

Katalogisierung von beschreibenden Größen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahn- befestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen

FA 9.125

Forschungsstellen: SEP Maerschalk, München / RS-Consult
Rübensam, Berlin

Bearbeiter: Hinsch, K. / Krause, G. / Maerschalk, G. / Rübensam, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und
Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Oktober 2004

1. Aufgabenstellung

Aussagen zu den im Zeitablauf zu erwartenden Zustandsänderungen von Fahrbahnbefestigungen, dem sog. Verhalten, werden für alle Aufgabenstellungen der systematischen Straßenerhaltung benötigt, die sich mit künftigen Entwicklungen befassen. Dazu gehören abschnittsbezogene Erhaltungsprogramme im Rahmen der rechnergestützten Erhaltungsplanung mit dem Pavement Management System (PMS), netzbezogene Abschätzungen des künftigen Erhaltungsbedarfs und alle Arten von abschnitts- oder netzbezogenen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. Auch für die Umsetzung der "Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen RPE-Stra 01" müssen die derzeit hinterlegten Verhaltenskennlinien überprüft und verifiziert werden.

Für Verhaltensprognosen werden derzeit im PMS Trendfortschreibungen des beobachteten Zustands vorgenommen, die auf wissenschaftlich nicht ausreichend abgesicherten Standardfunktionen basieren. Daraus resultieren z. T. erhebliche Unsicherheiten bei der Vorhersage der Zeitpunkte geplanter Erhaltungsmaßnahmen und den daraus abgeleiteten Zustandsverteilungen für Straßennetze. Diese Unsicherheiten werden noch dadurch verstärkt, dass zu den Verbesserungen der Zustandsgrößen und -werte unmittelbar nach durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen, den sog. Rücksetzwerten, zwar gut begründete Annahmen, aber keine empirisch ausreichend abgesicherten Erkenntnisse vorliegen.

Mit den Erfassungskampagnen der Zustandserfassung/-bewertung ZEB 1992, 1997/98 und 2001/2002 auf Bundesautobahnen liegen Zustandsdaten für drei Zeitpunkte vor, die eine mathematisch-statistisch abgesicherte Verfolgung von zeitlichen Zustandsverläufen ermöglichen. Dies gilt umso mehr, als mit der Erhebung der Aufbaudaten und der Erhaltungsgeschichte im Rahmen der Langfristprognose des Erhaltungsbedarfs die durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen erfasst wurden und damit auch die Zeitpunkte mit neuwertigen Zuständen als weitere Stützpunkte verfügbar sind. Auf dieser Datengrundlage kann das Verhalten von Fahrbahnbefestigungen mit Hilfe eines statistisch ausreichenden Kollektivs analysiert werden. Ausgehend von den derzeit verwendeten Verhaltensfunktionen sollten damit die Zustandsverläufe der ZEB-Merkmale nach Neubau- bzw. Erhaltungsmaßnahmen und die Rücksetzwerte dieser Merkmale unmittelbar nach Erhaltungsmaßnahmen für die Bundesautobahnen empirisch und mathematisch-statistisch überprüft und katalogisiert werden, um alle darauf aufbauenden Analysen besser abzusichern.

2. Methodische Vorgehensweise

Die Aufgabe, Zustandsentwicklungen mit den Verhaltensfunktionen und den Rücksetzwerten systematisch zum gegenwärtigen Stand zu dokumentieren, empirisch und mathematisch-statistisch um neue Erkenntnisse zu ergänzen und in einer für die Weiterverwendung im PMS geeigneten Form zu katalogisieren, erfordert eine systematische Analyse der Zustandsänderungen der einzelnen im Rahmen der ZEB erfassten Zustandsmerkmale in Abhängigkeit von netzweit verfügbaren exogenen Einflussfaktoren wie erfolgten Erhaltungsmaßnahmen, Bauweise, Alter, Verkehr (Achslasten), um die Streuung im Verhalten so weit wie möglich zu erklären.

