

Verfahren zur Bildung und Beschreibung zustandshomogener Abschnitte und repräsentativer Kennzahlen für das Erhaltungsmanagement

FA 29.360

Forschungsstelle: LEHMANN + PARTNER GmbH, Erfurt

Bearbeiter: Großmann, A. / Berthold, D.

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt),
Bergisch Gladbach

Abschluss: April 2019

1 Aufgabenstellung

Die rechnergestützte systematische Straßenerhaltung mithilfe eines Pavement-Management-Systems (PMS) beinhaltet in der Bundesrepublik Deutschland als ersten und grundlegenden Schritt die Bildung von fahrstreifenbezogenen, zustandshomogenen Abschnitten auf Grundlage der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB). Die zustandshomogenen Abschnitte werden aktuell aus den 100 m beziehungsweise 20 m langen Auswertabschnitten der ZEB nach dem Verfahren nach Rübensam/Schulze (RS) gebildet. Als Eingangsparameter werden hierbei die normierten Zustandsgrößen verwendet. Bei der Anwendung des Verfahrens sind jedoch in der Vergangenheit einige methodische Schwächen erkannt worden.

Der Kern des Forschungsprojekts bestand in der Untersuchung und Bewertung von verschiedenen alternativen Verfahren zur Bildung zustandshomogener Abschnitte – im Folgenden ZHA-Verfahren genannt. Im Forschungsprojekt waren national und international angewendete ZHA-Verfahren vergleichend zu untersuchen und auf ihre Eignung im deutschen PMS zu prüfen beziehungsweise alternativ ein neues ZHA-Verfahren zu erarbeiten und zu beschreiben.

Neben der Berücksichtigung einer Mindestlänge für die zustandshomogenen Abschnitte war zu untersuchen, wie sich die Verwendung von Zustandsgrößen als Inputdaten anstelle von Zustandswerten sowie kürzere Auswertabschnittslängen auswirken.

Das Projektziel bestand darin, eine Entscheidungsgrundlage für die Ablösung oder Modifikation des bestehenden Verfahrens RS zu liefern.

2 Untersuchungsmethodik

Zunächst wurden gemäß Aufgabenstellung Algorithmen entwickelt, die auf Basis der Rasterrohdaten die Zustandsgrößen auf verschiedenen Auswerterastern (1, 10, 20, 100 m) bereitstellen. Die Basisdaten (Rasterrohdaten, TP0-Daten, Ergebnisdateien) waren von der BASt für verschiedene ZEB-Kampagnen zur Verfügung gestellt worden. Die ZEB-Ergebnisdateien ERG.dbf wurden zur Verifikation der eigenen Berechnungen herangezogen. Die Berechnungsergebnisse wurden tabellarisch aufbereitet und für ausgewählte Strecken und Kampagnen in einer an die Struktur der Ergebnisdatei ERG.dbf angelehnten Form

(ERG_ZHA.dbf) der BASt auf Datenträger inklusive Datensatzbeschreibung übergeben.

Die ZHA-Verfahren betreffend lagen erste Forschungsansätze vor. In Zusammenarbeit mit der Hochschule Konstanz waren bereits international bekannte Vorgehensweisen zur Bildung zustandshomogener Abschnitte recherchiert und diese im Rahmen eines Pilotprojekts untersucht worden. Sie führten zu der Einschätzung, dass viele der zu prüfenden Verfahren Schwächen besitzen und demnach detaillierte Untersuchungen durchgeführt werden müssen, um das oder die Verfahren mit dem größten Potenzial herauszufinden oder auch Teilaspekte der einzelnen Verfahren zu kombinieren. Dazu wurde eine umfassende Literaturrecherche zur Analyse der generellen Eignung der Verfahren durchgeführt. Die nicht zielführenden Verfahren wurden von den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Schließlich wurden die folgenden drei Verfahren in Abstimmung mit der BASt und dem Betreuerkreis ausgewählt und es erfolgte deren Implementierung:

BAYES: Verfahren mit Bayes'schem Ansatz (Thomas, 2003 ff.);

CBS: Verfahren Circular Binary Segmentation (Olshen et al., 2004 ff.);

RS: Verfahren nach Rübensam/Schulze (Rübensam/Schulze, 1996).

Ausgangspunkt eines jeden Verfahrens ist eine Folge von fahrstreifenbezogenen Zustandsmerkmalen über einen linear zusammenhängenden Netzbereich. Das Ziel besteht darin, diese Messwertfolge so zu segmentieren, dass die entstehenden Teilfolgen zustandshomogen sind, das heißt, es müssen sogenannte Changepoints detektiert werden.

