Weiteren müsste auf die vielen Detailfragen hingewiesen werden, die hinter den Ausgabenaggregaten verborgen sind, zum Beispiel: Was ist genau mit baulichem Unterhalt gemeint? Wie wird mit Straßenverbreiterungen umgegangen? Wird die Teilung von Ausgaben zwischen Gemeinden und Kantonen überall gleich behandelt?

Etwas tiefer verborgen sind verzehrende zeitliche Aspekte, die zu Mehr- oder Minderausgaben führen können. Straßen sind langlebig. Die erwartete Lebensdauer der Deckschicht kann durchaus 25 Jahre betragen, und die der darunter liegenden Schichten auch einiges mehr (Gunsteren, Kieliger, Traber, Nellen, & Zahnd, 2005). Daher sind sogar bei einer Betrachtungslänge von 15 Jahren die Ausgangs- und Endbedingungen nicht vernachlässigbar. Übernimmt eine SNV beim Antritt ein im Schnitt älteres Netzwerk, wird dies über mehrere Jahre höhere Ausgaben erfordern, um das erforderliche Dienstleistungsniveau zu gewährleisten, als dies bei einem im Schnitt jüngeren Netzwerk der Fall wäre. Dies trifft umso mehr bei kürzeren Betrachtungsperioden zu, die für eine typische Leistungsbesmes-

<sup>1</sup> Eine sehr breite Streuung in Ausgaben pro Kilometer lässt sich mit österreichischen oder US-amerikanischen Daten ebenfalls darlegen. Beide Länder publizieren die benötigten Grunddaten.

sung relevant sind. Je nach politischen oder finanziellen Umständen kann eine Behörde mehr oder weniger für die Straßenerneuerung budgetieren. Es fragt sich dann, welche Anfangs- und Endbedingungen zu erfassen sind und welche kompensierenden Berechnungen angestellt werden sollen, damit am Ende die Maßzahlen vergleichbar werden.

Die vorhergehenden Ausführungen belegen, dass die Vergleichbarkeit von Maßzahlen über die Erneuerung nicht einfach herbeizuführen ist. Es fehlt Literatur darüber, wie vergleichbare Maßzahlen für die mengenmäßig ausreichende und kostenmäßig effiziente Erneuerung aus detaillierten Straßendaten eben „bottom-up“ gerechnet werden können, wie dies für Benchmarking benötigt wird. Das Ziel dieses Beitrags ist daher, Wege aufzuzeigen, wie diese Lücke ansatzweise gefüllt werden kann.

Vorab sollten zwei Begriffe geklärt werden, und zwar was unter „ausreichend“ und was unter „Leistung“ zu verstehen ist. „Ausreichend“ ist ein relativer Begriff und es muss als erstes die Zielsetzung, auf die er bezogen ist, bestimmt werden. Anstatt eine fixierte Zielsetzung vorzuschreiben, soll die Maßzahl so formuliert sein, dass die Zielsetzung offen bleibt und als unabhängige Variable in der Formel auftritt. Vergleiche zwischen mehreren SNVen lassen sich dann – je nach Zweck – relativ zu individuellen Zielen oder relativ zu einer postulierten gemeinsamen Zielsetzung durchführen.

Der Begriff ‚Leistung‘ ist in Bezug auf die Straßenerneuerung zweideutig. Sie kann entweder als physischer Output oder als Outcome/Wirkung verstanden werden, ungefähr wie in der Literatur zur Performance Messung zwischen „Output“ und „Outcome“ unterschieden wird (Rouse & Putterill, 2008) oder bei der Balanced Scorecard Literatur zwischen „Performance Driver“ und „Outcome Measure“ (Kaplan & Norton, 1996) unterschieden wird. Wenn es um Leistung als physischen Output geht, muss die Leistung in physischen Maßeinheiten gemessen werden. Zum Beispiel kann die Leistung einer Maßnahme mit der Anzahl Quadratmeter von Maßnahmentyp  $k$  auf Straßenaufbautyp  $j$  bemessen werden. Ein Nachteil dieser Definition zeigt sich deutlich in dem Fall, wenn der besagte Belagseinbau bei einer intakten Oberfläche gemacht wurde, nur um an den darunterliegenden Leitungen zu arbeiten. Ein Erneuerungs-Output wurde geleistet, aber kaum eine Erneuerungswirkung. Dieselbe Problematik zeigt sich weniger deutlich, wenn Erneuerungsmaßnahmen bei unterschiedlichen Belagszuständen ausgelöst werden. Interessiert man sich hingegen für die Wirkung, also die bewirkte Verbesserung der Straßensubstanz, dann muss die Leistung in der Menge der bewirkten Zustandsverbesserung gemessen werden<sup>2</sup>. Die Unterscheidung zwischen physischem Output und Wirkung ist von besonderer Wichtigkeit, falls die Maßzahlen als Teil eines Anreizsystems fungieren (siehe Kerr, 1975).

---

<sup>2</sup> Genauer gesagt, die Erneuerung bewirkt das zur Verfügung stellen eines Vektors an potentiellen Dienstleistungen, die je nach Gebrauch abgenutzt werden. Überlässt man die Strasse allein dem Wetter und den Fussgängern, hält ihre Dienstleistung vielleicht 80 Jahre an. Überlässt man die Strasse jedoch schweren Lastwagen, dauert die Dienstleistung vielleicht nur 12 Jahre. Idealerweise würde man dieses „zur Verfügung-stellen“ messen. Leider ist das nicht direkt möglich. Der Strassenzustand eines bestimmten Strassentyps ist ein approximatives Mass für die potentielle Benutzung.

Der verbleibende Teil dieses Beitrag ist folgendermaßen strukturiert: In Kapitel 2 werden Methoden diskutiert, die für die Bemessung von ausreichender Erneuerung angewendet werden können. Kapitel 3 behandelt die Frage nach effizienter Erneuerung. Schlussfolgerungen sind in Kapitel 4 aufgeführt.

## 2. Maßzahlen für die Feststellung, ob die Strassen ausreichend erhalten werden

Grundsätzlich gibt es zwei Vorgehensweisen, um zu prüfen, ob eine dauerhafte Infrastruktur ausreichend erhalten wird. Die Unterscheidung folgt im Allgemeinen der Abgrenzung zwischen Output und Wirkung. Die zwei in Frage kommenden Maßzahlen sind:

- i. Der durchschnittliche Netzwerkzustand oder dessen Veränderungsrate
- ii. Die Maßnahmendurchführungsrate

Neben einer kurzen Diskussion der Vorteile und Nachteile in Bezug auf die Vergleichbarkeit dieser zwei Haupt-Maßzahlen werden in diesem Kapitel auch zusätzliche Maßzahlen vorgestellt, die ungewollte Anreize bekämpfen sollen, welche dann entstehen, wenn die oben genannten Maßzahlen im Betrieb als Leistungsmaß benutzt werden. Wenn zum Beispiel die Anzahl eingebauter Quadratmeter als Maß der Zielerreichung bestimmt würde, entstähe ein Anreiz, neuen Belag auch dort einzubauen, wo es nicht unbedingt angezeigt wäre.

### 2.1 Der durchschnittliche Zustand

Der durchschnittliche Netzwerkzustand fasst die Wirkung der vergangenen Maßnahmen gegenüber den vorhandenen Einflussfaktoren zusammen und ist deshalb ein guter Indikator dafür, ob in der Vergangenheit ausreichend viel für die Erhaltung unternommen wurde, sofern unter „Vergangenheit“ eine genügend lange Periode verstanden wird, wie z.B. 5 Jahre oder länger. Sind kürzere Perioden von Interesse, spiegelt der Durchschnittswert des heutigen Tages die jüngsten Leistungen der SNV nur bedingt wider, da Straßen langlebig sind. Obgleich die Berechnung selbst trivial und die Aussage recht eindeutig ist wird diese Maßzahl selten publiziert. Eine Ausnahme findet sich z.B. in den Berichten des Österreichischen Rechnungshofes über die österreichischen Autobahnen, in denen der durchschnittliche Zustand im historischen Verlauf gezeigt wird (siehe Der Rechnungshof, 2012, Abbildung 4). Statt eines Durchschnittswerts sieht man dagegen öfter eine Einteilung der Netzwerkanteile in Zustandskategorien, wie bei Koch & Forster (2010). Diese Darstellungsweise ist jedoch weniger eindeutig.

#### 2.1.1 Vor- und Nachteile

Sofern es eine Zielvorgabe für den durchschnittlichen Zustand gibt, ist die Schlussfolgerung bezüglich einer ausreichenden Erhaltung bei einem Vergleich eindeutig. Von Vorteil

sind die einfache Berechnungsart und die vielen Möglichkeiten, über diverse Gewichtungsschemen spezielle Merkmale eines Erhaltungsprogramms hervorzuheben. Eine Gewichtung nach Verkehrsaufkommen würde beispielsweise eine Benutzersicht betonen; eine Gewichtung nach unfallbezogenen Risikofaktoren würde eine gesellschaftliche Perspektive betonen. Identische Zielwerte über verschiedene SNVen sind keine zwingende Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit, da auch die Differenz zum jeweiligen Zielwert verglichen werden kann. Ebenfalls muss als Vorteil gewertet werden, dass es sich beim Straßenzustand bereits vom Konzept her um einen vergleichbaren Parameter handelt. Ein Wert von 3,0 sollte für eine Strasse durch ein Wohngebiet dasselbe bedeuten wie für eine Autobahn.

Hingegen ist das Fehlen eines objektiven Kriteriums, wie zum Beispiel ein Zielwert für den durchschnittlichen Zustand ausgewählt werden soll, als Nachteil zu werten. Je nach Wohlstand, Beschwerlichkeit der lokalen Bedingungen bezüglich des Straßenunterhalts, Risiko oder der Lage der öffentlichen Finanzen sind unterschiedliche Zielwerte zu erwarten. Wenn alle anderen Einflussfaktoren gleich gehalten werden, hängt der durchschnittliche Zustand von dem „Auslösezustand“ ab, nach dem gemäß der Erhaltungsstrategie eine Erneuerung ausgelöst wird. Ist der Auslösezustand niedriger (d.h. in unserem Fall besser), dann werden die Straßen öfter erneuert, was die Gesamterneuerungskosten asymptotisch ansteigen lässt<sup>3</sup>. Da es auch unter optimalen Bedingungen relativ lang dauern kann, bis sich ein neuer Durchschnittszustand eingependelt hat, ist es ohne Prozessmodelle nicht einfach, einen stetig zu haltenden Durchschnittszustand mit einem Ausgabeniveau zu verknüpfen. Anhaltspunkte bieten Erfahrungen aus dem eigenen oder aus benachbarten Netzwerken.