Da eine Reihe von für das Verhalten relevanten endogenen Einflussfaktoren, wie z. B. die Einbaubedingungen (z. B. Witterung) oder die Qualität der Bauausführung (Gleichmäßigkeit der Schichtdicken, Beschaffenheit des Mischguts, Schichtenverbund) aus Bauunterlagen oder Laboruntersuchungen allenfalls für einzelne Straßenabschnitte, keinesfalls aber für statistisch auswertbare Kollektive verfügbar sind, muss grundsätzlich von einem Anteil einer nicht erklärbaren Reststreuung im Verhalten ausgegangen werden. In Abhängigkeit von der Ausprägung dieser Reststreuung besteht dementsprechend das minimale Untersuchungsziel darin, für bestimmte, mit den Einflussfaktoren abgegrenzte Faktorengruppen statistisch signifikante Funktionstypen zur Beschreibung der voraussichtlichen Zustandsentwicklung abzuleiten, die auf der Grundlage von beobachteten ZEB-Daten für verbesserte Trendprognosen verwendbar sind. Für den Fall, dass keine beobachteten Zustandsdaten für Trendfortschreibungen verfügbar sind, müssen darüber hinaus empirisch und statistisch abgesicherte Standardverhaltensfunktionen bereitgestellt werden.

Der Erfolg der Analysen wird entscheidend von der Präzision bestimmt, mit der die in den Jahren 1992 für die rechten Fahrstreifen, 1997/1998 und 2001/2002 für alle durchgehenden Fahrstreifen der Bundesautobahnen durchgeführten ZEB-Kampagnen örtlich zugeordnet werden. Wie aus Bild 1 ersichtlich, ist die Verknüpfung und Synchronisation der Zustandsdaten der drei ZEB-Kampagnen der grundlegende erste Arbeitsschritt, da eine fehlerhafte örtliche Zuordnung der Zustandsgrößen in Längs-/Querrichtung zu Missinterpretationen führt. Für diese Verknüpfung mussten die Netzkenngößen einer Kampagne als Bezugsnetz definiert werden, auf das die Netze der anderen Kampagnen angepasst werden. Das zunächst gewählte Bezugsnetz der ZEB 1997/1998 erwies sich als fehlerhaft. Im Untersuchungsablauf wurde daher das Netz der ZEB 2001/2002 als Bezug gewählt; die bis dahin durchgeführten Analysen mussten größtenteils wiederholt werden.

Nach der Netzabstimmung konnten örtlich nicht zuordenbare (100-m-) ZEB-Auswerteabschnitte aus dem Datenkollektiv für die Verhaltensanalysen aussortiert werden. Die Zielgrößen der übernommenen Abschnitte, die bewertungsrelevanten Zustandsmerkmale der ZEB, wurden um einen neu entwickelten Längsebenenheitswirkindex LWI ergänzt, der aus der ZEB 2001/2002 bereits vorlag. Der LWI wurde aus den Rohdaten der ZEB-Kampagne 1997/1998 nachträglich ermittelt und in die synchronisierte Zustandsdatei aufgenommen; für die ZEB 1992

war dies nicht möglich. Zusätzlich wurden die netzweit verfügbaren Bestands-, Verkehrs- und Lagedaten als potenzielle Einflussfaktoren zugeordnet (Bild 1). Dabei handelt es sich um die Anzahl und Breite der Fahrstreifen, die Art, Dicke und das Einbaujahr der gebundenen und ungebundenen Schichten, die Art und die Durchführungszeitpunkte von Erhaltungsmaßnahmen, die Verkehrsstärken (DTV, DTV-SV) und die Längsneigungen. Witterungsdaten konnten nicht berücksichtigt werden, weil ein abschnittsbezogener örtlicher Bezug nicht herstellbar und eine kleinräumige Wetterprognose nicht möglich ist.

