

REALITÄTSNAHE LANGFRISTPROGNOSE UND
ERHALTUNGSSTRATEGIEN VON BUNDESFERNSTRASSEN

BESCHREIBUNG DER METHODIK

Ingenieurbüro ASTRA GmbH, Rennbahnallee 110, 15366 Dahlewitz-Hoppegarten

T. Huber, MBA; Dipl.Ing. St. Klinghammer; Dr. M. Nagel

Zusammenfassung

In diesem Bericht werden die methodischen Grundlagen einer *realitätsnahen Langfristprognose der Straßenerhaltung* vorgestellt.

Planerisch ist die Langfristprognose zwischen der kurzfristigen Maßnahmenreihung eines Pavement-Management-Systems und den globalen Schätzungen der Makroökonomien anzusiedeln. Das hier vorgestellte Instrumentarium ermöglicht dem Planer, *strategische Optionen* zu testen und *diese auf transparente Weise zu vergleichen und zu bewerten*.

Langfristprognose auf Simulationsbasis

Das verwendete Modell trennt die Prognosefunktion in eine *passive (Verbrauch durch den Verkehr)* und eine *aktive (Maßnahmen des Straßenerhalters) Komponente*. Der passive Verbrauch wird durch die *Alterungsfunktionen* beschrieben und *als stochastischer Prozeß simuliert*. Das *Alterungsverhalten des Netzes* kann durch den Erhalter *mittels Maßnahmen indirekt, aber aktiv beeinflusst* werden. Da diese Maßnahmen das Netz verändern, wird sich die Prognose je nach Verhaltensweise (Erhaltungsstrategie) in eine andere Richtung entwickeln. Um diesem dynamischen Verhalten gerecht zu werden, baut die Langfristprognose auf Simulationen mit Einjahreszyklen auf.

Alterungsfunktionen auf Wahrscheinlichkeitsbasis

Die Alterungsfunktionen werden aufgrund der Zustandsmessungen und der kumulativen Verkehrsbelastung seit der letzten relevanten Maßnahme berechnet. Aus den Zustandswerten und der bisherigen Verhaltensweise werden *Ausfalldefinitionen* abgeleitet, welche die möglichen Ursachen für Erhaltungsmaßnahmen zusammenfassen. Diese empirisch ermittelten Ausfalldefinitionen werden auf ihre inhaltliche Relevanz geprüft und anschließend auf das Netz angewendet. Aus der Liegezeit seit der letzten Maßnahme werden mit Hilfe der *Survival-Technologie Wahrscheinlichkeits-Verteilungen für Ausfälle in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung* berechnet.

Die Methodik berücksichtigt die Tatsache, daß die Alterung des Straßenoberbaus nicht nach einem deterministischen Schema, sondern *mit einer erheblichen Zufallskomponente abläuft*, was jedem Betrachter von Streckenbändern der Zustandsmessung auffällt.

Strategien statt Einzelmaßnahmen

Obwohl die Methode kurzfristige Maßnahmenreihungen aufgrund der Zustandsmessung zuläßt, ist der Fokus klar auf *Strategien* ausgerichtet. Je nach Verhaltensweise des Erhalters entwickelt sich das Netz in unterschiedliche Richtungen, so daß am Ende des langen Betrachtungszeitraums die konkreten Einzelmaßnahmen von geringer Bedeutung sind. Maßnahmen werden nach den jeweils betroffenen Schichten und ihrer Funktion gegliedert.

Der *ökonomische Bezug geschieht über die Maßnahmekosten*. Wichtig ist hier ein klares Verständnis der *Kostenmechanik*, welche weitgehend konjunkturunabhängig ist und einen erheblichen *Einfluß auf Losgrößen oder Verstärkungsmaßnahmen* hat.

Jährliche Iterationsschritte

Die *Langfristprognose baut auf Zyklen* von einem Jahr, bestehend aus (1) Ermittlung der Maßnahmefälligkeit, (2) Maßnahmenverteilung und (3) Belastung durch Verkehr *auf*. Von jedem Zyklus werden die wesentlichen Zwischenergebnisse abgespeichert und am Ende der Simulation ausgewertet. Eine derartig feine Betrachtung der Simulationsergebnisse ist notwendig, da Strategien je nach Netz-zustand unterschiedlich effektiv sind und unter Umständen im Verlauf des Prognosehorizontes gewechselt werden müssen.

Restlebensdauer zur Bewertung der Strategien

Als *Vergleichsmaß* wird die *Restlebensdauer* verwendet, welche die mittlere Zeit (in Jahren) angibt, bis wieder eine Maßnahme fällig ist. Die Restlebensdauer ist vergleichbar mit der Lebenserwartung beim Menschen und kann zu jedem Zeitpunkt aus den Survivalkurven ermittelt werden. Im Gegensatz zu abstrakten Teil- oder Gesamtwerten kann sie auch leicht und verständlich kommuniziert werden. In der Netzbetrachtung muß die Verteilung der Restlebensdauer der Einzelabschnitte untersucht werden.

Aufgrund der stets zunehmenden Verkehrsbelastung sinkt die Restlebensdauer kontinuierlich. D.h. die Liegezeiten nach einer Baumaßnahme werden jedes Jahr kürzer. Die *Aufgabe der Erhaltungsstrategie ist es*, diesem *Zerfall entgegenzuwirken*. Eine Strategie gilt als stabilisierend, wenn sie die Restlebensdauer des untersten Viertels aller Abschnitte konstant halten kann. Strategien, welche ähnliche Restlebensverteilungen produzieren, können anschliessend bezüglich ihrer Kosteneffektivität untersucht werden.

Zustandsbezogene Langfristprognose

Die methodische Vorgehensweise der Langfristprognose für Bundesfernstraßen unterscheidet sich erheblich von anderen Prognoseansätzen:

- sie ist langfristig angelegt
- die Alterung der Streckenabschnitte wird durch Wahrscheinlichkeitsmodelle beschrieben, deren Parameter aus den gegenwärtig verfügbaren realen Daten (Zustandswerte, Verkehr, erfolgte Maßnahmen) abgeleitet werden
- sie ist zustandsbezogen, d.h. alle Modellgrößen werden aus dem real vorgefundenen Zustand des Netzes abgeleitet
- die zeitliche Entwicklung wird durch zukünftige Verhaltensweisen (Strategien) bestimmt

PMS

PMS

derterministisches System, geeignet zur kurzfristigen Maßnahmenreihung aufgrund des gegenwärtigen Zustandes
(Berechnung des Folgezustandes)

**zustandsbezogene
Langfristprognose**

zustandsbezogene Langfristprognose
stochastisches System zur Simulation der zukünftigen Entwicklung aufgrund zukünftiger Verhaltensweisen (Strategien)

**ökonomische Prognose
des Mittelbedarfes**

Prognose des Mittelbedarfes
aufgrund vergangener Verhaltensweise; kein Bezug zur Effektivität des Mitteleinsatzes und zum Zustand des Netzes

Ziele der Langfristprognose

Ziel der Langfristprognose ist eine Modellierung der Alterung von vorhandenen Fahrbahnbefestigungen. Parallel zum Alterungsprozeß durch Gebrauch werden Unterhaltungs-, Instandsetzungs-, und Erneuerungsmaßnahmen durchgeführt, die der Alterung entgegenwirken bzw. der Wiederherstellung von gewünschten Zuständen dienen. In die Prognosemodelle gehen also Alterung (chronologische Alterung, Alterung durch Verkehrsbelastung) in Abhängigkeit von Bauweisen und -klassen und weiteren externen Faktoren (z.B. Witterung) und die durchgeführten Maßnahmen ein. Der ökonomische Bezug erfolgt über die Kosten der Maßnahmen.

Für die Qualität der Prognose der Fahrbahnbefestigungen ist wesentlich, daß ein möglichst realitätsnahes Abbild der Straßenerhaltung modelliert wird.

Langfristprognose =

Modellierung der Alterung von vorhandenen Fahrbahnbefestigungen und der Auswirkungen von durchgeführten Massnahmen

Wesentlich ist:

Möglichst realitätsnahes Abbild der Strassenerhaltung

Straßenerhaltung als Abfolge von Maßnahmen

Das nachfolgende Schema zeigt die Straßenerhaltung als eine Abfolge von Maßnahmen zur Sicherung der Substanz und der Gebrauchseigenschaften. In der Abbildung ist dabei die Chronologie von oben nach unten und der Streckenverlauf von links nach rechts dargestellt.

So wurde beispielsweise 1972 die dargestellte Strecke neu gebaut. 1979 wurden Deckschicht (DS) und Binderschicht (BS) an bestimmten Teilabschnitten der Strecke erneuert, ebenso 1982. Allerdings kam hier eine andere Bauweise (Belag: dargestellt durch ein anderes Muster der Schichten) zum Einsatz; ein weiteres Baulos wurde 1989 komplett erneuert usw.

Als Konsequenz dieser Abfolge von Maßnahmen ergibt sich im Laufe der Liegezeit der Straße ein völlig inhomogenes Muster des Aufbaus: die ursprünglich identischen Schichten von 1972 sind kleinen Abschnitten mit unterschiedlichem Aufbau, Alter und damit auch ganz unterschiedlichen Verhaltenseigenschaften gewichen.

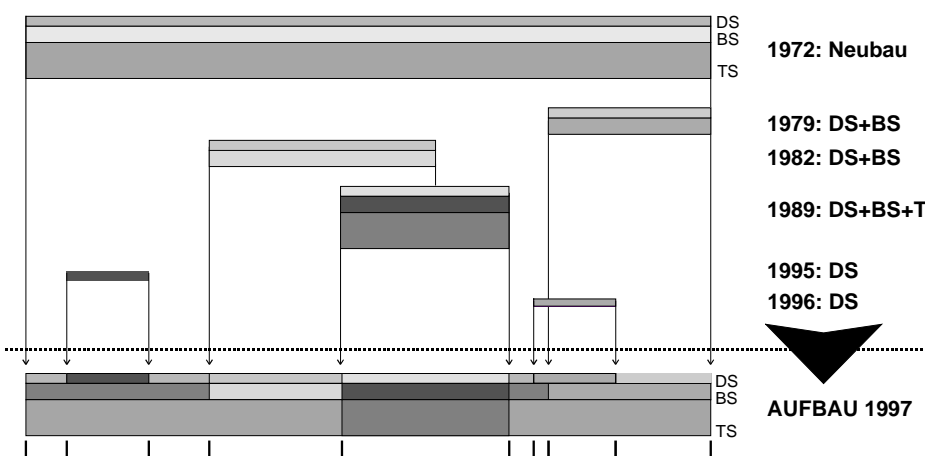
Dieses (vereinfachte) Schema findet man in nahezu allen Streckenbändern wieder. Die Konsequenz davon ist, daß realitätsnahe Prognosemodelle dieser Tatsache Rechnung tragen müssen.

Aus der Abbildung wird weiterhin deutlich, daß eine Erfassung von Schichten immer nur eine Momentaufnahme darstellt, die inzwischen längst von der Realität durch neue Maßnahmen eingeholt sein kann.

Werden jedoch Maßnahmen mit Ort, Art und Kosten dokumentiert, kann daraus jederzeit den Schichtaufbau abgeleitet werden. Umgekehrt ist es nicht möglich, vom Schichtaufbau auf die Erhaltungsgeschichte (d.h. erfolgte Maßnahmen) zu schließen.

Strassenerhaltung =

Abfolge von Massnahmen zur Sicherung der Substanz und Gebrauchseigenschaften



Streckennetze sind stochastische und dynamische Systeme

Ausgehend von einer einheitlichen Bauweise entwickelt sich der Zustand der Abschnitte inhomogen. Bei den Zustandswerten treten erhebliche Streuungen auf.

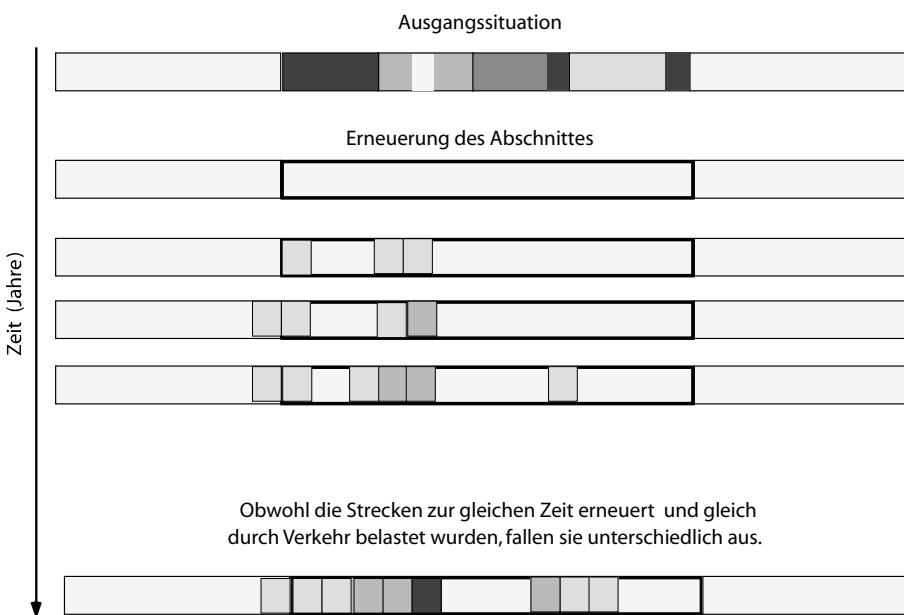
Gründe dafür können sein:

- *unbekannte und daher nicht berücksichtigte Einflußgrößen*
- *Materialfehler*
- ...