Abbildung 2 zeigt ein vergleichendes Beispiel dieser Maßzahl aus der Fallstudie. Aufgrund der Skala von  $I_1$ <sup>4</sup>, bedeutet ein Aufwärtstrend eine Verschlechterung, was in vier von fünf SNVen der Fall ist. Die Skala bezeichnet 0-1 als „gut“ und 1-2 als „mittel“, was zu dem Schluss führt, dass diese Netzwerke im Schnitt einen „guten“ bis „mittleren“ Zustand aufweisen, wobei bedeutende Unterschiede bestehen. Eine wichtige Schlussfolgerung ist, dass für das Beibehalten eines stetigen Zustands diese Netze in diesem Betrachtungszeitraum im Durchschnitt nicht ausreichend unterhalten wurden. Bemerkenswert ist, wie aussagekräftig diese einfache Maßzahl ist, wenn sie über die Zeit und über mehrere SNVen vergleichend

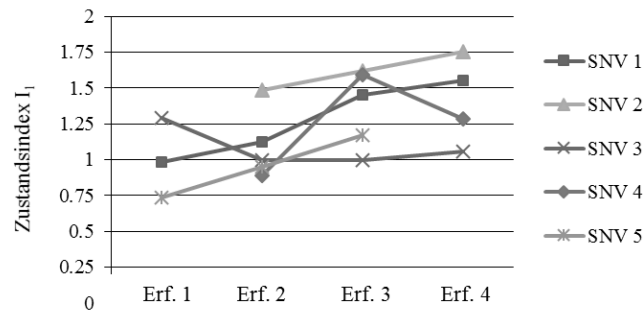
---

<sup>3</sup> Wenn die Erneuerung nach  $T$  Jahren erfolgt, ist die erwartete Fläche, die jedes Jahr bei einem stetigen Zustand erneuert werden muss, proportional zu  $1/T$ .

<sup>4</sup> In der Schweiz werden für die Messung des Straßenzustands sechs Indizes verwendet. Diese werden als  $I_0$  bis  $I_5$  bezeichnet.  $I_2$  bis  $I_5$  berücksichtigen spezifische physikalische Merkmale wie zum Beispiel die Quer- und Längsebenheit. Der Index  $I_1$  charakterisiert die Gesamtheit der Oberflächenschäden unter Einschluss der visuell geschätzten Spurrinnentiefe, während  $I_0$  dieses Schadensmerkmal nicht enthält. (VSS 640925b). Für alle Indizes beträgt der beste Wert 0 und der schlechteste 5. Die meisten der in diesem Artikel präsentierten Maßzahlen können von jedem Index aus berechnet werden.  $I_1$  wurde hier primär verwendet, da dafür die größte Anzahl Beobachtungen im Datensatz vorlagen.

dargestellt ist - selbst, wenn bekannt ist, dass bei den Erhebungen nicht durchgehend die gleichen Methoden benutzt wurden<sup>5</sup>.

**Abbildung 2 Der durchschnittliche Netzwerkzustand in Zeitverlauf, Fallbeispiel mit Fünf Schweizerischen Kantonen**



Quelle: Richmond, Kielhauser, and Adey (2013); zwischen den einzelnen Zustandserfassungen liegen 2 bis 3 Jahre.

### 2.1.2 Zusatzmasszahlen aufbauend auf Gewichtungsschemen

Ein gegebener durchschnittlicher Straßenzustand kann von vielen verschiedenen Verteilungen stammen. Zum Beispiel kann sich hinter einem akzeptablen Durchschnitt eine nicht akzeptable bimodale Verteilung verstecken. Es kann auch nicht allgemeingültig bestimmt werden, welche Verteilung der Zustände eines Straßenabschnitts die richtige ist. Die Verteilung variiert je nach der verfolgten Erhaltungsstrategie. Abhilfe gegenüber ungewollten Verteilungen bei einem gleichbleibenden Durchschnitt können Gewichtungsschemen, wie in Gleichung (1) schematisch dargestellt, liefern. Zum Beispiel kann man die Abschnitteflächen mit nichtlinearen Nutzerkosten gewichten, damit sehr schlechte Zustände überproportional in den Durchschnittswert eingehen. Auf diese Weise vermittelt man einen Anreiz, die schlechtesten Straßen zuerst zu erneuern. Dasselbe Prinzip lässt sich für andere Zwecke analog anwenden.

$$Masszahl = \frac{\sum_i w_i A_i}{\sum_i A_i} \quad (1)$$

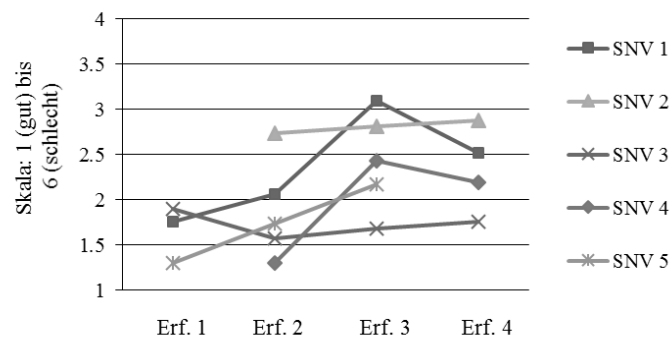
Abbildung 3 wurde mit der gleichen Datengrundlage wie Abbildung 2 erstellt. Aber um ein an den „Fahrentutzen“ angelehntes Schema zu erzeugen, wird der Straßenzustand in dritter

<sup>5</sup> SNV 4 benutzte vor und nach Erfassung eine visuelle Erhebungsmethode, aber bei Erfassung eine maschinelle Methode, was den Ausreißer in jenem Jahr vermutlich erklärt.



statt erster Potenz in den Gewichten eingesetzt:  $w_i = 7 - (27 - \text{Zustand}^3) / 4.5$ . Unter dieser Gewichtung ist es von Vorteil, Straßen mit schlechtem Zustand prioritär zu erneuern. Noch näher am tatsächlichen Fahrernutzen wäre eine zusätzliche Gewichtung nach Verkehrsaufkommen. Im konkreten Fall bleibt der Gesamteindruck wie in Abbildung 2 unverändert, außer dass die Werte auseinanderzogen wurden: Der durchschnittliche Zustand wird in vier von fünf Fällen schlechter; es gibt bedeutende Unterschiede zwischen den Teilnehmern; aber die Straßenzustände sind im Allgemeinen gut. Im Detail sieht man einzelne Unterschiede, etwa bei der SNV 1 im dritten Jahr oder bei der SNV 3, die unter dieser Berechnungsmethode eine Verschlechterung des Zustands nach Erfassung 2 erlebt.

**Abbildung 3: Nach Dem Fahrernutzen Gewichteter Durchschnitt der Zustände ( $I_1$ ); Gewichtung des Zustands in dritter Potenz; Skaliert auf 1 bis 6<sup>6</sup>**



Quelle: Eigene Berechnungen; zwischen den einzelnen Zustandserfassungen liegen 2 bis 3 Jahre.

## 2.2 Die Maßnahmendurchführungsrate als Maßzahl

Der zweite Typus von Leistungsmaßzahlen für die ausreichende Erneuerung zielt nicht auf die geschaffene Wirkung der vergangenen Maßnahmen ab, sondern geht von der Menge der ausgeführten Maßnahmen während der laufenden Beobachtungsperiode aus: die Maßnahmendurchführungsrate. Es ist ein Maß des „Outputs“ statt des „Outcomes“. Auch hier stellt sich die Frage, welche Menge als ausreichend angesehen werden sollte.

Diese Maßzahlen sind mit den Prognosen des Erneuerungsbedarfs methodisch stark verwandt, welche z.B. mit Pavement Management Systemen (PMS) erstellt werden. In beiden

<sup>6</sup> Die Gewichtungformel lautet  $7 - (27 - I_1^3) / 4.5$  und wurde aus Praktikabilitätsgründen gewählt.

Fällen wird eine Quantität an benötigten Maßnahmen aufgrund von erwarteten Verfallsraten und einer Erhaltungsstrategie, d.h. „bottom-up“, gerechnet. Um die benötigten Finanzmittel zu berechnen, müssen die Kosten der möglichen Maßnahmen geschätzt und diese dann mit der Menge an Maßnahmen multipliziert werden (siehe Maerschalk, 2014 für eine methodische Übersicht). Danach lässt sich der so bestimmte Bedarf mit dem tatsächlichen Budget vergleichen, um die Frage zu beantworten, ob das Budget ausreichend ist. Im Unterschied dazu wird hier nur aufgrund der Menge sanierter Fläche gerechnet, damit alle empirischen Schwierigkeiten hinsichtlich der Kosten entfallen. Außerdem gehen Prognosen des Erneuerungsbedarfs eines PMS von den heutigen Netzzuständen aus, oder allenfalls vom heutigen Netzalter. Hier wird hingegen ein Erwartungswert berechnet, wie viel Quadratmeter im Schnitt pro Jahr erneuert werden müssten, um einem bestimmten Netzzustand stetig beizubehalten. Der heutige Zustand des Netzwerks wird dabei nicht berücksichtigt. Eine prinzipielle Verwandtschaft mit den sogenannten Duration-Berechnungen bei beispielsweise Newbery (1988) oder Small and Winston (1986) ist zu erkennen, obwohl anstelle von deren Annahme eines einheitlichen Netzwerks hier der Erwartungswert verwendet wird.

Anders als bei Newbery oder Small & Winston werden hier die erwarteten Verfallsraten abschnittsspezifisch gerechnet, d.h. in Anbetracht der lokalen Einflussfaktoren. Um auf Abschnitt  $j$  die Länge der erwarteten Erneuerungsperiode  $T_j$  bis zu einer Erneuerung zu berechnen, wird neben den Verfallsraten auch eine Erhaltungsstrategie inklusive kleineren Maßnahmen und deren Reset-Werten benötigt – so wie dies in einem PMS ebenfalls gemacht wird (vgl. hierzu Hinsch, Krause, Maerschalk, & Rübstein, 2005). Die erwartete lokale Erneuerungsrate ist dann  $1/T_j$ . Eine flächengewichtete Summe dieser Werte über das ganze Netzwerk dient als netzwerkspezifischer Vergleichswert (Benchmark) der zu erwartenden Quadratmeter erneuerter Fläche pro Jahr. Setzt man diese Summe wiederum ins Verhältnis zu der gesamten Netzwerkfläche, ergibt sich eine erwartete netzwerkweite Erneuerungsrate. Für das Netzwerk  $i$  lässt sich diese wie folgt anschreiben:

$$\text{Erwartete Erneuerungsrate}_i = \frac{\sum_j \frac{A_{ij}}{T_{ij}}}{\sum_j A_{ij}} = \sum_j \frac{A_{ij}}{A_i} \frac{1}{T_{ij}} \quad (2)$$

Der gleiche Quotient kann ebenfalls aus der empirisch geleisteten Menge an Erneuerungen pro Jahr gebildet werden. Bezeichnet man einen tatsächlich erneuerten Quadratmeter von Abschnitt  $j$  mit  $A'_j$ , ist die geleistete Erneuerungsrate für das Netzwerk  $i$

$$\text{Geleistete Erneuerungsrate}_i = \frac{\sum_j A'_{ij}}{A_i} \quad (3)$$

Diese beiden Quotienten können miteinander verglichen werden. Die resultierende Differenz ist ein über Netzwerke hinweg vergleichbares Maß der langfristig ausreichenden Erneuerung. Formell lautet diese

$$\text{Maß der langfristig ausreichenden Erneuerung} = \sum_j \frac{A'_{ij}}{A_i} - \sum_j \frac{A_{ij}}{A_i} \frac{1}{T_{ij}} \quad (4)$$

