



Ermöglichung eines realistischen Benchmarkings des baulichen Unterhalts der Kantonsstrassen (BORMAC)

**Permettre une Évaluation Réaliste de la Rénovation des
Routes Cantonales (BORMAC)**

**Enabling Realistic Benchmarking of the Renewal
Maintenance of Cantonal Roads (BORMAC)**

ETHZ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Craig Richmond, PhD Economics
Bryan T. Adey, Prof.Dr.Sc.ETH, M.S. Civil Eng.
Fabian Achilles, M.S. Env.Eng.

**Forschungsprojekt VSS 2014/411 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Mai 2019

1658

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Ermöglichung eines realistischen Benchmarkings des baulichen Unterhalts der Kantonsstrassen (BORMAC)

**Permettre une Évaluation Réaliste de la Rénovation des
Routes Cantonales (BORMAC)**

**Enabling Realistic Benchmarking of the Renewal
Maintenance of Cantonal Roads (BORMAC)**

ETHZ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Craig Richmond, PhD Economics
Bryan T. Adey, Prof.Dr.Sc.ETH, M.S. Civil Eng.
Fabian Achilles, M.S. Env.Eng.

**Forschungsprojekt VSS 2014/411 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Mai 2019

1658

Impressum

Forschungsstelle und Projekt Team

ETHZ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement

Projektleitung

Prof.Dr. Bryan T.Adey

Projektteam

Dr. Craig Richmond
Fabian Achilles

Federführende Fachkommission

Fachkommission 4: Bau- und Geotechnik

Begleitkommission

Präsident

Luzia Seiler, Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittingen

Mitglieder

Dr. Rade Hajdin, Infrastructure Management Consultants GmbH, Zürich
Marc Gindraux, Bundesamt für Statistik, Neuchâtel
Alain Jacot, Tiefbauamt Kanton Zürich
Jean-Christophe Putallaz, Sectionschef Strasseninfrastrukturen - Verkehr, Kanton Wallis
Markus Müller, Strasseninspektorat, Kanton Luzern
Rolf Meier, Kantonsingenieur, Kanton Aargau
Thomas Arn, Lombardi SA, Minusio
Stefan Studer, Kantonsoberingenieur, Kanton Bern
Alfredo, Seriola, Abteilung Strassen, Kanton Uri

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einführung	13
1.1 Projektstruktur und Daten	14
1.2 Übersicht der Berechnung der zu erwartenden Gebrauchsdauer	17
1.3 Definition des Erwartungswertes.....	19
1.4 Auswahl der zu modellierenden Schadensmechanismen	19
1.5 Berücksichtigung der Alterung	19
1.6 Ermüdung durch Verkehrsbelastung	20
2 Modellierung von Spurrinnenbildung und thermischer Rissbildung	21
2.1 Spurrinnenbildung	21
2.1.1 Übersicht	21
2.1.2 Allgemeine Modellform für die Spurrinnenbildung	22
2.1.3 Modell der Rate der Spurrinnenbildung in Abhängigkeit der Belagstemperatur.....	22
2.1.4 Rate der Spurrinnenbildung in Abhängigkeit der kumulierten Lastwechsel	28
2.1.5 Schätzung der Parameter	30
2.1.6 Kombination der Untermodelle.....	31
2.2 Thermische Rissbildung.....	32
2.2.1 Übersicht	32
2.2.2 Modell der thermisch erzeugten Dehnung; Stufe I von Schritt 1	33
2.2.3 Modell des Schadens durch thermisch erzeugte Rissbildung; Stufe II von Schritt 1.....	39
2.2.4 Berechnung des erwarteten Schadens aufgrund des Klimas; Schritt 2	43
2.2.5 Berechnung des Verlaufs des Schadensindex für thermische Rissbildung; Schritt 3 ..	47
2.2.6 Formulierung einer Approximation des Schadensindex mit besseren mathematischen Eigenschaften für eine Weiterverarbeitung; Schritt 4.....	48
3 Zusammenfügen der Einzelschadensindices in einen Gesamtzustandsindex	51
3.1 Empirische Anpassung	51
3.1.2 Bestimmung der Skalierungsparametern η_B und φ_B	53
3.2 Bestimmung der Gewichtungsfaktor ρ	53
3.3 Empirische Anpassung des Modells am I^1	54
3.4 Gesamtzustandsindex.....	58
4 Herleitung der Dimensionierungsfunktion für den Erweichungspunkt beim Einbau; Schritt 5	61
4.1 Lösen nach der «Zeit bis zur Erneuerung»; Schritt 5a.....	61
4.2 Herleitung der Dimensionierungsfunktion $ErwPktNeuOpt()$	62
4.3 Implikation für die Erneuerungskosten.....	64
5 Berechnung der Kostenfaktoren, die über erhöhte Projektkosten wirken	66
5.1 Einführung	66
5.2 Behandlung des Einflussfaktors Verkehr	66
5.3 Behandlung der übrigen Einflussfaktoren auf die Projektmehrkosten	67
6 Typ-A Benchmarks	72
6.1 Benchmark A1: Der «stationäre Zustand» Benchmark	72
6.2 Benchmark A2: Der «veränderte Zustand» Benchmark	75
6.3 Fazit Typ-A Benchmarks.....	79

7	Typ-B Benchmarks	80
7.1	Beispiele.....	80
7.1.1	B1: Welcher Anteil unseres Strassennetzes befindet sich in mittlerem bis gutem bzw. in kritischem bis schlechtem Zustand?	80
7.1.2	B2: Hat sich der Zustand unseres Strassennetzes in den letzten 5 Jahren verbessert / verschlechtert / oder ist er gleichgeblieben?	85
7.1.3	B3: Verfolge ich eine präventive Substanzerhaltungsstrategie (Massnahmen zum richtigen Zeitpunkt) oder eine reaktive Substanzerhaltungsstrategie (Massnahmen, wenn Wertzerfall bereits weit fortgeschritten)?	90
7.1.4	B4: Welcher Anteil unseres Strassennetzes liegt in höherer topografischer Lage (> 700 Meter über Meer)?	94
7.1.5	B5: Welchen Kunstbautenanteil weist unser Strassennetz auf?	95
7.1.6	B6: Wurden genügend Erneuerungsmassnahmen innerhalb der letzten 10 Jahre durchgeführt?	95
7.1.7	B7: Sind die Strassen richtig dimensioniert?	101
7.2	Umsetzungsvorschlag.....	102
8	Schlussfolgerungen	104
9	Danksagung	108
	Anhänge.....	110
	Glossar.....	142
	Literaturverzeichnis.....	144
	Projektabschluss	146
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....	150

Zusammenfassung

Ein quantitatives Modell der Variabilität der zu erwartenden Verfallsrate der Deckschicht von Asphaltbelägen aufgrund klimatischer, humangeographischer, physikalisch-geographischer Faktoren sowie der Verkehrsbelastung wird auf neuartige Weise hergeleitet. Dies führt zum lokal-spezifischen Vorhersagen der Gebrauchsdauer von Asphaltbetonstrassen. Die unterschiedliche Länge der Gebrauchsdauer hat einen starken Einfluss auf die Höhe der Ausgaben für den Erneuerungsunterhalt. Das Modell kann daher für Benchmarks verwendet werden, die sich automatisch an die unterschiedliche Schwere der lokalen Ausprägung von erschwerenden Faktoren anpassen. Das Modell kann nur als Näherung mathematisch hergeleitet werden. Die resultierenden Gleichungen sind in geschlossener Form verfügbar. Die unabhängigen Variablen sind die Verteilungsparameter der jeweiligen Schadensereignisse.

Ein zweites Modell der Erneuerungskosten im Zusammenhang mit verfallsunabhängigen Einflussfaktoren wird geschätzt. Diese beeinflussen die Höhe der Projektkosten aber nicht wie oft ein Projekt ausgeführt werden muss. Kombiniert man die Höhe der Projektkosten mit der Häufigkeit der Projekte, ergibt sich ein Modell der Gesamtausgaben in Form von Preis mal Menge, wobei beide Werte in Abhängigkeit der lokalen Einflussfaktoren zu verstehen sind.

Das Verfallsmodell ist "bottom-up" mechanistisch. Zwei wichtige Schadensmechanismen werden berücksichtigt: Spurrinnenbildung und thermisch induzierte Risse. Die strukturell ausreichende Dimensionierung der Strassen wird vorausgesetzt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die "top-down"-Schädigungsmechanismen zur Bestimmung der Gebrauchsdauer der Deckschicht dominieren. Neu ist die methodische Verwendung von Erwartungswertintegralen zur Übertragung der einzelnen Schadenereignisse auf eine Vorhersage der Geschwindigkeit der aggregierten Schadenszunahme. Letztere hat als empirisches Gegenstück den messbaren Zustand auf realen Strassenabschnitten über die Zeit. Ein Vergleich zwischen dem Modellwert und seinem empirischen Pendant ermöglicht es, die Zuverlässigkeit der Unterschiede zwischen den prognostizierten ortsspezifischen Gebrauchsdauern zu testen.

Ein drittes wichtiges Merkmal der Modellierung ist die Herleitung einer Gleichung für den optimalen Erweichungspunkt des Bitumens in geschlossener Form, wobei "optimal" im Sinne der angenommenen Modellierung zu verstehen ist. Reeller Strassenbau ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Jedoch muss ein Benchmark die optimalen Lösungen berücksichtigen, die der Konstrukteur unter den lokalen Gegebenheiten hätte wählen können. Die Dimensionierungsgleichung erfüllt diese Anforderung.

Die Modellierung wird in zwei empirischen Tests stark bestätigt. Im ersten Test wird mit gemessenen Zustandsänderungen verglichen, somit basiert der Vergleich auf rein physikalisch messbaren Gegebenheiten. Im zweiten Test wird mit den durchschnittlichen Ausgaben für die Erneuerungsunterhalt durch verschiedene Netzbetreiber verglichen. Insbesondere die Kombination beider Tests bestätigt sowohl die zugrunde liegenden mechanischen Modelle als auch die Methoden zur Umwandlung der einzelnen Schadensereignisse in eine Zustandsverlauf-Prognose.

Anhand der modellierten Gebrauchsdauerprognosen werden zwei Effizienz-Benchmarks berechnet und bewertet. Das langfristige Konzept wird als erfolgreich angesehen. Es erreicht eine 50%ige Reduzierung der Varianz in den Beobachtungen. Das zweite Konzept, das auf einer Beziehung zwischen Zustandsverbesserung und Aufwand basiert, wird als nicht erfolgreich angesehen. Es wird argumentiert, dass die Messfehler in beiden Elementen des Vergleichs zusammen zu einem unzuverlässigen Benchmark führen. Würden die Messfehler in Zukunft reduziert, könnte das Konzept der kurzfristigen Effizienz ebenfalls genutzt werden.

Darüber hinaus werden eine Reihe von Benchmarks für diverse spezifische Merkmale der Unterhaltsprozesse vorgestellt. Diese enthalten keine Daten über die Ausgaben und

konzentrieren sich ausschliesslich auf physikalische Grössen. Anhand aktueller Daten werden Beispiele berechnet und deren Anwendbarkeit diskutiert.

Weiterer Forschungsbedarf sowie praktische Anwendungen der erarbeiteten Modellierung liegen im Bereich von Benchmarking, von diversen ökonomischen Problemstellungen wie die Berechnung der vom Schwerverkehr erzeugten Mehrkosten und im Bereich von strassenspezifischen Verfallsprognosen in PMS Systemen. Potentiell möglich erscheint eine Anwendung bezogen direkt auf die Dimensionierung von Strassen in Abhängigkeit des Verkehrs und der klimatischen Belastungen, etwa um den kostenoptimalen Einsatz von Modifizierungen zu berechnen.

Es wird empfohlen, den Vorschlag bezüglich der Kontierung von Strassenunterhaltskosten weiter zu verfolgen, nur so sind Fortschritte bezüglich des kurzfristigen Typ-A Benchmarks möglich.

Es wird empfohlen, dass ein Benchmarking mit den hier untersuchten Konzepten in die Tat umgesetzt wird. Besonders die Typ-B Benchmarks können mit vertretbarer Qualität verlässliche und nützliche Information an die kantonalen Strassenverwaltungen liefern.

Résumé

Un modèle quantitatif de la variation de la vitesse de détérioration attendue due à des facteurs climatiques, humain-géographiques, physico-géographiques ainsi que des charges de trafic est dérivé d'une manière inédite. Cela conduit à des prédictions localement distinctes de la durée de vie utile de la couche d'usure des routes en béton bitumineux. La variation de la durée de vie utile est un facteur clé du coût d'entretien du renouvellement ; par conséquent, les estimations du modèle peuvent être utilisées comme références, qui s'ajustent automatiquement en fonction des paramètres de détérioration d'un réseau donné. Les modèles ne peuvent être résolus mathématiquement qu'à titre d'approximation. Les équations qui en résultent sont des formes analytiques (fermées). Les variables indépendantes sont les paramètres de distribution des événements dommageables. Un deuxième modèle de coût est estimé pour les facteurs non liés à la détérioration qui augmentent les coûts du projet. Avec le modèle de durée de vie utile, on obtient un modèle de prix multiplié par la quantité des dépenses totales calculées pour chaque section de route, le prix et la quantité étant déterminés par les facteurs locaux.

Le modèle de détérioration est mécaniste et suit une approche ascendante. Deux processus clés d'endommagement sont pris en compte : fissure thermique et orniérage.

On suppose une solidité structurelle suffisante pour que ces processus d'endommagement descendants dominent la détermination de la longévité de la couche d'usure. La nouveauté est l'utilisation d'intégrales de valeur attendue pour transférer des événements de dommages individuels dans des prévisions de la quantité prévue des dommages accumulés au cours du temps. Ce dernier est l'équivalent modélisé de la détérioration mesurée empiriquement à partir des données d'inspection sur les routes existantes. La comparaison de l'un à l'autre permet de tester la précision du modèle à prédire la variation des différences observées.

Une troisième caractéristique clé de la modélisation est la dérivation d'une équation de forme analytique (fermée) pour le point de ramollissement optimal du bitume. Cela permet au modèle de détérioration d'inclure une réponse optimale de l'ingénieur concepteur aux conditions locales. Il s'agit d'une caractéristique appropriée pour un modèle utilisé lors d'analyses comparatives.

Le modèle est fortement confirmé par deux tests empiriques indépendants. Le premier concerne la détérioration mesurée et est de nature purement physique, alors que le deuxième concerne les dépenses moyennes du réseau pour l'entretien du renouvellement. En particulier, la combinaison des deux tests soutient à la fois les modèles mécanistes de dommage et les méthodologies utilisées pour calculer les dommages accumulés prévus au cours du temps.

Compte tenu des prévisions de durée de vie utile modélisées, deux concepts de référence en matière d'efficacité sont calculés et évalués. Le concept à long terme est considéré comme un succès. Il permet de réduire la variance observée d'environ 50 %. Le deuxième concept, fondé sur le rapport entre les dépenses et l'amélioration de l'état, est considéré comme un échec. Il est soutenu que les erreurs de mesure dans les deux éléments du ratio, tels que les dépenses et l'état de l'infrastructure, sont actuellement trop importantes pour qu'un ratio soit un point de référence fiable. Il sera peut-être possible à l'avenir de réduire l'ampleur des erreurs afin que cette mesure de l'efficacité puisse être utilisée dans la pratique.

De plus, un ensemble de référence de divers observables spécifiques au processus de gestion de la maintenance est présenté. Cela n'implique pas de données sur les dépenses et prend en considération uniquement les caractéristiques techniques. Des exemples sont calculés et leur viabilité pour la mise en œuvre actuelle est discutée.

Les besoins de recherche supplémentaires ainsi que les applications pratiques se situent dans le domaine du benchmarking, en particulier l'étude des divers problèmes

économiques tels que le calcul des coûts supplémentaires générés par le trafic lourd et la prévision des dégradations spécifiques aux routes dans les systèmes PMS. Une application potentielle semble être directement liée au dimensionnement des routes en fonction du trafic et des importantes variations de température, par exemple pour optimiser les coûts associés aux modifications de la chaussée.

La proposition concernant la répartition des coûts d'entretien routier doit être poursuivie, car c'est le seul moyen de progresser dans les benchmarks de type A à court terme.

Il est recommandé qu'une étude comparative soit réalisée avec les concepts examinés ici. Les benchmarks de type B en particulier peuvent fournir des informations fiables et utiles aux administrations cantonales des routes.

Summary

A quantitative model of the variation in the expected rate of deterioration due to climatic, human-geographic, physical-geographic factors as well as traffic loadings is derived in a novel way. It leads to locally distinct predictions of service-lives of the wear layer of asphalt concrete roads. The variation in service life is a key driver of renewal maintenance cost, therefore the model's estimates can be used to create benchmarks that adjust automatically for differences in a given network's exposures to deterioration enhancing factors. The models can only be solved mathematically as an approximation. The resulting equations are closed form. The independent variables are the distribution parameters of the damaging events.

A second cost model is estimated for non-deterioration related factors that raise project costs. Together with the service life model, one obtains a price times quantity model of total expenditure calculated for each road section whereby both the price and the quantity are determined by the local factors.

The deterioration model is bottom-up mechanistic. Two key damage processes are considered: thermal cracking and rutting. A sufficient structural soundness is assumed so that these top-down damage processes will dominate the determination of the wear layer's service life longevity. Novel is the use of expected value integrals to transfer individual damage events into predictions of the expected amount of accumulated damage over time. The latter is the modelled equivalent to empirically measured deterioration from inspection data on actual roads. Comparing one to the other permits a test of the model's accuracy at predicting the variation of observed differences.

A third key feature of the modelling is the derivation of a closed form equation for the optimal softening point of the bitumen. This allows the deterioration model to include an optimal response by the designing engineer to local conditions. This is an appropriate feature for a model used for benchmarking.

The model is strongly confirmed in two independent empirical tests. The first is against measured deterioration and is purely physical in nature. The second is against average network expenditures on renewal maintenance. Particularly the combination of both tests supports both the mechanistic models of damage and the methodologies used to calculate the expected accumulated damage over time.

Given the modelled service life predictions, two efficiency benchmark concepts are calculated and evaluated. The long-run concept is judged to be successful. It achieves a reduction in the observed variance by roughly 50%. The second concept based on a ratio of spending to condition state improvement is judged to not be successful. It is argued that the measurement errors in the two elements of the ratio, expenditures and condition state, are currently too large for a ratio to be a reliable benchmark. It may be possible in the future to reduce the size of the errors so that this measure of efficiency could be used in practice.

Additionally a set of benchmarks of various specific observables in the maintenance management process are presented. These do not involve expenditure data and only focus on technical attributes. Examples are calculated and their viability for current implementation is discussed.

A need for further research as well as practical applications of the developed models lie in the areas of benchmarking, in diverse economic questions such as marginal cost pricing of heavy vehicles, and in deterioration equations for use in PMS systems. An application for the realistic dimensioning of pavements in dependence on traffic loads and climate conditions may be possible, for example, as a calculation of the cost optimal locations to employ bitumen modification.

It is recommended that the proposal for a systemization of the bookkeeping practice with respect to maintenance expenditures be pursued. This is the only means by which a higher quality level can be achieved for the Type-A benchmarks.

It is further recommended that the investigated Type-B benchmarks be implemented in practice. Here the quality levels are sufficient to provide usefull and reliable information to the cantonal road authorities.

1 Einführung

Benchmarks werden zu verschiedenen Zwecken verwendet, aber das Prinzip dahinter bleibt stets dasselbe, nämlich das Herausfiltern von einer bestimmten Information aus einem gemischtem Signal durch einen Vergleich. Der Benchmark stellt das dar, was auszufiltern ist. Das was übrig bleibt nach dem Vergleich, ob als Differenz oder als Bruch, ist die gesuchte Information. Wieviel mehr oder wieviel weniger als der Benchmark wird eingesetzt, verbraucht, produziert etc.

In einer offenen Marktwirtschaft ist es oft möglich Benchmarks anhand von Konkurrenten zu erstellen. Bedingungen sind oft vergleichbar wie etwa die Preise von Rohmaterialien oder die Qualitätsanforderungen der Konsumenten. Bei den öffentlichen Diensten kann dies auch der Fall sein, zum Beispiel bei Schulen oder Spitälern. Die Strassennetze zusammen mit anderen kommunalen Infrastrukturen bilden natürliche Monopole. Oft haben diese eine grosse geographische Ausdehnung, so dass es keine guten Vergleichsorganisationen gibt, anhand welcher, Benchmarks zu erstellen wären. Die schweizerischen kantonalen Strassennetze erfüllen diese Bedingungen. Fast keine zwei Netze lassen sich finden, die sich nicht in einem der relevanten Merkmale stark voneinander unterscheiden, wie z.B. der Anteil Gebirgigkeit, der Anteil Innerorts, Unterschiede im Verkehrsaufkommen oder in der Bevölkerungsdichte. Genau deshalb sind für solche grossen Netze konstruierte Benchmarks von Nöten, um das zu errechnen, was man ansonsten bei einem vergleichbaren Konkurrenten beobachten könnte. Der vergleichbare Konkurrent fehlt hier.

Diese Arbeit befasst sich ausschliesslich mit einer spezifischen Strassenunterhaltstätigkeit: Die Erneuerung und zwar nur von Asphalt-Beton Belägen. Die Erneuerung wird hier definiert als der Komplet-Ersatz von im Minimum der Deckschicht bis hin zu dem gesamten Strassenkörper. Diese Auswahl ist nicht zufällig. Bei den Erneuerungsarbeiten ist das Mengengerüst zu einem bedeutenden Teil vorgegeben. Man erneuert nur was bereits besteht. Dasselbe ist beim Neubau nichtzutreffend und bei dem betrieblichen Unterhalt ist es zu wenig zutreffend.

Das Mengengerüst der erforderlichen Erneuerungsarbeit wird nicht alleine durch die Grösse des bestehenden Netzes bestimmt. Viele andere Faktoren spielen mit. Es sind genau die Faktoren, die einen direkten Vergleich zwischen zwei Nachbar-Kantonen oft unsinnig macht. Zum Beispiel, Basel-Stadt ist mit Basel-Landschaft kaum vergleichbar, was die durchschnittlichen Belastungen ihrer Strassennetze angeht oder in den qualitativen Unterschieden im durchschnittlichen Ausbaustandard.

Der erste Schritt dieser Forschungsarbeit besteht darin, das Mengengerüst für die erforderlichen Erneuerungsarbeiten unter Berücksichtigung der wichtigsten Umwelt-Faktoren zu berechnen. Hier geht es darum, ob bei gegebenen Umständen und einer nach Norm korrekt gebauten Strasse, es 15 Jahre oder 30 Jahre braucht bis die Strasse einen vorgegebenen Zustand erreicht. Wenn nur 15 Jahre, dann ist im Durchschnitt die doppelte Menge an Erneuerung erforderlich. Dieser Schritt hat als Resultat eine multidimensionale Verhaltensfunktion zur Folge. Die wichtigsten unabhängigen Variablen sind Verkehr, Temperatur und der Tagestemperaturgang. Verschiedene Materialparameter spielen auch eine Rolle wobei nur der Erweichungspunkt des Bitumens als Variable betrachtet wird.

Aber, anders als Klima und Verkehr, ist der Erweichungspunkt des Bitumens eine endogene Variable, weil es in der Kontrolle der Strasseneigener liegt. Dasselbe gilt für die Dimensionierung der Strasse im Allgemeinen. Es wäre unsinnig Strassen als Benchmark zu nehmen, die nicht gemäss den lokalen Verhältnissen optimal konstruiert wurden. Für die erforderliche Dimensionierung des Strassenkörpers wurden die geltenden Schweizer Normen angewendet. Es wurde angenommen, dass die Normen für einen ausreichenden strukturellen Unterbau sorgen, so dass Ermüdungsrisse von unten keinen begrenzenden Einfluss auf die Gebrauchsdauer der Strassen haben. Für den Erweichungspunkt haben wir einen anderen Vorgang gewählt.

Die Deckschicht des Belags ist der äusseren Belastungen am meisten ausgesetzt. In die Schweiz gibt es auch sehr grosse Unterschiede in den relativen Stärken dieser Belastungen. Alpine Strassen sind grossen Temperaturschwankungen bei sehr kalten Temperaturen wesentlich stärker ausgesetzt als Strassen entlang der grossen Seen, die die Schwankungen stark eindämmen. Umgekehrt sind städtische Strassen in den Niederungen wie Basel, Genf oder Lugano der spurrinnen Bildung wesentlich stärker ausgesetzt. Und es gibt Orte, wie die viel befahrenen Passstrassen, die beiden Schädigungsprozessen ausgesetzt sind. Mit der Auswahl des Erweichungspunktes kann der Strasseneigner die Stärke der Einwirkung dieser Schädigungsprozesse beeinflussen, aber nur im Sinne einer optimalen Bilanz. Was gegen Spurrinnenbildung gut ist, ist gegen Kälterisse schlecht und umgekehrt.

Wir haben in dieser Forschung einen Weg gesucht, um den Erweichungspunkt zu berechnen, der zur optimalen Bilanz zwischen den beiden erwähnten Schädigungsprozessen führt. Somit wird die längst mögliche Gebrauchsdauer erreicht. Dieser gilt dann als Benchmark. Aufgrund der enormen Datenmenge, die die Kantone dieser Forschung zur Verfügung stellten, war es auch möglich diese Berechnungen empirisch anzupassen und zu bestätigen. Als Resultat dieses Modells entsteht eine Schätzung der durchschnittlichen jährlichen erforderlichen Erneuerungsmenge in Prozent der bestehenden Fläche. In Prinzip ist diese Schätzung für jeden Quadratmeter berechenbar. Praktisch ist man aber durch den Auflösungsgrad der Daten beschränkt. Eine Differenzierung nach hundert Meter ist dennoch für einzelne Merkmale machbar.

Die zweite Aufgabe ist das Schätzen von Mehr- oder Minderkosten, die sich aus Einflussfaktoren ergeben, die keinen Einfluss auf die Menge der zu erneuernden Quadratmeter haben, die aber auf die Kosten pro erneuerte Quadratmeter einen Einfluss ausüben. Beispiel hierfür ist die Entwässerung bei Innerortsstrassen oder Projektmehrkosten unter engen städtischen Verhältnissen. In diesem Arbeitsschritt wird ein Regressionsverfahren eingesetzt, um Kostenfaktoren für die Einflussfaktoren zu berechnen. Der gesamte Benchmark für die Erneuerungsarbeiten ergibt sich als Produkt zwischen Quadratmeter und Quadratmeterkosten.

Es wird in dieser Arbeit zwischen zwei allgemeinen Typen von Benchmarks unterschieden. Typ-A bezeichnet Benchmarks, die einen Aspekt der ökonomischen Effizienz als Gegenstand hat. Typ-B bezeichnet solche, die sonst einen relevanten Aspekt der Leistungserbringung als Gegenstand haben. Der grösste Teil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit Typ-A Benchmarks, weil diese Benchmarks besonders anspruchsvoll zu berechnen sind. Von Typ-A werden zwei konkrete Benchmarks vorgelegt. Einer befasst sich mit einer langfristigen Kosteneffizienz. Der Andere befasst sich mit der meist kurzen Frist zwischen zwei Zustandserhebungen.

Von dem Typ-B Benchmark werden sieben Konzepte vorgelegt. Diese wurden im Zusammenarbeit mit den Kantonen und unserer Begleitgruppe ausgearbeitet und ausgewählt. Typ-B Benchmarks lassen sich zu vielen Themen und in vielen Varianten erstellen. Sie lassen sich auch über die Zeit leicht an neuen Bedürfnissen anpassen. Somit sind die hier vorgestellten Typ-B Benchmarks als Beispiel zu verstehen.

1.1 Projektstruktur und Daten

Zusammensetzung der Begleitkommission

Dieses Forschungsprojekt wurde als breite Kooperation zwischen den Kantonen, dem BFS, Experten aus Ingenieurbüros und der Forschungsstelle ausgeführt. Das ASTRA war in Form der BK Präsidentin, Frau Luzia Seiler, personell beteiligt. Nicht weniger als 6 Kantone beteiligten sich an der Begleitkommission. Die vielen Diskussionen und Anmerkungen unter den Teilnehmern trugen viel zu dem Endresultat bei.

Vorstudie

BORMAC basierte auf einer Vorstudie, «KPI - Key Performance Indicators for Cantonal Road Management» (Craig Richmond, Kielhauser, & Adey, 2013). Diese wurde zusammen mit fünf Kantonen ausgeführt. Untersucht wurden die Datenverfügbarkeit und die möglichen Benchmarks die darauf basierend berechnet werden konnten. Über den Untersuchungsbericht wurde vereinbart, dass er nicht publiziert wird. Resultate durften aber in anonymer Form publiziert werden (Craig Richmond, Kielhauser, & Adey, 2015, 2016). Aufgrund dieser Resultate konnte die zweite Studie, BORMAC, gezielter definiert werden. Besonders zwei Problemstellungen standen im Vordergrund.

Bedarf für ein Verfallsmodell

Die erste war das Fehlen eines Verfallsmodells in der Literatur, das die Grösse der Vor- und Nachteile von diversen Einflussfaktoren, inklusive ihrer Interaktionen, quantitativ berechnen lässt. Aber genau das war Voraussetzung, um ein vergleichbares Mass der ökonomischen Effizienz aufzustellen. In der Vorstudie war ein solches Mass mathematisch hergeleitet worden, aber empirisch nur sehr limitiert ausgeführt, da eben das benötigte Verfallsmodell fehlte. Einen Lösungsweg für dieses zentrale Problem zu finden, beansprucht den grössten Teil dieser Forschung. Der Lösungsweg konnte erst im Verlauf der Forschung gefunden werden. Ein bestehendes Modell für die rechnerische Dimensionierung von Asphaltbelägen konnte im Erwartungswert approximativ, dafür als geschlossene Gleichung gelöst werden. Abschnitte 2, 3, und 4 befassen sich mit diesem Lösungsweg.

Fehlende Vergleichbarkeit der Daten über die Unterhaltsausgaben

Die zweite Problemstellung, die im KPI-Projekt identifiziert wurde, betrifft die fehlende Vergleichbarkeit zwischen den Kantonen in einem Schlüsseldatensatz. Dies sind die Daten über die jährlichen Ausgaben für Unterhaltsarbeiten an den Strassen. Das Bundesamt für Statistik (BFS) erstellt diese Daten aufgrund der kantonalen Finanzdaten, die ihrerseits eine Aggregation von einzelnen Ausgaben darstellt. In der KPI-Studie wurde unter den Teilnehmern festgestellt, dass sich auf einer detaillierten operativen Ebene die Zuordnungen an Buchungskonten derart voneinander unterscheiden, dass Differenzen bis zu einem Verhältnis von 4:1 resultieren können. Integriert in das BORMAC Projekt war deshalb ein Arbeitspaket für die Ausarbeitung einer Gruppe von Ausführungsregeln, die die Zuordnung von Projektausgaben an Konten für die Strassenrechnung vereinheitlichen sollen.

Die Beteiligung des BFS war deshalb besonders wichtig, um diese Ausführungsregeln zu definieren. Neben zwei Mitarbeitern des BFS nahmen drei Vertreter der Kantone an einer Konsultationssitzung, mit der Zielsetzung eine in der Praxis umsetzbare Regelung zu finden, teil. Die Forschungsstelle erstellte aus den Beiträgen einen Vorschlag für eine mögliche VSS Norm. Diese wurde bei den Begleitgruppen Kantone und dem BFS in die Vernehmlassung gegeben. Sowohl der Vorschlag wie auch die Vernehmlassungsantworten können im Anhang 1 eingesehen werden. Ob eine Norm tatsächlich angestrebt wird, obliegt dem VSS.

Daten der Kantone

20 Kantone erklärten sich bereit, ihre Daten für das Projekt zu Verfügung zu stellen. Es wurde vereinbart, dass die einzelnen Resultate der Kantone aus diesen Daten nur anonymisiert ausgegeben werden. Da diese Forschung nicht ein Benchmarking selbst ist, sondern eine Untersuchung wie aus den vorhandenen Daten möglichst informative Benchmarks konstruiert werden können. Ist es auch nicht von zentraler Bedeutung, welcher Kanton zu welchen Wert gehört. Die 20 Kantone sind in Tabelle 1 zu sehen.

Die Datenübergabe erfolgte aus den zwei PMS Systemen TRASSEE und LOGO zentral mit jeweils nur einer Datenstruktur. Die anderen 6 hatten jeweils Einzellösungen für die ein spezielles Dateninterface gebaut werden musste.

Die folgenden Dateninhalte wurden angefragt

1. Strassen- und Abschnittsdefinitionen; Längen und Breiten, Landeskoordinaten
2. Zustandsaufnahmen
3. Belagsaufbau, Belagsalter, Verkehrslastklasse
4. Innerorts /Ausserorts, Signalisiertes Tempo
5. Durchschnittlicher Tagesverkehr (DTV)

Über das Vorhandensein der einzelnen Datenelementen wird im Abschnitt 7 detailliert berichtet. Die teilnehmenden Kantone beinhalten 88% der gesamtschweizerischen Kantonsstrassen mit insgesamt 15'793 km. Einzig das Engadin hätte noch eine bedeutende klimatische Zone zu den Daten beigetragen.

Was diesen Datensatz einmalig und besonders nützlich macht sind zwei Qualitäten. Erstens: Sie entstehen in einem geographisch kleinen Raum, bei dem von einem kompetitiven Markt für viele Faktoren ausgegangen werden kann und dazu besteht eine einheitliche technische Normierung. Diese einheitlichen Umstände reduzieren die Anzahl Parameter, die berücksichtigt werden müssen. Zweitens gibt es aber auf diesem kleinen Raum eine recht grosse Vielfalt an Kombinationen von klimatischen, humangeographischen und physisch-geographischen Umständen. Erst die Variation in den zu erklärenden abhängigen Variablen, hier die Verfallsraten, erlaubt eine starke statistische Aussage. Bei der grossen Vielfalt an verfallsbestimmenden Faktoren, bekommt das Modell viel Variation zu erklären. Das ist ein grosses Glück für diese Forschung.

Tabelle 1 Teilnehmende Kantone

Kanton	Km Länge	Datenbank-Gruppe
Freiburg	640	Trassee
Jura	443	Trassee
Neuenburg	478	Trassee
Nidwalden	74	Trassee
Tessin	1'050	Trassee
Uri	152	Trassee
Waadt	2'123	Trassee
Wallis	2'020	Trassee
Basel-Landschaft	472	Andere
Basel-Stadt	305	Andere
Obwalden	80	Andere
Schaffhausen	222	Andere
Schwyz	209	Andere
St Gallen	680	Andere
Aargau	1'154	Logo
Bern	2'094	Logo
Luzern	521	Logo
Solothurn	612	Logo
Thurgau	798	Logo
Zürich	1'666	Logo
Total	15'793	

1.2 Übersicht der Berechnung der zu erwartenden Gebrauchsdauer

Die hier präsentierte Modellierung der Gebrauchsdauer ermittelt eine zu erwartende Gebrauchsdauer einer Deckschicht je nach Erweichungspunkt des Bindemittels sowie nach der Belastung durch Verkehr und Klima. Die Modellierung ist einer mechanistisch-empirischen Strassendimensionierungsprozedur ähnlich. Vergleiche dazu: Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen unter Berücksichtigung stündlicher Beanspruchungszustände (Walther, 2014). Die Dimensionierung wird aber nur bezüglich der Wahl des Erweichungspunktes beim Einbau berücksichtigt. Prinzipiell wäre es möglich mit dem gleichen Modellansatz andere Dimensionierungsparameter zu bestimmen. Die dafür benötigten experimentellen Ergebnisse konnten im Rahmen dieses Projekts nicht gefunden beziehungsweise ausgeführt werden.

«Gebrauchsdauer» wird in diesem Modellierungsansatz als die Zeit zwischen zwei nacheinander folgenden Totalersatzes des Deckbelags definiert. Ob die darunterliegenden Schichten auch ersetzt werden, wird nicht behandelt. Es wird stets davon ausgegangen, dass die darunterliegenden Schichten ausreichend dimensioniert sind. Da aber die Modelle skalenmässig an den durchschnittlichen Verlauf der empirischen Zustandsindizes angepasst werden, kann hier nicht von einer systematischen Überschätzung der Gebrauchsdauer gesprochen werden.

Zwei Schadensmechanismen werden modelliert, die thermisch erzeugten Risse und die Spurrinnenbildung. Der Erweichungspunkt beeinflusst die Empfindlichkeit des Belages gegenüber diesen zwei Prozessen und zwar in umgekehrtem Sinne. Ein weicher Belag bildet schneller Spurrinnen und langsamer Kälterisse. Es soll durch das Modell ermittelt werden, welchen Erweichungspunkt unter den gegebenen Umständen zu der längsten Gebrauchsdauer führt. Somit wird eigentlich für jeden Strassenabschnitt eine eigene «Benchmark-Gebrauchsdauer» berechnet je nachdem, welche Mischung aus Verkehrs- oder Klimabelastung vorliegt. So fliessen lokale Erschwernisfaktoren in die Berechnungen hinein.

Da es hier um ein Benchmarking geht und nicht um konkrete Strassenabschnitte, wird hier oft von statistischen Erwartungswerten ausgegangen. Aus einer berechneten Gebrauchsdauer lässt sich so die zu erwartenden *durchschnittlichen* jährlichen Erneuerungskosten jedes Quadratmeter gemäss (1) berechnen.

$$ErwErneuerungskostenJahrM2 = \left(\frac{1}{Gebrauchsdauer} \right) ErneuerungskostenM2 \quad (1)$$

Die Kosten pro Quadratmeter werden je nach Verkehrslastklasse proportional zur Belagsstärke gemäss VSS Norm 640324a Oberbautyp 2 angepasst. Dazu werden Aufpreise oder Minderpreise pro Quadratmeter berechnet, je nach örtlichen Faktoren, wie Innerorts, Steigung oder Bevölkerungsdichte.

Die Berechnung der zu erwartenden Gebrauchsdauer erfolgt in mehreren Schritten. Abbildung 1 gibt darüber eine Übersicht. Die einzelnen Schritte sind in Tabelle 2 kurz beschrieben.

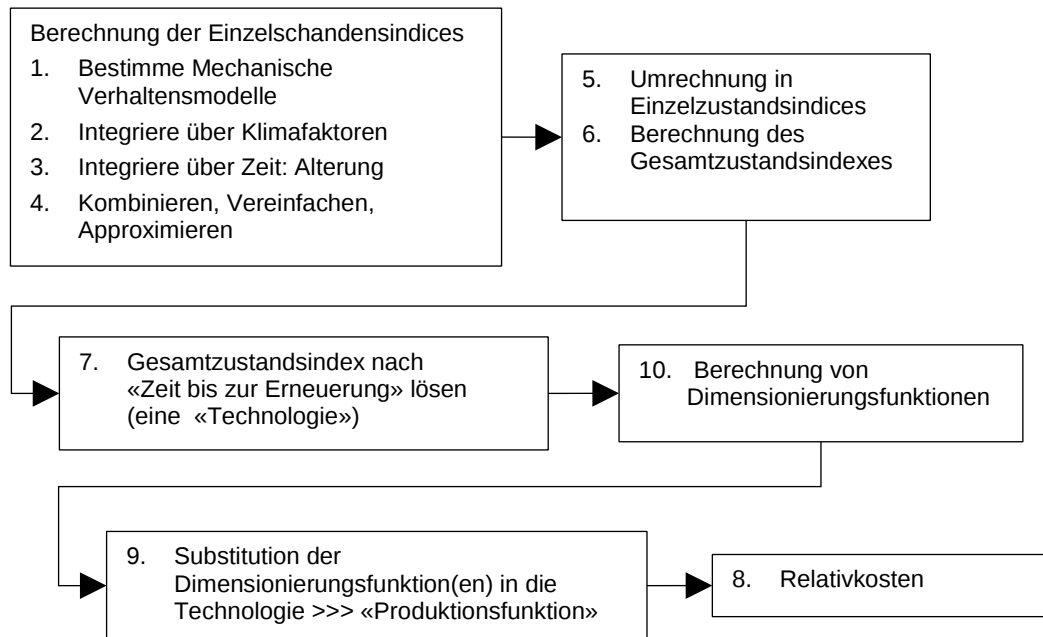


Abbildung 1 Gesamtmodell Übersicht

Tabelle 2 Modellübersicht in Schritten

Schritt	Beschreibung
1	Für jeden Schadensmechanismus wird ein mechanisches Einzelschadensmodell erstellt. Einzelschäden entstehen entweder bei einem Lastwechsel oder bei einem täglichen Abkühlungszyklus.
2	Ein Einzelschadensmodell wird mit einer Zufallsverteilung des Schadensereignisses kombiniert, um einen statistischen Erwartungswert des Einzelschadens als Integral zu berechnen. Schritt 2 wird bei allen Zufallsvariablen wiederholt.
3	Die Zunahme des Schadens über die Zeit unter Berücksichtigung der Alterung wird berechnet. Der Belag wird härter, was eine Verschiebung der Empfindlichkeit zwischen den Schadensmechanismen bewirkt.
4	Je nach dem werden die Ergebnissen aus Schritt 3 kombiniert, vereinfacht oder approximiert. Letztendlich erhält man eine analytische Funktion, die den zunehmenden Gesamtschaden in Abhängigkeit der diversen Verteilungsparameter beschreibt. Die abhängige Variable dieser Funktion lässt sich bspw. als der "Schadensindex" für Spurrinnen ausdrücken.
5	Die Einzelindizes werden Skalenmässig an einer I0 respektive I3 angepasst.
6	Ein Gesamtzustandsindex wird aus den Einzelzustandsindizes als gewichtete Summe berechnet. Das Vorgehen ist analog der Berechnung des I1-Indexes aus den Matrixwerten (VSS, 2003).
7	Der Gesamtzustandsindex wird nach Zeit «gelöst» um eine Funktion der «Zeit bis zur Erneuerung» zu erhalten. Der «Auslöse-Zustand», bei dem erneuert wird, wird nun zur unabhängigen Variablen. Die Zeit ist die abhängige Variable.
8	Eine Funktion wird berechnet, die für jede Kombination von Faktoren (Klima, Verkehr, etc.) den Erweichungspunkt berechnet, der zu der längsten Dienstzeit führt. Dies wird als «Dimensionierungsfunktion» bezeichnet.
9	Die Dimensionierungsfunktion wird anstelle des Erweichungspunkts in der «Zeit bis zur Erneuerung» Funktion eingesetzt. Nach dem Einwechseln beinhaltet die Formel aus Schritt 4 nun keine Dimensionierungsparameter mehr. Mit der Bezeichnung «Produktionsfunktion» wird diese Unterscheidung angedeutet.
10	Die relativen Vorteile/Nachteile für jeden Quadratmeter unter Berücksichtigung einer optimalen Entscheidung bezüglich Erweichungspunkt kann nun gerechnet werden.

Zu betonen ist, dass hier keine Empfehlungen abgegeben werden, wie eine Strasse tatsächlich zu dimensionieren ist. Das Modell spiegelt lediglich die Möglichkeit wider eine Strasse je nach Belastungslage anders zu dimensionieren und somit eine längere Gebrauchsdauer zu erzielen. Die durchschnittlich zu erwartende Gebrauchsdauer lässt sich höchstens approximativ vorhersagen. Faktoren, die keine massgebliche Rolle spielen, werden vernachlässigt. Da die zu berechnenden Benchmarks im Schnitt über eine Kantonsfläche berechnet werden, lassen sich Unterschätzungen an einem Ort mit Überschätzungen an anderen Orten kompensieren. Der Durchschnittswert soll als

Annäherung zur Realität übereinstimmen. Diese begrenzte Zielsetzung begründet die Bevorzugung mathematischer Durchführbarkeit über mathematischer Exaktheit und Schlüsselprozessen über Nebenprozessen. Ohne diese Zugeständnisse ist die Problemstellung nicht lösbar.

1.3 Definition des Erwartungswertes

Der Erwartungswert wird schematisch definiert als:

$$\int f(x) \cdot p(x) dx \quad (2)$$

wobei x das Schadensereignis, $f(x)$ der bewirkte Schaden und $p(x)$ die Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadensereignisses sind.

1.4 Auswahl der zu modellierenden Schadensmechanismen

Die folgenden Schadensmechanismen werden in der Gebrauchsdauer-Berechnung berücksichtigt:

- Alterung
- Spurrinnenbildung
- Thermische Rissbildung

Ein vierter Schadensmechanismus,

- Ermüdungsrisse von unten infolge Verkehrsbelastung

wird in den Kostenschätzungen berücksichtigt. Eine Begründung erfolgt in Abschnitt 1.6.

Diese Auswahl an Schadenmechanismen entspricht den Performance-Modellen zweier internationaler Prozeduren für die Dimensionierung von Asphaltbelägen: HDM-4 und M-EPG (AASHTO, 2015; Huang, 2004; Jorge & Ferreira, 2012). Siehe Vergleichsweise C. Richmond, Achilles, and Adey (2018)

Zudem wurde Regen als weiterer Schadenmechanismus vorgeschlagen. Doch weder Walther (2015) noch Huang, Y. (2004) berücksichtigen diesen Schadenmechanismus, obwohl Khattak, Nur, Bhuyan, and Gaspard (2014) belegen, dass ein empirischer Zusammenhang zwischen der jährlichen Regenmenge und den Verfallsraten besteht. Bekannt ist die Verminderung der Stabilität des Untergrunds bei schlechter Entwässerung bzw. Frostschäden durch Eindringen von Wasser in den Asphalt. Dennoch wurde in der Literatur kein explizites Modell dieses Schadensmechanismus angegeben.

Im weiteren Verlauf werden die oben aufgelisteten Schritte für Spurrinnenbildung und thermische Rissbildung detailliert erläutert. Bei der Spurrinnenbildung wird ein eigenständiges Modell aufgrund von Versuchsdaten erstellt. Bei den thermisch induzierten Rissen folgen wir einem Modellierungsansatz des Instituts für Strassenwesen der TU Braunschweig (Walther, 2014).

1.5 Berücksichtigung der Alterung

Die Alterung wird hier nicht als eigenständiger Schadensmechanismus angesehen, sondern als eine zeitliche Verschiebung des Erweichungspunktes (Verhärtung des Bitumens), was die anderen Schadensmechanismen beeinflusst. Die Alterung wird mit einer linearen Verschiebung des Erweichungspunktes um 0.25 Grad Celsius pro Jahr modelliert. Dies entspricht grössenmässig den empirischen Werten aus Mirza and Witczak (1995). Somit wird über die Zeit die Anfälligkeit bzgl. der thermischen Rissbildung erhöht und die Anfälligkeit bzgl. Spurrinnenbildung reduziert.

1.6 Ermüdung durch Verkehrsbelastung

Wie im Folgenden erklärt, ist es nicht nötig Ermüdungsrisse von unten als mitbestimmend für die erwartete Gebrauchsdauer zu modellieren. Dies bedeutet nicht, dass der Faktor Verkehrsbelastung über dem Schadensmechanismus Ermüdungsrisse von unten in keiner Weise kostenbestimmend ist. Der Wirkungsmechanismus geht nur nicht über die Gebrauchsdauer. Die Baustärke wird so gewählt, dass es die für die Gebrauchsdauer benötigten Lastwechseln aushält. Mehr Verkehr bedeutet eine grössere Baustärke was zu höheren Kosten führt. Insofern folgt die Modellierung dem in VSS Norm 6409324a (VSS, 1997) beschriebenen Vorgehen.

Ermüdungsrisse bilden sich zuerst an der Unterseite des Asphalts und arbeiten sich langsam durch wiederholte Lastzyklen nach oben. Dieser Schadensprozess wird in der AASHTO-Design-Gleichung abgebildet (AASHTO, 1993), auf welche sich die Schweizer Norm 640324 bezieht. Darin ist ersichtlich, dass die Fähigkeit die Verkehrslast aufzunehmen mit der 9. Potenz der Belagsstärke steigt [siehe (AASHTO, 1993) Seite 1-5]. Demgegenüber steigen die Einbaukosten nur mit der 1. Potenz der Belagsstärke: Das Materialvolumen steigt pro Flächeneinheit linear an. Um diesen 9-fachen Unterschied zwischen Marginalnutzen und Marginalkosten auszugleichen, müssen bei einem Diskontsatz von 3% ganze 75 Jahren vergehen $[(1.03)^{75} = 9.17]$. Es lässt sich zeigen, z.B. in McDonald and Madanat (2012), dass bei realistischen realen Diskontsätzen um 2%, Belagsstärken für den ganzen Strassenkörper Kosten-Nutzen mässig optimal sind, die zu einer Gebrauchsdauer von über 100 Jahren führen.

Aber, für Deck- bzw. Tragschichten werden, je nach Verkehrsbelastung, Perioden zwischen 15 und 35 Jahren von Strasseningenieuren in der Schweiz erwähnt. Es ist deshalb sicher ökonomisch sub-optimal die Gebrauchsdauer von Strassen durch Ermüdungsrisse auf weniger Jahren limitieren zu lassen, falls man der AASHTO-Design-Gleichung Glauben schenkt. Gespräche mit kantonalen Erneuerungsverantwortlichen haben diese Einsicht bestätigt: Man sehe in der Praxis kaum noch Schadensbilder mit Rissbildung von unten. Selbstverständlich gilt dies nur, wenn die Strasse ursprünglich stark genug gebaut wurde.

