

Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit zur Bewertung des Tausalzverbrauchs

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 18

bast

Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit zur Bewertung des Tausalzverbrauchs

von

Jürgen Breitenstein

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 18

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A – Allgemeines
- B – Brücken- und Ingenieurbau
- F – Fahrzeugtechnik
- M – Mensch und Sicherheit
- S – Straßenbau
- V – Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, daß die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Am Alten Hafen 113–115, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 4 60 93–95, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BASt-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 85605:
Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit (Winterstrenge) zur Bewertung des Tausalzverbrauchs

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon (0 22 04) 43-0
Telefax (0 22 04) 43-8 32

Redaktion:

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon (04 71) 4 60 93–95
Telefax (04 71) 4 27 65

ISSN 0943-9331

ISBN 3-89429-603-8

Bergisch Gladbach, März 1995

Kurzfassung · Abstract · Résumé

Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit zur Bewertung des Tausalzverbrauchs

Der Verbrauch von Tausalz ist stark vom Wetter abhängig. Die unterschiedliche Ausprägung des Winterwetters in den einzelnen Jahren erschwert die vergleichende Bewertung der Aufwendungen für den Winterdienst. In den letzten Jahren sind vielfältige Anstrengungen unternommen worden, den Tausalzverbrauch zu reduzieren. Die Frage nach dem Greifen solcher Maßnahmen kann ebenso wie die am Ende einer Winterdienstperiode aus dem politischen Raum gestellte Frage, ob mit dem Tausalz auch sparsam, d. h. umweltschonend umgegangen wurde, nur dann zufriedenstellend beantwortet werden, wenn es gelingt, den tatsächlichen Tausalzverbrauch durch Gegenüberstellung mit einem der Charakteristik des einzelnen Winters entsprechenden hypothetischen Tausalzbedarf vergleich- und damit beurteilbar zu machen.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr werden Modelle entwickelt, mit denen ausschließlich mit Hilfe einfach verfügbarer meteorologischer Parameter, die vom Deutschen Wetterdienst regelmäßig veröffentlicht werden, eine Schätzung des Tausalzbedarfs in Abhängigkeit von der Winterstrenge vorgenommen werden kann.

Das Verfahren basiert auf der Hypothese, daß für einen zurückliegenden Zeitraum eine Beziehung zwischen Winterwetter und Tausalzverbrauch gefunden werden und dann zur Beurteilung der Bemühungen um einen sparsamen Tausalzverbrauch herangezogen werden kann.

Für die Fläche der Bundesrepublik (alte Bundesländer) werden die Daten von 10 repräsentativen Klimastationen zur Ermittlung des witterungsabhängigen Tausalzbedarfs verwendet: die mittlere Lufttemperatur in °C, die Niederschlagshöhe in mm, die Zahl der Frost- und Eistage sowie die Zahl der Schneefall- und Schneedeckentage. Diese Daten werden für die Monate des Winterhalbjahres (Oktober–März) für jede Station zunächst zu einem Stations-Mittelwert zusammengefaßt bzw. summiert und anschließend daraus ein Gesamtmittelwert aus den Einzelwerten der 10 Stationen gebildet. Für diese Größen wird in einfachen bzw. multivariaten Ansätzen ihr Einfluß auf den Tausalzverbrauch bestimmt.

Für den Zeitraum Winter 1968/69 bis Winter 1980/81, in dem sich der Winterdienst ausschließlich an

den Witterungsbedingungen orientierte, ergeben sich sehr gute Korrelationen zwischen dem Tausalzverbrauch und den Wetterdaten. Den engsten Zusammenhang zeigen Ansätze, in denen die Zahl der Schneefall- und Schneedeckentage als unabhängige Variable vorkommen.

Für die letzten Jahre (Zeitraum ab Winter 1981/82) läßt sich aus der Gegenüberstellung von witterungsbedingt hypothetischem und tatsächlichem Tausalzverbrauch eine mittlere Einsparung von etwa 25–30 % angeben.

Definition of a parameter for describing winter rigidity-assessment of de-icing salt consumption

The consumption of de-icing salt is determined by the weather. As the winter weather varies from one year to another, it is difficult to compare the quantities of de-icing salt used. In recent years, great efforts have been made to reduce the saltconsumption. In order to assess the efficiency of these measures and to answer the question frequently asked by politicians at the end of a winter service period whether the salt usage had been economical and thus environmentally friendly, it is necessary to draw a comparison between the actual saltconsumption and the hypothetical demand for salt, estimated on the basis of the characteristics of each individual winter.

On request of the Federal Ministry of Transport, hypothesis models have been developed in order to estimate the demand for de-icing salt as a function of the winter rigidity, using only easily available parameters regularly published by the Deutscher Wetterdienst (German meteorological Institute).

The method starts from the hypothesis that the relationship between winter weather and saltconsumption established for past years can be used as a basis for assessing the efforts aiming at an economical saltconsumption.

Ten weather stations representing the area of the Federal Republic of Germany, were selected to verify the modelling of the weather-dependent demand for de-icing salt. The data they supply are: the air temperature in °C, the precipitation rate in mm, the number of days with frost conditions and of those with icy conditions, the number of days with snowfall and of those with snow cover. For the basic winter period (October to March), these data are summed up to an average value for each

weather station. These ten values are then added up to one global average value representing the conditions of the FRG. The influence of these values on the saltconsumption is determined using bivariate and multivariate regression analysis.

For the time period between winter 1968/69 and winter 1980/81, where the winter service was exclusively relying on the weather conditions, the correlations between saltconsumption and weather data were found to be very good. The closest correlations are revealed by the models defining days with snowfall and snow cover as independent variables.

For recent years (since winter 1981/82), the comparison between the weather-dependent hypothetical demand for salt and the actual saltconsumption has shown reductions of about 25–30 %.

Développement d'un indice pour la rigueur d'hiver en vue de l'évaluation de la consommation de sel antigel

La consommation de sel antigel est fortement dépendante du temps. L'évaluation comparative des quantités de sel utilisées en service d'hiver est rendue difficile par les variations du temps d'hiver d'une année à l'autre. Au cours des dernières années, de nombreux efforts ont été entrepris afin de réduire la consommation du sel antigel. A la question concernant l'efficacité de ces mesures s'ajoute la question posée toujours dans les milieux politiques à la fin d'une période d'hiver de savoir si l'usage du sel antigel avait été économique, et par là a ménagé l'environnement. Ces questions ne peuvent trouver des réponses satisfaisantes que s'il est possible de rendre comparable et évaluable la consommation effective de sel antigel et le besoin hypothétique en sel antigel calculé en fonction des caractéristiques de chaque hiver individuel.

Sur l'ordre du Ministère Fédéral du Transport, des modèles ont été développés qui permettent d'estimer le besoin en sel antigel en fonction de la rigueur de l'hiver, uniquement sur la base de paramètres météorologiques facilement disponibles et publiés régulièrement par le Deutscher Wetterdienst (Service météorologique allemand).

La méthode s'appuie sur l'hypothèse d'après laquelle un rapport entre le temps d'hiver et la consommation de sel antigel établi pour une période de temps passée peut servir de base pour l'évaluation des efforts de réduire l'usage du sel antigel.

Pour le territoire de la République fédérale d'Allemagne, 10 stations météorologiques représentatives fournissent des données à base desquelles le besoin en sel antigel en fonction du temps d'hiver est déterminé. Ces données sont notamment: la température atmosphérique moyenne en °C, l'hauteur des précipitations en mm, le nombre des jours de gel et des jours de verglas ainsi que le nombre des jours à chute de neige et des jours à couche de neige. Dans un premier pas, les données d'un semestre d'hiver (octobre à mars) sont accumulées à une valeur moyenne pour chaque station météorologique, et ensuite, une valeur moyenne globale est établie sur la base de ces 10 valeurs individuelles. Finalement, l'influence de ces valeurs sur la consommation du sel antigel est déterminée à l'aide d'analyses de régression à deux ou à plusieurs variables.

Entre l'hiver 1968/69 et l'hiver 1980/81, le service hivernal n'était déterminé qu'à partir des conditions météorologiques, et pour cette période, les corrélations entre la consommation de sel antigel et les données météorologiques sont bonnes. La connexion est la plus étroite quand les approches définissent les jours à chute de neige et les jours à couche de neige comme variables indépendantes.

Une comparaison entre le besoin hypothétique estimé sur la base des conditions météorologiques et la consommation réelle de sel antigel pour les dernières années (depuis l'hiver 1981/82) révèle des réductions d'environ 25 à 30 %.

Inhalt

1	Einführung und Anlaß	7
2	Problemstellung, Ziel, Nutzen.	7
3	Stand der Kenntnisse	8
4	Material und Methoden	11
4.1	Allgemeines	11
4.2	Verfahren.	12
4.3	Datengrundlage	14
4.3.1	Daten des Streusalzverbrauchs	14
4.3.2	Meteorologische Daten	14
5	Ergebnisse.	15
5.1	Ansätze mit einer Einflußgröße.	17
5.2	Multivariate Ansätze	18
5.3	Ausgewählte Modelle	19
6	Auswertung und Diskussion	23
6.1	Diskussion der Ergebnisse.	23
6.2	Nutzenbetrachtung	26
6.3	Anregungen für das weitere Vorgehen.	27

Literatur

1 Einführung und Anlaß

Der Versuch, Zeitreihen des Winterdienstes zu bewerten und zu vergleichen, scheitert immer wieder daran, daß die Kosten des Winterdienstes und die Menge der eingesetzten Ressourcen in starkem Maße von der winterlichen Witterung abhängen. Auf der anderen Seite werden vor allen Dingen aus Gründen des Umweltschutzes und zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Wirksamkeit des Winterdienstes ständig technologische Verbesserungen vorgenommen, die eine Reduzierung der benötigten Taustoffmengen ermöglichen.

Zunehmendes Umweltbewußtsein der Bevölkerung und eine entsprechende Sensibilisierung der Politik führen darüber hinaus am Ende der Winterdienstperiode immer wieder zu der Frage, ob mit dem Tausalz sparsam, d. h. umweltschonend, umgegangen worden ist. Auch diese Frage kann bislang nicht befriedigend beantwortet werden, da ein strengerer Winter zwangsläufig trotz aller Anstrengungen der Betriebsdienste zu einem gegenüber dem Vorjahr erhöhten Streustoffeinsatz führt.

Dementsprechend kann der Nachweis über die tatsächliche Verminderung der Tausalzmengen bisher nicht geführt werden, da die Intensität der Winterperioden sowohl zeitlich als auch regional unterschiedlich ist.

Um diesen Nachweis zu führen, d. h. um eine an den jeweiligen Winter angepaßte Aussage über die Höhe des Tausalzverbrauchs treffen zu können, müssen Bezugsgrößen gefunden werden, für die eine ausreichende Korrelation zu den meteorologischen Voraussetzungen für die Bildung von Fahrbahnglätte besteht.

Der Bundesverkehrsminister hat daher die Bundesanstalt für Straßenwesen beauftragt, eine Bezugsgröße zu entwickeln, die in der Lage ist, die Strenge eines Winters zu beschreiben und so eine Relativierung der eingesetzten Streustoffmenge ermöglicht¹. Dabei sollte insbesondere Wert darauf gelegt werden, daß die Bezugsgröße einfach und ohne größeren zusätzlichen Erhebungsaufwand zu ermitteln und rechtzeitig verfügbar ist.

2 Problemstellung, Ziel, Nutzen

Hohes Verkehrsaufkommen und die Bedeutung des Gütertransportes für die Wirtschaft stellen groÙe Anforderungen an die Verfügbarkeit und sichere

Befahrbarkeit der Verkehrswege auch bei winterlichen Witterungsbedingungen. Während die Folgen der Winterglätte zunächst durch Abstumpfen gemildert wurden, werden seit Anfang der 60er Jahre in zunehmendem Maße auch Taustoffe zur Beseitigung der Fahrbahnglätte eingesetzt. Das führte zu einem raschen Ansteigen des Tausalzverbrauchs insbesondere deshalb, weil in steigendem Maße Taustoffe auch präventiv zur Verhinderung des Entstehens überfrierender Nässe und zum Wegtauen größerer Schneemengen eingesetzt wurden.

Korrosionsschäden an Bauwerken und Fahrzeugen sowie Beeinträchtigungen der straÙennahen Vegetation durch von der befestigten StraÙenoberfläche abfließendes Wasser und durch salzhaltige Sprühnebel führten jedoch schon bald zu Überlegungen, wie die Taustoffe möglichst effektiv eingesetzt werden können. Aber auch steigender Kostendruck hat zu gemeinsamen Anstrengungen aller für den Winterdienst Verantwortlichen aus Industrie, Verwaltung und Wissenschaft geführt, den Streusalzeinsatz zu reduzieren. Seither sind vielfältige Maßnahmen unterschiedlichster Art ergriffen worden und bilden heute den Stand der Technik. Zu den bedeutendsten Verbesserungen der Winterdiensttechnologie zählen insbesondere:

- wegabhängige Streuung der Taustoffe,
- Verbesserung der Dosiergenauigkeit und Ausbringetechnik,
- Einsatz von Feuchtsalz,
- Verwendung von Glättemeldealanlagen,
- Einsatz von Taumittelsprühanlagen,
- Verwendung alternativer Taustoffe und
- Einbau eishemmender Deckschichten.

Die Verbesserungen der Winterdiensttechnik wurden flankiert durch organisatorisch/administrative Maßnahmen, die ebenfalls die Reduzierung des Taustoffverbrauchs zum Ziel hatten, wie etwa:

- Festlegung eines Anforderungsniveaus,
- Vereinheitlichung der Einsatzverfahren,
- Differenzierung des Winterdienstes in Abhängigkeit von Witterungsbedingungen und Verkehrsbedeutung der StraÙe,

¹ Schreiben vom 25. 11. 1985 = StB 27/38.58.30-20/97 Va 85.

in Abhängigkeit vom Anforderungsniveau an den Winterdienst [25] bemüht ist, Glätte erst gar nicht auftreten zu lassen oder möglichst im Entstehen zu beseitigen. Mit zeitlich und/oder räumlich pauschalen Angaben zur Winterlichkeit ist dem Problem der Bewertung der Verkehrssicherheit nur sehr eingeschränkt beizukommen, da davon auszugehen ist, daß bestimmte Fahrbahnzustände aus den genannten Gründen nur sehr kurzfristig und lokal begrenzt auftreten.

Im Bereich des Straßenunterhaltungs- und Betriebsdienstes gibt es nur wenige Ansätze, die Strenge eines Winters zu beschreiben und zur Grundlage u. a. zur Bevorratung von Streustoffen [29] oder zur Personalbemessung [28] zu machen. Gleiche Überlegungen, mit einem solchen Maß den Tausalzverbrauch oder die Kosten des Winterdienstes vergleichend zu bewerten, sind mit maximal etwa 10 Jahren noch relativ jung. Sie setzen erst in dem Augenblick ein, in dem steigender Kostendruck und der Wunsch nach einem möglichst umweltschonenden Winterdienst zu einem besonders vorsichtigen Umgang mit dem Tausalz zwingen. Im folgenden Abschnitt sind einige der Ansätze und ihre Intentionen dargestellt.