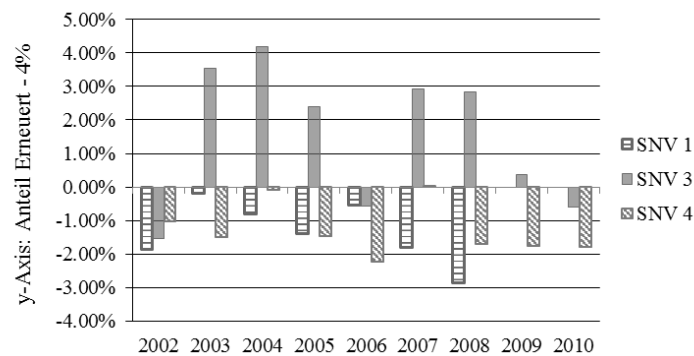
### 2.2.1 Vorteile und Nachteile

Ein erster Vorteil kann in der Genauigkeit der Messung gesehen werden. Die Menge an Maßnahmen nach Quadratmetern anstatt nach dem ausgegebenen Geld zu bemessen, repräsentiert das Objekt des Interesses deutlich besser: den Anteil des Netzwerks, der tatsächlich erneuert wurde. Bei einer Liste aller Erneuerungsmaßnahmen, die innerhalb eines gegebenen Zeitraums durchgeführt wurden, kann der erneuerte Anteil des Netzwerks relativ genau durch Aufsummierung der Quadratmeter an denen eine Maßnahme durchgeführt wurde bestimmt werden. Wenn man stattdessen die Kosten aller Maßnahmen addieren würde, und versuchen würde, davon den erneuerten Netzwerkanteil abzuleiten, würden die Aussagen deutlich ungenauer sein. Zum Beispiel würden sich sofort viele Detailfragen stellen, etwa wie belagsbezogene Kosten innerhalb der Projekte von anderen Kostentypen abgegrenzt wurden. Des Weiteren müssen weder die Preise noch die Qualitätsstandards von Ort zu Ort vergleichbar sein, wenn die Menge an Erneuerung in Quadratmetern gemessen wird. Schließlich will auch niemand die Leistung einer SNV anhand der ausgegebenen Mittel messen! Dies würde genau in die falsche Richtung führen.

Ebenfalls vorteilhaft ist die zeitnahe Messung. Straßenzustände verändern sich langsam und die Zustandsmessungen sind Unsicherheiten unterlegen. Dazu kommt, dass die Zustandserfassung selten jährlich getätigt wird. Es dauert deshalb mehrere Jahre, bis eine gesicherte Aussage über die ungenügende Erneuerung aufgrund des durchschnittlichen Straßenzustands gemacht werden kann. Demgegenüber ist die geleistete Erneuerungsrate relativ präzise und zeitnah. Unsicherheiten gibt es vor allem in der Berechnung der erwarteten Erneuerungsrate, die als Vergleichswert dient. Es gibt in der Literatur einige Ansätze, wie diese erwartete Erneuerungsrate zu berechnen ist, auf die hier verwiesen wird (Aguilar-Moya, Prozzi, & de Fortier Smit, 2011; Bardaka, Labi, & Haddock, 2014; Hong & Prozzi, 2010; Khattak, Nur, Bhuyan, & Gaspard, 2014; Mishalani & Madanat, 2002; Oeser, 2014; Scanziga, 2008; Weninger-Vycudil, Simanek, Rohringer, & Haberl, 2009). Letztendlich ist die Unsicherheit einer geschätzten erwarteten netzweiten Erneuerungsrate mit der Unsicherheit eines PMS-Maßnahmenprognosemodells vergleichbar.

Ein weiterer Vorteil des Maßzahlkonzepts ist, dass Differenzen zwischen Netzwerken hinsichtlich ihres Ausgesetztseins gegenüber Einflussfaktoren aufgefangen werden können. Aber auch unter der Annahme einer gemeinsamen erwarteten Erneuerungsrate, wie in Abbildung 4 gezeigt, gibt dieses schon einen deutlichen Eindruck darüber, ob zu wenig für die Erhaltung unternommen wird.

**Abbildung 4: Der Anteil des Netzwerks, an dem im betrachteten Jahr die Deckschicht Erneuert wurde, abzüglich des Vergleichswerts von 4%**



Quelle: Richmond et al. (2013)

In Abbildung 4 wurden anstatt netzwerkspezifischen erwarteten Erneuerungsraten für jede SNV eine erwartete Erneuerungsrate von 4% abgezogen, passend zu einer durchschnittlichen Lebensdauer der Deckschicht von 25 Jahren. Übereinstimmend mit den Verläufen der Zeitreihen in Abbildung 2 ist die Erneuerungsrate von SNV 3 eindeutig höher als die der SNV 1 oder 4. Auch mit dieser Maßzahl ist die Aussage bezüglich ausreichender Erneuerung eindeutig. Bei zwei von drei SNVn müssten die Straßen im Schnitt mehr als 25 Jahre überdauern, damit bei den beobachteten Erneuerungsraten ein stetiger Zustand gehalten werden kann. Bei Einbeziehung der lokalen Verfallsraten sowie des extern bestimmten Auslösezustands für Erneuerungsmaßnahmen wäre die Aussagekraft noch höher.

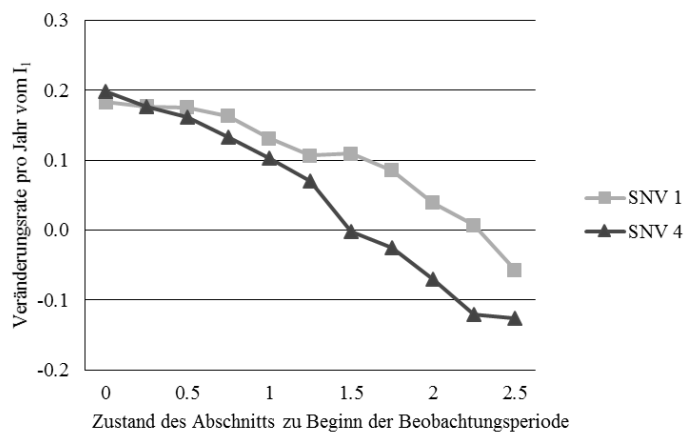
Es muss nicht zwingend optimal sein, dass in jedem Jahr die langjährig erwartete Erneuerungsrate erreicht wird. Budgetengpässe, außerordentlich schlechte Witterungsperioden oder vergangene Perioden der Unterinvestition können zu einem über- oder unterdurchschnittlichen Bedarf an Erneuerung führen. Aber über mehrere Jahre hinweg muss ein Zusammenhang zwischen der erfolgten Menge an erneuerten Quadratmetern und dem durchschnittlichen Zustand bestehen. Die Kombination von Abbildung 2 und Abbildung 4 bestätigt dies.

### 2.2.2 Zusatzmaßzahlen aufbauend auf altersspezifischen Verfallsraten

Die Verwendung der Erneuerungsrate als Maßzahl kann jedoch zu unerwünschten Anreizen führen. Zum Beispiel können Instandsetzungsmaßnahmen vernachlässigt werden, um mit den dadurch gesparten Ressourcen Erneuerungsmaßnahmen zu forcieren. Die erste von zwei Gruppen Zusatzmaßzahlen baut auf den unterschiedlichen durchschnittlichen Verfallsraten auf, die in verschiedenen Altersphasen der Straßen vorkommen. Die zweite basiert auf einem Vergleich der Verteilung der empirischen Zustände mit einer Modellverteilung derselben.

Das Ausmaß von Instandsetzungsarbeiten wie das Füllen von Rissen lässt sich nicht einfach quadrateinheitlich erfassen. Je nach Ausmaß des Schadens, muss mehr oder weniger intensiv gearbeitet werden, um den dahinterstehenden Schadensprozess einzudämmen. Als alternative Messstrategie kann die durchschnittliche Verfallsrate bei Abschnitten, die einen bestimmten Zustand bereits erreicht haben, einen Hinweis auf die bessere oder schlechtere Ausführung von Instandsetzungsarbeiten liefern. Ein Beispiel dieser Maßzahlen wird in Abbildung 5 gezeigt. Es wurden nur Straßenabschnitte in die Rechnung einbezogen, auf denen keine Erneuerungsmaßnahme stattfand. Die Verlangsamung der gemessenen jährlichen Zustandsveränderungsrate bei höheren (schlechteren) Ausgangszuständen zeigt die Wirkung von Instandsetzungsmaßnahmen. Die eigenen historischen Daten oder Daten benachbarter Netzwerke können als Vergleichswerte herangezogen werden um festzustellen, ob die Verfallsraten auffallend hoch sind, nachdem ein Zustand erreicht worden ist, bei dem vermehrte Instandsetzungen zu erwarten wären.

**Abbildung 5: Durchschnittliche jährliche Veränderungsrate, anhand von Paaren aufeinanderfolgender ZustandsErfassungen (Bezeichnet nach dem Zustand im Ausgangsjahr)**



Quelle: Eigene Berechnungen; dargestellt sind die Mittelwerte über mehrere Paare von Zustandserfassungen

### 2.2.3 Zusatzmaßzahlen aufbauend auf einer Modellverteilung der Zustände

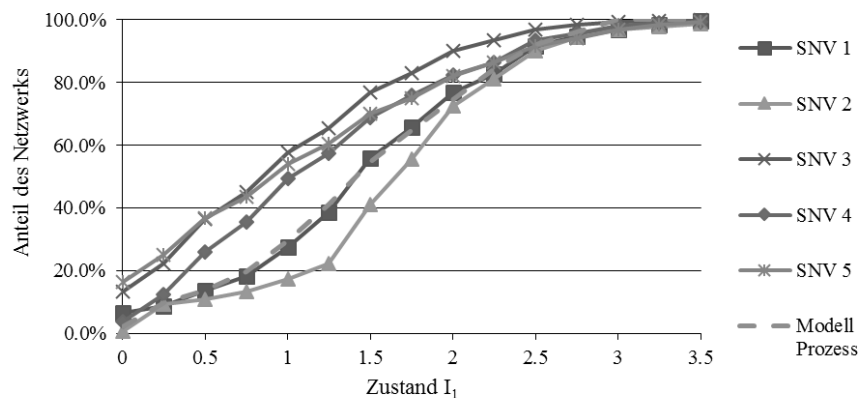
Die Summe der erneuerten Fläche sagt nichts darüber aus, ob jene Straßenabschnitte erneuert wurden, die dies am dringendsten benötigten. Die eine Hälfte der Straßen doppelt so oft zu erneuern und die andere Hälfte überhaupt nicht, resultiert zwar in der gleichen Summe, aber nicht in der gleichen Verteilung der Zustandswerte. Eine Reihe von Maßzahlen lassen sich mit Statistiken über die Verteilung der Zustände berechnen, um Probleme in der Erhaltungspraxis sichtbar zu machen. Obwohl Maßzahlen in manchen Fällen direkt zwischen einzelnen Netzwerken sinnvoll verglichen werden können, müssen jedoch - um breitere Vergleiche anzustellen - Differenzen zu lokal angepassten Vergleichswerten benutzt werden, die aus Modellverteilungen der Abschnittszustände bestimmt werden. Im Folgenden wird auf zwei Beispiele solcher Zusatzmaßzahlen eingegangen, es sind jedoch noch viele andere vorstellbar.

Die Modellverteilung wird wie folgt bestimmt: Würde eine SNV eine Erhaltungsstrategie definieren, könnte dies genau wie in einem PMS oder Life-Cycle Kostenmodell (siehe beispielsweise Ressel, Tejkl, & Klöpfer, 2013; Santos & Ferreira, 2013) verwendet werden, um eine zu erwartende Verteilung der Zustände zu berechnen. Für jeden Abschnitt wird ein Lebenszyklus in Anbetracht der Einflussfaktoren und Erhaltungsstrategie berechnet. Die Anzahl Jahre, in denen sich der Abschnitt in einem bestimmten Zustand befindet, definiert

– als Anteil der gesamten Lebenszykluszeit – eine Verteilung. Solche Verteilungen können flächengewichtet summiert und wie in Abbildung 6 als Modellprozess dargestellt werden.