D.h. das Streckennetz verhält sich wie ein stochastisches System. Dieser Tatsache muß in den Prognosemodellen Rechnung getragen werden.

Unser Modell der Langfristprognose ist ein Wahrscheinlichkeitsmodell, berücksichtigt damit die Streuungen und ist mit der **Arbeits- und Denkweise einer Versicherung** vergleichbar: Man kann die Risiken einer bestimmten Gruppe sehr präzise vorhersagen, ohne dabei die Zukunft eines einzelnen Individuums prognostizieren zu können.

Streckennetze sind komplexe, stochastische Systeme

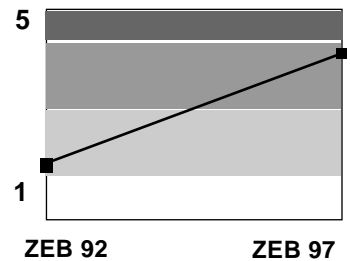


Obwohl zur gleichen Zeit erneuert, fallen einzelne Streckenabschnitte unterschiedlich aus. Diese Ausfälle sind **stochastischer Natur** und lassen sich für den einzelnen Abschnitt nicht sicher, sondern nur mit einer bestimmten **Wahrscheinlichkeit** vorhersagen.

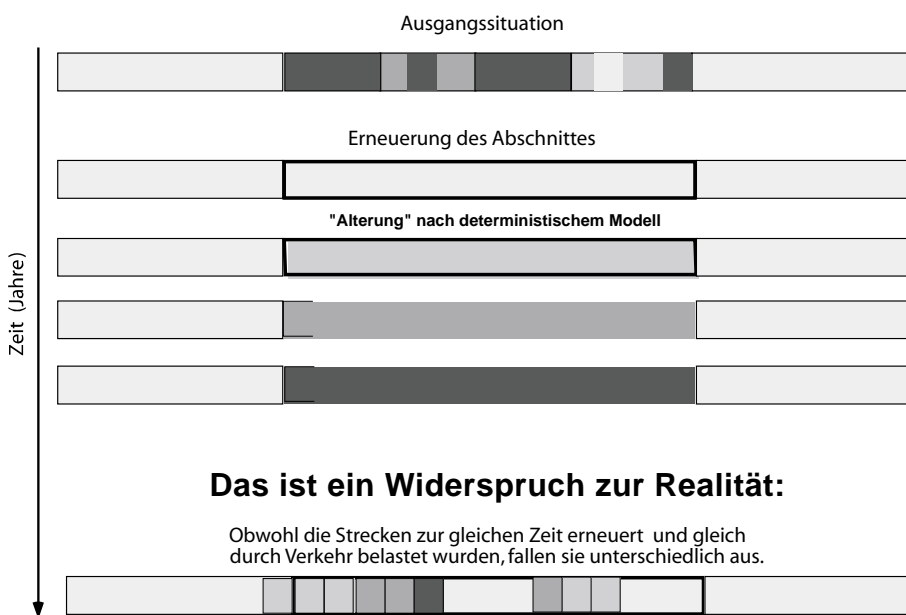
Abstufung der Zustandswerte von hell nach dunkel.

Deterministische Prognosemodelle

Bei deterministischen Ansätzen wird aus den Zustandswerten nach einer zumeist linearen Funktion der Zustand nach einer bestimmten Übergangszeit berechnet. Dieses Modell vermag nicht, die inhomogenen Verteilungen zu erklären.



Deterministisches Prognosemodell



Bei einem **deterministischen Prognosemodell** geht man von einer direkten Vorhersehbarkeit von Zuständen aufgrund vorausgehender Werte aus.

Nach einer Erneuerung müßten nach diesem Modell am Ende einer Zeitperiode alle Abschnitte gleiche Zustandswerte aufweisen.

Abstufung der Zustandswerte von hell nach dunkel.

Iterative Modellierung

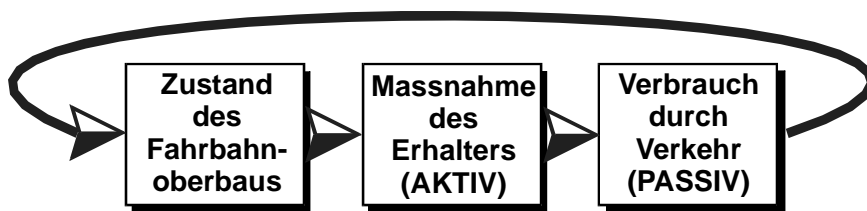
Durch das Modellieren der Komponenten **Alterung / Verbrauch** und der **Maßnahmen** ist es möglich, die Verhaltensweise zu berücksichtigen. Da Alterung und Erhaltung parallel nebeneinander verlaufen ist die Modellierung komplex und daher nur durch Iteration und Simulation möglich:

Der Zustand des Fahrbahnoberbaus wird durch Maßnahmen verändert (verbessert); auf die Fahrbahn wirkt der Verkehr als Verbrauch ein und verändert damit wieder den Zustand des Fahrbahnoberbaus usw.

Dabei kann durch Maßnahmen das System aktiv beeinflusst werden (z.B. durch unterschiedliche Erhaltungsstrategien), während der Verbrauch durch den Verkehr als passive Modellgröße anzusehen ist.

Die Strategien können sich über den Prognosezeitraum ändern, und das System kann sich in unterschiedliche Richtungen entwickeln.

Iterative Modellierung



Strategien bestimmen die Wahl der Maßnahmen; verschiedene Strategien führen zu unterschiedlichen Entwicklungen des dynamischen Systems Streckennetz.

Beschreibung des Fahrbahnzustandes

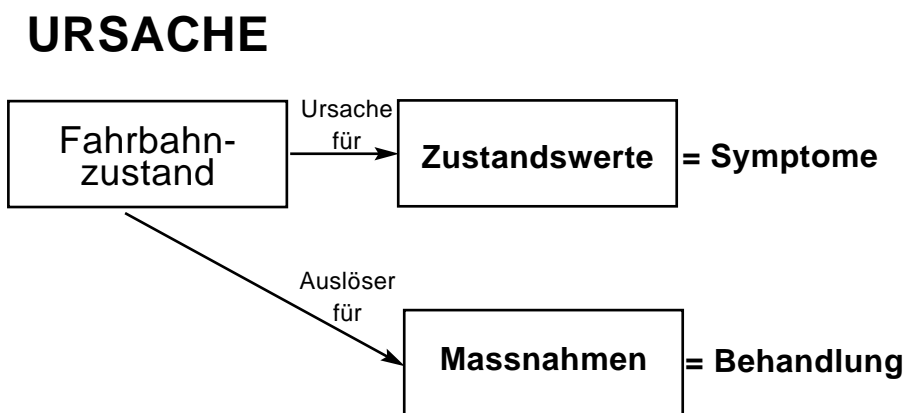
Der Fahrbahnzustand ist die **Ursache** für die Zustandswerte, die wiederum lediglich **Symptome** des Fahrbahnzustandes darstellen.

Symptome werden beobachtet, um Rückschlüsse auf die Ursache zu geben.

Gleichzeitig ist der Fahrbahnzustand Auslöser für Maßnahmen, d.h. die "Behandlung" der Ursache.

Aus dem Schema wird klar, daß eine realitätsnahe Prognose den **Ursachen** begegnen, also am Fahrbahnzustand ansetzen muß, ausgedrückt als **Maßnahmefälligkeit**.

Eine **Vorhersage von Symptomen ist unzweckmäßig**.



Maßnahmefälligkeit

Verknüpfung von Grenzwerten relevanter Zustandsparameter, welche einen Hinweis auf die Notwendigkeit, einen bestimmten Schaden des Strassenoberbaus zu beheben, gibt.

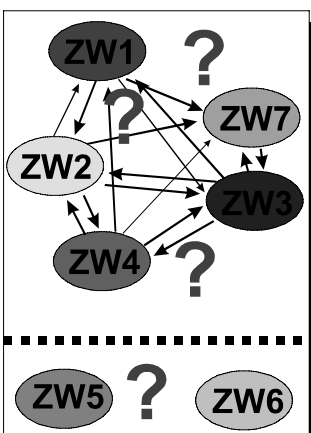
Warum keine Prognose von Zustandswerten?

Die Verwendung der Maßnahmefälligkeit ist von grundlegender Bedeutung für die Langfristprognose, so daß wir diesen Aspekt genauer analysieren wollen. Die Maßnahmefälligkeit hat gegenüber der Vorhersage einzelner Zustandsparameter viele Vorteile, da bei der Bewertung von Streckenabschnitten zahlreiche Einflußgrößen zu berücksichtigen sind.

- Die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Zustandsparametern sind teilweise unbekannt. Das erschwert eine Kombination von Zustandswerten zu einer gemeinsamen Bewertung (u.U. beschreiben verschiedene Zustandswerte ein und denselben Sachverhalt).
- Es stellt sich die Frage, ob alle relevanten Zustandswerte auch wirklich erfaßt werden.
- Die Meßverfahren und Bewertungen der Zustandsparameter werden sich über den langen Zeitraum bei der Langfristprognose ändern, d.h. die Ergebnisse sind **nicht zeitinvariant**. Das hat zur Konsequenz, daß "veraltete" Meßverfahren fortgeschrieben, zumindest aber kalibriert werden müssen.
- Es gibt weitere Einflußgrößen, die nicht gemessen wurden oder unbekannt sind (dargestellt als Kästchen unter der Strichlinie im Schema).
- Es kann vorkommen, daß Zustandsparameter nicht für alle Abschnitte vorliegen.

Alle diese Fälle machen die bisherigen Ansätze angreifbar.

Hinzu kommt, daß eine Entscheidung, ob eine Maßnahme erforderlich ist oder nicht, vom Straßenbauingenieur oftmals auch ohne die Kenntnis aller Zustandsparameter getroffen werden muß, da er aus der Kenntnis der Strecken, deren Erhaltungsgeschichte u.a.m. über das notwendige Expertenwissen verfügt (das allerdings nicht leicht in Regeln zu fassen ist).

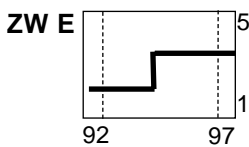
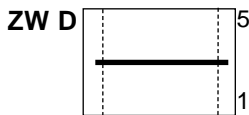
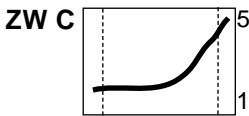
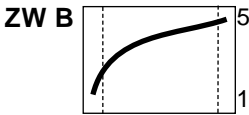
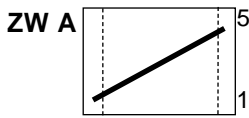


Bewertung von Streckenabschnitten muss zahlreiche Einflussgrößen berücksichtigen

- Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Zustandswerten sind teilweise unbekannt
- Messverfahren und Bewertungen der Zustandswerte können sich ändern
- Es gibt weitere Einflussgrößen, die nicht gemessen wurden oder unbekannt sind (Kästchen unter der Strichlinie)
- Zustandswerte müssen nicht für alle Abschnitte vorliegen

sehr viele und meist unbekannte Wechselwirkungen

Warum keine Prognose von Zustandswerten?



In der Fachliteratur wird die Bedeutung der einzelnen Zustandswerte und der daraus abgeleiteten Gebrauchs- und Substanzwerte unterschiedlich diskutiert.

Hinzu kommt, daß die Streuung auf den einzelnen Kurven sehr hoch ist.

Für eine Bewertung des Zustandes eines Streckennetzes müssen diese einzelnen Kurven gemeinsam betrachtet, gewissermaßen "harmonisiert" und zusammengefaßt werden.

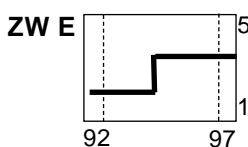
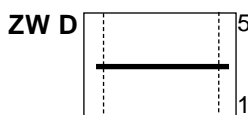
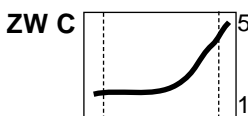
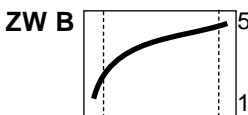
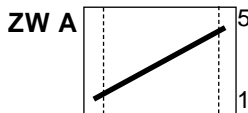
Es stellen sich die Fragen:

*Wie faßt man die Kurven zusammen?
Welches ist die richtige / relevante Kurve?*

Problem 1:

Wie sind unterschiedliche Kurven zu beurteilen?

Prognose



ZW A₂

ZW B₂

ZW C₂

ZW D₂

fehlt

Verwendet man diese Kurven der Zustandswerte als Grundlage für eine Prognose neuer Zustandswerte **ZW X₂**, wird das Problem nicht kleiner:

Man extrapoliert unsichere Angaben.

Problem 2:

Wie prognostiziert man von einer unsicheren Ausgangssituation?