Daraus folgt, dass eine detailliertere Modellierung dieses Schadenmechanismus als Gebrauchsdauer für unsere Zwecke unnötig ist. Diesem Schadensmechanismus kann durch den Einbau eines genügend dicken Belags kostenoptimal begegnet werden. Daraus lässt sich aber nicht schliessen, dass Ermüdungsrisse von unten als kostenwirksamer Schädigungsprozess in diesem Modell nicht auftreten. Im Gegenteil, je grösser die Verkehrslastklasse, je stärker muss das Belag sein. Diese Wirkung lässt sich mit multiplikativen Faktoren nach Verkehrslastklasse abbilden.

2 Modellierung von Spurrinnenbildung und thermischer Rissbildung

2.1 Spurrinnenbildung

2.1.1 Übersicht

Das Modell wird anhand von Daten aus einem kürzlich ausgeführten Experiment geschätzt. Über das Experiment wurde im VSS Forschungsbericht 1545 und 1558 berichtet (Arraigada, Treuholz, & Partl, 2014a, 2014b). Die Dimensionierung der genormten T2, T3 und T4 Belagsaufbauten wurde unter realistischen klimatischen Verhältnissen im Schweizerischen Mittelland getestet. Das Ziel war herauszufinden, ob bezüglich der Spurrinnenbildung die geltenden Normen das halten, was sie versprechen. Eine Maschine, die Grossversuchsanlage MLS10, simulierte die Wirkung einer grossen Anzahl Lastwechsel auf mehreren im Freien stehenden und speziell für den Versuch erbauten Testbelägen. Temperaturen, Lastwechsel und Spurrinnentiefen wurden kontinuierlich gemessen. Daraus ergab sich ein Datensatz, aus dem die Rate der Spurrinnenbildung in Abhängigkeit der Belagstemperatur und der kumulierten Lastwechsel geschätzt werden konnte. Die Autoren erlaubten grosszügiger Weise eine Benutzung ihrer Daten für BORMAC.

Die Berechnung eines eigenen Modells aufgrund von Versuchsdaten wurde einer Berechnung mit bestehenden mechanischen Modellen der Spurrinnenbildung vorgezogen. Wie unten gezeigt, besteht die Hauptschwierigkeit in diesem Modellierungsansatz darin, die Erwartungswerte zu berechnen. Es ist oft so, dass zwei Formeln kaum empirisch voneinander unterschieden werden können, aber ganz unterschiedliche Vorteile anbieten, was die mathematische Berechnung angeht. Liegen dem Forscher Versuchsdaten direkt vor, können Funktionsformen für die Nachbildung der Schadensmechanismen angewendet werden, die für die darauffolgenden Integralrechnungen vorteilhaft sind.

Bei der Verwendung von Daten aus einem Grossversuch unter realistischen klimatischen Verhältnissen ergibt sich als zweiter Vorteil die relative Nähe zum empirischen Gegenstand, der hier erklärt werden soll. Weniger Annahmen werden so benötigt. Die Voraussagungen der Modelle haben weniger Freiheit. Wenn die Voraussagungen dennoch stark von der Empirie abweichen, sind die möglichen Ursachen eher eingegrenzt. Als mögliche Ursachen einer Abweichung lässt sich hier folgendes hinterfragen: Ist ein 135 kN Lastwechsel tatsächlich 7.1 ESAL (Einheitsachslast) gleichzustellen? Beeinflusst die hohe Frequenz der Lastwechsel das Schadensverhalten mengenmässig oder gar strukturell? Verändert die fehlende Alterung und die fehlende Menge an klimatischen Einwirkungen das Schadensverhalten signifikant? Insofern als die Abweichungen annähernd linear sind, lassen sie sich in Schritt 5, die Umrechnung von Schadensindex in einen Zustandsindex, auffangen.

2.1.1.1 Empirische Einschränkung

Da in den Versuchen nur Dimensionierungen für die Verkehrslastklassen T2, T3, und T4 in der Ausführung S2 vorhanden waren, ist eine Übertragung auf anderen Strassenaufbau-Typen nicht unbedingt gewährleistet. Eine statistische Beziehung zwischen der Spurrinnenbildung und Belagsstärke und Ausführungstyp wurde in einer Regression getestet. Eine Einwirkung auf das Verhalten konnte mit den Daten nicht nachgewiesen werden. Die fehlende statistische Signifikanz der Belagsstärke deutet daraufhin, dass bei noch stärkeren Aufbauten ähnliches Spurrinnenbildungsverhalten zu erwarten ist, wobei gesagt werden muss, dass es sich hier um eine relativ kleine Stichprobe handelt. Bezüglich der Verwendung der Resultate in einem Benchmarking kann gesagt werden, dass das Modell ein Maximum der relativen Benachteiligung berechnet. Dem Strassenbauer stehen mehr Möglichkeiten für eine Optimierung zu Verfügung als es der Benchmark hat.

2.1.2 Allgemeine Modellform für die Spurrinnenbildung

Das geschätzte Modell berechnet die Rate der Spurrinnenbildung je standardisiertem Lastwechsel. Es wird versucht den Einfluss zweier Einflussfaktoren auf diese Rate separat abzubilden. So ergeben sich zwei Teilprozesse: Einer für die Temperatur des Belags und einer für die kumulierten Lastwechsel. Es überrascht nicht, dass höhere Temperaturen die Spurrinnenbildung beschleunigen und dass mehr kumulierte Lastwechsel die Spurrinnenbildung verlangsamen. Von grösserem Interesse ist die Quantifizierung dieser Auswirkungen auf die Rate der Spurrinnenbildung. Schematisch sieht das Modell wie in Gleichung (3) aus, wobei $x_1(Temp)$ und $x_2(ESAL)$ Funktionen sind, die die zwei Teilprozesse abbilden. Ein ESAL ist ein Lastwechsel von 8.16 t.

$$\frac{\Delta \text{Spurrinnen}_i}{ESAL} = \beta_1 x_{1,i}(Temp_i) + \beta_2 x_{2,i}(ESAL_i) \quad (3)$$

Weitere Regressionsversionen wurden getestet. Versuchsdaten existierten für je zwei T2 und T4 Normbeläge und einen T3 Belag. Wie bereits erwähnt waren Variablen für die Belagsstärke sowie für die Belagstypen nicht signifikant anders als Null. Auch die Regressionskonstante war nicht signifikant anders als Null. Da die weiteren Derivationen mit diesen Variablen komplizierter wären und sie statistisch keine klare Wirkung zeigten, wurden sie fallen gelassen.

2.1.3 Modell der Rate der Spurrinnenbildung in Abhängigkeit der Belagstemperatur

2.1.3.1 Modell des Schadens pro Lastwechsel (Schritt 1)

Für den Einfluss der Temperatur wird eine Sigmoid-Form angenommen (Abbildung 2). Merkmale einer Sigmoidfunktion sind die Begrenzung gegen oben und unten, sowie ein kontinuierlicher Anstieg im Bereich von $-\infty$ bis $+\infty$. Bei sehr hohen Temperaturen wird das Bitumen weich; bei sehr niedrigen Temperaturen fließt das Bitumen praktisch nicht. Dazwischen sinkt die Viskosität monoton. Dieses erwartete Verhalten kann mit einer Sigmoidfunktion abgebildet werden.

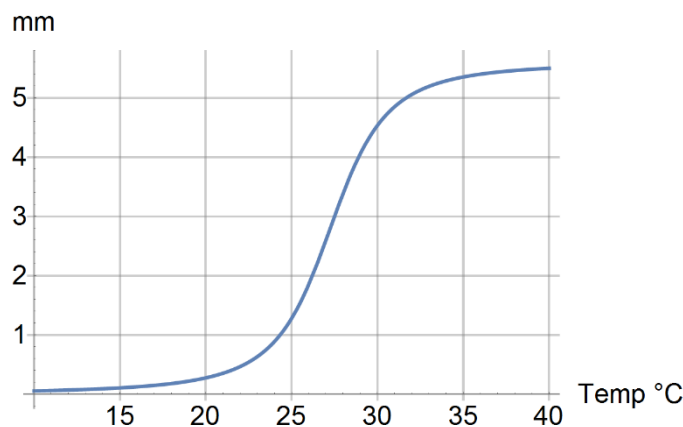


Abbildung 2. Rate der Spurrinnenbildung [mm] pro 100000 130KN Lastwechsel in Abhängigkeit der Belagstemperatur [°C]. Funktion geschätzt mit Daten aus einem Grossversuchs für Normbeläge.

Es gibt mehrere spezifische Funktionen, die eine Sigmoidform annehmen. Eine gut integrierbare ist:

$$\frac{z_i}{\sqrt{1 + z_i^2}} \quad (4)$$

$$\int \frac{z}{\sqrt{1+z^2}} dz = z + \sqrt{1+z^2} \quad (5)$$

Alle Werte liegen in der Zielmenge $(-1, 1)$. Damit die Zielmenge nur positive Werte enthält, wird der Gleichung (4) ein Wert von 1 dazu addiert. Eine lineare Transformation der Temperaturskala ermöglicht die Anpassung der Sigmoidfunktion in der Breite. Die Anpassung in der Höhe wird mit dem Regressionsparameter β_1 vollzogen (siehe Gleichung (3)). Somit wird der Temperatureffekt wie folgt modelliert:

$$x_{1,i} = \frac{z_i}{\sqrt{1+z_i^2}} + 1 \quad (6)$$

Wobei $z_i = (\gamma_2 (Temp_i + \gamma_1))$

2.1.3.1.1 Schätzung und Interpretation der Parameter γ_1 und γ_2 ; Die Einführung von Dimensionierungsvariablen

Die Konstante γ_1 bewegt den Mittelwert des Verhaltens zum Mittelwert der Funktion, nämlich zu null. Die Konstante γ_2 bestimmt die Spannweite des Bereichs zwischen hohem und niedrigem Widerstand gegenüber der Spurrinnenbildung. Beide Parameter werden mittels einer nichtlinearen Regression geschätzt. Tabelle 3 gibt die geschätzten Werte wieder. Die Regression wird in Abschnitt 2.1.3.4 präsentiert.

Tabelle 3.: Geschätzte Parameter für die Einwirkung der Temperatur auf die Rate der Spurrinnenbildung.

Parameter	Wert
γ_1 [°K]	-300.43
γ_2	0.2875

Die allgemeine Beziehung zwischen Modellparametern und Dimensionierungsparametern lässt sich an dieser Stelle erläutern. Bezogen auf den Teilaspekt des Gesamtmodells, das mit der Gleichung (6) abgebildet wird, gibt es genau zwei mögliche Wege eine spezifische Dimensionierung in die gewählten Sigmoidfunktion einfließen zu lassen: die Parametern λ_1 und λ_2 . Aber es braucht mehr als zwei Parameter, um ein Asphaltgemisch zu dimensionieren. Deshalb lässt es vermuten, dass sich λ_1 und λ_2 gleichzeitig über mehrere Gemischparameter beeinflussen lassen. Mit einer grösseren Menge an Experimenten könnten diesen Beziehungen modelliert werden. Mit den bestehenden Daten geht es leider nicht.

Anstelle eines empirischen Vorgehens stellen wir die Vermutung auf, dass der Parameter λ_1 in einer linearen Beziehung zu dem Erweichungspunkt steht. Somit wird die Grösse von λ_1 bestimmbar. Insofern als es einen zweiten Gemischparameter gibt, der ein entsprechenden Einfluss auf das Verhalten hat, dann gilt alles was folgend über dem Erweichungspunkt ermittelt wird auch für den zweiten Mischparameter. Der Bitumengehalt ist ein mögliches Beispiel.

2.1.3.1.2 Einführung von Alterung

Es ist belegt, dass die Alterung den Erweichungspunkt erhöht (Mirza & Witczak, 1995). Für diese Modellierung wird die Alterung mit einer linearen Verschiebung um η_5 °C im Jahr repräsentiert. Die nach Norm erstellten Deckschichten (AC 8 N und AC 8 S) in dem Versuch gelten dabei als Ausgangspunkt dieser Verschiebung. Es wird angenommen, dass diese Schichten einen Erweichungspunkt von 56 C hatten. Die Alterung kann somit mit folgender Einwechselung in das Modell hineingebracht werden.

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= -300.43 - (\text{Erweichungspunkt} - 56^\circ\text{C}) \\ \text{Erweichungspunkt} &= \text{ErwPktNeu} + \eta_5 \text{Alter} \\ \gamma_1 &= -300.43 - (\text{ErwPktNeu} + \eta_5 \text{Alter} - 56^\circ\text{C})\end{aligned}\quad (7)$$

Bei einem neuen Belag mit Erweichungspunkt 56°C gilt $\lambda_1 = -300.43$ wie in der Regression errechnet.

2.1.3.2 Erwartete Spurrinnenbildung pro standardisiertem Lastwechsel (Schritt 2)

Nimmt man als Vereinfachung an, dass an einem bestimmten Ort i die Verteilung der Temperaturen im Jahr annäherungsweise mit einer Gleichverteilung zwischen einem Minimal- und einen Maximalwert approximieren lässt, dann sind die zu erwartenden Spurrinnen pro Lastwechsel gemäss Gleichungen (2) und (6) wie folgt beschrieben:

$$\frac{\text{ErwSpurrinnen}_i}{\text{ESAL}} = \int_{\text{MinTJahr}}^{\text{MaxTJahr}} \left(\frac{\gamma_2 (\text{Temp}_i + \gamma_1)}{\sqrt{1 + (\gamma_2 (\text{Temp}_i + \gamma_1))^2}} \right) \left(\frac{1}{\text{MaxTJahr} - \text{MinTJahr}} \right) dT \quad (8)$$

Der zweite Term stellt die Dichtefunktion dar. Er ist eine Konstante in Bezug auf T und kann deshalb aus dem Integral herausgenommen werden. Was bleibt, muss integriert werden. Die Lösung des bestimmten Integrals ist:¹

$$\frac{\text{ErwSpurrinnen}}{\text{ESAL}} = \frac{\text{MaxTJahr} - \text{MinTJahr} + \frac{\sqrt{\gamma_2^2 (\gamma_1 + \text{MaxTJahr})^2 + 1} - \sqrt{\gamma_2^2 (\gamma_1 + \text{MinTJahr})^2 + 1}}{\gamma_2}{\text{MaxTJahr} - \text{MinTJahr}} \quad (9)$$

Gleichung (9) stellt die durchschnittliche Rate der Spurrinnenbildung pro standardisiertem Lastwechsel in einem Jahr bei einer Temperaturverteilung zwischen MinTJahr und MaxTJahr dar. Die zwei Grenzwerte sind so zu wählen, dass die Approximation möglichst zutrifft. Zum Beispiel können die monatlichen Mittelwerte anstelle von Tageswerten eingesetzt werden, damit die Gleichverteilung eher zutrifft. Da die Spurrinnenbildung von hohen Temperaturen begünstigt wird, werden hier die monatlichen Durchschnittswerte der Tageshöchsttemperaturen eingesetzt. So wird eine Verzerrung durch Extremwerte vermieden.

In Abbildung 3 ist der erste Term in der Gleichung (3) gezeigt. Für den skallierenden Parameter β_1 wird der Wert 2.8 eingesetzt (siehe Abschnitt 2.1.5). Die jährliche Anzahl ESAL wurde auf 100'000 gesetzt. Die hohe Empfindlichkeit des Modells auf höhere Temperaturen wird sehr deutlich.

¹ Alle Derivationen wurden mit der Software Mathematica ausgeführt. Kopien der Files werden auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

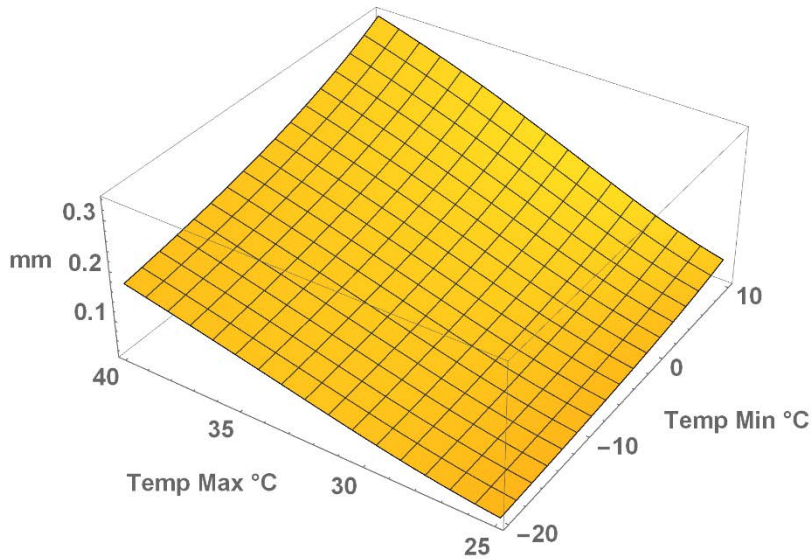


Abbildung 3.: Spurrinnenbildung [mm] in Abhängigkeit der Temperatur [°C] bezogen auf 1 Jahr bei 100000 ESAL.

2.1.3.3 Kumulierte Spurrinnenbildung im Verlauf der Gebrauchsdauer (Schritt 3)

Nun wird eine zweite Integralrechnung aufgestellt, diesmal über die Gebrauchsdauer des Belags. Gerechnet wird der Anteil aus dem Gesamtschadensbild, der auf das Einwirken der Temperatur zurückgeht. Das Integral lautet:

$$SpurrinnenTiefeTemp = ESAL \cdot \beta_1 \int_0^{TimeEnd} ErwSpurrinnen \left(\begin{matrix} MinTYear, MaxTYear, \\ ErwPktNeu, Alter, \eta_5, \lambda_1, \lambda_2 \end{matrix} \right) dAlter \quad (10)$$

wobei *ESAL* die jährliche Anzahl ESAL ist. Da die Variable *Alter* gleich *t* ist, ist *Alter* die Integrations-variable. Es wird leider zusehends schwieriger die Lösung des Integrals überhaupt aufzuführen, folgend ist es noch möglich:

$$\left(\frac{\beta_1 ESAL}{8(MaxTJahr - MinTJahr) \gamma_2^2 \eta_5} \right) \cdot \left(\begin{aligned} & -224 \gamma_2 \sqrt{1 + (56 - ErwPktNeu + \gamma_1)^2 \gamma_2^2} \\ & + 4 ErwPktNeu \gamma_2 \sqrt{1 + (56 - ErwPktNeu + \gamma_1)^2 \gamma_2^2} \\ & - 4 \gamma_1 \gamma_2 \sqrt{1 + (56 - ErwPktNeu + \gamma_1)^2 \gamma_2^2} \\ & + 224 \gamma_2 \sqrt{1 + (56 - ErwPktNeu + MaxTJahr - MinTJahr + \gamma_1)^2 \gamma_2^2} \\ & - 4 (MaxTJahr - MinTJahr) \gamma_2 \sqrt{1 + (56 - ErwPktNeu + MaxTJahr - MinTJahr + \gamma_1)^2 \gamma_2^2} \\ & + 4 \gamma_1 \gamma_2 \sqrt{1 + (56 - ErwPktNeu + MaxTJahr - MinTJahr + \gamma_1)^2 \gamma_2^2} \\ & + 8 (MaxTJahr - MinTJahr) TimeEnd \gamma_2^2 \eta_5 \\ & + 224 \gamma_2 \sqrt{1 + \gamma_2^2 (-56 + ErwPktNeu - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)^2} \\ & - 4 ErwPktNeu \gamma_2 \sqrt{1 + \gamma_2^2 (-56 + ErwPktNeu - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)^2} \\ & + 4 \gamma_1 \gamma_2 \sqrt{1 + \gamma_2^2 (-56 + ErwPktNeu - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)^2} \\ & - 4 TimeEnd \gamma_2 \eta_5 \sqrt{1 + \gamma_2^2 (-56 + ErwPktNeu - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)^2} \\ & - 224 \gamma_2 \sqrt{1 + \gamma_2^2 (-56 + ErwPktNeu - MaxTJahr + MinTJahr - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)^2} \\ & + 4 ErwPktNeu \gamma_2 \sqrt{1 + \gamma_2^2 (-56 + ErwPktNeu - MaxTJahr + MinTJahr - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)^2} \\ & - (MaxTJahr - MinTJahr) \gamma_2 \sqrt{1 + \gamma_2^2 (-56 + ErwPktNeu - MaxTJahr + MinTJahr - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)^2} \\ & - 4 \gamma_1 \gamma_2 \sqrt{1 + \gamma_2^2 (-56 + ErwPktNeu - MaxTJahr + MinTJahr - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)^2} \\ & + 4 TimeEnd \gamma_2 \eta_5 \sqrt{1 + \gamma_2^2 (-56 + ErwPktNeu - MaxTJahr + MinTJahr - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)^2} \\ & - \arcsign[(56 - ErwPktNeu + \gamma_1) \gamma_2] + \arcsign[(56 - ErwPktNeu + MaxTJahr - MinTJahr + \gamma_1) \gamma_2] \\ & - 4 \arcsign[\gamma_2 (56 - ErwPktNeu + MaxTJahr - MinTJahr + \gamma_1 - TimeEnd \eta_5)] \\ & - 4 \arcsign[\gamma_2 (-56 + ErwPktNeu - \gamma_1 + TimeEnd \eta_5)] \end{aligned} \right) \quad (11)$$

Abbildung 4 zeigt die Beziehung zwischen maximaler Temperatur, der Anzahl Jahre und der Spurrinntentiefe mit folgenden Annahmen:

ESAL pro Jahr	= 100'000
β_1	= 2.8
$ErwPktNeu$ [°C]	= 56
γ_2	= 0.2875
$MinTYear$ [°C]	= -10
η_5	= 0.25

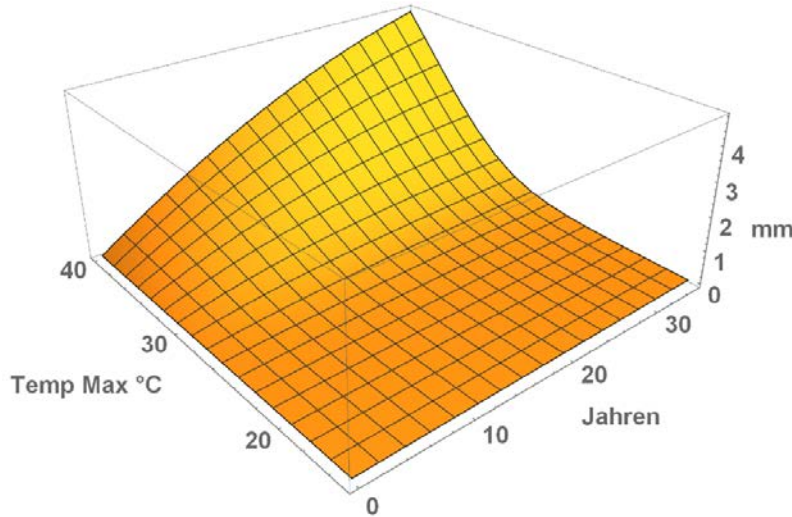


Abbildung 4.: Spurrinnentiefe [mm] in Abhängigkeit der Temperatur [°C] und der Zeit.

2.1.3.4

Ersatz durch eine Approximation (Schritt 4)

Die Gleichung (11) ist eine zu komplexe Funktion von der Zeit, um die Schritte 5 bis 9 in Tabelle 2 auszuführen. Gesucht wird deshalb eine Approximation, die als einfaches Polynom der Zeit formuliert ist und im Bereich von 20 bis 30 Jahren eine gute Näherung bietet. Der genaue Zeitverlauf des Verfalls in Zeiträumen in denen eine Erneuerung sehr unwahrscheinlich ist, hat keine praktische Auswirkung für das Benchmarking. Ob der Verfall anfangs als zu schnell und später als zu langsam modelliert ist oder umgekehrt, ist unerheblich. Es muss lediglich zum gleichen Zustandswert führen, in dem Jahr, wenn eine Erneuerung passiert. Deshalb ist die Genauigkeit der Approximation vor 15 Jahren nicht von grosser Bedeutung.

Die Approximation erfolgt im vorliegenden Fall in zwei Schritten. Zuerst wird eine Hilfsfunktion $f\phi1(\cdot)$ gerechnet, wobei $(\cdot)$ für die diversen unabhängigen Variablen steht :

$$f\phi1(ESAL, \beta_1, MinTJahr, MaxTJahr, ErwPktNeu, \eta_5, \lambda_1, \lambda_2) = \left(\frac{SpurrinnenTiefeTemp(ESAL, \beta_1, MinTJahr, MaxTJahr, ErwPktNeu, TimeEnd = 20, \eta_5, \lambda_1, \lambda_2)}{20 (ESAL \cdot \beta_1)} \right) \quad (12)$$

Die Hilfsfunktion gibt die durchschnittliche temperaturabhängige Spurrinnenbildung über 20 Jahre genau wieder, egal wie die anderen Parameterwerte ausfallen. Danach wird $f\phi1(\cdot)$ mit einer relativ einfachen Funktion der Zeit multipliziert. Die Funktion sollte nach der Zeit gut auflösbar sein und muss ungefähr 20 betragen, wenn gilt $TimeEnd = 20$. Bei passenden Werten für ϕ_2 und ϕ_3 erfüllt folgende Funktion diese Anforderungen:

$$\phi_2 \sqrt{TimeEnd} + \phi_3 TimeEnd \quad (13)$$

Werte für die Parameter ϕ_2 und ϕ_3 wurde durch eine visuelle Anpassung in Mathematica gefunden. Die Approximation gewährleistet, dass die Wirkung der Zeit nur multiplikativ mit den Wirkungen der anderen Variablen interagiert. Die Approximation lautet:

$$SpurrinnenTiefeTemp(ESAL, \beta_1, MinTJahr, MaxTJahr, ErwPktNeu, TimeEnd, \eta_5, \lambda_1, \lambda_2) = (ESAL \cdot \beta_1) f\phi1(\cdot) (\phi_2 \sqrt{TimeEnd} + \phi_3 TimeEnd) \quad (14)$$

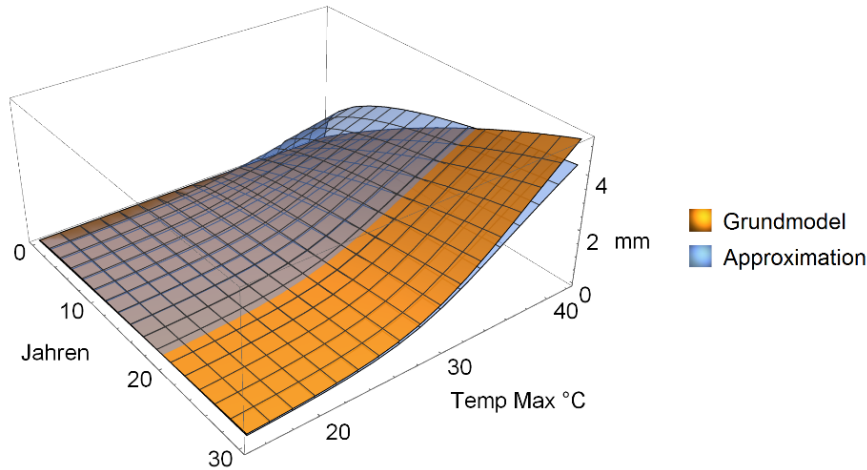


Abbildung 5.: Approximation der Spurrinnentiefe [mm] in Abhängigkeit der Temperatur [°C] und der Zeit.

2.1.4 Rate der Spurrinnenbildung in Abhängigkeit der kumulierten Lastwechsel

2.1.4.1 Modell des Schadens pro Lastwechsel (Schritt 1)

Es wird vermutet, dass die Rate der Spurrinnenbildung mit zunehmenden Lastzyklen abnimmt, aber dennoch immer positiv bleibt. Eine asymptotische Form, wie in Abbildung 6 gezeigt, wird für das Modell angenommen. Eine empirische Anpassung wird mit zwei Parametern ermöglicht. Der Regressionsparameter β_2 passt die Skala an. Der Potenzparameter ϕ_4 verändert die Bedeutung grösserer Werte der kumulierten Lastwechsel.

$$x_{2,i} = \frac{1}{\left(KumLastWechsel_i \cdot 10^{-5} \right)^{\phi_4}} \quad (15)$$

Es wurden nur Potenzen getestet, die eine spätere mathematische Bearbeitung begünstigen. Die Quadratwurzel funktioniert am besten. So wird die Funktion $x_{2,i}(ESAL_i)$ in der folgenden konkreten Form angenommen:

$$x_{2,i} = \frac{1}{\sqrt{KumLastWechsel_i \cdot 10^{-5}}} \quad (16)$$

Die Beobachtungen bis 5'000 Lastwechsel wurden von der Regression ausgeklammert, da hier eine Initialverdichtung nach dem Einbau des Asphalts stattfindet. Diese Phase passt nicht zu dem Verhalten nach 5'000 Zyklen und wurde mit der Addition einer Konstante von 2.5 mm abgefangen. Abbildung 6 zeigt das modellierte Verhalten.

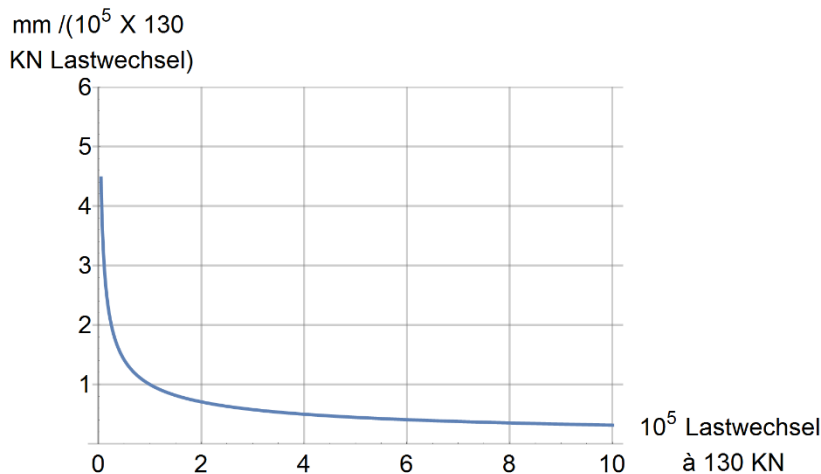


Abbildung 6.: Rate der Spurrinnenbildung [mm] pro 105 130KN Lastwechsel in Abhängigkeit der kumulierten Lastwechsel.

2.1.4.2 Erwartete Spurrinnenbildung pro standardisiertem Lastwechsel (Schritt 2)

Da keine Klimavariablen mitwirken, worüber der Erwartungswert zu kalkulieren wäre, bleibt die Formel unverändert.

2.1.4.3 Kumulierte Spurrinnenbildung im Verlauf der Gebrauchsdauer (Schritt 3)

Die kumulierten Lastwechsel lassen sich als Funktion der Zeit formulieren. Unter der Annahme einer konstanten Menge standardisierter Lastwechsel im Jahr, $ESAL$, sind die kumulierten Lastwechsel bis t gleich $t \cdot ESAL$. Aufgrund der Initialverdichtung wird das bestimmte Integral von Gleichung (16) startend bei 5'000 Lastwechseln bis $TimeEnd$ verwendet. Die durchschnittliche Verdichtung in den Versuchen bei 5'000 Zyklen lag durchschnittlich bei 2.5 mm.

$$SpurrinnenTiefeKumZyk(ESAL, TimeEnd, \beta_2) = ESAL \cdot \beta_2 \int_{5000/a}^{TimeEnd} \frac{1}{\sqrt{ESAL \cdot 10^{-5} \cdot t}} dt + 2.5 \quad (17)$$

Das Modell der Spurrinnenbildung aufgrund der kumulierten Lastwechsel ist dann wie folgt:

$$\begin{aligned} SpurrinnenTiefeKumZyk(ESAL, TimeEnd, \beta_2) &= \beta_2 \left(2\sqrt{ESAL \cdot 10^{-5} \cdot TimeEnd} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) + 2.5 \\ &= \left(2.5 - \frac{\beta_2}{\sqrt{5}} \right) + \left(2\beta_2 \frac{\sqrt{ESAL}}{10^5} \right) \sqrt{TimeEnd} \end{aligned} \quad (18)$$

Abbildung 7 zeigt die Beziehung unter Einbeziehung der folgenden Annahmen:

$$\begin{aligned} ESAL \text{ pro Jahr} &= 100'000 \\ \beta_2 &= 3.25 \end{aligned}$$

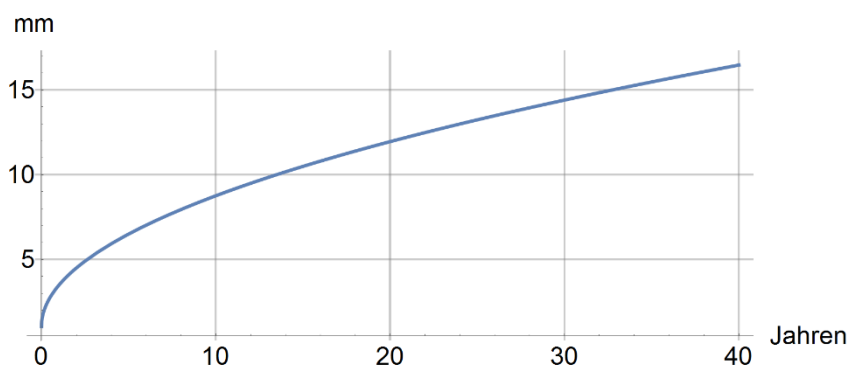


Abbildung 7.: Spurrinnentiefe in Abhängigkeit mit der kumulierten Lastwechsel über die Zeit

2.1.5 Schätzung der Parameter

Die Werte für die Parameter γ_1 und γ_2 lassen sich nicht linear schätzen. Sie lassen sich aber mit der Methode der Minimierung der Summe der Fehlerquadrate schätzen. So wurden alle vier Parameter $\gamma_1, \gamma_2, \beta_1$, und β_2 gleichzeitig mit nicht linearen kleinsten Quadratfehlern geschätzt. Gleichung (3) lässt sich unter Annahme der beiden geschätzten Parameterwerte für β_1 und β_2 trotzdem linear schätzen, um die gewöhnlichen Regressionsstatistiken angeben zu können. Diese sind in Tabelle 4 zu sehen. Die Verteilungen der t-Statistiken sind mit den Standardtabellen nicht konsistent, weil die Annahme des Vorhandenseins einer Konstanten in der Regression nicht erfüllt ist. Die P-Werte könnten deshalb verzerrt sein. Abbildung 8 zeigt eine deutliche positive Beziehung zwischen den Modellwerten und den gemessenen Werten.

Tabelle 4.: Parameter für die Spurrinnenbildung.

Statistik	Wert
R-Quadrat	0.8041
Adj. R-Quadrat	0.7823
Std. Abweichung	2.4017
Beobachtungen	57

Variable	Koeff.	Std. Abw	t-Stat.	P-Wert
β_1	2.800	0.464	6.040	1.39 X 10 ⁻⁷
β_2	3.250	0.319	10.198	2.75 X10 ⁻¹⁴

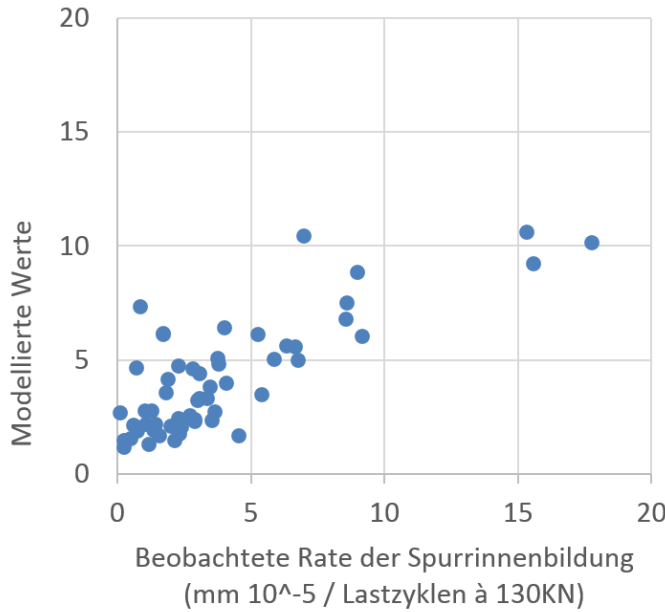


Abbildung 8.: Beobachtete und modellierte Rate der Spurrinnenbildung.

2.1.6 Kombination der Untermodelle

Die zwei Untermodelle werden mittels Gleichung (3) zu einem Schadensindex für Spurrinnen kombiniert. Im Fall des Temperatureffekts wird die Approximation eingesetzt.

$$\begin{aligned}
 \text{SchadenIndexSpurrinnen} &= \left(\begin{array}{l} \text{SpurrinnenTiefeTemp} \\ + \text{SpurrinnenTiefeKumZyk} \end{array} \right) \\
 &= \left(\begin{array}{l} (ESAL \cdot \beta_1) f \phi_1(\cdot) \\ \cdot (\phi_2 \sqrt{\text{TimeEnd}} + \phi_3 \text{TimeEnd}) \\ + \left(2.5 - \frac{\beta_2}{\sqrt{5}} \right) + \left(2\beta_2 \frac{\sqrt{ESAL}}{10^5} \right) \sqrt{\text{TimeEnd}} \end{array} \right) \quad (19)
 \end{aligned}$$

Man erkennt folgend, dass diese Formel auch als quadratische Gleichung von $\sqrt{\text{TimeEnd}}$ anzusehen ist:

$$\begin{aligned}
 \text{SchadenIndexSpurrinnen} &= \\
 &\left(2.5 - \frac{\beta_2}{\sqrt{5}} \right) \\
 &+ \left((ESAL \cdot \beta_1) f \phi_1(\cdot) \phi_2 + \left(2\beta_2 \frac{\sqrt{ESAL}}{10^5} \right) \right) \sqrt{\text{TimeEnd}} \\
 &+ ((ESAL \cdot \beta_1) f \phi_1(\cdot) \phi_3) \text{TimeEnd} \quad (20)
 \end{aligned}$$

Abbildung 9 zeigt das komplette Modell der Spurrinnenbildung gemäss Gleichung (19) mit Hilfe der Annahmen aus Tabelle 5. In Abbildung 9 ist der Einfluss der Temperatur zweitrangig. Das liegt allerdings an den angenommenen Parameterwerten. Bei anderen Parameterwerten ist dies nicht so. Was nicht von Parameterwerten abhängt, ist die mit der Zeit abnehmende Rate der Spurrinnenbildung. Das liegt daran, dass sowohl der

Temperatureffekt wie auch der kumulierte Lastwechsel-Effekt mit der Zeit abnehmen. Ersterer nimmt wegen des ansteigenden Erweichungspunktes infolge der Alterung ab. Letzterer nimmt wegen der Verdichtung ab. Aus diesen Berechnungen folgt, dass die zweite Ableitung eines I3-Indexes mit der Zeit negativ sein muss.

Tabelle 5. Parameterwerte für Abbildung 9.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
ESAL pro Jahr	100'000	β_1	2.8
Erweichungspunkt Neu [°C]	56	β_2	3.25
Minimal Temperatur [°C]	-10	ϕ_2	5.7
γ_2	0.2875	ϕ_3	-0.33

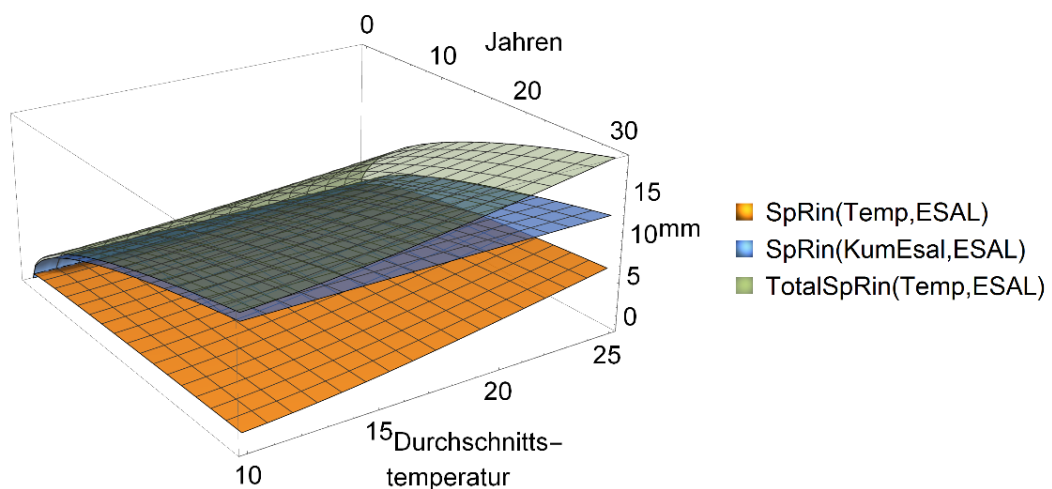


Abbildung 9.: Modell der Spurrinnenbildung und seiner Komponenten.

2.2 Thermische Rissbildung

2.2.1 Übersicht

Das Modell der thermisch induzierten Rissbildung folgt im Allgemeinen einer kürzlich am Institut für Strassenwesen der TU Braunschweig erschienenen Dissertation Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstrassen unter Berücksichtigung stündlicher Beanspruchungszustände (Walther, 2014). Wir verweisen auf diese Quelle für detaillierte Erklärungen zu den hier genutzten Modellansätzen.

Walther rechnet mit dem Modell des Zusammenwirkens von Lastwechseln und thermischen Spannungszyklen, um den Verlauf der «Top-Down»-Rissbildung im Allgemeinen voraussagen. Er zieht aber als Fazit, dass der Einfluss der Lastwechsel eher zweitrangig ist (S.96). Wir folgen hier seiner Schlussfolgerung und modellieren lediglich die thermische Rissbildung, ohne Berücksichtigung des Zusammenwirkens der Lastwechsel.

Das Modell ist grundsätzlich zweistufig. Zuerst wird ein Einzelschaden berechnet. Danach wird der Schaden kumuliert. Der Belag zieht sich zusammen, wird aber durch seine Grösse bzw. sonstige Begrenzungen daran gehindert. Es entstehen Spannungen, wovon ein Teil über das viskose Verhalten des Bitumens abgebaut werden kann. Der andere Teil führt zu einer elastischen Dehnung. Die erste Stufe des Modells berechnet drei physische Grössen. Zuerst wird berechnet welcher Anteil der aufgebauten Spannung durch die Viskosität abgefangen wird. Dieser Anteil wird von den vorherrschenden Temperaturen stark

beeinflusst. Danach wird berechnet wie gross die Dehnung sein wird. Dieses elastische Verhalten ist ebenfalls stark temperaturabhängig und wird mit dem E-Modul ausgedrückt. Somit müssen in der ersten Stufe drei Grössen berechnet werden: Die Grösse des Zusammenziehens, der Anteil der nicht gleichzeitig abgebaut werden kann, und die daraus entstehende Dehnung.

Die zweite Modellstufe übersetzt die berechnete Dehnung in eine Schadensmenge. Hier wird der Ansatz von Miner (1945) verfolgt. Aus einem temperaturabhängigen Ermüdungsmodell wird die Anzahl, N , zu erwartender Spannungszyklen bis zum Bruch berechnet. Die Schadensmenge pro Zyklus ist $\frac{1}{N}$. Diese Schadensmengen werden summiert. Die Summe wird als «Schadensindex» angesehen, auch wenn sie grösser als 1 wird. Die Anzahl zu erwartender Zyklen bis zum Bruch ist von der Temperatur abhängig.

Die Temperatur fliesst somit dreifach als Eingangsgrösse in das Modell ein. Dazu kommt der Temperaturgradient, also das Sinken der Temperatur, als eigentliches Schadensereignis. Die Integrationsschritte sind deshalb noch komplizierter als bei der Spurrinnenbildung. «Klima» besteht in diesem Fall aus der Temperatur und seiner täglichen Veränderung. Relevant ist die Belagstemperatur. Alles was darauf einen Einfluss hat, kann in das Modell integriert werden. Hier benutzen wir die Temperatur und seine Veränderung als Eingangsgrössen, gleich welches natürlichen Prozesses: Wind, Sonne, bzw. Lufttemperatur, die die Belagstemperatur letztendlich bestimmen.

2.2.2 Modell der thermisch erzeugten Dehnung; Stufe I von Schritt 1

2.2.2.1 Die Definition von Schaden nach Miner

Der «Schaden» aus einem Schadensereignis bei einem Ermüdungsprozess wird nach Miner mit $\frac{1}{N(\cdot)}$ definiert, wobei N als Funktion zu verstehen ist und für die zulässige

Lastwechselzahl steht. E ist das E-Modul in MPa und σ ist die Zugspannung in MPa. Wir folgen Walther [S. 11] mit Ausnahme bei der Formulierung von k_2 . Walther setzt eine temperaturabhängige Formel für k_2 ein. Hier wird k_2 als konstante mit dem Betrag 5 eingesetzt und damit dem Ansatz von Kingham (1972) gefolgt.³

$$N_f = k_1 \left(\frac{E}{\sigma} \right)^{k_2} \quad (21)$$

Es gilt als nächstes die Modellierung der zwei Variablen E und σ darzustellen. Das eigentliche Schadensereignis ist ein Sinken der Temperatur. Ein allfälliger Schaden aus einer Temperatur-zunahme wird nicht betrachtet.

2.2.2.2 Das Schadensereignis

Das Schadensereignis ist ein Temperaturabfall. Empirisch wird dies mit dem Unterschied zwischen der höchsten und niedrigsten Tagestemperatur umgesetzt. Es wird angenommen, dass dies über eine Periode von 12 Stunden stattfindet. Der eingesetzte Wärmedehnbeiwert beträgt $2,5 \cdot 10^{-5} / K$ [Walther, S. 12].

2.2.2.3 E-Modul in Abhängigkeit mit der Temperatur und des Erweichungspunkts

Der E-Modul wird nach Gleichungen (22) bis (24) berechnet [Walther S. 63].

² Das Zeichen $(\cdot)$ steht für eine Reihe unabhängigen Variablen, die nicht aufgezählt werden.

³ Siehe Abschnitt 2.2.3

$$|E| = y_0 + \frac{w}{1 + e^{\left(\frac{\log_{10}(f_R) - x_0}{z}\right)}} \quad (22)$$

$$f_R = f \alpha_T \quad (23)$$

$$\alpha_T = \frac{1}{e^{-m \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_R+273} \right)}} \quad (24)$$

Wobei gilt:

T	tatsächliche Prüftemperatur [°C]
T_R	Bezugstemperatur [°C]
m	Faktor [°C]
w	Glasm modul [MPa]
y_0, x_0, z	Regressionskoeffizienten

Der E-Modul hängt vom Asphalttyp ab und ist sehr Temperaturempfindlich. Walther setzt hier eine mit Laborwerten abgeschätzte Funktionsform ein. Für die in dieser Präsentation gezeigten Grafiken wurden Regressionsparameter von einem Kalibrierungsasphalt einer Deckschicht nach EN 12697 24 / -26 eingesetzt. Die Parameterwerte sind: $w = 29593$, $x_0 = 7.4$, $y_0 = -561$, $z = 3.87$, $f = 10$, $m = 25000$

Um eine Dimensionierung durch den Erweichungspunkt zu ermöglichen, wurde folgende Substitution vorgenommen. Dieses Vorgehen weicht von Walther ab, da er stets von im Labor bestimmten Regressionsparametern ausgehen kann. Dasselbe ist in dieser Arbeit nicht möglich. Empirische Arbeiten zu dieser Beziehung fanden wir nicht. Aber der in vielen Arbeiten zitierten Van der Poel Nomogramm (Van der Poel, 1954) beschreibt die Steifigkeit als Funktion der additiven Differenz zwischen der Temperatur und dem Erweichungspunkt. In diesem Sinne wird hier eine Änderung des Erweichungspunktes wie eine Verschiebung der Temperaturskala modelliert. Um dies mit einer mathematisch einfachen Formulierung zu erreichen, wurde Gleichung (25) wie gezeigt definiert und visuell geschätzt. Eine detailliertere Begründung dieses Vorgehens kann in (Craig Richmond & Adey, Submitted 2018) nachgelesen werden.

$$x_0 = 16.5 - 0.162 \cdot \text{ErwPkt} \quad (25)$$

Abbildung 10 zeigt das Grundmodell von Walther und zwei gerechnete E-Modulkurven mit Erweichungspunkten von 56°C und 66°C. Man sieht, dass die Verschiebung im kritischen Bereich parallel ist und wie gewollt +10 °C beträgt.

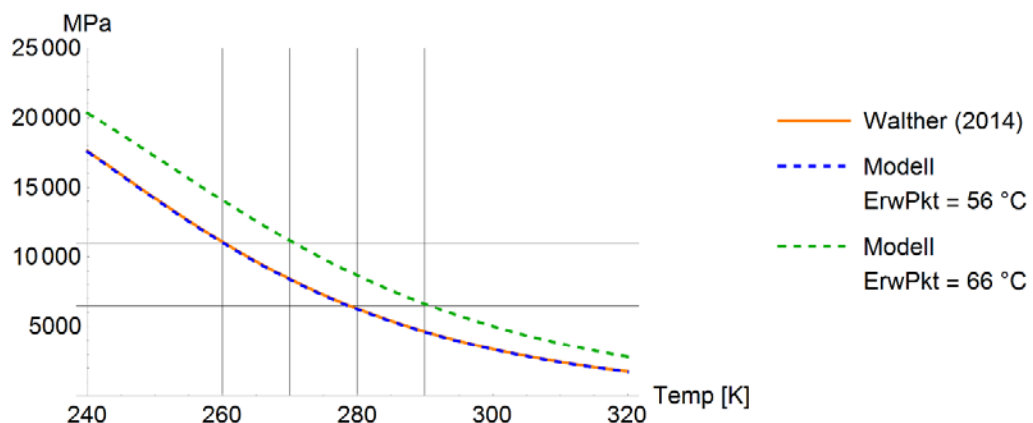


Abbildung 10.: E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur und des Erweichungspunkts.