Grundsätzlich ist die Strenge eines Winters von der geografischen Breite und Höhe eines Beobachtungsortes sowie seiner Entfernung von der Küste der Weltmeere abhängig. Diese Aussage gilt jedoch nur im langjährigen Mittel, im Einzelfall können Strenge und vor allem auch Dauer eines Winters von diesem langjährigen Mittel erheblich abweichen. Soll etwa die Abhängigkeit der industriellen Produktion von der Winterstrenge analysiert und bewertet werden, ist diesem Umstand dadurch Rechnung zu tragen, daß überprüft werden muß, ob und inwieweit die Meßwerte einer Beobachtungsstation repräsentativ für das zu betrachtende Gebiet sind. Mit diesem Hintergrund wurde von HULME [19] Anfang der 80er Jahre ein Winterindex entwickelt. Dabei wurde vorausgesetzt, daß es aufgrund der unterschiedlichen Ausprägungsformen winterlicher Witterung (Schnee, Frost) nicht genügt, nur einen Faktor, z. B. die mittlere Temperatur, in einem Ansatz zur Beschreibung der Winterstrenge zu berücksichtigen. Die von HULME ermittelte Beziehung für vier verschiedene Wetterstationen lautet:

$$WI = 10 * T - 18,5 * S - F + 200 \quad (1)$$

Darin bedeuten:

T = mittlere tägliche Höchsttemperatur

S = Anzahl der Tage mit einer Schneedecke um 9.00 h GMT

F = Anzahl der Nächte mit Bodenfrost

Mit den meteorologischen Daten von Dezember bis März wurde dieser Winterindex von THORNES [34, 35] mit Daten des Streusalzverkaufs in Großbritannien korreliert und ein Korrelationskoeffizient von 0,85 (signifikant bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 1 %) gefunden. In Bild 3.2 ist der von THORNES nach der Formel von HULME für Manchester ermittelte Winterindex über einen Zeitraum von 30 Jahren aufgetragen.

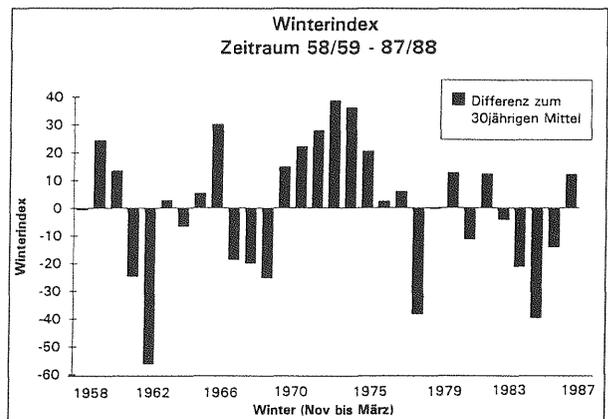


Bild 3.2: Winterindex nach HULME [27]

Ein vereinfachter Winterindex nach Hershfield wird auf der Basis der Auswertung der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel für Nordamerika angegeben [35] und mit diesem drei verschiedene Klimazonen mit Dauerfrost im Norden, Frost-Tau-Wechseln in der Mitte und Dauer-Nichtfrost im Süden unterschieden.

In einem Computer-Programm zur Abrechnung des Straßenwinterdienstes wurde zunächst grob vereinfachend die gesamte Schneefallhöhe als Maß für die Winterstrenge zugrunde gelegt. Nachdem festgestellt worden war, daß dieses Maß für die Bewertung der Ausgaben nicht geeignet ist, wurde von RISSEL und SCOTT empirisch ein Winterindex entwickelt, der auf sechs verschiedenen meteorologischen Daten basiert.

$$WI = S + 2 * M + H + T - (C/2) + R \quad (2)$$

Darin bedeuten:

S = Gesamt-Schneefallhöhe [inch]

M = Zahl der Tage mit Schneefall 1 – 6 inch

H = Zahl der Tage mit Schneefall > 6 inch

T = Zahl der Frosttage

C = Zahl der Eistage

R = Anzahl der Stunden mit Schnee- oder Eisglätte

Dieser Winterindex WI für repräsentative Wetterstationen wurde mit der Gesamtzahl der während eines Winters erforderlichen Gesamt-Arbeitsstunden mit Zulagen (single-shift premium hours) Y korreliert und die folgende Beziehung mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,94$ gefunden:

$$Y = -37,9 + 0,8 * WI \quad (3)$$

In Dänemark wurde ein ähnlicher Winterindex entwickelt mit dem Ziel, bereits im Januar die erforderlichen Winterdienstkosten abschätzen zu können, damit die entsprechenden Mittel durch die politischen Entscheidungsträger bereitgestellt werden. Auf der Grundlage des seit 1986/87 betriebenen Systems zur Wetterbeobachtung und Glättemeldung wird für jeden Tag und für jeden Bezirk ein Winterindex WI (d) berechnet. Dieser soll besonders diejenigen Wetteränderungen berücksichtigen, die Aktivitäten des Winterdienstes erfordern. Der Winterindex WI ergibt sich aus der Summe dieser Einzelberechnungen zu:

$$WI = \sum_{15. \text{ Apr.}}^{15. \text{ Okt.}} WI(d) \quad (4)$$

Der auf den Tag bezogene Index wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$WI(d) = a * (b + c + d + e) + a \quad (5)$$

Die Glieder der Gleichung sind wie folgt definiert:

a = 1, wenn die Temperatur im Laufe von 24 Stunden unter $+0,5^\circ\text{C}$ sinkt, sonst = 0.

b = 1, wenn innerhalb eines 12-Stunden-Intervalls die Fahrbahntemperatur für mindestens 3 Stunden unter den Gefrierpunkt sinkt und gleichzeitig niedriger ist als die Taupunkt-Temperatur der Luft (Reifglätte), sonst = 0; (d. h. b kann max. den Wert 2 annehmen).

c = Anzahl der Unterschreitungen des Gefrierpunktes der Fahrbahntemperatur innerhalb von 24 Stunden (Abkühlung von mind. $+0,5^\circ\text{C}$ auf mind. $-0,5^\circ\text{C}$).

d = 1 bei Schneefall von mind. 1 cm innerhalb von 24 Stunden, sonst = 0.

e = 1 bei nennenswertem Schneetreiben, sonst = 0.

Zur Absicherung wurde dieser Winterindex mit einem Aktivitätsindex AI (d) korreliert, der die Einsätze des Winterdienstes widerspiegelt:

$$AI(d) = N1 + N2 \quad (6)$$

Darin bedeuten:

$$N1 = \frac{\text{Anzahl der Streueinsätze}}{\text{Anzahl der Salzstrecken}}$$

$$N2 = \frac{\text{Anzahl der Räumereinsätze}}{\text{Anzahl der Räumstrecken}}$$

Zwischen dem Winter- und dem Aktivitäts-Index wurde bei landesweiter Betrachtung eine sehr enge Beziehung mit einem hohen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,95$ gefunden; bei Betrachtung der Werte für die verschiedenen Bezirke in einem Ansatz sinkt der Korrelationskoeffizient auf $r = 0,61$. Ähnliche Werte ergeben sich für den Zusammenhang zwischen dem Winterindex und dem Salzverbrauch mit $r = 0,96$ für den Gesamtansatz und $r = 0,38$ für die Einzelwerte. Die niedrigen Korrelationskoeffizienten bei der gemeinsamen Betrachtung der einzelnen Bezirke macht deutlich, daß es große Unterschiede in der Art und Weise gibt, wie die einzelnen Bezirke ihren Winterdienst organisieren.

Keine Korrelation wurde dagegen für die Beziehung zwischen dem Winterindex und den Kosten des Winterdienstes gefunden. Eine Ursache für die schwache Beziehung zwischen diesen beiden Größen könnte u. a. auch darin zu suchen sein, daß die Kosten nur jahresbezogen, die Winterindices dagegen saisonbezogen vorliegen [3].

In der Bundesrepublik wurden grundlegende Untersuchungen zur Abhängigkeit des Streusalzverbrauchs von der Winterintensität von SPETH [1, 2] vorgelegt. SPETH geht aus von einer detaillierten Analyse der täglichen Praxis des Winterdienstes in der einzelnen Meisterei, die in besonderen Formblättern festgehalten wird. Diese enthalten für jeden Tag die Minima und Maxima der Lufttemperatur, die Unterscheidung in Eis-, Frost- und Tautag, die Art des Niederschlages (Regen, Schnee, Schneeregen), die Schneefallhöhe pro Tag, die Räumleistung [km], die Streuleistung [km], die Fahrleistung [km] und den Salzverbrauch [t].

Diese Daten werden auf zwei unterschiedliche Winterdienstsituationen hin untersucht: Einsätze bei Schneefall und Einsätze bei Glättebildung. Für den ersten Fall gelingt es, Abhängigkeiten zwischen der mittleren Schneefallhöhe pro Schneefalltag und dem Salzverbrauch je Schneefalltag in g/m^2 aufzuzeigen. Für Bayern ist diese Größe mit einem Anteil von etwa 79 % der Gesamtstreumenge die maßgebende Größe für die Beurteilung des Winterdienstes. Für Niedersachsen und Schleswig-Holstein ergeben sich mit etwa 66 % bzw. 54 % im Vergleich allerdings erwartungsgemäß deutlich geringere Anteile.

Für den Salzverbrauch bei Winterdiensteseinsätzen zur reinen Glättebekämpfung, d. h. an schneefallfreien Tagen, lassen sich keine solch engen Zusammenhänge wie für Schneefalltage ableiten. Der Autor stellt dazu fest, daß „der Salzverbrauch an derartigen Tagen – betrachtet man die untere Grenze – von Kontrollfahrten mit sporadischen, punktuellen Streuungen, z. B. an kritischen Stellen, Brücken usw., bis zu teilweise enormem Salzeinsatz bei Eisregen, wenn Regen auf eine unterkühlte Fahrbahn fällt, oder beim Nachräumen an Tagen, die auf sehr schneefallreiche Einsatztage folgen, um bereits vorhandene, festgefahrene Schneedecken zu beseitigen, reicht“ [32]. SPETH schlägt die Verwendung eines Quotienten „Salzverbrauch an Glättetagen“ zu „Salzverbrauch an Schneefalltagen“ vor, um die Lücke zu schließen.

Die von SPETH gefundenen Abhängigkeiten weisen relativ große Streuungen auf, die vorwiegend dadurch bedingt sind, daß die Werte einzelner Meistereien und damit auch deren individueller Charakter in einem Ansatz zusammengefaßt werden.

SPETH stellt fest, daß Ansätze, die versuchen, aus Daten der Winterdiensteseinsatzstatistik, etwa der Zahl der Voll- und Teileinsatztage, zu einer Bewertung zu kommen, weniger geeignet sind als die Verwendung von winterdienstfremden, d. h. meteorologischen Daten für diesen Zweck. Die Ansätze aus der Winterdiensteseinsatzstatistik heraus sind wegen der inneren Korrelation der Daten für eine objektive Beschreibung nur bedingt geeignet. Deshalb empfiehlt SPETH den Ansatz meteorologischer Meßwerte und Parameter, um zu einer objektiveren Bewertung zu gelangen. Für zweckmäßig hält er die Verwendung von Daten von den Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes, wobei jedoch die Repräsentativität der Daten ausgewählter Wetterstationen für das betrachtete Gebiet besonders nachzuweisen wäre.

4 Material und Methoden

4.1 Allgemeines

Unterschiedliche Ausprägungen der winterlichen Witterung beeinflussen in erheblichem Maße den Streusalzverbrauch. Im allgemeinen ist davon auszugehen, daß in milden Wintern nur wenig Salz verbraucht wird und in strengeren Wintern der Tausalzverbrauch ansteigt.

Winterliche Straßenglätte tritt in verschiedenen Formen als Reif-, Eis- oder Schneeglätte sowie als

Glätte auf; mit jeder Glätteart ist ein unterschiedlicher Winterdienst und Taumittleinsatz verbunden. Gerade in relativ milden, und das heißt in der Regel auch feuchten Wintern kommt es zu häufiger Glätte durch Reifbildung, deren Beseitigung im Einzelfall nur eine geringe Streudichte erfordert, in der Summe aber einen erheblichen Streusalzverbrauch bedeuten kann. Auf der anderen Seite ist lang anhaltender strenger Frost meist mit geringen Niederschlägen verbunden, so daß hier nur ein vergleichsweise niedriger Streusalzverbrauch entsteht. Wenn im folgenden von Winterstrenge die Rede ist, so ist damit nicht die allgemeine begriffliche Vorstellung von einer langanhaltenden und/oder strengen Frostperiode verknüpft, sondern eine Ausprägung der winterlichen Witterung, die einen höheren oder niedrigeren Taumittleinsatz notwendig macht.

Die Entstehung winterglatter Fahrbahnen ist allgemein an zwei Bedingungen geknüpft: das Vorhandensein oder Entstehen von Feuchtigkeit (z. B. durch Unterschreiten des Taupunktes) und Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Ein Idealmaß zur Beschreibung der Winterstrenge wäre deshalb die Angabe, wie oft oder besser wie lange beide Bedingungen gleichzeitig herrschen.

Beide Faktoren sind unmittelbar abhängig von der geographischen Breite, der Höhe sowie dem Abstand zur Küste. Dies ist aus entsprechenden meteorologischen Aufzeichnungen ersichtlich und schlägt sich unmittelbar auch nieder in den erheblich höheren Winterdienstaufwendungen in Baden-Württemberg und Bayern im Vergleich etwa mit den norddeutschen Küstenländern. Die drei genannten Einflußgrößen sind somit wichtige Kriterien zur Darstellung der Größe des Taumittelbedarfs. Der Versuch, den Streusalzverbrauch mit der geographischen Höhe zu korrelieren, ist jedoch im Rahmen der Voruntersuchungen zu diesem Projekt gescheitert, was vor allem auf die zu schmale verfügbare Datenbasis zurückzuführen ist. Auf die Berücksichtigung der geographischen Höhe in einem Ansatz zur Beschreibung der Winterstrenge kann jedoch dann leicht verzichtet werden, wenn Daten zur Beschreibung der Temperatur und Niederschlagshöhe in den Ansatz einbezogen werden, in denen der Einfluß der geographischen Höhe implizit enthalten ist.

Von entscheidender Bedeutung für die Höhe des Taustoffverbrauches sind die Anforderungen, die an den Winterdienst gestellt werden. Sie sind im „Anforderungsniveau Winterdienst“ der Straßenbauverwaltungen der Länder in Abhängigkeit von

der Verkehrsbedeutung der Straße festgelegt. Für die weiteren Überlegungen werden diese Anforderungen bzw. die sich aus ihnen ergebende Winterdienstpraxis als bundesweit einheitlich unterstellt und können daher ebenfalls außer Ansatz bleiben.