Warum ein neuer Modellansatz für die Langfristprognose?

Gründe, nach alternativen Modellen zu suchen, waren:

- *Es sind die zahlreichen zufälligen Einflüsse im System Straße zu berücksichtigen (d.h. es sind stochastische Modelle nötig).*
- *Die Einflußnahme des Erhalters in Form von Strategien (diese bestimmen Maßnahmen) ist zu berücksichtigen.*
- *Es ist zu beurteilen, inwieweit Schichten in Ordnung sind oder erneuert werden müssen. D.h. es geht primär um die Darstellung von Ursachen und nicht einzelner Zustandswerte oder -größen.*
- *Das Modell sollte nach neuen Erkenntnissen erweiterbar sein und Bestand haben. Es ist nicht ausschließlich an Zustandswerte der Oberfläche gebunden, sondern es können für die Beurteilung eines Ausfalls von Schichten auch Expertisen von Fachleuten oder neue Meßverfahren herangezogen werden.*
- *Das Modell sollte sich an den realen Gegebenheiten in Form von Meß- und Beobachtungswerten zum Netz orientieren. Es muß die Möglichkeit eines Vergleichs mit der Realität bestehen, d.h. man muß in der Lage sein, nachträglich die Modellparameter an reale Situationen anzupassen, um die Güte des Modells bewerten zu können.*

Der gewählte Prognoseansatz unterscheidet sich daher in mehrerlei Hinsicht erheblich von den bisherigen Ansätzen, die bis anhin nur an einzelnen Strecken(abschnitten) getestet wurden:

- *Prognose setzt bei den **Ursachen**, der **Maßnahmefälligkeit**, anstelle bei Symptomen, den Zustandswerten an;*
- *Modell verknüpft **Alterung / Verbrauch** mit **Maßnahmen**, **Steuerung** erfolgt über **Strategien**;*
- *anstelle von Regressionen und Zeitreihen Verwendung von **Survivalkurven** und **Modellen der Zuverlässigkeitstheorie**.*

Maßnahmefälligkeit

Verknüpfung von Grenzwerten relevanter Zustandsparameter, welche einen Hinweis auf die Notwendigkeit, einen bestimmten Schaden des Strassenoberbaus zu beheben, gibt.

Survival Analysis

Statistische Methode zur Analyse von Ausfallwahrscheinlichkeiten für Systeme, welche zum Zeitpunkt der Untersuchung einen kleinen Anteil Ausfälle und einen hohen Anteil Elemente mit noch unbekannter Lebensdauer aufweisen (sog. Zensierte).

Die Survival-Methoden gehören zum Standardinstrumentarium der Zuverlässigkeitstheorie und finden seit Jahrzehnten sowohl in der Technik als auch in der Medizin breite Anwendung.

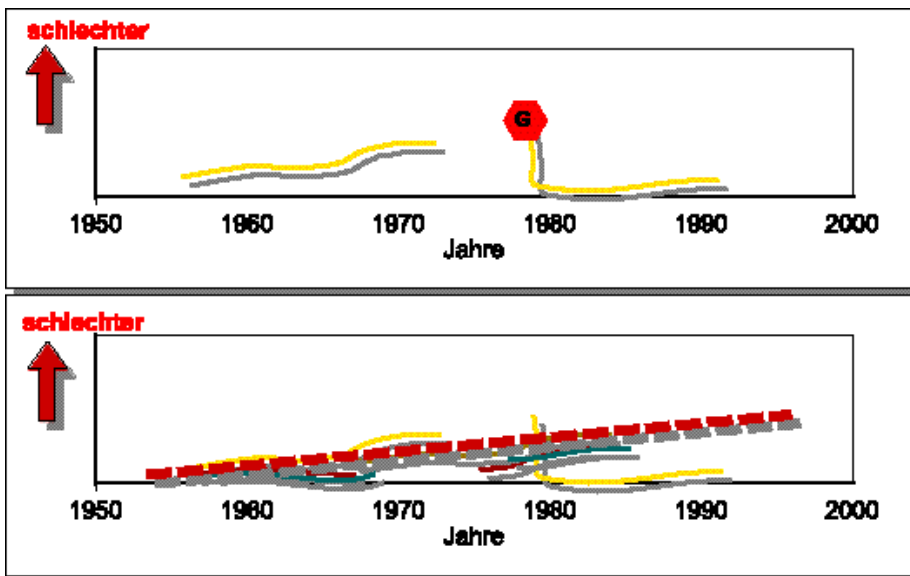
Nachfolgend wird kurz begründet, weshalb die weit verbreiteten Zeitreihen- und Regressionsmodelle in vorliegendem Fall methodisch nicht anwendbar sind.

Zeitreihen

Der klassische und zunächst naheliegenste Ansatz der **Modellierung über Zeitreihen** erfordert für jeden Streckenabschnitt wenigstens 10 bis 12 aufeinanderfolgende Werte, um vernünftige Schätzungen absichern zu können. Bisher liegen jedoch nur die Meßwerte aus zwei Zustandserfassungen vor. Ungeklärt ist bei der Verwendung von Zeitreihen auch, wie man mit der Vielzahl der Trajektorien (je Streckenabschnitt ergibt sich eine Zeitreihe) umgehen soll.

J. P. Klein, M. L. Moeschberger
Survival Analysis
Techniques for Censored
and Truncated Data
New York, 1997

Diggle, P. J. :
Time Series.
Oxford Science Publications,
Oxford, 1989



Ein Streckenabschnitt altert durch den Verbrauch. Dadurch nimmt der in der Zeitreihe - symbolisch dargestellte - Zustandswert schlechtere Werte an. Der Streckenabschnitt wird repariert, für den Zeitraum der Reparatur gibt es keine Zustandswerte. Nach Neu-Inbetriebnahme der Strecke beginnt die Zeitreihe wieder beim Zustandswert 1, um erneut zu altern.

Ähnlich verhalten sich alle Streckenabschnitte. Wie modelliert man sie gemeinsam?

Regressionsmodelle

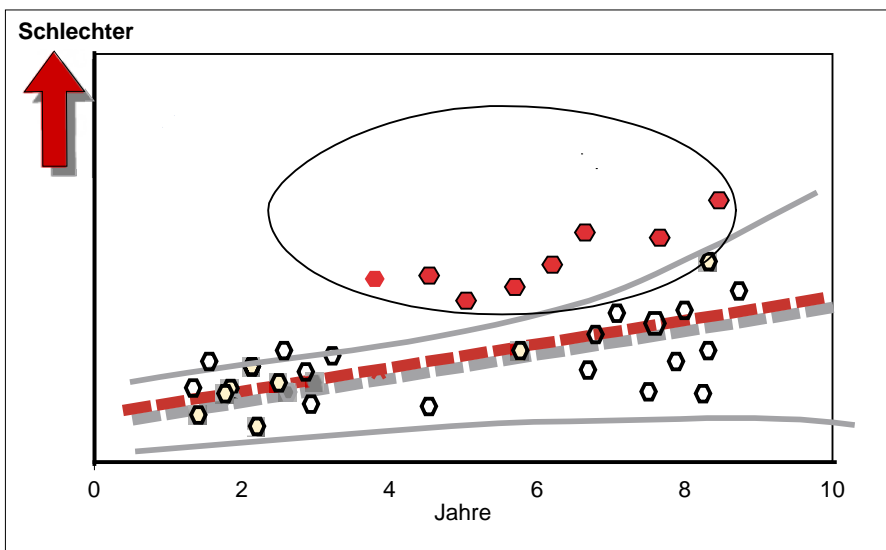
Bei Regressionsmodellen besteht das selbe Problem wie bei Zeitreihen: es stehen **zuwenig Messungen** zur Verfügung. Allerdings sind Regressionsansätze a-priori nicht für Wiederholungen von Meßwerten gedacht.

Weiterhin darf **nicht über den Vorhersagebereich hinaus extrapoliert** werden, denn die Genauigkeit der Schätzung nimmt an den Rändern, also gerade dort, wo man vorhersagen möchte, stark ab. Auch kann bei Extrapolationen der zukünftige Kurvenverlauf beliebig vom bisherigen Modell abweichen. Es sind aus der Fachliteratur genügend Beispiele von solchen mißlungenen Vorhersagen bekannt. Mit den bisher vorliegenden zwei ZEB-Messungen werden lediglich 5 Jahre überdeckt, außerdem fehlen Zwischenwerte für eine zuverlässige Schätzung.

Arbeitet man bei Regressionen mit **indirekten Daten**, d.h. verwendet im Modell Zustandswerte von unterschiedlich alten Streckenabschnitten, umgeht man zwar obige Probleme, handelt sich aber gleichzeitig erhebliche **Selektionseffekte** ein:

*Durch Eingriffe in Form von **Maßnahmen** dominieren einige alte Strecken das Modell. Die Strecken, die den Anstieg der Kurve beeinflussen würden, sind bereits durch die Durchführung von Maßnahmen aus dem Datensatz verschwunden, d.h. die wahre Alterung wird durch die Regressionskurven nicht korrekt wiedergegeben.*

Durch die Einflußnahme durch Maßnahmen entstehen also generelle Probleme bei der Modellierung. Maßnahmen müssen deshalb im Modell Eingang finden und berücksichtigt werden.



Atkinson, A.C.:
Plots, Transformations and Regression. An Introduction to Graphical Methods of Diagnostic Regression Analysis.

Oxford Science Publications,
Oxford, 1985

Schneeweiß, H.: Ökonometrie,
Würzburg, 1971

Die Streckenabschnitte in der Ellipse wurden instandgesetzt/erneuert und gehen daher nicht in die Berechnungen ein. Dagegen gibt es einige alte Strecken, die die resultierende Gerade beeinflussen.

Maßnahmefälligkeit (Nein / Ja) erhöht Präzision der Aussagen

Die Maßnahmefälligkeit stellt - bildlich gesprochen - eine **Diagnose** dar, zu der der Straßenbaufachmann aufgrund seiner Kenntnis der Strecken in der Lage sein muß, ganz gleich, ob und wieviele Zustandsparameter er zur Beurteilung zur Verfügung hat. Die Zustandsparameter sind dagegen nichts anderes als **Symptome** dafür, ob Streckenabschnitte noch zuverlässig funktionieren oder ob bestimmte Maßnahmen, die bis zu einer Erneuerung reichen können, erfolgen müssen. Sie müssen vom Fachmann bewertet werden.

Das **Konzept der Maßnahmefälligkeit erzwingt eine Entscheidung**. Symptome sind von der Sache her unverbindlich, und bei der Multiplikation mit einer Gewichtung (wie es vielfach bei der Kombination von Zustandsparametern erfolgt) werden fachliche Inhalte eher verwischt als präzisiert. Anstelle Symptome zu prognostizieren, wie es bei den bisherigen Ansätzen der Fall ist, wird das Auftreten der Ursachen prognostiziert.

Die Zusammenfassung von unterschiedlichen Symptomen erfolgt bei dem Konzept der Maßnahmefälligkeit durch logische Verknüpfungen. Diese logischen Verknüpfungen lassen auch widersprüchliche Definitionen ("entweder A oder B", wobei A und B durchaus widersprüchlich sein können) oder die Verknüpfung ganz unterschiedlicher Meßmethoden zu.

Wie erfolgt nun die Ableitung der Maßnahmefälligkeit?

Wir verwenden dazu eine datenbasierte Methode, die alle verfügbare Information über die Streckenabschnitte ausnutzt.

Maßnahmefälligkeit (nein / ja) erhöht Präzision der Aussagen

Zustandsparameter

- Symptom
 - unverbindlich
 - nicht zusammenfassbar:
- Ausmultiplikation mit Gewichtung verwischt statt zu präzisieren

Maßnahmefälligkeit

- Ursache
 - erzwingt Entscheidung
 - zusammenfassbar:
- Aggregation durch logische Verknüpfungen läßt auch widersprüchliche Definitionen zu

Datenbasierte Ableitung von Entscheidungsregeln

Zur Ableitung von Entscheidungsregeln für die Maßnahmefälligkeit wenden wir keine deterministischen Verhaltensregeln an sondern nutzen die verfügbaren Informationen zu den einzelnen Streckenabschnitten.

Unter der Annahme, daß Maßnahmen in der Regel zustandsbezogen ausgelöst werden, stellt sich dies wie folgt dar:

Ausgehend von bekannten Zustandswerten zum Zeitpunkt einer Zustandserfassung (ZEB) analysiert man für jeden Streckenabschnitt die danach durchgeführten Maßnahmen. Gleichzeitig werden die letzte Maßnahme vor der ZEB und alle weiteren im Zusammenhang stehenden Informationen berücksichtigt. D.h. die Auswertung der Zustandsbilder jedes Streckenabschnittes führt zu Entscheidungsregeln.

Für die Analyse und Ableitung der Entscheidungsregeln verwenden wir das Verfahren der Classification And Regression Trees (CART), das zu Entscheidungsbäumen führt.

Aus diesen werden die Regeln der Maßnahmefälligkeit abgeleitet und anschließend mit Lehrmeinungen aus der Fachliteratur verglichen, um eine Plausibilität und Sinnfälligkeit sicherzustellen.