Die Gleichung für das E-Modul lautet:

$$EModul(TempK, ErwPkt, w, y_0, z) = \frac{w}{1 + \left(e^{\frac{52.53 - 0.162 \cdot ErwPkt}{z}} \right) \left(e^{\frac{25000}{TempK}} \right)^{\frac{-0.4342}{z}}} + y_0 \quad (26)$$

2.2.2.4 Viskosität in Abhängigkeit mit der Temperatur und des Erweichungspunkts

Das Modell der Viskosität aus Walther (Seite 13) lautet:

$$\log_{10}(\log_{10}(\lambda(TempK))) = a + b \cdot \log_{10}(TempK) \quad (27)$$

Die Parameter a und b sind für einige Erweichungspunkte angegeben, gelten aber nur für Standardstrassenbaubitumen (Arand and Lorenzl (1995), S.14). Diese sind in Abbildung 11 gezeigt.

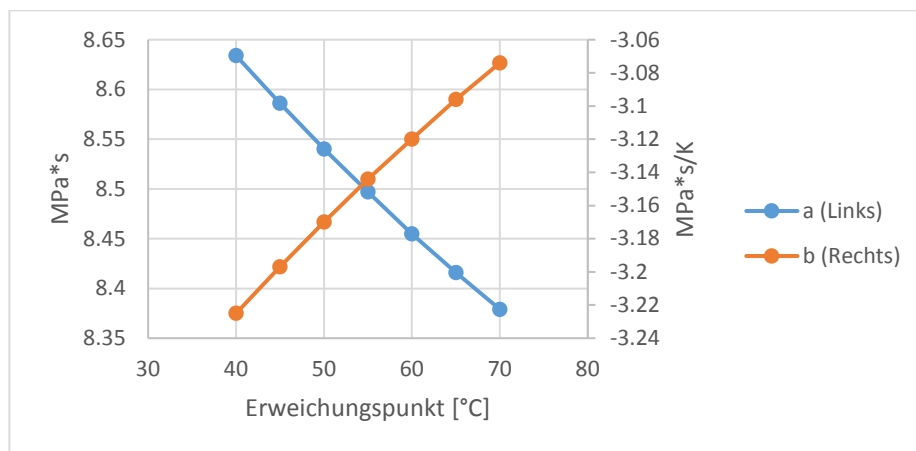


Abbildung 11.: Beziehung des Erweichungspunktes zu den Parametern a und b gemäss (Arand & Lorenzl, 1995) S.14.

Die Beziehungen wurden ursprünglich von Arand und Lorenzl mit zwei Geraden geschätzt. Weitergegeben wurden aber nur die Tabellenwerte. Mit zwei Regressionen liessen sich aber die Formeln aus den Werten schätzen. Die Gleichungen sind:

$$\begin{aligned} a &= 8.968 - 0.0085 \cdot ErwPkt(^{\circ}C) \\ b &= -3.423 + 0.005 \cdot ErwPkt(^{\circ}C) \end{aligned} \quad (28)$$

Abbildung 12 zeigt die modellierte Viskosität. Eine Verschiebung des Erweichungspunktes um 10 führt nicht zu einer vollständig parallelen Verschiebung des Verhaltens um 10 .

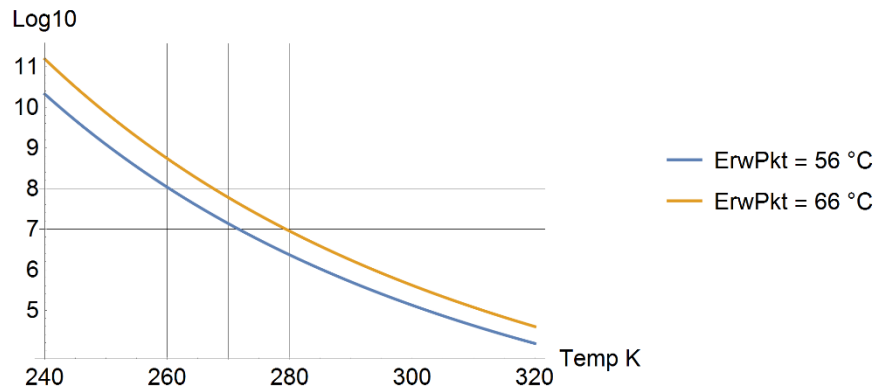


Abbildung 12.: Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur und des Erweichungspunkts

Die Gleichung für die Viskosität ist folgende:

$$\text{Viskosität}(\text{ErwPkt}, \text{TempK}) = e^{2.141488214812608 \times 10^9 e^{-0.01957 \text{ ErwPkt}} \text{TempK}^{0.005036 \text{ ErwPkt} - 3.424}} \quad (29)$$

Der Erweichungspunkt wird in diesem Bericht stets in °C angegeben. Temperaturen werden hier nachfolgend in Kelvin ausgedrückt, weil dadurch rechnerische Probleme bezogen auf Null vermieden werden können.

2.2.2.5 Das Modell der Relaxationszeit

Die letzte Komponente des angewendeten Modells der thermisch erzeugten Zugspannung ist die Relaxationszeit, t_R . Walther (S.13) definiert diese als die Beziehung der Viskosität zum E-Modul, welche bei fallenden Temperaturen stark ansteigt.

$$t_R = \frac{\lambda(T)}{E} \quad (30)$$

Das modellierte Verhalten wird in Abbildung 13 gezeigt.

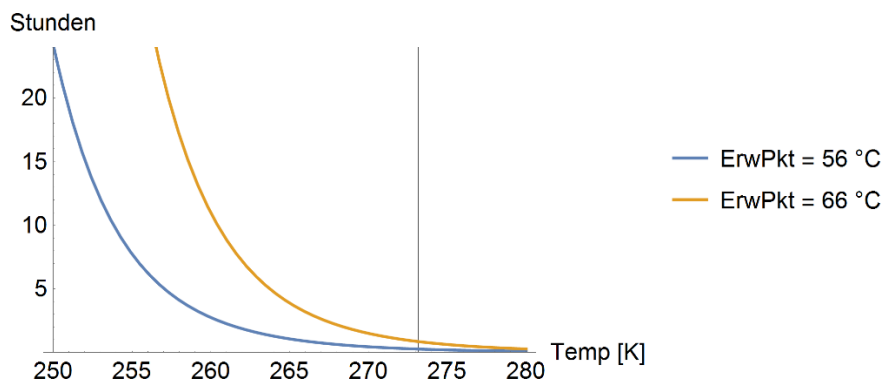


Abbildung 13.: Relaxationszeit in Abhängigkeit der Temperatur und des Erweichungspunkts.

2.2.2.6 Modell der thermisch erzeugten Zugspannung

Nun lässt sich das Modell für Zugspannung darstellen. Walthers Gleichung 9, hier als (31) und (32) wiedergegeben, wird dabei verwendet [Walter S.12].

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{\frac{t}{t_R}} - \beta \lambda(T) \dot{T} \left(1 - e^{\frac{t}{t_R}} \right) \quad (31)$$

$$t_R = \frac{\lambda(T)}{E} \quad (32)$$

Wobei gilt:

$\sigma(t)$	Spannung in Abhängigkeit von der Zeit [MPa]
σ_0	Anfangsspannung [MPa]
β	einaxialer Wärmedehnbeiwert [1/K]
t_R	Relaxionszeit [s]
E	E-Modul [Mpa]
$\lambda(T)$	temperaturabhängige Zugviskosität [MPa]
$\dot{T}$	Temperaturgradient [K/h]

Das Modell unterliegt der Annahme von gleichbleibendem Materialverhalten während eines Schadensereignisses. Diese Annahme führt bei Abkühlungen über 12 Stunden in der Grössenordnung von 5 bis 10 Kelvin zu einer Unterschätzung des Schadens. In Walther (2014) wurde mit Perioden von einer Stunde gearbeitet. Wie die obigen Abbildungen zeigen, kann sich das Verhalten markant ändern, wenn sich die Ausgangstemperatur um 10 °C verschiebt. Da es sich hier nur um Abkühlungsereignisse handelt, sind die Abweichungen stets negativ. Und da das Verhalten deutlich nichtlinear ist, kann dieses Bias nur erschwert bei einer empirischen Anpassung aufgefangen werden.

Eine zweite Annahme die hier vereinfachend angewendet wird, führt vermutlich zu einer Überschätzung des Schadens. Die Gleichung (31) besteht aus zwei Termen. Der Erste steht für die in der vergangenen Periode bereits entstandene Zugspannung. Es wird hier angenommen, dass dieser Term gleich null ist. Das führt dazu, dass sich der Asphalt bei der Tageshöchsttemperatur in einem spannungslosen Zustand befindet. Tatsächlich müsste aber der Asphalt bei einem zyklischen Temperaturverlauf im Moment der Tageshöchsttemperatur unter Druckspannung stehen. Die Temperatur, bei der eine Nullspannung besteht, müsste deshalb niedriger sein als die Tageshöchsttemperatur. Somit müsste der schadensverursachende Temperaturabfall auch kleiner sein als die Differenz der Tagesextremwerte. Somit führt die zweite Annahme zu einer Überschätzung des Schadens.

Tabelle 6.: Annahmen für Abbildung 14.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Erweichungspunkt [°C]	56	y0 [Mpa]	-561
w [Mpa]	29000	z [-]	3.87

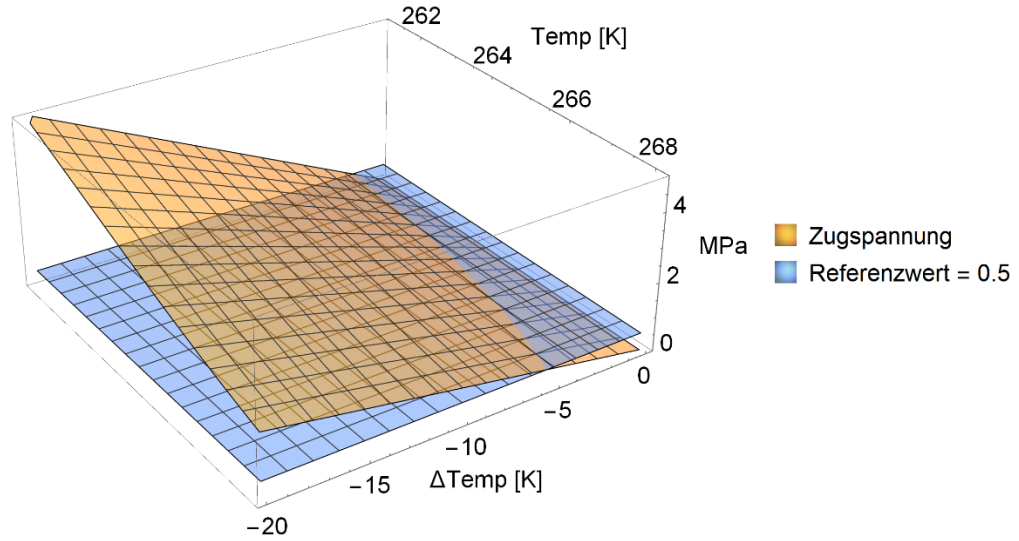


Abbildung 14.: Zugspannung in Abhängigkeit der Temperatur und der Temperaturveränderung

Gleichung (33) ist die thermisch erzeugte Zugspannung unter oben erwähnten Annahmen.

$$\sigma(\text{TempGrad12Hr}, \text{ErwPkt}, \text{TempK}, w, y_0, z) = \text{TempGrad12Hr} \cdot e_1 \cdot e_2$$

Wobei

$$e_1 = \left(-5.787 \times 10^{-10} \right) \cdot \left(e^{2.141 \times 10^9 e^{-0.01957 \text{ErwPkt}} \text{TempK}^{0.005036 \text{ErwPkt} - 3.424}} \right)$$

$$e_2 = \left(1 - \exp \left(\frac{-43200 e^{-2.141 \times 10^9 e^{-0.01957 \text{ErwPkt}} \text{TempK}^{0.005036 \text{ErwPkt} - 3.424}}}{\left(\frac{w}{\frac{52.53 - 0.162 \text{ErwPkt}}{z} + \frac{10857}{\text{TempK} \cdot z} + 1 \right) + y_0} \right) \right) \right) \quad (33)$$

2.2.2.7 Die thermisch erzeugte Dehnung

Im linear-elastischen Modell ist die Dehnung wie folgt definiert:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\text{TempGrad12Hr} \cdot e_1 \cdot e_2}{E} \quad (34)$$

Der Umkehrwert $\frac{1}{\varepsilon}$ ist der Eingangswert für die Berechnung der Schadensmenge pro Schadensereignis. In Abbildung 15 ist die Dehnung ε unter den in Tabelle 6 gegebenen Annahmen dargestellt. Wichtig für die weitere Analyse ist, dass die Dehnung linear mit der Temperaturveränderung zunimmt. Dieses Verhalten ist in Abbildung 15 gut ersichtlich. Dies geht auf das multiplikative Verhältnis von $\dot{T}$ (Temperaturgradient) in der Gleichung für die Zugspannung zurück.

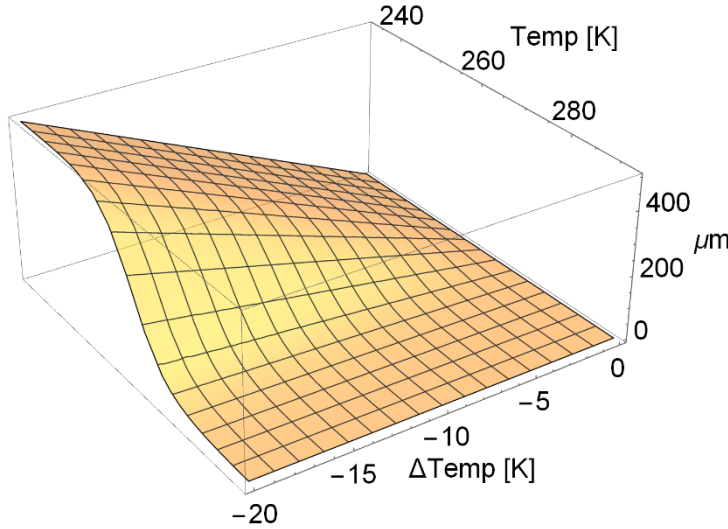


Abbildung 15.: Thermisch erzeugte Dehnung in Abhängigkeit der Temperatur und der Temperaturveränderung.

2.2.3 Modell des Schadens durch thermisch erzeugte Rissbildung; Stufe II von Schritt 1

Die Schadensmenge pro Schadensereignis wird über das Ermüdungsmodell gerechnet. Danach wird der Schaden summiert. Daraus entsteht ein Index des Schadens, welcher bei 0 anfängt und im Prinzip keinen Höchstwert besitzt. Der Schaden ist definiert als:

$$\begin{aligned} \text{Schadensmenge}_i &= \frac{1}{N_i}; \\ N_i &= k_1(T) \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{k_2} \end{aligned} \quad (35)$$

Fügt man Gleichung (34) ein und lässt die Indices vereinfachend aus, gilt

$$N = k_1(T) \left(\frac{1}{\frac{\text{TempGrad12Hr} \cdot e_1 \cdot e_2}{E}} \right)^{k_2} = k_1(T) \left(\frac{E}{\text{TempGrad12Hr} \cdot e_1 \cdot e_2} \right)^{k_2} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \text{Schadensmenge}(\text{TempGrad12Hr}, \text{ErwPkt}, \text{TempK}, w, y_0, z) &= \frac{1}{N} \\ &= \frac{\text{TempGrad12Hr}^{k_2} \cdot (e_1 \cdot e_2)^{k_2}}{k_1(T) E^{k_2}} \end{aligned} \quad (37)$$

Bis auf den Wert von k_2 , wird der Modellierung von Walther (2015) gefolgt. Die Formeln für k_1 und k_2 die von Walther und einigen anderen Autoren eingesetzt werden, stammen aus Laboruntersuchungen aus den frühen 70er Jahren und wurden für das Dimensionierungsprogramm VESYS II in den USA entwickelt (Rauhut, O'Quin, & Hudson, 1976; Siehe S. 182). Damals wurde bereits bemängelt, dass die Formeln zu einer Übertreibung des Verfalls führen. Rauhut et al. (1976) präsentieren als Alternative eine Arbeit von Kingham (1972). Diese Arbeit verwendet Daten aus dem AASHO Road Test und baut deshalb auf Beobachtungen mit einem wesentlich breiteren Temperaturbereich auf, als dies die Laboruntersuchungen hatten. Es sind Beobachtungen für eine minimale

Durchschnittstemperatur von -15 C vorhanden. Im Modellansatz von Kingham wird der Exponent k_2 als Konstante mit Betrag 5 angenommen. Für die späteren Integralrechnungen ist Kinghams Vorgehen doppelt vorteilhaft. Erstens ist k_2 so keine Funktion der Temperatur und zweitens ist der Wert eine Ganzzahl.

Störend bei den Gleichungen, die sowohl bei Walther wie auch den Vorgängern bis zurück zum Programm VESYS II zur Anwendung kamen, ist die verwendete quadratische Form für die Beziehung zur Referenztemperatur 70 F. Die Gleichungen sind in (38) und (39) aus Walther [S. 12] wieder gegeben.

$$k_1(T) = k_1(70) \cdot 10^{(0.08896(T-70) - 0.0023817(T-70)^2)} \quad (38)$$

$$k_2(T) = k_2(70) - 0.01349(T - 70) + 0.0004624(T - 70)^2 \quad (39)$$

Wobei gilt:

$k_1(70)$	Koeffizient bei 70°F
$k_2(70)$	Exponent bei 70°F
T	Temperatur in °F

Die Wirkung des quadratischen Terms $(T - 70)^2$ wechselt die Richtung bei 70 F. Aber «70 F» hat keine besondere physikalische Bedeutung. Als physikalisches Modell für das Verhalten zwischen -40 F und 140 F ist diese Wirkungsumkehrung unbefriedigend. Das Vorziehen von Kinghams Gleichungen ist auch deshalb zu empfehlen, weil diese auf Werten aus empirischen Versuchen basieren, die bei niedrigen Temperaturen stattfanden. Insgesamt wären Versuchsdaten aus neueren Zeiten und/oder Modellen, die darauf aufbauen, zufriedenstellender. Bis jetzt wurden allerdings keine gefunden.

2.2.3.1 Funktion für den Parameter k_1

Die Formel, die in Rauhut (1976) Kingham zugeschrieben wird und zwar dessen Arbeit von 1972, wird leider in Kingham (1972) nicht angegeben. Rauhut zitiert aber eine Tabelle von Werten, die aus der Formel von Kingham entstanden sein sollen. Mit den Werten lässt sich eine Gleichung rekonstruieren, welche die Formel von Kingham gut approximieren müsste.⁴

Zwei Gleichungsformen wurden ausprobiert. Die erste geschätzte Formel war quadratisch und lautete:

$$k_1 = 10^{18.112 + \frac{(TempK - 220.15)^2}{1000}} \quad (40)$$

Die zweite war exponentiell und lautete:

$$k_1 = \exp[-49.94 + 0.1842 \exp[0.01626 TempK]] \quad (41)$$

Auch hier ist (40) unbefriedigend, da das Verhalten bei -53 C (220.15 K) seine Richtung ändert, wie in Abbildung 16 zu sehen ist. So wurde Gleichung (41) selektiert.

⁴ Diese Grundlage für k_1 ist unbefriedigend. Aber Rauhut lässt keinen Zweifel daran, dass es diese Gleichung gegeben hat und die Werte aus der Tabelle lassen sich sehr genau an eine quadratische Gleichung anpassen.

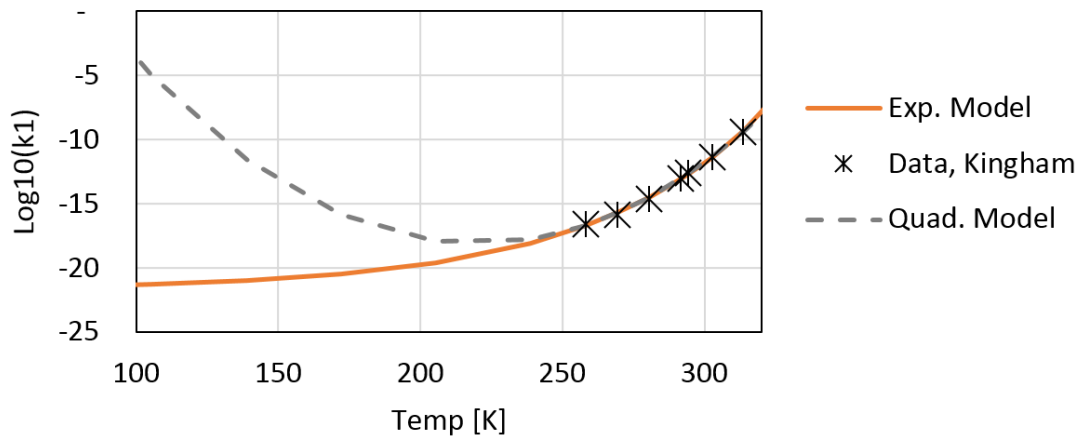


Abbildung 16: Ermüdungsparameter k_1 in Abhängigkeit der Temperatur

2.2.3.2 Bestimmung des Parameters k_2

Der Parameter k_2 wird gleich 5 gesetzt und demnach Rauhut et al. (1976) und dem Modell von Kingham gefolgt.

2.2.3.3 Modell des Schadens durch thermisch erzeugte Rissbildung

Kombiniert man die Elemente von Gleichung (35), lässt sich das Modell des Schadens pro täglichem Temperaturabfall, wie in Abbildung 17, aufzeigen. Die Annahmen zu den weiteren Parameterwerten sind in Tabelle 6 angegeben. Das Verhältnis ist äusserst nichtlinear. Die angegebene Temperatur (TempK) repräsentiert den Tageshöchstwert. Tageshöchsttemperaturen von -13 C (260 K) sind ausserhalb von sehr hoch gelegenen Gemeinden selten anzutreffen. Temperaturgradienten von mehr als 15 C an einem Tag sind auch eher selten. Das gleichzeitige Eintreten beider Umstände muss als sehr unwahrscheinlich gelten.

Auch zu erwähnen ist, dass nachfolgend der Betrag der Temperaturänderung in absoluten Werten angeschrieben wird, da nur die negativen Werte von Interesse sind und «Schaden» anders als Dehnung kein Vorzeichen hat.

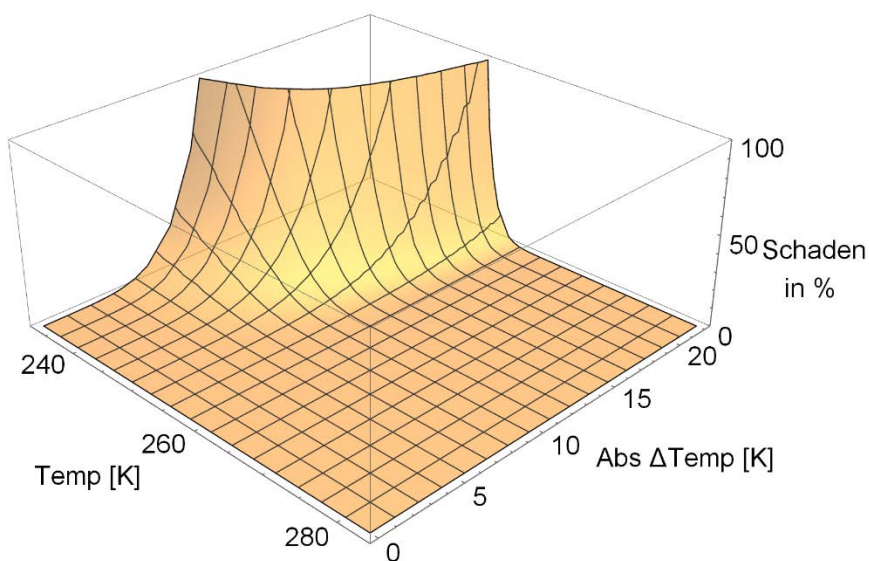


Abbildung 17.: Schaden pro Tag [%] in Abhängigkeit der Temperatur und des Temperaturabfalls; Übersicht.

Abbildung 18 zeigt nur den eher wahrscheinlichen Bereich. Betrachtet man eine zwanzigjährige Gebrauchsdauer und 50 Ereignisse pro Jahr, ergäbe das 1'000 Ereignisse im Leben. So gesehen sind nur Schäden in der Grössenordnung von 1/10 % des Versagensniveaus von Bedeutung. Abbildung 18 zeigt denjenigen Bereich an, in dem der Schaden kleiner als 1/10 % ist. So lässt sich das modellierte Konzept des Schadens aus thermischen Abkühlungszyklen am besten betrachten.

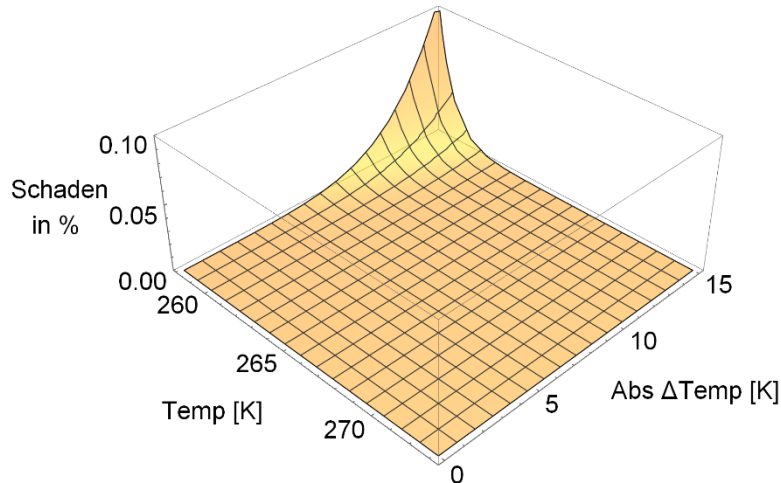


Abbildung 18.: Schaden pro Tag [%] in Abhängigkeit der Temperatur und des Temperaturabfalls; Wahrscheinlicher Bereich; Erweichungspunkt = 56 °C.

Was aber gleichzeitig zu betrachten ist, ist die grosse Bedeutung der Alterung. Abbildung 19 zeigt denselben Bereich, diesmal aber für einen Erweichungspunkt von 66 °C (also +10°C). Der Bereich, bei dem ersichtliche Schadensmengen vorkommen, ist deutlich grösser. Ohne Berücksichtigung der Alterung müsste in einem Normbelag, wie er hier modelliert ist, in den meisten Regionen der Schweiz innerhalb von 20 Jahren wenige thermische Rissbildungen vorkommen. Erst nach der Integration über die Verteilung der Schadensereignisse, sowie über die Zeit, wird die Einwirkung der Alterung ersichtlich.

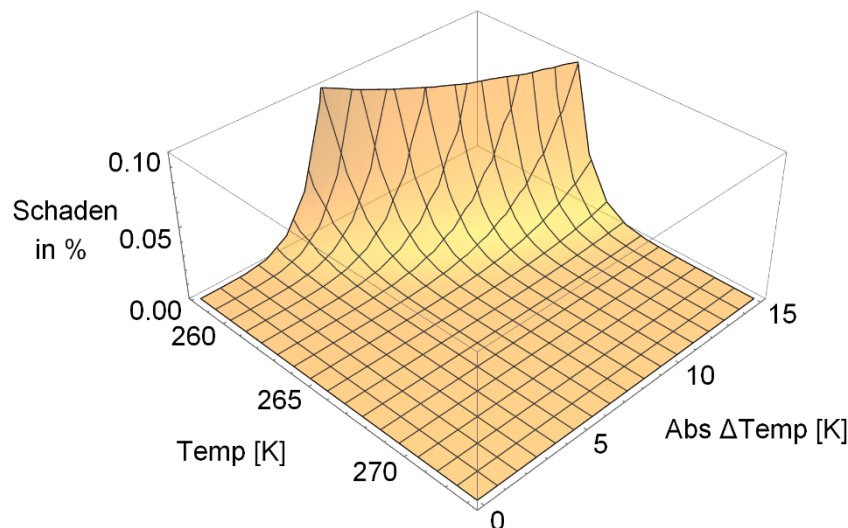


Abbildung 19 Schaden pro Tag [%] in Abhängigkeit der Temperatur und des Temperaturabfalls; Wahrscheinlicher Bereich; Erweichungspunkt = 66 °C.

2.2.4 Berechnung des erwarteten Schadens aufgrund des Klimas; Schritt 2

2.2.4.1 Approximation einer Normalverteilung mit zwei Dreiecken

Die Dichtefunktion für den täglichen Temperaturabfall wird mittels einer doppelten Dreieck-Approximation einer Normalverteilung abgebildet. Die Normalverteilung selbst ist als Produkt mit einer zweiten nichtlinearen Funktion, wie dies im Erwartungswert vorkommt, schwierig zu integrieren. Eine Approximation aus zwei Dreiecken resultiert in einer Summe aus zwei Integralen. Beide Integrale bestehen aus dem Produkt einer Schadensfunktion und einer Geradengleichung. Abbildung 20 zeigt die angewendete Approximation. Die schwarze Linie markiert $x = 2.28\sigma$, wo das erste Dreieck aufhört. Das zweite Dreieck geht bis $x = 3.04\sigma$. Die Summe beider Dreiecke plus das kleine, graue Viereck, ergeben eine Fläche von $1/2$.



Abbildung 20.: Normalverteilung durch zwei Dreiecke approximiert.

2.2.4.2 Erwartungswert über den Temperaturabfall

Die Berechnung des Erwartungswerts ist in Gleichung (42) zu sehen. Vereinfachend wird nur die «rechte» Hälfte der Verteilung berechnet. So müssen negative Schäden nicht behandelt werden. Aus Abbildung 17 ist klar ersichtlich, dass kleinere Temperaturänderungen zu keinen Schäden führen. Daher ist nur die über dem Mittelwert liegende Hälfte massbestimmend für den Erwartungswert. Mit der Doppelten-Dreieck-Annäherung sieht der Mittelwert folgendermassen aus, wobei p_1 und p_2 die zwei Linie-Segmente sind.

$$\int_{\mu}^{2.28\sigma+\mu} f(x) \cdot p_1(x) dx + \int_{2.28\sigma+\mu}^{3.04\sigma+\mu} f(x) \cdot p_2(x) dx \quad (42)$$

Das symbolische Mathematikprogramm Mathematica berechnet Gleichung (43) als Lösung. Der als *TagesTempÄnderungsFaktor* bezeichnete Term interagiert multiplikativ mit allen anderen Termen in der Gleichung, was bedeutet, dass die Klimakomponente «Verteilung der Temperaturveränderungen» lediglich als Skalierungsfaktor fungiert.

$$\begin{aligned} & \text{IntegralEins}(\text{ErwPkt}, \text{TempK}, w, y_0, z, \mu\text{TempGrad12H}, \sigma\text{TempGrad12H}) \\ &= \frac{5 \cdot e1 \cdot e2}{E} \cdot \left(\begin{aligned} & \mu\text{TempGrad12H}^5 + \\ & 4.258 \cdot \mu\text{TempGrad12H}^4 \cdot \sigma\text{TempGrad12H} \\ & + 11.10 \cdot \mu\text{TempGrad12H}^3 \cdot \sigma\text{TempGrad12H}^2 \\ & + 17.73 \cdot \mu\text{TempGrad12H}^2 \cdot \sigma\text{TempGrad12H}^3 \\ & + 16.055 \cdot \mu\text{TempGrad12H} \cdot \sigma\text{TempGrad12H}^4 \\ & + 6.350 \cdot \sigma\text{TempGrad12H}^5 \end{aligned} \right) \quad (43) \end{aligned}$$

Etwas kompakter geschrieben:

$$= \frac{5 \cdot e1 \cdot e2}{E} \cdot \text{TagesTempÄnderungFaktor}(\mu\text{TempGrad12H}, \sigma\text{TempGrad12H}) \quad (44)$$

Das *IntegralEins* ist nicht mehr eine Funktion von einem spezifischen Temperaturabfall an einem Tag, sondern eine Funktion der Verteilungsparameter $\mu\text{TempGrad12H}$ und $\sigma\text{TempGrad12H}$. So sieht man, wie das Konzept «Klima» in einer Verhaltensfunktion umgesetzt wird. Abbildung 21 zeigt die berechnete Fläche. Zu den Annahmen in Tabelle 6 kommt nun $\sigma\text{TempGrad12H} = 3$ dazu.

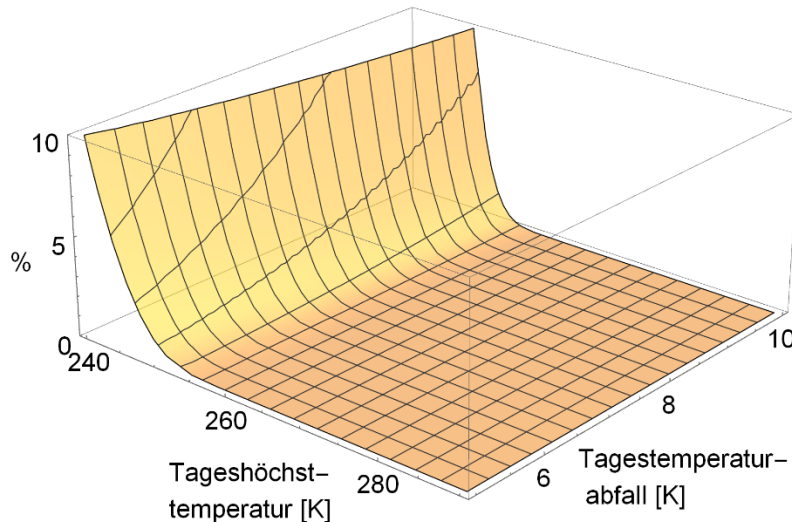


Abbildung 21.: Erwarteter Schaden pro Tag [%] in Abhängigkeit der Verteilung des Tagestemperaturabfalls [K] und der Tageshöchsttemperatur [K].

Eine andere Betrachtungsweise von *IntegralEins* ist in Abbildung 22 zu sehen. Hier wird $\mu\text{TempGrad12H}$ bei 3 konstant gehalten. Letztendlich muss sowohl über die Temperatur wie auch über die Erweichungspunkte integriert werden. Deshalb ist Abbildung 22 sehr bedeutend für den weiteren Verlauf dieser Berechnungen.

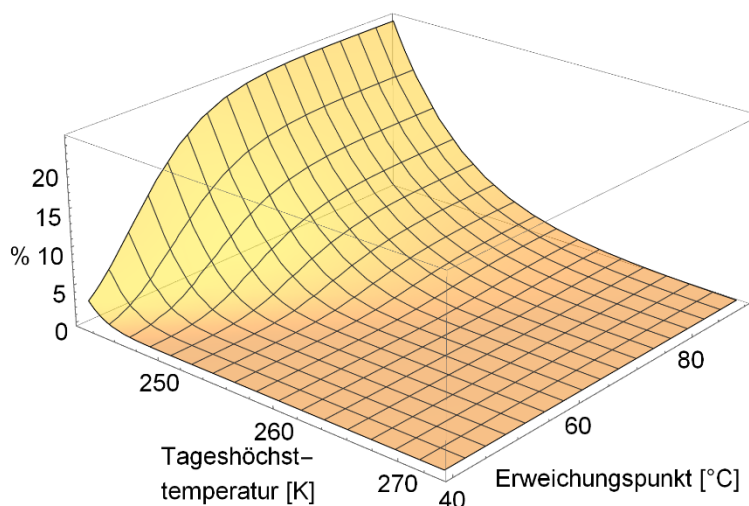


Abbildung 22.: Erwarteter Schaden pro Tag [%] in Abhängigkeit des Erweichungspunkts [°C] und der Tageshöchsttemperatur [K].

2.2.4.3

Erwartungswert über die Verteilung der Tageshöchsttemperaturen über das Jahr

Ausgehend von Abbildung 22 soll ein Erwartungswert über die Verteilung der Tageshöchsttemperaturen gerechnet werden. Das Resultat dieser Berechnung ist der zu erwartende Schaden an einem Tag, der aber keinen spezifisch festgelegten Tag darstellt. Es ist vielmehr ein Durchschnittswert der Tagesschäden über ein Jahr gerechnet.

$$ErwarteterTagesSchadenJahr = \int_{MinTempKJahr}^{MaxTempKJahr} IntegralEins(TempK, \dots) \cdot p(TempK) dTempK \quad (45)$$

Hier wird vereinfachend angenommen, dass diese Verteilung über ein Jahr eine Gleichverteilung ist. Die Dichtefunktion ist demnach:

$$\frac{1}{MaxTempKJahr - MinTempKJahr} \quad (46)$$

Auch bei dieser Vereinfachung lässt sich der Erwartungswert des jährlichen Schadens nicht errechnen. Die Variable $TempK$ kommt in sehr komplexer Weise in der Gleichung (43) vor. Sie kommt in allen Termen e_1 , e_2 und E vor und vermischt sich verschiedentlich mit den anderen unabhängigen Variablen. Es müsste eine Approximation gefunden werden, und zwar so, dass die zu integrierende Variable von den anderen, unabhängigen Variablen getrennt wird. Zudem muss $TempK$ in einem Ausdruck stehen, der eine Stammfunktion besitzt. Die unabhängigen Variablen in $IntegralEins$ sind

$$\{ErwPkt, TempK, w, y_0, z, \mu TempGrad12H, \text{ und } \sigma TempGrad12H\}.$$

Eine gewisse Vereinfachung entsteht, wenn die Parameter w , y_0 und z in der Formel für das E-Modul in Konstanten umgewandelt werden. Nachteilig dabei ist, dass diese Parameter später nicht optimiert werden können. Das hat letztendlich eine Auswirkung auf die Benchmarks. Sowohl kostenmässige Vorteile wie auch Nachteile, die aus einer Anpassung dieser Variablen an die lokalen Bedingungen entstehen könnten, werden nicht berücksichtigt. Hierbei sind die gleichen Argumente anzubringen wie in Abschnitt 2.1.1.1. Mehr Möglichkeiten zu haben, kann nutzen aber nicht schaden. Die später in dem Benchmark berechneten kostenmässigen Vorteile oder Nachteile müssen als äussere Grenzwerte angesehen werden.

Über die zwei Variablen $\mu TempGrad12H$ und $\sigma TempGrad12H$ müssen wir uns nicht sorgen, da der multiplikative Faktor $TagesTempÄnderungsFaktor(\mu TempGrad12H \text{ und } \sigma TempGrad12H)$ sich so oder so durch das Integral verschieben lässt. Somit verbleiben nach dem Ersetzen von w , y_0 und z durch Konstanten nur die zwei zu integrierenden Variablen $ErwPkt$ und $TempK$ übrig.

Eine Annäherung wurde in einer Sigmoidfunktion dieser Variablen gefunden. Dabei sind die Parameter η_1 , η_2 , η_3 und η_4 empirische Anpassungsparameter. Die Anpassung erfolgte visuell in Mathematica. Denkbar bei entsprechenden Daten wäre eine Verlinkung der Parameter w , y_0 und z mit η_1 , η_2 , η_3 und η_4 .

$$Integral1Approx = \eta_4^2 \left(\frac{\eta_1 + \eta_2 ErwPkt - TempK}{\eta_3 \sqrt{\frac{(\eta_1 + \eta_2 ErwPkt - TempK)^2}{\eta_3^2} + 1}} + 1 \right) \quad (47)$$

Die Approximation ist in Abbildung 23 zu sehen.

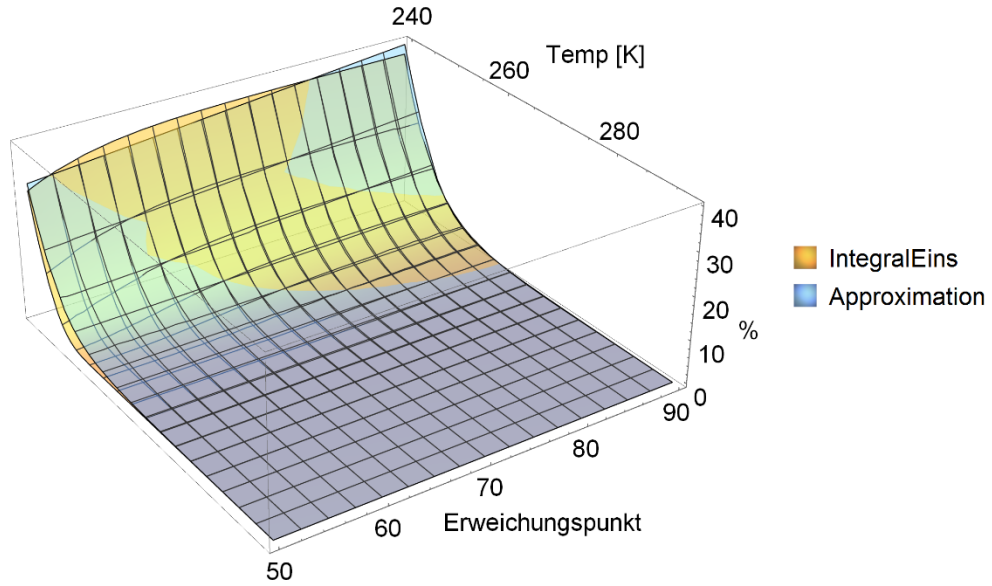


Abbildung 23.: IntegralEins und eine Approximation.

Gleichung (47) besitzt eine Stammfunktion. Die Lösung von (45) ist Gleichung (48). Abbildung 24 zeigt die gerechnete Fläche mit den Parameterwerten in Tabelle 7

$$\begin{aligned}
 \text{ErwarteterTagesSchadenThermischeRissbildung} = & \left(\frac{\eta_4^2 \cdot \text{TagesTempÄnderungFaktor}(\mu\text{TempGrad12H}, \sigma\text{TempGrad12H})}{\text{MaxTempKJahr} - \text{MinTempKJahr}} \right) \cdot \\
 & \left(\begin{aligned} & 2(\text{MaxTempKJahr} - \text{MinTempKJahr}) - \\ & 2\sqrt{\text{MaxTempKJahr}^2 + \eta_1^2 + 2\text{SoftPoint}\eta_1\eta_2 +} \\ & 2\sqrt{\text{SoftPoint}^2\eta_2^2 - 2\text{MaxTempKJahr}(\eta_1 + \text{SoftPoint}\eta_2) + \eta_3^2} + \\ & 2\sqrt{\text{MinTempKJahr}^2 + \eta_1^2 + 2\text{SoftPoint}\eta_1\eta_2 +} \\ & 2\sqrt{\text{SoftPoint}^2\eta_2^2 - 2\text{MinTempKJahr}(\eta_1 + \text{SoftPoint}\eta_2) + \eta_3^2} - \\ & \eta_3 \arctan\left[\frac{\text{MaxTempKJahr} - \eta_1 - \text{SoftPoint}\eta_2}{\eta_3}\right] + \\ & \eta_3 \arctan\left[\frac{\text{MinTempKJahr} - \eta_1 - \text{SoftPoint}\eta_2}{\eta_3}\right] \end{aligned} \right) \quad (48)
 \end{aligned}$$

Tabelle 7.: Annahmen für Abbildung 24.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
MaxTempKJahr [K]	315	η_2	0.0487
$\mu\text{TempGrad12H}$ [K]	7.5	η_3	12.58
$\sigma\text{TempGrad12H}$ [K]	3	η_4	0.001859
η_1	239.1		

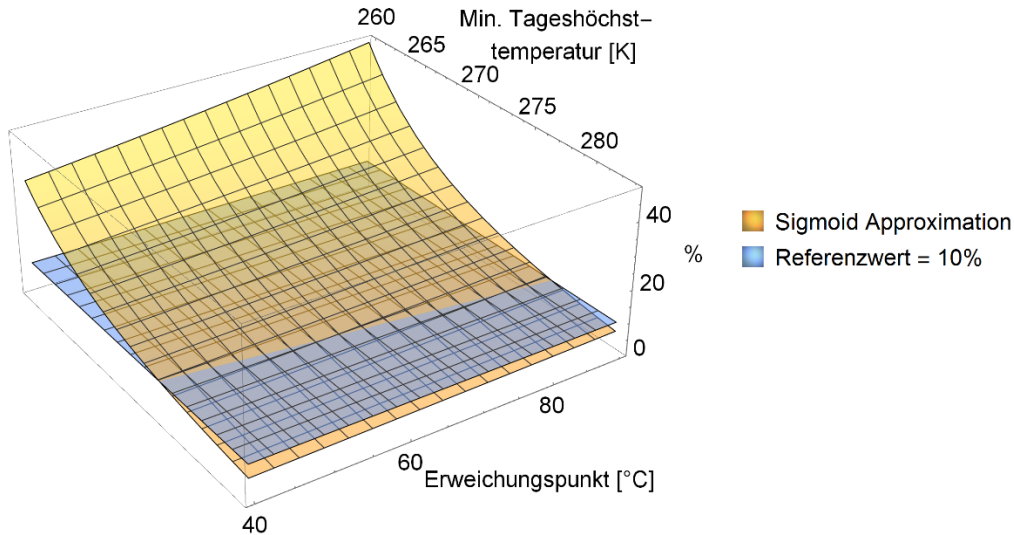


Abbildung 24.: Erwarteter Schaden pro Tag [%] durch thermisch erzeugte Ermüdungsrisse in Abhängigkeit der minimalen Tageshöchsttemperatur [K] und dem Erweichungspunkt [°C].

2.2.5 Berechnung des Verlaufs des Schadensindexes für thermische Rissbildung; Schritt 3

Ausser des Erweichungspunktes sind alle Variablen in der Gleichung (48) vom Ort abhängig. Sie verändern sich nicht über die Zeit. Bei den Parametern $\eta_{1...4}$ wird angenommen, dass sie konstant bleiben. Eine lineare Verschiebung des Erweichungspunktes bildet die Alterung ab, so wie dies für die Spurrinnenbildung auch angenommen wurde.

$$ErwPkt_t = ErwPktNeu + \eta_5 \text{Alter} \quad (49)$$

Die Alterung pro Jahr wird mit dem Parameter η_5 angegeben. Es erhält den gleichen Wert wie bei der Spurrinnenbildung: 0.25. Gleichung (49) wird in (48) eingewechselt und danach über die Zeit integriert mit $\text{Alter} = t$.

$$\begin{aligned} \text{SchadenIndexThermRiss} & \left(\begin{array}{l} \text{TimeEnd, ErwPktNeu, TempKMinJahr,} \\ \text{TempKMaxJahr, } \eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \\ \mu\text{TempGrad12H, } \sigma\text{TempGrad12H} \end{array} \right) \\ &= \int_0^{\text{TimeEnd}} 365 \cdot \text{ErwarteterTagesSchadenJahr}(\text{Alter}(t), \dots) dt \end{aligned} \quad (50)$$

Mathematica kann diesen bestimmten Integral lösen. Die Lösung lässt sich aber aus Platzgründen kaum weitergeben. Ein Abbild davon ist im Anhang 2 zu sehen.

Über die drei Integrationsschritte ist es möglich eine empirische Grösse zu berechnen, die am ehesten mit einem I^0 -Index zu vergleichen ist, wenn auch in vereinfachter Form. Das lokale Klima mit den Variablen TempKMinJahr , TempKMaxJahr , $\mu\text{TempGrad12H}$ und $\sigma\text{TempGrad12H}$ bestimmt zusammen mit der Dimensionierung ErwPktNeu , η_1 , η_2 , η_3 und η_4 den zu erwartenden Zustand zum Zeitpunkt TimeEnd . Abbildung 25 zeigt die berechneten «Indexwerte» nach 25 Jahren.