Neben der eindeutigen lokalen Zuordnung der Einflussfaktoren und der Zielgrößen muss im Vorfeld einer Verhaltensanalyse auch die Plausibilität aller Daten sorgfältig geprüft werden (Bild 1). Diese Plausibilitätsprüfung lässt, sofern überhaupt möglich, vielfach einen Ermessensspielraum. In einem Forschungsprojekt kann dieser Ermessensspielraum nicht willkürlich ausgefüllt werden. Die mit einem hohen Zeit-, Analyse- und Auswerteaufwand verbundene Entwicklung und Anwendung eines nachvollziehbaren Verfahrens zur Plausibilitätsprüfung der Zustandsgrößen der drei ZEB-Kampagnen führte zu zahlreichen Ausschlüssen von (100-m-) ZEB-Auswerteabschnitten mit unplausibler Zustandsentwicklung. Die mathematisch-statistischen Analysen mussten daher, anders als ursprünglich beabsichtigt, auf der Grundlage der (100-m-) ZEB-Auswerteabschnitte durchgeführt werden, weil wegen der Ausschlüsse keine homogenen Abschnitte in repräsentativen Fallzahlen gebildet werden konnten. Die Plausibilitätsanalysen führten, neben gravierenden Unterschieden in der Lokalisierung und der Erhebungstechnik, letztlich auch zu einem kompletten Ausschluss der ohnehin nur für die rechten Fahrstreifen vorliegenden Zustandsdaten aus der ZEB 1992.

Die im PMS verwendeten und in die RPE-Stra 01 übernommenen Verhaltensmodelle schreiben aus anwendungstechnischen Gründen keine Zustandsgrößen, sondern Zustandswerte fort. Als Basis für eine Weiterentwicklung wurden die Zustandswerte der Kampagne von 1997/1998 mit den vorliegenden Verhaltensfunktionen auf den Stand 2001/2002 hochgerechnet und mit den bei der ZEB 2001/02 tatsächlich ermittelten Zustandswerten verglichen. Neben Erkenntnissen zur Schlüssigkeit der bisherigen Funktionen zeigte sich insbesondere, dass, aufgrund von Sprüngen und nicht linearen Verzerrungen bei der Normierung, die Verhaltensfunktionen nicht mehr auf Zustandswerte, sondern auf Zustandsgrößen ausgerichtet werden sollten.

Deskriptive statistische Auswertungen der Einflussfaktoren und Zustandsgrößen sind die Voraussetzung für die Prüfung der Anwendbarkeit mathematisch-statistischer Signifikanztests (Bild 1). Nach Klärung dieser Voraussetzungen können die Zielgrößen, d. h. die zeitlichen Änderungen der Zustandsgrößen zwischen 1997/98 und 2001/02, in Abhängigkeit der netzweit verfügbaren Einflussfaktoren analysiert werden. Mit Hilfe geeigneter Verfahren wie der Varianz- und Kovarianzanalyse, die sowohl feste als auch zufällige Faktoren sowie kategorial (qualitative) erklärende Variablen und intervallskalierende erklärende Variablen (Kovariaten) einbeziehen, wird die Signifikanz der Faktorengruppen (z. B. Asphalt und Beton bei der Bauweise) im Hinblick auf ihren Einfluss auf die Zielgröße "Zustandsänderung" beurteilt. Dabei werden auch Wechselwirkungen berücksichtigt, die zur Verstärkung oder auch zur Aufhebung der Effekte einzelner Faktoren führen können. Bei den auf der Grundlage dieser Signifikanztests mit den Faktoren Bauweise (Asphalt-Beton), Fahrstreifen, Deckschichtart, Tragschichtart, Längsneigung und Bemessung abgegrenzten Faktorenguppen mit homogenen Verhaltenseigenschaften, den "verhaltenshomogenen Gruppen", wird stets auch die bau- und erhaltungstechnische Plausibilität eines eventuellen Zusammenhangs hinterfragt.

Die als plausibel erkannten verhaltenshomogenen Gruppen sind die Ausgangsbasis für die Analysen zur Ermittlung von