Abbildung 6 vergleicht den prozentuellen Anteil der Gesamtfläche eines Netzwerks zwischen SNVn, der einen gegebenen Zustand nicht übersteigt. Neben den tatsächlichen Werten aus den fünf teilnehmenden SNVn beinhaltet die Abbildung auch eine Modellverteilung. Letztere entstammt einem idealisierten Netzwerk mit gleichmäßig verteilten Abschnittsaltern, angenommenen Verfallsraten und einer vordefinierten Reihe von Maßnahmen. Die gute Übereinstimmung mit SNV 1 ist zufällig. Wie die Abbildung zeigt, scheint es zwischen den Erhaltungsstrategien der dargestellten SNVn wichtige Unterschiede zu geben. Im Unterschied zu dem Durchschnittszustand oder der Erneuerungsrate ist hier eine Art Zeitprofil zu sehen. Aufgestauter Investitionsbedarf, wie vermutlich bei SNV 2 ersichtlich, oder zyklische Erneuerungen, wie vermutlich bei SNV 3 und 5, werden erkennbar.

**Abbildung 6: Kumulativer Anteil des Netzwerks über einem bestimmten Zustandswert**



Quelle: Richmond et al. (2013)

Abbildung 7 zeigt in zwei Matrizen, dass die Verteilungen der Zustände sowie die Verteilung ihrer Veränderung deutlich unterschiedlich zwischen den SNVn sein können. Die Zelle in Reihe  $i$  und Spalte  $j$  zeigt den Prozentsatz aller Abschnitte, die einen Ausgangszustand  $i$  und einem Endzustand  $j$  hatten. Größere Zahlen sind dunkler gefärbt. SNV 3 weist ein weniger breit gestreutes Bild auf, bei dem fast keine Abschnitte mit schlechterem Zustand als 3 vorliegen. SNV 1 hat Abschnitte bis zum Zustand 5 in der ersten Zustandserfassung. Es scheint allerdings, dass die meisten dieser Abschnitte im Folgenden eine Maßnahme erfuhren, sodass bei der zweiten Zustandsaufnahme nur noch sehr wenige Abschnitte einen Zustand von 5 aufwiesen. Gemäß Lehrbuch müsste die Erhaltungsstrategie durch Häufungen klar zu erkennen sein. Die horizontale Streuung der Werte rechts der Diagonalen erlaubt die Vermutung, dass Messfehler im Spiel sind, die Streuung nach links könnte

zusätzlich die Wirkung von Instandsetzungsmaßnahmen reflektieren. Eine fehlende Häufung in der ersten Spalte um der Zustand 2,5 bis 3,5 deutet auf relativ frühe oder späte Erneuerungen hin. Wie aus Abbildung 7 zu entnehmen ist, wenden diese zwei SNVen höchstwahrscheinlich unterschiedliche Erhaltungsstrategien an. Allerdings lässt sich aus dieser Abbildung allein nicht beantworten, welche dieser Erhaltungsstrategien besser ist, und warum. Genau um solche Fragen aufzuwerfen, ist diese Analyseart wertvoll.

Abbildung 7: Vergleich zweier Häufigkeitsmatrizen der Zustandsveränderung

(a)

SNV 1	Zweite Zustandsaufnahme, drei Jahren später																				
	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00
0,00	0,28	1,38	0,79	1,10	1,87	2,04	0,80	0,34	0,24	0,03	0,04	0,06	0,04	0,09	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,13	0,12	0,59	0,61	0,78	0,54	0,70	0,21	0,05	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,07	0,14	1,05	0,76	1,38	2,47	2,48	0,91	0,32	0,18	0,07	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,75	0,09	0,02	0,28	0,43	1,42	1,44	2,08	0,56	0,71	0,09	0,17	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,25	0,19	0,07	0,35	1,79	1,45	2,73	1,50	1,77	0,39	0,56	0,26	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,25	0,17	0,06	0,20	0,88	0,59	0,95	2,73	1,16	1,02	0,39	0,46	0,14	0,03	0,10	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,50	0,28	0,00	0,14	0,11	0,18	0,64	2,72	2,00	1,67	0,52	0,84	0,23	0,11	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,75	0,15	0,00	0,10	0,03	0,45	0,25	0,76	0,94	1,08	0,60	0,81	0,10	0,06	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,29	0,00	0,42	0,24	0,16	0,29	0,60	0,77	0,68	0,68	1,48	0,29	0,14	0,13	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,25	0,23	0,00	0,03	0,04	0,09	0,05	0,17	0,29	0,13	0,36	0,64	0,42	0,24	0,02	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,38	0,00	0,23	0,08	0,44	0,23	0,89	0,46	0,94	0,73	1,49	0,42	0,41	0,37	0,14	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
2,75	0,12	0,01	0,11	0,02	0,02	0,10	0,16	0,12	0,14	0,27	0,57	0,07	0,22	0,04	0,13	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,00	0,12	0,00	0,00	0,01	0,06	0,17	0,17	0,17	0,69	0,48	0,59	0,06	0,26	0,07	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,25	0,29	0,00	0,00	0,00	0,03	0,11	0,19	0,12	0,08	0,30	0,16	0,21	0,21	0,30	0,03	0,04	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
3,50	0,29	0,05	0,11	0,05	0,00	0,01	0,24	0,20	0,53	0,25	0,51	0,23	0,10	0,05	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,75	0,05	0,00	0,00	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,12	0,13	0,05	0,03	0,06	0,14	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	0,20	0,00	0,00	0,01	0,00	0,12	0,02	0,08	0,16	0,19	0,14	0,17	0,10	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,25	0,03	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,02	0,02	0,10	0,00	0,13	0,10	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,50	0,22	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,08	0,07	0,07	0,38	0,00	0,09	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08	0,09	0,00	0,13	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

(b)

SNV 3	Zweite Zustandsaufnahme, drei Jahren später																				
	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00
0,00	0,65	1,35	2,13	0,34	0,28	0,04	0,15	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,89	2,46	3,52	1,10	0,74	0,15	0,13	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,44	1,44	4,73	2,88	2,68	0,72	0,75	0,20	0,12	0,06	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,75	0,30	0,27	1,09	1,88	2,57	1,26	0,82	0,24	0,19	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,44	0,24	0,86	1,05	3,10	2,28	3,18	1,07	0,58	0,13	0,10	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,25	0,16	0,22	0,28	0,30	0,91	1,38	1,94	0,91	0,65	0,32	0,07	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,50	0,55	0,29	0,34	0,26	0,91	1,25	2,59	1,85	1,77	0,74	0,79	0,19	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,75	0,26	0,13	0,19	0,32	0,49	0,32	0,98	0,97	1,25	0,50	0,53	0,11	0,07	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,36	0,12	0,41	0,20	0,35	0,34	0,59	0,61	1,08	0,84	0,80	0,30	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,25	0,13	0,05	0,42	0,18	0,12	0,06	0,20	0,14	0,58	0,45	0,63	0,26	0,15	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,11	0,08	0,25	0,04	0,18	0,09	0,12	0,04	0,16	0,15	0,57	0,25	0,13	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,75	0,05	0,06	0,12	0,04	0,01	0,05	0,04	0,02	0,04	0,11	0,27	0,12	0,19	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,00	0,00	0,05	0,02	0,08	0,04	0,00	0,03	0,00	0,02	0,06	0,06	0,11	0,09	0,01	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,02	0,08	0,00	0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,50	0,00	0,03	0,05	0,06	0,01	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,06	0,00	0,02	0,04	0,05	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
3,75	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,25	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quelle: Richmond et al. (2013); Dunkel bedeutet relativ viel und hell relativ wenig Prozent der Abschnitte. Die einzelnen Zahlen sind bei dieser Betrachtung weniger interessant als die daraus resultierenden Muster, welche auf unterschiedliche Erhaltungsstrategien hindeuten.



### 2.3 Vorläufige Zusammenfassung

Sowohl der durchschnittliche Zustand als auch die jährliche Erneuerungsrate sind vielversprechende Maßzahlen, um die Frage zu beantworten, ob ein Netzwerk ausreichend unterhalten wird. Um jedoch ungewollten Anreizen entgegenzuwirken, sind zusätzliche Maßzahlen empfehlenswert. Davon gibt es viele. Alle diese Maßzahlen haben die Gemeinsamkeit, auf rein physikalischen Quantitäten aufgebaut zu sein. Keine beinhaltet geschätzte finanzielle Angaben. Somit werden ein Hindernis der Vergleichbarkeit und eine große Quelle für Messunsicherheiten umgangen.

## 3. Maßzahlen für die Kosteneffizienz der Unterhaltsausgaben

Bei der Frage der Kosteneffizienz (KE) ist es nicht mehr möglich, auf Finanzdaten und die damit verbundenen Schwierigkeiten zu verzichten. Der Schlüssel zum Erfolg liegt, wie bei den schon vorgestellten Maßzahlen auch, in der Fähigkeit, die Kostenwirkung der lokalen Einflussfaktoren zu kompensieren, damit die Vergleiche als fair – oder zumindest fair genug – angesehen werden können. 100% Fairness ist bei so vielen verschiedenen die Kosten beeinflussenden Faktoren illusorisch. Der Einsatz einer KE-Maßzahl bedarf daher einer Kosten-Nutzen-Überlegung, bei der die Verfügbarkeit und Qualität der Daten eine entscheidende Rolle zu spielen haben. In diesem Sinne wird hier untersucht, inwiefern es in einem spezifischen Kontext möglich ist, eine Maßzahl der Kosteneffizienz aus einem gegebenen Datenstamm zu konstruieren. Die Schlussfolgerung im hier untersuchten spezifischen Fall fiel zwar eher ernüchternd aus, was jedoch nicht heißt, dass sie nicht anders sein könnte, wenn die Datenqualität verbessert werden könnte.

### 3.1 Definition der KE-Maßzahl

Wie eingangs erwähnt, ist der spezifische Kontext dieser Arbeit eine Fallstudie bestehend aus 5 Schweizerischen Kantonen. Einheitlich strukturierte jährliche Ausgaben mit einer Granularität bis zum baulichen Unterhalt der Straßen mit entsprechenden Abgrenzungen gegenüber Kunstbauten, Ausbau, und betrieblichem Unterhalt bildeten die Daten zu den Ausgaben. Die das Netzwerk beschreibenden Daten kamen aus den jeweiligen PMS-Systemen in einer Granularität von maximal 100 m langen Abschnitten. In jedem Fall lagen mehrere Zustandserfassungen vor, die aber nicht gleichzeitig oder in gleichen Intervallen stattfanden. Nicht überall waren Datenbestände über erfolgte Erneuerungsmaßnahmen vorhanden, was eine direkte Bemessung der Wirkung der Erneuerungen verhinderte. Deshalb ist das unten vorgeschlagene Messkonzept auf der netzwerkweiten Zustandsveränderung aufgebaut, was impliziert, dass die Wirkung von Instandsetzungsmaßnahmen mit denjenigen der Erneuerungsmaßnahmen vermischt sind. Anders ausgedrückt, die anfangs angestrebte Fokussierung auf reine Erneuerungsmaßnahmen, lässt sich hier empirisch nicht durchsetzen. Dies ist nicht kritisch sofern die Ausgabendaten ebenfalls entsprechend ausgeweitet werden, was mit dem Begriff des baulichen Unterhalts sowieso teilweise zutrifft.