Tabelle 8.: Annahmen für Abbildung 25.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
$TimeEnd$ [Jahre]	25	η_1	239.1
$ErwPktNeu$ [°C]	56	η_2	0.0487
$TempKMaxJahr$ [K]	315	η_3	12.58
$\sigma TempGrad12H$ [K]	3	η_4	0.001859
		η_5	0.25

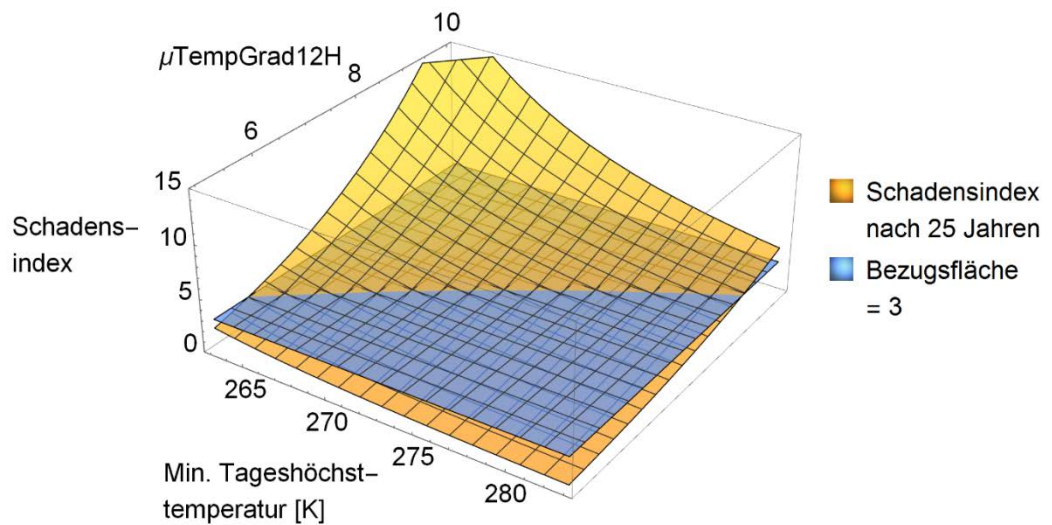


Abbildung 25.: Schadensindex für die thermisch erzeugten Ermüdungsrisse nach 25 Jahren in Abhängigkeit der minimalen Jahrestemperatur [K] und des durchschnittlichen Temperaturgradienten [K].

2.2.6 Formulierung einer Approximation des Schadensindex mit besseren mathematischen Eigenschaften für eine Weiterverarbeitung; Schritt 4

2.2.6.1 Auslösung der Variable für die Zeit

Für die weitere mathematische Berechnungen ist es nötig eine Approximation von Gleichung (50) zu finden, die nach Variable $TimeEnd$ zu lösen ist. Das Vorgehen gleicht dem in Abschnitt 2.1.3.4. Gleichung (50) wird für einen bestimmten Wert von $TimeEnd$ evaluiert. Dies ergibt eine Funktion mit allen anderen Variablen und Parametern, welche aber nicht mehr $TimeEnd$ beinhaltet. Danach wird versucht mit einer einfachen Funktion aus $TimeEnd$ eine Approximation der ursprünglichen Fläche zu finden. Es stellt sich heraus, dass eine lineare Funktion der Zeit gut funktioniert.

$$\begin{aligned}
 & \text{SchadenIndexThermRiss} \left(\begin{matrix} \text{TimeEnd}, \text{ErwPktNeu}, \text{TempKMinJahr}, \\ \text{TempKMaxJahr}, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \\ \mu\text{TempGrad12H}, \sigma\text{TempGrad12H} \end{matrix} \right) \\
 & \cong \text{SchadenIndexThermRiss}_{20} \left(\begin{matrix} \text{TimeEnd} = 20, \text{ErwPktNeu}, \text{TempKMinJahr}, \\ \text{TempKMaxJahr}, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \\ \mu\text{TempGrad12H}, \sigma\text{TempGrad12H} \end{matrix} \right) \quad (51) \\
 & \frac{\text{TimeEnd}}{20}
 \end{aligned}$$

Die originale Gleichung und die Approximation sind in Abbildung 26 zu sehen. Die Annahmen sind gleich wie in Tabelle 8. Ein Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die Approximation bei Alter = 20 Jahren exakt ist und dass auch bei allen Variationen der anderen Variablen.

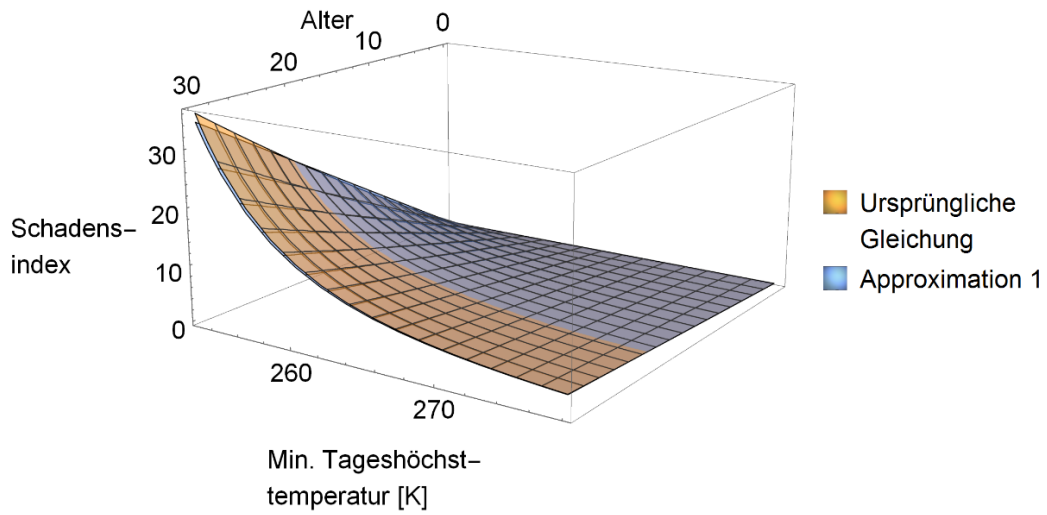


Abbildung 26.: Approximation 1 des Schadensindex für thermisch erzeugten Ermüdungsrisse.

3 Zusammenfügen der Einzelschadensindices in einen Gesamtzustandsindex

Die Problemstellung ist ähnlich wie bei der Konstruktion des I^1 -Indexes und seiner Beziehung zum Index I^0 . I^0 ist gleich I^1 aber mit Ausschluss der Spurrinnenbildung. Der Index I^1 kombiniert mehrere Schadenstypen über eine gewichtete Summe von «Matrixwerten», die im Prinzip Indices der Einzelschäden sind. Hinter den Indices stehen physikalische Grössen die im Prinzip messbar sind (VSS, 2003). Die Berechnung eines kombinierten Indexes benötigt so zwei Schritte. Zuerst werden die physischen Grössen in Zwischenwerte umgerechnet, danach werden die Zwischenwerte gewichtet und summiert. Die Umrechnungsfaktoren sind η_8 und ϕ_8 . Die «Matrixwerten» sind ρ_1 und $(1 - \rho_1)$. Schematisch ist dies

$$\text{GesamtZustandsIndex} = \rho_1(\eta_8 \text{SchadenIndexThermRiss}) + (1 - \rho_1)(\phi_8 \text{SchadenIndexSpurrinnen}) \quad (52)$$

Formel steht Gleichung (53) für die Gesamtzustandsindex. Eine kleine Umformatierung zeigt in (54), dass der Gesamtzustandsindex ein Polynom zweiten Grades in der Variable $\sqrt{\text{TimeEnd}}$ ist. Dies ist insofern wichtig, weil solche Gleichungen umkehrbar sind.

$$\begin{aligned} \text{GesamtZustandsIndex} = & \rho_1(\eta_8 \text{SchadenIndexThermRiss} - 20 \eta_6 \text{TimeEnd}) \\ & + (1 - \rho_1) \phi_8 \left(\left(2.5 - \frac{\beta_2}{\sqrt{5}} \right) + \left((a \beta_1) f \phi_1(\text{MinT}, \text{MaxT}, \text{ErwPktNeu}) \phi_2 + \left(2 \beta_2 \frac{\sqrt{a}}{10^5} \right) \sqrt{\text{TimeEnd}} \right. \right. \\ & \left. \left. + ((a \beta_1) f \phi_1(\text{MinT}, \text{MaxT}, \text{ErwPktNeu}) \phi_3) \text{TimeEnd} \right) \right) \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \text{GesamtZustandsIndex} = & + (1 - \rho_1) \phi_8 \left(2.5 - \frac{\beta_2}{\sqrt{5}} \right) \\ & + \left[(1 - \rho_1) \phi_8 \left((a \beta_1) f \phi_1(\text{MinT}, \text{MaxT}, \text{ErwPktNeu}) \phi_2 + \left(2 \beta_2 \frac{\sqrt{a}}{10^5} \right) \sqrt{\text{TimeEnd}} \right) \right] \sqrt{\text{TimeEnd}} \\ & + \left[(1 - \rho_1) \phi_8 ((a \beta_1) f \phi_1(\text{MinT}, \text{MaxT}, \text{ErwPktNeu}) \phi_3) \right] \text{TimeEnd} \\ & + \rho_1(\eta_8 \eta_6 \text{SchadenIndexThermRiss} - 20) \end{aligned} \quad (54)$$

3.1 Empirische Anpassung

Dieser Schritt ist eigentlich erst möglich, wenn die Funktion `ZeitBisErneuerungTech()` bereits steht und diese Funktion wird erst im Abschnitt 4.2 eingeführt. Da es aber in die Reihenfolge des Modellaufbaus hierher gehört, erklären wir die Anpassung bereits jetzt.

Für die empirische Anpassung wurden die Zustandsdaten aus dem Kanton Tessin verwendet. Tessin stellte dem Projekt alle drei benötigten Index Reihen zu Verfügung: I^0 , I^1 sowie I^3 . Es wird in zwei empirischen Schritten vorgegangen. Zuerst werden die zwei Einzelschadensindices skalenmässig über die Parameter η_8 und ϕ_8 angepasst. Danach

wird der Parameter ρ_1 geschätzt. ρ_1 bestimmt die Gewichtung der Einzelindizes im Gesamtzustandsindex.

$$Verfallsrate_{i,t_1,t_2} = \frac{Zustand_{i,t_2} - Zustand_{i,t_1}}{t_2 - t_1} \quad (55)$$

Obwohl nur Daten aus dem Tessin für diesen Schritt verwendet werden, bedeutet dies nicht, dass sich das Modell nur für das Tessin eignet. Es werden Modellwerte für das Tessin an Beobachtungen im Tessin angepasst. Daraus entsteht keine Übertragung der Eigenheiten des Tessins an die übrige Schweiz. Die Zustandsindizes sind national genormt und es geht hier um eine Anpassung des Modells an die Skallierung der Zustandsindizes.

3.1.1.1 Detailliertes Vorgehen

Gruppiert man solche Beobachtungen entweder aufgrund der erste Zustandsbeobachtung oder aufgrund der zweite Zustandsbeobachtung, lässt sich ein Gruppendurchschnitt errechnen. Zum Beispiel könnte man den Durchschnitt aller Verfallsraten berechnen, wo die erste Zustandsbeobachtung zwischen 0.2 und 0.4 lag. Danach lässt sich einen Zeitraum berechnen, den es im Durchschnitt braucht, um von einem Wert 0.2 bis zu einem Wert 0.4 zu verfallen. Wenn $v_{[0.2, 0.4]}$ diese durchschnittliche Verfallsrate ist, dann lässt sich so der entsprechende Zeitraum $\tau_{[0.2, 0.4]}$ berechnen.

$$\tau_{[0.2, 0.4]} = \frac{0.4 - 0.2}{v_{[0.2, 0.4]}} \quad (56)$$

Somit erhält man einen Satz von Paaren $\left\{ \tau_{[z_j - \Delta z, z_j]}, v_{[z_j - \Delta z, z_j]} \right\}$, eins für jedes Element in einer Reihe von spezifischen Zustandswerten $z_j = j \cdot \Delta z$. Der Index j wird so bestimmt durch: $j \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{5}{\Delta z} \right\}$. Zum Beispiel für $\Delta z = 0.2$ erhält man die Reihe $\{ 0.2, 0.4, 0.6, \dots, 4.8, 5 \}$. Die Zeit T_j bis ein spezifisches Auslösungswert z_j erreicht wird, kann als Summe gerechnet werden.

$$T_j = \sum_{j=1}^{j=z_j / \Delta z} \tau_{[z_j - \Delta z, z_j]} \quad (57)$$

Der korrespondierender Zustand ist z_j .

Die gesuchte Verfallskurve besteht aus linearen Segmenten zwischen den Punkten $\{T_j, z_j\}$. Ein Beispiel einer so gerechneten empirischen Verfallskurve ist in Abbildung 27 gezeigt. Sie ist empirisch und nicht modelliert, da der ganze Verlauf eigentlich eine Statistik der Daten ist, wie ein Durchschnittswert oder eine Standardabweichung.

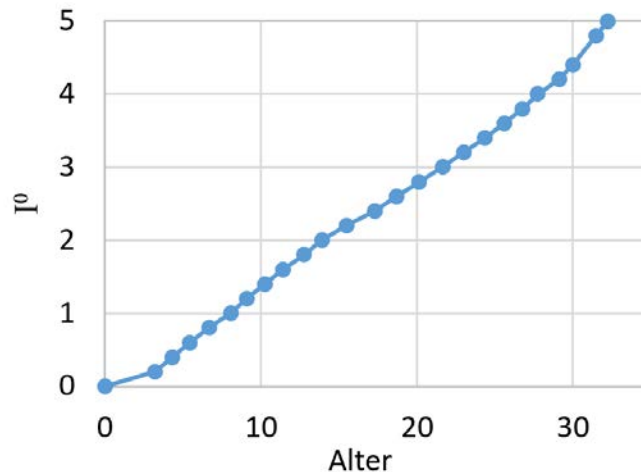


Abbildung 27 Beispiel einer empirischen Verfallskurve gemäss I^0

3.1.1.2 Datenbereinigung

Bevor die Gruppendurchschnitten gerechnet werden, müssen die Zustandsbeobachtungen gefiltert werden, um Zustandsverbesserungen aufgrund von Erhaltungsmassnahmen auszuschliessen. Um aber zu verhindern, dass das Filterieren die Gruppendurchschnitte systematisch verzerren, wurden die Zustandsänderungen aufgrund von einem zweiten Index-Wert gefiltert. Also, das I^3 wurde gebraucht um die I^1 Daten zu Filtern und umgekehrt. Das Vorgehen geht davon aus, dass wenn eine Massnahme vorliegt, dann werden beide Indices merklich verbessert. Aber bei einem Messfehler, ist es relativ unwahrscheinlich, dass bei beiden Indices ein grosser Fehler in die gleiche Richtung passiert.

3.1.2 Bestimmung der Skalierungsparametern η_8 und φ_8

Das Modell berechnet für spezifischen klimatischen und verkehrsmässigen Umständen eine erwartete Zeit bis ein Auslösungszustand erreicht wird. Es lässt sich über alle Strassenabschnitten eines Kantons der Durchschnitt davon errechnen. Die oben beschriebene Verfallskurve für denselben Kanton kann als Skalierungsmass herangezogen werden. Im Falle von η_8 , wurde der I^0 in Abbildung 27 gebraucht. η_8 wurde so bestimmt, dass der Durchschnittswert des berechneten Schadensindex für thermische Risse für Strassenabschnitte in Tessin nach 22 Jahren ein Wert von 3 erreicht.

Dasselbe Vorgehen wurde für den Parameter φ_8 verwendet.

3.2 Bestimmung der Gewichtungsfaktor ρ

Für den Kanton Tessin liegen Beobachtungen für drei Zustandsindices vor: I^0 , I^1 sowie I^3 . Es wird postuliert, dass im Durchschnitt eine Beziehung wie folgt bestehen wird.

$$I^1 = b_1 \cdot I^0 + b_2 \cdot I^3 \quad (58)$$

Die Parameter b_1 und b_2 können mit einer linearen Regression geschätzt werden. Diese wurden dann gebraucht, um den Parameter ρ zu bestimmen.

$$\rho = \frac{b_1}{b_1 + b_2} \quad (59)$$

Die Regressionsresultate sind in Tabelle 9

Tabelle 9 Regression für die Bestimmung der Gewichtung zwischen den Einzelschadensindices

Statistik	Wert
R-Quadrat	0.9932
Adj. R-Quadrat	0.9932
Std. Abweichung	0.2007
Beobachtungen	44218

Variable	Koeff.	Std. Abw	t-Stat.	P-Wert
CS I0	0.7570	0.0008	916.7	0
CS I1	0.2821	0.0011	262.9	0

Die zwei Koeffizienten summieren fast auf 1: $0.757 + 0.282 = 1.039$; wie dies aus der Beziehung zwischen den Indices zu erwarten wäre.

3.3 Empirische Anpassung des Modells am I^1

Modellwerte lassen sich ebenfalls für alle Strassenabschnitte in der Datenbank rechnen. Somit erhalten wir für jeden Strassenabschnitt eine vorhergesagte Gebrauchsdauer, bis der I^1 den Wert drei erreicht. Drei wurde verwendet, weil es als Mittelwert des Auslösungszustands in der Praxis von uns vermutet wurde. Es wird somit zum Angelpunkt, wo die Anpassung am besten sein wird.

Genau so wie man die Beobachtungen nach Kantonen oder Gemeinden einteilen kann, kann man die Beobachtungen nach einem anderen Merkmal in Untergruppen einteilen. Ein solches Merkmal bildet die vom Modell vorausgesagte Zeit bis $I^1 = 3$ erreicht wird. Zum Beispiel lässt sich eine Gruppe bilden, aus schweizweit allen Abschnitten mit einer vorhergesagten Zeit bis $I^1 = 3$ von zwischen 20 und 21 Jahren. Aus dieser Gruppe lässt sich eine empirische Verfallskurve mit den Differenzwerten zwischen zwei Zustandsaufnahmen, wie oben erklärt, berechnen.

Der Datensatz, den das Projekt aus den Daten der teilnehmenden Kantone berechnet hat, beinhaltet mehr als 500,000 Abschnitte. Etwa die Hälfte davon konnte für die Anpassung verwendet werden, weil bei diesen sämtliche benötigte Merkmale vorhanden waren. Weil diese Datenmenge so gross ist, und weil die Schweiz einer ausserordentlichen Vielfalt von Kombinationen von Einflussfaktoren besitzt, war es möglich 37 verschiedene I^1 Verfallskurven zu berechnen. Der Gesamtdatensatz wurde in etwa gleich grosse Gruppen von ca. 10'000 Abschnitten unterteilt, wobei die Abschnitte in aufsteigender Reihenfolge ihrer vorhergesagten Gebrauchsdauer eingeteilt wurden. Eine Einteilung in genau gleich grosse Gruppen war nicht möglich, weil viele Gebrauchsdauerwerte mehrfach vorkamen und die Zuteilung nach diesen Werten erfolgten. Die Gruppeneinteilung kann in Tabelle 10 gesehen werden.

Tabelle 10 Gruppenbildung für die Berechnung von Verfallskurven

Kurve ID	Anzahl Segmente pro Kurve	Gruppe Anfangswert (Jahre)	Gruppe Endwert (Jahre)	Gruppe Mittel-wert (Jahre)	Berechnete Jahre bis I1 = 3
1	15	18.92	20.2	19.6	21.37
2	15	20.2	20.45	20.3	19.88
3	15	20.45	20.68	20.6	23.25
4	15	20.68	20.86	20.8	17.98
5	15	20.86	21.02	20.9	30.25
6	15	21.02	21.11	21.1	22.84
7	15	21.11	21.27	21.2	18.89
8	15	21.27	21.42	21.3	23.96
9	15	21.42	21.6	21.5	19.69
10	15	21.6	21.75	21.7	20.25
11	15	21.75	21.92	21.8	22.07
12	15	21.92	22.11	22	25.89
13	15	22.11	22.22	22.2	22.34
14	15	22.2	22.37	22.3	23.26
15	15	22.37	22.59	22.5	20.7
16	15	22.59	22.76	22.7	24.94
17	15	22.76	22.93	22.8	19.35
18	15	22.93	23.14	23	21.08
19	15	23.14	23.37	23.3	24.53
20	15	23.37	23.48	23.4	25.1
21	15	23.48	23.66	23.6	24.02
22	15	23.66	23.83	23.7	22.57
23	14	23.83	24.1	24	21.71
24	15	24.1	24.52	24.3	20.46
25	14	24.5	24.64	24.6	25.33
26	15	24.64	25.01	24.8	20.57
27	15	25.01	25.35	25.2	26.76
28	15	25.35	25.84	25.6	21.57
29	15	25.84	26.2	26	21.58
30	14	26.2	26.82	26.5	28.67
31	15	26.82	27.2	27	22.84
32	15	27.2	27.39	27.3	28
33	12	27.39	28.13	27.8	47.48
34	15	28.13	29.04	28.6	27.91
35	15	29.04	31.61	30.3	31.04
36	15	31.6	35.47	33.5	29.15
37	10	35.47	41.33	17.7	n.a

Jede Kurve kann aus bis zu 25 Segmenten bestehen aber die meisten enden vorher, wegen fehlender Daten. Jedes Segment deckt eine Zustandsbandbreite von 0.2 Indexeinheiten ab und der I^1 geht von 0 bis 5, was maximal 25 Segmente ergibt. Für jedes Segment muss aber eine durchschnittliche Verfallsrate berechnet werden. Es wurde für jede einzelne durchschnittliche Verfallsrate 20 Beobachtungen vorausgesetzt. 20 x 25 ist zwar nur 500, aber die Verteilung der beobachteten Werte von I^1 ist sehr inhomogen über die möglichen Werte zwischen 0 und 5. Somit hatten gewisse Segmente wesentlich mehr als zwanzig Beobachtungen. Auch mit rund 10'000 Beobachtungen insgesamt, gab es einzelne Zustandsbandbreiten in einzelnen Gruppen mit weniger als 20 Beobachtungen. Deshalb sieht man einzelne Werte in der ersten Spalte in Tabelle 10, die weniger als 15 sind. 15 ist die Anzahl Segmente zwischen 0 und 3 mit einer Bandbreite von 0.2.

Abbildung 28 zeigt 8 der 35 empirischen Verfallskurven die für die Regression verwendet wurden. Die drei Kurven mit Punkten dienen nur zur Verständlichkeit und haben keine weitere Bedeutung. Jedes Segment verbindet zwei Punkte. Die ersten Segmente sind nicht angezeigt, verbinden aber 0 mit dem ersten Punkt jeder Reihe.

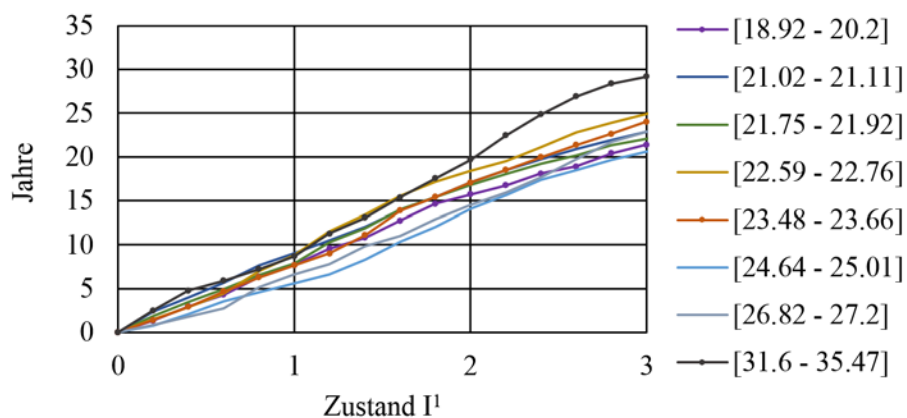


Abbildung 28 Auszug aus die berechneten empirischen Verfallskurven

Dort wo ein Segment weniger als 20 Beobachtungen hatte, und deshalb fehlte, wurde die Verfallsrate der nächst höheren Zustandsbandbreite angewendet. Kurven bei dem mehr als ein Segment fehlte, wurden für die folgende Regressionsanalyse nicht einbezogen. Somit ergab es 35 potentielle Beobachtungen für die empirische Anpassung.

Diese Grunddaten lassen sich als Plot darstellen.

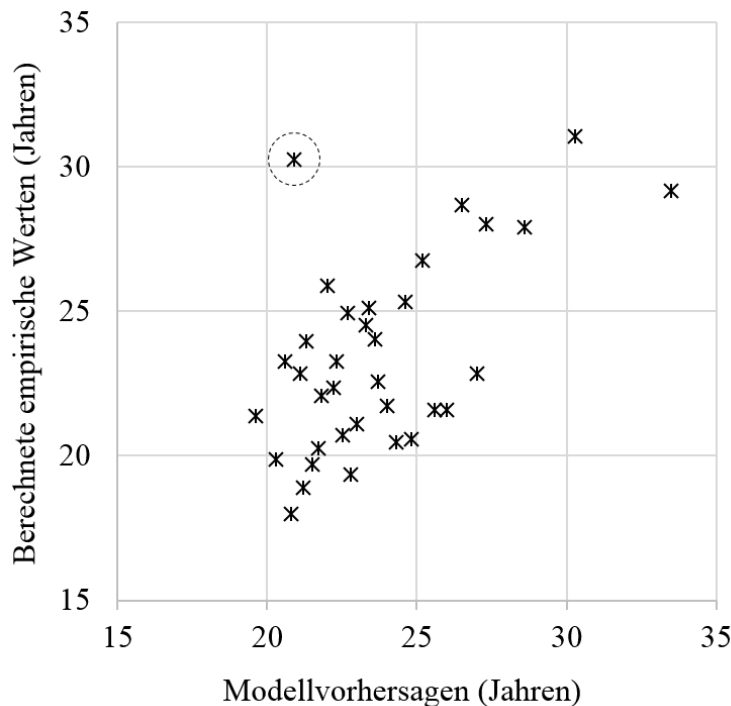


Abbildung 29 Potentielle Regressionsdaten: Modell im Vergleich zu den berechneten empirischen Zeiten bis $I^1=3$

Die eingekreiste Beobachtung (Kurve 5) ist gemäss unserer Meinung ein Ausreisser. Sie wurde deshalb aus der Regression ausgeschlossen. Alle qualitativen Schlussfolgerungen werden dadurch nicht verändert.

Aus diesen Werten kann folgende Regressionsgleichung geschätzt werden

$$\text{EmpirischeWert}_i = \beta_0 + \beta_3 \text{ModellierteWert}_i + \varepsilon_i \quad (60)$$

Die Regressionsresultate sind in Tabelle 11 zu sehen. Die Regression kann auch als empirischer Test des Verfallsmodells angesehen werden. Getestet wäre dann die Null-Hypothese, dass der Koeffizient auf der Modellvorhersage nicht signifikant grösser als Null ist. Die Null-Hypothese wird verworfen, wenn der Regressionsparameter auf der Modellprognose statistisch signifikant positiv ist. Der P-Wert, der die Wahrscheinlichkeit der Wahrheit der Null-Hypothese angibt, ist 0.000005. Dies ist sicherlich ausreichend klein. Auch von Interesse ist die Grösse des Standard-Fehlers. Mit 2.3 Jahren verglichen mit der Prognose von Werten zwischen 20 und 35, ist dies relativ klein. Der geschätzte Koeffizient auf das Modell ist kleiner als 1. Das Modell, auch nach der ersten Skalierung an die Indices I^0 und I^3 , scheint empfindlicher auf die Einflussfaktoren zu reagieren als die Wirklichkeit. Der Wert von 0,743 dämpft die nicht-kalibrierten Modellwerten ab.

Die Rolle der Konstante ist es, eine lokale Anpassung möglich zu machen. Die Anpassung hat als Ankerpunkt die Zeit, bei dem der Zustand $I^1=3$ erreicht wird. Geht man von 3 nach oben oder nach unten weg, werden die Vorhersagen in beiden Richtungen zusehends schlechter.

Tabelle 11 Regression für die Anpassung von I^1 .

Statistik	Wert
R-Quadrat	0.49
Adj. R-Quadrat	0.47
Std. Abweichung	2.33
Beobachtungen	34

Variable	Koeff.	Std. Abw	t-Stat.	P-Wert
Konstante	5.532	3.236	1.710	0.097
Model Prognose	0.743	0.135	5.509	0.000005

Die Regressionslinie ist in der Abbildung 30 zu sehen.

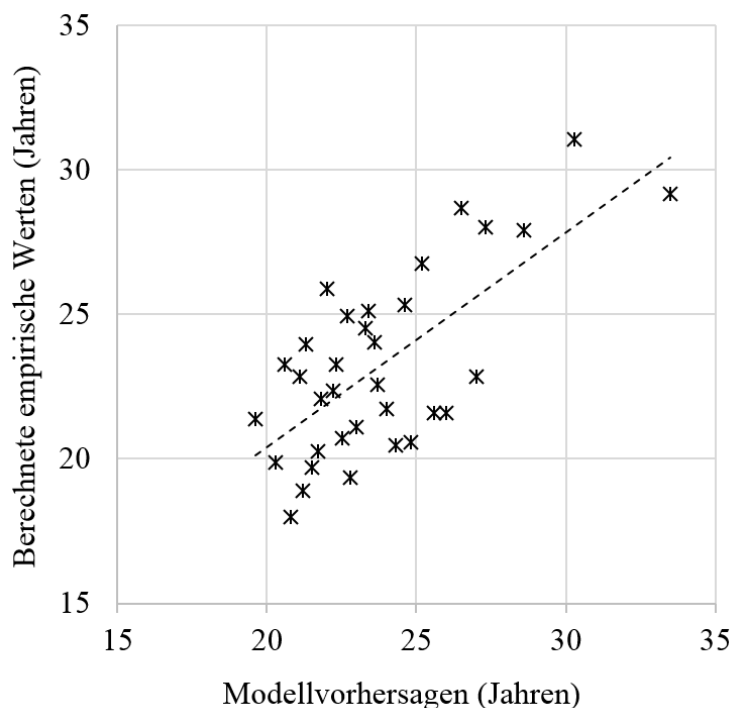


Abbildung 30 Nicht kalibriertes Modell gegenüber empirischen Werten: Zeit bis $I1 = 3$

3.4 Gesamtzustandsindex

Es lässt sich nun mit den angepassten Parameterwerten der Gesamtzustandsindex berechnen und als Grafik präsentieren.

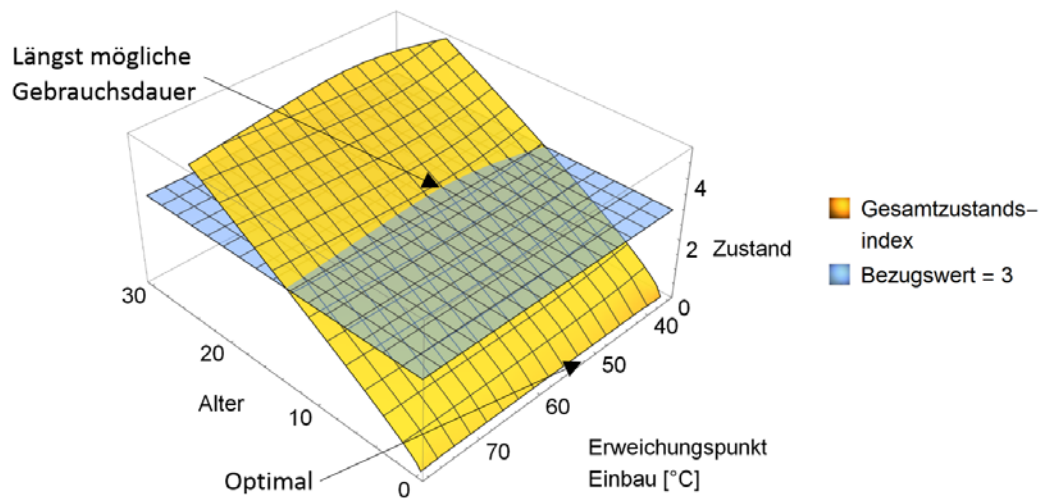


Abbildung 31: Index des Gesamtzustands in Abhängigkeit der Zeit [Jahre] und des Erweichungspunktes [°C].

Bei genauerer Betrachtung von Abbildung 31 wird ersichtlich, dass es für das angenommene Klima und Verkehrsaufkommen und einen angenommenen Auslösungszustand von 3 (i.e. *GesamtZustandIndex* = 3) eine optimale Auswahl für den Erweichungspunkt beim Einbau gibt. Der optimale Erweichungspunkt liegt dann ungefähr bei 60 C. Man erkennt also, dass das Modell bei Vorgabe eines Auslösungszustands und der dafür benötigten Dimensionierungsparameter eine maximal zu erwartende Gebrauchsdauer als Resultat angibt. Das ist das, was mit einer Dimensionierungsfunktion gemeint ist. Diese Funktion gilt es als nächstes herzuleiten. Danach wird in den Formeln anstelle des Parameters *ErwPktNeu* die neu hergeleitete Funktion für den optimale Erweichungspunkt gesetzt.

4 Herleitung der Dimensionierungsfunktion für den Erweichungspunkt beim Einbau; Schritt 5

Die Herleitung selbst hat zwei Schritte die mit 5a und 5b bezeichnet werden. In 5a wird die Gleichung *GesamtZustandIndex()* nach der Variable *TimeEnd* «gelöst». Aus der unabhängigen Variablen *TimeEnd* wird die abhängige Variable *ZeitBisErneuerung*. Aus der abhängigen Variablen *GesamtZustandIndex* wird die unabhängige Variable *AuslöseZustand*. Das Resultat ist eine Formel für die Zeit bis der Auslösezustand erreicht wird. Das Symbol () steht für eine Funktion.

Um diese erste Formel von seiner späteren optimierten Version zu unterscheiden, wird die Erste als *ZeitBisErneuerungTech()* bezeichnet. Wir beziehen uns dabei auf die Unterscheidung in der Wirtschaftsliteratur zwischen der mathematischen Beschreibung aller Möglichkeiten und der mathematischen Beschreibung der optimalen Möglichkeiten. Die zweite, optimale Form wird als *ZeitBisErneuerungOpt()* bezeichnet.

In Schritt 5b wird die unabhängige Variable *ErwPktNeu* durch die neue Formel *ErwPktNeuOpt()* ersetzt. Diese gibt den optimalen Erweichungspunkt beim Einbau für jede Konstellation der unabhängigen Variablen in der Formel *ZeitBisErneuerungTech()* an. *ErwPktNeuOpt()* ist ein Beispiel für das, was wir als Dimensionierungsfunktion bezeichnen. In der Wirtschaftsliteratur wäre dies eine Nachfragefunktion.

Nach Einwechslung der Dimensionierungsfunktion wird die neu entstandene Funktion *ZeitBisErneuerungOpt()* als «Produktionsfunktion» bezeichnet. In der Wirtschaftsliteratur werden die Schritten 5a und 5b unter Berücksichtigung der Preise der zur Auswahl stehenden Materialien ausgeführt. Im Falle vom Erweichungspunkt wird angenommen, dass es keinen relevanten Preisunterschied für Bitumen mit unterschiedlichem Erweichungspunkt gibt.

Bevor diese Schritte ausgeführt wurden, wurde folgende Substitution ausgeführt:

$$\begin{aligned} TempKMaxJahr &= TempKMeanJahr + \frac{1}{2} TempKBereichJahr \\ TempKMinJahr &= TempKMeanJahr - \frac{1}{2} TempKBereichJahr \end{aligned} \quad (61)$$

Es soll eine Beschreibung des Klimaeinflusses mit zwei neuen Variablen ermöglichen, eines für die Spannweite des Temperaturbereichs und eines für den Mittelwert dieses Bereiches. Dies ersetzt die Variablen für die maximale und minimale Temperatur. So lässt sich in den Graphiken der Einfluss der *Spannweite* des Temperaturbereichs veranschaulichen. Vermutet wird, dass eine optimale Auswahl des Erweichungspunktes mit dem, was als kälteres oder wärmeres Klima bezeichnet wurde, zusammenhängt. Dieser Gedanke wird mit dem Mittelwert des Temperaturbereiches empirisch umgesetzt. Aber, je breiter die Spannweite des Temperaturbereichs ist, desto schwieriger wird es bei Extremwerten Schaden zu vermeiden. So müsste die Grösse des Temperaturbereichs eher mit höheren Kosten verbunden sein als Kälte oder Wärme alleine.

4.1 Lösen nach der «Zeit bis zur Erneuerung»; Schritt 5a

Es wurde in den Modellierungsschritten bisher daraufhin gearbeitet, dass Gleichung (54) als niedrig-gradiges Polynom in der Zeit ausfällt. Gleichung (54) hat zwei Wurzeln, die in der Abbildung 1 zu sehen sind. Bei der ersten Wurzel ist die «Zeit bis zur Erneuerung» negativ und bei der zweiten Wurzel ist sie positiv. Die positive Wurzel wurde ausgewählt.

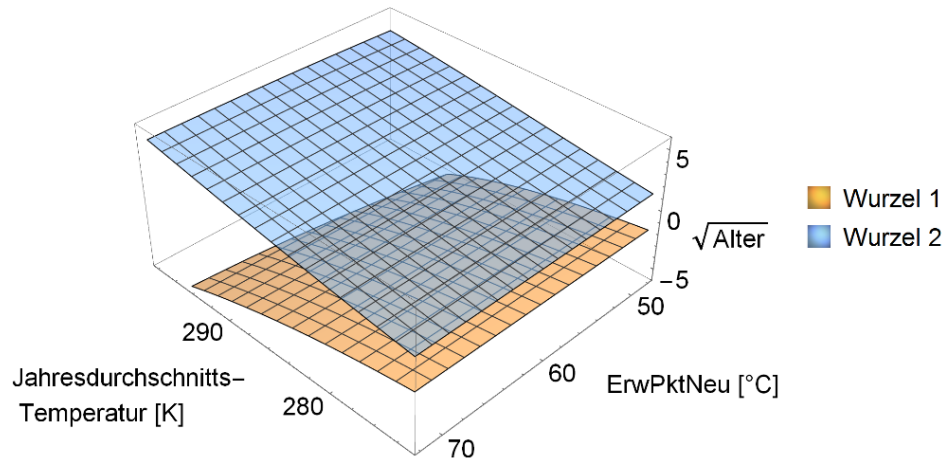


Abbildung 32: Die Funktion *ZeitBisErneuerungTech* aufgeteilt in die zwei Wurzelterme.

Die eigentliche Formel lässt sich nicht mehr sinnvoll darstellen. Wir begnügen uns deswegen mit folgender Bezeichnung. Die diversen Parameter sind dabei unterdrückt. Es verbleiben sieben Variablen.

$$\begin{aligned} \text{ZeitBisErneuerungTech}(\cdot) = & \\ \text{ZeitBisErneuerungTech} \left(\begin{array}{l} \text{Auslösungszustand, ErwPktNeu,} \\ \text{TempKMeanJahr, TempKBereichJahr,} \\ \mu\text{TempGrad12H, } \sigma\text{TempGrad12H, ESAL} \end{array} \right) & \quad (62) \end{aligned}$$

4.2 Herleitung der Dimensionierungsfunktion *ErwPktNeuOpt()*

Es wurde verschiedentlich versucht, eine analytische Lösung für einen optimalen Erweichungspunkt beim Einbau mittels der notwendigen Optimalitätskriterien erster Ordnung zu finden. In keiner Formulierung der vorausgehenden Modellierungen liess sich aber die erste Ableitung nach dem Erweichungspunkt lösen. Eine Annäherung liess sich dennoch numerisch errechnen.

Das Prinzip der numerischen Lösung ist einfach. Gleichung (62) wird für ein Gitter von Punkten aus dem gesamten sieben dimensionalen Definitionsbereich evaluiert. Jede unabhängige Variable in (62) ist eine Dimension. Das Gitter deckt für alle unabhängigen Variablen die Bereiche, die für den Strassenbau von Interesse sind, ab. Das Gitter deckt auch die möglichen Werte für den Erweichungspunkt beim Einbau ab.

Betrachtet wird zuerst der mehrdimensionale Raum bestehend aus sechs unabhängigen Variablen mit Ausnahme von *ErwPktNeu*. Man stellt sich ein Gitter vor, das diesen Raum abdeckt. Bezeichnen wir einen Kreuzpunkt im Gitter als V_j und notieren wir, dass der Auslösungszustand ein Element in V_j ist. Für jeden V_j gibt es dazu noch unendlich viele Varianten für *ErwPktNeu*. Die möglichen Varianten für *ErwPktNeu* werden ebenfalls mit einer limitierten Auswahl abgedeckt. Die Funktion *ZeitBisErneuerungTech()* wird dann für jedes V_j und jedes der Varianten für *ErwPktNeu* evaluiert. So entstehen für jedes V_j einige mögliche Werte für die Zeit bis zur Erneuerung. Der höchste Wert, also die längste «Zeit bis zur Erneuerung», wird selektiert. Es resultieren Vektoren $\{\text{ZeitBisErneuerung}_j, V_j, \text{ErwPktNeuOpt}_j\}$, die nur die optimalen Kombinationen von $\{V_j, \text{ErwPktNeuOpt}_j\}$ beinhalten. Aus diesen Daten lässt sich die Dimensionierungsfunktion schätzen. Die Gittermasche für den Erweichungspunkt ist von 30 °C bis 114 °C alle 6 °C.

Mittels einer Regression wird eine Funktion durch diese optimalen Punkte geschätzt. Die resultierende Funktion ist $ErwPktNeuOpt(ZeitBisErneuerung, V)$. Dies ist die Dimensionierungsfunktion des Erweichungspunkts beim Einbau. Es stellte sich heraus, dass sich die Funktion im relevanten Bereich mit einem Polynom zweiten Grades gut approximieren liess, wobei nicht alle möglichen Terme gebraucht werden. Selbstverständlich liessen sich andere Funktionen auch schätzen. Die verwendete Funktion ist:

$$\begin{aligned} ErwPktNeuOpt(\cdot) = & -229.4 - 2.338 \text{ AuslösungsZustand} - 2.377 \text{ ESAL} - \\ & 0.1327 \text{ TempKBereichJahr} + 1.003 \text{ TempKMeanJahr} + \\ & 0.07495 \sqrt{\text{ESAL}} \left(\frac{\text{TempKBereichJahr}}{2} + \text{TempKMeanJahr} \right) \\ & -1.453 \mu\text{TempGrad12H} - 2.2702 \sigma\text{TempGrad12H} \end{aligned} \quad (63)$$

Gegeben der Masche, ist es gar nicht möglich ein wirklich kleines R^2 hinzubringen. Die Standardabweichung ist 9.8 °C entspricht in etwa den Spanweiten im EN 12591 und ist so nicht übermässig hoch.

Tabelle 12 Regressionsstatistik für die approximierte Funktion $ErwPktNeuOpt()$

Statistik	Wert
R-Quadrat	0.8932
Adj. R-Quadrat	0.8932
Std. Abweichung	9.8748
Beobachtungen	26248

Variable	Koeff.	Std. Abw	t-Stat.	P-Wert
Konstante	-299.4	1.140	-201	0
CS Star	-2.338	0.0609	-38.3	0
ESAL	-2.377	0.02487	-95.57	0
TempKMeanJahr	1.003	0.0039	255	0
TempKBereichJahr	-0.133	0.00368	-36.0	0
MuTempGrad12H	-1.453	0.01724	-84.3	0
SigmaTempGrad12H	-2.270	0.02154	-105	0
$ESAL^{1/2} * TempKMeanJahr + TempKBereichJahr/2$	0.0749	0.0004788	156	0

Setzt man nun die Formel $ErwPktNeuOpt()$ anstelle von der Variable $ErwPktNeu$ in Gleichung (62) ein, erhält man die neue optimierte Formel $ZeitBisErneuerungOpt()$. Diese ist nunmehr nicht mehr von einer Dimensionierungsvariable abhängig. Dieses Ergebnis war gesucht.

Es lassen sich nun die zwei Funktionen miteinander vergleichen in dem man einen spezifischen Wert für das $ErwPktNeu$ in $ZeitBisErneuerungTech()$ einfügt. Die optimierte

Funktion muss überall besser sein, das heisst eine längere Gebrauchsdauer erreichen, oder mindestens gleich gut sein. Dass dies so ist zeigt Abbildung 33.

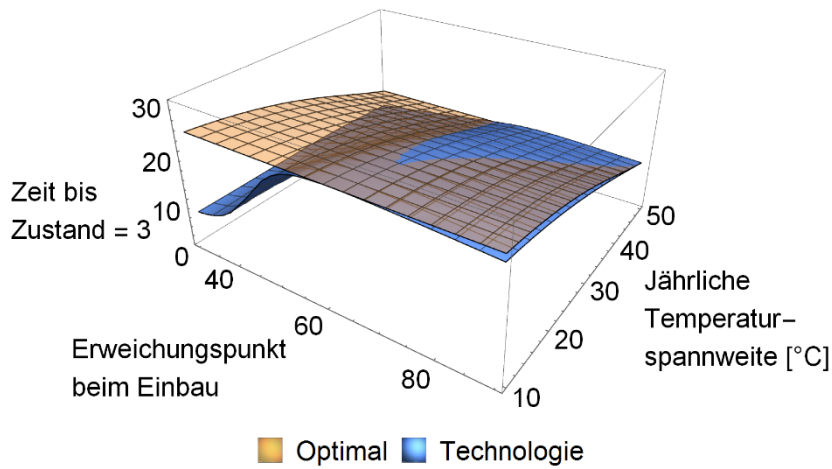


Abbildung 33.: «Zeit bis zur Erneuerung»: Optimale Funktion gegenüber der Technologie-Funktion.

4.3 Implikation für die Erneuerungskosten

Nun lässt sich ein Teil der zu erwarteten Erneuerungskosten pro Jahr berechnen. Es ist der Teil, der in Abhängigkeit mit der Klimavariablen und dem Verkehr steht. Noch nicht berücksichtigt sind die Einflussfaktoren, die nicht über die Verfallsrate wirken. Die Berechnungsformel ist

$$\text{ErwarteteKostenProJahr} \approx \frac{1}{\text{ZeitBisErneuerungOpt}(\cdot)} \quad (64)$$

Diese erwarteten Kosten lassen sich als Verhältnis zu einem Standardwert ausdrücken wie in Abbildung 34.

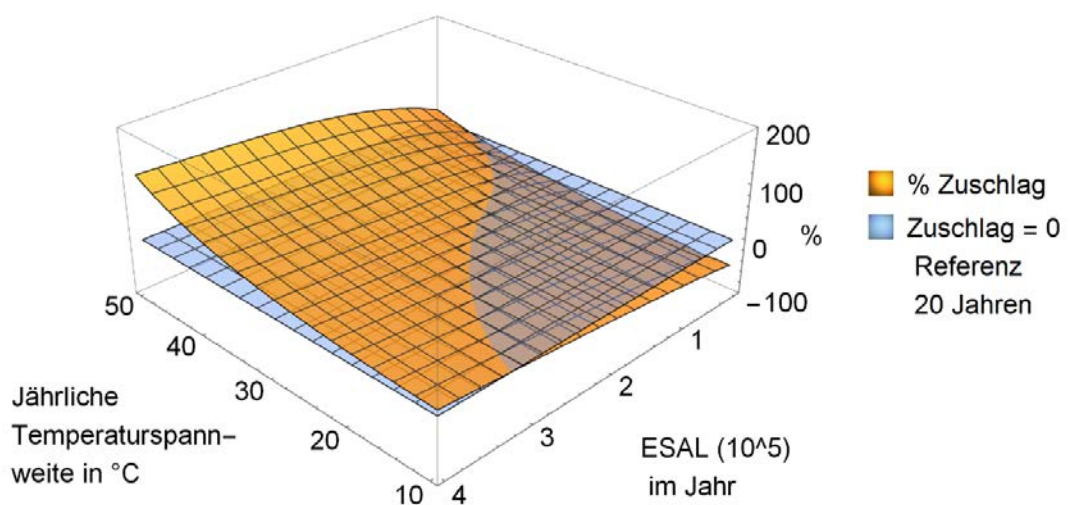


Abbildung 34.: Kostenvorteil der Standorte ausgedrückt in Prozent Abweichung zur Referenz.

Das ist das Prinzip hinter der Benchmark-Berechnung in Bezug auf die Verfallsrate bezogenen Einflussfaktoren.

5 Berechnung der Kostenfaktoren, die über erhöhte Projektkosten wirken

5.1 Einführung

Gleichung (1)

$$ErwErneuerungskostenJahrM2 = \left(\frac{1}{\text{Gebrauchsdauer}} \right) ErneuerungskostenM2$$

besteht aus zwei Termen. Dieses Vorgehen teilt die Einflussfaktoren in zwei Hauptgruppen, die primär durch das Limitieren der Gebrauchsdauer wirken und die, die primär durch die Bestimmung der Projektkosten wirken. Dieses Vorgehen entspricht einer Trennung zwischen *wie oft* wird eine Strasse erneuert von *wieviel* kostet es, wenn es erneuert wird. Das *wie oft* wird über die Gebrauchsdauer bestimmt, das *wieviel* über die Projektkosten. Ersteres lässt sich physikalisch modellieren, letzteres hängt von Qualitätsansprüchen und Normen ab und lässt sich nur als sich historisch verändernden Durchschnitt erfassen. Es wird versucht hier Annäherungsweise die Beziehung zwischen einzelnen Einflussfaktoren und Mehrkosten zu erfassen. Um Missverständnisse zu vermeiden, ist an dieser Stelle betont, dass das absolute Niveau von Projektkosten oder einzelnen Elementen davon nicht Gegenstand dieser Forschung sind. Nur die relativen Grössen sind relevant.

Bis jetzt wurde die Berechnung der Gebrauchsdauer behandelt. In diesem Kapitel werden die Erneuerungskosten pro Quadratmeter in Abhängigkeit mit den Einflussfaktoren berechnet, wie zum Beispiel «innerorts». Man denkt hier an Elemente, die die Projektkosten erhöhen, wie eine Entwässerung, eine Stützmauer oder eine komplizierte Verkehrsführung. Eine schwarz-weiss Trennung zwischen den Wirkungsweisen, so wie es hier modelliert wird, gibt es in der Wirklichkeit nicht. Innerorts-Strassen verfallen auch schneller, weil die diversen Leitungsarbeiten den Strassenkörper schwächen. Aber es gibt Projekt Mehrkosten, die nur deshalb entstehen, weil der Strassenabschnitt innerorts liegt. Das Vorgehen via Regression berechnet einen durchschnittlichen Gesamteffekt aus allen Wirkungsweisen.