Während die Verfahren BAYES und CBS auf wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätzen beruhen und eine möglichst symmetrische Normalverteilung der Messwerte voraussetzen, hat das Verfahren RS keine solche Einschränkung. Eine (jedoch nicht per se symmetrische) Normalverteilung liegt nur bei den Zustandsgrößen des TP1a/b und TP2 vor. Zur Herstellung der Symmetrie wird die Messwertfolge vor Anwendung des Verfahrens zunächst einer Transformation unterworfen (Box-Cox).

Alle untersuchten ZHA-Verfahren können pro Durchlauf jeweils nur ein Zustandsmerkmal segmentieren. Eine Zusammenfassung der pro Zustandsmerkmal gefundenen Segmentierungen zu einer Gesamtsegmentierung (zustandshomogener Abschnitt) wird nur beim Verfahren RS in Form eines Postprozessings durchgeführt.

Für die drei Verfahren lagen wissenschaftliche Arbeiten der jeweiligen Autoren vor, in welchen die theoretischen und praktischen Aspekte beschrieben waren. Auf dieser Basis wurde die Softwareapplikation ZHACalc in C++ erstellt, die nach Auswahl des gewünschten ZHA-Verfahrens und Angabe von diversen

Steuerparametern eine aus der ERG_ZHA abgeleitete Messwertfolge segmentiert. Eine Mindestsegmentlänge kann vorgegeben werden.

Der Postprozessingschritt zur Herstellung einer Gesamtsegmentierung wurde in der Programmiersprache R separat als Applikation ZHAMerge implementiert. Dies bot die Möglichkeit, die einzelnen Zustandsgrößen mit verschiedenen Verfahren (zum Beispiel SPT mit CBS und RISS mit RS) zu segmentieren. Beim Postprocessing werden die Changepoints aller beteiligten Messwertfolgen vereinigt. Da im Ergebnis jedoch oftmals die Mindestsegmentlänge unterschritten wird, wird anschließend durch Anpassung einzelner Changepoints versucht, die Mindestsegmentlänge auf Kosten der Zustandshomogenität wiederherzustellen.

Zur Verifikation der Implementierung und zur Untersuchung des Verhaltens der Verfahren in Standardsituationen wurden diese zunächst auf synthetische Messwertfolgen mit überlagertem Rauschen und vorgegebenen Changepoints, die von den Verfahren zu erkennen waren, angewendet.

Für Berechnungen mit realen Daten wurde auf zwei ZEB-Kampagnen der letzten Jahre zurückgegriffen, und zwar auf die Daten der Bundesautobahn A 3 in Bayern (ZEB 2013) und die Daten der Bundesstraße B 58 in Nordrhein-Westfalen (ZEB 2015). Die Inputdaten wurden entsprechend den oben genannten Ausführungen auf Basis der Rasterrohdaten auf den beiden Auswertearastern 20 und 100 m erstellt.

Ein wichtiger Bestandteil des Forschungsprojekts war die Untersuchung, wie die einzelnen Zustandsgrößen nach der Segmentierung aggregiert werden sollten, damit der charakteristische Zustand des jeweiligen homogenen Abschnitts optimal durch eine Kennzahl beschrieben wird. Im aktuellen angewendeten Verfahren RS wird die Kennzahl durch das arithmetische Mittel gebildet. Jedoch ist bekannt, dass dies bei Segmenten mit sehr inhomogenem Zustand eine unbefriedigende Aussagekraft hat, was sich durch eine Verschiebung der Streckenanteile in den einzelnen Zustandsklassen zu besseren Zuständen hin darstellt. Es waren daher Alternativen zu prüfen und zu bewerten. Hierzu wurden Untersuchungen mit den p-Quantilen anstelle des Mittelwerts durchgeführt. Dies führte bei bestimmten p zu einer deutlichen Verringerung des genannten Effekts. Der zu beobachtende Effekt war jedoch sehr stark abhängig vom Wert p.

Die Bewertung der Ergebnisse und der Vergleich der Verfahren untereinander erfolgte auf verschiedenen Wegen: Vorher-Nachher-Vergleiche der Streckenanteile nach Zustandsklassen, Berechnung von speziellen Gütewerten der resultierenden Segmentierung und vergleichende Prognosen des sich ergebenden Finanzbedarfs für die Erhaltungsaufwendungen mittels der Software HORIZONS (Hersteller: Yotta).