Verhaltensfunktionen (Bild 1). Als maßgeblicher quantitativer Einflussfaktor erweisen sich dabei die kumulierten Übergänge äquivalenter 10-t-Einheitsachsen des Schwerverkehrs. In Abhängigkeit davon können unter Berücksichtigung vorliegender Erkenntnisse und Literaturveröffentlichungen durch eine Korrelations-/Regressionsanalyse Verlaufstypen von Verhaltensfunktionen und, nach Schätzung der Koeffizienten, gruppenspezifische Standardfunktionen ermittelt werden. Aus analyse- und anwendungstechnischen Gründen ist dabei weiterhin als Grundtyp eine Potenzfunktion angenommen. Die Verlaufstypen dieser Potenzfunktionen (progressiv-linear-degressiv) zur Beschreibung der Zustandsentwicklung werden für die weiterhin vorgesehenen Trendprognosen benötigt. Ausgehend vom Jahr der Herstellung bzw. der letzten Erhaltungsmaßnahme und den Zustandsgrößen aus der jeweils aktuellen ZEB werden dabei die Steigungskoeffizienten der Verhaltensfunktionen abschnittsspezifisch angepasst. Anders als bisher werden auch die Koeffizienten für den Achsabschnitt, die den Ausgangszustand vor der Verkehrsfreigabe kennzeichnen, abschnittsspezifisch modifiziert. Auf die Standardverhaltensfunktionen wird bei der praktischen Anwendung nur dann zurückgegriffen, wenn keine Zustandsdaten verfügbar und damit keine Trendprognosen möglich sind (z. B. nach Maßnahmevorschlägen im PMS).

Die für die verhaltenshomogenen Gruppen ermittelten Verhaltensfunktionen werden in einer Ex-post-Analyse wiederum für die Hochrechnung der Zustandsdaten aus ZEB-Kampagne von 1997/1998 auf den Stand 2001/2002 angewendet (Bild 1). Ein Vergleich der für 2001/2002 tatsächlich ermittelten und der hochgerechneten Zustandsgrößen auf der Ebene der (100-m-) ZEB-Auswerteabschnitte zeigt, dass kleinere Modifikationen erforderlich sind, insgesamt aber weitgehend konsistente und im Ergebnis zufrieden stellende Verhaltensfunktionen kalibriert wurden.

Für das Teilkollektiv von Autobahnabschnitten, an denen zwischen zwei ZEB-Kampagnen Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt wurden, können empirische Analysen zur Rücksetzung der einzelnen Zustandsgrößen und -indikatoren durchgeführt werden. Die Rücksetzwerte, die den Ausgangszustand nach der Herstellung bzw. nach Maßnahmen kennzeichnen, streuen sehr stark. Eine eindeutige Abhängigkeit von Maßnahmenteilen wird nicht erkennbar.

3. Untersuchungsergebnisse

Bei den Analysen zur Abgrenzung verhaltenshomogener Gruppen werden im Rahmen einer Varianzanalyse mittlere Zustandsänderungen zwischen 1997/98 und 2001/02 statistisch abgesichert. Unabhängig von der darauf aufbauenden Ermittlung von Verhaltensfunktionen liefern diese mittleren Zustandsänderungen stabile und größtenteils schlüssige Erkenntnisse zum generellen Verhalten in Abhängigkeit von der Bauweise und der Verkehrsbelastung, die nicht nur für die Abgrenzung verhaltenshomogener Gruppen, sondern auch für weitergehende Fragestellungen, z. B. im Zusammenhang mit Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, Verwendung finden können. Darüber hinaus sind auf dieser Basis auch Aussagen zur Schlüssigkeit der im Rahmen der ZEB ermittelten Zustandsgrößen möglich.

Die für die verhaltenshomogenen Gruppen abgeleiteten Verhaltensfunktionen und Rücksetzwerte werden im Ergebnis mit Anwendungsempfehlungen so katalogisiert, dass sie ohne größeren Zusatzaufwand in bestehende Richtlinien und Arbeitspapiere übernommen werden können. Als wesentliche Änderung gegenüber dem bisherigen Verhaltensmodell ist zu beachten, dass der Achsabschnitt der Verhaltensfunktionen, kennzeichnend für den Zustand nach der Herstellung oder der Maßnahmedurchführung und vor der Verkehrsfreigabe, in Bezug auf die Zustandsgrößen und -indikatoren der Ebenheitsmerkmale und der Griffbarkeit i. allg. bestimmte, von Null abweichende Werte