Der Einflussfaktor Verkehr ist speziell und darauf wird unten näher eingegangen.

Unsere Vorstudie KPI - Key Performance Indicators for Cantonal Road Management (Craig Richmond et al., 2013) stellte eine Anzahl von kostenwirksamen Einflussfaktoren bezogen auf Erneuerungsmassnahmen fest. Das allgemeine Vorgehen und die Regressionsresultate sind in Craig Richmond, Kielhauser, and Adey (2014) Abschnitt 3, *Maßzahlen für die Kosteneffizienz der Unterhaltsausgaben*, beschrieben. Da hier die separate Modellierung der Verfallskurven eine direkte Berechnung der Gebrauchsdauer ermöglicht, ist eine vereinfachte Regression möglich. Schematisch kann wie folgt vorgegangen werden.

$$ErwErneuerungskostenJahrM2 \cdot Gebrauchsdauer = ErneuerungskostenM2 \quad (65)$$

5.2 Behandlung des Einflussfaktors Verkehr

Drei Wirkungsmechanismen des Verkehrs auf die Erneuerungskosten werden in diesem Modell berücksichtigt: Spurrinnen, Kapazität und Ermüdungsrisse vom Verkehr. Der Mechanismus Spurrinnen wurde im Gebrauchsdauermodell subsumiert. Der Mechanismus Kapazität wird über die Strassenbreite berücksichtigt. Der Schadensmechanismus Ermüdungsrisse von unten wird über die Belagsstärke berücksichtigt. Warum letzteres Vorgehen gewählt wurde, wurde in Abschnitt 1.6 erklärt.

Somit wird ein normbasiertes Vorgehen gewählt, um die relative Stärke des Belags und dadurch die relative Menge an benötigtem Material zu bestimmen, je nach Verkehrslastklasse. Die Schweizer Norm 940324a (VSS, 1997) definiert die Schichtdicken je nach Oberbautyp. Daraus lässt sich der Faktor berechnen, der die relativen Oberbaustärken je nach Verkehrslastklasse darstellt. Die Faktoren sind in Tabelle 13 definiert.

Tabelle 13 Verkehrslastklasse Faktoren

Verkehrslastklasse	Norm Stärke cm*	Faktor
T1	11	0.647
T2	14	.823
T3	17	1
T4	19	1.117
T5	26	1.529
T6	32	1.882

* SN 640324a Oberbautyp 2, Ausführung S2, die Stärke bezieht sich nur auf die gebundenen Schichten

Diese Faktoren werden multiplikativ mit der Belagsfläche eingeführt. Somit erfassen sie den Volumenunterschied als Flächen Unterschied.

$$FlächeAdj(VLK) = Fläche \cdot VLKFaktor \quad (66)$$

T3 als Nenner entspricht der Annahme, dass die Länge gewichtete Mittelwert der Verkehrslastklassen bei den 130 grössten Gemeinden ein T3 entspricht. Dies wird im nächsten Abschnitt erklärt. Dafür haben wir aber keine empirischen Daten. Die Werte in Tabelle 13 können vom Teilnehmer eines konkreten Benchmarkings angepasst werden.

5.3 Behandlung der übrigen Einflussfaktoren auf die Projektmehrkosten

Drei Einflussfaktoren zeigten in den früheren Arbeiten eine statistisch signifikante Beziehung zu den Erneuerungskosten. Diese waren:

1. Wie steil das Gelände ist (*Steigung*)
2. die Bevölkerungsdichte um eine Strasse (*EinwProHektar*)
3. ob die Strasse innerorts liegt (*PrctInnerOrts*)

Schwierige geologische Untergründe als Einflussfaktor wurde ebenfalls getestet, ohne dass eine statistisch signifikante Beziehung erkannt werden konnte. Die Auslassung dieses Einflussfaktors bedeutet nicht, dass es sie nicht gibt, sondern lediglich, dass es in den Datenaggregaten zu wenig ersichtlich ist.

Es wird eine lineare Beziehung zwischen den Faktoren und den Kosten angenommen. Dies ist im Sinne eines Preis-mal-Quantität-Modells. Dann gilt

$$ErneuerungskostenM2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot Steigung + \beta_2 \cdot EinwProHektar + \beta_3 PcntInnerorts \quad (67)$$

Für die empirische Umsetzung liegt eine Zeitreihe jährlicher Ausgabendaten aus Gemeinden vor. 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 (Städteverband, 1978 -

2011). Drei elfjährige Perioden, anfangend im Jahr 1978, wurden gewählt, um die Problematik der kurzfristigen Schwankungen der Investitionstätigkeit zu reduzieren. Daraus ergaben sich 396 Beobachtungen. Zwei Dummy-Variablen erfassen eine zeitabhängige Veränderung für die Zeitperioden 1989-2000 und 2001-2011. Alle Daten in Schweizer Franken wurden mit dem Verbraucherpreisindex Basis 2010 für Inflation korrigiert. Somit ist es möglich folgende Regression mit der Methode der kleinsten Quadrate zu schätzen.

$$\frac{\text{JährlichenAusgabenErneuerung}_i}{\text{FlächeAdj}_i} \cdot \text{ZeitBisErneuerungOpt}_i = \left(\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{ZeitGruppe2}_i + \beta_2 \cdot \text{ZeitGruppe3}_i + \beta_3 \cdot \text{Steigung}_i + \beta_4 \cdot \text{EinwProHektar}_i + \beta_5 \cdot \text{PcntInnerorts}_i + \varepsilon_i \right) \quad (68)$$

Es stellt sich die Frage, in wie fern die Kosten für Gemeindestrassen für Kantonsstrassen relevant sind und ebenfalls die Frage, warum nicht direkt mit Kantonsdaten gerechnet wird. Der Grund warum Kantonsdaten nicht für die Regression benutzt wurden, ist weil die Anzahl Beobachtungen, 26, wesentlich kleiner sind als die ca. 130 Beobachtungen bei den Gemeinden. 130 Beobachtungen erlauben es eine viel stärkere Beziehung zu schätzen.

Die geschätzten Parameter kommen im Modell nicht absolut zur Anwendung, sondern als relative Gewichtung der Einflussfaktoren. Die absolute Skala wird durch den Mittelwert der zu messenden Kantone bestimmt. Somit stellt das angewendete Vorgehen die Hypothese auf, dass relativ gesehen, die Innerortsstrassen im Vergleich zu Ausserortsstrassen kostenprozentual gleich viel höher sind, egal ob sie im Besitz eines Kantons oder in Besitz einer Gemeinde sind. Um festzustellen ob diese Hypothese zutrifft, müsste eine grössere Menge an Projekten von Kantonen und Gemeinden gesammelt werden.

Spezifische Bemerkungen zu den benutzten Daten:

1. *ZeitBisErneuerungOpt*: Diese Daten stammen aus dem bisher beschriebenen Modell der Gebrauchsdauer. Der Wert der Gemeinde ist der Längen-gewichtete Durchschnitt der einzelnen Abschnitte.
2. *Steigung*: Für jeden Strassenabschnitt wurden mittels Geländemodell von Swisstopo eine durchschnittliche Steigung gerechnet. Der Wert der Gemeinde ist der Längen-gewichtete Durchschnitt der einzelnen Abschnitte.
3. *EinwProHektar*: Die Einwohneranzahl wurde durch die bewohnte Gemeindefläche geteilt. Beide Angaben stammen von der BFS. Diese Variable soll die Effekte der steigenden Komplexität der Infrastruktur erfassen, die durch eine höhere Bevölkerungsdichte hervorgerufen wird. Tramlinien wäre ein Beispiel.
4. *PcntInnerOrts*: Diese Variable repräsentiert den Anteil von innerorts/ausserorts liegenden Strassen in der Gemeinde. Angaben über das Wohngebiet wurden aus den GIS Daten der Arealstatistik entnommen. Das Innerortsmerkmal wurde den Strassenabschnitten zugeordnet. Dann wurde der Anteil der Gemeindestrassen, die innerorts liegen berechnet.

Die Regressionsresultate sind in Tabelle 14 zu sehen. Der adjustierte R^2 für die Regressionsgleichung insgesamt ist nur ca. 15%, unser Interesse aber gilt vor allem der marginalen Wirkung der Einflussfaktoren, also den geschätzten Parameterwerten. Die Konstante sowie die zwei Zeitgruppen-Parameter sind alle statistisch verlässlich geschätzt bei einem 1% Niveau, wie dies der P-Wert zeigt [P-Wert < 0.01]. Alle drei Einflussfaktoren haben das erwartete Vorzeichen. Aber nur bei Einwohner pro Hektar ist der geschätzte Parameterwert bei einem Niveau von 1% statistisch signifikant.

Tabelle 14 Regression zur Bestimmung der Kostenfaktoren, die mehrheitlich nicht durch die Verfallsrate wirken

Statistik	Wert
R-Quadrat	0.166
Adj. R-Quadrat	0.155
Std. Abweichung	78.93
Beobachtungen	396

Variable	Koeff.	Std. Abw	t-Stat.	P-Wert
Konstante	72.84	26.30	2.79	0.0059
ZeitGruppe2	-51.30	10.13	-5.063	0
ZeitGruppe3	-51.78	9.811	-5.63	0
Steigung	2.594	2.730	0.95	
EinwProHektar	1.537	0.281	5.470	
PcntInnerOrts	34.69	33.12	1.048	

Um die tatsächliche Bedeutung der Einflussfaktoren abzuschätzen, kann Tabelle 15 betrachtet werden. Sie zeigt die Auswirkung einer Verschiebung des jeweiligen Einflussfaktors um eine Standardabweichung. Zum Beispiel, der Faktor Einwohner pro Hektar hat einen Durchschnittswert von 39.47 und eine Standardabweichung von 15.12. Wenn die Bevölkerungsdichte einer bestimmten Gemeinde eine Standardabweichung höher als der Durchschnittsgemeinde ist, dann fügt dieser Faktor zusätzliche 23.23 Franken zu seinen Kosten pro Quadratmeter zu. Das macht 17.8% der Durchschnittskosten von 129.59 Franken aus. Eine ähnlich hohe Bedeutung erreicht der Faktor Steigung erst bei sechs Standardabweichungen, was entsprechend selten vorkommt.

Tabelle 15 Wichtigkeit der Einflussfaktoren bei den geschätzten Werten

Variable	Koeff.	Durchschnitt Variable	Std. Abw. Variable	Durchschnitts-einfluss	Std. Abw. Einfluss	Std. Abw. Einfluss in Pcnt Abw. Var.
AbhängigeVar.		127.44	83.39			
ZeitGruppe2	-51.30	1.00	0.00	-51.30	0	
ZeitGruppe3	-51.78	1.00	0.00	-51.78	0	
Steigung	2.594	2.70	1.51	7.00	3.91	3.1%
EinwProHektar	1.537	39.47	15.12	60.64	23.23	18.2%
PcntInnerOrts	34.39	0.72	0.13	24.91	4.52	3.5%

Die drei Merkmale Steigung, Einwohner pro Hektar und Innerorts liegen für sämtliche Strassenabschnitte i in allen Kantonen j vor. Somit kann für alle Abschnitte die Gleichung (67) berechnet werden. Das ergibt

$$\begin{aligned} \text{ErneuerungskostenM2}_{i,j} = & \beta_0 + \beta_3 \cdot \text{Steigung}_{i,j} + \\ & \beta_4 \cdot \text{EinwProHektar}_{i,j} + \beta_5 \text{PcntInnerorts}_{i,j} \end{aligned} \quad (69)$$

Diese abschnittsspezifischen Kosten pro Quadratmeter werden für weitere Berechnungen eingesetzt.

6 Typ-A Benchmarks

Als Typ-A Benchmark werden hier Benchmarks bezeichnet, die eine Bemessung der ökonomischen Effizienz als Ziel haben. Es werden nachfolgend zwei Varianten dargestellt. Die erste geht von einer langfristigen Perspektive aus. Die zweite von der Frist zwischen zwei Zustandserhebungen. Letztere macht es möglich, kurzfristige Schwankungen in der Unterhaltsintensität zu kompensieren. Solche Schwankungen können zum Beispiel auf Grund von Budgetvorgaben entstehen.

6.1 Benchmark A1: Der «stationäre Zustand» Benchmark

Im vorangehenden Kapitel wurden abschnittspezifische Erneuerungskosten pro Quadratmeter unter Berücksichtigung der lokalen, verfallsunabhängigen Einflussfaktoren als $ErneuerungskostenM2_{i,j}$ berechnet. Dieser «Preis» wird dann mit der zu erwarteten Erneuerungsmenge $\left(\frac{1}{Gebrauchsdauer}\right)$ multipliziert, und das für jeden Abschnitt. Die Summe über den Kanton ergibt dann die erwarteten jährlichen Erneuerungskosten. Formell lässt sich dies so schreiben

$$ErwErnKostenJahr_j = \sum_i FlächeAdj_{i,j} \cdot \left(\frac{1}{Gebrauchsdauer_{i,j}}\right) \cdot ErneuerungskostenM2_{i,j} \quad (70)$$

wobei die Abschnitte i sämtliche Abschnitte im Kanton j indexieren.

Dieser Wert kann als langfristiger Kostenbenchmark bei einem gleichbleibenden durchschnittlichen Zustand, einem sogenannten stationären Zustand, gebraucht werden. Er soll nicht absolut verstanden werden, da die absoluten Ausgaben aus der Gemeinderegression hervorgehen. Er darf nur relativ verstanden werden, nämlich als Vergleichswert.

Die folgende Graphik wurde aus öffentlich zugänglichen Daten erstellt und deshalb lassen sich auch Werte für Kantone, die nicht am Projekt teilnehmen, berechnen. Gleichung (70) wurde zuerst absolut evaluiert und dann über den eigenen Mittelwert zu einem Index skaliert. Dasselbe wird mit den kantonalen Ausgaben gemäss BFS Strassenrechnung zwischen 1994 und 2014 gerechnet. Die Summe der Strassenrechnungsrubriken baulicher Unterhalt sowie Verbesserungen und Ausbau wurden dabei als empirische Umsetzung von Erneuerungskosten verwendet.

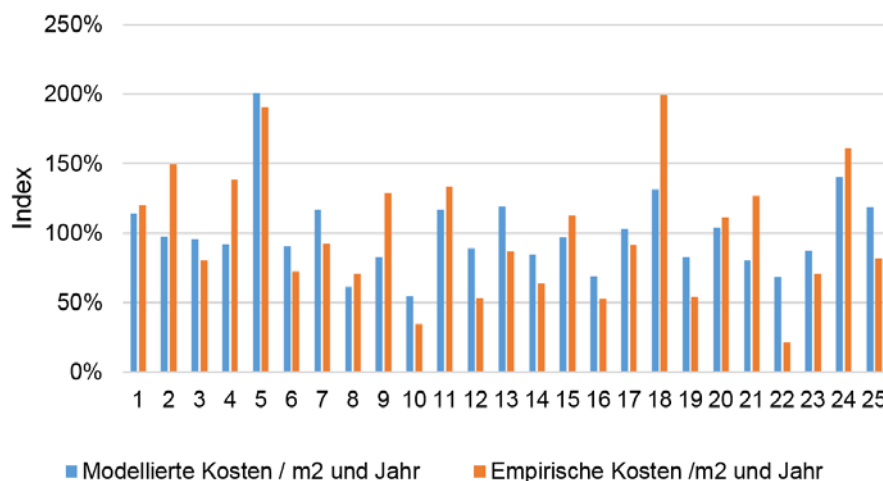


Abbildung 35 Beispiele des langfristigen, «stationärer Zustand» Benchmarks

Appenzell Innerrhoden fehlt, weil wir keinen GIS Datensatz für die Kantonsstrassen finden konnten.

Dieselben Werte können in Tabelle 16 eingesehen werden. Bei den empirischen Werten ist das Verhältnis zwischen den höchsten Ausgaben (199%) und den kleinsten Ausgaben (21%) pro Quadratmeter 9.5:1. Bei den modellierten Daten liegt dieses Verhältnis nur bei etwas mehr als 3.5:1 ($201 / 55 = 3.47$). Von daher kann gesagt werden, dass das Modell einiges über die Variabilität erklären kann. Gleichzeitig bleibt das Verhältnis von 3.5 durch das Benchmarking unerklärt.

Tabelle 16 Beispiele des langfristigen, «stationärer Zustand» Benchmarks; Werte

Kanton	Modellierte Kosten / m2 und Jahr	Empirische Kosten /m2 und Jahr
1	87%	71%
2	141%	161%
3	119%	82%
4	92%	138%
5	201%	191%
6	90%	72%
7	117%	93%
8	61%	71%
9	83%	129%
10	55%	35%
11	117%	133%
12	89%	53%
13	119%	87%
14	85%	64%
15	97%	112%
16	69%	53%
17	103%	92%
18	131%	199%
19	83%	54%
20	104%	111%
21	114%	120%
22	98%	150%
23	96%	80%
24	81%	127%
25	69%	21%

Abbildung 36 zeigt eine Gegenüberstellung der modellierten und empirischen Daten als Plot. Die Beziehung lässt sich mittels einer linearen Regression untersuchen. Die Resultate sind in Tabelle 17 zu sehen. Der Koeffizient auf das Modell ist nahe bei eins und besitzt einen P-Wert von 0.00004 was eine verlässliche Beziehung andeutet. Angesichts der grossen Variation in den Grunddaten ist die gezeigte starke Beziehung doch etwas überraschend.

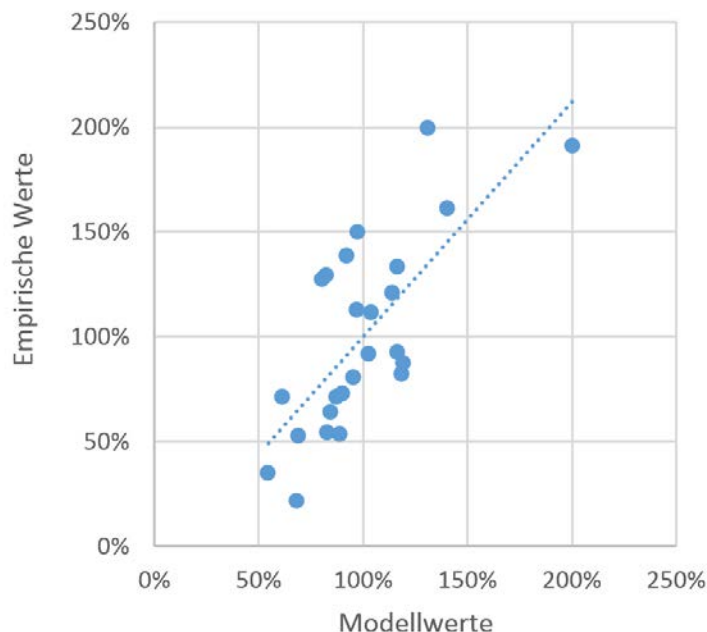


Abbildung 36 Vergleich Modell-Empirie

Tabelle 17 Beziehung zwischen dem «stationärer Zustand» Benchmarks und empirischen Daten

Statistik	Wert
R-Quadrat	0.5268
Adj. R-Quadrat	0.5063
Std. Abweichung	.3234
Beobachtungen	25

Variable	Koeff.	Std. Abw	t-Stat.	P-Wert
Konstante	-0.118	0.230	-0.512	0.613
Modell	1.118	0.221	5.061	0.000

Somit kann gesagt werden, dass der stationäre Zustands-Benchmark in verlässlicher Weise gewichtige Kostenfaktoren, die von Kanton zu Kanton variieren, abbilden mag und somit in einem Benchmarking diese Vor- und Nachteile kompensieren kann.

Ausgeschlossen von der Berechnungen sind mögliche Unterschiede im Ausbaustandard und dem durchschnittlichen Strassenzustand. Diese können ebenfalls zu langfristigen Unterschieden in den zu erwartenden Quadratmeterkosten führen. Für diese Faktoren liegen keine Daten aus öffentlichen Quellen vor.

6.2 Benchmark A2: Der «veränderte Zustand» Benchmark

Die Wirklichkeit über kürzere Perioden kann von der Annahme eines stationären Zustands abweichen. Es kann aus diversen Gründen Schwankungen in der Anzahl Erhaltungsmassnahmen von Jahr zu Jahr geben. Es kann sein, dass das Alter der Strassen über das Netz nicht gleich verteilt ist. Auch kurzfristige Sparmassnahmen oder

Investitionskampagnen können zu Schwankungen führen. Gesucht ist ein Benchmark-Konzept, welches solche Schwankungen auffangen kann.

Ein solches Konzept wurde in früheren Arbeiten vorgestellt (Craig Richmond et al., 2015, 2016). Wir verweisen für eine ausführliche Präsentation darauf.

Dieses Benchmark-Konzept geht von der Tatsache aus, dass die Differenz in dem Zustand zwischen zwei Zustandserhebungen (*ZustandDelta*), die Summe zweier Veränderungen ist. Eine Veränderung wird durch den Verfall verursacht und die andere wird durch Erhaltungsmassnahmen verursacht (*ZustandVerbess*). Könnte man letzteres isolieren, dann wäre es möglich der Menge der erfolgten Zustandsverbesserung die dafür aufgewendeten Kosten gegenüberzustellen.

Dafür kann das Modell der Gebrauchsdauer eingesetzt werden. Man kann annäherungsweise aus den beiden Angaben *AuslöseZustand* und *ZeitBisErneuerungOpt* eine Schätzung der zu erwartenden durchschnittlichen Verfallsrate (*ErwVerfallsrate*) auf Abschnitt *i* berechnen.

$$ErwVerfallsrate_i = \frac{AuslösungsZustand}{ZeitBisErneuerungOpt(\cdot)_i} \quad (71)$$

Damit lässt sich für jeden Quadratmeter die Menge der Zustandsverbesserung zwischen zwei Zustandserhebungen berechnen. Zuerst berechnet man die beobachtete Veränderung,

$$ZustandDelta_{t_1,t_2} = Zustandsaufnahme_{t_2} - Zustandsaufnahme_{t_1}, \quad (72)$$

wobei t_2 nach t_1 liegt. Danach berechnet man die Menge der Zustandsverbesserung

$$ZustandVerbess_{t_1,t_2} = ZustandDelta_{t_1,t_2} - ErwVerfallsrate \cdot (t_2 - t_1). \quad (73)$$

Der Begriff *Menge der Zustandsverbesserung* ist gewöhnungsbedürftig. Aber für das Bemessen der Gesamtleistung einer Erhaltungsmanagement-Organisation macht es Sinn. Die Gesamtleistung zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 ist dann

$$GesamtZustandVerbess_j = \sum_i Fläche_{i,j} \cdot ErwVerfallsrate_{i,j} \quad (74)$$

wobei die Abschnitte *i* sämtliche Abschnitte in Kanton *j* indexieren.

Das kurzfristige Benchmark-Konzept basiert auf einer Gegenüberstellung der Ausgaben in der Periode zwischen t_1 und t_2 und der damit erstellten Gesamtleistung.

$$KurzKostenLeistungVerh_{j,t_1,t_2} = \frac{AusgabenErneuerung_{j,t_1,t_2}}{GesamtZustandVerbess_{j,t_1,t_2}} \quad (75)$$

Dieses Mass hat die Form eines Preises: Einheiten/Franken. Um hieraus einen vergleichbaren Benchmark zu konstruieren, braucht es eine Abgeltung der Mehr- oder Minderkosten je nach Einflussfaktoren. Da es sich hier um netzweite Durchschnitte handelt, liegt es nahe, dass aus dem stationärer-Zustands-Benchmark ein solcher Korrekturfaktor berechnet werden könnte. Gleichung (70) definiert bereits die Höhe der zu erwartenden jährlichen Ausgaben. Es fehlt nur die Höhe der zu erwartenden Menge an jährlichen Zustandsverbesserungen. Da Gleichung (70) einem stetigen Zustand entspricht, muss die Menge der Zustandsverbesserung gleich gross sein wie die Menge des Zustandsverfalls. So ergibt sich folgende Beziehung

$$\begin{aligned} \text{ErwJährlichVerbess}_j &= \text{ErwJährlichVerfall}_j \\ &= \sum_i \text{Fläche}_{i,j} \cdot \left(\frac{1}{\text{Dienstdauer}_{i,j}} \right) \end{aligned} \quad (76)$$

Nun lässt sich das zu erwartende Verhältnis zwischen Ausgaben und Leistung definieren.

$$\text{ErwKostenLeistungVerhält}_j = \frac{\text{ErwErnKostenJahr}_j}{\text{ErwJährlichVerbess}_j} \quad (77)$$

Nun lässt sich der kurzfristige Benchmark als Differenz zwischen Ist und Soll definieren. Die Form ist zwar wie eine Preisdifferenz, es bleibt aber ein Index, der nur relativ als Vergleichswert anzuwenden ist.

$$\begin{aligned} \text{KurzfristigBM}_{j,t1,t2} &= \frac{\text{AusgabenErneuerung}_{j,t1,t2}}{\text{GesamtZustandVerbess}_{j,t1,t2}} - \frac{\text{ErwErnKostenJahr}_j}{\text{ErwJährlichVerbess}_j} \\ &= \text{KurzKostenLeistungVerh}_{j,t1,t2} - \text{ErwKostenLeistungVerhält}_j \end{aligned} \quad (78)$$

Die Berechnung dieses Benchmark-Konzepts ist in Tabelle 18 gezeigt. Es werden nur 12 Werte gezeigt. Für dieses Konzept sind zwei Zustandserhebungen des I¹ nötig. Beide Erhebungen sollten in einem Jahr das ganze Netz abdecken. Die Daten, die zur Verfügung standen, erfüllten diese Anforderung nur in 12 Fällen, und selbst da mussten teilweise zwei Jahre als ein Jahr behandelt werden. Der Grund für diese Beschränkung ist, dass die Ausgabendaten jährlich sind. Ohne eine netzweite Erhebung können die Ausgaben und die Zustandsänderungen nicht eindeutig zueinander zugeordnet werden. Es wurde verschiedentlich vorgeschlagen, dass auch Approximationen vom Zustandsverlauf eingesetzt werden könnten, um aus Zustandsaufnahmen über mehrere Jahre einen netzweiten Zustand zu berechnen. Bei der Bemessung eines Durchschnittszustand kann dies vertreten werden. Aber bei diesem Benchmark-Konzept, bei dem es um eine kurzfristige Änderung geht, würde es dazu führen, dass man das „bemisst“, was man annimmt.

Die Masseinheiten der Leistung sind Zustandsverbesserung x m². Die Einheiten des Effizienzmasses sind Franken pro Einheit Zustandsverbesserung pro Quadratmeter. Um aus der Tabelle durchschnittliche Massnahmenpreise zu erhalten kann die folgende Annäherung berechnet werden. Bei der Annahme, dass eine Erneuerung bei Zustand = 3 stattfindet, müssen die Erneuerungskosten pro Quadratmeter im Schnitt bei 3x Spalte-(c) sein. Die gleiche Interpretation gilt auch für den Benchmark. Erneuert ein Kanton früher oder später als Zustand 3, müsste die Berechnung entsprechend angepasst werden.

Tabelle 18 Beispiele der Berechnung des Delta-Zustand Benchmark

	Durchschnitt I ¹			Einheiten Leistung (Zustand X Fläche)			Kosten / Leistung		
Kanton	Erste Erfassung	Zweite Erfassung	Perioden- länge	Zustand Veränderung (a)	Verfalls- prognose (b)	Leistung (a) - (b)	Periode (c)	Benchmark (d)	Effizienzmass (c) - (d)
A	1.43	1.79	3	2'340'952	2'589'048	248'096	1102	75	1'026.7
B	1.14	1.15	8	96'237	12'663'348	12'567'111	58	64	-6.5
C	1.49	1.49	4	-939	1'339'517	1'340'456	70	67	2.3
D	2.13	1.52	8	-2'638'260	3'733'715	6'371'976	51	64	-12.6
E	1.12	1.39	9	923'322	4'206'495	3'283'173	133	76	57.4
F	1.79	2.17	5	1'041'460	1'894'435	852'975	87	61	26.1
G	0.87	1.18	7	804'442	2'483'455	1'679'014	105	68	37.6
H	1.21	2.08	10	1'077'383	1'718'986	641'603	394	83	311.7
I	2.12	2.19	5	415'065	3'545'684	3'130'619	67	76	-8.3
J	1.77	1.74	7	-297'123	6'589'553	6'886'676	13	57	-43.7
K	2.42	2.62	5	115'057	430'225	315'167	85	59	25.5
L	1.07	1.25	3	1'596'922	3'561'597	1'964'675	146	79	66.7

Abbildung 37 zeigt die Spalten (c) und (d). Der Kanton A wird dabei nicht gezeigt. Etwas muss bei den Erhebungen nicht stabil gewesen sein.

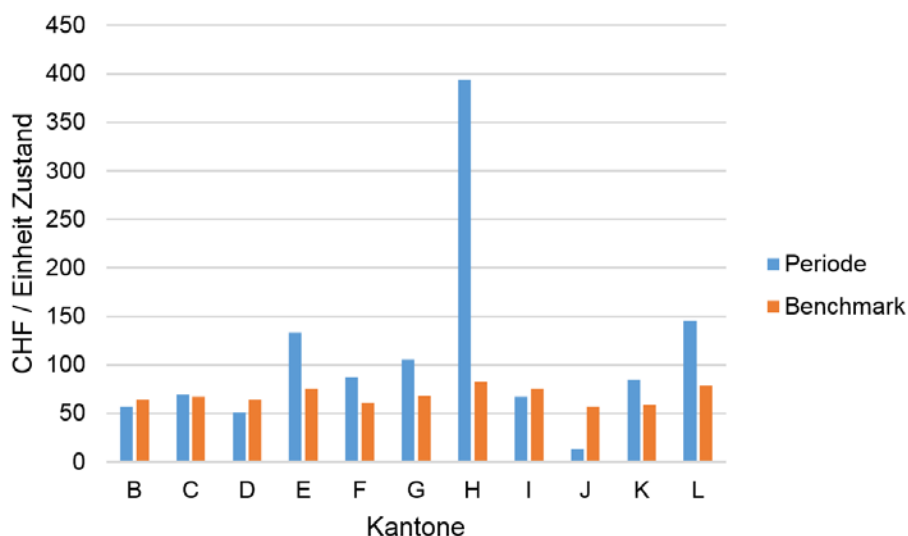


Abbildung 37 Beispiele des Delta-Zustand Benchmarks

Es ist auch nicht möglich in diesem Fall eine empirische Überprüfung herzustellen, da es keinen empirischen Vergleichswert für das modellierte Effizienzmass gibt. Eine Beurteilung der empirischen Qualität ist deshalb schwierig. Der Eindruck der Forscher ist, dass der Benchmark ziemlich empfindlich auf die Vergleichbarkeit der zwei benutzten

Messkampagnen ist. Bei relativ kleinen Abständen zwischen den Messkampagnen ist eine grosse Verzerrung leicht möglich, wie bei A zu sehen ist. Es ist zu vermerken, dass wenn eine Strasse 30 Jahre hätte, um von Zustand 0 bis Zustand 3 zu verfallen, dann wäre der zu messende Unterschied nach drei Jahren im Schnitt nur 0.3 Zustandseinheiten. Vermutlich ist die Toleranz der Messkampagnen nicht wesentlich kleiner. Bei längeren Zeitperioden verkleinert sich dieses Problem. Aber wie bei H zu sehen ist, sind auch längere Perioden keine Garantie, dass das Mass innerhalb einer vernünftigen Bandbreite bleibt.

6.3 Fazit Typ-A Benchmarks

Zwangsläufig müssen Typ-A Benchmarks aus zwei Datenreihen gerechnet werden, wobei beiden Reihen diverse Fehlerquellen beinhalten können. Besonders bei den Kostendaten ist es schwierig, klare Grenzen zu ziehen, welche Massnahmen zu welchen Kostenaggregaten zuzuordnen sind. Eine einheitliche Praxis liegt zwischen den Kantonen im Moment nicht vor, und dies kann zu grossen Differenzen führen. Ebenfalls sind Zustandsmessungen mit Fehlerquellen behaftet. Bei relativ langsamem Verfall ist die Grösse des durchschnittlichen Fehlers gegenüber der Durchschnittsmenge an Verfall von einer nicht zu vernachlässigender Grösse.

Daraus ist heute zu schliessen, dass ein kurzfristiger Benchmark wie A2 zwar zu berechnen ist, es kann aber leicht zu sehr grossen Abweichungen kommen, die vor allem mit systematischen Messfehlern zusammenhängen. Verbesserungsmöglichkeiten sind bei den Datenquellen zu suchen.

Das Benchmark Konzept A1 hat gegenüber A2 zwei Vorteile. Erstens ist aufgrund der grossen Anzahl an Jahren, die in die Bemessung der Durchschnittsausgaben einfließen, der Durchschnitt statistisch um einiges verlässlicher als bei dem kurzfristigen Benchmark. Zweitens kommt hier keine Bemessung des Zustands zum Tragen, da von einem stationären Zustand ausgegangen wird. Dass der stationäre Zustands-Benchmark einiges an Erklärungsfähigkeit bietet, wurden in Graphiken und mit einer Regression eindeutig gezeigt.

Wir vermuten aus früheren Arbeiten, dass bedeutende Verbesserungsmöglichkeiten für A1 und A2 in einer einheitlichen Buchungspraxis liegen, die heute nicht vorhanden ist. Zweitens wird von Seiten der Kantone argumentiert, dass der einheitliche Auslösezustand von drei nicht überall zutreffend ist. Bei einem konkreten Benchmarkingprojekt wäre es möglich, für jeden Kanton einen eigenen Auslösezustandswert oder gar Werte je nach Einflussfaktoren festzulegen. Um diese Vermutung zu testen bräuchte es aber diese Werte.

7 Typ-B Benchmarks

Als Typ-B Benchmark bezeichnen wir solche, die mindestens einen relevanten Aspekt der Leistungserbringung als Gegenstand haben, die aber keinen Anspruch auf eine Messung der ökonomischen Effizienz erheben. So ist man in der Gestaltung sehr frei. Es müssen nicht Kosten und Nutzen gegeneinander abgewogen werden; der Anspruch auf Fairness bei Vergleichen steht nicht im Vordergrund. Im Vordergrund steht ein spezifischer Aspekt, um die Leistungserbringung möglichst klar darzustellen. Die Analogie eines «Dashboards» im Auto mit diversen Anzeigeinstrumenten ist passend. Dem Strassenverwalter werden relevante Informationen in präziser und konsolidierter Form dargestellt. Bei einem Vergleich mit anderen Strassenverwaltern bleibt die Verantwortung für die Interpretation der Differenzen beim jeweiligen Verwalter.

Von den Typ-B Benchmarks werden sieben Konzepte vorgelegt. Diese wurden in Zusammenarbeit mit den Kantonen in unserer Begleitgruppe ausgearbeitet und ausgewählt. Typ-B Benchmarks lassen sich zu vielen Themen und in vielen Varianten erstellen. Sie lassen sich auch über die Zeit leicht an neue Bedürfnisse anpassen. Somit sind die hier vorgestellten Typ-B Benchmarks als Beispiele zu verstehen.

Bei der Konstruktion von Typ-B Benchmarks ist man von den vorhandenen Daten abhängig. Die Herausforderung liegt oft genau darin, aus den vorhandenen Daten etwas heraus zu kristallisieren, was sonst nur vage sichtbar ist.

Ausgangspunkt unserer konkreten Vorschläge sind 7 Fragen, die wir in Gesprächen mit den Kantonen herausgearbeitet haben. Diese sind

1. Welcher Anteil unseres Strassennetzes befindet sich in mittlerem bis gutem bzw. in kritischem bis schlechtem Zustand?
2. Hat sich der Zustand unseres Strassennetzes in den letzten 5 Jahren verbessert / verschlechtert / ist er gleichgeblieben?
3. Verfolge ich eine präventive Substanzerhaltungsstrategie (Massnahmen zum richtigen Zeitpunkt) oder eine reaktive Substanzerhaltungsstrategie (Massnahmen, wenn Wertzerfall bereits weit fortgeschritten)?
4. Welcher Anteil unseres Strassennetzes liegt in höherer topografischer Lage (> 700 Meter über Meer)?
5. Welchen Kunstbautenanteil weist unser Strassennetz auf?
6. Wurden genügend Erneuerungsmassnahmen innerhalb der letzten 10 Jahren durchgeführt?
7. Sind die Strassen richtig dimensioniert?

Es gibt zu einzelnen Fragestellungen mehrere Benchmarkvarianten. Diese werden mit a, b, c etc. unterschieden.

7.1 Beispiele

7.1.1 B1: Welcher Anteil unseres Strassennetzes befindet sich in mittlerem bis gutem bzw. in kritischem bis schlechtem Zustand?

Benötigt für diesen Benchmark sind Zustandsaufnahmen für einen genügend grossen Anteil des Netzes in einem genügend kleinen Zeitraum. Die bemessenen Zustände werden flächengewichtet aggregiert. Je nach Darstellungsart können diskrete Zustandsklassen, Teilklassen oder zusammengefügte Klassen gezeigt werden.

7.1.1.1 Einflussfaktoren

Die von den Kantonen für die Darstellungen vorgeschlagenen Einflussfaktoren sind

1. Innerorts / Ausserorts

2. Verkehrslastklasse
3. Höhenlage

Für diese Einflussfaktoren gibt es für jeden Abschnitt Daten aus nicht-kantonalen Quellen. Für die Verkehrslastklasse lässt sich über die von Open Street Map vorgeschlagenen Strassenkategorien annäherungsweise eine Zuordnung machen. Im Umsetzungsvorschlag (siehe Abschnitt 7.2) wird empfohlen sowohl „soll“ wie auch „ist“ Verkehrslastklassen-Zuordnungen zu verlangen. Dies erscheint uns als eine Nutzen-Kosten vertretbare Lösung. Eine Quelle für Angaben über innerorts / ausserorts sind die 100m x 100m Raster aus der Arealstatistik Schweiz (<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/erhebungen/area.html>). Eine Quelle für die Höhenlagen ist Swisstopo. Wir haben hierfür das RIMINI DHM200 Rastermodell (<https://shop.swisstopo.admin.ch/de/>) benutzt.

Die Auswirkung von den Einflussfaktoren innerorts / ausserorts auf die Verteilung der Zustände insgesamt wird in Abbildung 38 gezeigt. Selbstredend bezeugt das Bild nicht die Gleichheit der Verfallsraten unter den verschiedenen Umständen, sondern es bezeugt die kombinierte Auswirkung von Verfall und Unterhaltsmassnahmen. Wie auch immer es sich mit Verfallsraten verhält, die Strassen werden im Durchschnitt so unterhalten, dass daraus eine gleiche Verteilung der Zustände innerorts wie ausserorts resultiert. Dasselbe Bild ergibt sich auf Kantonsebene. Deshalb bringt eine Differenzierung von Benchmark B1 nach innerorts / ausserorts wenig.

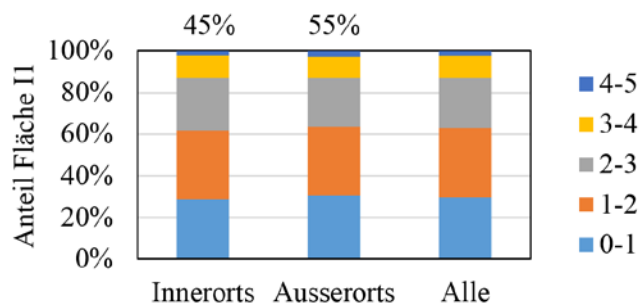


Abbildung 38 Einfluss Innerorts / Ausserorts auf den Durchschnittszustand gemäss I¹. Die Prozentsätze oben am Bild sind die flächenmässigen Aufteilungen der Strassen.

Die Auswirkung vom Einflussfaktor Verkehrslastklasse auf die Verteilung der Zustände insgesamt wird in Abbildung 39 gezeigt. Anders als beim Einflussfaktor innerorts / ausserorts scheint es eine Differenzierung in der Verteilung nach Verkehrslastklasse zu geben. Bei einer höheren Verkehrslastklasse verbessert sich der Zustand im Schnitt. Da die Verkehrslastklasse auf eine höhere Belastung durch Verkehr deutet, ist der bessere Zustand auf intensiveren Unterhalt zurückzuführen. Auf Grund der kleinen Anteile von T1 und T5 Strassen bei den Kantonen, wird vorgeschlagen, dass T1 und T2 sowie T4 und T5 in den Benchmarks zusammengeführt werden, sonst haben die Durchschnittswerte zu wenig Aussagekraft.

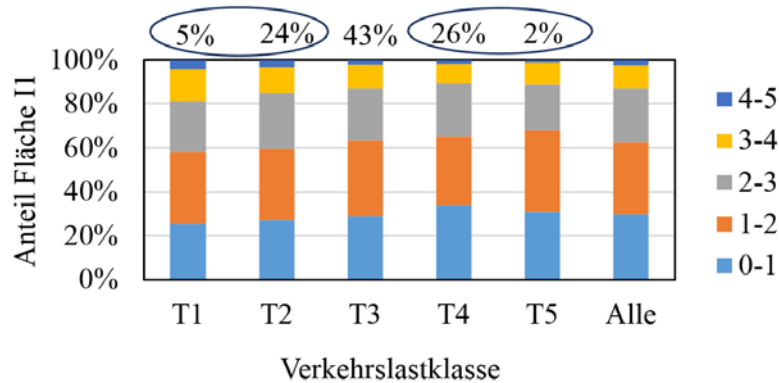


Abbildung 39 Einfluss der Verkehrslastklasse auf den Durchschnittszustand gemäss I¹. Die Prozentsätze oben am Bild sind die flächenmässigen Aufteilungen der Strassen.

Die Auswirkung des Einflussfaktors Höhenlage auf die Verteilung der Zustände insgesamt wird in Abbildung 40 gezeigt. Es gibt eine deutliche Abnahme des durchschnittlichen Zustands mit ansteigender Höhenlage. Ob dies von höheren Verfallsraten oder von einem weniger intensiven Unterhalt oder von beidem stammt, lässt sich mit dieser Darstellung nicht belegen. Es wird vorgeschlagen, in den Benchmarks nur zwei Höhenlagenkategorien zu führen, da es relativ wenig Strassenfläche gibt, welche über 1400m liegt. So werden die Durchschnitte weniger aussagekräftig.

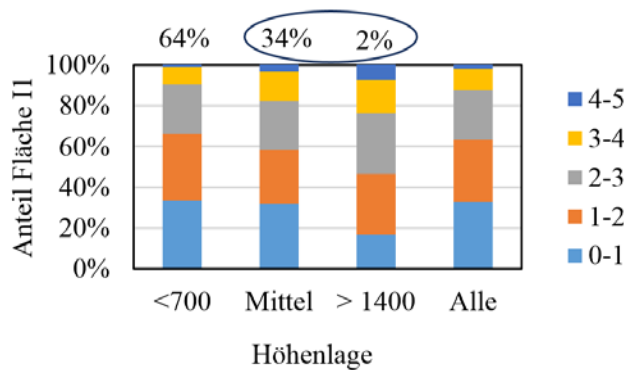


Abbildung 40 Einfluss der Höhenlage auf den Durchschnittszustand gemäss I¹. Die Prozentsätze oben am Bild sind die flächenmässigen Aufteilungen der Strassen.

7.1.1.2 Benötigte Daten und Verfügbarkeit

Tabelle 19 stellt die Verfügbarkeit der Daten für I¹ für das Benchmark Konzept B1 innerhalb der beteiligten Kantone dar. Es wurden nur die zwei neuesten Aufnahmen betrachtet. Da nicht alle Kantone netzweite Aufnahmen machen, müssten in manchen Fällen einzelne Jahre miteinander gruppiert werden, um das ganze Netz abzudecken. In den meisten Fällen gibt es trotzdem einzelne Strecken, die ohne Wert waren. Um die Vertraulichkeit zu bewahren, ist die Reihenfolge in den Tabellen von Tabelle zu Tabelle unterschiedlich. Wer 1, 2 oder 3 ist, bleibt nicht konstant.

- «Min Jahr» bedeutet das erste Jahr, falls mehrere Jahre zusammen gruppiert wurde, um das Netz abzudecken.
- «Max Jahr» ist das letzte Jahr einer solche Gruppierung.
- «Anzahl Jahre» ist die Anzahl Jahre mit Werten in dem Zeitraum.
- «% Abdeckung» bedeutet den Flächenprozentanteil von dem ganzen Netz wo ein Zustandswert vorhanden ist.

Die Hintergrundfarbe bedeutet, im Urteil der Forscher ist der entsprechende Fall genügend = Grün, knapp genügend = Gelb, und ungenügend = Rot.

Die zweite Aufnahme ist die neueste. Die Farbe in der ganz linken Spalte deutet auf genügende Datenqualität für eine Berechnung des Benchmarks für den Kanton insgesamt. Es braucht für Benchmark B1 nur eine Zustandsaufnahme.

Tabelle 19 Datenverfügbarkeit BM B1

Knt	Zustandsaufnahme 1				Zustandsaufnahme 2			
	Min Jahr	Max Jahr	Anzahl Jahre	% Abdeckung	Min Jahr	Max Jahr	Anzahl Jahre	% Abdeckung
1				0%	2012	2015	4	100%
2				0%	2010	2011	2	99%
3	2010	2011	2	99%	2015	2015	1	99%
4	2010	2010	1	75%	2013	2013	1	99%
5	2008	2008	1	89%	2015	2015	1	99%
6	2010	2011	2	30%	2013	2013	1	99%
7	2010	2010	1	97%	2015	2015	1	99%
8	2010	2010	1	98%	2014	2014	1	98%
9	2012	2012	1	98%	2015	2015	1	97%
10	2004	2006	3	70%	2012	2012	1	95%
11	2011	2011	1	93%	2014	2014	1	93%
12	2008	2011	4	87%	2012	2016	5	92%
13	2006	2009	4	96%	2012	2014	3	91%
14	2007	2007	1	80%	2010	2010	1	76%
15				0%	2011	2013	3	70%
16	2009	2011	3	57%	2013	2014	2	65%
17	2006	2009	4	95%	2011	2013	3	5%
18	2008	2010	3	95%	2011	2012	2	4%

7.1.1.3 Möglicher Umgang mit fehlenden Datenelementen

Nicht alle Kantone haben neuere Erhebungswerte über das ganze Netz. Eine 100 prozentige Abdeckung ist auch nicht unbedingt erforderlich, um eine verlässliche Aussage über den Durchschnittszustand zu machen. Hier können unterschiedliche Ausführungsregeln angedacht werden. Zum Beispiel können Kantone ausgeschlossen werden, falls 75% der Fläche nicht innerhalb einer Zeitspanne von maximal 4 Jahren, die nicht mehr als 7 Jahren zurück liegt, eine Bewertung erhielt. Würde diese Regel angewendet, hätten 13 aus den 20 am Projekt teilnehmenden Kantonen für dieses Benchmark ausreichende Daten.

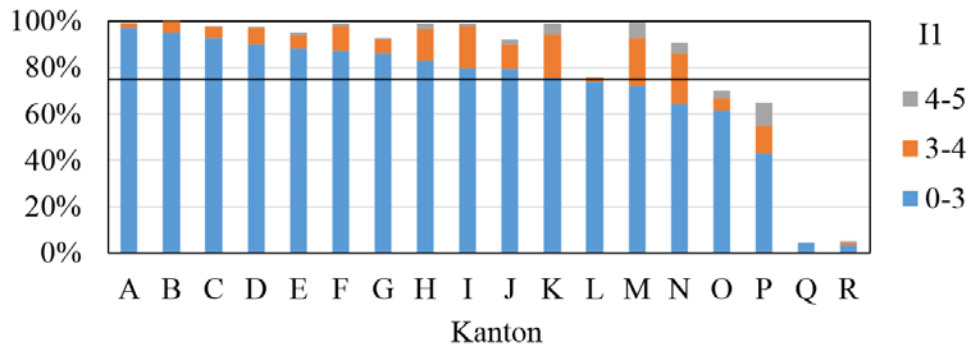


Abbildung 41 Datenverfügbarkeit: % der Strassenfläche mit einer Zustandsbewertung I^1 , Teilnehmende Kantone. Die schwarze Linie liegt bei 75%.

7.1.1.4 Darstellungsmöglichkeiten

Die Daten lassen sich in zwei möglichen Formen darstellen. Die erste Form zeigt die tatsächlich beobachteten Prozente aus der Gesamtfläche wie in Abbildung 41. Nennen wir dies B1a. Eine Alternative ist, die Daten in Prozent der Flächen mit Beobachtungen auszudrücken. Nennen wir dies B1b. Letzteres Prozedere ist eine Interpretation der Beobachtungen einer Stichprobe gleichzusetzen. Insofern als 75% der Gesamtfläche vorausgesetzt wird, ehe ein Benchmarkwert kalkuliert wird, scheint es uns vertretbar, dass hier mit einem Stichprobeansatz vorgegangen wird. Dies macht es einfacher, Vergleiche anzustellen.