Die Einflussfaktoren können mit einem Vektor  $\mathbf{z}$  angeschrieben werden. Um zu unterscheiden, wann eine Variable als netzwerkweiter Durchschnittswert zu verstehen ist, wird ein Großbuchstabe  $\mathbf{Z}$  benutzt. Kleine Buchstaben stehen für Variablen, die abschnittsweise variieren. Im Fallbeispiel fehlten zum Teil abschnittsspezifische Daten über die Einflussfaktoren. Insbesondere fehlten diese für die Regressionsanalyse, die in Sektion 3.2.2 beschrieben ist. Deshalb wurde in Übereinstimmung mit dieser Beschränkung eine lineare Form der Kosteneffizienz-Maßzahl (KE) wie in Gleichung 5 gewählt, die die Kosteneinwirkungen der Einflussfaktoren als gebietsweiter Durchschnittswert erlaubt.

$$KE_{i,\bar{t}} = \left( \mathbf{p}^T \bar{\mathbf{Z}} + \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{Z}_{i,\bar{t}} \right) - \frac{TC_{i,\bar{t}}}{\Delta \hat{C}_{i,\bar{t}}} \quad (5)$$

Es gelten dabei folgende Definitionen:

- $TC_{i,\bar{t}}$ : die Gesamtausgaben von SNV  $i$  in der Zeitperiode  $\bar{t}$ , die zwischen zwei Zustandserhebungen bei  $t_1$  und  $t_2$  getätigt wurden
- $\bar{\mathbf{Z}}$ : der Durchschnittswert der Einflussfaktoren über alle teilnehmenden SNVen.
- $\Delta \mathbf{Z}_{i,\bar{t}}$ : die Differenz zum  $\bar{\mathbf{Z}}$  für SNV  $i$
- $\mathbf{p}$ : ein Vektor aus den erwarteten Einheitskosten pro  $m^2$  für jeden Einflussfaktor
- $\Delta \hat{C}_{i,\bar{t}}$ : die Anzahl Einheiten der Zustandsverbesserung in  $\Delta C \times m^2$ ; das Caret (^) bezeichnet eine Schätzung

Der erste Term auf der rechten Seite von Gleichung (5) entspricht einem Vergleichswert für das Kostenniveau pro  $m^2$ , der im jährlichen Durchschnitt für das gesamte Netzwerk von SNV  $i$  erwartet wird. Mit ausreichenden Daten über die geographische Verteilung der Einflussfaktoren kann ein Vergleichswert auch abschnittsweise berechnet werden. Darin können dann interaktive Kosteneffekte berücksichtigt werden, wie zum Beispiel aufwendige Bautypen bei starkem Verkehrsaufkommen und gleichzeitiger Innerortslage. In dem verwendeten Modell wird angenommen, dass die Auswirkungen voneinander unabhängig sind und in einem linearen Zusammenhang stehen.

Es wäre prinzipiell möglich, die Menge an erfolgter Zustandsverbesserung einer Erneuerungsmaßnahme durch eine direkte Messung vor und nach der Maßnahme zu ermitteln. Im Fallbeispiel standen solche Daten jedoch nicht zur Verfügung, und ein anderes Konzept für die Berechnung der Zustandsverbesserung musste gefunden werden. Die gemessene Zustandsveränderung auf Abschnitt  $j$ ,  $C_{j,t2} - C_{j,t1}$ , ist das Nettoergebnis aus zwei Prozessen:

der Erneuerung und das Verfalls. Die gesuchte Bruttozustandsverbesserung ist die netto gemessene Verbesserung unter Einbeziehung des Verfalls. Das heißt, mit der Einrechnung einer geschätzten Verfallsrate, die – wie in einem PMS – die lokalen Einflussfaktoren berücksichtigt, kann von einer gemessenen Nettoverbesserung auf eine Bruttoverbesserung geschlossen werden. Da die Abschnitte, an denen Maßnahmen stattfanden, ebenfalls nicht eindeutig klar waren, musste die Berechnung der Bruttozustandsverbesserung für das ganze Netz berechnet werden.

Wenn die Menge an Zustandsverbesserung auf diese Art berechnet wird, dann beinhaltet das Resultat auch die bewirkte Zustandsverbesserung von Instandsetzungsmaßnahmen zusätzlich zu derjenigen der Erneuerungsmaßnahmen. Dies ist zwar an sich unerwünscht, passt aber erfreulicherweise zu der Kategorie Baulicher Unterhalt, die in den Ausgabendaten verwendet wurde.

Die geschätzte Zustandsverbesserung  $\Delta \hat{C}_{i,t}$  ist deshalb wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{C}_{i,t} &= -1 \sum_j A_{i,j,\bar{i}} \left( (C_{j,t_2} - C_{j,t_1}) - \lambda_{j,\bar{i}}(\mathbf{z}_{j,\bar{i}})(t_2 - t_1) \right) \\ &= -A_{i,\bar{i}}(t_2 - t_1) \sum_j \frac{A_{i,j,\bar{i}}}{A_{i,\bar{i}}} \left( \frac{(C_{j,t_2} - C_{j,t_1})}{(t_2 - t_1)} - \lambda_{j,\bar{i}}(\mathbf{z}_{j,\bar{i}}) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Es gelten folgende Definitionen:

$A_{j,\bar{i}}$ : die Fläche des Abschnitts  $j$

$A_i = \sum_j A_{i,j}$ : die Fläche von SNV  $i$ . Ansonsten wird auf das gemeinsame Anschreiben von  $i$  und  $j$  verzichtet.

$C_{j,t_2}$ : der gemessene Zustand von Abschnitt  $j$  zum Zeitpunkt  $t_2$

$\lambda_{j,\bar{i}}(\mathbf{z}_{j,\bar{i}})$ : die durchschnittliche Verfallsrate (bis zur Erneuerung) als Funktion der Einflussfaktoren

$t_2 - t_1$ : die Länge der Betrachtungsperiode zwischen  $t_1$  und  $t_2$

Die Einheiten an Verbesserung des Zustandes nehmen die Form einer flächengewichteten Summe der Zustandsverbesserungen an. Die geschätzte Zustandsverbesserung auf einem bestimmten Abschnitt besteht aus zwei Elementen, einem gemessenen Unterschied  $C_{j,t_2} - C_{j,t_1}$  und einem erwarteten Verfall  $\lambda_{j,\bar{i}}(\mathbf{z}_{j,\bar{i}})(t_2 - t_1)$ .

Für die Funktion  $\lambda(\mathbf{z})$  eignet sich jede Form der Verfallsfunktionen, die auch in PMS-Systemen eingesetzt werden (siehe beispielsweise Oeser, 2014; Scazziga, 2008; Weninger-Vycudil et al., 2009). Konkret ist  $\lambda$  die durchschnittliche jährliche Verfallsrate bis zu dem Zustandswert, bei dem gemäß der Erhaltungsstrategie die Erneuerungsmaßnahme ausgelöst wird. Im Fallbeispiel wurden in Anlehnung an die VSS NORM 640986 Lebenserwartungen bis zur Erneuerung je nach Straßentyp berechnet. Im Prinzip sind jedoch auch viel komplexere Vorgehen möglich. Weil bei einem Indexverlauf von 0 bis 5<sup>7</sup> die Verbesserung als negative Veränderung herauskommt, wird die ganze Summe in (6) mit -1 multipliziert.

Es wird nicht behauptet, dass diese KE-Maßzahl die einzig mögliche ist oder dass sie bereits optimal wäre, wenn keine Datenbeschränkungen vorliegen. Die Maßzahl kann drei Mechanismen des Einwirkens von Einflussfaktoren widerspiegeln: solche, die über die Fläche wirken; solche, die über die Verfallsrate wirken; und solche, die über die Baukosten pro Meter wirken. Jede dieser Anpassungen kann auf der Granularität einzelner Straßenabschnitte stattfinden. Im Fallbeispiel wurden nur die Flächen und die erwarteten Verfallsraten auf dieser Granularitätsstufe umgesetzt.

Als weiterer Vorteil kann die Möglichkeit angesehen werden, unterschiedliche Periodenlängen zwischen den Zustandsaufnahmen korrekt in die Maßzahl einfließen zu lassen. Der zu erwartende Verfall wird dementsprechend angepasst. Außerdem setzen Vergleiche zwischen SNVen keine Gleichheit in Erneuerungsstrategien oder Budgetsituation voraus. Vergleich wird die auf der Stufe der Ausgaben pro Einheit bewirkte Bruttoverbesserung. Dadurch wird die Abgrenzung gegenüber den Maßzahlen aus Kapitel 2 hervorgehoben. Die KE-Maßzahl gibt nur Auskunft über die Kosteneffizienz des Mitteleinsatzes, nicht aber über deren Höhe. Bei den Maßzahlen für die ausreichende Erhaltung war es umgekehrt.

### 3.2 Empirische Umsetzung der KE-Maßzahl

Die Variablen  $TC$ ,  $A$ ,  $\mathbf{z}$ , und  $C$  sind alle Beobachtungen. Die Verfallsrate  $\lambda$  resultiert aus  $\mathbf{z}$  bei einer angenommenen Verfallsfunktion und festgelegtem Auslösezustand. Nur der Vektor  $\mathbf{p}$  muss empirisch bestimmt werden, um die Maßzahl zu berechnen.

Es ist anzunehmen, dass je nach Anwendungsfall unterschiedliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Im Fallbeispiel wurde neben der Literatur über Performance-Messung (Cook et al., 1993; Deller et al., 1988; Fallah-Fini, Triantis, de la Garza, & Seaver, 2012; Kalb, 2009; Rouse et al., 1997) auch eine Gruppe von Kantonsingenieuren konsultiert und über die wichtigsten Kosteneinflussfaktoren befragt. Neben Faktoren wie Verkehrsaufkommen und Klima, die gemäß der Bauingenieurliteratur mit Verfallsprozessen in Verbindung zu bringen sind, (Bardaka et al., 2014; Khattak et al., 2014; Oeser, 2014; Weninger-Vycudil et al., 2009), gab es Vorschläge, die wenig oder gar nichts mit Verfall zu tun ha-

---

<sup>7</sup> Siehe Fußnote 5

ben, wie Einkommen, „Komplexe Urbane Umgebungen“ oder die Verminderung von Stau bei Baumaßnahmen. Es wurden allerdings auch Einflussfaktoren vorgeschlagen, bei denen eine Kostenrelevanz über mehrere Mechanismen vermutet werden kann, wie z.B. die Kriterien „innerorts“ oder „Steilheit“<sup>8</sup>. Die Einflussfaktoren, die in der Fallstudie zur Anwendung kamen, sind in Tabelle 1 aufgelistet. Es kamen nur solche Faktoren zur Anwendung, für die auch Daten für eine Regression gefunden werden konnten. Bei einer zukünftigen Arbeit wird davon ausgegangen, dass diese Liste erweitert werden kann.