Die grundlegende These, daß Glättebildung nur bei gleichzeitigem Vorhandensein von Feuchtigkeit und Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auftreten kann, legt nahe, den Streusalzverbrauch mit Hilfe meteorologischer Daten zu bewerten. Dies führt unmittelbar zu Überlegungen, wie entsprechende Informationen beschafft werden können. Dabei ist in die Überlegungen einzubeziehen, welcher Aufwand mit der Datenbeschaffung verbunden ist. Ziel sollte es sein, wie auch schon im Auftrag formuliert, daß die Daten einfach und ohne größeren Erhebungsaufwand beschafft werden können. Grundsätzlich sind zwei Wege denkbar, die im folgenden als mikroskopischer bzw. makroskopischer Ansatz bezeichnet werden.

Mikroskopischer Ansatz

Der mikroskopische Ansatz geht von der kleinräumigen (Einzelfall-) Betrachtung auf Meistereis- oder Bauamtsebene aus. Als Datenbasis hierfür stehen die Meldungen von Glättemeldeanlagen zur Verfügung. Der größte Teil der Autobahnmeistereien ist gegenwärtig mit Glättemeldeanlagen ausgestattet, jedoch verfügen nicht alle Anlagen über Speichermedien, die eine einfache dv-gestützte Auswertung der Daten ermöglichen.

Die Auswertung der Aufzeichnungen der Glättemeldeanlagen eignet sich in idealer Weise, den Taumitteleinsetz der (zugehörigen) (Autobahn-) Meistereien zu bewerten. Für die globalere Betrachtung eignet sich der Ansatz dagegen nur sehr bedingt. Zum einen ist mit der (notwendigen) Sammlung und Aggregation der Daten ein nicht unerheblicher Aufwand verbunden. Zum anderen bereitet die Auswahl und Festlegung repräsentativer Glättemeldeanlagen große Schwierigkeiten.

Makroskopischer Ansatz

Der makroskopische Ansatz versucht, entsprechend der großräumigeren Aufgabenstellung von bereits voraggregierten Daten auszugehen, um insbesondere den Aufwand für die Datensammlung und -aufbereitung zu verringern. Als Datenbasis hierfür stehen die vielfältigen Wetterdaten zur Verfügung, die der Deutsche Wetterdienst sammelt und regelmäßig veröffentlicht. Der makroskopische Ansatz eignet sich besonders für großräumigere

Fragestellungen z. B. auf Länder- oder Bundesebene.

Eine Datenaggregation ist jedoch stets mit einem Informationsverlust verbunden. Die sich daraus ergebenden Probleme und Unzulänglichkeiten werden im Abschnitt 6 diskutiert.

Verfahrenswahl

Aus den dargelegten Gründen, insbesondere wegen der großräumigeren Fragestellung und zur Reduzierung des Aufwandes für die Datenerhebung wird im folgenden der makroskopische Ansatz weiterverfolgt. Ausschlaggebend für diese Entscheidung gegen den mikroskopischen Ansatz ist der erhebliche Aufwand für die Datenaufbereitung, für die entsprechende Auswerteprogramme erstellt werden müßten. Die Aufgabe würde dadurch erschwert, daß eine Vielzahl unterschiedlicher und nicht hinreichend kompatibler Systeme für die Glättemeldung in Betrieb ist und deshalb verschiedene Auswerteprogramme erforderlich wären.

4.2 Verfahren

Grundidee des Verfahrens ist es, eine Korrelation zwischen dem Streusalzverbrauch und Parametern zur Beschreibung der Winterstrenge herzustellen, daß ein hypothetischer, der Winterstrenge angemessener Streusalzbedarf dem tatsächlichen Streusalzverbrauch im gleichen Zeitraum gegenübergestellt werden kann.

Die Differenz zwischen hypothetischem Streusalzbedarf und Ist-Verbrauch ist dann ein Maß dafür, ob mit dem Salz großzügig oder sparsam umgegangen worden ist. Dazu muß eine enge Beziehung zwischen der Winterstrenge und dem Streusalzverbrauch bestehen, d. h. die Zeitreihen beider Größen müssen gut miteinander korreliert sein. Grundvoraussetzung für eine gute Korrelation zwischen zwei Größen und damit auch zwischen zwei Zeitreihen ist, daß beide keinen äußeren Störungen unterworfen sind. Für die meteorologischen Größen als maßgebende Einflußgrößen auf den Streusalzverbrauch wird dies als gegeben vorausgesetzt.

In Bild 4.1 ist der auf die Streckenlänge bezogene Streusalzverbrauch seit Beginn der Streusalzanwendung in der Bundesrepublik Deutschland für die alten Bundesländer in Tonnen je Kilometer für Bundesautobahnen (BAB) und Bundesstraßen (B-Str.) dargestellt. Es wird deutlich, daß der Streusalzverbrauch erhebliche Unterschiede aufweist. Wesentliche Ursache für diese Schwankungen ist die unterschiedliche Ausprägung des Winterwet-

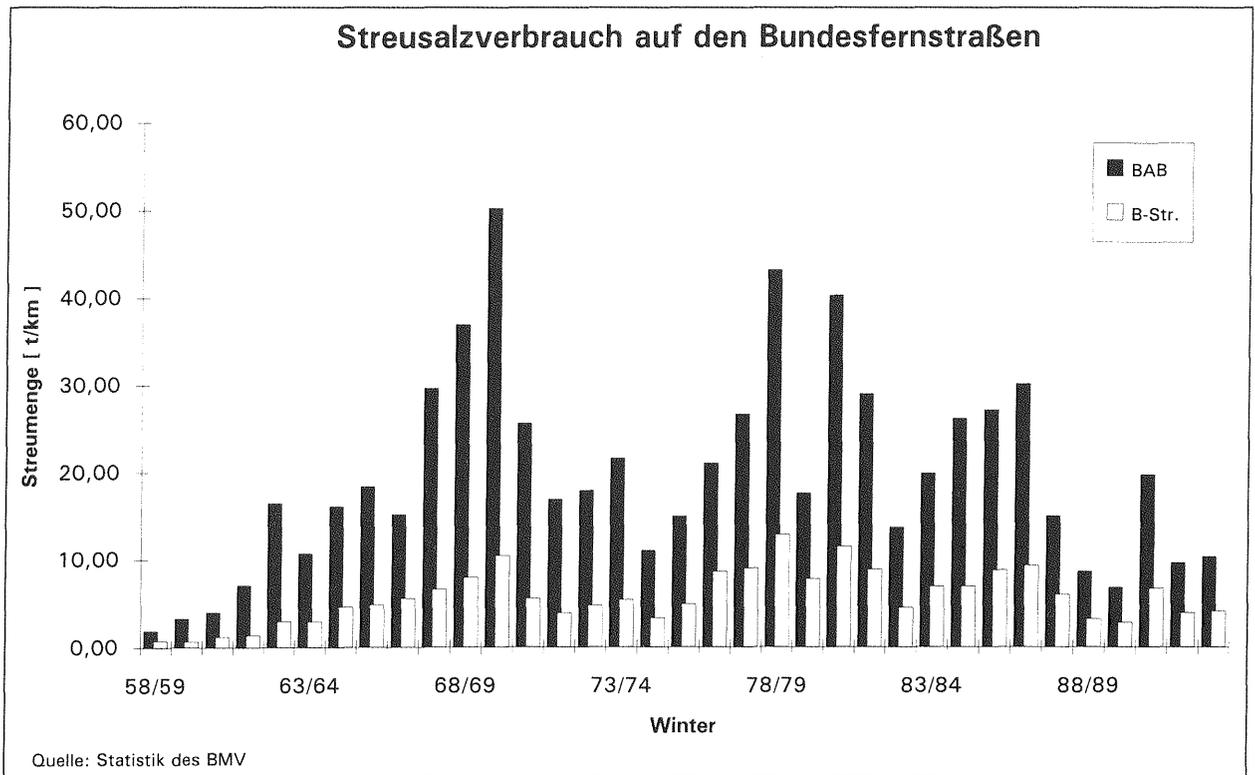


Bild 4.1: Streusalzverbrauch auf den Bundesfernstraßen

ters. Weiterhin zeigt die Darstellung, daß offenbar (wegen des Witterungseinflusses!) ein enger Zusammenhang zwischen dem Streusalzverbrauch auf den Bundesautobahnen und dem auf Bundesstraßen besteht.

Die erste Eingangshypothese des gewählten Verfahrens lautet, daß die Zeitreihe des Streusalzverbrauchs in drei Abschnitte unterschiedlicher Ausprägung eingeteilt werden kann. In Bild 4.2 ist noch einmal der Streusalzverbrauch für die Bundesautobahnen gemeinsam mit den drei Abschnitten dargestellt.

Im Abschnitt I ist der Streusalzverbrauch SV kleiner als der (witterungsbedingte) hypothetische Streusalzbedarf SB , d.h. $SV/SB < 1$. In den ersten Jahren der Streusalzanwendung wurden nur allmählich die für das Ausbringen des Streusalzes erforderlichen Geräte beschafft und mit den vorhandenen Geräten nur Teile des Netzes mit auftauenden Mitteln behandelt. Erst nach und nach wird eine Vollausstattung mit Geräten erreicht und mit ihnen das Gesamtnetz gestreut.

In Abschnitt II ist die Vollausstattung mit Geräten erreicht. In diesem Abschnitt ermöglicht der vollständig vorhandene Gerätepark eine Streusalzbringung entsprechend den Witterungsbedingungen. Der Streusalzverbrauch SV ist deshalb gleich

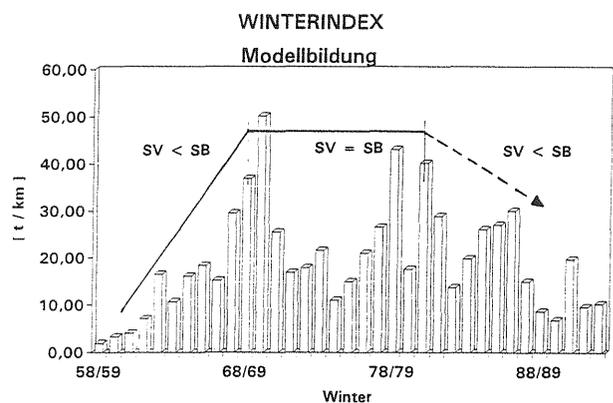


Bild 4.2: Herleitung des verwendeten Modells

dem hypothetischen Streusalzbedarf SB und entsprechend $SV/SB = 1$.

Der Abschnitt III zeichnet sich durch die vielfältigen Bemühungen (s. Kap. 2) aus, den Streusalzverbrauch aus ökologischen und ökonomischen Gründen zu reduzieren. Hier ist der Streusalzverbrauch kleiner als der witterungsbedingte Streusalzbedarf SB , d. h. $SV/SB < 1$.

Für das Verfahren wird als zweite Eingangshypothese unterstellt, daß im Abschnitt II ein stochastischer Zusammenhang zwischen dem Streusalzverbrauch SV und dem Winterwetter besteht, so daß dieser Abschnitt für eine Regressionsanalyse her-

angezogen werden kann. Gelingt es, für diesen Abschnitt eine statistisch hinreichend abgesicherte Beziehung zwischen Parametern zur Beschreibung der Winterstrenge und dem Salzverbrauch zu finden, so kann diese benutzt werden, um in den Abschnitten I und III einen hypothetischen Salzbedarf zu errechnen, mit dem der tatsächliche Salzverbrauch verglichen werden kann.

4.3 Datengrundlage

4.3.1 Daten des Streusalzverbrauchs

Die Bundesländer ermitteln jährlich die Kosten des Winterdienstes und den Verbrauch an Streustoffen. Diese Statistik wird vom Bundesverkehrsministerium zu einem mittleren Wert für die gesamte Bundesrepublik (alte Bundesländer) aggregiert (Bild 4.1). Seit dem Winter 1974/75 wird der spezifische Verbrauch [t/km] auf den Bundesautobahnen auf den Bewertungs-Kilometer bezogen. Mit dem Bewertungs-Kilometer werden mehr als vierstreifige Querschnitte und Rampen in Knoten und Anschlußstellen berücksichtigt. Zur Ermittlung der Bewertungs-Kilometer werden die folgenden Umrechnungsfaktoren verwendet:

4streifige Fahrbahnen	: 1,00
5streifige Fahrbahnen	: 1,25
6streifige Fahrbahnen	: 1,50
8streifige Fahrbahnen	: 2,00
2streifige Fahrbahnen	: 0,50
Rampen und Nebenfahrbahnen in Anschlußstellen und Autobahnknoten:	0,50.

Vielfach basieren die Zahlen, die die Länder von den Meistereien zusammentragen, nicht auf exakten Verbrauchsaufschrieben, sondern auf Schätzungen des Füllungsgrades der Salzlagerhallen zu Beginn und am Ende des Winters unter Berücksichtigung eventueller Nachlieferungen. Diese Schätzungen können zu Fehlern führen, es ist jedoch anzunehmen, daß sich zu hohe und zu niedrige Schätzungen im Mittel gegenseitig aufheben. Die Daten werden nach Ende der Winterperiode von den Meistereien abgerufen und stehen etwa im August/September als Mittelwert für die Bundesrepublik zur Verfügung.

4.3.2 Meteorologische Daten

Das Zentralamt des Deutschen Wetterdienstes in Offenbach veröffentlicht regelmäßig den „Monatlichen Witterungsbericht“. In diesen Berichten werden neben einer allgemeinen Darstellung des Witterungscharakters und des Wetterablaufs die „Monatswerte“ der Klimastationen des synoptischen Netzes, das sind die Bodenbeobachtungsstationen des Wetterdienstes, publiziert. Diese Veröffentlichungen erfolgen etwa zwei Monate nach dem Ende des Berichtsmonats, so daß sie für den vorliegenden Zweck rechtzeitig zur Verfügung stehen.

Die Monatswerte umfassen u. a. für jede Klimastation die Angabe von

- T = mittlere Lufttemperatur in °C,
- N = Niederschlagshöhe in mm,
- SF = Anzahl der Tage mit Schneefall über 0,1 mm,
- SD = Anzahl der Tage mit einer geschlossenen Schneedecke über 1 cm
- FT = Anzahl der Frosttage (Tiefstwert der Lufttemperatur unter 0 °C) und
- ET = Anzahl der Eistage (Höchstwert der Lufttemperatur unter 0 °C).

Um den Aufwand für das Zusammentragen der Daten zu begrenzen und um gleichzeitig einen Eindruck zu gewinnen, welcher Aufwand für die Datenbeschaffung betrieben werden muß, wurde aus der Vielzahl der Klimastationen eine repräsentative Auswahl getroffen. Diese Auswahl erfolgte nach drei Kriterien:

1. Die Stationen sollten möglichst repräsentativ für das Klima der Bundesrepublik (alte Bundesländer) sein.
2. Die Stationen sollten möglichst repräsentativ für die Dichte des Straßennetzes bzw. Verkehrsaufkommens sein.
3. Für die Stationen sollten möglichst die Wetteraufzeichnungen über den gesamten Zeitraum der Salzverbrauchsstatistik, also vom Winter 1958/59 bis heute, vorliegen.