annimmt. Für die Anwendung der Verhaltensfunktionen im PMS müssen zunächst die kumulierten Übergänge äquivalenter 10-t-Einheitsachsen des Schwerverkehrs AL für jeden Abschnitt i (z. B. homogener Abschnitt, Erhaltungsabschnitt) und, ausgehend vom Jahr der letzten Maßnahme, für das Jahr t_{ZEB} der aktuellen ZEB-Kampagne bestimmt werden. Auf dieser Basis kann, getrennt für jede Zustandsgröße j, zunächst die katalogisierte Standardverhaltensfunktion der jeweiligen verhaltenshomogenen Gruppe k ausgewählt und angewendet werden:

$$z_{i,j,t ZEB} = a_{j,k} + b_{j,k} \cdot AL_{i,t ZEB} c_{j,k}$$

mit

- $z_{i,j,t ZEB}$ geschätzte Zustandsgröße für Abschnitt i und Zustandsmerkmal j im Jahr t ZEB der aktuellen ZEB-Kampagne,
- $AL_{i,t ZEB}$ kumulierte Achsübergänge AL für Abschnitt i im Jahr t_{ZEB} ,
- $a_{j,k} / b_{j,k} / c_{j,k}$ katalogisierte Koeffizienten der Standardverhaltensfunktion für Zustandsgröße j und verhaltenshomogene Gruppe k.

Die geschätzte Zustandsgröße $z_{i,j,t ZEB}$ wird vielfach von der in der aktuellen ZEB ermittelten Zustandsgröße $z_{i,j,b ZEB}$ abweichen. In diesen Fällen müssen die katalogisierten Koeffizienten der Standardverhaltensfunktion für den Achsabschnitt ($a_{j,k}$) und die Steigung ($b_{j,k}$) wie folgt angepasst werden:

$$\alpha_{i,j,k} = a_{j,k} \cdot (z_{i,j,b ZEB} / z_{i,j,t ZEB})$$

$$\beta_{i,j,k} = (z_{i,j,b ZEB} - \alpha_{i,j,k}) / AL_{i,t ZEB} c_{j,k}$$

mit

- $z_{i,j,b ZEB}$ beobachtete Zustandsgröße für Abschnitt i und Zustandsmerkmal j aus der aktuellen ZEB-Kampagne im Jahr t_{ZEB} ,
- $\alpha_{i,j,k}$ angepasster Ausgangszustand (Achsabschnitt) für Abschnitt i, Zustandsgröße j (und verhaltenshomogene Gruppe k),
- $\beta_{i,j,k}$ angepasster Steigungskoeffizient für Abschnitt i, Zustandsgröße j und verhaltenshomogene Gruppe k.
- $b_{i,j,k}$ Steigungskoeffizient für Abschnitt i, Zustandsgröße j und verhaltenshomogene Gruppe k,
- $c_{j,k}$ Verlaufs-Koeffizienten (Potenzzahlen) für Zustandsgröße j und verhaltenshomogene Gruppe k.

Der Umformung des Achsabschnitts $a_{j,k}$ zu einem abschnittsbezogenen Wert $\alpha_{i,j,k}$ liegt die Annahme zugrunde, dass der aktuelle Zustand sich zu einem bestimmten Anteil aus dem (individuellen abschnittsspezifischen) Ausgangszustand nach der Herstellung oder einer Erhaltungsmaßnahme ableitet und damit der zunächst einheitlich gesetzte, i. allg. mit dem häufigsten Rücksetzwert (Modus) übereinstimmende Achsabschnitt der Standardverhaltensfunktion rückwirkend angepasst werden muss.