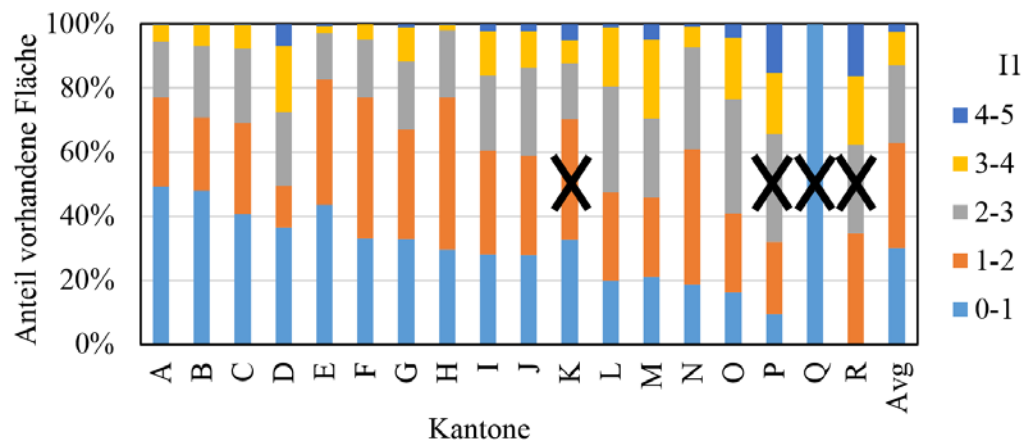


Abbildung 42 Benchmark B1b: % der Strassenfläche nach Zustandsklasse gemäss I^1 , teilnehmende Kantone. Das X deutet auf Kantone bei denen weniger als 75% der Gesamtfläche I^1 Werte haben. Sortiert wird links-rechts nach der Anteil in der Klasse 0-1.

7.1.1.5 Beispiele

Es folgen 4 Beispiele von einzelnen Kantonen. Eine Differenzierung ist klar erkennbar. Genau das ist der Sinn der Type-B Benchmarks. Erkenntnisse lassen sich danach in Gesprächen herausarbeiten, ob diese Differenzen gewollt und vertretbar sind.

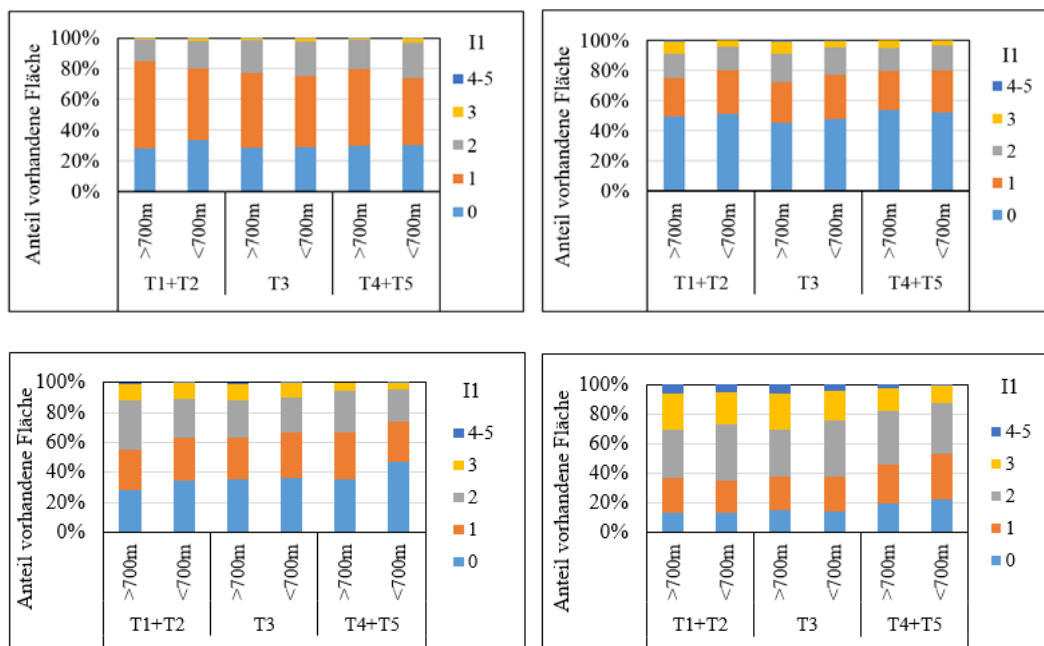


Abbildung 43 Beispiele des Benchmarks B1

7.1.1.6 Beurteilung

Für das Benchmark-Konzept B1 sind in den meisten Kantonen ausreichende Daten vorhanden. Es müssen für eine konkrete Ausführung spezifische Regeln abgemacht werden.

Da manche Kantone das ganze Netz nicht im gleichen Jahr erheben, können Werte aus verschiedenen, aber nahe beieinander liegenden Jahren vermischt werden. Jedes Jahr wird dann als Stichprobe der Verteilung der Zustände interpretiert. Damit dies zu keiner Verzerrung führt, soll keine Korrelation zwischen dem Zustand und dem Gebiet, wo die Erhebungen stattfand, bestehen. Bei dem langsamen Verlauf der Zustandsentwicklung sind Zeitspannen von 3 oder 4 Jahren vertretbar.

Um zeitgemäss zu sein, dürfen die Erhebungen nicht zu weit in der Vergangenheit liegen. 7 Jahren scheint bei der kantonalen Datenlage eine nicht zu strenge Grenze zu sein.

Für eine Teilnahme schlagen wir eine Grenze von 75% der Flächen vor, sofern die Auswahl der Flächen nicht zu stark mit dem Zustand korreliert. Somit könnte heute für etwa 2/3 der Kantone das Konzept B1 berechnet werden.

Als bedeutende Einflussfaktoren stellten sich die Verkehrslastklasse sowie die Höhenlage heraus. Die Unterscheidung innerorts / ausserorts ergibt keine Differenzierung.

Als Darstellungsart wird die Version B1b vorgeschlagen. Somit muss der Benutzer nicht zuerst umrechnen, wenn ein Vergleich angestellt wird.

7.1.2 B2: Hat sich der Zustand unseres Strassennetzes in den letzten 5 Jahren verbessert / verschlechtert / oder ist er gleichgeblieben?

Benötigt für dieses Benchmark sind zwei Zustandsaufnahmen für einen genügend grossen Anteil des Netzes in einem genügend kleinen Zeitraum. Die gemessenen Zustände werden flächengewichtet aggregiert. Je nach Darstellungsart kann entweder ein flächengewichteter Mittelwert oder eine kumulative Verteilung der Zustände gezeigt werden.

7.1.2.1 Einflussfaktoren

Als Einflussfaktoren lassen sich prinzipiell die Gleichen einsetzen wie in B1. Nur wird es unübersichtlich, wenn neben der zeitlichen Veränderung auch unterschiedliche Einflussfaktoren gezeigt werden. Deshalb werden in den folgenden Darstellung nur gesamtkantonale Durchschnitte gezeigt.

7.1.2.2 Benötigte Daten und Verfügbarkeit

Tabelle 20 stellt die Verfügbarkeit der Daten für I¹ für das Benchmark Konzept B2 unter den beteiligten Kantonen dar. Es wurden nur die zwei neuesten Aufnahmen betrachtet. Es gibt aber Kantone, die eine längere Zeitreihe an Erhebungen haben. Fünf Erhebungen war die längste uns übermittelte Zeitreihe. Da nicht alle Kantone netzweite Aufnahmen machen, mussten in manchen Fällen einzelne Jahren miteinander gruppiert werden, um das ganze Netz abzudecken. In den meisten Fällen gibt es trotzdem einzelne Strecken, die ohne Wert waren. Die zweite Aufnahme ist die neueste. Die Bedeutung der Überschriften und Farben bleibt wie oben gleich. Grün in der ganz linken Spalte bedeutet genügend Daten für eine Berechnung. Dies war der Fall für etwa 1/3 der teilnehmenden Kantone. Dies ist vermutlich eine Untertreibung der tatsächlichen Datenlage, da einzelne Kantone möglicherweise ältere Erhebungsdaten nicht eingereicht haben. Selbstverständlich müssen die Erhebungen in ihrer Bewertung skalenmässig vergleichbar sein. Sofern die Normen befolgt werden, sollte dies zutreffen. Aber wie bei dem Benchmark A2 gezeigt wurde, ist die Annahme der durchschnittlichen skalenmässigen Vergleichbarkeit bei einzelnen Kantonen nicht plausibel.

Tabelle 20 Datenverfügbarkeit BM B2

Knt	Zustandsaufnahme 1				Zustandsaufnahme 2			
	Min Jahr	Max Jahr	Anzahl Jahren	% Abdeckung	Min Jahr	Max Jahr	Anzahl Jahren	% Abdeckung
1				0%	2012	2015	4	100%
2				0%	2010	2011	2	99%
3	2010	2011	2	99%	2015	2015	1	99%
4	2010	2010	1	75%	2013	2013	1	99%
5	2008	2008	1	89%	2015	2015	1	99%
6	2010	2011	2	30%	2013	2013	1	99%
7	2010	2010	1	97%	2015	2015	1	99%
8	2010	2010	1	98%	2014	2014	1	98%
9	2012	2012	1	98%	2015	2015	1	97%
10	2004	2006	3	70%	2012	2012	1	95%
11	2011	2011	1	93%	2014	2014	1	93%
12	2008	2011	4	87%	2012	2016	5	92%
13	2006	2009	4	96%	2012	2014	3	91%
14	2007	2007	1	80%	2010	2010	1	76%
15				0%	2011	2013	3	70%
16	2009	2011	3	57%	2013	2014	2	65%
17	2006	2009	4	95%	2011	2013	3	5%
18	2008	2010	3	95%	2011	2012	2	4%

7.1.2.3 Möglicher Umgang mit fehlenden Datenelementen

Es wird die gleiche Vorgehensweise wie bei B1 vorgeschlagen, aber hier betrifft es zwei Erhebungen.

7.1.2.4 Darstellungsmöglichkeiten

Zwei Darstellungsmodi sind möglich. B2a zeigt gewichtete Durchschnittswerte für jeden Kanton und jedes Erhebungsjahr an, also

$$\overline{Znd}_{j,t} = \frac{\sum_i Znd_{i,j,t} \cdot Fläche_{i,j,t}}{\sum_i Fläche_{i,j,t}}, \quad (79)$$

wobei Znd Zustand bedeutet und i die Abschnitte, j die Kantone, und t die Erhebung indizieren. Diese Art der Darstellung wird in Abbildung 44 gezeigt.

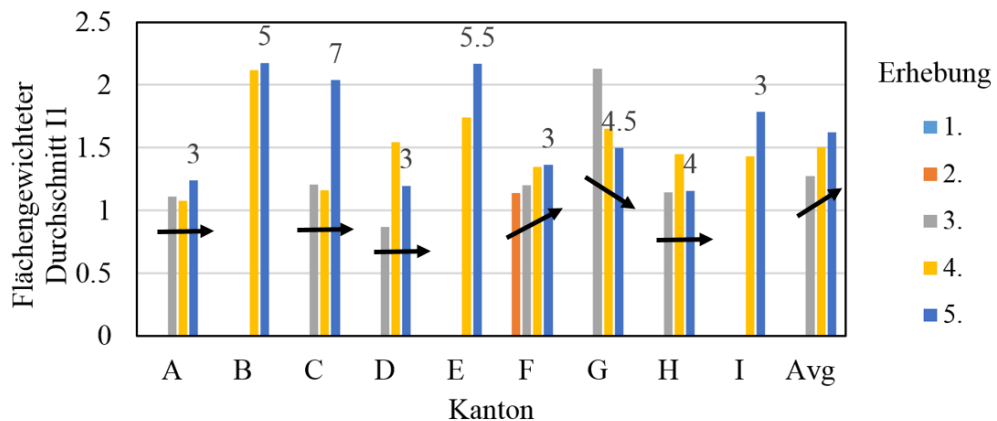


Abbildung 44 Benchmark B2a: Der Zeitverlauf des flächengewichteten Durchschnittszustands gemäss I1, teilnehmende Kantone. Die älteste vorhandene Erhebung ist 1 (hellblau), das neuste ist 5 (dunkelblau). Die Zahlen im Bild zeigen die Anzahl Jahre zwischen den letzten zwei Erhebungen.

Darstellung B2a dient vor allem für die Feststellung einer Zeitentwicklung. Die Pfeile geben eine solche Deutung an. Aber auch mit drei Werten ist ein Trend kaum nachzuweisen und nur die wenigsten Kantone haben solche lange, vergleichbare Reihen für das ganze Netz. Deshalb erscheint diese Darstellungsart wenig an Interpretationsmöglichkeiten zu bieten.

Eine zweite Darstellungsart der Daten ist die kumulative Verteilung: B2b. Weil die Kumulativverteilung wesentlich mehr Inhalt über die einzelnen Jahre aussagt, ist ein Vergleich mit wenigen Jahren trotzdem aufschlussreich. Dies wird in Abbildung 45 gezeigt.

Die Kumulativverteilung gibt für jedes Zustandsniveau den Prozentanteil der Fläche an, der unterhalb dieses Niveaus liegt. Es lassen sich so die unterschiedlichen Erhaltungsstrategien darstellen. Stellt man zwei solche Verteilungen von gleichen Kantonen nebeneinander, wird der gemessene Unterschied in der Erhaltungsstrategie dargestellt. Manche Verschiebungen in der Verteilung erscheinen gänzlich unwahrscheinlich, was auf eine Verschiebung in der Erhebungsmethodik hindeutet. Manche Verschiebungen lassen sich als Investitionsschub oder das Gegenteil interpretieren. Somit kann die Kumulativdarstellungsweise sowohl einen Quervergleich wie auch einen zeitlichen Vergleich der Erhaltungsstrategien ermöglichen.

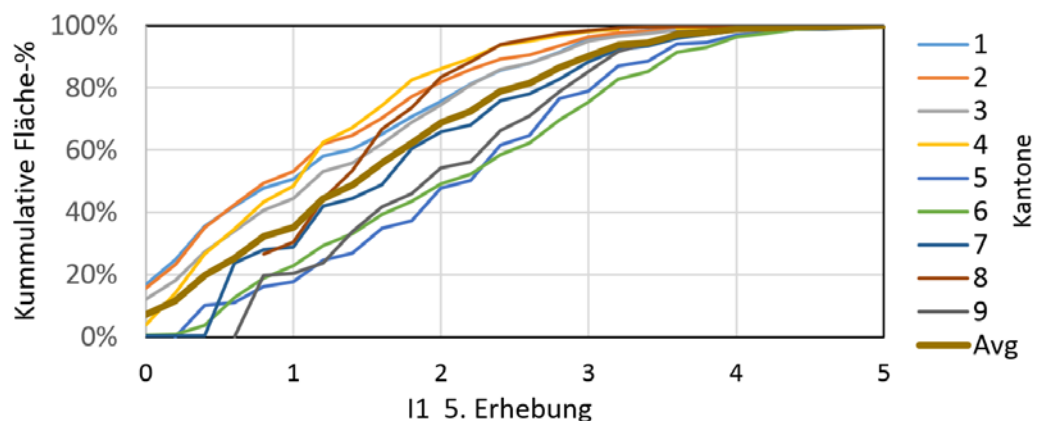


Abbildung 45 Kumulativverteilung des Zustands gemäss I1, teilnehmende Kantone mit einem Erhebungswert.

Abbildung 46 zeigt drei Kumulativverteilungen aus nachfolgenden Erhebungen. Die Veränderung zwischen den Erhebungen 3 und 4 erscheint uns als unwahrscheinlich. Bei der Erhebung 3 waren etwa 70% der Fläche in einem besseren Zustand als 1. Bei der Erhebung 4 sank dieser Anteil auf knapp unter 30%. Eine solche Verschiebung innerhalb von 4 oder 5 Jahren deutet sowohl auf sehr wenig Erneuerung wie auch auf recht hohe Verfallsraten hin. Typisch für die Schweiz bei gewöhnlicher betrieblicher Unterhaltsintensität sind Verfallsraten kleiner als 0.15 Klassen pro Jahr (= 3 Klassen in 20 Jahren; siehe Abbildung 28). Nach 5 Jahren ohne Erneuerung, aber mit kleineren Unterhaltsarbeiten, würde sich die Kurve deshalb typischerweise um $5 \times 0.15 = 0.75$ nach rechts verschieben. Das ist ungefähr das was die zwei Kurven von Erhebungen 3 und 4 andeuten. Dass es keine Erhaltungsmassnahme gegeben hätte, ist aber sehr unwahrscheinlich, also wird hier eine Verschiebung des Zustandsindex zwischen den Erhebungen angedeutet.

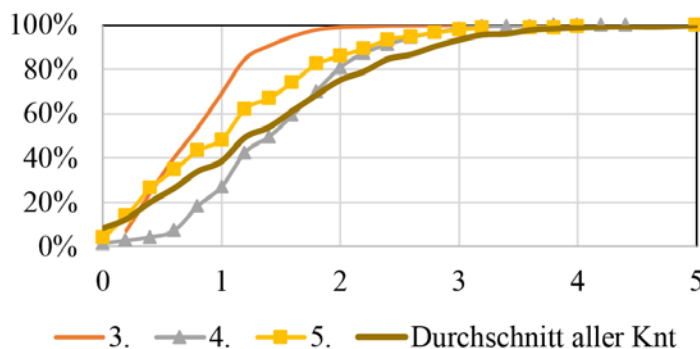


Abbildung 46 Benchmark B2b und ein schwer erklärbarer Zeitverlauf

Danach muss es einen sehr grossen Investitionsschub gegeben haben, um die Kurve 5 zu verursachen. Mengenmässig müsste etwa 30% des Netzes zwischen diesen zwei Erhebungen erneuert worden sein. Vergleiche dazu die ersten 4 Punkte der Kurve 4 mit Kurve 5. Ein solcher Investitionsschub ist möglich und wäre natürlich dem Netzbetreiber bekannt. Trifft es zu, dann stellt Abbildung 46 implizit die Frage, ob eine solche wellenmässige Unterhaltsstrategie auch sinnvoll ist. Trifft es nicht zu, dann stellt Abbildung 46 explizit fest, dass die Erhebungsmethoden nicht vergleichbar sind.

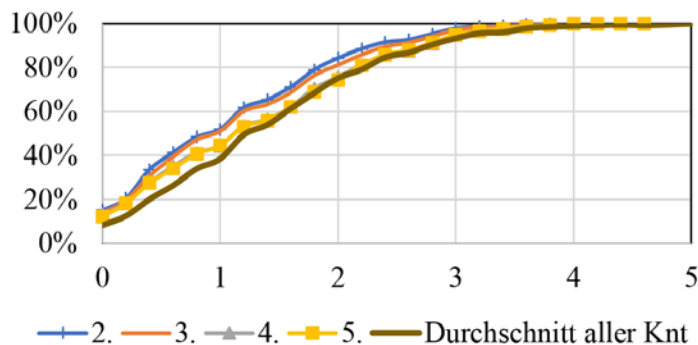


Abbildung 47 Benchmark B2b und ein vergleichbarer Zeitverlauf mit schlechter werdender Tendenz

Abbildung 47 gibt einen Fall wieder, bei dem die Werte über die Zeit eng vergleichbar erscheinen. Der gleichbleibende Ausgangspunkt der 4 Kurven bei ca. 15% deutet auf eine konstante Erneuerungsrate hin. Bei einer Zeitspanne von 2 oder 3 Jahren bis der Zustand 0.2 erreicht ist (siehe Abbildung 28), müsste die Erneuerungsrate um 5 bis 8% liegen. Der Punkt 0 erfasst die Abschnitte die unter 0.2 sind. Im Schweizerischen Vergleich (Abbildung 45) sind diese Erneuerungsrate bei den höchsten. Dies bringt sowohl Kosten wie auch Strassenqualität. Die Konsistenz der Daten über vier Erhebungen zeigt, dass solche Daten sinnvolle Diskussionen über Themen wie z.B. die Höhe des so geleisteten

Strassenzustandes zulassen. Dasselbe gilt für das langsam zurückgehende Gesamtniveau, welches in der Abbildung 44 auch zu sehen ist. Nur ein Beispiel mit vier Beobachtungen wird gezeigt.

7.1.2.5 Beispiele

Abbildung 48 zeigt ein vergleichendes Beispiel des Benchmarks in Form B2b. Es werden je zwei Erhebungen von zwei Kantonen gezeigt. In beiden Fällen erwecken die Kurven den Eindruck der inneren Vergleichbarkeit. Insofern die Skalen vergleichbar sind, was bei korrekter Anwendung der Normen sein sollte, werden hier zwei ganz verschiedene Unterhaltsstrategien gezeigt und auch unterschiedliche Ansprüche an Strassenqualität. Erkenntnisse lassen sich danach in Gesprächen herausarbeiten, ob diese Differenzen gewollt und vertretbar sind.

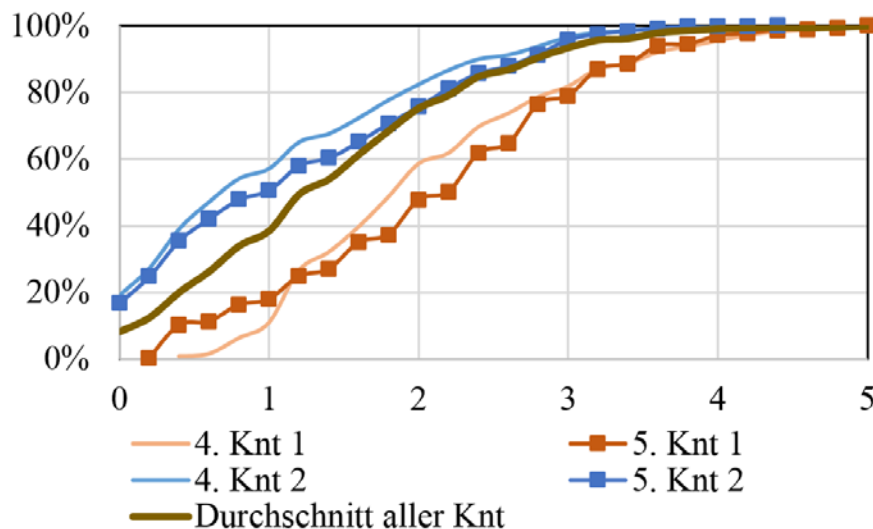


Abbildung 48 Beispielen der Benchmark B2

7.1.2.6 Beurteilung

Für das Benchmark-Konzept B2 sind in etwa einem Drittel der Kantone ausreichende Daten vorhanden. Es müssen für eine konkrete Ausführung spezifische Regeln abgemacht werden. Dies verhält sich wie bei B1.

Als Darstellungsart wird die Version B2b vorgeschlagen, weil damit viel mehr Informationen angezeigt werden. Nur wenige Kantone haben eine genügend lange Zeitreihe um einen Trend zu belegen. Aber bei 4 Werten alle 3 Jahre ist ein recht langer Zeitraum inbegriffen. Ob dieser Raum auch für eine Beurteilung heute relevant ist, ist fraglich.

Version B2b gibt Einblicke sowohl in der Erhebungsdatenqualität wie auch in den angewendeten Unterhaltsstrategien. Vergleiche sind möglich zwischen den Kantonen und für einzelne Kantone über die Zeit.

7.1.3 B3: Verfolge ich eine präventive Substanzerhaltungsstrategie (Massnahmen zum richtigen Zeitpunkt) oder eine reaktive Substanzerhaltungsstrategie (Massnahmen, wenn Wertzerfall bereits weit fortgeschritten)?

Für dieses Benchmark-Konzept wird der durchschnittliche Zustand vor und nach einer Massnahme untersucht. Es werden nur Massnahmen in Betracht gezogen, die zu einer ganzflächigen Erneuerung der Deckschicht geführt haben. Kein Kanton hat einen eigentlichen Massnahmen-Datensatz eingereicht, der einen direkten Hinweis auf

Massnahmen gegeben hätte. Deshalb wird hier von Datensätzen über den Belagsaufbau ausgegangen. Solche waren für einige Kantone vorhanden.

Es gab in allen Belagsaufbaudatensätzen Angaben zu dem Belagseinbaudatum. Dieses Datum wird als Massnahmendatum angenommen. Für die Kantone, die eine Zeitreihe an Erhebungen hatten, konnten wir relativ zu dem Einbaudatum die vorausgehenden und darauffolgenden Zustände in vielen Fällen in den Daten finden. Die somit gewonnenen Daten sind durch die vorhandenen Erhebungen zeitlich limitiert. Dies entspricht aber einer Betrachtung der Strategie aus der jüngeren Vergangenheit. Dies ist für ein Benchmarking eher relevant.

Im Umsetzungsvorschlag wird vorgeschlagen, dass die Kantone selber angeben, wann die Deckschicht erneuert wurde. Somit können die grössten Unsicherheiten bei der Berechnung dieses Benchmarks beseitigt werden.

7.1.3.1 Einflussfaktoren

Es werden keine Einflussfaktoren berücksichtigt. Die Netzbetreiber sind frei in der Auswahl ihrer Auslösezustände. Diese könnten von Umweltfaktoren abhängen oder auch nicht. Im Umsetzungsvorschlag wird deshalb verlangt, dass der Netzbetreiber eigene «Soll» Auslösezustände angibt. Diese könnten netzweit gleich sein oder im Prinzip für jeden Abschnitt individuell. Einzelne Kantone benutzen ein Kategoriensystem nach Strassentyp, nach dem die Erneuerung früher oder später erfolgt.

7.1.3.2 Benötigte Daten und Verfügbarkeit

Tabelle 21 stellt die Verfügbarkeit der Daten für I¹ für das Benchmark Konzept B3 unter den beteiligten Kantonen dar. Grün in der ganz linken Spalte bedeutet genügend Daten für eine Berechnung. Dies war der Fall für etwa 1/3 der teilnehmenden Kantone. Dies ist vermutlich eine Untertreibung der tatsächlichen Datenlage, da einzelne Kantone möglicherweise ältere Erhebungsdaten nicht eingereicht haben und/oder Listen von Massnahmen führen, die uns nicht bekannt sind.

Tabelle 21 Datenverfügbarkeit BM B3

Kanton	Anzahl Erhebungen mit genügend Daten	Prozent der Fläche mit Beobachtungen
A	4	16%
B	2	15%
C	2	15%
D	1	14%
E	3	11%
F	1	7%
G	2	6%
H	1	1%
I	1	1%
J	0	0%
K	0	0%
L	0	0%
M	0	0%

Auf Grund einer 25 jährigen erwarteten Gebrauchsdauer für die Deckschicht muss man im Schnitt mit Erneuerungsmassnahmen über 4% der Gesamtfläche pro Jahr rechnen. So entspricht 6% oder 7% einem nicht unbedeutenden Zeitraum für eine Beurteilung der jetzt geltenden Strategie.

Für die Belagseinbaudaten muss ein qualitatives Limit gesetzt werden, wie dick die neu eingebaute Schicht sein muss, um als «Erneuerung der Deckschicht» zu gelten. In den folgenden Beispielen wurde das Limit bei 1.5 cm gesetzt. Es kann gut sein, dass gleichzeitig mit dieser obersten Schicht auch darunterliegende Schichten ersetzt wurden. Die Datensätze der Kantone sind weder in der Struktur noch in der Semantik einheitlich, sodass einige Annahmen getroffen werden mussten, um die Daten als «Deckschicht» zu interpretieren. Die Graphiken sind deshalb vorsichtig zu interpretieren. Es geht hier nicht darum, zu zeigen, wie es sich in Wirklichkeit verhält, sondern ob dieses Benchmark-Konzept überhaupt einen Informationsgehalt liefern könnte, wenn es genügend verlässliche Daten gäbe. In diesem Fall werden im Umsetzungsvorschlag die Belagsdaten nicht als Inputdaten verwendet.

7.1.3.3 Möglicher Umgang mit fehlenden Datenelementen

Der Vorschlag der Forscher ist für diesen Benchmark, im Sinne eine Stichprobe, 2% der Fläche vorauszusetzen. Eine zeitliche Begrenzung wie B2 wird vorgeschlagen. Dies wird in den folgenden Abbildungen nicht umgesetzt um möglichst viele Einzelfälle anzeigen zu können.

7.1.3.4 Darstellungsmöglichkeiten

Von Interesse bei einer Strategiebeurteilung ist nicht nur der Durchschnitt (B3a) des Zustands bei der Auslösung einer Erneuerungsmassnahme, sondern auch die Standardabweichung (B3b). Somit ergeben sich grundsätzlich zwei Darstellungsformen: Durchschnitt und Standardabweichung.

7.1.3.5 Beispiele

Abbildung 49 zeigt ein vergleichendes Beispiel des Benchmarks B3a. Werte werden für jedes Jahr zwischen der Massnahme und der nächsten Erhebung angegeben. Es müsste bei diesen Werten eine absteigende Reihenfolge geben, da die Abschnitte in den Jahren zwischen der letzten Erhebung und der darauffolgenden Massnahme weiter verfallen sollen. Eine solche Entwicklung ist bei dem ersten Kanton ganz links im Bild auszumachen. Das Fehlen eines solchen Trends gibt eine Indikation über die Belastbarkeit diesen Daten. Andererseits zeigen die Daten eine recht hohe Konsistenz bei den einzelnen Kantonen über die Zeit und eine deutliche Differenzierung zwischen den Kantonen.

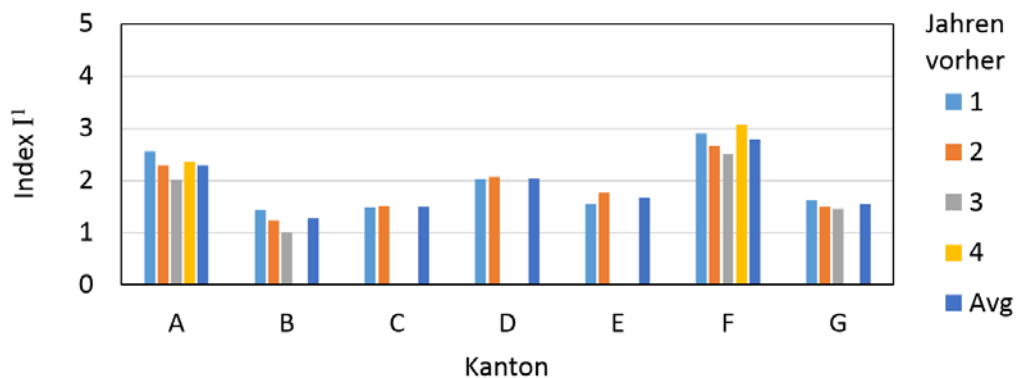


Abbildung 49 Beispiel der Benchmark B3a: Durchschnittswert des Zustands vor der Massnahme.

Ein Zustand kann nicht 100% eindeutig erfasst werden. Beim I^1 handelt es sich sowieso um eine visuelle Einschätzung bei der ein gewisser Schwankungsspielraum anzunehmen ist. Trotzdem wird in Abbildung 49 klar, dass die angezeigten Differenzen mit einem Schwankungsspielraum nicht erklärbar sind. Es kann sein, dass sich die Belagsdaten für die Identifikation einer Massnahme schlecht eignen und dass wenn zweckspezifische Daten angewendet würden, sich das Bild veränderte. Klar bleibt, dass ein Benchmark in dieser Form wichtige Information zu der implementierten Strategie liefern kann. Sollte das Bild der Tatsache entsprechen, wird hier ein grosser Unterschied zwischen den Strategien angezeigt.

Abbildung 50 berechnet aus der gleichen Datensammlung die Standardabweichung an Stelle des Durchschnittswerts. Wird eine Strategie mit einem spezifizierten Auslösezustand konsistent umgesetzt, dann ergäbe das eine kleine Standardabweichung. Bei einer Standardabweichung von 1 um einen Mittelwert von 2 ist die Streuung der Werte jedoch ziemlich breit. Bei einer Normalverteilung sind ca. 15% der Werte ausserhalb einer 1 Standardabweichung womit 15% nach einem Wert von 3 und 15% unter einem Wert von 1 erneuert wird.

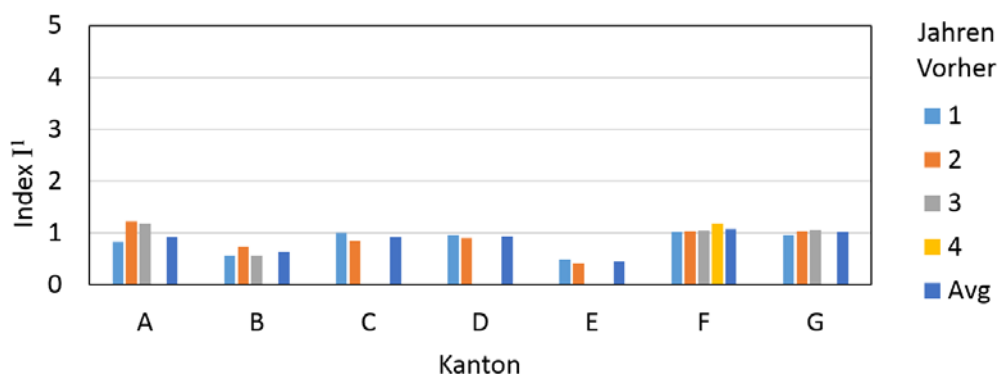


Abbildung 50 Beispiel der Benchmark B3b: Standardabweichung des Zustands vor der Massnahme

Auch dieser Benchmark zeigt deutliche Differenzen unter den Kantonen. Auf Grund der Annahme, dass die Daten hinter Abbildung 50 ein verlässliches Bild wiedergeben, setzt Kanton B gegenüber Kanton A seine Strategie deutlich konsistenter um.

7.1.3.6 Beurteilung

Für das Benchmark-Konzept B3 sind für etwa ein Drittel der Kantone ausreichende Daten vorhanden. Es müssen für eine konkrete Ausführung spezifische Regeln abgemacht werden. Es verhält sich wie bei Benchmark B2.

Als Darstellungsart sind beide Versionen B3a und B3b zu empfehlen. Es werden unterschiedliche Informationen angezeigt. Bei B3a geht es um den Auslösezustand und bei B3b geht es um die Umsetzungsdisziplin. Beide können auf den erreichbaren durchschnittlichen Strassenzustand sowie die generierten Kosten einen Einfluss haben.

Die Möglichkeit, aus Belagsdatensätzen Auslöszeitpunkte zu berechnen, erscheint uns als untauglich. Es werden zu viele Annahmen für eine Interpretation benötigt. Andererseits ist ein zweckspezifischer, über grössere, projektbasierende Massnahmen zu führender Datensatz nicht ausserordentlich teuer. Er hätte aber für mehrere Analysen eine grössere Bedeutung. Den Zustand vor einer Erneuerungsmassnahme eruierbar zu machen ist nur eine davon. Deshalb ist im Umsetzungsvorschlag eine direkte Angabe des letzten Erneuerungsdatums vorgeschlagen.

7.1.4 B4: Welcher Anteil unseres Strassennetzes liegt in höherer topografischer Lage (> 700 Meter über Meer)?

Es geht bei dieser Fragestellung eher um eine statistische Angabe als um einen Benchmark. Der Anteil des Netzes über 700 Meter über Meer liegt ja nicht im Entscheidungsspielraum der Netzbetreiber. Dennoch gibt es, was diese Statistik angeht, in der Schweiz grosse Unterschiede zwischen den Kantonen. Dies kann in Abbildung 51 gesehen werden.

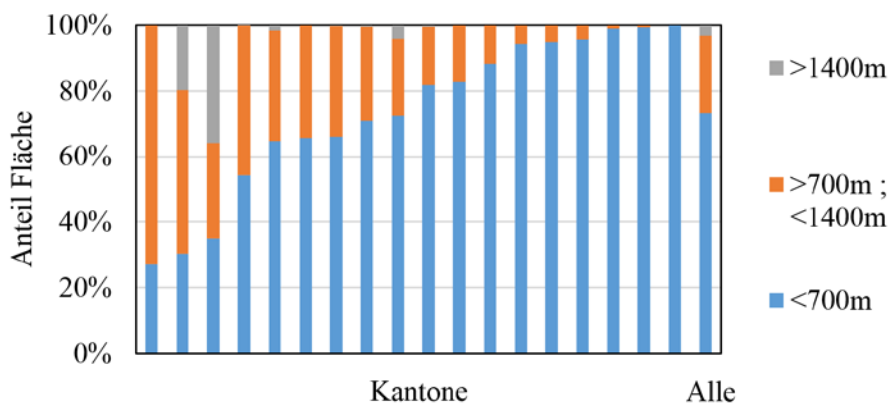


Abbildung 51 Beispiel B4: Flächenanteil über 700 und 1400 Meter über Meer

7.1.4.1 Beurteilung

Insofern als dieses Merkmal für eine Beurteilung der Benchmarks wichtig ist, ist es zielführender das Merkmal als Einflussfaktor wie bei B1 miteinzuberechnen. Gemäss Abbildung 40 haben die Strassen über 1400m mengenmässig wenig Einfluss. Abbildung 43 zeigt, dass es zwar Unterschiede aufgrund der Höhenlage gibt, aber dass diese in der Grössenordnung der Unterschiede zwischen den Kantonen im Allgemeinen untergeordnet sind. Von einem eigenständigen Benchmark für die Höhenlage raten wir deshalb ab. Diese Information kann neben anderen Netzmerkmalen in einem konkreten Benchmarking als Zusatzinformation angegeben werden.

7.1.5 B5: Welchen Kunstbautenanteil weist unser Strassennetz auf?

Es geht bei dieser Fragestellung eher um eine statistische Angabe als um ein Benchmark. Der Anteil des Netzes, der mit Kunstbauten gestützt wird, liegt nicht im Entscheidungsspielraum des Netzbetreibers. Dennoch gibt es grosse Unterschiede in der Schweiz zwischen den Kantonen was diese Statistik angeht. Dies kann in Abbildung 52 gesehen werden.

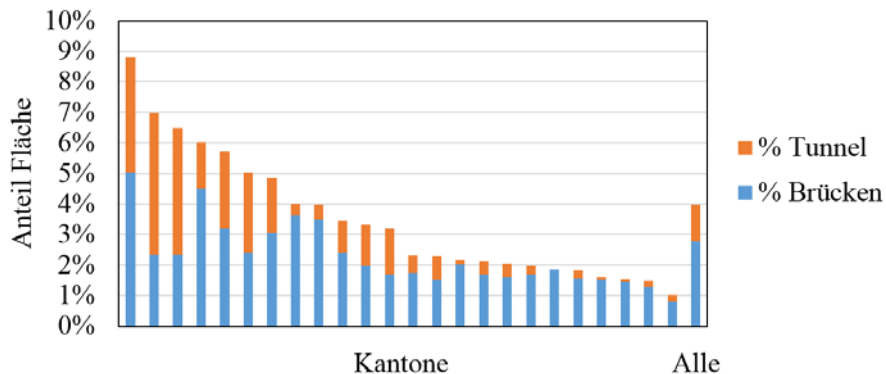


Abbildung 52 Beispiel B5: Flächenanteil in einem Tunnel oder auf einer Brücke

7.1.5.1 Benötigte Daten und Verfügbarkeit

Daten für die Berechnung der Anteile wurden aus OpenStreetMap genommen (<https://www.openstreetmap.org>). Strassenabschnitte in einem Tunnel oder auf einer Brücke werden mit Länge aufgeführt. Eine geeignetere Quelle wären die Kantone. Im Umsetzungsvorschlag werden pro Abschnitt die Länge einer allfälligen Stützmauer, Tunnel und Brücke als Merkmal angefordert.

7.1.5.2 Beurteilung

Insofern als dieses Merkmal für eine Beurteilung der Benchmarks wichtig ist, ist es zielführender das Merkmal als Einflussfaktor miteinzuberechnen. Bei einem konkreten Benchmarking-Projekt wäre das möglich. Von einem eigenständigen Benchmark für den Kunstbautenanteil raten wir ab. Diese Information kann neben anderen Netzmerkmalen als Zusatzinformation angegeben werden.

7.1.6 B6: Wurden genügend Erneuerungsmassnahmen innerhalb der letzten 10 Jahre durchgeführt?

Dieser Benchmark erstellt einen Bezug zwischen der Fläche, die tatsächlich erneuert wurde, und der Fläche, die hätte erneuert werden sollen, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Je nach Kanton können unterschiedliche Ziele angewandt werden.

Grundprinzip der Berechnung ist die Überlegung, dass bei einer erwarteten Gebrauchsdauer der Deckschicht von T , der Erwartungswert der jährlichen Erneuerungsmenge $1/T$ ist.

Eine besondere Eigenschaft dieses Benchmark-Konzepts ist, dass es die Frage nach den benötigten Mengen an Erneuerung ohne Einbezug der Menge der Ausgaben für Projekte beantwortet. Es ist durchaus möglich, bei steigenden Ausbaustandards, steigenden Preisen oder beim Einbinden von Sonderleistungen in Erneuerungsprojekte, dass bei steigenden Gesamtausgaben, die erreichte erneuerte Fläche trotzdem sinkt. In dem man sich nur auf das Flächenprozent bezieht, umgeht man viele Nebeneffekte, die die Ausgaben mitbestimmen.

Die Gebrauchsdauer ist keine rein physisch bestimmte Grösse. Sie beinhaltet auch einen Qualitätsanspruch. In den folgenden Tabellen und Abbildungen wird der Qualitätsanspruch

einheitlich festgelegt. Es wird angenommen, dass jeder Netzbetreiber die Erneuerung bei Zustand = 3 auslöst.

Selbstverständlich werden tatsächlich kleine Anteile von Abschnitten nicht jährlich erneuert, sondern nach T Jahren werden die Abschnitte normalerweise als Ganzes erneuert. Ist das Netz aber gross genug, dann kann von einer eher konstanten Erneuerungsrate ausgegangen werden. Ist ein Kanton übermässig von schwierigen Einflussfaktoren betroffen, dann werden dort die Gebrauchsdauern, bis der Zustand von 3 erreicht wird, im Schnitt kürzer. So müsste dieser Kanton, um denselben Qualitätsanspruch zu erreichen, eine grössere Menge an Erneuerungen jährlich ausführen. Um diesen Aspekt hervorzuheben, muss der Benchmark B6 relativ zu den modellierten Verfallsraten formuliert werden. Nenne dies B6a. Andererseits, will man die unterschiedlichen absoluten Mengen an Erneuerung hervorheben, muss dieser Benchmark absolut formuliert sein. Nenne dies B6b.

Besonders nützlich bei der Formulierung B6b ist der zeitliche Trend, da in dieser Formulierung allfällige Einflussfaktoren bei allen Werten desselben Kantons in etwa gleich bleiben. So verbleibt bei grösseren Netzen tatsächlich wenig Interpretationsspielraum. Nimmt der Flächenanteil, der erneuert wird, gegenüber der Vergangenheit zu, dann verringert sich das Alter des Netzs im Schnitt. Eine steigende Qualität im Schnitt ist zu vermuten. Dies könnte mit dem Benchmark B2 bestätigt werden.

7.1.6.1 Einflussfaktoren

Hier sind, neben dem Qualitätsanspruch des Netzbetreibers, sämtliche Einflussfaktoren relevant, die für die Berechnung von Verfallsraten miteinbezogen werden. Für den Benchmark B6a sind diese bereits eingerechnet. Von B6b sind diese absichtlich ausgeschlossen.

7.1.6.2 Benötigte Daten und Verfügbarkeit

Für die Berechnung dieses Benchmark-Konzepts sind Angaben über den Zeitpunkt von Erneuerungsmassnahmen nötig. Die Problematik stellt sich gleich wie bei Benchmark B3. Da kein direkter Datensatz über Massnahmen zu Verfügung stand, musste aus einem Belagsdatensatz auf den Zeitpunkt der letzten Erneuerung geschlossen werden. Für Details siehe Abschnitt 7.1.3.2.

Weiter sind Angaben über den zulässigen Zustand bis zur Erneuerung notwendig. Diese können nur die Kantone angeben. Netzweite Werte, Werte je Abschnitt, oder Werte je nach Umstand wie Verkehrslastklasse sind möglich.

Tabelle 22 stellt die Verfügbarkeit der Daten dar.

- «Min Jahr» bedeutet das früheste Jahr bei dem eine Erneuerungsmassnahme in den Daten identifiziert wurde.

- «Max Jahr» bedeutet das späteste Jahr bei dem eine Erneuerungsmassnahme in den Daten identifiziert wurde.

- «Anzahl Jahre mit Daten seit 2000» ist die Anzahl der Jahre seit 2000 bei dem eine Erneuerungsmassnahme in den Datensätzen identifiziert wurde.

- «% wenn Dicke ≥ 1.5 cm» bedeutet den Flächenprozentanteil des ganzen Netzs wo eine Erneuerungsmassnahme identifiziert wurde, unter der Annahme, dass neue Schichtdicken unter 1.5 cm keine Erneuerung der Deckschicht anzeigen.

Die Hintergrundfarbe bedeutet, im Urteil der Forscher ist der entsprechende Fall genügend = Grün, knapp genügend = Gelb, und ungenügend = Rot.

Die zweite Aufnahme ist die neueste. Die Farbe in der ganz linken Spalte deutet auf die genügende Datenqualität für eine Berechnung des Benchmarks für den Kanton insgesamt hin. Es braucht für Benchmark B6 nur eine Zustandsaufnahme.

Tabelle 22 Datenverfügbarkeit BM B6

Kanton	% Abdeckung	% Wenn Dicke ≥ 1.5 cm	Min Jahr	Max Jahr	Anzahl Jahre mit Daten seit 2000
A	97.9%	91.4%	1981	2014	14
B	96.7%	91.5%	1961	2015	15
C	94.9%	42.8%	1965	2014	14
D	84.5%	84.5%	1980	2015	15
E	78.3%	69.3%	1960	2014	14
F	74.3%	45.2%	1963	2007	7
G	59.6%	41.0%	1960	2007	7
H	49.0%	46.6%	1980	2015	15
I	48.5%	47.4%	1999	2014	14
J	31.8%	28.2%	1983	2015	15
K	31.7%	31.7%	1990	2015	15
L	31.0%	28.8%	1966	2015	15
M	2.3%	2.0%	2007	2015	7

Ein Beispiel erklärt die Bedeutung der Angaben in der Tabelle. In Abbildung 53 wird der jährliche Prozentanteil der Gesamtfläche in einem Kanton ausgewiesen, bei dem aus den Belagsdaten vermutet wird, dass eine neue Deckschicht eingebaut wurde.

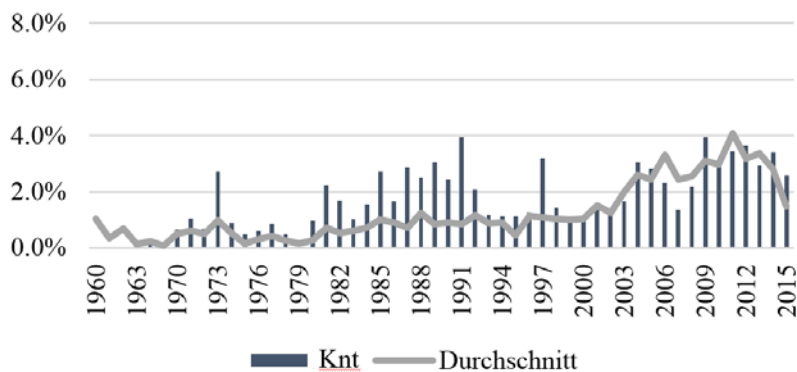


Abbildung 53 Beispiel Zeitreihe für Erneuerungsmassnahme, die anhand von Belagsaufbaudaten identifiziert wurden. Gezeigt werden nur Flächen bei dem die oberste Schicht stärker als 1.5 cm ist.

Gezeigt wird Kanton B aus Tabelle 22. Der Belagsaufbaudatensatz beinhaltet Angaben zu 96.7% der Gesamtstrassenfläche. Bei 91.5% besitzt das, was als oberste Schicht bezeichnet wird, eine Stärke grösser als 1.5 cm. Würde man die verbleibenden 8.5% manuell untersuchen, wäre es vielleicht möglich, eine später eingebaute Oberflächenbehandlung von der eigentlichen Deckschicht zu unterscheiden. Andererseits ist ein Eruiern der erneuerten Fläche in der weit zurückliegenden Vergangenheit auch nicht für das heutige Benchmarking relevant.

Die lange Zeitreihe in Abbildung 53 zeigt eine gewisse Konsistenz. Kein Jahr übersteigt 4%, was mit einer durchschnittlichen Gebrauchsdauer von 25 Jahren in Verbindung zu bringen wäre. Es scheint zwei Perioden gegeben zu haben, in denen intensiver erneuert

wurde. Der Datensatz seit 2000 ist lückenlos. Für sämtliche Jahre gibt es einen Wert. Würde für ein Jahr kein Wert vorliegen, gäbe es in diesem Jahr gar keine Erneuerungsmassnahmen oder die Daten für das Jahr wurden nicht eingetragen. Da ersteres unwahrscheinlich ist, spricht eine lückenlose Zeitreihe für die Belastbarkeit dieser Datenreihe.