STRASSE RTG	V_BKM		N_BKM		Massnahmen und Bauweisen vor ZEB			Zustandserfassung								Massnahmen nach ZEB			
	OS_ART	BW/BKL	Jahr der Massnahme			ZWAUN	ZWEHI	ZWPFR	ZWSPT	ZWSPH	ZVGRI	ZWNRI	ZWFLL	1.Massn.		2.Massn.			
			TS	BS	DS									Schicht	Jahr	Schicht	Jahr		
A 4 H	69.800	69.900	AB	A_1	66	66	66	1.6	1.8	1.0	4.0	5.0	2.1	5.0	5.0	TS	97		
A 4 H	69.900	70.000	AB	A_1	66	66	66	1.0	1.7	1.0	3.6	3.1	2.3	5.0	5.0	TS	97		
A 4 H	70.000	70.100	AB	A_1	66	66	66	1.9	1.6	1.0	3.3	1.7	1.0	5.0	5.0	TS	97		
A 4 H	70.100	70.200	AB	A_1	66	66	66	2.0	2.7	1.0	3.5	2.8	1.9	5.0	4.4	TS	97		
A 4 H	70.200	70.300	AB	A_1	66	66	88	2.5	3.7	1.0	2.3	1.6	1.9	1.0	1.0				
A 4 H	70.300	70.400	AB	A_1	66	66	88	2.0	3.7	1.0	1.9	1.8	2.4	4.4	1.0				
A 4 H	70.400	70.500	AB	A_1	66	66	88	1.0	1.0	1.0	1.7	1.6	2.0	2.4	2.4	BS	97		
A 4 H	70.500	70.600	AB	A_1	66	66	88	1.0	1.0	1.0	1.7	1.5	2.2	5.0	2.0	BS	97		
A 4 H	70.600	70.700	AB	A_1	66	66	88	1.0	1.0	1.0	1.6	1.5	1.6	4.5	2.0	BS	97		
A 4 H	70.700	70.800	AB	A_1	66	66	88	1.0	1.0	1.0	1.7	1.5	1.6	5.0	3.6	BS	97		
A 4 H	70.800	70.900	SMA	A_1	66	89	89	1.0	1.0	1.0	1.8	1.7	1.7	5.0	1.6	BS	97		
A 4 H	70.900	71.000	SMA	A_1	66	89	89	1.0	1.0	1.0	1.9	1.5	2.1	5.0	2.6	BS	97		
A 4 H	71.000	71.100	SMA	A_1	66	89	89	1.0	3.9	1.0	1.9	1.7	2.5	5.0	1.9	BS	97		
A 4 H	71.100	71.200	SMA	A_1	66	89	89	1.0	1.6	1.0	1.6	1.5	2.0	5.0	1.7	BS	97		
A 4 H	71.200	71.300	AB	A_1	66	66	88	1.0	1.0	1.0	2.3	2.3	2.7	5.0	1.7	BS	97		
A 4 H	71.300	71.400	AB	A_1	66	66	88	1.0	1.6	1.0	2.9	2.0	3.3	5.0	2.3	BS	97		
A 4 H	71.400	71.500	AB	A_1	66	66	88	1.6	1.0	1.0	2.7	2.2	3.9	5.0	5.0	DS	94	BS	99
A 4 H	71.500	71.600	AB	A_1	66	66	88	1.0	1.0	1.0	1.5	1.6	3.3	5.0	5.0	DS	94	BS	99
A 4 H	71.600	71.700	AB	A_1	66	66	88	1.8	2.9	1.0	1.0	1.5	3.2	5.0	5.0	DS	94	BS	99
A 4 H	71.700	71.800	AB	A_1	66	66	88	1.0	2.2	1.0	1.0	1.7	2.8	5.0	4.1	DS	94	BS	99
A 4 H	71.800	71.900	AB	A_1	66	66	88	1.0	2.4	1.0	1.9	2.1	3.1	5.0	5.0	DS	94	BS	99
A 4 H	71.900	72.000	AB	A_1	66	66	88	1.0	1.0	1.0	1.6	1.6	3.5	5.0	5.0	DS	94	BS	99
A 4 H	72.000	72.100	AB	A_1	78	78	78	1.9	3.1	1.0	1.8	1.5	2.4	5.0	5.0	DS	94	BS	99
A 4 H	72.100	72.200	AB	ASV	78	78	78	1.0	1.0	1.0	2.3	1.6	1.0	1.0	1.5	DS	99		
A 4 H	72.200	72.300	AB	ASV	78	78	78	1.0	1.0	1.0	1.9	1.9	1.0	1.0	1.8	DS	99		
A 4 H	72.300	72.400	SMA	ASV	78	91	91	1.0	1.0	1.0	1.6	1.6	1.0	1.0	1.6	DS	99		
A 4 H	72.400	72.500	SMA	ASV	78	91	91	1.0	1.0	1.0	1.0	1.6	1.0	1.0	2.3	DS	99		
A 4 H	72.500	72.600	SMA	ASV	78	91	91	1.0	1.6	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	2.9	DS	99		
A 4 H	72.600	72.700	SMA	ASV	78	91	91	1.0	1.0	1.0	2.0	1.6	1.0	1.0	2.6	DS	99		
A 4 H	72.700	72.800	SMA	ASV	78	91	91	1.0	1.0	1.0	2.0	1.6	1.0	1.0	1.6	DS	99		

inadäquate Massnahme

Ableitung von Entscheidungsregeln für Maßnahmen

Statt einer deterministischen Festlegung von Maßnahmeregeln, werden diese empirisch aufgrund der bisherigen Verhaltensweise hergeleitet. Wir gehen zunächst davon aus, daß die ausgeführten Erhaltungsmaßnahmen in der Vergangenheit zustandsbezogen erfolgt sind.

Ziel der Analyse ist eine Verknüpfung zwischen Zustandswerten und den, aufgrund des Zustandes (nicht ausschließlich der Zustandswerte) getroffenen Erhaltungsmaßnahmen herzustellen. Zu diesem Zweck wird eine Datenbank angelegt, welche wesentliche Parameter zur Entscheidungsfindung beinhaltet:

- **Zielgrößen** sind entweder die erste Maßnahme (bei Deckenmaßnahmen) oder die tiefste Maßnahme (zur Berücksichtigung von inadäquaten Maßnahmen) innerhalb eines Zeitraums von fünf Jahren nach der Zustandserfassung.
- **Einflußgrößen** sind Deckschichtart, Bauweise resp. Bauklasse, das Alter der einzelnen Schichten, die Verkehrsbelastung, die Art der zuletzt erfolgten Maßnahme und die Zustandsgrößen resp. Zustandswerte.

Die Zustandsparameter wurden speziell aufbereitet und mit einer Bewertung ob diese "gut" oder "schlecht" sind versehen. Damit kann im Rahmen der Analyse auch festgestellt werden ob als Bedingung für eine bestimmte Maßnahme z.B. keine Netzzrisse vorliegen dürfen. Diese Bewertung erfolgte im Wesentlichen auf Basis der Quartils-Zugehörigkeit (gut= i.A. unterstes Quartil, schlecht= oberstes Quartil). Wenn ein Parameter eine sehr schiefe Verteilung aufweist, wurden die Grenzen entsprechend angepaßt.

Zielgröße: Erste Maßnahme nach ZEB oder tiefste Maßnahme nach ZEB

Einflussgrößen: Letzte Maßnahmen vor ZEB
 Deckschichtart
 Bauklasse / Bauweise
 Alter der Schichten
 Verkehrsbelastung hoch / tief
 Zustandsparameter gut
 Zustandsparameter schlecht

Berechnung von Entscheidungsbäumen

Für die Suche nach Entscheidungsregeln wird **CART** (Classification And Regression Trees), ein Verfahren der Klassifikation verwendet. CART ist eine inzwischen weit verbreitete und in den gängigen Statistik-Systemen implementierte statistische Methode, die unter anderem verwendet wird, um Entscheidungsbäume zu bilden und so den Einfluß einer Vielzahl von Parametern auf eine Zielgröße anschaulich darzustellen.

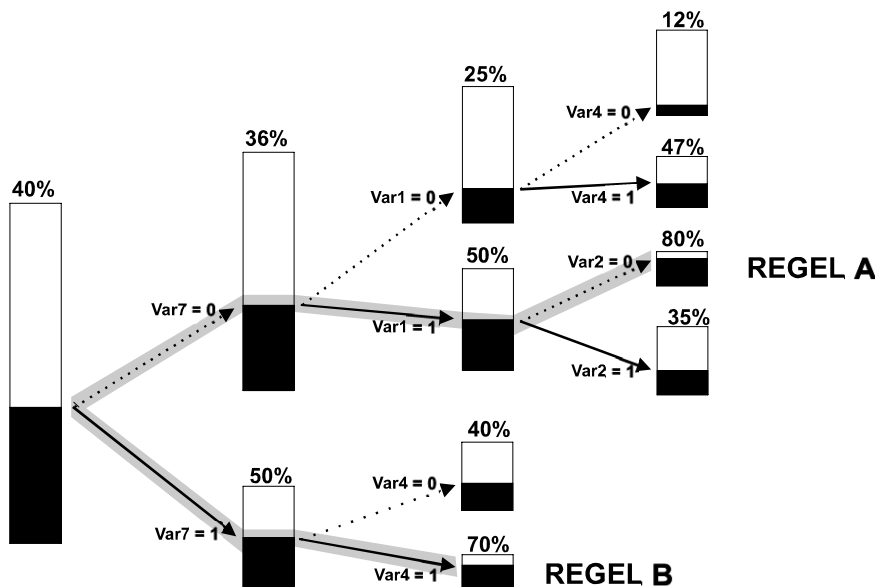
Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J. Classification and Regression Trees (CART), Monterey, Wadsworth, 1984

Die Funktionsweise ist denkbar einfach:

1. Sämtliche Einflußgrößen werden dichotomisiert, d.h. als 1/0 Variablen (= über oder unter einem bestimmten Wert liegend) umcodiert.
2. Die Beobachtungen werden aufgrund einer Einflußvariablen in zwei Teilmengen getrennt und der jeweilige Anteil der Zielgröße untersucht.
3. Die Variable, welche das beste Trennvermögen (Teilmenge mit hohem/niedrigem Anteil) aufweist (aufgrund des P-Wertes), wird als erste Trennvariable verwendet.
4. Anschließend wird jeder Ast mit den verbleibenden Variablen und Beobachtungen weiter aufgesplittet, bis zu einer vorgegebenen Mindestgröße des Beobachtungsumfangs.

Die Methode ist zu diesem Zweck sehr gut geeignet, da sie auch widersprüchliche Definitionen zuläßt, wie im Beispiel unten ersichtlich ist.

Nach Berechnung des Baumes werden die Äste untersucht und auf ihre Übereinstimmung mit der Lehrmeinung geprüft. Unsinnige Äste werden entfernt.



Beispiel eines CART-Entscheidungsbaums

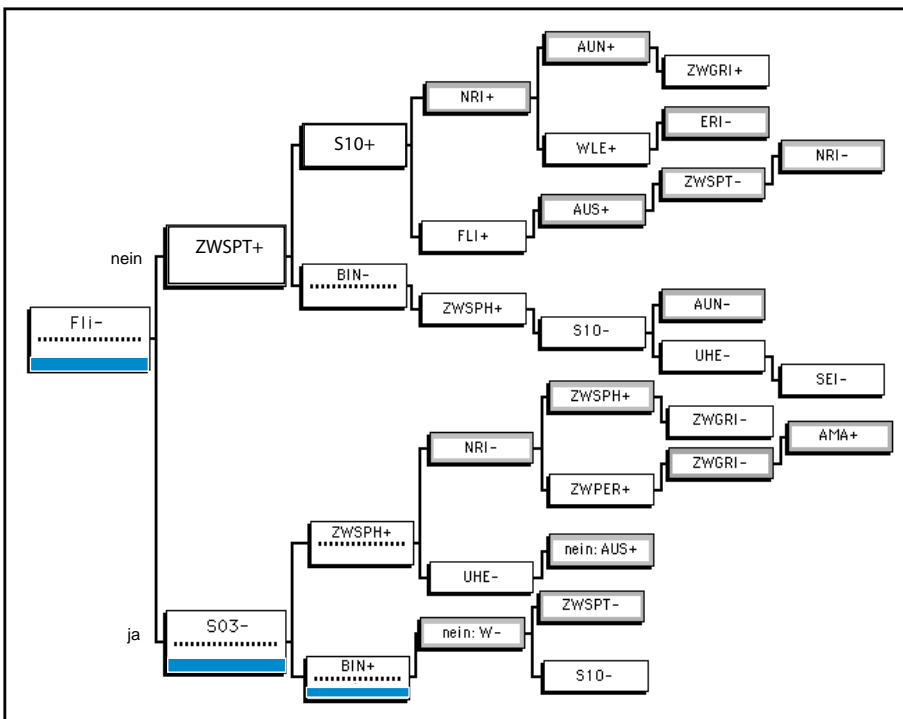
Die Abbildung unten zeigt einen Entscheidungsbaum für die binäre Zielgröße

T_MN:D Tiefste Maßnahme nach ZEB an der Deckschicht,

d.h. es wird untersucht, welche Kombination von Zustandswerten zu einer Erneuerung der Deckschicht und nicht zu einer anderen Maßnahme führen könnte.