**Tabelle 1: Beschreibende Statistiken der Regressionsvariablen**

Einflussfaktor	Empirische Um-	Einheiten	Durch-	Stand.	Max	Min
	setzung		schnitt	Abw.		
Erneuerungs-	Neubau und Er-	1000 CHF	34.21	25.81	250	3.07
kosten	neuerung / km					
Innerorts Umge-	Wohnfläche / km	ha	9.67	4.11	37.7	2.45
bung						
Komplexe Urbane	Einwohner /	Personen /	39.35	14.81	124	13.5
Umgebung	Wohnfläche	ha				
Lastwagen Ver-	Registrierte	Anzahl	13.48	9.08	77.5	2.27
kehr	Lastwagen / km	/km				
Einkommen	Bundessteuer /	CHF	1144	963	9474	421
	Einwohner					
Steile Umgebung	Durchschnittliche	Grad	5.72	4.94	27.7	0.14
	Geländeneigung					
Geologische	Index der Flächen	(0, 1)	0.029	0.087	0.50	0.00
Schwierigkeiten	mit schwierigen					
	Bodentypen					

Quelle: Richmond et al. (2013)

<sup>8</sup> Als Beispiel: Innerorts. Der Straßenraum wird innerorts mit Leitungen geteilt, welche gelegentlich Eingriffe durch die Straßensubstanz hindurch benötigen, was zur beschleunigten Verfall führen kann (Chow & Troyan, 1999). Andererseits müssen großflächige Arbeiten an Leitungen in der optimalen Planung von Straßenerneuerungen miteinbezogen werden, was zu Verschiebungen des optimalen Zeitpunkts führen kann. Die daraus resultierenden Mehrkosten gegenüber dem optimalen Zeitpunkt gäbe es auch bei einer gleichbleibenden Verfallsrate.

### 3.2.1 Das Schätzen der durchschnittlichen Kostenbeeinflussung durch Einflussfaktoren

Mit entsprechenden Daten könnte man den Einheitskostenvektor  $\mathbf{p}$  als Parameter einer Kostenfunktion schätzen, wobei  $KE_{i,\bar{t}}$  als Teil der Zufallsvariable  $v_{i,\bar{t}}$  auftreten würde und  $TC_{i,\bar{t}}$  zur abhängigen Variable wird.

$$\begin{aligned} TC_{i,\bar{t}} &= \left( \mathbf{p}^T \bar{\mathbf{Z}} + \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{Z}_{i,\bar{t}} \right) \Delta \hat{C}_{i,\bar{t}} - \Delta \hat{C}_{i,\bar{t}} \left( \mathbf{z}_{i,\bar{t}} \right) KE_{i,\bar{t}} + \varepsilon_{i,\bar{t}} \\ &= \left( \mathbf{p}^T \bar{\mathbf{Z}} + \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{Z}_{i,\bar{t}} \right) \Delta \hat{C}_{i,\bar{t}} \left( \mathbf{z}_{i,\bar{t}} \right) + v_{i,\bar{t}} \end{aligned} \quad (7)$$

Top-Down Leistungsvergleiche in der Stochastic Frontier Analysis (SFA) Gattung werden in dieser allgemeinen Form vorgenommen (Farsi, Filippini, & Greene, 2005; Greene, 2005; Kalb, 2009). Dafür standen jedoch in dem Fallbeispiel nur fünf Beobachtungen mit kompletten Datensätzen zur Verfügung und es musste daher auf einen größeren Datensatz ausgewichen werden. Ein weitaus größerer Datensatz von Ausgabendaten wurde für größere Gemeinden gefunden<sup>9</sup>. Hier fehlten jedoch die Netzwerk- und Zustandsdaten, aus denen  $\Delta \hat{C}_{i,\bar{t}}$  berechnet wird.

Um diese Beschränkung zu umgehen, sind zwei vereinfachende Annahmen nötig. Erstens ist aus Gleichung (6) ersichtlich, dass bei einer ausreichend langen Zeitperiode die Unterschiede zwischen der Anfangs- und Endzustandsaufnahme,  $(C_{j,t_2} - C_{j,t_1})$ , eine untergeordnete Rolle gegenüber dem linear ansteigenden erwarteten Gesamtverfall  $\lambda_{j,\bar{t}} \left( \mathbf{z}_{j,\bar{t}} \right) (t_2 - t_1)$  einnimmt. Dies ist umso mehr der Fall, wenn von dem durchschnittlichen Zustand für das Gesamtnetzwerk gesprochen wird und das Netzwerk als Ganzes in einem brauchbaren Zustand gehalten wird. Zweitens wird für die Regression vereinfachend angenommen, dass jede Gemeinde die gleiche durchschnittliche Verfallsrate aufweist<sup>10</sup>.

Gleichung (6) kann nach Anwendung der oben genannten Annahmen wie folgt geschrieben werden

$$\Delta \hat{C}_{i,t} = A_{i,\bar{t}} (t_2 - t_1) \bar{\lambda} \quad (8)$$

Somit kann Gleichung (7) umformuliert werden:

<sup>9</sup> Schweizerische Gemeinden/Städte mit mehr als 5000 Einwohnern

<sup>10</sup> Aufgrund der großen Variation in den geographischen, klimatischen und verkehrsbezogenen Einflussfaktoren in der Schweiz ist diese Annahme vermutlich nicht realistisch, aber - wie oben bereits erwähnt - fehlten für eine empirische Schätzung der unterschiedlichen Verfallsparameter die Netzwerkdaten.

$$\frac{TC_{i,\bar{t}}}{A_{i,\bar{t}}(t_2 - t_1)} = (\mathbf{p}^T \bar{\mathbf{Z}} + \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{Z}_{i,\bar{t}}) \bar{\lambda} + v_{i,\bar{t}} \quad (9)$$

Es muss erwartet werden, dass die Zufallsvariable  $v_{i,\bar{t}} = -\Delta \hat{C}_{i,\bar{t}}(\mathbf{z}_{i,\bar{t}}) KE_{i,\bar{t}} + \varepsilon_{i,\bar{t}}$  wegen des Faktors  $\Delta \hat{C}_{i,\bar{t}}(\mathbf{z}_{i,\bar{t}})$  heteroskedastisch verteilt ist.

### 3.2.2 Beschreibung der Regressionsdaten

Die Daten über die Straßenausgaben der etwa 130 größten Gemeinden der Schweiz werden durch das Schweizerische Bundesamt für Statistik erstellt und durch den Schweizerischen Städteverband (SSV) jährlich publiziert. Drei achtjährige Perioden, anfangend im Jahr 1986, wurden gewählt, um die Problematik der fehlenden Zustandsveränderungsdaten zu reduzieren. Daraus ergaben sich 391 Beobachtungen. Zwei Dummy-Variablen erfassen eine zeitabhängige Veränderung für die Zeitperioden 1994-2001 und 2002-2009. Alle Daten in Schweizer Franken wurden mit dem Verbraucherpreisindex Basis 2010 für Inflation korrigiert.

#### Spezifische Bemerkungen

1. „Ausgaben pro Km\_Jahr“: Der SSV publiziert die Straßenrechnung des BFS für die Kantone, allerdings nicht so detailliert wie das BFS selbst. Es gibt z.B. keine Unterscheidung zwischen Neubau, Verbesserung und baulichem Unterhalt. Diese Ausgaben pro km und Jahr stellen daher die abhängige Variable der Regressionsgleichung dar. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass mit Neubau und Verbesserung korrelierte Einflussfaktoren einen positiven Bias in der geschätzten Wirkung erhalten. Zum Beispiel erscheint es plausibel, dass Einkommen mit Neubau positiv korreliert..
2. „Wohnfläche pro km“: Diese Variable repräsentiert den Anteil von innerorts/außerorts liegenden Straßen in der Gemeinde. Die Variable benutzt das Verhältnis von Hektar Wohngebiet zu Kilometern Straßennetzwerk. Angaben über das Wohngebiet sind durch das Bundesamt für Landestopographie (swisstopo) tabellarisch verfügbar und werden ca. alle 12 Jahre neu erfasst. Die Länge des Straßennetzwerks wird durch den SSV publiziert.
3. „Einwohnerdichte im Wohngebiet“: Unter Verwendung des gleichen Maßes für das Wohngebiet wie oben genannt, wurde die durchschnittliche Bevölkerungsdichte errechnet. Diese Variable soll die Effekte der steigenden Komplexität der Infrastruktur erfassen, die durch eine höhere Bevölkerungsdichte hervorgerufen wird.
4. „LKW pro km“: Da kein direktes Maß für die Ausgesetztheit gegenüber dem Verkehr im Allgemeinen oder Schwerverkehr im Besonderen *auf Netzwerkebene* – weder auf Gemeinde- noch auf Kantonsebene – gefunden werden konnte, wurde diese Näherung benutzt. Es wird der Quotient aus der Anzahl registrierter LKWs durch die Länge des

Straßennetzwerkes dieser Stadt berechnet. Die Daten werden vom SSV publiziert und reichen zurück bis in das Jahr 1980.

5. „Bundessteuer pro EW“: Es wird angenommen, dass einer der Einflussfaktoren auf die Kostenunterschiede die politische Erwartungshaltung über die durchschnittliche Straßenqualität ist und diese positiv mit dem Einkommen der Einwohner korreliert. Die durchschnittliche direkte Bundessteuer pro Kopf dient als Maß für das durchschnittliche Einkommen, da diese Steuer über alle Kantone gleich ist. Gemeindesteuersätze sind nicht überall gleich, weshalb die Bundessteuer pro Kopf nicht mit dem zur Verfügung stehenden Budget gleichzusetzen ist und noch weniger mit dem zur Verfügung stehenden Budget pro Km. Also wird hier etwas anderes als das Budget selbst gemessen. Neben dem Einkommen müsste eine zweite ähnliche Wirkung auf die politische Erwartungshaltung über die durchschnittliche Straßenqualität hinsichtlich der Bevölkerungsdichte bei gleichbleibendem Einkommen vermutet werden<sup>11</sup>. Da die Bevölkerungsdichte bereits als Maß der komplexen urbanen Umgebung in der Regression fungiert, kann vermutet werden, dass diese Variable einen Teil der Effekte der durchschnittlichen Straßenqualität aufnimmt.
6. „Durchschn. Geländeneigung“: Es wurden Zufallsstichproben aus der GeoVITe<sup>12</sup> Datenbank extrahiert. Die dahinterliegenden Daten stammen von swisstopo. Der Wert der Gemeinde ist der Durchschnitt der Stichprobenpunkte.
7. „Geol. Schwierigkeit“: Es wurden Zufallsstichproben aus der GeoVITe Datenbank extrahiert. Die dahinterliegenden Daten stammen von swisstopo. Die 144 Unterkategorieen wurden einem der drei Schwierigkeitsgrade zugeordnet: Schwierig = +1, Durchschnitt = 0, Einfach = -1. Der Wert der Gemeinde ist der Durchschnitt der Stichprobenpunkte.