Die Notwendigkeit zur Anpassung der Steigungskoeffizienten $b_{j,k}$ und Ermittlung eines abschnittsspezifischen Koeffizienten $\beta_{i,j,k}$ ergibt sich aus der Tatsache, dass mit den netzweit verfügbaren Einflussfaktoren aus Bestand und Verkehr, trotz der Bildung verhaltenshomogener Gruppen, nur ein sehr geringer Teil der Streuung in der Zustandsentwicklung erklärt werden kann. Mit den abschnittsbezogenen angepassten Koeffizienten wird die Zustandsprognose im PMS für jedes Jahr t des Prognose- und Betrachtungszeitraums wie folgt durchgeführt:

$$z_{i,j,t} = \alpha_{i,j,k} + \beta_{i,j,k} \cdot AL_{i,t} c_{j,k}$$

mit

- $z_{i,j,t}$ geschätzte Zustandsgröße für Abschnitt i und Zustandsmerkmal j im Jahr t,
- $AL_{i,t}$ kumulierte Achsübergänge AL für Abschnitt i im Jahr t,
- $\alpha_{i,j,k}$ angepasster Ausgangszustand (Achsabschnitt) für Abschnitt i, Zustandsgröße j (und verhaltenshomogene Gruppe k),
- $\beta_{i,j,k}$ angepasster Steigungskoeffizient für Abschnitt i, Zustandsgröße j und verhaltenshomogene Gruppe k.
- $c_{j,k}$ katalogisierte Verlaufs-Koeffizienten (Potenzzahlen) für Zustandsgröße j und verhaltenshomogene Gruppe k.

4. Folgerungen für die Praxis

Die katalogisierten Verhaltensfunktionen können unverändert im PMS verwendet und in der Folge auch in die entsprechenden Richtlinien übernommen werden (z. B. RPE Stra-01). Die erforderlichen Bestands- und Verkehrsdaten werden bereits derzeit in PMS-IO vorgehalten. Sowohl im PMS-IO als auch im Optimierungsmodul des PMS sind allerdings noch Umrechnungen bzw. Umformungen erforderlich. Da Zustandsgrößen prognostiziert werden, muss z. B. das Verfahren der Zustandsbewertung in das PMS integriert werden.

Nach dem Ergebnis der entsprechenden Analysen ist mit den abgeleiteten Verhaltensfunktionen die Wahrscheinlichkeit von gravierenden Fehlschätzungen bei der Zustandsprognose relativ gering, aber nicht völlig ausgeschlossen. Größere Fehlschätzungen können vor allem bei ungewöhnlichen Zustandskonstellationen auftreten. Für die Anwendung sollte daher ein begleitender Plausibilitätsalgorithmus installiert werden, der a priori auf Auffälligkeiten im Bestand und/oder Zustand hinweist, z. B. derart, dass bei einer verhältnismäßig langen Liegezeit ein ungewöhnlich guter oder bei einer sehr kurzen Liegezeit ein ungewöhnlich schlechter Zustand ermittelt wurde. Die grundlegenden Erkenntnisse für diesen Plausibilitätsalgorithmus wurden erarbeitet.

Im Hinblick auf Schätzfehler bei praktischen Anwendungen wirkt sich günstig aus, dass die Auswerteabschnitte der ZEB (meist 100 m) i. allg. zu längeren Abschnitten zusammengefasst werden, die als einheitlicher räumlicher Bezug für die Zustandsdaten und alle anderen Daten dienen. Bei ihrer Abgrenzung werden die Zustandsgrößen stets nivelliert, sodass mit den abgeleiteten Verhaltensfunktionen deutlich konsistentere Ergebnisse zu erwarten sind als für ZEB-Auswerteabschnitte. Mit der Darstellung der Verhaltenskennlinien in Abhängigkeit von den kumulierten Achsübergängen besteht die Möglichkeit, den Einfluss sprunghafter Verkehrsveränderungen realistisch abzubilden.

Nachdem die ohnehin nur für die rechten Fahrstreifen verfügbaren Daten der ZEB 1992 ausgesondert werden mussten, standen nur zwei Beobachtungsreihen in einem relativ kurzen Zeitabstand von nur 4 Jahren für Analysezwecke zur Verfügung. Damit konnten z. B. einige Probleme im Zusammenhang mit den Verhaltensfunktionen für die Griffigkeit nicht definitiv geklärt werden. Die Untersuchung sollte daher beim Vorliegen neuer Beobachtungsdaten fortgeführt werden. Die Analysealgorithmen sind entwickelt und einsatzbereit. Im Hinblick auf eine Plausibilitätsprüfung der ZEB-Ergebnisse sollte erwogen werden, einen Teil der vorgenommenen Analysen, z. B. im Rahmen der Dokumentation der ZEB-Kampagnen, standardmäßig durchzuführen.