Insgesamt zehn Klimastationen genügten diesen Kriterien, wobei gewisse Einschränkungen bei den Bedingungen 1 und 2 in Kauf genommen wurden, um das Kriterium 3 zu erfüllen. Die folgenden Klimastationen wurden in die Untersuchung einbezogen (Bild 4.3).

Für diese 10 Klimastationen wurden für das Winterhalbjahr (Oktober – März) die Monatswerte zusammengetragen und anschließend zu einem stationsbezogenen Wintermittelwert (Temperatur) bzw.

Station	Seehöhe	m ü. NN
Hamburg-Fuhlsbüttel	14	"
Oldenburg	5	"
Hannover-Langenhagen	51	"
Arnsberg/Westfalen	204	"
Köln/Wahn	68	"
Frankfurt a. Main	103 [*]	"
Kaiserslautern	283	"
Stuttgart	305 ^{**}	"
Nürnberg (Flughafen)	310	"
München-Nymphenburg	515	"

* ab 1983/84 F-Flughafen 141 m ü. NN

** ab 1983/84 S-Schnarrenberg 314 m ü. NN

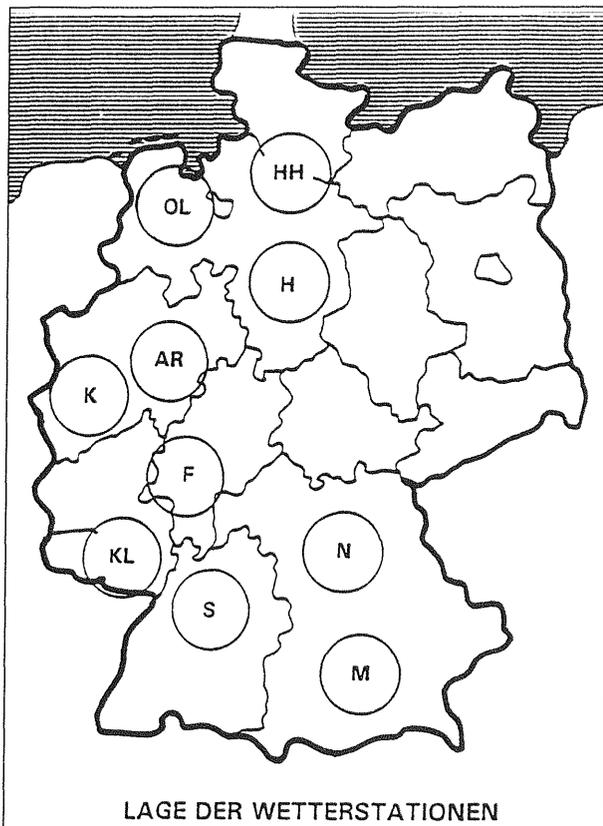


Bild 4.3: Geographische Lage der ausgewählten Klimastationen

Wintergesamtwert (übrige Meßwerte) zusammengefaßt bzw. summiert.

Anschließend wurden die stationsbezogenen Winterwerte zu einem Gesamtmittelwert für die Fläche der alten Bundesländer zusammengefaßt. Diese Gesamtmittelwerte werden als repräsentativ für das gesamte mittlere Wintergeschehen angesehen (Bild 4.4).

5 Ergebnisse

Wie im Abschnitt 4.2 im einzelnen dargestellt, soll in dem „unbeeinflussten“ Abschnitt II der Ganglinie des Streusalzverbrauchs (Bild 4.2) eine Korrelation zwischen dem Salzverbrauch SV und den Witterungsdaten (Bild 4.4) derart hergestellt werden, daß die gefundene Beziehung für die Schätzung des witterungsabhängig hypothetischen Salzbedarfs SB in den Abschnitten I und III verwendet werden kann. Zur Bewertung wird der tatsächliche Verbrauch SV mit diesem hypothetischen Wert SB verglichen.

Die zunächst erforderliche Festlegung der Grenzen des Abschnittes II erfolgte in einem ersten Schritt empirisch nach Schätzungen der Kollegen aus den Straßenverwaltungen der Länder: Als Beginn und Ende des Abschnitts II wurden die Winterperioden 1966/67 bzw. 1982/83 angesetzt. Die Auswertung der mit diesem Ansatz gewonnenen Regressionsgleichungen zeigte jedoch, daß der Abschnitt II enger anzusetzen ist. Für die weiteren Untersuchungen wurden daher als Grenzen des Abschnitts II die Winterperioden 1968/69 bzw. 1980/81 festgelegt. Im übrigen haben entsprechende Auswertungen gezeigt, daß die sich ergebenden Regressionskoeffizienten nur sehr geringfügig auf kleinere Verschiebungen des Abschnitts II reagieren. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, daß der Schätzfehler durch möglicherweise nicht voll zutreffende Festlegung der Abschnittsgrenzen klein ist.

Ziel der in den folgenden Abschnitten dargestellten Regressionsanalysen ist es, einen Schätzwert für den witterungsbedingten Streusalzverbrauch, den Streusalzbedarf SB, in Abhängigkeit von den meteorologischen Parametern zu finden, der für eine Beurteilung des tatsächlichen Verbrauchs SV herangezogen werden kann. Mit den meteorologischen Parametern Temperatur T, Niederschlag N, Schneefalltage SF, Schneedeckentage SD, Frosttage FT und Eistage ET wird mit Hilfe der Regressionsanalyse versucht, einen linearen Ansatz zur Beschreibung des Tausalzbedarfs SB in dem unbeeinflussten Abschnitt II (s. Bild 4.2) der Form

$$SB = f(T, N, SF, SD, FT, ET) \quad (7)$$

zu finden.

Der gefundene Streusalzbedarf als Funktion der Witterungsparameter wird dann in den beiden Abschnitten I und III in Beziehung zum tatsächlichen Verbrauch gesetzt und ermöglicht damit eine Be-

	Jahr	T	N	SF	SD	FT	ET
1	58/59	4,32	275	21,70	19,60	67,30	11,20
2	59/60	4,13	254	23,10	20,10	70,80	13,40
3	60/61	5,20	422	25,10	21,90	56,60	9,20
4	61/62	3,42	363	28,50	27,90	82,90	19,30
5	62/63	0,32	219	42,30	82,80	106,60	55,90
6	63/64	2,64	247	21,10	34,10	91,10	29,70
7	64/65	3,27	334	41,50	40,50	80,40	17,40
8	65/66	3,67	405	35,70	33,60	72,50	23,60
9	66/67	4,87	437	32,40	19,40	56,30	8,00
10	67/68	4,04	376	39,70	36,20	74,40	14,30
11	68/69	2,92	274	33,80	47,30	92,10	28,40
12	69/70	2,39	344	51,90	78,90	98,70	39,40
13	70/71	3,58	277	29,10	39,60	71,10	25,00
14	71/72	4,29	196	21,40	16,30	74,40	10,20
15	72/73	3,47	223	25,00	15,70	79,80	10,90
16	73/74	4,65	358	27,20	18,40	59,00	5,50
17	74/75	4,93	430	22,30	7,60	48,60	0,20
18	75/76	3,36	255	22,90	25,10	76,50	15,20
19	76/77	4,77	316	29,00	26,00	59,00	11,00
20	77/78	4,47	356	36,60	31,40	62,30	15,10
21	78/79	2,63	325	41,50	62,10	89,90	32,60
22	79/80	4,26	350	25,60	18,40	65,20	12,40
23	80/81	3,62	387	41,60	51,10	85,40	18,10
24	81/82	2,88	429	39,90	48,30	85,80	25,90
25	82/83	4,92	425	29,80	21,20	54,20	7,60
26	83/84	3,49	325	34,40	28,70	88,60	11,90
27	84/85	2,56	277	35,30	46,40	87,20	32,80
28	85/86	2,50	325	43,40	56,80	92,70	35,40
29	86/87	2,75	398	42,30	56,90	86,70	28,70
30	87/88	4,98	466	32,70	17,80	52,00	5,50
31	88/89	5,62	328	17,00	7,40	49,30	5,20
32	89/90	5,88	350	17,50	6,90	66,90	7,10
33	90/91	4,37	312	22,60	30,30	70,70	16,90
34	91/92	4,31	337	24,20	11,40	66,60	10,50
35	92/93	4,55	385	22,10	8,80	68,80	13,2
Mittelwert		3,83	336,6	30,98	31,85	71,15	17,91

Bild 4.4: Gesamtmittelwerte der Wetterparameter

wertung, ob mit dem Streusalz sparsam umgegangen worden ist.

5.1 Ansätze mit einer Einflußgröße

In einem ersten Arbeitsschritt wurden zunächst die Ansätze mit einer unabhängigen Variablen untersucht. In Bild 5.1 ist beispielhaft die gefundene Bezeichnung zwischen dem Streusalzverbrauch SV [t/km] und der Zahl der Schneefalltage SF für den Zeitabschnitt II (Winter 1968/69 bis 1980/81) dargestellt. Die Regressionsanalyse ergibt die folgende Schätzung SV^* für den (tatsächlichen) Streusalzverbrauch in Abhängigkeit von der Zahl der Schneefalltage SF

$$SV^*_{(II)} = -13,28 + 1,27 \cdot SF_{(II)} \quad (8)$$

mit einem sehr hohen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,954$.

Für den Abschnitt II ist entsprechend der Eingangshypothese (s. 4.2) der Schätzwert für den tatsächlichen Streusalzverbrauch SV^* gleich dem witterungsabhängigen hypothetischen Streusalzbedarf SB.

$$SB_{(II)} = SV^*_{(II)} \quad (9)$$

Für die beiden Abschnitte I und III wird mit

$$SV_{(I,III)} < SB_{(I,III)} \quad (10)$$

die gefundene Beziehung (Gl. 8) zur Schätzung des hypothetischen Streusalzbedarfs SB verwendet und der tatsächliche Streusalzverbrauch mit diesem bewertet.

$$SB_{(I)} = -13,28 + 1,27 \cdot SF_{(I)} \quad (11)$$

$$SB_{(III)} = -13,28 + 1,27 \cdot SF_{(III)} \quad (12)$$

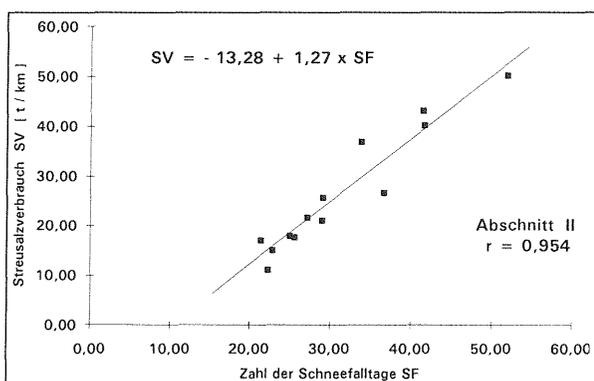


Bild 5.1: Beziehung zwischen dem Streusalzverbrauch und der Zahl der Schneefalltage (Winter 1968/69 bis 1980/81)

In der folgenden Tabelle (Bild 5.2) sind die übrigen Korrelationskoeffizienten zwischen den meteorologischen Parametern Temperatur T, Niederschlag N,

Schneefalltage SF, Schneedeckentage SD, Frosttage FT sowie Eistage ET und dem mittleren Salzverbrauch [t/km] für die alten Bundesländer zusammengestellt. Die Tabelle enthält darüber hinaus die Korrelationskoeffizienten der meteorologischen Parameter untereinander.

	T	N	SF	SD	FT	ET	SV
T	1	0,282	-0,631	-0,812	-0,944	-0,896	-0,749
N	0,282	1	0,342	0,120	-0,331	-0,121	0,180
SF	-0,631	0,342	1	0,930	0,656	0,793	0,954
SD	-0,812	0,120	0,930	1	0,800	0,942	0,969
FT	-0,944	-0,331	0,656	0,800	1	0,851	0,786
ET	-0,896	-0,121	0,793	0,942	0,851	1	0,877
SV	-0,749	0,180	0,954	0,969	0,786	0,877	1

Bild 5.2: Korrelationen zwischen dem Streusalzverbrauch und den meteorologischen Parametern sowie der meteorologischen Parameter untereinander (Winter 1968/69 bis Winter 1980/81)

Mit Ausnahme des Niederschlags ergeben sich durchweg gute bis sehr gute Korrelationen zwischen den meteorologischen Parametern und dem Streusalzverbrauch. Der mit Abstand niedrigste Korrelationskoeffizient für den Niederschlag ist dadurch erklärbar, daß im allgemeinen sehr niederschlags(regen-)reiche Winter nicht sehr kalt sind, so daß Glättebildung nur selten auftritt; diese These wird durch die negative Korrelation zwischen dem Niederschlag und den Frost- bzw. Eistagen bestätigt. Erwartungsgemäß ergeben sich ebenfalls negative Korrelationen zwischen der Temperatur und dem Streusalzverbrauch sowie den übrigen Parametern mit Ausnahme wiederum des Niederschlags. (Ein negativer Korrelationskoeffizient weist aus, daß die abhängige Variable mit steigender Einflußgröße fällt.)

Die mit Abstand besten Zusammenhänge bestehen zwischen dem Streusalzverbrauch und den Schneefall- bzw. den Schneedeckentagen. Dieses Ergebnis konnte erwartet werden, da die Parameter beide Bedingungen für das Auftreten von Glätte, nämlich Feuchtigkeit und Kälte, repräsentieren. In besonderem Maße gilt dies für die Schneedeckentage, die zeigen, daß neben dem gefallenem Schnee auch über längere Zeit die Temperaturen unter dem Gefrierpunkt liegen und so die notwendige Voraussetzung für das Liegenbleiben von gefallenem Schnee vorliegt.

Besonders große Korrelationskoeffizienten (im Bereich von 0,9 und darüber) ergeben sich unter den meteorologischen Parametern zwischen der Temperatur und den Frosttagen, der Temperatur und

den Eistagen, den Schneefall- und den Schneedeckentagen sowie den Schneedecken- und den Eistagen. Dies ist ein Hinweis darauf, daß diese Parameter besonders gut gegenseitig substituierbar sind.

Insgesamt ist festzustellen, daß die gefundenen Korrelationen und ihre Rangfolge in hohem Maße plausibel erscheinen und die winterlichen Witterungsbedingungen gut widerspiegeln.

5.2 Multivariate Ansätze

Als multivariater Ansatz wird für die vorliegende Untersuchung eine lineare Regressions-Beziehung zwischen einer Zielgröße y und mehreren Einflußgrößen x_n gleichzeitig angenommen in der Form:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n \quad (13)$$

Bei dieser multiplen Regressionsanalyse lautet die Aufgabe, die Parameter b_n so zu bestimmen, daß die Reststreuung (nicht erklärte Streuung) minimiert wird [2]. Bei diesen multivariaten Ansätzen nimmt die Zahl der erforderlichen Rechenschritte erheblich zu, so daß eine Lösung mit vertretbarem Aufwand nur mit Hilfe von Rechenanlagen (PC) möglich ist. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf Berechnungen mit dem Statistikprogramm SPSS.