### 3.2.3 Regressionsgleichung und Parameterwerte

Mit den Variablen in Tabelle 1 wurde Gleichung (10) mit einem gewichteten Kleinst-Quadrat-Schätzer ermittelt, wobei die gesamten Straßenausgaben ohne Normierung nach Kilometern als Gewichtungsvektor verwendet wurden, weil diese am stärksten mit der Streuung der Schätzfehler korrelierten.

$$\begin{aligned}
 \text{Ausgaben pro Km}_{i,\bar{t}} = & \beta_0 + \beta_1 \text{Dummy94}_{i,\bar{t}} + \beta_2 \text{Dummy02}_{i,\bar{t}} \\
 & + \beta_3 \text{Wohnfläche pro km}_{i,\bar{t}} + \beta_4 \text{Einwohnerdichte im Wohngebiet}_{i,\bar{t}} \\
 & + \beta_5 \text{LKW pro Km}_{i,\bar{t}} + \beta_6 \text{Bundessteuer pro EW}_{i,\bar{t}} \\
 & + \beta_7 \text{Durchschn. Geländeneigung}_{i,\bar{t}} + \beta_8 \text{Geol. Schwierigkeit}_{i,\bar{t}} + v_{i,\bar{t}}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

<sup>11</sup> Ein anonymer Gutachter hat auf diesen Effekt hingewiesen.

<sup>12</sup> Quelle: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (Art. Nr. 30 GeoIV): 5704 000 000.



Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Regression. Mit Ausnahme der geologischen Schwierigkeit weisen alle Einflussfaktoren sowohl statistisch als auch numerisch relevante Zusammenhänge zu den Gemeindeausgaben für Straßenneubau und Straßenerneuerung auf, wobei die oben erwähnten statistischen Schwierigkeiten zur Vorsicht mahnen. Die Vorzeichen sind wie erwartet. Die jährlichen durchschnittlichen Ausgaben pro km in 1000 CHF<sub>2010</sub> aus Tabelle 1 liegen bei 34.21<sup>13</sup>. Demgegenüber ist der mittlere Einfluss der Wohnfläche pro km in Tabelle 2 bei 23.74 numerisch bedeutsam und mit einem t-Wert von 6,3 statistisch relativ präzise geschätzt. Der Geländeneigung ist im Durchschnitt weniger bedeutsam, aber erhöht man die Neigung einer durchschnittlichen Straße um eine Standardabweichung (etwa 5 Grad), werden  $5.82/34.21 = 17\%$  mehr Kosten generiert. Eine Umfrage unter den an der Fallstudie beteiligten Kantonsingenieuren ergab erwartete Mehrkosten bei einer „steilen und kurvenreichen Straße“ von 15%, bezogen auf die durchschnittlichen Erneuerungskosten.

---

<sup>13</sup> Um diese Werte auf die Kosten pro m<sup>2</sup> bei einer Massnahme umzurechnen, müssen sie mit der erwarteten Lebensdauer multipliziert und durch die durchschnittlichen Fläche pro km Länge dividiert werden. Bei 8000 m<sup>2</sup> und 25 Jahren sind das ca. CHF 110.- pro m<sup>2</sup>. Bei 7000m<sup>2</sup> und 30 Jahren sind es ca. CHF 150.-.

**Tabelle 2: Regressionsschätzung der Einheitskosten der Einflussfaktoren**

	R	R <sup>2</sup>	korrigiertes R <sup>2</sup>	Standard- schätzfehler		
	0.613	0.3755	0.3625	328.7		
	Variation	Freiheitsgrad	Quadr. Mittel	F	Sig.	
Regresswerte	24893773	8	3111721	28.79	0.000	
Residuen	41385662	383	108056	0	0	
Gesamt	66279435	391	0	0	0	
Variable	Koeff.	Std.Abw.	t-Wert	Signif.- Niveau	Mittl. Einfluss <sup>14</sup>	Std.Abw.- Einfluss <sup>15</sup>
(Konstante)	-8.444	6.503	-1.298	0.195		
Dummy_94_01	-24.439	3.776	-6.473	0.000		
Dummy_02_09	-19.856	3.699	-5.367	0.000		
Wohnfläche pro km	2.455	0.392	6.267	0.000	23.74	10.08
Einwohnerdichte im Wohngebiet	0.455	0.091	4.98	0.000	17.9	6.74
LKW pro km	0.581	0.185	3.138	0.002	7.83	5.28
Bundessteuer pro EW	0.00486	0.001	3.471	0.001	5.57	4.69
Durchschn. Gelän- deneigung	1.178	0.331	3.561	0.000	6.73	5.82
Geol. Schwierigkeit	29.409	17.568	1.674	0.095	0.86	2.55

Quelle: Richmond et al. (2013)

### 3.2.4 Berechnung der KE-Maßzahl für die Kantone

Mit den geschätzten Parameterwerten aus Tabelle 2 lässt sich die KE-Maßzahl gemäß Gleichung (11) berechnen<sup>16</sup>. Der Durchschnitt der teilnehmenden Kantone wurde für  $\mathbf{p}^T \bar{\mathbf{Z}}$

<sup>14</sup> Der Durchschnittswert aus Tabelle multipliziert mit dem geschätzten Parameter.

<sup>15</sup> Die Standardabweichung aus Tabelle multipliziert mit dem geschätzten Parameter.

<sup>16</sup> Die Parameter  $\mathbf{p}$  sind in CHF pro Einheit Zustandsverbesserung pro m<sup>2</sup>. Die geschätzten Parameter  $\beta$  sind in 1000 CHF pro Jahr pro km Länge, unter den drei Annahmen: 6000m<sup>2</sup> Fläche pro km Länge;  $\bar{\lambda} = \frac{1}{T} = \frac{1}{24}$ ; und 3 Einheiten Zustandsverbesserung pro Erneuerungsmaßnahme. Zusammen ergibt dies einen Umrechnungsfaktor von  $\mathbf{p} = \frac{4}{3} \beta$ .

substituiert, damit die Kosteneffizienz einen Durchschnitt von Null hat. Die flächengewichtete Summe  $\Delta\hat{C}_{i,\bar{i}}$  wurde aus den Abschnittsdaten der Teilnehmer an zwei nacheinander folgenden Zustandsaufnahmen berechnet, wie in Gleichung (6) dargestellt.

$$KE_{i,\bar{i}} = \left( \frac{1}{5} \sum_i \frac{TC_{i,\bar{i}}}{\Delta\hat{C}_{i,\bar{i}}} + \mathbf{p}^T \Delta\mathbf{Z}_{i,\bar{i}} \right) - \frac{TC_{i,\bar{i}}}{\Delta\hat{C}_{i,\bar{i}}} \quad (11)$$

Die Resultate dieser Berechnung sind in Tabelle 3 aufgeführt, wobei (a) und (b) die zwei Terme der rechten Seite von (11) sind. Gemäß der  $I_1$  Skala und nach Beobachtungen aus der Fallstudie treten Erneuerungsmaßnahmen selten später als bei Zustand 3,5 ein. Nur etwa 0.3% der Abschnitte wiesen einen schlechteren Zustand auf. Um Anhalt dafür zu geben, wie die Größe der Zahlen in Tabelle 3 zu interpretieren ist, kann man eine durchschnittliche Zustandszunahme bei einer Maßnahme von 3 annehmen. Dann würde der durchschnittlichen Quadratmeterpreis einer Maßnahme CHF 243.- (3 x 81.02) betragen.

**Tabelle 3: Beispiel KE-Maßzahlen für fünf Kantone**

	(a)	(b)	(a)-(b)
	Vergleichswert	Angepasste	KE-
SNV	Ausgaben / $\Delta C$	Ausgaben / $\Delta C$	Maßzahl
1	76.54	116.48	-39.93
2	84.19	66.09	18.10
3	75.88	57.77	18.11
4	73.00	77.77	-4.77
5	95.49	86.99	8.50
$\infty$	81.02	81.02	0.00

Quelle: Richmond et al. (2013)

Gemäß Tabelle 3, Spalte (b) ist SNV 1 etwa 50% teurer im Bewirken von Zustandsverbesserungen als der Durchschnitt – auch nach allen Anpassungen für die Einflussfaktoren. Dieser sehr große Unterschied wird in Tabelle 4 in einzelnen Anpassungsschritten auseinandergenommen. Die jeweilige Standardabweichung gibt Auskunft darüber, ob die Streuung nach dem Anpassungsschritt kleiner wird oder nicht. Da die tatsächliche Kosteneffizienz der SNVen nicht bekannt ist, lässt sich die Maßzahl nur über die Streuung evaluieren, unter der Annahme, dass alle SNVen relativ ähnlich in ihrer Kosteneffizienz sind. Die Indi-

zes sind so konstruiert, daß der Durchschnitt immer bei 100 liegt. Somit können die Standardabweichungen direkt miteinander verglichen werden.

Die Spalte (e) in Tabelle 4 bildet die Ausgangslage und gibt die Ausgaben pro km an, so wie dies in Abbildung 1 gezeigt wird. Berücksichtigt man zunächst nur die unterschiedlichen Flächen (Spalte (e) zu (f)), sinkt die Standardabweichung von 28.3 auf 23.3 markant. Spalte (d) zeigt die unterschiedlichen Mengen an Zustandsverbesserung, die in der Periode bewirkt wurden. SNV 3 sticht mit beinahe dem Doppelten an Zustandsverbesserung im Schnitt pro  $m^2$  heraus. Scheinbar gab es eine Erneuerungskampagne im betrachteten Zeitraum. Wird dieser Mengenunterschied ebenfalls berücksichtigt (Spalte (f) zu (g)), wechselt SNV 3 von ineffizient (116) zu effizient (66). Die Streuung nimmt aber gleichzeitig wieder zu, was zwar unerwünscht ist, aber keinen Beweis dafür liefert, dass diese Anpassung nicht erfolgen sollte. Spalte (h) zeigt die Verhältnisse unter den SNVen bezüglich der relativen Betroffenheit gegenüber den teuer zu erneuernden Straßentypen. SNV 1 hat nicht nur breitere Straßen, die Straßen sind auch vermehrt in einer höheren Verkehrslastklasse (VLK). Rechnet man diesen Unterschied mit ein (Spalte (g) zu (i)), rücken sowohl SNV 1 wie auch 3 zur Mitte und die Streuung fällt erneut. Die letzte Anpassung von Spalte (i) zu (k) berücksichtigt die mit der Regression geschätzten Kosten der Einflussfaktoren. Diese sind in Spalte (j) angegeben. Da  $\mathbf{p}^T \Delta \mathbf{Z}$  zu den Vergleichswertausgaben gehört, wird es von den empirischen Ausgaben subtrahiert. Die Größenordnung dieser Anpassung beträgt im größten Fall fast 17% (107/17.86) und ist somit nicht vernachlässigbar. Wenn dies ebenfalls berücksichtigt wird, wechselt SNV 5 von ineffizient zu effizient.

**Tabelle 4: Einzelne Anpassungsschritte in der Maßzahlberechnung**

	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j) <sup>17</sup>	(k)
	∞	Index: Ausg./	Index: Ausg./	Index: Ausg./	∞	Index: Ausg. /		Index: Ausg. /
SNV	$\Delta C / m^2$	km	m <sup>2</sup>	$\Delta C$	VLK Faktor	$\Delta C$	$\mathbf{p}^T \Delta \mathbf{Z}$	$\Delta C$
1	-0.094	145	137	152	1.07	143	-5.53	149
2	-0.100	72	77	81	1.00	81	3.91	77
3	-0.182	119	116	66	0.95	71	-6.34	77
4	-0.091	73	82	94	0.99	96	-9.90	105
5	-0.086	89	86	104	0.99	107	17.86	89
St. Abw.		28.3	23.3	29.3		25.1		26.7

Quelle: Richmond et al. (2013); Alle Indizes sind gegenüber dem Gruppendurchschnitt als Verhältnis und mal 100 gerechnet

Zusammenfassend sind die diversen Anpassungen zwar numerisch bedeutend, aber insgesamt können sie die Unterschiede zwischen den SNVen nicht erklären oder vermindern. Störend bleibt die Diskrepanz zwischen dem besten und dem schlechtesten Resultat von fast 100% - auch nach allen Anpassungen. Als Erklärung bleibt die Vermutung der fehlenden Vergleichbarkeit in den Grunddaten über Ausgaben<sup>18</sup>, wie dies bereits bei Abbildung 1 gezeigt wurde. Eine Maßzahl für Kosteneffizienz kann nur dann zu überzeugenden Vergleichen führen, wenn bei den Ausgabendaten von allen Teilnehmern in konsistenter Weise zwischen Erneuerungsmaßnahmen, Ausbau, Neubau und betrieblicher Unterhalt unterschieden wird.