3 Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde mit den Applikationen ZHACalc und ZHAMerge eine hohe Anzahl an Berechnungsläufen durchgeführt, die sich aus der Variation der verschiedenen Eingangsgrößen und Steuerparameter ergaben. Letztere steuern den Ablauf und die Sensitivität des Verfahrens und mussten daher ebenfalls variiert werden:

- Zwei verschiedene Aggregierungsverfahren für die ERG_ZHA bei drei Zustandsgrößen,
- zwei verschiedene Rasterlängen der ERG (20, 100 m),
- drei verschiedene Mindestabschnittslängen (500, 1000, 2000 m),
- mehrere verschiedene ZHA-Verfahren und Varianten davon (CBS, BAYES, RS, CBS+RS),
- mehrere interne Steuerparameter der ZHA-Verfahren, die auch abhängig von der jeweiligen Zustandsgröße zu wählen waren und
- mehrere Möglichkeiten für die Bildung der charakteristischen Kennzahl (Mittelwert, p-Quantil mit Variation des p).

Beim Verfahren RS zeigte sich ein sehr starker Einfluss der Steuerparameter auf die resultierende Segmentierung. Bei einer geeigneten Wahl der Steuerparameter, die abhängig von der jeweiligen Zustandsgröße gewählt werden müssen, werden die Changepoints gut erkannt. Beim Verfahren BAYES werden viele Changepoints nicht oder an unerwarteten Positionen detektiert. Dieses Verfahren wurde auch deswegen von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen, weil es bei einem inversen Durchlauf ein deutlich abweichendes Segmentierungsergebnis zeigte. Das Verfahren CBS erkannte die Changepoints in der Regel gut.

Auf Grundlage dieser Berechnungsergebnisse sowie der theoretischen Aspekte und der Vorgaben der Aufgabenstellung wurden folgende Erkenntnisse gewonnen und daraus Vorschläge hinsichtlich einer künftigen Anwendung im Sinne der systematischen Straßenerhaltung generiert.

3.1 Zustandsgrößen

Als Eingangsgrößen (Messwertfolgen) sollten künftig die Zustandsgrößen verwendet werden, um den Einfluss der nichtlinearen Normierungsfunktionen zu eliminieren. Insbesondere die Tatsache, dass ab einem bestimmten Wert der Zustandsgröße die Zustandswerte konstant = 5,0 bleiben, führt zu unerwünschten Effekten.

3.2 Aggregierungsverfahren

Bezüglich der Mittelungsverfahren zur Bildung der aggregierten 20- beziehungsweise 100-m-Werte wurden Alternativen untersucht. Grundsätzlich kann man bei den Zustandsgrößen des

TP 1b und des TP 2 die derzeitige arithmetische Mittelwertbildung durch ein Aggregationsverfahren ersetzen, bei dem stark abweichende Ausreißer bereits vorab eliminiert werden. Diese Einflussgröße ist im Vergleich zu anderen jedoch von untergeordneter Bedeutung.

3.3 ZHA-Verfahren

Es wird ein hybrides Verfahren CBS+RS vorgeschlagen. Für normalverteilte Zustandsgrößen (TP 1a/b, TP 2) soll für die Segmentierung das Verfahren CBS verwendet werden und für die TP 3-Zustandsgrößen dagegen das bisherige Verfahren RS. Für diese Kombination wurden die zielführendsten Resultate erzielt. Dies gilt auch für die Berechnungen zur Finanzbedarfsprognose. Die Gesamtsegmentierung im Postprocessing analog der Forschungsarbeit hat sich trotz gewisser Nachteile (Mindestsegmentlänge vs. Zustandshomogenität) als guter Kompromiss erwiesen. Untersuchte Alternativen dazu haben sich als nicht tragfähig erwiesen.

3.4 Auswerteabschnittlänge

Die in der ZEB etablierte Rasterlänge (100/20 m) ist für das kombinierte Verfahren CBS+RS grundsätzlich geeignet. Ein praxisrelevanter Vorteil ist zweifelsohne, dass damit die Ergebnisdatei ERG.dbf der ZEB ohne jegliche Anpassung des ZEB-Verfahrens als Input sofort zur Verfügung steht. Für spezielle Untersuchungen, zum Beispiel für die genauere Lokalisierung von Schadensbereichen, erwies sich ein durchgängiges Raster von 20 m als zielführender. Hierfür wäre jedoch eine spezielle Aufbereitung der Rasterrohdaten notwendig.