In den folgenden Tabellen (Bilder 5.3–5.6) sind die multiplen Korrelationskoeffizienten für alle multivariaten Ansätze mit 2, 3, 4 und 5 unabhängigen Variablen der Reihe nach zusammengestellt. In den Tabellen für 2 bzw. 3 unabhängige Variablen sind die die Zielgröße Streusalzverbrauch beschreibenden Einflußgrößenkombinationen den dazugehörigen Werten der Diagonale gespiegelt gegenübergestellt. Die sich jeweils ergebenden größten Korrelationskoeffizienten sind zusammen mit den zugehörigen Parameterkombinationen durch Fettdruck hervorgehoben.

	T	N	SF	SD	FT	ET
T	-	0,853	0,973	0,971	0,786	0,881
N	T/N	-	0,967	0,971	0,914	0,923
SF	T/SF	N/SF	-	0,980	0,977	0,974
SD	T/SD	N/SD	SF/SD	-	0,969	0,975
FT	T/FT	N/FT	SF/FT	SD/FT	-	0,880
ET	T/ET	N/ET	SF/ET	SD/ET	FT/ET	-

Bild 5.3: Multiple Korrelationskoeffizienten: Zwei unabhängige Variable

T/N	T/N/SF	T/N/SD	T/N/FT	T/N/ET	-
T/SF	T/SF/SD	T/SF/FT	T/SF/ET	-	0,924
T/SD	T/SD/FT	T/SD/ET	-	0,975	0,914
T/FT	T/FT/ET	-	0,975	0,977	0,972
	-	0,908	0,980	0,980	0,973
N/SF	N/SF/SD	N/SF/FT	N/SF/ET	-	
N/SD	N/SD/FT	N/SD/ET	-	0,975	
N/FT	N/FT/ET	-	0,976	0,977	
	-	0,950	0,976	0,980	
SF/SD	SF/SD/F	SF/SD/E	-		
SF/FT	SF/FT/E	-	0,979		
	-	0,980	0,983		
SD/FT	SD/FT/E	0,979			

Bild 5.4: Multiple Korrelationskoeffizienten: Drei unabhängige Variable

T/ N/SF/SD	0,9804	T/SF/FT/ET	0,9813
T/ N/SF/FT	0,9770	T/SD/FT/ET	0,9824
T/ N/SF/ET	0,9755	N/SF/SD/FT	0,9835
T/ N/SD/FT	0,9846	N/SF/SD/ET	0,9810
T/ N/SD/ET	0,9755	N/SF/FT/ET	0,9802
T/ N/FT/ET	0,9692	N/SD/FT/ET	0,9793
T/SF/SD/FT	0,9860	SF/SD/FT/ET	0,9841
T/SF/SD/ET	0,9805	-	-

Bild 5.5: Multiple Korrelationskoeffizienten: Vier unabhängige Variable

T/ N/SF/SD/FT	0,9868
T/ N/SF/SD/ET	0,9812
T/ N/SF/FT/ET	0,9833
T/ N/SD/FT/ET	0,9846
T/SF/SD/FT/ET	0,9862
N/SF/SD/FT/ET	0,9841

Bild 5.6: Multiple Korrelationskoeffizienten: Fünf unabhängige Variable

Die vier Tabellen zeigen, daß der Anteil der nicht erklärten Reststreuung mit zunehmender Zahl erklärender Variablen zunimmt. Allerdings wird auch deutlich, daß die Verbesserung der Korrelationskoeffizienten insbesondere bei den Ansätzen mit fünf

unabhängigen Variablen gegenüber denjenigen mit vier unabhängigen Variablen kaum noch ins Gewicht fällt. Allgemein ist festzustellen, daß auch bei den Ansätzen mit mehreren unabhängigen Variablen sich die besten Korrelationen bei den Ansätzen ergeben, in denen diejenigen Parameter vorkommen, die auch schon bei den Einfachkorrelationen den deutlichsten Zusammenhang zum Streusalzverbrauch erkennen ließen.

5.3 Ausgewählte Modelle

Ausgehend von den im Abschnitt über die Einfachregressionen mitgeteilten Überlegungen wurden aus der Vielzahl möglicher Ansätze unter Zuhilfenahme der mit dem Statistikprogramm ermittelten statistischen Maßzahlen sowie zusätzlicher Plausibilitätsüberlegungen vier Ansätze, je einer mit 1, 2, 3 und 4 unabhängigen Variablen, ausgewählt und mit diesen Modellen die weiteren Auswertungen durchgeführt (Bild 5.7).

$$\begin{aligned} SB_1 &= -13,28 + 1,27 \cdot SF \\ SB_2 &= -1,75 + 0,52 \cdot SF + 0,36 \cdot SD \\ SB_3 &= -10,72 + 0,65 \cdot SF + 0,23 \cdot SD + 0,12 \cdot FT \\ SB_4 &= -9,56 + 0,52 \cdot SF + 0,38 \cdot SD + 0,14 \cdot FT - 0,20 \cdot ET \end{aligned}$$

Bild 5.7: Ausgewählte Modelle (Gleichungen 14–17)

Im Vergleich zeigen die vier ausgewählten Modelle einige bemerkenswerte Eigenschaften. Mit Ausnahme von Modell 2 ergibt sich die Konstante in nahezu der gleichen Größe. Die Konstante mit dem negativen Vorzeichen ist zu interpretieren als Gegengewicht gegen winterliche Witterungsverhältnisse, die sich zwar in den meteorologischen Parametern widerspiegeln, bei denen aber kein Winterdienst durchgeführt wird. Solche Fälle sind denkbar als geringfügige, vereinzelte Nachfröste, aber auch als strenger Frost bei geringer Feuchte, bei dem ebenfalls kein Winterdienst durchgeführt wird, da keine Glätte auftritt.

Als stärkste Einflußgröße erweist sich in allen Ansätzen die Zahl der Schneefalltage, jedoch mit deutlich geringerem Gewicht, wenn auch die Zahl der Schneedeckentage einbezogen wird. Die Zahl der Schneedeckentage ist die zweitstärkste Einflußgröße mit nahezu gleichem Gewicht in allen drei Modellen, in denen diese Variable vorkommt. Ebenso hat die Zahl der Frosttage in beiden Ansätzen, in denen sie vorkommt, nahezu das gleiche Gewicht. Grundsätzlich entspricht dies der Rangfolge der Korrelationskoeffizienten der Wetterpara-

meter, die bei den Einfachregressionen gefunden wurde.

Im Modell 4 tritt erstmalig ein Term mit negativem Vorzeichen auf. Das bedeutet, daß mit zunehmender Zahl der Eistage der Streusalzbedarf sinkt. Für sich allein genommen wäre eine solche Aussage natürlich nicht haltbar. Hier wird jedoch offensichtlich im Zuge der schrittweisen Minimierung der Reststreuung einer Übersteuerung bei den drei ersten Einflußgrößen entgegengewirkt. Dieses Gegensteuern mit der Variablen „Eistage“ ergibt auch bei Plausibilitätsüberlegungen einen Sinn, da an Eistagen die Wahrscheinlichkeit, daß Feuchte oder Niederschlag auftritt, relativ gering ist.

In Bild 5.8 sind die Schätzungen des Tausalzbedarfs SB_i mit diesen 4 Modellen seit Beginn des Streusalzeinsatzes einander gegenübergestellt. Sie zeigen insgesamt eine gegenseitig sehr gute Übereinstimmung, im Einzelfall aber auch deutliche Abweichungen voneinander.

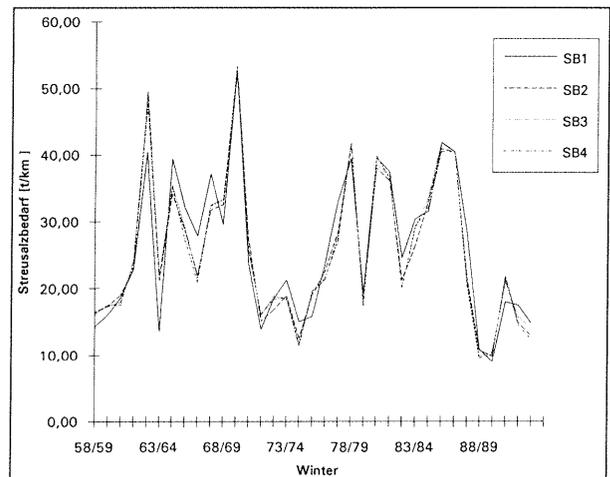


Bild 5.8: Gegenüberstellung der vier Modelle für den gesamten Betrachtungszeitraum (Winter 1958/59 bis 1992/93)

Für den Winter 70/71 ergeben alle vier Modelle nahezu gleiche Werte, während z. B. im Winter 66/67 sehr deutliche Abweichungen auftreten. Die Darstellung zeigt darüber hinaus, daß die multivariaten Ansätze erheblich enger beieinander liegen als das Modell 1 mit der Zahl der Schneefalltage als einziger unabhängiger Variablen.

In Bild 5.9 ist für das Modell 1 mit der Zahl der Schneefalltage als einziger unabhängiger Variablen der tatsächliche Tausalzverbrauch dem mit dem Modell geschätzten Tausalzbedarf gegenübergestellt. Die Darstellung bestätigt zunächst einmal die Eingangshypothese für das gewählte Verfahren, wonach die Zeitreihe des Tausalzverbrauchs in drei

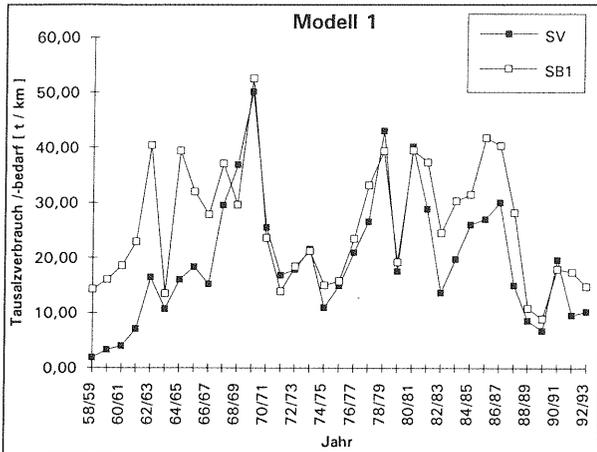


Bild 5.9: Gegenüberstellung von geschätztem Tausalzbedarf und tatsächlichem Verbrauch: Modell 1

Abschnitte mit unterschiedlicher Ausprägung eingeteilt werden kann. Deutlich wird im linken Bereich der Darstellung, daß im Zeitraum Winter 1958/59 bis Winter 1967/68 (Abschnitt I) wegen fehlender Geräte zum Ausbringen weit weniger Salz gestreut wurde als nach dem Wettergeschehen erforderlich. Im Abschnitt II (Winter 1968/69 bis 1980/81), für den die Regression durchgeführt wurde, liegen Tausalzverbrauch und Tausalzbedarf voraussetzungsgemäß sehr eng beieinander. Im Abschnitt III (Winter 1981/82 bis 1992/93) liegt der Tausalzverbrauch wiederum deutlich unterhalb des Tausalzbedarfs. Besonders deutlich wird dies in der ersten Hälfte des Abschnittes III.

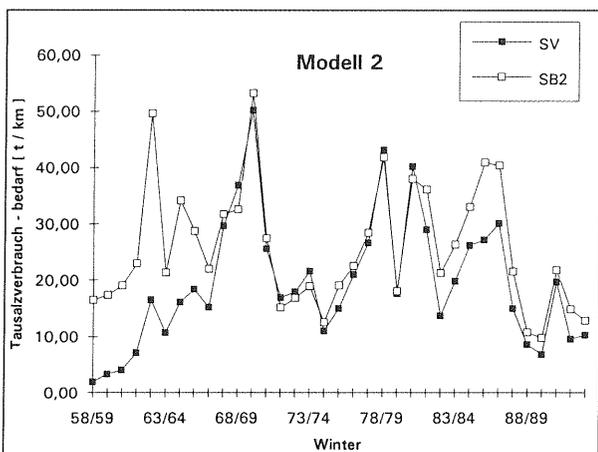


Bild 5.10: Gegenüberstellung von geschätztem Tausalzbedarf und tatsächlichem Verbrauch: Modell 2

Ähnliche Zusammenhänge ergeben sich bei den übrigen Modellen mit zwei und mehr unabhängigen Variablen (Bild 5.10–5.12). Erkennbar wird, daß mit steigender Zahl unabhängiger Variablen entsprechend dem steigenden Korrelationskoeffizienten auch die Anpassung von geschätztem und tatsäch-

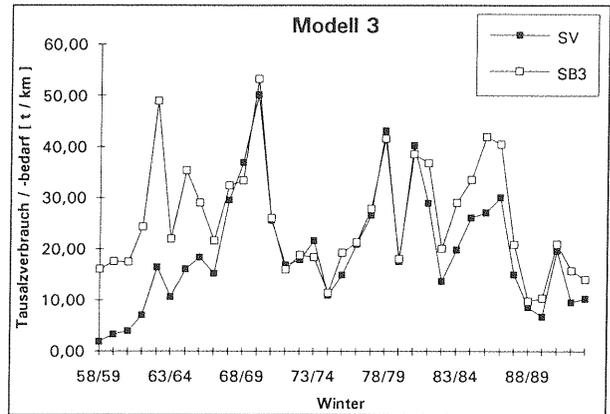


Bild 5.11: Gegenüberstellung von geschätztem Tausalzbedarf und tatsächlichem Verbrauch: Modell 3

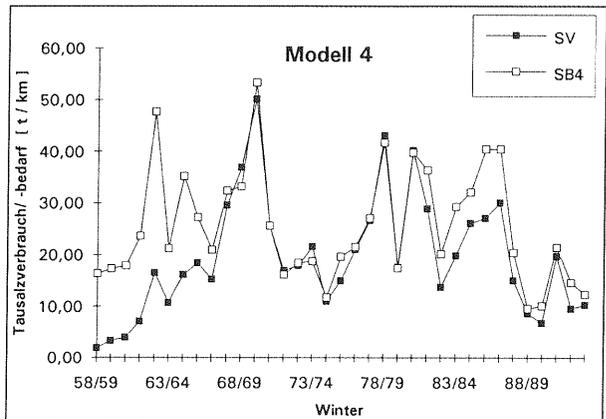


Bild 5.12: Gegenüberstellung von geschätztem Tausalzbedarf und tatsächlichem Verbrauch: Modell 4

lichem Tausalzverbrauch im Abschnitt II zunimmt. Dennoch sind in einigen Wintern (z. B. Winter 1975/76) große Abweichungen zwischen den beiden Größen erkennbar, die durch keines der ausgewählten Modelle erklärt werden. In Bild 5.13 ist als Mittelwert über alle vier Modelle der tatsächliche Tausalzverbrauch bezogen auf den geschätzten Tausalzbedarf in Prozent aufgetragen. Es wäre zu erwarten gewesen, daß in diesem Abschnitt wegen der guten Korrelationen nur sehr geringe Abweichungen von dem Erwartungswert 100 % auftreten. Trotz der guten Korrelationen treten im Einzelfall jedoch Abweichungen bis nahezu 20 % auf. Allerdings sind die mittleren Abweichungen zwischen tatsächlichem und geschätztem Wert deutlich geringer. Sie nehmen von 11,2 % bei dem einfachen Ansatz (Modell 1) über 8,8 % und 6,8 % auf ca. 6,1 % bei dem Ansatz mit den vier Einflußgrößen (Modell 4) ab.