Nach entsprechender "Ausdünnung" des Klassifikationsbaumes nach Anzahl der Werte in den Ästen, der Wahrscheinlichkeit und der prozentualen Veränderung ergibt sich für obiges Beispiel der Deckschichtmaßnahmen ein anderer reduzierter (und damit besser lesbarer) Entscheidungsbaum.

Neben der grafischen Darstellung als Entscheidungsbaum erhält man bei diesem Verfahren eine Vielzahl weiterer Angaben z.B. über die Anzahl der Abschnitte in jedem Split, die prozentuale Verbesserung oder Verschlechterung durch Einbeziehung weiterer Variablen usw. Damit wird klar, welche Variablenkombinationen mit welcher Wahrscheinlichkeit zu der gewünschten Zielgröße (d.h. zu der Maßnahme Deckschichterneuerung) führen.



Die am stärksten trennende Variable in unserem Beispiel ist **FLI-**, was (nach der verwendeten, aber hier nicht näher erläuterten Kodierung) keine Flickstellen (unterstes Quartil) bedeutet. Für den unteren Ast trifft dies zu, der obere Ast entspricht **NICHT FLI-**, also geringfügige bis schwerwiegende Flickstellen (größer als das unterste Quartil). Die Daten im unteren Ast mit **FLI-** werden dann durch **S03-**, Wechsel kurzweiliger Unebenheiten, besonders gut getrennt. Für den Bereich **S03-** folgt dann **BIN+**, für den Bereich **NICHT S03-** **ZWSPH+** usw.

Regeln für Maßnahmefälligkeit

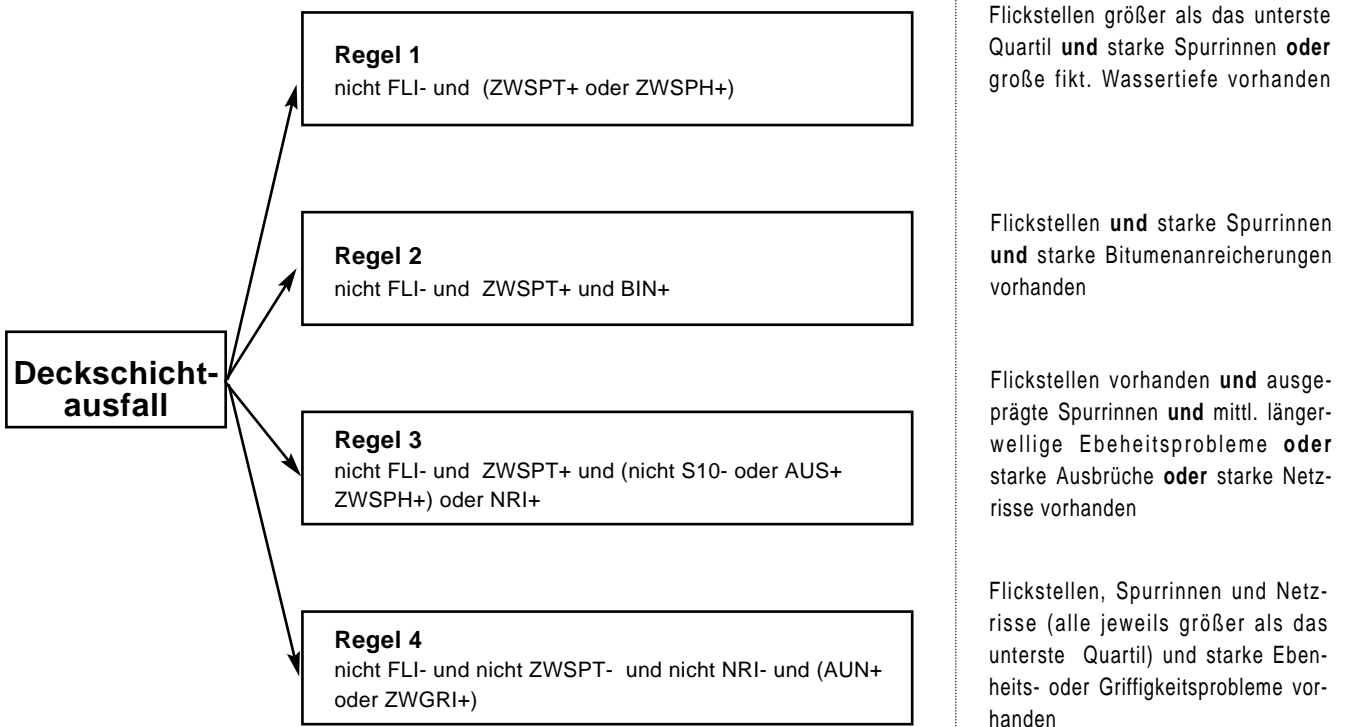
Aus diesem Baum lassen sich Regeln für die Fälligkeit von Deckschichtmaßnahmen (hier bei Bundesstraßen) ableiten.

Die einzelnen Regeln können auf unterschiedliche Ursachen hinweisen und lassen sich gut sachlich interpretieren. Anhand der vorliegenden realen Daten (Zustandsparameter und Verhaltensweisen) lassen sich plausible und interpretierbare Vorschläge für Entscheidungsfindungen generieren, die auf den Erfahrungen der Straßenbaufachleute beruhen. Jede Regel muß jedoch auch kritisch fachlich hinterfragt werden, da einzelne Maßnahmen z.T. auch andere Beweggründe aufweisen können.

Da unterschiedliche Gründe zur Erneuerung einer bestimmten Schicht führen können, müssen die einzelnen Regeln mit einer ODER-Verknüpfung kombiniert werden, wie im Beispiel unten für Deckschichtmaßnahmen.

Die logischen Verknüpfungen mit **UND** und **ODER** weisen, im Gegensatz zu den bisher vorgefundenen multiplikativen Zustandsbewertungen den entscheidenden Vorteil auf, daß sie von einander unabhängig sind und sich nicht gegenseitig aufheben können.

Die Ausfalldefinitionen werden anschließend für jede Schicht auf das Streckennetz angewendet, um eine Bewertung des vorgefundenen Netzzustandes zu erhalten.

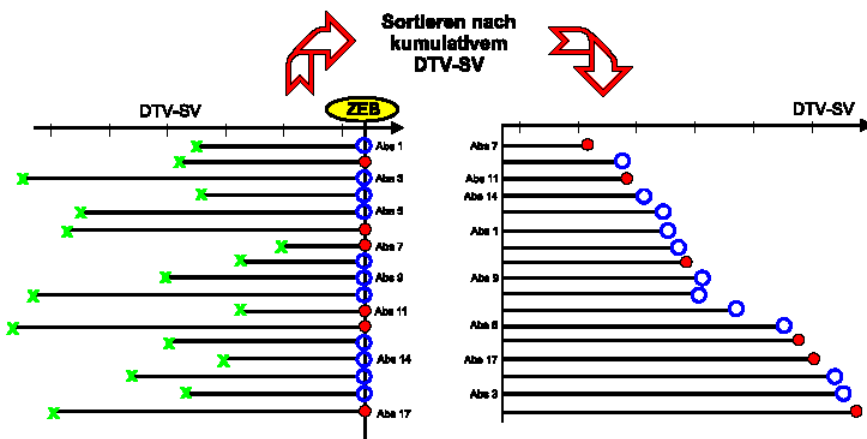


Berechnung der Alterungsfunktionen

Ausgehend von den Ausfalldefinitionen für die einzelnen Schichten wird nun das Alter bzw. die Größenordnung des Verkehrs (kumulierter DTV-SV) jedes einzelnen Streckenabschnittes (100m-Abschnitt) bestimmt, den dieser seit der letzten relevanten Maßnahme erfahren hat. Die einzelnen Streckenabschnitte werden anschließend nach dem Alter, wie in nachstehender Grafik dargestellt, sortiert. Damit erhält man einen Überblick über die Verteilung der Ausfälle nach dem Alter (Verbrauch).

Ist der Abschnitt bisher noch nicht ausgefallen, wird er als zensiert bezeichnet, d.h. der Ausfallzeitpunkt ist unbekannt. Auf dieser Grundlage können die Wahrscheinlichkeiten eines Ausfalls innerhalb einer gegebenen Zeitspanne berechnet werden.

Bestimmung des Alterungsverhaltens



x- Zeitpunkt letzte Maßnahme
 o- noch in Ordnung = Zensiert
 • - Ausfall

Ermittlung der Survivalkurven

Aus der sortierten Liste der Streckenabschnitte kann mit Hilfe der Survival-Technologie die Ausfallwahrscheinlichkeit innerhalb eines bestimmten Zeitraums berechnet werden. Das Ergebnis dieser Berechnung läßt sich sehr anschaulich in sogenannten Survivalkurven darstellen.

Methodisch stellt die Survivalkurve die bestmögliche Beschreibung von Ausfallzeiten einer Gruppe von Streckenabschnitten unter Verwendung aller verfügbarer Informationen dar. Dies, weil berücksichtigt wird, daß eine Strecke, die 20 Jahre ohne Ausfall liegt, bereits 19, 18, ... 1 Jahr ohne Ausfall lag.

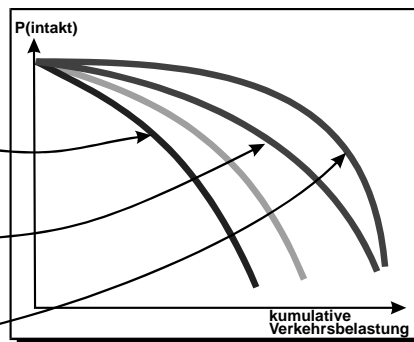
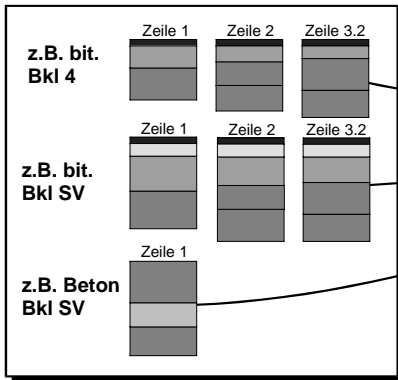
Als unabhängige Variable wird auf der X-Achse anstelle des chronologischen Alters der kumulative DTV-SV verwendet. Es handelt sich hierbei um die Summe der Jahresmittelwerte.

Diese empirischen Kurven können für verschiedene Bauklassen und Bauweisen miteinander verglichen werden, d.h. es ist möglich das Verhalten von Bauweisen und Bauklassen in Abhängigkeit des Verkehrs oder Alters gegeneinander abzuwägen. Im Rahmen der Survival-Methodik gibt es eine Vielzahl von statistischen Tests zur Untersuchung von Unterschieden zwischen den Gruppen und zur Schätzung der Zuverlässigkeit

Verbrauch durch Streckenabschnitte erfolgt durch Verkehrsbelastung

Diese hat unterschiedliche Auswirkungen je nach Bauweise

Streckenabschnitte werden homogenen Gruppen zugeordnet:



Kurven werden aus historischen Massnahmefälligkeiten berechnet. Wahrscheinlichkeiten werden als Survivalkurven dargestellt

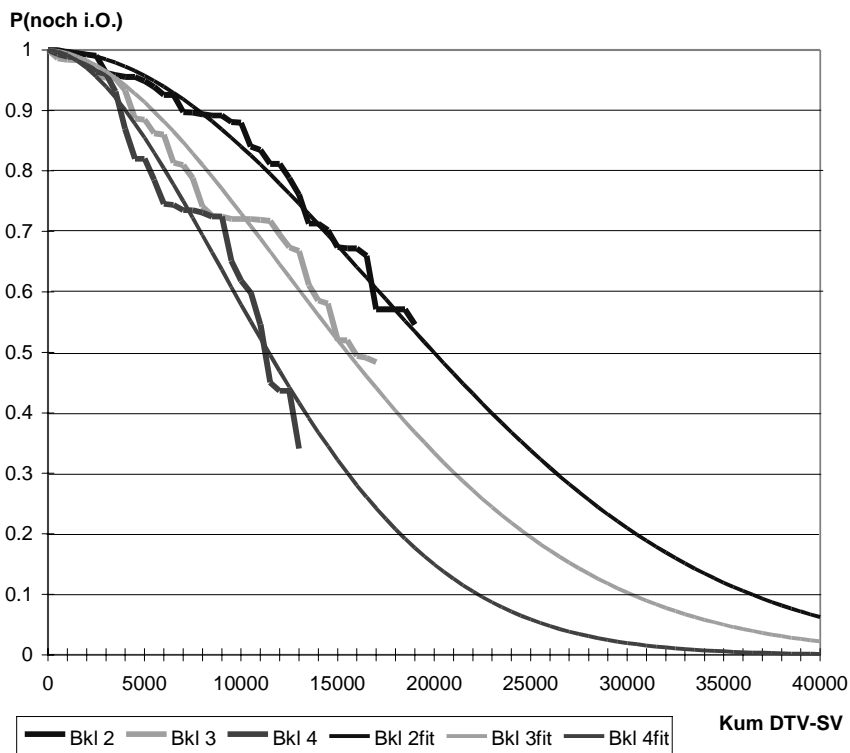
Beispiele empirischer Survivalkurven

Für die Modellierung von Survivaldaten gibt es eine Reihe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die geeignet sind. Die **Weibull-Verteilung** ist dabei am flexibelsten und läßt sich sehr einfach mit zwei Parametern, alpha und beta, beschreiben:

$$P(SV) = \exp(-(SV/\alpha)^\beta)$$

Um zu prüfen, wie gut die empirischen Daten einer **Weibull-Kurve** entsprechen, kann man die Daten und die Weibull-Kurve in einem diagnostischen Plot darstellen, in dem sie auf eine lineare Skala transformiert werden.