3.5 Vorabblockbildung

Bevor das ZHA-Verfahren angewandt wird, ist das zu untersuchende Netz vorab in Blöcke einzuteilen. Ein Block ist eine linear zusammenhängende Strecke aus ZEB-Auswerteabschnitten unter Berücksichtigung von tatsächlichen Unterbrechungen im Straßenverlauf, Bauweisenwechseln, Ortsdurchfahrtsgrenzen und gegebenenfalls weiteren gewünschten Vorabgrenzen. Bei der Blockbildung sollte auch die Interpolation von einzelnen fehlenden Werten und die Überbrückung von sehr kurzen Bauweisenwechseln und kurzen Ortsdurchfahrten erfolgen.

3.6 Steuerparameter

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden die internen Steuerparameter der Verfahren variiert und es konnten für bestimmte Parameter gut geeignete Werte gefunden werden. Jedoch zeigte es sich bei einigen Steuerparametern (insbesondere bei RS), dass deren nur geringfügige Änderung bei ansonsten gleichen Eingangsdaten zu einer deutlich veränderten

Segmentierung und damit zu anderen Längenanteilen je Zustandsklasse im Vorher-Nachher-Vergleich führt.

3.7 Charakteristische Kennzahl

Zur Optimierung der Berechnung einer charakteristischen Kennzahl für den zustandshomogenen Abschnitt wurden Untersuchungen mit den p-Quantilen durchgeführt. Ausschlaggebend war die Kritik am Verfahren HARC, das die Mittelwertbildung bei relativ inhomogenen Abschnitten das Ergebnis deutlich verfälscht (Prüfstein: Vorher-Nachher-Vergleiche der Streckenlängen je Zustandsklasse). Es wurde bei den Untersuchungen jedoch festgestellt, dass sich dieser unerwünschte Effekt allein schon durch die Verwendung von Zustandsgrößen (anstelle von Zustandswerten) als Inputdaten deutlich vermindert, da der Einfluss der Nichtlinearität der Normierungsfunktionen wegfällt.

3.8 Bewertungsmethode

In die Bewertung eines ZHA-Verfahrens oder den Vergleich untereinander sollten aus Sicht des Forschungsnehmers nur die objektiven Verfahrensziele Eingang finden, das heißt eine möglichst kleine Streuung beziehungsweise Standardabweichung innerhalb der Segmente und eine möglichst große Länge eines jeden Segments. Derartige Zielfunktionen wurden in Form der Gütewerte G_s und G_L im Forschungsprojekt entwickelt. Vorher-Nachher-Vergleiche der Streckenlängen je Zustandsklasse werden vom Forschungsnehmer nicht als zielführend für die Qualität eines solchen Verfahrens erachtet.

4 Folgerung für die Praxis

Aus Sicht des Forschungsnehmers sind die erzielten Ergebnisse mit dem vorgeschlagenen ZHA-Verfahren CBS+RS durch weitere netzweite Berechnungen zu festigen. Dabei ist auch der Einfluss der Streckencharakteristik (Bundesautobahn, Bundesstraße freie Strecke und Ortsdurchfahrt) noch umfangreicher zu untersuchen. Gegebenenfalls sind die Steuerparameter noch zu optimieren oder sogar abhängig von der Streckencharakteristik festzusetzen. Es besteht ferner noch Untersuchungsbedarf zu einem vorgeschalteten Preprocessing mittels gleitendem Mittel oder morphologischer Glättung.

Die Applikationen ZHACalc und ZHAMerge, welche die Algorithmen des modifizierten ZHA-Verfahrens enthalten, wurden projektbezogen durch den Forschungsnehmer erstellt. Diese wurden der BAST als Quellcode und als compilierte Programme sowie in Form von Programmablaufplänen und Pseudocode übergeben.

Unabhängig von der Zielstellung dieses Forschungsprojekts sollte auch der Gedanke weiterverfolgt werden – statt der Bildung zustandshomogener Abschnitte als ersten Schritt – als Grundlage einer weiteren PMS-Analyse zielführende bekannte Verfahren aus dem benachbarten Ausland anzuwenden. Dort

werden homogene Abschnitte erst am Ende der PMS-Analysen gebildet. Dies hat unter anderem den entscheidenden Vorteil hinsichtlich einer Historisierung der Daten.

Es wird daher empfohlen, erst nach erfolgter Anschlussforschung ein neues Berechnungsverfahren bundeseinheitlich festzulegen.