Über die Ursachen und Auswirkungen der festgestellten Schätzfehler wird im Abschnitt 6 zusammen mit den Grenzen des Verfahrens und dem beabsichtigten weiteren Vorgehen diskutiert.

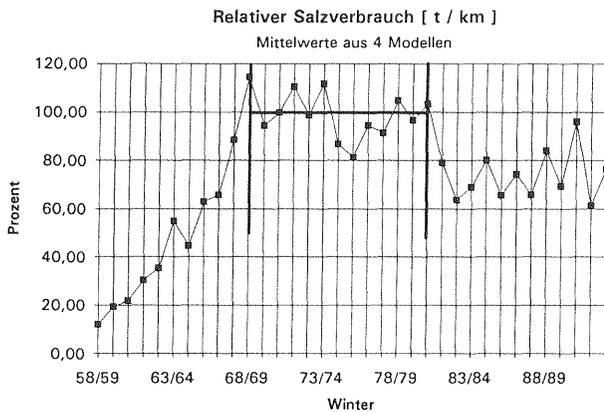


Bild 5.13: Relativer Tausalzverbrauch

Mit den Regressionsgleichungen läßt sich ein Schätzwert für den Tausalzverbrauch als hypothetischer Bedarfswert unmittelbar angeben. Eines expliziten Winterindex bedarf es dabei nicht. Ein solcher Index, der dann auch z. B. zur Bewertung des Tausalzverbrauchs in Kommunen oder auf dem Bundesstraßennetz herangezogen werden könnte, läßt sich jedoch auch aus den Gleichungen für den hypothetischen Streusalzbedarf herleiten, indem die Einzelwerte auf ein beliebiges Niveau, z. B. auf ihren langjährigen Mittelwert, bezogen werden. Im vorliegenden Fall liegt es nahe, als Bezugszeitraum den Abschnitt II der Zeitreihe zu wählen, für den ein allein witterungsabhängiger Winterdienst unter den in diesem Zeitraum geltenden organisatorisch-technischen Bedingungen vorausgesetzt worden war. In Bild 5.14 ist beispielhaft für das Modell 4 der auf den Zeitraum Winter 1968/69 bis Winter 1980/81 bezogene Winterindex dargestellt. Der Wert Null des Winterindex entspricht dabei einem durchschnittlichen Winter, positive Werte weisen auf einen strengen und negative Werte auf einen milden Winter. Das Bild macht deutlich, daß die Winterstrenge erheblichen Schwankungen unterliegt. Dabei fällt auf, daß die Spitzen nach oben (strengerer Winter) deutlicher ausgeprägt sind (maximaler Wert über + 100 %) als die (häufigeren) milden Winter, die maximal etwa 65 % vom mittleren Winter abweichen.

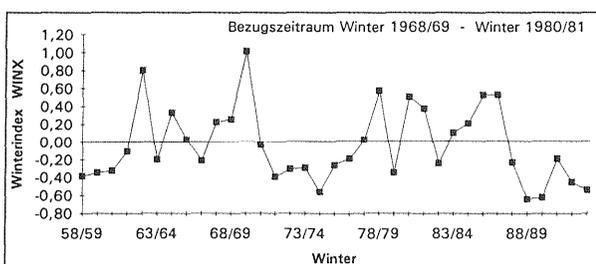


Bild 5.14: Winterindex Modell 4

Der Vergleich mit dem von THORNES ermittelten Winterindex nach HULME zeigt deutliche Parallelen der langfristigen Winterwetterentwicklung im Vereinigten Königreich (Bild 3.2) und der Bundesrepublik Deutschland. Die Werte zeigen eine milde Witterungsperiode in den 70er Jahren (Winter 1970/71 bis Winter 1977/78), anschließend eine wechselhafte Periode mit eher strengen Wintern und ab dem Winter 1986/87 eine weitere extrem milde Witterungsperiode.

Es sei noch einmal unterstrichen, daß dieser Winterindex kein Maß für die Winterstrenge im engeren meteorologischen Sinne darstellt, sondern den Winter hinsichtlich seines Tausalzbedarfs klassifiziert. Dennoch sind Ähnlichkeiten mit den in den Bildern 5.15–5.18 dargestellten Abweichungen der verwendeten meteorologischen Parameter von ihrem langjährigen Mittelwert unverkennbar.

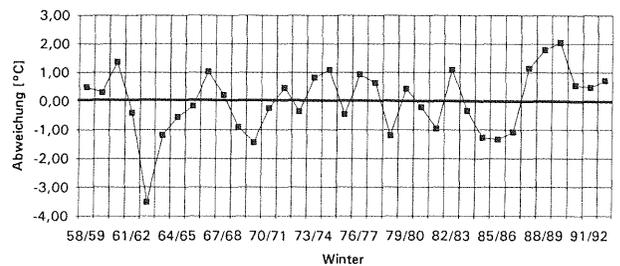


Bild 5.15: Abweichung der Temperatur vom langjährigen Mittelwert

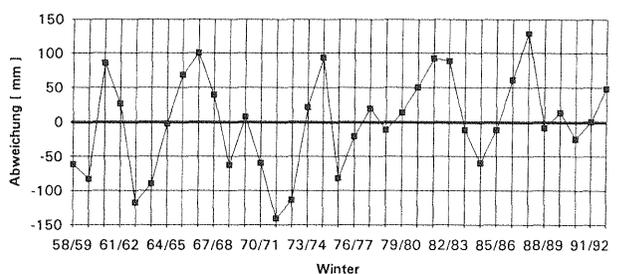


Bild 5.16: Abweichung der Niederschlagshöhe vom langjährigen Mittelwert

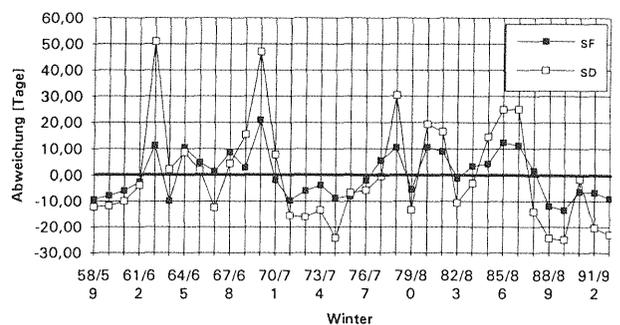


Bild 5.17: Abweichung der Anzahl der Tage mit Schneefall und Schneedecke vom langjährigen Mittelwert

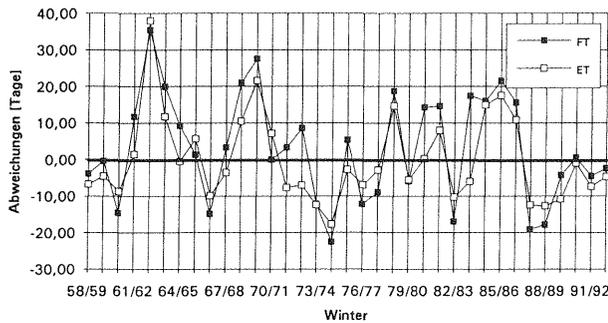


Bild 5.18: Abweichung der Anzahl der Frost- und Eistage vom langjährigen Mittelwert

Langfristiges Ziel der Untersuchungen zur Bewertung der Winterstrenge ist die Beurteilung der Höhe des Streusalzverbrauchs am Ende einer Winterperiode. Dabei interessiert vor allem die Fragestellung, ob mit dem Salz – bezogen auf den witterungsbedingten Tausalzbedarf – sparsam, d. h. umweltbewußt umgegangen wurde. Im folgenden wird diskutiert, inwieweit mit den vorliegenden Ergebnissen diese Frage beantwortet werden kann. In Bild 5.19 ist dazu der relative Minderverbrauch an Tausalz für den Abschnitt III der Zeitachse seit dem Winter 1981/82 dargestellt. Der Winterindex nach dem Modell 2 ist aus Maßstabsgründen 100fach überhöht dargestellt.

Die Darstellung zeigt, daß der tatsächliche Verbrauch mit Ausnahme des Winters 1990/91 zwischen 60 und 80 % des Bedarfs liegt. Zu erwarten wäre, daß in dieser Form der relativen Betrachtung der Tausalzverbräuche sich ein nach rechts ständig fallender Verlauf einstellen würde.

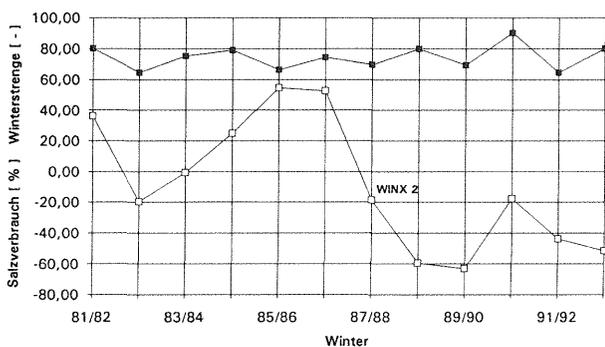


Bild 5.19: Tausalzverbrauch in Prozent des hypothetischen Streusalzbedarfs (oben) mit dem Winterindex nach Modell 2 (unten)

Die Streuungen können durch zweierlei bedingt sein: Zum einen stellen sie den Schätzfehler des Modells im Sinne eines verbleibenden Restfehlers dar, zum anderen legt die stärkere Streuung der Werte in der milden rechten Hälfte der Darstellung die Vermutung nahe, daß gerade in milden Wintern

ein bestimmter Grundverbrauch an Tausalzen durch vorsorgliches witterungskonformes Streuen erforderlich ist, der durch die Witterungsparameter nicht hinreichend erklärt werden kann. Diese Vermutung wird durch die Darstellung in Bild 5.20 bestärkt, in der die tatsächlichen Verbräuche in Prozent der modellmäßig errechneten „erforderlichen“ Verbräuche für alle Modelle einander gegenübergestellt sind.

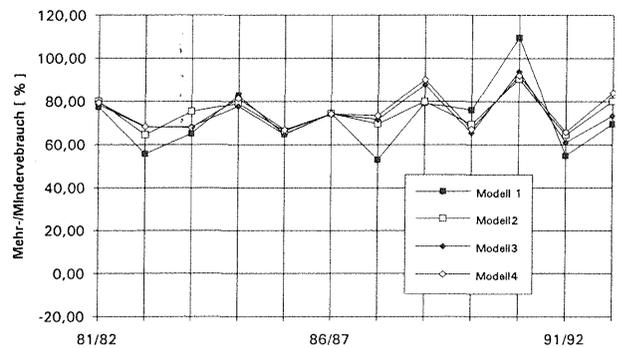


Bild 5.20: Tausalzeinsparung: Gegenüberstellung der 4 Modelle

Die Darstellung macht zweierlei deutlich: Zum einen liegen die Schätzungen aller Modelle in der winterlich strengeren linken Hälfte der Darstellung deutlich enger beieinander, zum anderen folgen sie offensichtlich einer einheitlichen Tendenz. Die größten Ausschläge sowohl in positiver als auch in negativer Richtung ergeben sich bei dem Modell 1, das in einem Fall sogar zur Schätzung eines Mehrverbrauchs gegenüber der meteorologisch „notwendigen“ Menge führt. Wie eine Einzelfallbetrachtung zeigt, ergaben sich in diesem Winter starke Unterschiede in der Ausprägung des Winterwetters in der Nord- und in der Südhälfte der Bundesrepublik. Insbesondere aber zeigt die Einzelfallbetrachtung, daß z. B. 1990/91 auch noch in dem nicht in die Bewertung einbezogenen April 1991 gegenüber den übrigen Wintermonaten ein überdurchschnittlicher Schneefall mit bis zu 13 (Arnsberg) Frosttagen zu verzeichnen war. Die gefundenen Modelle sind offenbar nicht in der Lage, derartige Besonderheiten implizit mitzuerfassen, so daß ein gemäß Modell konstaterter Mehrverbrauch nicht notwendigerweise als Hinweis auf unnötige Streusalzverwendung zu interpretieren ist.

Die Minderverbräuche liegen in der linken Hälfte der Darstellung Bild 5.20 niedriger als in der vergleichsweise milden rechten Hälfte. In der Gesamtbewertung ergeben sich mit den 4 Modellen die folgenden Werte (Bild 5.21).

Verringerung des Streusalzverbrauchs [%]				
Winter	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4
1981/82 - 1986/87	29,9	26,7	28,0	27,9
1987/88 - 1992/93	26,2	24,5	24,4	21,2
Gesamtzeitraum	29,1	25,5	26,2	24,1

Bild 5.21: Tausalzeinsparung gegenüber dem hypothetischen Bedarf

Diese Zahlen erlauben die Gesamtbeurteilung, daß die vielfältigen Bemühungen zur Einsparung von Tausalz in den letzten 10 Jahren zu einer Reduzierung der gestreuten Mengen in der Größenordnung von 25 – 30 % geführt haben. Vermutlich steckt in den ergriffenen technischen und organisatorischen Maßnahmen noch ein größeres Potential. Weitere Einsparungen sind zu erzielen, wenn weitere intensive Schulung des Personals betrieben wird und mit dem Ausbau des Straßenzustands- und Wetterinformationssystems SWIS witterungskonformes Streuen auf eine sicherere Basis gestellt wird.

6 Auswertung und Diskussion

In den folgenden Abschnitten werden die erzielten Ergebnisse einer kritischen Würdigung unterzogen. Dabei werden insbesondere Aussagekraft und Grenzen des vorgeschlagenen Verfahrens aufgezeigt. Dem folgt eine Skizzierung des Nutzens der Forschungsarbeit und der Verwendungsmöglichkeiten des Forschungsergebnisses. Abschließend werden Anregungen für das (beabsichtigte) weitere Vorgehen gegeben.