Die graue Linie zeigt die Durchschnittswerten pro Jahr über alle Kantone, von denen die Erneuerungszeitpunkte konstruiert werden konnten. Dass die Werte vor 1980 sehr klein sind, entspricht der Tatsache, dass die Belagsaufbautabellen in der Regel einen «Istzustand» wiedergeben. Werte vor 1985 kann es nur für Deckschichten geben, deren Gebrauchsdauer grösser als 30 Jahre ist. Die Werte aus den 60er Jahren belegen, dass einzelne Beläge sehr alt werden können. Von etwa 1980 steigt die graue Kurve mehr oder weniger kontinuierlich bis etwa 2003 an. Danach steigen die Werte stark bis um 2011 an und sie entsprechen einer Gebrauchsdauer um die 25 bis 30 Jahre. Warum dies so ist, kann mit diesen Daten nicht beantwortet werden. Der Knick in der Durchschnittskurve nach 2011 ist interessant, sollte es tatsächlich auf einen Rückgang der Erneuerungsrate zurückzuführen sein.

7.1.6.3 Möglicher Umgang mit fehlenden Datenelementen

Nicht alle Kantone haben einen Datensatz über den Belagsaufbau eingereicht. Bei nur 4 von 20 war die flächenmässige Abdeckung grösser als 80%. Bei 2 Kantonen fehlte eine neuere Vergangenheit komplett, obwohl Daten aus der Vergangenheit vorhanden waren. Die 4 Kantone mit 14 aus 15 möglichen Jahren seit 2000 deuten auf eine lückenhafte Datenführung. Diese Lücken könnten alle Jahren betroffen haben und nur in einem Jahr so extrem gewesen sein, dass keine Beobachtungen vorlagen. Aus all diesen Überlegungen sind alle Abbildungen mit grosser Vorsicht zu interpretieren.

Wendet man eine Kombination aus 3 Regeln an:

1. 80% der Gesamtfläche
2. Schichtstärke >1.5 cm
3. keine Lücken in der neueren Vergangenheit;

verbleiben nur 3 Kantone.

Dennoch sind wir der Auffassung, dass dieses Benchmark-Konzept praktisch umsetzbar ist. Erstens haben die Kantone mehr Möglichkeiten, ihre eigene Datensätze über den Belageinbau zu interpretieren als wir es haben. Es kann gut sein, dass mehr Kantone die drei Regeln bereits heute erfüllen können. Zweitens sind die benötigten Daten prinzipiell vorhanden. Benötigt sind die Daten der letzten Erneuerungsmassnahmen. Belagsaufbaudaten sind nicht nötig. Drittens sind Daten für das ganze Netz nicht nötig. Vielmehr ist die Vollkommenheit während der neueren Vergangenheit benötigt. Würde man direkt mit Aussagen über die Massnahmausführungsdaten arbeiten, dann müsste Regel 1 sich auf das Jahresvolumen beziehen. Der Umsetzungsvorschlag geht so vor.

7.1.6.4 Darstellungsmöglichkeiten

Wie oben bereits erwähnt, gibt es zwei Formulierungen, absolut oder relativ zu einer erwarteten Erneuerungsrate, um ein Ziel zu erreichen. Die erwartete Erneuerungsrate kann mit dem BORMAC-Modell für jeden Auslösezustand gerechnet werden. Der Auslösezustand muss von den Kantonen geliefert werden. Folgende Graphiken und Tabellen nehmen an, dass der Auslösezustand = 3 ist.

Beide Formulierungen können im Prinzip als Zeitreihe oder als einzelne Werte dargestellt werden. Tabelle 23 zeigt die Benchmarks als Durchschnittswerte. Abbildung 53 zeigt ein Beispiel als Zeitreihe.

Tabelle 23 Durchschnittswerte seit 2000 des Benchmark-Konzepts B6

Knt	Abdeckung wenn Dicke ≥ 1.5 cm (%)	(1) B6b: Durchschnitt Erneuert pro Jahr seit 2000	(2) B6b: Wie (1), wenn Dicke ≥ 1.5 cm	(3) modellierter Erwartungswert bei Zustand = 3	(4) B6a: Relativ (2) - (3)
A	91.4%	4.7%	4.5%	4.5%	0.0%
B	91.5%	2.8%	2.7%	4.1%	-1.5%
C	42.8%	6.5%	2.8%	4.1%	-1.3%
D	84.5%	5.2%	5.2%	4.4%	0.8%
E	69.3%	4.1%	3.8%	4.4%	-0.6%
F	45.2%	2.3%	1.5%	3.5%	-2.0%
G	41.0%	2.2%	1.6%	4.3%	-2.7%
H	46.6%	2.9%	2.7%	4.3%	-1.6%
I	47.4%	3.4%	3.3%	4.4%	-1.1%
J	28.2%	1.7%	1.6%	4.0%	-2.5%
K	31.7%	2.1%	2.1%	4.5%	-2.4%
L	28.8%	1.4%	1.3%	4.2%	-2.8%
M	2.0%	0.3%	0.3%	3.9%	-3.6%

7.1.6.5 Beispiele

Es folgen 3 Beispiele von Benchmark B6b für einzelne Kantone. Eine Differenzierung ist klar erkennbar. Erkenntnisse lassen sich danach in Gesprächen herausarbeiten, ob diese Differenzen gewollt und vertretbar sind.

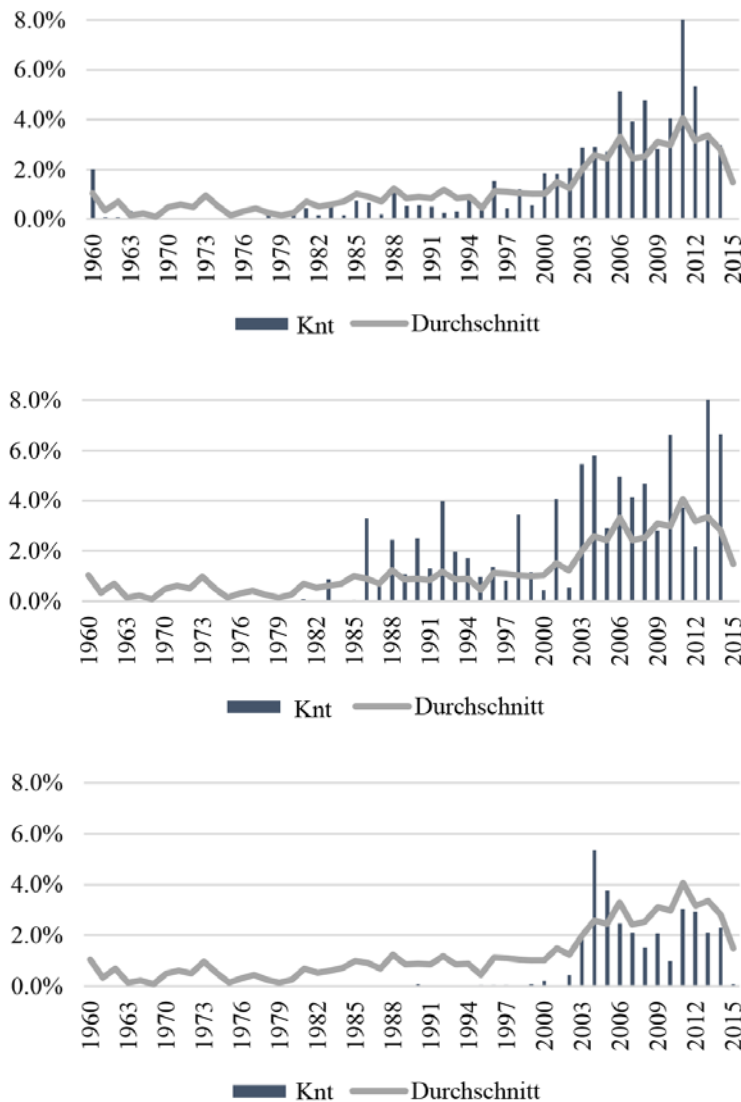


Abbildung 54 Beispiele des Benchmarks B6 für drei Kantone als absoluter Prozentsatz (B6b)

7.1.6.6 Beurteilung

Für das Benchmark-Konzept B6 waren nur für wenige Kantone genügend Daten vorhanden. Da es keine direkten Angaben über die Zeitpunkte der letzten Erneuerung gab, wurden die Datensätze über den Belagsaufbau verwendet. Dadurch ist es möglich einen Eindruck zu vermitteln, wie ein solcher Benchmark aussehen würde und welche Einsichten daraus zu gewinnen wären. Wir sind überzeugt, dass dieses Konzept über die wichtige Frage, ob genügend erneuert wird, wichtige Erkenntnisse liefern kann.

Wir sind ebenfalls überzeugt, dass es innerhalb eines vernünftigen Aufwands möglich ist, zumindest in der neueren Vergangenheit von zum Beispiel 5 Jahren, spezifische Datensätze zu erstellen, worin das Jahr und die Ortschaft der ausgeführten Erneuerungsprojekte aufgeführt sind. Somit wären sehr hoch qualitative Daten für die Form B6b in vielen Kantonen vorhanden.

Im Urteil der Forscher ist die heutige Datenlage ungenügend, um ein Urteil über die relative Form dieses Benchmarks B6a zu bilden. Ohne auf die Anonymität zu verzichten, ist es auch nicht möglich die modellierten Werte in Tabelle 23 zu hinterfragen. Diese Datenlage würde sich ändern, sollte in einem konkreten Benchmarking-Projekt Daten, wie in dem Umsetzungsvorschlag definiert, von den meisten Kantonen geliefert werden. Aufgrund der empirischen Bestätigung des BORMAC Modells in Abschnitt 3.3 sind wir zuversichtlich,

dass für die Kantone, die den aggressiven Einflussfaktoren stark ausgesetzt sind, realistische Benchmarks für die benötigte Menge an Erneuerung angegeben werden kann.

7.1.7 B7: Sind die Strassen richtig dimensioniert?

Da Strassen langlebig sind, kann es vorkommen, dass alte Strassen den heutigen Anforderungen nicht mehr entsprechen. Bei schnell anwachsenden Anforderungen kann es zu erhöhten Verfallsraten und/oder zu einem frühzeitigen Entscheid führen, die Strassen auf die neuen Umstände anzupassen. Beides kann zu einem erhöhten Erneuerungsbedarf führen. Dieses Benchmark-Konzept soll diese Problematik sichtbar machen.

Als Benchmark B7 kann der Flächenanteil dienen, die gemäss den heutigen Bedürfnissen unterdimensioniert ist. Es wird von der Verkehrslastklasse gemäss Schweizer Normen ausgegangen.

7.1.7.1 Einflussfaktoren

Die Einflussfaktoren sind in den Normen bereits einbezogen.

7.1.7.2 Benötigte Daten und Verfügbarkeit

Die richtige Dimensionierung einer Strassenanlage bezieht sich auf viele Faktoren. Es ist höchstens sehr begrenzt möglich mit den eingereichten kantonalen Daten und weiteren Daten aus nationalen Quellen, eine Schätzung der benötigten Soll Verkehrslastklasse zu errechnen. Wir haben es trotzdem versucht, um das Konzept beispielhaft zeigen zu können. Uns standen neben einer flächendeckenden geologischen Karte der obersten Erdschichten auch ein nationales Verkehrsmodell, das sehr viele Kantonsstrassen erfasst, zur Verfügung. Daraus lässt sich annäherungsweise eine Schätzung der Soll-Verkehrslastklasse errechnen.

Die Ist-Verkehrslastklasse wurde aus den Belagsdatensätzen berechnet. Da die Bezeichnung der Schichten und Mischtypen nicht einheitlich ist, mussten die Daten zuerst vereinheitlicht werden. Einige Annahmen und Detailarbeiten war dazu nötig. Die grundlegende Datenlage war dieselbe wie bereits in Tabelle 22 gezeigt; 13 der 20 teilnehmenden Kantone haben zumindest einzelne Datensätze über den Belagsaufbau geliefert.

7.1.7.3 Möglicher Umgang mit fehlenden Datenelementen

Da in diesem Fall kein Gesamtprozentanteil gerechnet wird, wie bei B6, kann hier mit einem Stichprobeansatz vorgegangen werden. Leider entstehen vermutlich genau dort Belagseinbaudatensätze, wo der Belag auf die neueren Bedürfnissen angepasst wurde. Also ist die Stichprobe vermutlich mit den Aussagewerten korreliert und es muss daher von einem Bias ausgegangen werden. Vermutlich wird der Prozentsatz von unterdimensionierten Abschnitten so unterschätzt werden.

7.1.7.4 Darstellungsmöglichkeiten

Es gibt nur eine Darstellungsmöglichkeit.

7.1.7.5 Beispiele

Abbildung 55 zeigt die Werte für 12 der 13 Kantone mit Belagsaufbaudaten. Bei einem Kanton kam die Berechnung auf 55%, was uns als unglaublich erscheint. Wir gehen von einem systematischen Fehler in den Daten aus.

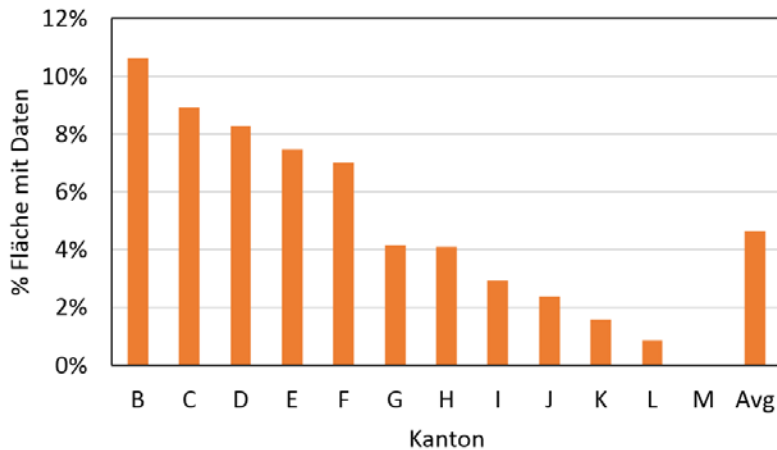


Abbildung 55 Beispiele des Benchmarks B7: Anteil mit ungenügender Dimensionierung. Als Basis dienen die vorhandenen Datensätze über den Belagsaufbau. Eine Unterschätzung wird deshalb vermutet.

Da die Schweizer Normen einen relativ hohen Anspruch an die Belagsstärke stellen, führt eine leichte Unterdimensionierung auch nicht unbedingt zu schnell eintretenden strukturellen Schäden. Bei der Beurteilung dieser Abbildung sollte ebenfalls berücksichtigt werden, dass bei einer Gebrauchsdauer von 25 Jahren, 8% der Fläche innerhalb von 2 Jahren erneuert werden sollen. Geht man von einer 50-jährigen Gebrauchsdauer der darunterliegenden gebundenen Schichten aus, dann werden innerhalb von 4 Jahren 8% von diesen erneuert. Somit sind 8% oder gar 10% nicht unbedingt übergrosse Zahlen für diesen Benchmark.

7.1.7.6 Beurteilung

Für das Benchmark-Konzept B7 haben wir für etwas mehr als die Hälfte einen Wert mit dem Stichprobenansatz berechnen können. Leider können wir in diesem Fall nicht von einer un-biased Stichprobe ausgehen und deswegen müssen wir vermuten, dass die Angaben in Abbildung 55 die Sachlage unterschätzen.

Eine Soll-Verkehrslastklasse aus Verkehrsmodellen und einer nationalen Geologiekarte ist mit einigen Unsicherheiten gebunden. Dasselbe trifft für die Berechnung der Ist-Verkehrslastklasse aus verschiedenen strukturierten Belagsaufbaudatensätze zu. Beiden Ungewissheiten sind mit direkten Angaben aus den Kantonen zu beseitigen. Wir erwarten dann, dass B7 verlässlich wäre und für viele Kantone berechnet werden kann.

Danach wäre sowohl die Ist-Lage wie auch einen Zeitverlauf von Interesse, zum Beispiel um eine unerwartet hohe Verfallsrate zu erklären.

7.2 Umsetzungsvorschlag

Der Umsetzungsvorschlag wurde in Form einer VSS Norm formuliert. Sie kann in Anhang 3 gesehen werden.

Die grössten Schwierigkeit bei der Berechnung der Benchmarks lag in der Transformation der Daten aus den Kantonen. Als besondere Schwierigkeit tritt die Verknüpfung von Datensätzen, deren geographische Abdeckungen ungleich waren, auf. Die Problematik ist bei den Kantonen wesentlich leichter und verlässlicher zu lösen. Deshalb wurde ein «Flat-file» Konzept gewählt, das zwar zu vielen Redundanzen im File selber führt, aber auch zu einer eindeutigen Verknüpfung der diversen Attribute mit den GIS Angaben über die Abschnitte. Mittels der GIS Angaben lassen sich dann zusätzliche Datensätze mit den Kantonalen eindeutig verknüpfen.

Sind die Daten einmal als grosse Tabelle aufgestellt, lassen sich die diversen Benchmarkkonzepte als SQL-Abläufe berechnen. Somit gibt sich eine Arbeitsaufteilung.

Die Datenverwaltung findet bei den Kantonen statt. Zentral werden nur die nicht kantonalen Daten dazu addiert und danach die Benchmarks kalkuliert.

8 Schlussfolgerungen

Untersucht wurden die Möglichkeiten für schweizerische Kantone ein vergleichendes Benchmarking für diverse Tätigkeiten, die mit der Erneuerung von Asphaltstrassen zusammenhängen. Es wurden zwei Typen von Benchmarks untersucht. Als Typ-A gelten Benchmarks, die eine ökonomische Effizienz als Betrachtungsobjekt haben. In Typ-A Benchmarks spielen Kosten, Preisen und Optimierungen eine entscheidende Rolle. Als Typ-B gelten Benchmarks, die etwas anderes als eine ökonomischen Effizienz als Betrachtungsobjekt haben. Da Kosten und Preisen oft nur ungenau als Daten zu erfassen sind und weil Optimierungen meistens einen grossen Modellaufwand benötigen, sind die Typ-A Benchmarks schwierig zu berechnen und oft mit grossen Messunsicherheiten behaftet. Beides trifft für die Erneuerungstätigkeiten, die in dieser Arbeit untersucht wurden, zu. Bei den Typ-B Benchmarks ist man hingegen relativ frei in der Gestaltung. Die Daten können rein physischer Natur sein und sind deshalb oft präzise zu bemessen.

Typ-A Benchmarks

Zwei Typ-A Benchmarks wurden erarbeitet. Beide basieren auf einem extensiven Modell des Verfalls. Das Modell ist als Ganzes neuartig, aber in seinen Komponenten traditionell. Das mechanistische Modell des Asphaltverhaltens entstammt grössten Teils einer längeren Tradition von der Technischen Universität Braunschweig. Der neuste Beitrag in dieser Tradition ist ein Simulationsmodell. Nachteilig an einer Simulation ist, dass es nur ein Beispiel einer ganzen Verteilung von möglichen Belastungsszenarien darstellt. Wegen dieses Nachteils gibt es in der ökonomischen Literatur ein Standardverfahren, nämlich die Kalkulation eines Erwartungswerts als Alternative zu der Kalkulation von mehreren Simulationen.

Solche Erwartungswerte können nur unter günstigen Bedingungen analytisch gelöst werden, was für dieses Modell absolut notwendig war. Deshalb wurden an verschiedenen Stellen Approximationen eingesetzt, damit Resultate in geschlossenen Gleichungen Ausdruck fanden. Mit den heutigen computergestützten Werkzeugen scheint dieser Weg als durchaus machbar.

Am Ende einer Reihe von Kalkulationen und Approximationen war es möglich Verfallskurven in geschlossener Form in Abhängigkeit von klimabezogenen und verkehrsbezogenen Variablen zu berechnen. Da diese Gleichung immer noch eine Dimensionierungsvariable beinhaltete, nämlich den Erweichungspunkt des Bitumens, gilt sie in der Terminologie der Ökonomen als «Technologie». Das heisst, die Technologie beschreibt sowohl gute wie schlechte Dimensionierungslösungen für spezifische Konstellationen von Klima- und Verkehrsbelastungen.

Da aber ein Benchmark für die Erneuerungstätigkeiten stets von guten Ingenieur-Lösungen ausgehen muss, musste eine reduzierte Gleichung gefunden werden, bei dem die Dimensionierungsvariable nicht mehr frei zu wählen war, sondern selbst als geschlossene Form-Gleichung da stand und zwar eine Gleichung, die stets die optimale Wahl für die Dimensionierungsvariable ausgab. Die Auflösung nach einer Dimensionierungsgleichung ist auch ein Standardverfahren in der ökonomischen Literatur, die aber äusserst selten für realistische mechanische Verhaltensfunktionen angewendet wird. Auch hier musste auf Approximationsverfahren zurückgegriffen werden. Nach Einsetzen der Dimensionierungsfunktion in der Technologie entstand eine dritte geschlossen Form-Gleichung, die in der ökonomischen Literatur «Produktionsfunktion» genannt wird.

Obwohl dieser Weg viele detaillierte Einzelschritte beinhaltete und insgesamt einen grossen Modellierungsaufwand darstellt, ist das Ergebnis sehr nützlich. Es entstand daraus flächendeckend für die Schweiz in einer Granularität, die die schattigen Seiten eines Tals von den sonnigen Seiten unterscheiden kann, eine Verhaltensfunktion, die den Erwartungswert des Einflusses von vielen relevanten unabhängigen Variablen ausdrückt und zwar bei einer optimalen Wahl des Erweichungspunkts. Im Unterschied zu gängigen Verhaltensfunktionen sind die unabhängigen Variablen die Parameter von Verteilungen

von Faktoren, die zu Einzelschäden führen. Es ist möglich im Rahmen dieses Modells quantitativ zu fragen, was zu einem schnelleren Verfall führt: 1 Grad mehr Differenz zwischen sommerliche und winterliche Temperaturen oder 1 Grad mehr Durchschnittstagestemperaturgänge. Ein solches Verhaltensmodell ist gänzlich neu für die Literatur.

Die Granularität des vorausgesagten Verfallsverhaltens ermöglichte zwei unabhängige empirische Tests. Der erste Test konnte gegen die gemessenen Zustandsveränderungen ausgeführt werden. Unser Datensatz aus den 20 teilnehmenden Kantonen umfasste über 15'000 km Strassen und weil die Schweiz klimatisch und geographisch sehr viel Variabilität aufweist, ist dieser Datensatz ideal, um die Fähigkeit lokalspezifischen Verhaltensvorhersagen zu testen. Es war möglich aus diesen Daten 35 unabhängige empirische Verhaltenskurven zu erstellen. Das Modell konnte zu einem hohen Grad an statistischer Sicherheit die unterschiedliche Verfallsschnelligkeit vorhersagen. Dieser Test basierte nur auf gemessene Zustandsveränderungen.

Der zweite Test basierte auf den kantonalen Ausgaben für Erneuerung. Als empirisches Ebenbild für die Erneuerungsausgaben wurden zwei Rubriken aus der jährlichen Strassenrechnung genommen. Die Höhe der kantonalen Ausgaben hängt nicht nur von der Verfallsrate ab. Es gibt auch Einflussfaktoren, die die Höhe der Projektkosten beeinflussen wie innerorts / ausserorts, die Bevölkerungsdichte und die Geländesteilheit. Ihr quantitativer Einfluss wurde mit einer Regression geschätzt. Als Datenbasis dienten die Ausgaben von Städten, die ebenfalls in der Strassenrechnung ausgewiesen sind.

Nun konnten die zwei Einflussfaktorengruppen kombiniert werden. Einflussfaktoren die auf die Verfallsrate wirkten, beeinflussten die jährlich zu erneuernde Fläche: die Quantität. Einflussfaktoren, die nicht auf die Verfallsrate wirkten, aber sonst die Höhe der Projektkosten mitbestimmen, beeinflussten die modellierten Preise pro erneuerten Quadratmeter. Die vorausgesagte Ausgabenmenge war dann ein lokaler Durchschnittspreis mal die Quantität. Die so vorhergesagte Ausgabenmenge wurde Abschnitt für Abschnitt berechnet und summiert. Die Summe wurde dann mittels einer Regression mit den empirischen Ausgaben aus der Strassenrechnung verglichen. Mit nur 25 Beobachtungen erreichte das Modell einen hohen Grad an statistischer Verlässlichkeit. Mengemässig konnte das Modell etwa die Hälfte der Variabilität in den empirischen Ausgaben erklären.

Zusammengenommen gab es zwei unabhängige Bestätigungen für die Modellierung. Beide zeigten eine hohe statistische Verlässlichkeit. Dieses Ergebnis bestätigt sowohl die darunterliegenden mechanischen Modelle wie auch die Methoden aus der Ökonomie. Aus der Verteilung von belastenden Ereignissen kann ein Erwartungswert berechnet werden, auch wenn dies nur als Approximation mathematisch ausführbar ist. Ebenfalls lässt sich mit numerischen Methoden eine Dimensionierungsfunktion bestimmen. Aus der Technologie wurde eine Produktionsfunktion, die die optimale Dimensionierung umsetzt. Hier wurde die Dimensionierung auf der Wahl des Erweichungspunkts limitiert. Die Produktionsfunktion gibt an, wie lange eine Strasse unter den lokalen Bedingungen bestenfalls halten kann bis ein vorgegebener Zustand erreicht wird.

Damit lassen sich zwei Typ-A Benchmarks berechnen. Beide basieren auf folgender Überlegung: Hält eine Strasse T Jahre bis sie erneuert werden muss, dann ist die zu erwartende jährliche Menge an Erneuerung $1/T$ mal die Abschnittsfläche. Der erste Benchmark geht von einem stationären Zustand aus und kann daher nur mit einem langjährigen Ausgabendurchschnitt verglichen werden. Diese Benchmark-Konzepte funktionierten trotz aller datenbezogenen Einschränkungen als Annäherung. Das Verhältnis zwischen den höchsten und den tiefsten Ausgaben pro Quadratmeter liess sich so von 9.5:1 auf 3.5:1 reduzieren. Das Verhältnis 3.5:1 ist immer noch ein sehr grosser unerklärter Unterschied. Es bestätigt die Schlussfolgerung einer früheren Studie, dass die Kantone ihre Ausgabendaten mit unterschiedlichen Regeln den Rubriken der Strassenrechnung zuordnen. Ohne Konsistenz in der Datenerfassung sind grosse unerklärte Differenzen unumgänglich.

Der zweite Typ-A Benchmark, der veränderte Zustandsbenchmark, ist für kurzfristige Vergleiche konzipiert. Dafür werden zwei Zustandserhebungen benötigt. Subtrahiert man die beobachteten Zustandsverbesserungen von der prognostizierten Verfallsmenge zwischen zwei Erhebungen, bekommt man als Resultat die Menge an Zustandsverbesserung, die aus diversen Massnahmen resultierte. Diese Menge mal die lokal relevanten Preise ist eine prognostizierte Menge an Ausgaben für die Periode zwischen den zwei Erhebungen. Da die Strassenrechnung jährlich ist, kann die Prognose mit der Wirklichkeit verglichen werden. Daraus lässt sich im Prinzip eine Aussage über die kurzfristige relative Effizienz machen. Leider funktionierte dieses Benchmark-Konzept empirisch ungenügend. Die Kurzfristigkeit stellt eine höhere Anforderung an die Vergleichbarkeit der Ausgabendaten. Zweitens interagieren hier zwei Fehlerquellen. Zu den Ausgabendaten kommen systematische Verschiebungen in der Zustandserfassungsmethodik. Da der Verfall ein relativ langsamer Prozess ist, können auch kleine Verschiebungen zu relativ grossen Verzerrungen führen. Wir raten deshalb von einem allgemeinen, kantonsvergleichenden Einsatz dieses Konzepts ab. Bei einzelnen Kantonen könnte es bei genügend hoher Datenqualität eingesetzt werden.

Typ-B Benchmarks

Sieben Typ-B Benchmarks wurden getestet. Die Auswahl wurde in Zusammenarbeit mit den Kantonen in unserer Begleitgruppe gemacht. Es bleibt eine Auswahl von vielen weiteren Möglichkeiten, die in ein konkretes Benchmarking umgesetzt werden können.

Aus den 7 werden 5 empfohlen. Beispielrechnungen zeigten in etwa wie die Benchmarks in der Praxis aussehen könnten und welche Art von Informationen daraus zu gewinnen wäre. Entscheidend für die Brauchbarkeit ist, dass der Benchmark zu einer klaren Differenzierung zwischen den Teilnehmern führt. Nur so werden Fragen gestellt, warum die Differenzen existieren und ob daraus ein Handlungsbedarf zu sehen ist.

Einzelne Typ-B Konzepte sind stark limitiert auf Grund von Datenbeschränkungen, die wir für umgehbar bei vertretbarem Aufwand halten. Die drei Schlüsselangaben sind 1) die Auslösezustände gemäss Unterhaltsstrategie, 2) die Ist- und Soll-Verkehrslastklasse und 3) die Zeiten der letzten Erneuerung. Letzteres muss nicht flächendeckend sein. Nützlich wären auch nur die Erneuerungen aus der neueren Vergangenheit.

Ein möglicher Umsetzungsvorschlag schliesst diese Untersuchung ab. Wir schlagen interessierten Kantonen vor, dass sie Ihre Daten an eine zentrale Stelle abgeben, aber dass diese Daten bereits als eine einzige Tabelle strukturiert ist, damit alle Verknüpfungen zwischen den diversen Merkmalen jedes Abschnitts bereits bei der Abgabe gelöst sind. Jeder Abschnitt beinhaltet GIS Koordinaten. Die zentrale Stelle ergänzt die Daten mittels der GIS Koordinaten mit Angaben, die aus nationalen Quellen zu entnehmen sind. Danach können die Benchmarks mittels SQL-Abläufen berechnet werden.

Forschungsbedarf

Weiterer Forschungsbedarf sowie praktische Anwendungen der erarbeitete Modellierung liegen im Bereich von Benchmarking, von diversen ökonomischen Problemstellungen wie die Berechnung der vom Schwerverkehr erzeugten Mehrkosten und im Bereich von strassenspezifischen Verfallsprognosen in PMS Systemen. Potentiell möglich erscheint eine Anwendung bezogen direkt auf die Dimensionierung von Strassen in Abhängigkeit des Verkehrs und der klimatischen Belastungen, etwa um den kostenoptimalen Einsatz von Modifizierungen zu berechnen.

Es wird empfohlen, den Vorschlag bezüglich der Kontierung von Strassenunterhaltskosten weiter zu verfolgen, nur so sind Fortschritte bezüglich des kurzfristigen Typ-A Benchmarks möglich.

Es wird empfohlen, dass ein Benchmarking mit den hier untersuchten Konzepten in die Tat umgesetzt wird. Besonders die Typ-B Benchmarks können mit vertretbarer Qualität verlässliche und nützliche Information an die kantonalen Strassenverwaltungen liefern.

9 Danksagung

Zum Schluss möchten wir uns für die grosse Arbeit unser Begleitkommissionsmitglieder bedanken. Sie haben mit viel Einsatz das zum Teil recht technische Material mit den Forschern durchgearbeitet und viele sehr wertvolle Vorschläge gemacht.

Ebenfalls bedanken wir uns bei den Teilnehmern der Arbeitsgruppe, die als Experten dienten, um einen Vorschlag für eine Norm über die Zusammenstellung von Ausgabendaten für die Strassenrechnung zu erarbeiten. Diese waren

Herr Christoph Baur, Revisor Schweizerische Strassenrechnung, Bundesamt für Statistik.

Herr Stefano Bradanini, Leiter Erhaltungsmanagement, Tiefbauamt, Kanton Aargau.

Herr Markus Müller, Abteilungsleiter Strasseninspektorat, Tiefbauamt, Kanton Luzern

Herr Alexander Noll, Eidg. dipl. Experte für Rechnungslegung und Controlling, Tiefbauamt, Kanton Zürich.

Herr Jean-Marc Pittet, Dienstchef Verkehrsträgerrechnung, Bundesamt für Statistik.

Wir bedanken uns bei Dr. Meike Akveld vom Departement für Mathematik, ETH Zürich, für ihre wertvolle Unterstützung.

Folgenden Personen haben die Modellierung mit uns besprochen und Wertvolle Hinweise gegeben:

Dr. Lily Poulikakos, Abteilung Strassenbau / Abdichtungen, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt.

Dr. Martin Arraigada, Abteilung Strassenbau / Abdichtungen, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt.

Prof. Dr Manfred Partl, Abteilungsleiter, Abteilung Strassenbau / Abdichtungen, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt.

Dr. Axel Walther, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Prof.Dr. Michael Wistuba, Leitung Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig.

Und zuletzt möchten wir den Kantonen danken, die uns ihre Daten zu Verfügung gestellt haben.

Anhänge

I	Vorschlag für eine VSS-Norm über die Zuordnung der Unterhaltskosten in die Rubriken der Strassenrechnung	112
II	Lösung des bestimmten Integrals aus Gleichung 41	124
III	Umsetzungsvorschlag in Form einer Schweizer Norm	126
IV	GIS Karten zur Visualisierung der Modellberechnungen	138

I **Vorschlag für eine VSS-Norm über die Zuordnung der Unterhaltskosten in die Rubriken der Strassenrechnung**

Die Forschungsstelle macht folgenden Vorschlag für eine neue VSS-Norm über die Zuordnung der Unterhaltskosten in die Rubriken der Strassenrechnung. Dieser entstand nach vielen Gesprächen mit den Kantonen und dem BFS. Am 3.6.2016 führten wir zu diesem Thema mit Experten Gespräche am Runden-Tisch. Daran beteiligt waren: Alexander Noll (ZH), Markus Müller (LU), Stefano Bradanini (AG), Jean-Marc Pittet (BfS), Christoph Bauer (BfS), Craig Richmond (ETHZ) und Fabian Achilles (ETHZ). An diesem Treffen entstand der Grundvorschlag. Er wurde danach von uns schriftlich verfasst und im Umlaufverfahren mit den Teilnehmern des Runden-Tischs besprochen und angepasst. Die Schlussversion wurde den Kantonen, die an unserer Begleitkommission beteiligt waren, sowie dem BFS und ASTRA zum Kommentieren gegeben. Ihre Beiträge sind dem Normvorschlag folgend aufgeführt.



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Departement Bau, Umwelt und Geomatik
Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement

ETH Zürich
Stefano-Franscini-Platz 5
8093 Zürich

Prof. Dr. Bryan T. Adey
Professur für Infrastrukturmanagement
HIL F 24.3
Tel. +41 44 633 27 38
adey@ibi.baug.ethz.ch
www.ibi.ethz.ch

Zürich, 21.11.2017

Vernehmlassung Norm-Vorschlag für die Kontierung von Strassenausgaben

Sehr geehrte Damen und Herren

Als Teil des VSS Forschungsprojekts VSS 2014141 1 "Ermöglichung eines realistischen Benchmarkings des baulichen Unterhalts der Kantonsstrassen (BORMAC)" senden wir Ihnen einen Vorschlag zur Vernehmlassung, wie eine VSS Norm über die Kontierung von Strassenausgaben formuliert werden könnte. Wir bitten Sie Ihre Stellungnahme bis am 26.01.2018 mit dem Vermerk «BORMAC» an die Forschungsstelle, der Professur für Infrastrukturmanagement, zukommen zu lassen.

Zweck

Gemäss dem *Bundesgesetz über die Verwendung der zweckgebundenen Mineralölsteuer und der Nationalstrassenabgabe* (MinVG) müssen das ASTRA, die Gemeinden und die Kantone ihre Strassenausgaben jährlich dem Bundesamt für Statistik (BFS) rapportieren. Daraus entsteht die jährliche Strassenrechnung. Da das Bundesamt für Statistik eine grosse Expertise auf diesem Gebiet besitzt und weil das Zusammenführen dieser Daten mit nicht minderem Aufwand verbunden ist, ist es sinnvoll, wenn diese Daten für Vergleiche zwischen den Kantonen und Gemeinden bezüglich Ausgaben genutzt werden. Die Forschung hat aber gezeigt, dass die bisherige Buchungspraxis bei den Kantonen und Gemeinden zu erheblichen Differenzen in Benchmark-Werten geführt haben, so dass die Daten heute nur beschränkt für Vergleiche geeignet sind. Um diesen Zustand zu korrigieren, wurde als Teil unseres Forschungsauftrags BORMAC ein Norm-Vorschlag erarbeitet. Der Vorschlag entstand nach Konsultationen mit Experten des BFS und der Kantone. Es ist aber ein Vorschlag der Forschungsstelle. Diesen Vorschlag legen wir Ihnen nun zur Stellungnahme vor.

Einschränkung

Dieser Vorschlag entspricht aus Sicht der Forschungsstelle nicht einem Idealbild für eine Kategorisierung der Tätigkeiten einer Strassenverwaltung, so wie wir es vorschlagen würden, gäbe es keine Einschränkungen. Dasselbe trifft vermutlich für andere Fachbereiche, je als einzelne genommen, zu. Gesucht ist ein pragmatischer und erreichbarer Kompromiss, ohne dass neue Konten in den Rechnungssystemen der Kantone und Gemeinden erstellt werden müssen. Aus fachlicher Sicht wäre eine klare Trennung vorteilhaft zwischen Tätigkeiten, die die Substanz der Strasse nicht verändern und solchen die dies tun. Unter den substanzverändernden Tätigkeiten wären weitere bautechnisch

bezogene Abgrenzungen erwünscht. Eine solche grundlegende Neu-Kategorisierung steht heute aber nicht zur Diskussion. Hier gilt es vor allem, das für das Benchmarking wichtige Kostenaggregat «Erneuerung des bestehenden Belags» möglichst von anderen Tätigkeiten abzugrenzen. Würde ein grösseres Projekt vorliegen in dem die Kostenaggregate frei von historisch gewachsenen Kategorien neu definiert werden könnten, würden wir einen anderen Vorschlag präsentieren. Wir finden aber diesen Vorschlag die beste Lösung in Anbetracht der bestehenden Einschränkungen, um eine Verbesserung in der Vergleichbarkeit der Kostenaggregate, die in der Strassenrechnung publiziert werden, mit vertretbarem Aufwand zu erreichen.

Hintergrund

Eine Buchhaltung muss mehreren Zielen dienen und es kommt gelegentlich zu Konflikten wie eine Kategorie genau definiert werden sollte. Bei den Strassenausgaben interagieren mehrere Ziele, wie zum Beispiel die Notwendigkeit Ausgaben aus der laufenden Rechnung von denjenigen der Investitionsrechnung zu unterscheiden, aber gleichzeitig die Notwendigkeit Ausgaben nach deren Auswirkungen auf den physischen Strassenkörper zu unterscheiden. Oft stimmt die Zuordnung in spezifische Konti mit mehreren buchhalterischen Zielen überein – aber nicht immer. Dort wo dies nicht der Fall ist, braucht es spezifische Regeln wie vorzugehen ist.

Das MinVG definiert vier Rubriken: *Bau*, *Ausbau*, *Unterhalt* und *Betrieb*. Bei den Strassenverwaltungen sowie in den bestehenden VSS Normen, insbesondere 640900a, werden andere Begriffe definiert und benutzt. Die diversen Finanzsysteme und ihre Kontenstrukturen bilden eine dritte Begriffssystematik, wobei diese Kontostrukturen letztendlich die Quelle aller Finanzstatistiken sind. Es ist deshalb nötig, hier einen pragmatischen Kompromiss zu finden, wie die Rubriken voneinander abgegrenzt werden können. Abbildung 1 stellt die unterschiedlichen Begriffssystematiken dar.

FES	Erfolgsrechnung		Investitionsrechnung		
	Betriebliche Unterhalt	Bauliche Unterhalt	Erneuerung	Ausbau und Verbesserung	Neubau
MinVG	Betrieb	Unterhalt (Projektgestützt)		Ausbau	Bau
640900	Betriebliche Unterhalt	Bauliche Unterhalt		Veränderung	

Abbildung 1 Unterschiedliche Begriffssystematiken

Problemstellung

In den Diskussionen mit den Experten zeichneten sich vor allem zwei Problemstellen ab.

- 1) Die Trennung von Betrieb und Unterhalt lässt sich bautechnisch nicht sauber vollziehen, wenn gleichzeitig die Erfolgsrechnung von der Investitionsrechnung unterschieden werden soll. Es gibt Unterhaltmassnahmen, die bautechnisch gleich sind, aber je nach Gemeinde oder Kanton von der Finanzierung her unterschiedlich gehandhabt werden.
- 2) Die meisten Erneuerungsprojekte vermischen zwei Kategorien von Ausgaben. Teilweise werden bestehende Anlagen ersetzt (Unterhalt) und teilweise werden dieselben Anlagen mit neuen Komponenten ergänzt (Ausbau). Da ist auf Gesamtprojektebene keine saubere Trennung möglich.

Lösungsansätze

- 1) Die Unterscheidung zwischen Unterhalt und Betrieb im MinVG wird hauptsächlich entlang der Abgrenzung gezogen, ob die Arbeiten projektgestützt sind oder nicht. Bei den Öffentlichen Verwaltungen ist es aber notwendig die Erfolgsrechnung von der Investitionsrechnung zu unterscheiden, wobei diese Unterscheidung jedoch nicht unbedingt mit dem Kriterium *projektgestützt* übereinstimmt. Deshalb sind wir zum Schluss gekommen, dass es zwei Kategorien braucht, deren bautechnischen Inhalt nur als Summe genormt wird um den Bezug einzelner Massnahmen zur Erfolgs- und Investitionsrechnung nicht genormt zu belassen.

Als Präzedenz für dieses Vorgehen kann die Empfehlung einer Arbeitsgruppe der Städtevereinigung über die *Empfehlung Leistungs- und Kosten-Controlling im Strassenunterhaltsdienst* aus dem Jahre 2000 genommen werden. Darin ist eine fünf gliedrige Unterscheidung zwischen *betrieblichem Unterhalt*, *baulichem Unterhalt*, *Erneuerung*, *Ausbau* und *Neubau* zu finden. Es war vorgesehen, dass die Unterscheidung von Erneuerung und baulichem Unterhalt genau die Trennung zwischen Erfolgsrechnung und Investitionsrechnung vollziehen könnte, wobei aber eine Flexibilität weiterbestehen sollte, weil die Finanzordnungen der Gemeinden und Kantone die Zuordnung unterschiedlich vollzieht [S.16].

Es ist für die Strassenrechnung unbedeutend unter welcher dieser zwei Rubriken die Ausgaben für Unterhalt gebucht werden, wenn sie in der Summe die Vorgaben des MinVG erfüllen. Das heisst, wenn die Trennung von betrieblichem Unterhalt und baulichem Unterhalt das vollzieht was mit «projektgestützt» gemeint ist und die Trennung von Erneuerung und Ausbau das vollzieht was die Begriffe gemäss MinVG bedeuten, dann können die Öffentlichen Verwaltungen die Trennung zwischen baulichem Unterhalt und Erneuerung selber definieren. Die Bedeutung der Summe bleibt dabei unverändert. Dieser Lösungsansatz wird im Normvorschlag vollzogen.

- 2) Es gehört zum Fortschritt, dass grosse Erneuerungsprojekte gleichzeitig mit Anpassungen an neue Standards und Erfordernisse einhergehen. Es ist zwar denkbar, dass einzelne Rechnungen eines Projektes der Erneuerung oder dem Ausbau eindeutig zuzuordnen wären, aber nur mit grossem Aufwand. Der Lösungsansatz wurde deshalb pragmatisch gewählt, je nach Hauptgewicht der Projektausgaben.

Vorgehen

Der Normvorschlag ist im Anhang beigelegt. Wir bitten Sie, uns Ihre schriftliche Stellungnahme zuzustellen. Wir werden diese, zusammen mit unser Synthese für eine definitive Entscheidung an die zuständige Stelle im VSS weiterleiten, welche zu entscheiden hat, ob und in welcher Ausführung eine Norm tatsächlich zu erstellen ist.

Bestem Dank im Voraus für Ihre Stellungnahme.

Mit freundlichen Grüssen



Prof. Dr. Bryan T. Adey



Dr. Craig Richmond



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Departement Bau, Umwelt und Geomatik
Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement

ETH Zürich
Stefano-Franscini-Platz 5
8093 Zürich

Prof. Dr. Bryan T. Adey
Professur für Infrastrukturmanagement
HIL F 24.3
Tel. +41 44 633 27 38
adey@ibi.baug.ethz.ch
www.ibi.ethz.ch

Zürich, 21.11.2017

Vorschlag: Entwurf einer Norm für die Kontierung von Strassenausgaben

Gegenstand: Strassenkörper ausschliesslich Kunstbauten

A. Allgemeines

1. Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für die Ausgaben für National-, Kantonal- und Gemeindestrassen.

2. Gegenstand

Diese Norm definiert Standards für die Zuordnung der Ausgaben für den Strassenkörper ausschliesslich Kunstbauten. Ausgaben für den Landerwerb, für die Signalisation und Polizeidienste fallen nicht unter diese Norm.

3. Zweck

Diese Norm gewährleistet eine minimale Vergleichbarkeit der Datenreihen über Strassenausgaben zwischen verschiedenen Strassenverwaltungen.

4. Überblick

Strassenverwaltungen können aus diversen Gründen ihre Ausgaben für die Verfügungsstellung von Strassen unterschiedlich aufteilen und in den jeweiligen Rechnungssystemen unterschiedlich kontieren. Dies kann die Vergleichbarkeit der Zahlen vermindern, die als Aggregaten dieser Konten entstehen. Vergleiche sind aber nötig für das Eruiere von Stärken und Schwächen der technischen und organisatorischen Strategien der Strassenverwaltungen. Deshalb wird hier ein minimaler Standard definiert, wie die Ausgaben den Kontenkategorien zugeordnet werden sollen damit die Summen der Kontenkategorien über die Organisationsgrenze vergleichbar werden.

Seite 1/3

B. Allgemeine Prinzipien

1. Detaillierte Ausführungsregeln

Ausführungsregeln werden von den Strassenverwaltungen gebraucht, um die hier definierten minimalen Standards in die Praxis umzusetzen. Vor allem gelten solche Regeln damit im Umgang mit den Ausgaben diese sinngemäss in mehr als eine Kategorie gebucht werden können.

Ausführungsregel-Beispiel: «Wenn mehr als 50% einer Rechnung dem betrieblichen Unterhalt zuzuordnen sind, wird die gesamte Rechnung dem betrieblichen Unterhalt zugeordnet.»

Von einer Normung der Ausführungsregeln wird abgesehen. Um dennoch die Daten interpretieren zu können, sind die Ausführungsregeln schriftlich festzuhalten und auf Anfrage Externen zur Verfügung zu stellen.

2. Änderungen der Ausführungsregeln

Werden Änderungen in den Ausführungsregeln vorgenommen, sind diesen auf Ende Jahr anzusetzen. Sowohl die bisherigen wie auch die veränderten Ausführungsregeln sind aufzubewahren und auf Anfrage zur Verfügung zu stellen.

3. Rubriken

Es werden maximal fünf Kontenkategorien benötigt. Die genaue Benennung ist nicht genormt. Diese sind

- Betrieblicher Unterhalt
- Baulicher Unterhalt
- Erneuerung
- Ausbau und Verbesserung
- Neubau

4. Unterscheidung Laufende- oder Investitionsrechnung

Die bautechnische Abgrenzung zwischen den Kategorien Baulicher Unterhalt und Erneuerung wird nicht genormt. Die Strassenverwaltungsorganisationen können gemäss internen Regeln selber entscheiden, wie zwischen diesen beiden Bereichen abgegrenzt wird. Vorgesehen ist aber, dass die Ausgaben, die aus der laufenden Rechnung bezahlt werden, dem baulichen Unterhalt zugeordnet werden und dass die Ausgaben, die aus der Investitionsrechnung bezahlt werden, der Erneuerung zugeordnet werden.

C. Minimale Standards

Die Begriffssystematik folgt VSS Norm 640900a [1]. Um diese operativ in der Buchhaltung klarer voneinander abzugrenzen, sind folgende operative Regeln festgelegt.

1. Betrieblicher Unterhalt

Zu betrieblichem Unterhalt gehören Ausgaben für Aufgaben wie dies in VSS 640900a für «betrieblichen Unterhalt» festgelegt ist. Weiter sollen bei Belagsarbeiten keine der folgenden zwei Kriterien verletzt werden:

- Das Auftragsvolumen des Projekts ist nicht grösser als CHF 50'000.-; und
- Die obersten 4 cm des Belags werden nicht auf einer zusammenhängenden Fläche von mehr als 500 m² erneuert oder neu erstellt (Hocheinbau).

2. Baulicher Unterhalt oder Erneuerung

Zu baulichem Unterhalt oder Erneuerung gehören Ausgaben für Aufgaben wie dies in VSS 640900a für «baulicher Unterhalt» festgelegt ist. Weiter gehören Ausgaben für Belagsarbeiten dazu, wenn eine der folgenden zwei Kriterien erfüllt ist:

- Das Auftragsvolumen des Projekts ist grösser als CHF 50'000.-, und
- Die obersten 4 cm des Belags werden auf einer zusammenhängenden Fläche von mehr als 500 m² erneuert oder neu erstellt (Hocheinbau).

3. Ausbau und Verbesserung

Zu Ausbau und Verbesserung gehören Ausgaben für Aufgaben wie dies in VSS 640900a für «Veränderungen» festgelegt ist. Zu Ausbau und Verbesserung gehören Ausgaben für Projekte wenn z.B.

- die Kapazität der Strasse durch eine neue Spur erweitert wird;
- die Strassengeometrie deutlich verändert wird.

Bei gemischten Projekten gehören die Ausgaben zu Ausbau und Verbesserung, wenn mindestens 50% des Projektvolumens zu einer der beiden erwähnten Veränderungen gehören.

4. Neubau

Zu Neubau gehören Ausgaben für eine ganz neue Strassenanlage.