Die Abbildung zeigt Beispiele von Survivalkurven für die Deckschicht im Tiefenbau auf Bundesfernstraßen.



Das **Beispiel: Deckschicht Bundesstraßen** zeigt die Möglichkeit des Vergleiches von Bauklassen (die Treppenfunktionen sind die empirischen Kurven, die glatten Kurven die daran angepassten parametrischen Modelle).

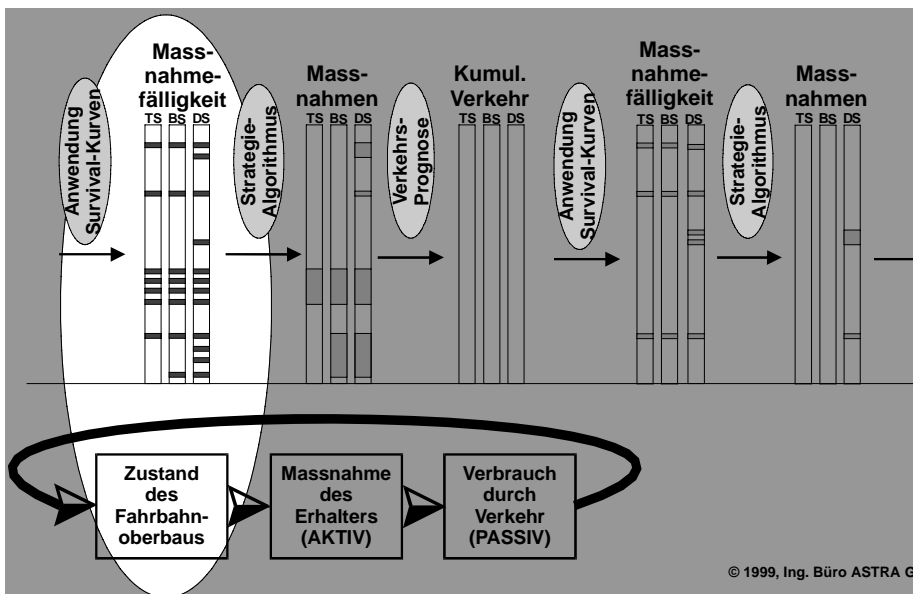
Schema eines Prognosezyklus: Maßnahmefälligkeit

Mit Hilfe des vorher beschriebenen Instrumentariums kann nun im Rahmen der **Simulation** der Fahrbahnzustand beschrieben werden.

Einerseits kann das System direkt aus den ZEB-Daten anhand der Ausfall-Definitionen initialisiert und so z.B. auch für eine kurzfristige Maßnahmenreihung verwendet werden. Auf der anderen Seite können in späteren Prognose-Zyklen mit Hilfe der Ausfall-Wahrscheinlichkeiten zukünftige Maßnahmenfähigkeiten simuliert werden.

Es besteht somit eine weitgehende Parallelität zwischen der kurzfristigen, zustandsbezogenen Maßnahmenreihung und der langfristigen Prognose, welche auf einem, durch Maßnahmen stark veränderten Netz aufsetzt.

Die Maßnahmenfähigkeiten werden für jede Schicht (z.B. Tragschicht, Binderschicht und Deckschicht bei Asphaltbauweisen) gesondert gerechnet. Die Einheit der Berechnung ist der einzelne 100m-Streckenabschnitt. Aufgrund der jeweils anwendbaren Survivalkurve werden die Ausfallwahrscheinlichkeiten bestimmt und in Abhängigkeit davon Ausfälle im Netz verteilt. Dadurch entsteht der "Fleckenteppich" wie er von den Streckenbändern der ZEB her bekannt ist.



Schema eines Prognosezyklus: Maßnahmenfälligkeit
1. Zyklus direkt aus ZEB-Daten möglich, später aus Simulation.

Beispiel einer Ausfallverteilung auf einem Streckenabschnitt

Die Abbildung zeigt ein Streckenband mit den für die Prognose notwendigen Informationen, um die Maßnahmefälligkeit zu ermitteln.

Die erste Zeile enthält Informationen zur Stationierung (Netznoten NKA, NKB, ...).

Die nächste Zeile verdeutlicht homogene Abschnitte im Sinne des Aufbaus und der Bauweise.

Für einzelne Strecken zwischen den Netznoten ergibt sich ein bestimmter DTV/SV.

In der Folgezeile werden Informationen zum Alter der Schichten abgelegt, die sich aus der Aufzeichnung der erfolgten Maßnahmen ergeben.

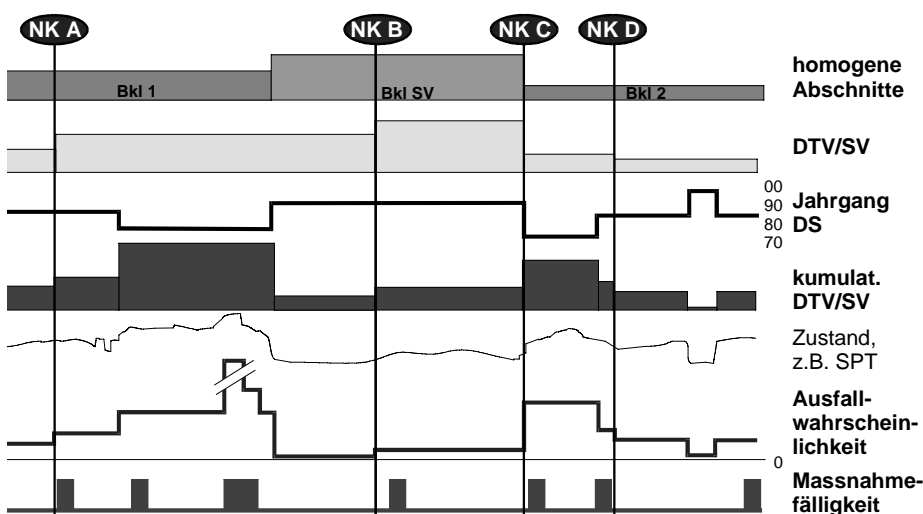
Je nach Alter dieser Schichten erfahren diese einen definierten unterschiedlichen kumulierten Verkehr DTV/SV.

Die Zeile mit dem Zustand der Spurrinntiefe (SPT) hat lediglich informativen Charakter. Es lassen sich im Streckenband selbstverständlich beliebige Zustandswerte oder Informationen darstellen.

Von Bedeutung ist dagegen die nächste Zeile mit den Ausfallwahrscheinlichkeiten je Abschnitt, die aus den Survivalkurven berechnet werden. In dieser Zeile befindet sich auch ein Abschnitt (dargestellt durch //), der bereits im vorherigen Zyklus ausfiel, aber bisher nicht erneuert wurde.

Die Ausfallverteilung ist abhängig von Nachbarschaften, da die Ausfälle nicht gleichverteilt sind. D.h. in der Umgebung von Ausfällen steigt die Wahrscheinlichkeit weiterer Ausfälle an. Das ist bei der Simulation zu berücksichtigen.

In der letzten Zeile wird nun die Maßnahmefälligkeit berechnet.

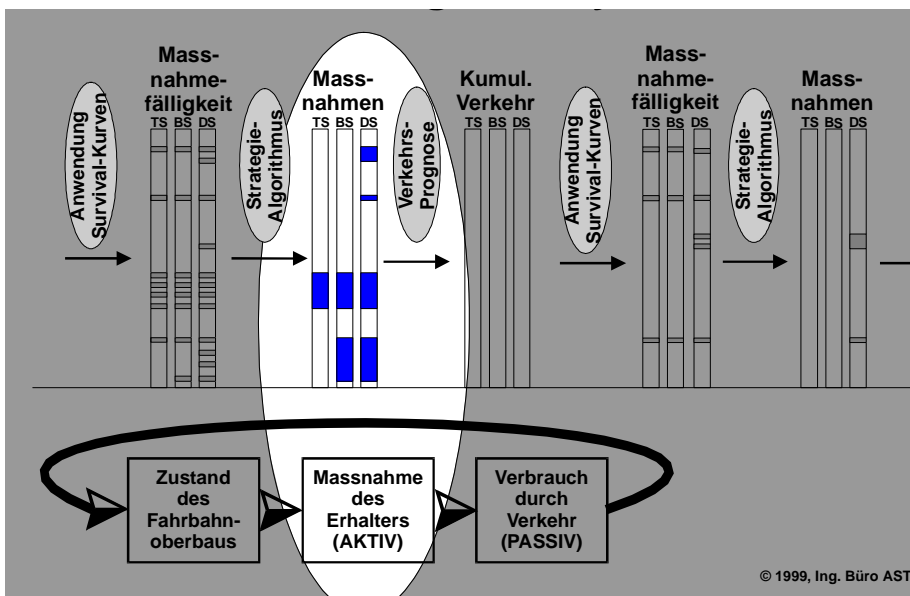


Beispiel einer Ausfallverteilung auf einem Streckenabschnitt

Schema eines Prognosezyklus: Maßnahmen

Nachdem alle Streckenabschnitte ermittelt wurden, bei denen für Schichten Maßnahmen nötig sind, müssen die Maßnahmen auf dem Netz verteilt werden.

Im Blockdiagramm (s. Abbildung unten) ist das der Schritt, bei dem durch unterschiedliche Strategien der Erhaltung aktiv auf das Netz eingewirkt werden kann.



Schema eines Prognosezyklus: Maßnahmen

Maßnahmenverteilung im Netz aufgrund der Ausfälle

Die Abbildung zeigt ein schematisches Netz mit Ausfällen, die als Punkte dargestellt sind. Die markierten rechteckigen Bereiche stellen Maßnahmen auf technologisch begründeten Baulosen dar, bei denen auch intakte Abschnitte überbaut werden müssen.

Stünden unbegrenzte Mittel zur Verfügung und würde durch die Durchführung von Maßnahmen nicht auch den Verkehrsfluß beeinträchtigt werden, würden alle Ausfallstrecken repariert. Da dies aber nicht der Fall ist, muß aus einer Vielzahl von möglichen Maßnahmen ausgewählt werden, wobei diese Auswahl aufgrund von

- Budgetfestlegungen
- Strategien und
- Baulosen

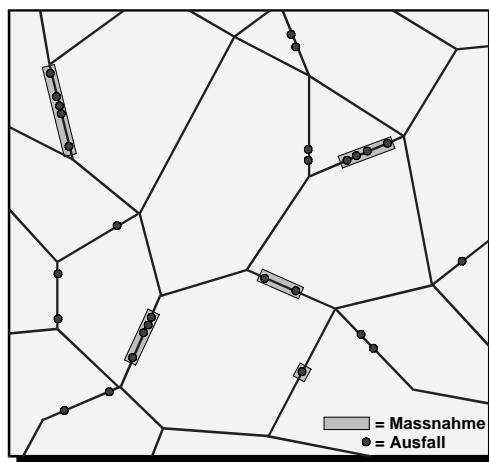
erfolgt.

Für kurzzeitige Entscheidungen (z.B. für die Halbdekade nach der ZEB) sind aufgrund der Ausfälle konkrete Maßnahmenreihungen und damit Vergleiche mit Pavement-Management-Systemen möglich. Mittel- und langfristig fallen jedoch aufgrund der Simulation die Maßnahmefälligkeiten bei jedem Simulationslauf anders an, so daß detaillierte Kartendarstellungen oder Streckenbänder in der Regel wenig sinnvoll sind.

**Massnahmenreihung
mit konkretem
Streckenbezug für
nächste Halbdekade
möglich**

**Massnahmenwahl
erfolgt aufgrund von**

- Budget
- Strategie
- Baulosen



Maßnahmenverteilung im Netz aufgrund der Ausfälle

Langfristprognosen fokussieren auf Strategien

Streckenbezogene (lokalisierte) Zustandsprognosen sind nur auf wenige Jahre hinaus möglich. Danach lassen sich keine konkreten Maßnahmen mehr auf dem Netz anordnen. Diese Tatsache wird sofort beim Betrachten der "Zerfaserung" von Strecken klar. Würde sich das Netz deterministisch verhalten, dürften inhomogene kurze Teilstücke überhaupt nicht vorkommen.

Für Langfristprognosen ist charakteristisch, daß der Schwerpunkt auf der Betrachtung des Netzes und damit auf der Betrachtung der Auswirkungen von unterschiedlichen Strategien liegt. Sie dienen der Budgetplanung und der Strategieentwicklung sowie dem Vergleich von Szenarien ("Was wäre wenn..."). Wegen der vielen Veränderungsmöglichkeiten im laufenden Betrachtungshorizont wäre eine Ausrichtung auf einzelne Maßnahmen realitätsfremd.