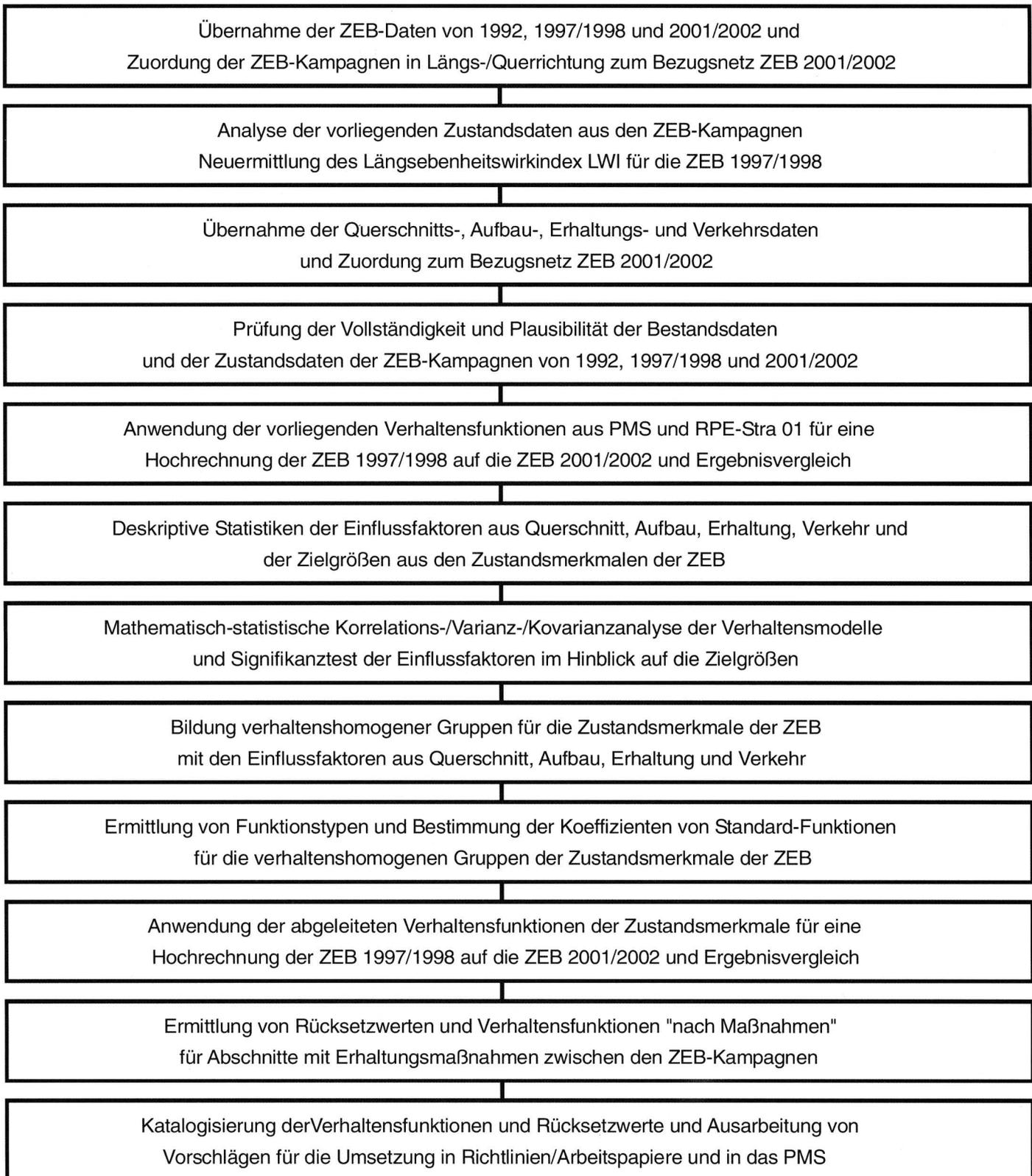


Bild 1: Schematische Darstellung des methodischen Untersuchungsablaufs