D. Literatur Verzeichnis

[1] SN 640 900a Erhaltungsmanagement Grundnorm

Anhang Stellungnahmen zur:

«Norm-Vorschlag für die Kontierung von Strassenausgaben»

Die Stellungnahmen sind folgend auf Wunsch anonymisiert zusammengefasst. Nur Organisationen, die in der Begleitkommission vertreten sind, wurden angefragt. Vier Kantone, das ASTRA und das BFS haben Stellungnahmen eingereicht. Da die Problemstellungen teilweise eng mit dem Organisationstyp zusammenhängen, ist eine Anonymisierung nur bedingt möglich.

Kanton 1 schreibt:

A - 2. Gegenstand : Kunstbauten können nicht immer ausgeschieden werden, da sie teilweise Bestandteil eines Gesamtprojektes sind. Gleiches gilt für den Landerwerb sowie die Signalisation.

B - 3. Rubriken : Eine Unterscheidung zwischen Ausbau und Neubau ist bei uns nicht möglich.

C - 3. Ausbau und Verbesserung sowie C - 4. Neubau : Eine solche Unterscheidung ist bei uns nicht möglich.

Kanton 2 schreibt:

Gerne lasse ich Sie wissen, dass wir mit dem Norm-Vorschlag für die Kontierung von Strassenausgaben einverstanden sind.

Kanton 3 schreibt:

Wir haben den Entwurf und Ihre Argumentation eingehend geprüft. So sehr wir Ihr Ziel einer vergleichbaren Abgrenzung von Strassenunterhaltsausgaben bei den unterschiedlichen Trägerschaften nachvollziehen können, so sehr zielt Ihr Lösungsansatz der Vereinheitlichung mittels einer VSS - Norm in die falsche Richtung.

Alle öffentlich rechtlichen Infrastruktureigentümer sind Ihrer jeweiligen Finanzgesetzgebung verpflichtet. Diese wird durch entsprechende Verordnungen und Regelwerke der Rechnungslegung (z.B. Handbuch Rechnungslegung HBR) konkretisiert. Aktuell findet in einer Vielzahl der Kantone eine Vereinheitlichung Ihrer Rechnungslegung im Zuge des harmonisierten Rechnungslegungsmodells (HRM 2) statt.

Die von Ihnen vorgeschlagene VSS-Norm würde ohne gesetzliche Grundlage in die Rechnungslegung der Strassenträgerschaften eingreifen. Dort würde sie unweigerlich zu finanzrechtlich nicht zulässigen Widersprüchen führen. Um die ordnungsgemässe Buchführung nicht zu gefährden, müssten die von der Norm anvisierten Reportinggrössen deshalb parallel in einer Schattenbuchhaltung nachgeführt werden.

Das ist nicht nur ineffizient und fehleranfällig - vielmehr verlagert es das Vergleichbarkeitsproblem aus dem Benchmark in den Alltag der Strasseneigentümer. Denn künftig würde aufgrund der unterschiedlichen Abgrenzung ja die gleiche Frage für die BORMAC-Zwecke mit einer anderen Zahl beantwortet, als in unserem offiziellen Kantonsreporting. Einen solchen Zustand der Parallel-Zahlen gilt um jeden Preis zu vermeiden.

Zudem erlauben wir uns die Bemerkung, dass die von Ihnen angestrebte Vergleichbarkeit der Infrastrukturbetreiber deutlich mehr braucht, als eine einheitliche Verbuchung. Im Punkt 4 des Normvorschlages wird indessen suggeriert, bei vergleichbarer Abgrenzung und Verbuchung der Ausgaben im Strassenunterhalt sei durch den Kontenvergleich eine Aussage zu "Stärken und Schwächen der technischen und organisatorischen Strategien der Strassenverwaltungen" möglich. Diese Einschätzung verkennt die Sachlage massiv. Der Strassenunterhalt ist in seiner Wirkung und Effizienz von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Hier mag eine vereinheitlichte Abgrenzung im Rechnungswesen eine notwendige Bedingung für eine erhöhte Vergleichbarkeit sein - hinreichend ist sie auf gar keinen Fall.

Soll der Weg einer verbesserten Vergleichbarkeit der Strassenunterhaltszahlen weiter verfolgt werden, so muss dieser konform zu den finanzrechtlichen Vorgaben der betroffenen Strasseneigentümer sein. Statt über eine VSS-Norm mit Solitär-Status muss eine solcher Weg also über die finanziellen Steuerungsgremien von Bund und Kantonen führen. So könnten definiertere Abgrenzungen im Strassenunterhalt Bestandteil einer Weiterentwicklung von HRM2 oder eine Vorgabe der Finanzdirektorenkonferenz sein.

In diesem Sinne empfehlen wir Euch dringend, den Ansatz einer VSS-Norm in diesem Themenbereich nicht weiter zu verfolgen.

Kanton 4 schreibt:

Ma position rejoint celle de Canton 3, que je remercie pour son argumentaire : si l'objectif d'une méthode permettant d'effectuer des comparaisons des dépenses d'entretien doit être poursuivi, sa traduction dans une norme n'est pas, à ce jour et à mon sens, le moyen adéquat.

L'argumentaire développé par Canton 3 est tout-à-fait pertinent et rejoint nos préoccupations, notamment au niveau

- des aspects juridiques,
- des aspects en lien avec le plan comptable et des difficultés afférentes.

Das Bundesamt für Statistik schreibt.

Wir danken Ihnen dafür, zum „Norm-Vorschlag für die Kontierung von Strassenausgaben“ Stellungnehmen zu können.

Das BFS begrüsst die Arbeiten der ETHZ, eine Norm für die Kontierung der Strassenausgaben zu etablieren. Die Erstellung der Norm und die Befürwortung des BFS können aber den Erfolg des Projektes nicht sicherstellen. Das Projekt steht und fällt mit der Bereitschaft der Strassenverwaltungen die Norm umzusetzen, da einzig die Strassenverwaltungen über die Informationen für die Zuordnung der Ausgaben verfügen. Für die Umsetzung muss ein Weg gefunden werden, die Informationen der einzelnen Strassenbauprojekte nach den Rubriken der Norm in die Buchhaltung einfließen zu lassen. Damit das BFS die Strassenrechnung nach den vorgeschlagenen Rubriken publizieren kann, müssten die von den Gemeinden und Kantonen ans BFS gelieferten Buchhaltungsdaten im Text die Schlüsselbegriffe der Norm enthalten.

Für eine erfolgreiche Umsetzung der Norm sind der Einbezug und die Schulung der Strassenverwaltungen essentiell. Aus Sicht des BFS stellt sich die Frage, wie die Unterstützung der Strassenverwaltungen mittel- bis langfristig sichergestellt werden kann.

Für eine korrekte Anwendung der Norm wären zusätzliche konkrete Umsetzungshinweise hilfreich. Aus der Norm geht beispielsweise nicht hervor, wer diese umsetzen soll oder wie das Ergebnis der korrekt angewandten Norm aussieht. Zu letzterem wäre es wünschenswert, wenn im Anhang der Norm eine Musterbuchhaltung abgebildet wäre, die die Vorgaben der Norm vollumfänglich erfüllt.

Ihre vorgeschlagene Norm orientiert sich an der SN-Norm 640 900 a und übernimmt die dort für das Erhaltungsmanagement verwendeten Begriffe. Die Begriffe 'Instandsetzung', 'Erneuerung' und 'Ersatz' der Norm 640 900 a sind allerdings nicht klar genug. Daher schlägt das BFS folgende Anpassung im Kapitel C3 'Ausbau und Verbesserung' Ihres Norm-Vorschlags vor:

Zu Ausbau und Verbesserung gehören Ausgaben für Projekte wenn z.B.:

- eine Strasse verstärkt wird. Kriterien dazu sind:

Das Auftragsvolumen des Projektes ist grösser als CHF 50'000.- und
Mehr als 4 cm des Belags (Oberbau und eventuell Unterbau) werden auf einer
zusammenhängenden Fläche von mehr als 500 m2 erneuert oder neu erstellt.

- eine Strasse erweitert wird. Kriterien dazu sind z.B.:

Verbreiterung der Strasse;
Erweiterung der Kapazität der Strasse durch eine neue Spur;
deutliche Veränderung der Strassengeometrie.

Ausserdem regen wir folgende Anpassungen an:

Allgemeines

Kapitel A1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für die Ausgaben für National-, Kantons- und Gemeindestrassen

B. Allgemeine Prinzipien

Kapitel B1 Detaillierte Ausführungsregeln

Das Ausführungsregel-Beispiel ist zu trivial. Bitte folgenden Satz ersetzen:

«Wenn mehr als 50% einer Rechnung dem betrieblichen Unterhalt zuzuordnen sind,
wird die gesamte Rechnung dem betrieblichen Unterhalt zugeordnet.» mit «Wenn
mehr als 50% eines Projektes der Verbesserung/Ausbau dient, wird das gesamte
Projekt der Rubrik Verbesserung/Ausbau zugeordnet.»

Das ASTRA schreibt:

Nach Rücksprache werden wir auf Grund des von Ihnen vorliegenden Norm-Vorschlag
„Forschungsprojekt (BORMAC)“ keine detaillierte Stellungnahme abgeben.

Sollte zu einem späteren Zeitpunkt entschieden werden, eine VSS-Norm auszuarbeiten, sind wir
gerne bereit uns daran zu beteiligen.

Das ASTRA weicht in diversen Punkten von dem Norm-Vorschlag ab. Abweichungen u.a. in folgenden
Punkten:

1. Begriff „Kunstabauten“: Empfehlung, einen anderen Begriff zu verwenden, insbesondere auch in Ziffer A. 2 des Normentwurfs / bzw. Definition Strassenkörper
Begründung: Der Begriff „Kunstabauten“ wird beim ASTRA für Brücken, Galerien, gedeckte Einschnitte, Wildtierpassagen und Stützmauern des Nationalstrassennetzes verwendet.
2. Empfehlung, Anwendungsbereich gilt für die Ausgaben für National- Kantonal- und Gemeindestrassen? Ziffer A.1 des Normentwurfs zu präzisieren oder entsprechende Anpassungen der Norm vorzunehmen
3. Begründung: Wie Sie selbst schreiben, geht es vor allem um Benchmarks zwischen den Kantonen. Da die Kantone ihr Rechnungswesen auf den HRM2 Standard harmonisiert haben, ist dies evt. möglich. Empfehlung, dies mit den zuständigen Organen der Kantone (Finanzdirektorenkonferenz?) zu klären. Der Bund weist hingegen verschiedene Abweichungen auf. Auch inhaltlich bestehen Unterschiede zwischen den Nationalstrassen und einer Gemeinde- oder Kantonsstrasse.
4. Folgende Grafik (Erfolgs-/Investitionsrechnung) ist gemäss neuem Buchungskreis NAF nicht mehr aktuell.
5. C Minimale Standards: -
 - a. Betrieblicher Unterhalt : Auftragsvolumen bis 250'000.00
 - b. Unterhaltsprojekte NS : Kriterien / Standards diverse Abweichungen
 - c. Ausbau- / Engpassprojekte : NS Kriterien / Standards diverse Abweichungen
 - d. Netzfertigstellung / Kapazitätserweiterung NS : Kriterien / Standards diverse Abweichungen

II Lösung des bestimmten Integrals aus Gleichung 41

[illegible]

III Umsetzungsvorschlag in Form einer Schweizer Norm

Zürich 18.07.2018

Vorschlag: Entwurf einer Norm für die Datenelemente die für Benchmarking benötigt werden

Gegenstand: Strassenkörper ausschliesslich Kunstbauten

A. Allgemeines

1. Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für Kantone und Gemeinden, die an einem gemeinsamen Benchmarking teilnehmen wollen.

2. Gegenstand

Diese Norm legt fest, wie die Informationsobjekte zu definieren sind, die speziell für den Zweck «Benchmarking» auf Netzebene benötigt werden.

3. Zweck

Strassenverwaltungen können aus diversen Gründen sich mit anderen vergleichen wollen. Eine gemeinsame Definition der Datenelemente ist dafür Voraussetzung. Deshalb werden hier Standards für einzelne Elementen definiert sowie der minimal benötigter Felder. Bezweckt sind nicht die Definitionen von Datenobjekten für ein PMS, die in anderen Normen behandelt sind. Es soll ermöglicht werden, dass Kantone und Gemeinden, die keine PMS anwenden, trotzdem mit minimalem Aufwand und gängiger Software die benötigten Transferfiles erstellen können.

4. Überblick

Es wird ein «Flat File» definiert, wie eine Excel Tabelle. Jede Reihe stellt einen Strassenabschnitt dar und beinhaltet alle benötigten Datenelemente. Der Strasseneigner ist dafür zuständig, bei seinen Daten die historische und geographische Konsistenz zu gewährleisten.

Zwischen Strassenstreifen oder der Strassenrichtung wird in der Datenstruktur nicht direkt unterschieden. Sofern ein Strasseneigner genügend differenzierte Daten besitzt, um nach Strassenstreifen Daten zu liefern, kann dies über die intern definierten IDs (Rt_ID, Sect_ID) trotzdem erreicht werden. Das Benchmarking findet im Allgemeinen auf einer aggregierten Ebene statt, bei der die differenzierten Daten in der Regel keinen starken Einfluss haben.

B. Allgemeine Prinzipien

1. Definition der möglichen Einträge in das Feld «Obligatorisch»

Seite 1/11

Tabelle 1 Definition der möglichen Einträge in das Feld «Obligatorisch»

Wert	Bedeutung
1	Muss vom Strasseneigentümer geliefert werden.
2	Kann vom Strasseneigentümer geliefert werden und wenn nicht, werden Daten aus anderen Quellen eingesetzt.
3	Um an den betroffenen Auswertungen teilzunehmen, müssen diese Felder durch den Strasseneigentümer ausgefüllt werden.

2. Definition des Feldes «Definiert Durch»

Die Werte identifizieren welche Autorität für die Definition der Inhalte zuständig ist.

Wert	Bedeutung
Quellsystem	Die Dateninhalte sind in einer Datensammlung beim Eigner zu finden. Es wird erwartet, dass diese Werten zur Kontrolle im Quellsystem nachgeschaut werden können.
Datensatz	Die Dateninhalte können auch nur in dem zu transferierenden Datensatz definiert sein.
Eigner	Werten die vom Eigner zu definieren sind.
Sonstige Werte	Organisationen oder Schriftwerke die die Wertinhalte bereits definiert haben.

3. Definition des Feldes «Quelle»

Die Werte identifizieren von wem die Inhalte bezogen werden.

4. Definition des Feldes «Format»

Um das Erstellen der Files möglichst einfach zu gestalten, werden nur drei Datenformaten benutzt:

Wert	Bedeutung
Text	Text Feld mit weniger als 255 Ziffern
Ganzzahl	Eine Ganzzahl zwischen -2'000'000'000 und 2'000'000'000.
Zahl	Dezimalzahl

5. Zustandsdaten

Die Tabellenstruktur ermöglicht die Erfassung von bis zu fünf Erhebungen von den sechs Zustandsindices I0 bis I5. Jeder Erhebungswert wird mit dem Jahr der Erhebung ergänzt.

Die Erhebungen werden mit ihrer historischen Reihenfolge identifiziert. Die neueste Erhebung ist deshalb «Erhebung 5». Die vorletzte Erhebung ist die «Erhebung 4» usw.

C. Definition der Felder in dem Flat File

1. Identifizierung des Abschnitts

FeldName	Ist nötig	Erklärung	Beispiel	Definiert durch	Quelle	Format
Knt_Code	1	Kantonskürzel	LU	BFS	Eigner	Text
Rt_ID	1	Ganzzahl Schlüssel der Ax	224707	Datensatz	Eigner	Ganzzahl
Sect_ID	1	Ganzzahl Schlüssel der Sektion	3610	Datensatz	Eigner	Ganzzahl
Rt_Code	1	Text Schlüssel der Ax	Knt-13	Quellsystem	Eigner	Text
		Positionierung des Anfangspunktes in einer gebräuchlichen Kilometrierung des Eigentümers gerundet auf Meter. Falls kein Unterbruch besteht oder Ax-Anfang ist, gilt FromDist = vorhergehende ToDist.				
VonDist	1		20010	Quellsystem	Eigner	Ganzzahl
		Positionierung des Endpunktes in einer gebräuchlichen Kilometrierung des Eigentümers gerundet auf Meter. Falls kein Unterbruch besteht oder Ax-Ende ist, gilt FromDist = vorhergehende ToDist.				
BisDist	1		20090	Quellsystem	Eigner	Ganzzahl
Beginn_X	1	Lage des Anfangspunktes in Landeskoordinaten	689986.108	Quellsystem	Eigner	Zahl
Beginn_Y	1	Lage des Anfangspunktes in Landeskoordinaten	252920.499	Quellsystem	Eigner	Zahl
End_X	1	Lage des Endpunktes in Landeskoordinaten	690000.321	Quellsystem	Eigner	Zahl
End_Y	1	Lage des Endpunktes in Landeskoordinaten	253000.165	Quellsystem	Eigner	Zahl

2. Dimensionierung

FeldName	Ist nötig	Erklärung	Beispiel	Definiert durch	Quelle	Format
Breite	1	Durchschnittsbreite entlang des Abschnitts. Es gilt: Fläche = Länge X Durchschnittsbreite. Die Breite gilt die zu unterhaltende Belagsfläche.	14.55	Quellsystem	Eigner	Zahl
Länge	1	Länge des Abschnitts (nicht gerundet)	80	Quellsystem	Eigner	Zahl
Fläche	1	Fläche des Abschnitts (nicht gerundet)	1164	Quellsystem	Eigner	Zahl
IstVLK	2	Bauwerkmerkmal der existierenden Strasse gemäss Norm. Es geht hier um eine grobe Einschätzung der Dimensionierung.	T4	SN 640324	Eigner oder Extern	Text
SollVLK	1	Verkehrsmerkmal des zu erwartenden Verkehrs. Es geht hier um eine grobe Einschätzung der benötigten Dimensionierung.	T5	SN 640324	Eigner	Text
IstSN	2	Der existierende Strukturwert gemäss Norm. Es geht hier um eine verfeinerte Dimensionierungsangabe.	87	SN 640324	Eigner oder Extern	Zahl
SollSN	3	Der erforderliche Strukturwert gemäss Norm. Es geht hier um eine verfeinerte Dimensionierungsangabe.	94	SN 640324	Eigner oder Extern	Zahl
MaxGeschwt	2	Maximal erlaubte Geschwindigkeit	50	Quellsystem	Eigner oder Extern	Zahl

3. Umfaktoren

FeldName	Ist nötig	Erklärung	Beispiel	Definiert durch	Quelle	Format
GDE_ID	2	Gemeindennummer gemäss BFS in der der Strassenabschnitt liegt.	1095	BFS	Eigner	Ganzzahl
GmdName	2	Name der Gemeinde in der der Strassenabschnitt liegt.	Oberkirch	BFS	Eigner	Text
Tragfkt_Klasse	2	Die Tragfähigkeitsklasse gemäss Norm als Ganzzahl (0,1,2,3,4). Bei fehlenden Angaben wird dies anhand des geologischen Atlas der Schweiz grob geschätzt.	2	SN 640324	Eigner oder Extern	Ganzzahl
DSV	2	Durchschnittlicher Schwerverkehr (Anzahl Fahrzeuge pro Tag > 3.5 t). Bei fehlenden Angaben werden die Daten aus dem Nationalen Verkehrsmodell entnommen oder gemäss obigen RequiredVLK grob geschätzt.	34	SN 640320	Eigner oder Extern	Zahl
DTV	2	Durchschnittlicher Tagesverkehr (Anzahl Fahrzeuge pro Tag). Bei fehlenden Angaben werden die Daten aus dem Nationalen Verkehrsmodell entnommen oder gemäss obigen RequiredVLK grob geschätzt.	400	SN 640320	Eigner oder Extern	Zahl

4. Erneuerung

FeldName	Ist nötig	Erklärung	Beispiel	Definiert durch	Quelle	Format
AuslöseZstd_I1	2	Der Erwartungswert vom I1 bei dem die Deckschicht erneuert werden soll. Bei fehlenden Angaben wird ein nationaler Durchschnittswert eingesetzt.	3	Eigner	Eigner oder Extern	Zahl
AuslöseZstd_I2	2	Der Erwartungswert von I2 bei dem die Deckschicht erneuert werden soll. Bei fehlenden Angaben wird ein nationaler Durchschnittswert eingesetzt.	3.5	Eigner	Eigner oder Extern	Zahl
AuslöseZstd_I3	2	Der Erwartungswert von I3 bei dem die Deckschicht erneuert werden soll. Bei fehlenden Angaben wird ein nationaler Durchschnittswert eingesetzt.	3.5	Eigner	Eigner oder Extern	Zahl
LetzteIntDeck	3	Das Jahr in dem die Deckschicht zuletzt erneuert wurde.	2015	Eigner	Eigner	Ganzzahl
LetzteIntTrag	3	Das Jahr in dem die Tragschicht zuletzt erneuert wurde.	1990	Eigner	Eigner	Ganzzahl
LetzteIntFund	3	Das Jahr in dem der ganze Strassenkörper zuletzt erneuert wurde.	1990	Eigner	Eigner	Ganzzahl
BrückeLänge_m	2	Anzahl Meter dieses Abschnitts die auf einer Brücke liegen. Bei fehlenden Angaben wird möglichst aus Alternativquellen eine Schätzung gemacht.	0	Eigner	Eigner oder Extern	Zahl
Tunnellänge_m	2	Anzahl Meter dieses Abschnitts die in einem Tunnel liegen. Bei fehlenden Angaben wird möglichst aus Alternativquellen eine Schätzung gemacht.	0	Eigner	Eigner oder Extern	Zahl
MauerLänge_m	3	Anzahl Meter dieses Abschnitts die durch einem Stützmauer abgegrenzt ist.	20	Eigner	Eigner	Zahl

5. Zustand

FeldName	Ist nötig	Erklärung	Beispiel	Definiert durch	Quelle	Format
Zsd_I1_Jahr1	3	Jahr der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 1		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I1_Wert1	3	Wert der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 1		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I1_Jahr2	3	Jahr der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 2	2006	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I1_Wert2	3	Wert der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 2	0.8	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I1_Jahr3	3	Jahr der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 3	2009	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I1_Wert3	3	Wert der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 3	1	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I1_Jahr4	3	Jahr der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 4	2012	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I1_Wert4	3	Wert der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 4	1.1	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I1_Jahr5	3	Jahr der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 5	2015	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I1_Wert5	3	Wert der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 5	1.1	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I2_Jahr1	3	Jahr der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 1		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I2_Wert1	3	Wert der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 1		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I2_Jahr2	3	Jahr der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 2		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I2_Wert2	3	Wert der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 2		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I2_Jahr3	3	Jahr der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 3	2006	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I2_Wert3	3	Wert der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 3	2	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I2_Jahr4	3	Jahr der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 4	2012	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I2_Wert4	3	Wert der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 4	3	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I2_Jahr5	3	Jahr der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 5	2015	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I2_Wert5	3	Wert der Erhebung; I2 ; historische Reihenfolge: 5	3.70	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I3_Jahr1	3	Jahr der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 1		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I3_Wert1	3	Wert der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 1		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I3_Jahr2	3	Jahr der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 2	2006	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I3_Wert2	3	Wert der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 2	2.2	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I3_Jahr3	3	Jahr der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 3	2009	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I3_Wert3	3	Wert der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 3	1.5	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I3_Jahr4	3	Jahr der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 4	2012	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I3_Wert4	3	Wert der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 4	2.4	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I3_Jahr5	3	Jahr der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 5	2015	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I3_Wert5	3	Wert der Erhebung; I3 ; historische Reihenfolge: 5	2.6	SN 640925b	Eigner	Zahl

FeldName	Ist nötig	Erklärung	Beispiel	Definiert durch	Quelle	Format
Znd_14_Jahr1	3	Jahr der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 1		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_14_Wert1	3	Wert der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 1		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_14_Jahr2	3	Jahr der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 2		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_14_Wert2	3	Wert der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 2		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_14_Jahr3	3	Jahr der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 3		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_14_Wert3	3	Wert der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 3		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_14_Jahr4	3	Jahr der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 4	2009	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_14_Wert4	3	Wert der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 4	0.8	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_14_Jahr5	3	Jahr der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 5	2012	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_14_Wert5	3	Wert der Erhebung; 14 ; historische Reihenfolge: 5	0.2	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_15_Jahr1	3	Jahr der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 1		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_15_Wert1	3	Wert der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 1		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_15_Jahr2	3	Jahr der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 2		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_15_Wert2	3	Wert der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 2		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_15_Jahr3	3	Jahr der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 3		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_15_Wert3	3	Wert der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 3		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_15_Jahr4	3	Jahr der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 4		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_15_Wert4	3	Wert der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 4		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_15_Jahr5	3	Jahr der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 5		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_15_Wert5	3	Wert der Erhebung; 15 ; historische Reihenfolge: 5		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_10_Jahr1	3	Jahr der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 1		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_10_Wert1	3	Wert der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 1		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_10_Jahr2	3	Jahr der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 2		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_10_Wert2	3	Wert der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 2		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_10_Jahr3	3	Jahr der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 3		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_10_Wert3	3	Wert der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 3		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_10_Jahr4	3	Jahr der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 4		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_10_Wert4	3	Wert der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 4		SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_10_Jahr5	3	Jahr der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 5		Eigner	Eigner	Zahl
Znd_10_Wert5	3	Wert der Erhebung; 10 ; historische Reihenfolge: 5		SN 640925b	Eigner	Zahl

6. Beispiel einer minimalen Abgabe

FeldName	Ist nötig	Erklärung	Beispiel	Definiert durch	Quelle	Format
Knt_Code	1	Kantonskürzel	LU	BFS	Eigner	Text
Rt_ID	1	Ganzzahl Schlüssel der Ax	224707	Datensatz	Eigner	Ganzzahl
Sect_ID	1	Ganzzahl Schlüssel der Sektion	3610	Datensatz	Eigner	Ganzzahl
Rt_Code	1	Text Schlüssel der Ax	Knt-13	Quellsystem	Eigner	Text
VonDist	1	Positionierung des Anfangspunktes in einer gebräuchlichen Kilometrierung des Eigentümers gerundet auf Meter. Falls kein Unterbruch besteht oder Ax-Anfang ist, gilt FromDist = vorhergehende ToDist.	20010	Quellsystem	Eigner	Ganzzahl
BisDist	1	Positionierung des Endpunktes in einer gebräuchlichen Kilometrierung des Eigentümers gerundet auf Meter. Falls kein Unterbruch besteht oder Ax-Ende ist, gilt FromDist = vorhergehende ToDist.	20090	Quellsystem	Eigner	Ganzzahl
Beginn_X	1	Lage des Anfangspunktes in Landeskoordinaten	689986.108	Quellsystem	Eigner	Zahl
Beginn_Y	1	Lage des Anfangspunktes in Landeskoordinaten	252920.499	Quellsystem	Eigner	Zahl
End_X	1	Lage des Endpunktes in Landeskoordinaten	690000.321	Quellsystem	Eigner	Zahl
End_Y	1	Lage des Endpunktes in Landeskoordinaten	253000.165	Quellsystem	Eigner	Zahl
Breite	1	Durchschnittsbreite entlang des Abschnitts. Es gilt: Fläche = Länge X Durchschnittsbreite. Die Breite gilt die zu unterhaltende Belagsfläche.	14.55	Quellsystem	Eigner	Zahl
Länge	1	Länge des Abschnitts (nicht gerundet)	80	Quellsystem	Eigner	Zahl
Fläche	1	Fläche des Abschnitts (nicht gerundet)	1164	Quellsystem	Eigner	Zahl
SollVLK	1	Verkehrsmerkmal des zu erwartenden Verkehrs. Es geht hier um eine grobe Einschätzung der benötigten Dimensionierung.	T5	SN 640324	Eigner	Text
Znd_I1_Jahr4	3	Jahr der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 4	2012	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I1_Wert4	3	Wert der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 4	1.1	SN 640925b	Eigner	Zahl
Znd_I1_Jahr5	3	Jahr der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 5	2015	Eigner	Eigner	Zahl
Znd_I1_Wert5	3	Wert der Erhebung; I1 ; historische Reihenfolge: 5	1.1	SN 640925b	Eigner	Zahl

D. Literatur Verzeichnis

SN 640 320 Dimensionierung des Strassenaufbaus; Äquivalente Verkehrslast

SN 640 324 Dimensionierung des Strassenaufbaus; Unterbau und Oberbau

SN 640 925b Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF)

IV GIS Karten zur Visualisierung der Modellberechnungen

Das Modell gibt für jeden Vektor von Variablen in Gleichung (62) die Zeit bis zur Erneuerung oder in Gleichung (63) den optimalen Erweichungspunkt an. Im Prinzip lassen sich solche Berechnungen für jeden Strassenabschnitt durchführen. Die Klimadaten existieren bis zu einer Aggregationsstufe auf Gemeindeebene. Noch genauer an die jeweiligen lokale Bedingungen anpassen lassen sich die Höhen- und Temperaturmodelle so wie die Sonneneinstrahlung. Letztere lässt sich mithilfe von topologischen Karten auch saisonabhängig sehr präzise berechnen. Verkehrsdaten können teilweise für einzelne Strassenabschnitt aus Modellberechnungen bezogen werden, jedoch sind diese nicht flächendeckend vorhanden. Diesbezüglich sind die Karten mit den durchschnittlichen Verkehrsaufkommen auf den Kantonsstrassen der jeweiligen Gemeinden dargestellt.

Um darzulegen wie wichtig der klimatische Einfluss auf die zu erwartende Lebensdauer und auf den optimale Erweichungspunkt der Bindemittel bei dem Einbau ist, sind zwei Karten der Schweiz aufgeführt. Es wird für beide Karten angenommen, dass die Strassen einheitlich bei einem Zustand von $l_1=3$ erneuert werden.

Besonders interessant ist der Einfluss einzelner Mikroklimata in der Nähe von Seen, dargestellt in der ersten Karte. Der Einflusses auf die zu erwartenden Kosten ist in Abbildung 56 zu sehen. Dabei repräsentiert die dicke Linie den prozentualen Unterschied gegenüber einer Lebensdauer von 30 Jahren, d.h. ein Lebensdauer von 20 Jahren erhöht die Kosten um 50%, wohingegen ein Lebensdauer von 40 Jahren die Kosten um 25% reduziert.

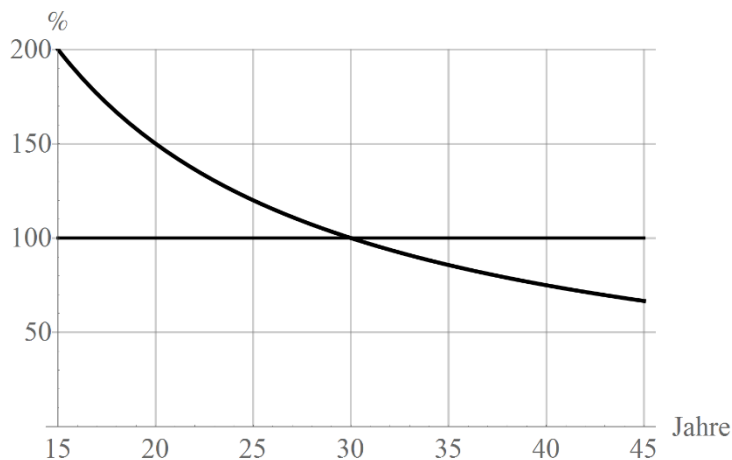
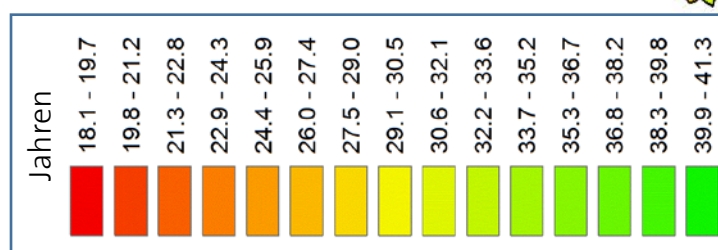


Abbildung 56 Relativer Vorteil bzw. Nachteil gegenüber einer Lebensdauer von 30 Jahren in Prozent

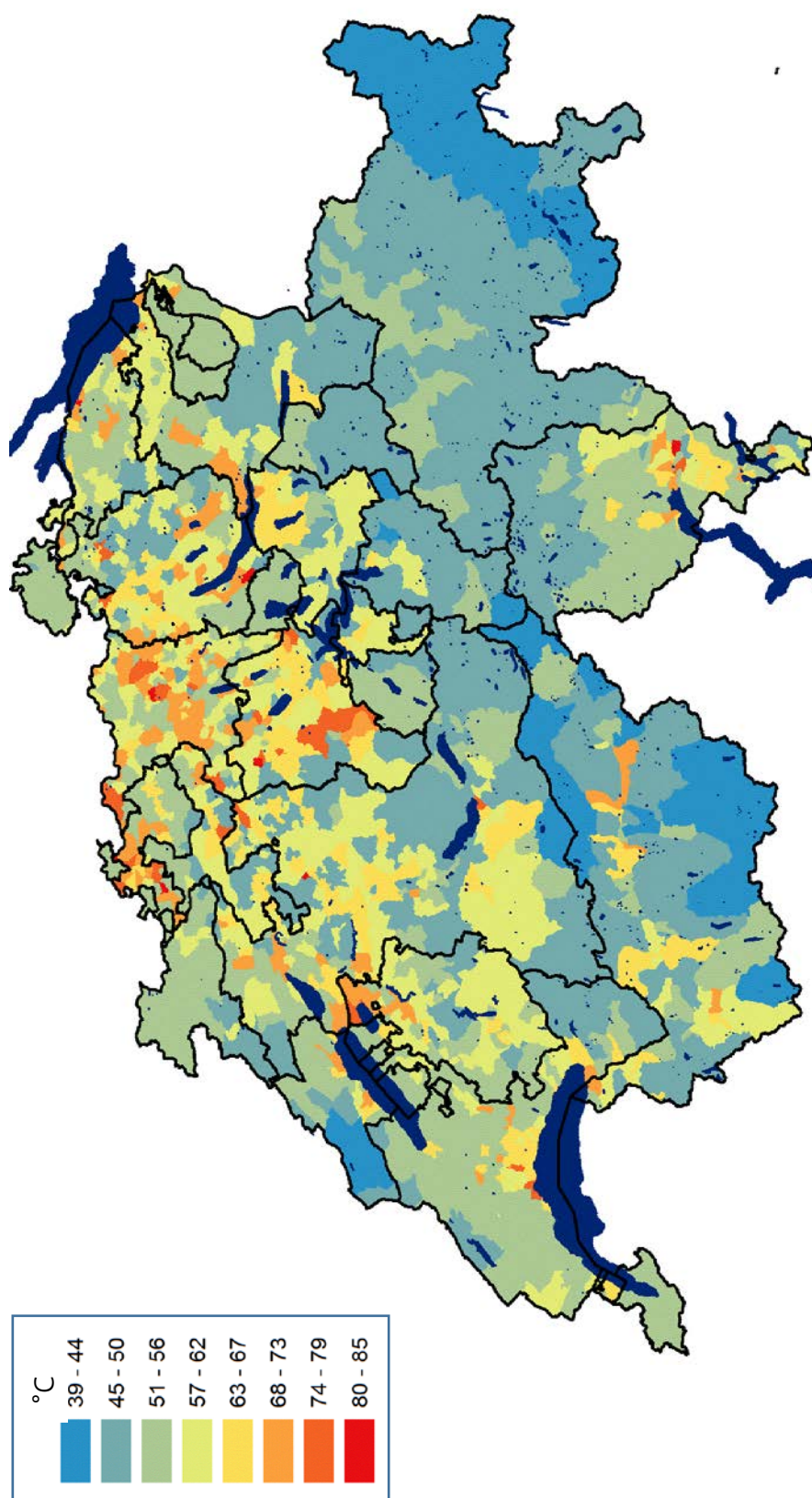
Die zweite Karte stellt den, vom Modell berechneten, optimalen Erweichungspunkt dar. Hierbei sollten die Ergebnisse als relative Werte aufgefasst werden, da es keine Methode gab die Skala der Erweichungspunkte im Modell gegenüber einem empirischen Niveau zu kalibrieren. D.h. könnte man den optimale Erweichungspunkt an einem spezifischen Ort feststellen, so müsste man die Skala an diesem Ort in Einklang bringen.

Auffallend an der optimalen Erweichungspunktkarte sind die relativ starken Schwankungen innerhalb relativ kleinen geographischen Räumen. Dies zeigt die Empfindlichkeit des Modells bezüglich dem Verkehrsaufkommen. Leider, wie oben erwähnt, ist das durchschnittliche Verkehrsaufkommen auf Kantonsstrassen nicht unbedingt massgebend für eine Gemeinde. Des Weiteren, zeigt die Karte deutlich auf, wie regionale Klimabedingungen den optimalen Erweichungspunkt im allgemeinen beeinflussen und dass bei einem hohen Verkehrsaufkommen andere Bindemittel eingesetzt werden sollten.

Zeit bis zu einem I1 Zustand von 3



Optimaler Erweichungspunkt für einen Auslösezustand von $l_1=3$



Glossar

Begriff	Bedeutung
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTRA OFROU	Bundesamt für Strassen Office fédéral des routes
BFS	Bundesamt für Statistik
DTV	Durchschnittlicher Tagesverkehr
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ESAL	Equivalent Single Axle Load (Einheitsachslast)
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
HDM-4	Highway Development and Maintenance (Version 4)
GIS	Geographische Informationssysteme
M-E-PEG	Mechanical-Empirical Pavement Design Guide
SN	Schweizer Norm (SN)
SQL	Standard Query Language
SSV	Schweizerische Städteverband
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Literaturverzeichnis

-
- AASHTO. (1993). Guide for design of pavement structures (4 ed.). Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
-
- AASHTO. (2015). Mechanistic-empirical pavement design guide: A manual of practice. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials
-
- Arand, W., & Lorenzl, H. (1995). Einfluss der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung, und der Temperatur. Retrieved from Bonn:
-
- Arraigada, M., Treuholz, A., & Partl, M. (2014a) Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T3-Normbelags mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10. . Vol. 1545. Bern: Bundesamt für Strassen; VSS.
-
- Arraigada, M., Treuholz, A., & Partl, M. (2014b) Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T4-Normbelags mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10. . Vol. 1462. Bern: Bundesamt für Strassen; VSS.
-
- Huang, Y. (2004). Pavement analysis and design (2cd ed.). Upper Saddle River, N.J., USA: Prentice Hall.
-
- Jorge, D., & Ferreira, A. (2012). Road network pavement maintenance optimisation using the HDM-4 pavement performance prediction models. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(1), 39-51. doi:10.1080/10298436.2011.563851
-
- 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). doi:10.1080/10298436.2013.842237
-
- Kingham, I. (1972). Failure Criteria developed from AASHO Road Test Data. Paper presented at the Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, London.
-
- McDonald, M., & Madanat, S. (2012). Life-Cycle Cost Minimization and Sensitivity Analysis for Mechanistic-Empirical Pavement Design. *Journal of Transportation Engineering*, 138(6), 706-713. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000346
-
- Miner, M. A. (1945). Cumulative Damage of Fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 12(3), 5.
-
- Mirza, M. W., & Witczak, M. W. (1995). Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements. Paper presented at the Asphalt Paving Technology, Minneapolis, Minn.
-
- Rauhut, B., O'Quin, J., & Hudson, W. R. (1976). Sensitivity analysis of FHWA Structural Model VESYS II; Vol. 1 Preparatory and Related Studies. Retrieved from Washington D.C.:
-
- Richmond, C., Achilles, F., & Adey, B. T. (2018). Approximating an Analytic Solution for the Optimal Design of Asphalt Pavement: Limited Example. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 144(4). doi:10.1061/JPEODX.0000070
-
- Richmond, C., & Adey, B. T. (Submitted 2018). The A-VTS model of bitumen viscosity transformed and made continuous across families of grades.
-
- Richmond, C., Kielhauser, C., & Adey, B. T. (2013) KPI - Key Performance Indicators for Cantonal Road Management. In *ETHZ (Series Ed.)*, (pp. 160). Zurich, Switzerland: Eidgenössischer Technischer Hochschule, IBI.
-
- Richmond, C., Kielhauser, C., & Adey, B. T. (2014). Genügender und Effizienter Strassenunterhalt; Wie kann man es wissen? Paper presented at the Verkehrsökonomik und -politik, TU Berlin.
-
- Richmond, C., Kielhauser, C., & Adey, B. T. (2015). Leistungsmaßzahlen für die Straßenerneuerung. *Zeitschrift fuer Verkehrswissenschaft*, 86(2), 32.
-

Richmond, C., Kielhauser, C., & Adey, B. T. (2016). Performance measures for road managers facing diverse environments. *Benchmarking: An International Journal*, 23(7), 1876-1891. doi:10.1108/BIJ-01-2015-0005

Städteverband, S. (1978 - 2011) Statistisches Jahrbuch des Schweizerischen Städteverbandes.

Van der Poel, C. (1954). A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology*, 4.

VSS. (1997) Norm 640324a, Dimensionierung des Strassenoberbaus (German /French). Zürich: VSS.

VSS. (2003) Norm 640925b Zustandserhebung und Indexbewertung (German/French). Zürich: VSS.

Walther, A. (2014). Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen unter Berücksichtigung stündlicher Beanspruchungszustände. Braunschweig: Technischen Universität Braunschweig

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 28.09.2018

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2014/411

Projekttitel: Ermöglichung eines realistischen Benchmarkings des baulichen Unterhalts der Kantonsstrassen (BORMAC)

Enddatum: 28.09.2018

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Es wurden zwei Sätze von Benchmarks entwickelt und anhand der kantonalen Daten implementiert. Der erste Satz (Typ-A) bezieht sich auf Fragen der ökonomischen Effizienz. Der Zweite (Typ-B) bezieht sich auf Fragen, die ohne Einbezug von Ausgabendaten beantwortet werden können.

Die Herausarbeitung einer methodischen Berechnungsart für die Typ-A Benchmarks stellt das grösste Resultat dieser Forschung dar. Entgegen der Annahmen bei der Erstellung des Forschungsantrags gab es in der Literatur kein in sich geschlossenes, analytisches Modell des Verfalls in Abhängigkeit der unterschiedlichen klimatischen sowie verkehrsbezogenen Belastungen. Ein solches Modell musste zuerst aus mechanischen Modellen des Belagsverhaltens erstellt werden. Die Modellierung unterscheidet sich grundsätzlich von bisherigen Verfallsmodellen und kann daher für einige neue und wesentliche Anwendungen eingesetzt werden. Die Modellierung wurde zweifach mit unabhängigen Datensätzen empirisch stark bestätigt.

Ein zweites Modell, bezogen auf die verfallsunabhängigen Einflussfaktoren jedes Strassenabschnitts wurde ebenfalls erstellt und die Parameter geschätzt. Die zwei Untermodelle zusammen ergeben die Vorhersage der zu erwartenden Höhe der kantonalen Ausgaben für den Erneuerungsunterhalt.

Das Verfallsmodell ist "bottom-up" mechanistisch. Zwei wichtige Schadensmechanismen werden berücksichtigt: Spurrinnenbildung und thermisch induzierte Risse. Neu ist die methodische Verwendung von Erwartungswertintegralen zur Übertragung der einzelnen Schadenereignisse auf eine Vorhersage der Geschwindigkeit der aggregierten Schadenszunahme. Ein drittes wichtiges Merkmal der Modellierung ist die Herleitung einer Gleichung für den optimalen Erweichungspunkt des Bitumens in geschlossener Form.

Die Modellierung wird in zwei empirischen Tests stark bestätigt. Insbesondere die Kombination beider Tests bestätigt sowohl die zugrundeliegenden mechanischen Modelle als auch die Methoden zur Umwandlung der einzelnen Schadenereignisse in eine Zustandsverlauf-Prognose.

Darüber hinaus wird eine Reihe von Benchmarks für diverse spezifische Merkmale der Unterhaltsprozesse entwickelt und berechnet. Diese enthalten keine Daten über die Ausgaben und konzentrieren sich ausschliesslich auf physikalische Grössen.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Vier Ziele wurden im Projektantrag angegeben:

1. Ein Norm-Vorschlag über die Kontierung von Strassenausgaben wurde erstellt. Die Forscher sind überzeugt, dass es hier um einen vertretbaren Kompromissvorschlag handelt, der zu einer Erhöhung der Vergleichbarkeit der Statistiken führen würde. Einigkeit über den Vorschlag unter den an der BK beteiligten Kantonen gab es nicht.
2. Zwei Benchmark-Konzepte über die Kosteneffizienz wurden erstellt. Das langfristige Benchmark vermag ca. 50% der Variabilität in den empirischen Ausgaben pro Quadratmeter zu erklären. Das kurzfristige Benchmark zeigte sich in der Ausführung als zu empfindlich auf Schwierigkeiten bei den Eingabedaten um allgemein eingesetzt zu werden.
3. Datensätze wurden in einem aufwendigen Verfahren aus diversen Quellen erstellt damit eine Kostenregression erfolgreich berechnet werden konnte. Besonders wichtig dabei war der Einbezug der Verfallsprognosen aus der bereits erwähnten Modellierung.
4. Sieben Fragestellungen wurden identifiziert, zu denen Typ-B Benchmarks aus den vorhandenen Datensätzen erstellt werden konnten. Einzelne von diesen können in mehrfacher Ausführung mit unterschiedlichem Inhalt erstellt werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Praktische Anwendungen der erarbeiteten Modellierung liegen im Bereich von Benchmarking, von diversen ökonomischen Problemstellungen wie die Berechnung der vom Schwerverkehr erzeugten Mehrkosten und im Bereich von strassenspezifischen Verfallsprognosen in PMS Systemen. Potentiell möglich erscheint eine Anwendung bezogen direkt auf die Dimensionierung von Strassen in Abhängigkeit des Verkehrs und der klimatischen Belastungen, etwa um den kostenoptimalen Einsatz von Modifizierungen zu berechnen.

Es wird empfohlen, den Vorschlag bezüglich der Kontierung von Strassenunterhaltskosten weiter zu verfolgen, nur so sind Fortschritte bezüglich des kurzfristigen Typ-A Benchmarks möglich.

Es wird empfohlen, dass ein Benchmarking mit den hier untersuchten Konzepten in die Tat umgesetzt wird. Besonders die Typ-B Benchmarks können mit vertretbarer Qualität verlässliche und nützliche Information an die kantonalen Strassenverwaltungen liefern.

Publikationen:

Richmond, C., Achilles, F., & Adey, B. T. (2018). Approximating an Analytic Solution for the Optimal Design of Asphalt Pavement: Limited Example. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 144(4), 04018045. doi:doi:10.1061/JPEODX.0000070

Richmond, C., & Adey, B. T. (Submitted). Theorem to reduce the mathematical complexity of formulating optimal maintenance strategies for infrastructures.

Richmond, C., & Adey, B. T. (Submitted). The A-VTS model of bitumen viscosity transformed and made continuous across families of grades.

Richmond, C., Archilla, A. R., & Adey, B. T. (Submitted). Relevance of the discount rate to the optimal structural design service life of asphalt concrete pavement.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Adey

Vorname: Bryan T.

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich, Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement (IBI)

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

30.11.2018



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Erstmals wurde ein quantitatives Modell aufgrund der Daten von 20 Kantonen zur Ermittlung der Verfallsrate der Deckschicht von Asphaltbelägen aufgrund klimatischer, humangeographischer, physikalisch-geographischer Faktoren auf wissenschaftlicher Basis ermittelt. Dieses Modell ermöglicht lokalspezifische Vorhersagen betreffend den zu erwartenden Verfallsraten. Es kann für Benchmarks A verwendet werden und ermöglicht einen fairen ökonomischen Vergleich der Kantone. Die Resultate sind sehr erfolgsversprechend und eine wichtige Grundlage für einen interkantonalen Vergleich des theoretischen Erhaltungsbedarfs, bzw. der Wirkung der eingesetzten Finanzmittel. 50% der Variation konnte durch die Forschungsarbeit erklärt werden. In einem weiteren Modell wurden 7 Typ B Benchmarks für bauliche Massnahmen entwickelt. Mit diesen können individuelle Fragen beantwortet werden. (z.B. Einfluss Innerorts/Ausserorts auf den Durchschnittszustand) Um diese beiden Modelle zu verbessern, wäre es notwendig die Kontierung der Strassenausgaben in der Schweiz unter den Kantonen zu vereinheitlichen.

Umsetzung:

In einem ersten Schritt ist die Vereinheitlichung der Kontierung von Strassenausgaben zu diskutieren und eventuell in einer Norm (je nach Entscheid der VSS-Instanzen) festzulegen. Dabei sind unbedingt die finanzbuchhalterischen Grundsätze nach HRM2/IPSAS zu berücksichtigen. Hinweise auf inhaltliche Differenzen betreffend einer Normierung sind als Anhang dem Forschungsbericht beigelegt.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Modelle aus der Forschungsarbeit sind nun in erster Linie in der Praxis anzuwenden und zu übertragen. Entsprechende Erfahrungen damit sollten gesammelt werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Vereinheitlichung der Kontierung von Strassenausgaben ist zu diskutieren und eventuell in einer Norm festzulegen.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Soller

Vorname: Luzia

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

15.11.18

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare) heruntergeladen werden.