Aufgrund der sorgfältig durchdachten Konzeption der Methode, welche auf möglichst hohen Realitätsbezug ausgerichtet ist, kann für kurze Zeiträume jedoch eine detaillierte und ebenso transparente Maßnahmenreihung erstellt werden. Somit wäre es für kurz- und mittelfristige Prognosen nicht erforderlich, das Modell zu wechseln.

Einzelmaßnahmen sind wenig relevant und zu konkret für Langfristprognosen:

Streckenbezogene (lokalisierte) Zustandsprognosen sind nur auf wenige Jahre hinaus möglich, so dass danach keine konkreten Massnahmen angeordnet werden können.

Massnahmen verändern das Abgangverhalten der Streckenabschnitte. Nicht-adäquate Massnahmen sind nicht direkt prognostizierbar.

Langfristprognosen dienen der Budgetplanung und Strategieentwicklung, die nicht auf einzelne Massnahmen ausgerichtet sein können.

Langfristprognosen fokussieren auf Strategien statt auf einzelne Maßnahmen

Strategien

Die Strategien sind Verhaltensweisen, codiert als Regeln, nach denen bestimmte Maßnahmen zur Anwendung kommen.

Sie können über wenige Kontrollgrößen gesteuert werden, z.B. über die Bevorzugung bestimmter Maßnahmen:

- wird beispielsweise der Erneuerung der Vorrang gegeben, werden die Kapazitäten auf bestimmte Schwerpunkte konzentriert (Konzentration).
- Ein Vorrang von kleinen Instandsetzungsmaßnahmen führt dagegen zu einer Dispersion.

Eine sehr wichtige Steuergröße ist die Losgröße:

- große Baulose führen zur Konzentration,
- kleine Baulose zur Dispersion.

Strategien =

Verhaltensweisen, codiert als Regeln für die Anwendung von Massnahmen

Steuerung über wenige Kontrollgrößen:

Priorisierung der Massnahmen

**Vorrang Erneuerung (Konzentration)
Vorrang Instandsetzung (Dispersion)**

Losgrößen

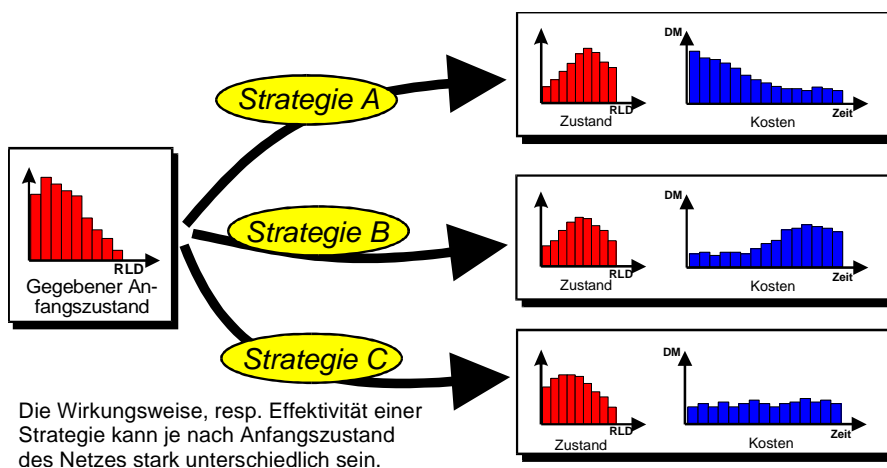
**gross (Konzentration)
klein (Dispersion)**

Strategien führen zu unterschiedlichen Endzuständen des Netzes

Wie sich Strategien oder Mischformen davon auf das Netz auswirken, läßt sich von vornherein nicht sagen. Dazu muß der Iterationsprozeß über den gesamten Prognosezeitraum gerechnet werden, wobei mehrere Simulationen nötig sind.

Es ist durchaus vorstellbar, daß eine Strategie mittelfristig höhere Kosten verursacht, langfristig aber effektiver und kostengünstiger ist.

In den schematischen Darstellungen ist die Verteilung der Zustände anhand der Restlebensdauer (RLD) und die Kostenentwicklung dargestellt. Die Restlebensdauer, welche später noch eingehend erläutert wird, ist der Erwartungswert der noch verbleibenden Jahre bis zum nächsten Ausfall.



Strategien führen zu unterschiedlichen Endzuständen und/ oder Kostenverteilungen

Beispiel einer Strategie

Das Prognosemodell läßt die Modellierung beliebiger Strategieansätze zu. Dabei wird grundsätzlich zwischen zwei Strategietypen unterschieden:

- *Der Budget-limitierte Typ zeichnet die Entwicklung des Netzzustandes im Rahmen der finanziellen Möglichkeiten auf.*
- *Die zustandsorientierte Betrachtung, mit dem Ziel einer Abschätzung der zum Erreichen oder Halten eines bestimmten Qualitätsniveaus benötigten finanziellen Mittel.*

Beide Modelle versuchen ökonomische Baulose zu bilden mit möglichst vielen Ausfällen pro Los. Für die Strategien sind sorgfältig aufgearbeitete Maßnahmekosten unverzichtbar. Bei den Kosten sind die absoluten Beträge weniger wichtig, da diese ohnehin extrem konjunkturabhängig sind. Statt dessen ist ein gutes Verständnis der Kostenmechanik von essentieller Bedeutung. Diese behält ihre Gültigkeit, abgesehen von technologischen Veränderungen, in guten wie auch schlechten Zeiten.

Die Kostenstruktur beeinflusst die Losbildung und auch die Maßnahmenwahl. Wenn sie gut verstanden ist, lassen sich jedoch auch hier, im Rahmen von Simulationen (was ... wenn ...), z.B. Strategien bei Ölpreisschüben bewerten.

Beispiel einer Strategie

Konzentrierter Einsatz der Ressourcen auf wenige Strecken mit Fokus auf Erneuerung und Verstärkung:

1. Priorität: Allokation Erneuerungsmassnahmen:

Mindestens 50% der 100m-Abschnitte eines Bauloses müssen Tragschichtsausfälle aufweisen.

2. Priorität: Allokation Instandsetzungsmassnahmen:

Mindestens 80% der 100m-Abschnitte eines Bauloses müssen Deck- oder Binderschichtsausfälle aufweisen.

Nebenbedingung:

Das Budget beträgt X Mio.DM/Jahr für die erste Halbdekade, Y Mio.DM/Jahr für die zweite und Z Mio. DM/Jahr für die dritte Halbdekade

Schema eines Prognose-Zyklus: Verbrauch durch Verkehr

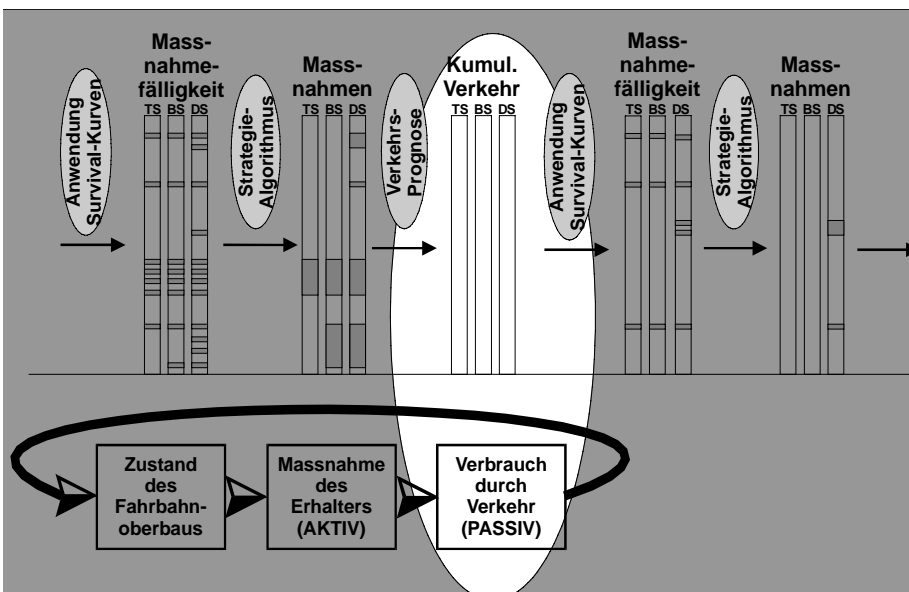
In unserem Blockschema kommt nach erfolgter Verteilung der Maßnahmen im Netz nun der Schritt des Verbrauchs durch den Verkehr.

Der Verkehr ist eine passive Größe, die nicht durch Erhaltungsstrategien beeinflusst werden kann.

Die Verkehrsbelastung durch den Schwerverkehr entstammt der Verkehrsprognose und wird vom Jahr der jeweils relevanten Maßnahme an kumuliert. Damit bewegt sich jeder Streckenabschnitt nach rechts auf der Survivalkurve, was zu einer Verringerung der Überlebenswahrscheinlichkeit (oder, gegenläufig, zu einer Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeit) des jeweiligen Streckenabschnitts führt.

Durch die starke Zunahme des Schwerverkehrs, beschleunigt sich der Verbrauch der Straßen ganz erheblich. Das Ausmaß der im Rahmen der Straßenerhaltung notwendigen Aufholjagd um den Status Quo zu wahren, darf nicht unterschätzt werden.

Wichtig ist, daß die Verkehrsprognose streckenbezogen und nicht über Pauschalfaktoren erfolgt.



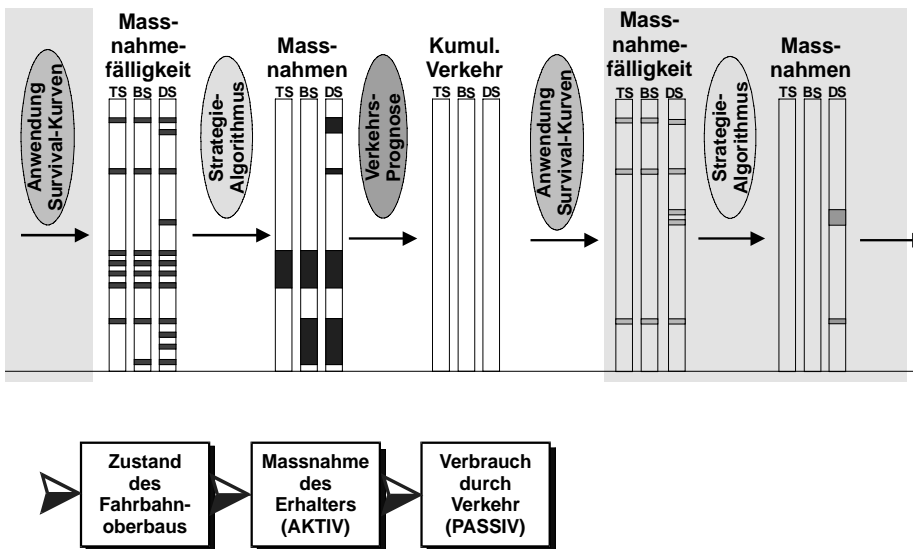
Schema eines Prognose-Zyklus:
Verbrauch durch Verkehr

Schema eines Prognose-Zyklus: Abschluß einer Iteration

Der erste Zyklus ist mit dem Abarbeiten der drei Blöcke abgeschlossen. Das System befindet sich nun eine Zeitperiode später wieder im selben Zustand wie zu Beginn des vorhergehenden Schrittes und ist nun bereit für die nächste Iteration.

Nach Abschluß eines Zyklus werden wichtige Zwischenergebnisse abgespeichert, um sie für spätere Analysen bereitzuhalten.

Insgesamt wird für jedes Jahr des Vorhersagehorizontes ein Iterations-schritt fällig, wobei für die Verteilung von Ausfällen mehrere Simulationen gerechnet werden müssen.



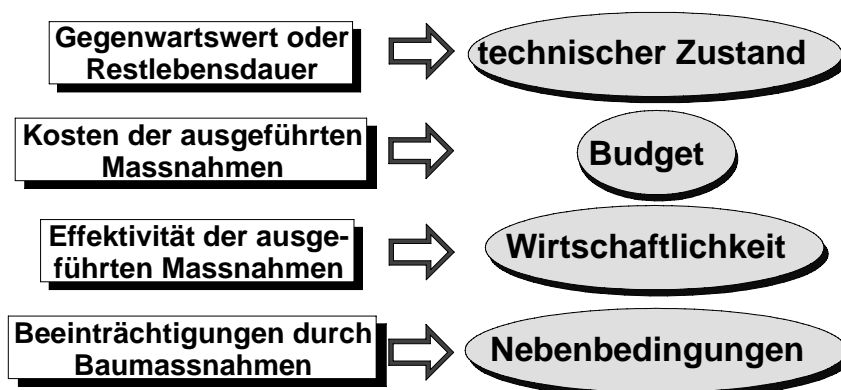
Iterative Modellierung:
Der Kreis schließt sich

Auswertung der Ergebnisse

In jedem einzelnen Iterationsschritt fallen für jeden 100m-Abschnitt viele Daten an, die verwaltet, zusammengefaßt und gemeinsam bewertet werden müssen:

- *Der technische Zustand des Netzes (eines beliebigen Teilnetzes und sogar jedes Abschnittes) läßt sich über die Verteilung der Restlebensdauer, die angibt, welchen Verbrauch (Verkehrsbelastung) das Netz noch verträgt, beschreiben.*
- *Die Kosten der ausgeführten Maßnahmen schaffen den ökonomischen (Budget-) Bezug.*
- *Durch den Vergleich der Kostenentwicklung und der Entwicklung der Restlebensdauer, läßt sich die Effektivität und die Wirtschaftlichkeit von (alternativen) Strategien beurteilen.*
- Nebenbedingungen sind z.B. die Beeinträchtigung des Verkehrs durch Baumaßnahmen, die durch Restriktionen begrenzt werden kann.