6.1 Diskussion der Ergebnisse

Wie bereits im Bild 5.13 erkennbar ist, fallen die tatsächlichen Tausalzverbräuche im Abschnitt III ab Winter 1981/82 zunächst steil ab in einen Bereich von etwa 60 – 80 % des bei Fortschreibung des für die siebziger Jahre ermittelten „meteorologisch erforderlichen“ Salzverbrauchs. Etwa ab der Winterperiode 1987/88 streuen die Werte stärker als in den vorhergehenden 6 Winterperioden und pendeln um einen geringfügig höheren Mittelwert. In Bild 6.1 ist beispielhaft für das Modell 2 der gegenüber dem theoretischen Bedarf tatsächliche Minderverbrauch in t/km zusammen mit der Winterstrenge dargestellt, die aus Maßstabsgründen 10fach überhöht wurde. Es zeigt sich, daß ein gewisser Zusammenhang zwischen dem Minderverbrauch und der Winterstrenge besteht. In der linken Hälfte der Darstellung mit den strengeren Wintern (Winterindex im positiven Bereich) sind deutliche

Minderverbräuche feststellbar, während in der rechten Hälfte der Darstellung wesentlich milderen Wintern (negative Werte der Winterstrenge) nur geringfügige Minderverbräuche feststellbar sind. Hier wird eine Schwäche des Verfahrens deutlich, die allerdings bei der vorgesehenen Weiterentwicklung des Verfahrens in diesem Umfang vermutlich nicht mehr ins Gewicht fallen würde. Durch die Mittelwertbildung über die gesamte Fläche der Bundesrepublik (alte Länder) mit den Werten von 10 Klimastationen gehen Unterschiede der Ausprägung des Winterwetters etwa der norddeutschen Küstenregion oder der Schwäbischen Alb verloren. So geht ein Wintertag in Bayern, der u. U. einen erheblichen Winterdienstaufwand nach sich zieht, nur noch mit einem Zehntel seines Gewichtes in die Berechnung ein.

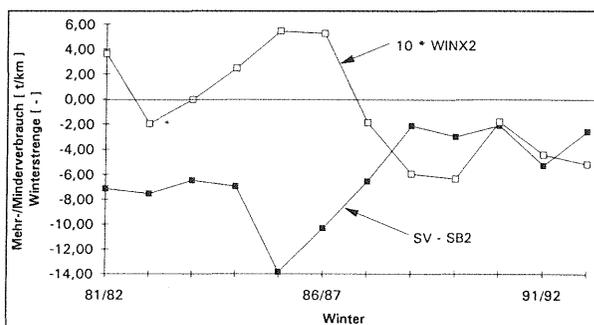


Bild 6.1: Winterstrenge und Minderverbrauch an Tausalz

Es ist anzunehmen, daß strenge oder normale Winter mehr oder weniger gleichmäßig über die gesamte Fläche der Bundesrepublik verteilt sind, wobei im allgemeinen in den (höher gelegenen) süddeutschen Ländern Baden-Württemberg und Bayern eine deutlichere Ausprägung des Winters zu erwarten ist. Milde Winter sind dagegen häufig dadurch gekennzeichnet, daß winterliches Wetter nur im süddeutschen Raum und in Gebirgslagen auftritt, während in der Norddeutschen Tiefebene keine Witterungsbedingungen herrschen, die zu Fahrbahnglätte führen. Die Wahrscheinlichkeit, daß süddeutsche „Teil“-Winter durch nichtwinterliches Wetter im Norden überdeckt werden, ist um so größer, je milder insgesamt der Witterungsverlauf des gesamten Winters ist. Entsprechend machen sich die Fehlschätzungen mit den entwickelten Modellen besonders in milden Wintern bemerkbar. Um einen Einfluß der Milde des Klimas auf den errechneten Tausalzverbrauch herauszufinden, wurden in Bild 6.2 ebenfalls für den Abschnitt III der gesamten Zeitreihe die prozentualen Minderverbräuche in Abhängigkeit vom tatsächlichen Tausalzverbrauch (als einfaches Maß für die Winterstrenge) aufgetra-

gen. Die Darstellung zeigt, daß eine solche einfache Abhängigkeit offenbar nicht besteht.

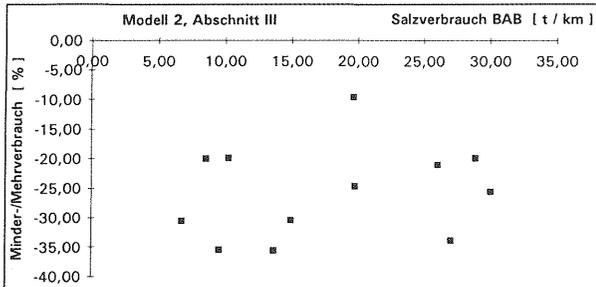


Bild 6.2: Minderverbrauch als Funktion des Ist-Verbrauchs

Hier wird auch eine besondere Schwäche des vorgesehenen Verfahrens deutlich. Je geringer die Häufigkeit des Auftretens einzelner Bedingungen für Glättebildung (Kälte und Feuchtigkeit), d. h. je geringer die Gesamtzahl der entsprechenden Tage in einer Winterperiode, desto geringer ist auch die Wahrscheinlichkeit, daß beide Bedingungen gleichzeitig auftreten. Aus diesem Grunde ist denjenigen Parametern zur Beschreibung des Winterwetters der Vorzug zu geben, die beide Aspekte gleichzeitig repräsentieren, d. h. Zahl der Tage mit Schneefall und (eingeschränkt) Zahl der Schneedeckentage. Es sind dies die Parameter, die auch die beste Korrelation zum Tausalzverbrauch zeigten.

Die Eignung der in die Untersuchung einbezogenen Wetterparameter läßt sich abschließend über das bereits im Kapitel 4 bei ihrer Auswahl Gesagte hinaus wie folgt beurteilen:

– mittlere Temperatur T:

Die Temperatur ist ein Mittelwert, der – über einen Monat gemittelt – sowohl kühle Nächte als auch wärmere Tageszeiten gleichzeitig repräsentiert. Wegen dieser großen Spanne für die Mittelbildung ist die Temperatur ein weniger geeigneter Parameter zur Beschreibung der Winterstrenge. Hinzu kommt, daß meteorologisch betrachtet keine eindeutige Funktion zwischen der Temperatur und der Winterstrenge im vorliegenden Sinne besteht, da in der Regel sehr tiefe Temperaturen insbesondere über einen längeren Zeitraum mit geringer Luftfeuchtigkeit und wenig Niederschlägen verbunden sind. Eine solche Witterungsperiode senkt den mittleren Temperaturwert nicht unerheblich; auf der anderen Seite ist während dieser Zeit kaum Winterdienst und Tausalzeinsatz erforderlich. Die mittlere Temperatur ist daher als Parameter zur Beschreibung der für den Winterdienst maßgebenden „Winterstrenge“ nicht geeignet.

– Niederschlag N:

Wie auch schon durch die geringen Korrelationskoeffizienten zum Tausalzverbrauch und zu den anderen Winterparametern belegt, eignet sich die Niederschlagshöhe nicht zur Beschreibung der Winterstrenge, da sie nur eine der beiden Bedingungen für die Glättebildung (nur Feuchte, nicht aber Kälte) repräsentiert. Auch der multiple Ansatz zusammen mit der Temperatur ergibt keine befriedigende Korrelation. Das liegt vor allem daran, daß beide Werte Monatsmittel- bzw. Monatssummenwerte sind und wegen dieser Mittelbildung hinreichend genaue Aussagen hinsichtlich des zeitlichen Zusammentreffens beider Bedingungen nicht möglich sind.

– Tage mit Schneefall SF:

Schneefalltage repräsentieren (im Rahmen der hier diskutierten Parameter) in fast idealer Weise das Zusammentreffen von Niederschlag und ausreichend tiefen Temperaturen. Allerdings bedeutet Schneefall nicht immer auch das Liegenbleiben von Schnee, z. B. wenn bei Lufttemperaturen um den Gefrierpunkt die Temperatur der Fahrbahndecke noch oberhalb 0 °C liegt. Bei geringer Niederschlagsintensität ist dann ein Winterdienstesatz nicht erforderlich. Bei größeren Schneemengen wird der Schnee durch den Verkehr zu einer kompakten Eisschicht zusammengepreßt, die in der Regel einen sehr intensiven Winterdienstesatz erfordert. Allerdings gleichen sich hinsichtlich der erforderlichen Winterdienstaktivitäten Tage mit größeren Schneemengen und Tage mit sehr geringen Schneemengen in gewissem Maße aus, so daß die Zahl der Schneefalltage der wichtigste Faktor zur Beschreibung der Winterstrenge ist.

– Tage mit Schneedecke SD:

Auch dieser Parameter repräsentiert beide Glättebedingungen, nämlich das Vorhandensein von Feuchtigkeit und Kälte. Einschränkend ist jedoch zu bemerken, daß Schneedeckentage nicht zwingend auch Winterdienstesatztage sind. Ein gut funktionierender Winterdienst wird schon am Tage des Schneefalls eine apere Fahrbahndecke erzeugen, so daß an den Folgetagen keine weiteren Einsätze erforderlich sind, es sei denn, es erfolgen neue Schneefälle oder es muß Glättebildung durch Gefrieren des von den Schneewällen nach der Tageserwärmung abfließenden Schmelzwassers verhindert werden. In diesem Sinne kann die Berücksichtigung der Zahl der Schneedeckentage die Aussagekraft eines Modells verbessern.

– Frosttage FT:

Frosttage repräsentieren nur eine der beiden Bedingungen für Glättebildung. Frost führt nur in Verbindung mit Fahrbahnnässe zu Eisglätte und mit hoher Luftfeuchtigkeit bei Unterschreiten des Taupunktes zu Reifglätte. Über beide Feuchtigkeitsarten liegen mit den verwendeten meteorologischen Parametern keine Informationen vor. Beide Glättearten, Eisglätte (überfrierende Nässe) und Reifglätte, bedingen jedoch einen erheblichen Winterdienstaufwand, der durch die Schneefall- und Schneedeckentage nicht repräsentiert werden kann. Frosttage sind auf der anderen Seite besonders unterschiedlich ausgeprägt. So gilt als Frosttag ebenso ein Tag mit einer mittleren Tagestemperatur von z. B. + 5 °C und einer Mittagstemperatur von + 10 °C, an dem die Temperatur in den frühen Morgenstunden kurzzeitig unter den Gefrierpunkt fällt, wie ein Tag mit nächtlichen Temperaturen bis zu z. B. –7 °C, an dem die Mittagstemperatur kurzfristig über den Gefrierpunkt ansteigt. Im ersten Fall kann ein einzelner Streueinsatz mit geringer Streudichte zur Verhinderung von Reifglätte erforderlich sein, im zweiten Fall bei nasser Fahrbahn sind unter Umständen mehrere Einsätze notwendig. Im Extremfall bleibt im ersten Fall die Fahrbahntemperatur den ganzen Tag über dem Gefrierpunkt und im zweiten Fall ganztägig darunter. Trotzdem sollte die Zahl der Frosttage in einem Modell berücksichtigt werden, da nur sie die Glättefälle Eis- und Reifglätte repräsentieren kann.

– Eistage ET:

Für Eistage gilt ähnliches wie für die Schneedeckentage. Sie repräsentieren die größeren Kältegrade, bei denen in der Regel auch mit durchgehend negativen Fahrbahndeckentemperaturen zu rechnen ist. Allerdings sind Frostperioden vielfach nicht mit feuchter Witterung oder Niederschlägen verbunden, so daß hier nur selten mit Glättebildung und Winterdienst gerechnet werden muß. In diesem Sinne eignet sich die Zahl der Eistage als (negativer) Korrekturfaktor zur Zahl der Frosttage. Dies wird durch das Ergebnis der Regressionsanalyse, die im Modell 4 (s. Gl. 17) einen Term mit negativem Vorzeichen ergibt.

Mit den dargestellten Modellen wird versucht, den Tausalzverbrauch anhand einer Kenngröße der Winterstrenge zu bewerten, die ausschließlich auf meteorologischen Parametern basiert. Neben den Witterungseinflüssen, die die dominierende Rolle

bei der hier vorliegenden Fragestellung spielen, gibt es eine Reihe weiterer, nicht witterungsbedingter Einflüsse auf den Streusalzverbrauch [31, 32]. Solche vorwiegend organisatorisch-administrativen Einflüsse auf den Salzverbrauch sind u. a. die Funktion und die Verkehrsbedeutung einer Straße. Beide Faktoren bestimmen über das „Anforderungsniveau für den Winterdienst“ [25] die grundsätzliche Intensität des Winterdienstes auf einer bestimmten Strecke und damit auch die Höhe des Tausalzverbrauchs. Das Anforderungsniveau für den Winterdienst wurde als gemeinsamer Maßstab für die „Serviceleistung Winterdienst“ von den Betriebsreferenten der Länder festgelegt. Dieser Maßstab ist als räumlich und zeitlich weitgehend konstant anzusehen, so daß er als mögliche Fehlerquelle bei dem interregionalen Vergleich ebenso wie bei der Frage nach der Entwicklung im Abschnitt III der Zeitreihe keinen wesentlichen Einfluß haben dürfte. Bei Betrachtung des gesamten Zeitraumes jedoch müssen Veränderungen im Anforderungsniveau als mögliche „Fehlerquelle“ angesehen werden.

Bei der Bewertung einer einzelnen Meisterei wäre zu berücksichtigen, daß die individuelle Risikobereitschaft des Straßenmeisters den Streusalzverbrauch erheblich beeinflussen kann. Auch dieser Faktor kann jedoch bei der großräumigen Fragestellung vernachlässigt werden.

Eine weitere Fehlerquelle, die die Güte der Ergebnisse beeinflussen könnte, ist das Verfahren zur Ermittlung des durchschnittlichen Salzverbrauchs. Die Verbrauchsangaben der Bundesländer basieren z. T. auf Schätzungen des Füllungsgrades der Salzhallen, die fehlerbehaftet sein können. Die absoluten Verbrauchsmengen wurden bis zum Winter 1972/73 auf den Streckenkilometer bezogen und anschließend auf den sogenannten Bewertungskilometer, in den die Rampen und mehrstreifigen Querschnitte eingehen. Bei den weiterführenden Untersuchungen ist eine entsprechende Korrektur vorgesehen.

Von erheblicher Bedeutung auf die Höhe des Tausalzverbrauchs ist die Verkehrsbelastung einer Straße. Durch die Wärmeabstrahlung der Motoren, die mit der Walkarbeit der Reifen erzeugte Wärme und die beim Zusammendrücken von Schnee entstehende Wärme wird offensichtlich der Winterdienst wirkungsvoll unterstützt und der Salzbedarf verringert. Für den interregionalen Vergleich spielt dieser Faktor vermutlich nur eine geringe Rolle; ob bei Bewertung der Entwicklung über einen längeren

Zeitraum Veränderungen der Verkehrsbelastung berücksichtigt werden müssen, kann derzeit nicht gesagt werden.

Für Bundesstraßen muß mit erheblich geringeren Korrelationen zwischen dem Streusalzverbrauch und den Winterparametern gerechnet werden, so daß die Sicherheit einer Aussage über den Tausalzbedarf entsprechend unsicherer wird. Dies hängt u. a. damit zusammen, daß die Umrüstung auf die jeweils neueste Gerätetechnik auf den Bundesstraßen generell nicht so schnell wie auf Autobahnen und in den einzelnen Ländern nach unterschiedlichen Maßstäben erfolgte. Hinzu kommen zusätzliche Unwägbarkeiten etwa dadurch, daß die einzelnen Bundesländer unterschiedliche Entscheidungen bezüglich der Feuchtsalztechnik (FS 5 vs. FS 30) getroffen haben.