Wie in der vorgestellten KE-Maßzahl gezeigt, ist eine Abgrenzung zwischen Erneuerung und Instandsetzung als Ursache der Zustandsverbesserung nicht zwingend nötig, obwohl präzisere Masszahlen konstruierbar wären, falls diese Unterscheidung durch die Daten konsistent nachzuvollziehen wäre. Sofern Zustandsdaten vor und nach den Erneuerungsmaßnahme nicht erhoben worden sind, oder falls die genauen Abschnitte, auf denen die Maßnahmen erfolgten, nicht in den Datensätzen erfasst sind, muss man die Ausgaben für

<sup>17</sup> Die eigentlichen Werte wurden mit dem Faktor 100/81.02 skaliert, um proportional zu den anderen Werten zu bleiben.

<sup>18</sup> Das genaue Buchungsprozedere wurde in der Fallstudie ebenfalls untersucht. Obwohl es nicht möglich war, zu eruieren, um wie viel jeder Teilnehmer im Schnitt voneinander abweichen müsste, ließ sich schematisch zeigen, dass Unterschiede in einer Größenordnung von bis zu 4:1 möglich sind.

Erneuerung und Instandsetzung ohnehin aggregieren. Nur so erhält man die Gesamtausgaben, die zu der Menge an Zustandsverbesserungen passen, die für Gleichung (6) benötigt werden.

#### 4. Schlussfolgerungen

In diesem Bericht wurden Maßzahlen präsentiert, die über die mengenmäßig ausreichende sowie kostenmäßig effiziente Erneuerung Auskunft geben. Ob die Erneuerung ausreichend ist, lässt sich am besten mit physikalischen Quantitäten beantworten, wie zum Beispiel dem durchschnittlichen Zustand oder dem Anteil des Netzwerks, der jedes Jahr erneuert wird. Solche Maßzahlen sind relativ einfach zu berechnen und – im Vergleich zu der Schätzung der Kosten von Maßnahmentypen – unterliegen sie weniger Messunsicherheiten. Diese Unsicherheiten treten unausweichlich in jenen Berechnungen auf, in denen die Frage nach einer ausreichenden Erneuerung in der Form einer Frage nach ausreichenden Ausgaben gestellt wird.

Entscheidet sich die Aufsichtsinstanz für die wiederholte Leistungsbemessung nach einer bestimmten Maßzahl, ist davon auszugehen, daß sich das Verhalten der Beaufsichtigten auf diese Tatsache einstellt. Ist die Maßzahl einseitig – und das ist fast immer der Fall – entsteht ein einseitiges Anreizsystem. Es ist daher ratsam für eine Aufsichtsinstanz möglichst vielseitige Maßzahlen gleichzeitig einzusetzen. Mit diesem Gedanken im Sinne wurde eine Reihe zusätzlicher Maßzahlen vorgestellt, die ebenfalls aus den Daten der Pavement Management Systeme berechnet werden können, um die unerwünschten einseitigen Anreize zu bekämpfen. Diese Maßzahlen liefern auch wichtige Einsichten in die Erneuerungsstrategien und wie sie implementiert werden.

Die vorgeschlagene Maßzahl zur Kosteneffizienz gestaltet sich als eher kompliziert und benötigt auch Daten, bei denen die Messunsicherheit groß ist. Es wurden Methoden gefunden, um die Kosteneinwirkung von einigen wichtigen Einflussfaktoren auszugleichen, obwohl die Datenlage nicht ausreicht, um den Ausgleich in allen Fällen in ausreichender Qualität zu parametrisieren. Entsprechend nüchtern fällt auch ein Rechenbeispiel bezogen auf fünf Schweizerische Kantone aus. Die Größenordnung der Streuung vor und nach vier Anpassungen blieb so hoch, dass der Ineffizienteste doppelt so viel aufwendet wie der Effizienteste, was eher auf Probleme in den Ausgabendaten hindeutet. Dennoch konnte eine theoretisch konsistente Messmethode für die Leistung einer SNV gefunden werden. Im Unterschied zu den auf physischen Daten basierenden Maßzahlen, wird von einem allgemeinen Einsatz der KE-Maßzahl im konkreten Fallbeispiel abgeraten, bis grundlegende Datenprobleme angemessen gelöst werden können.

#### 5. Abstract

Road networks are nearly exclusively managed by public bodies and hence there is a need for comparable measures to determine whether the networks are being maintained suffi-

ciently and efficiently. Generally, both types of measures are missing. The primary cause of that absence is likely to be found in the difficulty of achieving comparability across networks. In this article theoretical and practical methods for achieving comparability are derived and tested on the data from a group of Swiss cantons. The presented measures focus primarily on renewal maintenance. In addition to measures concerning sufficiency and efficiency, a set of further measures is introduced, as this is done in a Balanced Scorecard approach, to combat potential skewed incentives that will likely result from putting too much management attention on single quantitative measures. Collectively, the presented measures should enable a reasonable benchmarking of renewal management activity for road networks.

## 6. Literaturverzeichnis

- Aguiar-Moya, J. P., Prozzi, J. A., & de Fortier Smit, A. (2011), Mechanistic-empirical IRI model accounting for potential bias, *Journal of Transportation Engineering*, 137(5), 297-304.
- Bardaka, E., Labi, S., & Haddock, J. (2014), Using Enhanced Econometric Techniques to Verify the Service Life of Asset Interventions, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2431(1), 16-23.
- Chow, C., & Troyan, V. (1999), Quantifying Damage from Utility Cuts in Asphalt Pavement by Using San Francisco's Pavement Management Data, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1655(-1), 1-7.
- Cook, W. W., Kazakov, A., & Roll, Y. (1993), On the Measurement and Monitoring of Relative Efficiency of Highway Maintenance Patrols. In A. Charnes, W. W. Cooper, A. Y. Lewin & L. M. Seiford (Eds.), *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Application*. London: Kluwer Academic Publishers.
- Deller, S. C., Chicoine, D. L., & Walzer, N. (1988), Economies of Size and Scope in Rural Low-Volume Roads. *The Review of Economics and Statistics*, 70(3), 459-465.
- Der Rechnungshof. (2012), Erhaltungsmaßnahmen bei Autobahnen und Schnellstraßen *Bericht des Rechnungshofes*. Wien.
- Fallah-Fini, S., Triantis, K., de la Garza, J. M., & Seaver, W. L. (2012), Measuring the efficiency of highway maintenance contracting strategies: A bootstrapped non-parametric meta-frontier approach, *European Journal of Operational Research*, 219(1), 134-145.
- Farsi, M., Filippini, M., & Greene, W. (2005), Efficiency Measurement in Network Industries: Application to the Swiss Railway Companies, *Journal of Regulatory Economics*, 28(1), 69-90.

- Greene, W. (2005), Fixed and Random Effects in Stochastic Frontier Models, *Journal of Productivity Analysis*, 23(1), 7-32.
- Gunsteren, E. v., Kieliger, T., Traber, M., Nellen, A., & Zahnd, U. (2005), Abschätzung des durchschnittlichen jährlichen Wertverlustes von kommunalen Strassennetzen (pp. 110): VSS.
- Hinsch, K., Krause, G., Maerschalk, G., & Rübenstein, J. (2005), Kategorisierung von beschreibenden Größen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen, *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* (Vol. 915). Bonn: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau.
- Hong, F., & Prozzi, J. A. (2010), Roughness model accounting for heterogeneity based on in-service pavement performance data, *Journal of Transportation Engineering*, 136(3), 205-213.
- Kalb, A. (2009), What Determines Local Governments' Technical Efficiency? The Case of Road Maintenance, *Discussion Paper* (Vol. 09, pp. 34).
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996), *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*. Boston: Harvard Business School Press.
- Kerr, S. (1975), On the Folly of Rewarding A while Hoping for B., *Academy of Management Journal*, 18(4), 14.
- Khattak, M. J., Nur, M. A., Bhuyan, M. R. U. K., & Gaspard, K. (2014), International roughness index models for HMA overlay treatment of flexible and composite pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 15(4), 334-344.
- Koch, B., & Forster, M. (2010), Zustandsanalyse und Werterhaltung bei den Kantonsstrassen in der Schweiz (pp. 18). Zürich: Infrastruktur Strasse.
- Maerschalk, G. (2014), *Prognose des Erhaltungsbedarfs aller Anlageaggregate der Fernstrasseninfrastruktur*, Paper presented at the Verkehrsökonomik und -politik, Berlin. [http://www.sep-maerschalk.de/cms/files/erhaltungsbedarfsprognose\\_fernstrassen.pdf](http://www.sep-maerschalk.de/cms/files/erhaltungsbedarfsprognose_fernstrassen.pdf), Zugriff am 24.06.2014.
- Mishalani, R. G., & Madanat, S. M. (2002), Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models, *Journal of Infrastructure Systems*, 8(4), 139-148.
- Newbery, D. M. (1988). Road Damage Externalities and Road User Charges, *Econometrica*, 56(2), 295-316.



- Oeser, M. (2014). Entwicklung von Prognosefunktionen für den Straßenzustand kommunaler Straßen, *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* (Vol. 1107). Bonn: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau.
- Ressel, W., Tejkl, K., & Klöpfer, C. (2013). Methodenstudie zur Life-Cycle-Bewertung von Strassenbefestigungen, *Forschung in Strassenbau und Strassenverkehrstechnik* (Vol. 1096). Bonn: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau.
- Richmond, C., Kielhauser, C., & Adey, B. T. (2013). KPI - Key Performance Indicators for Cantonal Road Management (pp. 160). Zurich, Switzerland: Eidgenössischer Technischer Hochschule, IBI.
- Rouse, P., & Putterill, M. (2008). Highway Performance. In D. A. Hensher & K. J. Button (Eds.), *Handbook of Transport Modelling* (pp. 743-759). London: Elsevier.
- Rouse, P., Putterill, M., & Ryan, D. (1997). Towards a General Managerial Framework for Performance Measurement: A Comprehensive Highway Maintenance Application, *Journal of Productivity Analysis*, 8(2), 127-149.
- Santos, J., & Ferreira, A. (2013). Life-cycle cost analysis system for pavement management at project level, *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 71-84.
- Scazziga, I. (2008). Forschungspaket Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement, Forschungsauftrag VSS 2004/712; 1304 Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen; 1304.
- Small, K. A., & Winston, C. (1986). Efficient pricing and investment solutions to highway infrastructure needs, *American Economic Review*, 76(2), 165-169.
- Weninger-Vycudil, Simanek, Rohringer, & Haberl. (2009). Handbuch Pavement Management in Österreich 2009 (Vol. 584). Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.