Jeder Zyklus liefert eine Flut von Daten, die zusammengefasst und gemeinsam bewertet werden muss



Auswertung der Zwischenergebnisse

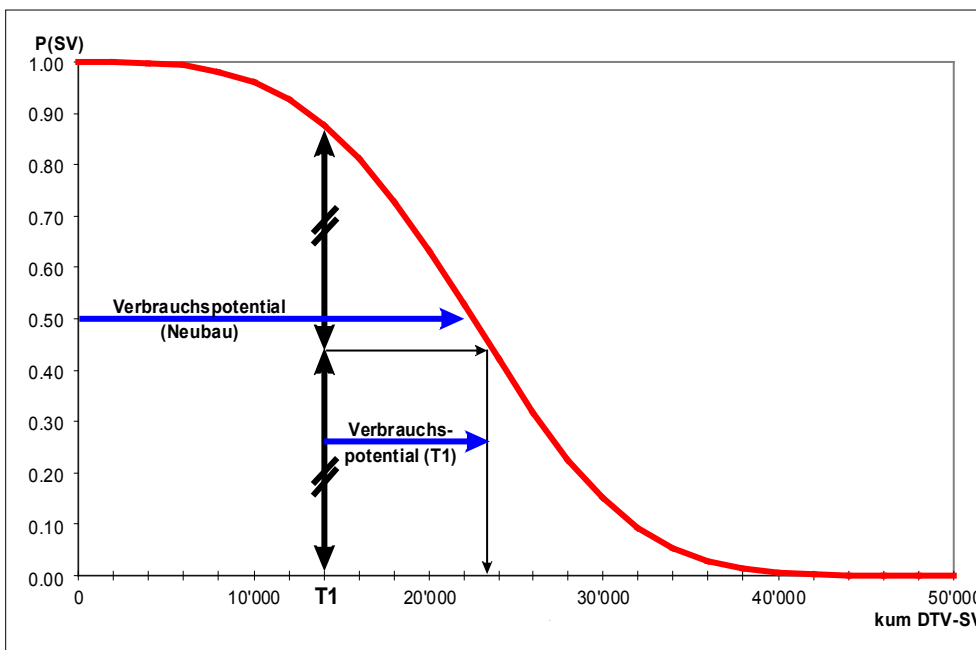
Verbrauchspotential und Restlebensdauer

Im Gegensatz zu anderen Methoden, welche einen abstrakten Teil- oder Gebrauchswert verwenden, um den technischen Zustand des Streckennetzes oder eines Abschnittes zu beschreiben, wird hier das verbleibende Verbrauchspotential eingeführt. Das Verbrauchspotential beschreibt die zu erwartende Verkehrsbelastung, welche eine Strecke noch aushalten dürfte, bis eine Maßnahme fällig wird. Dieses Potential läßt sich direkt aus den Survivalkurven ableiten, welche eine Wahrscheinlichkeit des Ausfalls darstellen.

Das **Verbrauchspotential** gibt an, nach wieviel Schwerverkehrs-Überrollungen (ausgedrückt als DTV/SV) die Hälfte der heute noch "intakten" Abschnitte ausgefallen sein werden. Damit kann zu jedem Zeitpunkt ein Verbrauchspotential berechnet werden (s. Grafik). Dies ist analog der Lebenserwartung beim Menschen oder der Halbwertszeit beim radioaktiven Zerfall.

Die **Restlebensdauer** wird aus dem Vergleich des Verbrauchspotentials mit der zu erwartenden Verkehrsbelastung errechnet und besagt, in wievielen Jahren eine Maßnahme zu erwarten ist. D.h. je höher die Verkehrsbelastung, desto geringer wird die zu erwartende Restlebensdauer sein. □

Diese Betrachtungsweise stellt eine Abweichung von der bisherigen (gemäß RStO) dar, welche von vollbemessenen Strecken mit jeweils konstanten Liegezeiten ausgeht. Die Realität zeigt jedoch, dass Vollbemessenheit nicht immer gegeben und somit ein Instrumentarium erforderlich ist, das auch mit Unterbemessenheit umgehen kann.



Definition des Verbrauchspotentials

Simulationsbeispiele: Strategien mit vorgegebenem Budget

Im Rahmen einer Langfristprognose für Bundesstraßen wurden zusammen mit dem Auftraggeber folgende Strategien erarbeitet:

Bei einem vorgegebenen Budget soll eine Prognose der Erhaltung erstellt werden. Der gegebene Budgetrahmen wurde um einen festen Betrag reduziert, um den Maßnahmen der baulichen Unterhaltung Rechnung zu tragen.

Die Modellrechnungen gehen davon aus, daß im Rahmen der Erhaltung folgende grundlegende Maßnahmearten zur Verfügung stehen:

- *Verstärkung der Bauweise durch Einbringen einer Ausgleichsschicht mit neuer Binder- und Deckschicht im Kombi- oder Hocheinbau.*
- *Ersatz von Deck- und Binderschicht im Tiefeinbau ohne Verstärkung der Bauweise*
- *Erneuerung der Deckschicht im Hoch- oder Tiefeinbau mit neuem Material oder im Remix- oder Repave-Verfahren.*

Es stellte sich heraus, daß im vorliegenden Fall der Ersatz der Tragschicht eher selten war, da praktisch immer auf den bestehenden Straßenkörper im Hocheinbau aufgebaut werden konnte (freie Strecken). Bei Bundesautobahnen sieht die Situation anders aus, da einzelne Fahrspuren nur im Tiefeinbau erneuert werden können.

Die wichtigsten Kenngrößen dieser Strategien sind in nachstehender Tabelle kurz zusammengefaßt:

Strategie	Budget Mio DM	Verstärkung	Focus auf	prozentualer Anteil			Eigenschaften	
				Binderschicht	Deckschicht	davon Remix/Repave	Kosten	Effizienz
SB1	x	keine	Instandsetzung	55 %	45%	25 %	preiswert	gering
SB2	x	JA	Erneuerung	75 %	25 %	5%	preiswert	Stabilisierung über 10 Jahre
SB3	x+10%	JA	Erneuerung	85 %	15 %	5%	> SB1 od. SB2	Stabilisierung über 10 Jahre
SB4	x mit 3% Wachstum	JA	Erneuerung	75%	25%	5%		Stabilisierung des Netzes

Simulationsbeispiele: Strategien mit gegebenen Erhaltungszielen

Im Rahmen dieser Simulationsreihen wird kein Budget vorgegeben, sondern es wird versucht Kosten und Auswirkungen einer bestimmten Vorgehensweise abzuschätzen.

Die Strategien unterscheiden sich in der

- *Aggressivität bezüglich Verstärkung der Bauweise (keine Verstärkung bis Binderschichtmaßnahme, immer mit Verstärkung auf Bauklasse II)*
- *Gründlichkeit beim Beheben der auftretenden Ausfälle (infolge der Loslängen werden natürlich mehr als nur gerade die ausgefallenen Abschnitte erneuert)*

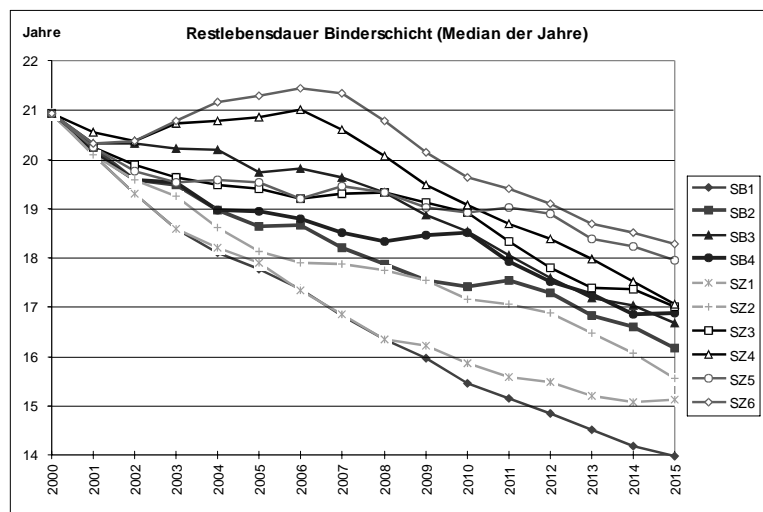
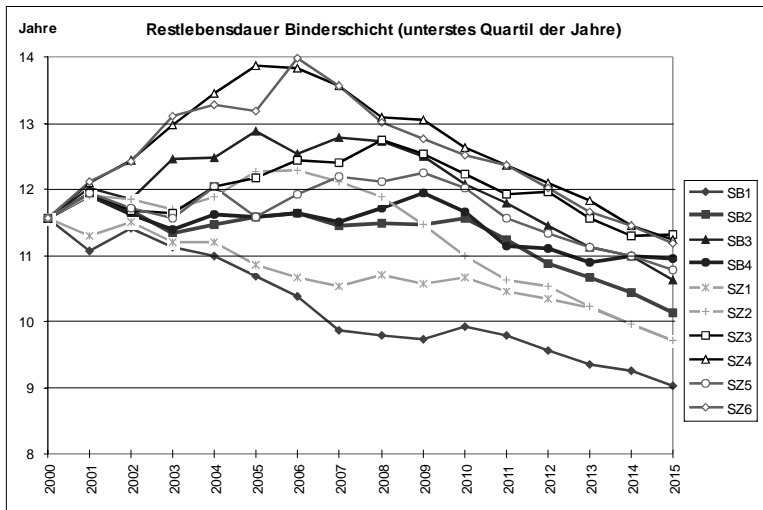
Die wichtigsten Kenngrößen dieser Strategien sind in nachstehender Tabelle kurz zusammengefasst:

Strategie	Verstärkung	Anteil der Ausfälle			Kosten / Effektivität
		Binder-schicht	Deck-schicht	davon Remix/Repave	
SZ1	keine	10 %	10 %	25 %	vergleichbar mit SB1 oder SB2
SZ2	keine	15 %	15 %	25%	> SB1 oder SB2
SZ3	moderat	10 %	10 %	25%	> SB1 od. SB2 Stabilisierung, Verlängerung der RLD DS
SZ4	moderat	15 %	15 %	25 %	aufwendig , mittelfristig Stabilisierung, Verlängerung der RLD DS und BS
SZ5	erheblich	10 %	10 %	5 %	teuer und wenig effektiv
SZ6	erheblich	15 %	15 %	5%	sehr teuer und wenig effektiv

Bewertung der Strategien (Beispiele)

Unterschiedliche Strategien erzeugen unterschiedliche Kosten und sind unterschiedlich effektiv. Ziel der Straßenerhaltung sollte eine langfristige Stabilisierung des technischen Zustandes bei möglichst geringen Kosten sein. Die absolute Höhe der Restlebensdauer ist weniger wichtig als die Stabilisierung des Netzes, was mit nicht zu unterschätzendem Aufwand verbunden ist, da die zunehmende Verkehrsbelastung die Lebensdauer der Baumaßnahmen erheblich verkürzt: So kann eine Maßnahme, welche vor wenigen Jahren noch über 20 Jahre Restlebensdauer erbrachte, in fünf Jahren nur noch 12 Jahre Restlebensdauer erbringen.

Aus diesem Grund ist es wichtig die Verteilung der Restlebensdauer über die Zeit zu untersuchen. Dazu verwenden wir die 1. Quartilsgrenze und den Median aller Abschnitte des betrachteten Netzes. Gelingt es einer Strategie das Restleben des untersten Viertels aller Abschnitte konstant zu halten, bezeichnen wir sie als stabil. Gleichzeitig sollte auch der Median der Restlebensdauer beobachtet werden, um den "Druck" von oben (den weniger stark belasteten Strecken) zu verfolgen.



Wirtschaftlichkeit der Strategien

Strategien, welche am Ende des Prognosehorizontes ähnliche Verteilungen der Restlebensdauer aufweisen, müssen auf ihre relative Effektivität untersucht werden. Dazu müssen die jeweiligen Kostenentwicklungen herangezogen werden. Je nach Verhaltensweise sind erhebliche Unterschiede möglich.

Die Kosten werden kumulativ aufgezeichnet. Um den Zeitwert des Geldes zu berücksichtigen, werden die Nominalbeträge mit dem Leitzinssatz diskontiert.

Vielfach reicht eine einfache Betrachtung des Endwertes nicht aus: Eine Strategie, welche am Ende des Prognose-Horizontes unwirtschaftlich erscheint, kann zu einem Zwischenzeitpunkt sehr günstig ausfallen, müßte dann jedoch von einer anderen abgelöst werden, welche eine wirtschaftlichere Erhaltung des durch die erste Strategie veränderten Netzes ermöglicht.