Insgesamt besteht dennoch ein relativ guter Zusammenhang zwischen dem Tausalzverbrauch auf der Autobahn und dem auf den Bundesstraßen (Bild 6.3) mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,901$. Wird in die gefundene Beziehung zwischen dem Tausalzverbrauch auf Bundesstraßen SV_B und auf Autobahnen SV_{BAB}

$$SV_B = 1,51 + 0,235 * SV_{BAB} \quad (18)$$

zum Beispiel die für den Salzbedarf auf Autobahnen gefundene Beziehung Modell 3

$$SB_{BAB,3} = -10,72 + 0,65 * SF + 0,23 * SD + 0,12 * FT \quad (19)$$

eingesetzt, so folgt mit

$$SB_{B,3} = -1,01 + 0,15 * SF + 0,05 * SD + 0,03 * FT \quad (20)$$

eine weitere Möglichkeit, den Tausalzbedarf auf den Bundesstraßen zu schätzen. Ob dieser Weg zielführend ist, soll im Zuge der vorgesehenen Fortführung der Arbeiten geklärt werden.

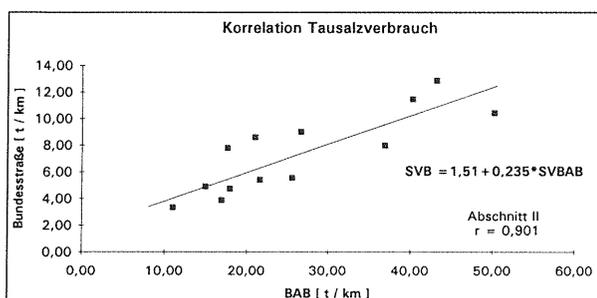


Bild 6.3: Vergleich Bundesautobahn und Bundesstraße

6.2 Nutzenbetrachtung

In allen Industriestaaten, in denen zur Aufrechterhaltung des Verkehrs auch unter winterlichen Witterungsbedingungen und zur Gewährleistung eines sicheren Verkehrsablaufs große Winterdienstaufwendungen gemacht werden müssen, wird in den letzten Jahren versucht, die Kosten und die eingesetzten Ressourcen in Abhängigkeit von der Winterstrenge zu erfassen. Vielfach zielen diese Bemühungen auf eine Bewertung der Winterdienstaktivitäten mit dem Ziel, weitere Einsparpotentiale zu erschließen.

Mit dieser Arbeit ist es erstmals für den Bereich der Bundesrepublik gelungen, in einem geschlossenen Ansatz mit Hilfe von meteorologischen Daten die Winterstrenge so zu beschreiben, daß eine Bewertung des Tausalzverbrauchs durch Vergleich mit einem geschätzten witterungsabhängigen Tausalzbedarf erfolgen kann. Der gewählte Ansatz hat die in ihn gesetzten Erwartungen prinzipiell erfüllt, so daß eine Verfeinerung der Modelle erfolgversprechend im Sinne einer noch besseren Erklärungstiefe erscheint. Allerdings weist der Ansatz noch einige Schwächen auf, deren Beseitigung in weiteren Untersuchungen angestrebt werden soll.

Erstmals ist es auch gelungen, die vielfältigen Bemühungen zur Einsparung von Tausalz witterungsunabhängig zu quantifizieren. Mit einer bislang erzielten Tausalzeinsparung von etwa 25 – 30 % erscheint das Einsparpotential noch nicht ausgeschöpft. Hier gilt es, insbesondere durch Schulung des Personals und Verbesserung der Information über die Wetterentwicklung, weitere Einsparungen zu erschließen.

Für die Ermittlung der Kenngrößen werden Daten verwendet, die vom Deutschen Wetterdienst rechtzeitig veröffentlicht werden, so daß auch Modelle mit einer breiteren Abstützung auf weitere meteorologische Meßstellen mit geringem Aufwand realisierbar sind.

6.3 Anregungen für das weitere Vorgehen

Aus der Diskussion der Ergebnisse und der Nutzenbetrachtung ergibt sich zusammen mit dem im Auftrag formulierten Ziel, eine einfache Methode zu entwickeln, eine Reihe von Anregungen für das weitere Vorgehen in einer zweiten Stufe des Projektes.

Nachdem im vorliegenden Bericht die grundsätzliche Eignung des Verfahrens aufgezeigt worden ist,

soll in die weiteren Untersuchungen vor allem auch der Tausalzverbrauch auf den Bundesstraßen einbezogen werden. Dabei sind wie aufgezeigt verschiedene Wege denkbar.

Von der gesamten Fläche der Bundesrepublik ausgehend, sollen schrittweise zunächst Ansätze für eine Trennung in eine Nord- und eine Südhälfte untersucht werden, um der unterschiedlichen geographischen Höhe und unterschiedlichen Entfernung zur Küste sowie der dadurch bedingten Unterschiede im Aufwand für den Winterdienst gerecht zu werden. Die bisherigen Erkenntnisse deuten darauf hin, daß mit der feineren regionalen Klassifizierung zugleich eine Verbesserung der Aussagekraft der Modelle verbunden ist.

Weitere Verbesserungen scheinen möglich, wenn die Berechnung des Tausalzbedarfs auf eine breitere meteorologische Datenbasis gestellt wird. Dies ist mit nur geringem Zusatzaufwand leicht möglich, da ein Teil der mit der Auswahl der Klimastationen für diese Grundlagenuntersuchungen verbundenen Restriktionen (Aufzeichnungen seit den 50er Jahren) in Zukunft entfallen kann.

Ein weiterer Schritt ist die Diskussion der Verbrauchszahlen auf Länderebene, die insbesondere dann mit geringem Aufwand realisierbar ist, wenn die benötigten Daten vom Deutschen Wetterdienst in Zukunft auf Datenträger zur Verfügung gestellt werden.

Eine weitere Verbesserung des Verfahrens kann auch erwartet werden, wenn mit einer um einen Monat auf den Zeitraum November bis April verschobenen Winterperiode gearbeitet wird. Nach bisherigen Erkenntnissen ist zumindest aus der Sicht des Winterdienstes mit größerer Wahrscheinlichkeit im April mit nennenswerter winterlicher Witterung zu rechnen als im Oktober.

Ein voraussichtlich deutlich schwieriger zu lösendes Problem ergibt sich, wenn die räumliche Feingliederung noch weiter getrieben wird und etwa Darstellungen auf Bauamtsebene oder auf Ebene der einzelnen Meistereien durchgeführt werden. Hier stellt sich als neues Problem die Frage der Repräsentativität der Klimastation für den Bezugsbezirk einer Meisterei, wenn nicht gar erneut die Grundsatzfrage gestellt wird, ob in einem solchen Fall das mikroskopische Modell und damit die Meßwerte von Glättemeldeanlagen zielführender zur Abschätzung des meteorologisch bedingten Tausalzbedarfs sind.

Literatur

- [1] Anonym: A Winter Index for North America. Highways Meteorology, Nr. 2, 1986
- [2] BACKHAUS, K., et al.: Multivariate Analysemethoden. Berlin (u. a.), 1987
- [3] COST 309: Road Weather Conditions. CEC, Directorate-General for Transport; Ed. by: F. Fabre, A. Klose; Final Report 1992
- [4] CZEPLAK, G., u. KASTEN, F.: Parametrisierung der atmosphärischen Wärmestrahlung bei bewölktem Himmel. Meteorologische Rundschau, 40. Jahrg., Heft 6, 1987
- [5] Deutscher Wetterdienst, Offenbach: Untersuchungen über kleinräumige Klimaänderungen durch Straßenbauten. Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des Bundesministers für Verkehr, Heft 155, 1973
- [6] DÖLLE, E., u. WEISE, M.: Prognosesystem für das Auftreten von Fahrbahnglätte der Winterperiode. Informationen des Zentralen Erzeugnisgruppenverbandes Straßenwesen Nr. 1, 1976
- [7] DURTH, W., u. HANKE, H.: Feuchtsalzstreuung im kommunalen Straßenwinterdienst – Anwendung, Einsparpotentiale und Wirtschaftlichkeit. Der Städtetag Nr. 44, Heft 8, 1991
- [8] DURTH, BARK, BÖHM, LEVIN, MATTHESS: Winterdienst und Verkehrssicherheit (innerorts). Abschlußbericht zum FP 8938 der BASt, Nov. 1993 (unveröffentlicht)
- [9] DURTH, BARK, LEVIN, MATTHESS: Wirksamkeit des Straßenwinterdienstes auf die Verkehrssicherheit und die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufs auf Bundesautobahnen. Abschlußbericht zum FE 03.228 G 90 H des BMV, Dez. 1993 (unveröffentlicht)
- [10] DURTH, W., HANKE, H., u. LEVIN, C.: Verkehrssicherheit und Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufs im Winter. Straße und Autobahn Nr. 39, Heft 2, 1988
- [11] DURTH, HANKE, LEVIN: Wirksamkeit des Straßenwinterdienstes auf die Verkehrssicherheit

heit und die Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufs. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 550.

- [12] DYSLI, M.: L'indice de radiation – Der Strahlungsindex. Straße und Verkehr Nr. 4, 1988
- [13] ERNST, R.: Zum Einfluß winterlicher Fahrbahnbedingungen auf die Verkehrssicherheit. Forschungsergebnisse und Erfahrungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung in: Zeitschrift für Verkehrssicherheit Nr. 33, Heft 3, 1987
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 86/89). Ausgabe 1986, Ergänzung 1989
- [15] GEIGER, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig 1950
- [16] HAHN, S., u. BAUER, A.: Erfahrungen mit Feuchtsalz zur Glättebekämpfung auf Autobahnen in Rheinland-Pfalz. Straße und Autobahn Nr. 31, Heft 2, 1981
- [17] HAHN, S.: Abschätzung von Nutzen-Kosten-Verhältnissen im Straßenwinterdienst. Vortrag, veröffentlicht im Tagungsband zum Winterdienst-Kolloquium der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen in Darmstadt, 1987
- [18] HANKE, H.: Feuchtsalzanwendung im Straßenwinterdienst – Einsparmöglichkeiten und Anwendungsempfehlungen. Straße und Autobahn Nr. 42, Heft 5, 1991
- [19] HULME, M.: A New Winter Index and Geographical Variation of Winter Weather. J. of Meteorology Vol. 7, S. 294–300, 1982
- [20] KIRCHNER, S.: Angewandte Straßenverkehrsmeteorologie (II). Das Straßenwesen, Heft 10–12, 1980
- [21] KNUDSEN, F.: A Winter Index Based on Measured and Observed Road Weather Parameters. Proc., 7. Road Weather Conference SIRWEC, Seefeld, 1994
- [22] KREBS, H.-G., u. BÖLLINGER, G.: Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper und Erstellung von Jahreszyklen der Fahrbahntemperaturen. Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 347, 1982
- [23] KUHLE, H.: Entwicklungen, Ziele und Möglichkeiten des Winterdienstes an Bundesfernstraßen. Vortrag, veröffentlicht im Tagungsband zum Winterdienst-Kolloquium der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen in Darmstadt, 1984
- [24] KUHLE, H.: Anforderungen und Erwartungen an den Straßenwinterdienst aus verkehrspolitischer Sicht. Straße und Autobahn Nr. 40, Heft 1, 1989
- [25] Länderfachausschuß Straßenunterhaltung und Betriebsdienst: Maßnahmenkatalog zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Straßenunterhaltungs- und Betriebsdienstes, Maßnahme 2 a: Anforderungsniveau Winterdienst. Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.)
- [26] Ministerium für Verkehrswesen: Winterdienstordnung des Straßenwesens. Verfügungen und Mitteilungen des Ministeriums für Verkehrswesen der DDR vom 21.6. 1985, Sonderdruck Nr. 3, Berlin, 1985
- [27] Organisation for Economic Co-Operation and Development: Curtailing Usage of De-Icing Agents in Winter Maintenance. Road Transport Research, Paris 1989
- [28] RISSEL, M. C., u. Scott, D. G.: Staffing of Maintenance Crews During Winter Months. Transportation Research Record 1019, Transp. Res. Board, Washington, 1985
- [29] SCHMIDT, H.: Möglichkeiten der Ermittlung von Einlagerungsnormativen für Abstumpfungs- und Auftaumaterial im Straßenwinterdienst. Die Straße, 30. Jahrg., Heft 8, 1990
- [30] SCHULTE, W.: Analyse des Temperaturegeschehens im Straßenoberbau und dessen Einfluß auf Ergebnisse der Einsenkungsmessungen nach Benkelmann. Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 423, 1984
- [31] SPETH, O.: Tausalzverbrauch in Abhängigkeit von der Intensität des Winters. Vortrag, veröf-

fentlich im Tagungsband zum Winterdienst-Kolloquium der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen in Darmstadt, 1986

- [32] SPETH, O.: Salzverbrauch beim Straßenwinterdienst in Abhängigkeit von der Winterintensität. Straße und Autobahn Nr.39, Heft 2, 1988

- [33] The Road Directorate, Denmark: COST 309, Draft for section 5.6: Winterindex. Kopenhagen, 1990

- [34] THORNES, J. E. (Ed.): Highways Meteorology. The Newsletter of the European Road Weather Commission, Vol. 1, Nr. 1, Febr. 1985

- [35] THORNES, J. E.: Review of Efficiency and Effectiveness of the National Ice Prediction Network in England. Proc., 7. Road Weather Conference SIRWEC, Seefeld, 1994.

- [36] ZULAUF, R.: Mikroklimastation und präventive Streusalzverwendung. Straße und Verkehr, Heft 1, 1964

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

- V 1: **Leitfaden Parkraumkonzepte**
von H. P. Appel, R. Baier und A. Wagener
132 Seiten, 2. Auflage, 1993 kostenlos
- V 2: **Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt**
von H.-G. Brod
168 Seiten, 1993 DM 37,00
- V 3: **Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen**
von H. Wirtz und K. Moritz
36 Seiten, 1993 DM 20,00
- V 4: **Sicherheitsbewertung von Querungshilfen für den Fußgängerverkehr**
von K. Füsser, A. Jacobs und J. Steinbrecher
240 Seiten, 1993 DM 46,00
- V 5: **Sicherheitsbewertung von Querschnitten außerörtlicher Straßen**
von U. Brannolte, H.-B. Barth, R. Schwarzmann, W. Junkers, Y. Liu, H. Sigthorsson und J. Stein
148 Seiten, 1993 DM 34,00
- V 6: **Schutzeinrichtungen an Bundesfernstraßen**
von R. Schnüll, N. Handke, F. Gause, B. Göcke, P. Patzschke, U. Prenzlów, Th. Schröder, St. Wiesiek und W. Engel
112 Seiten, 1993 DM 30,00
- V 7: **Ortsdurchfahrt Much**
von A. Moritz, E. Rossbander, W. Brilon und H. Blanke
136 Seiten, 1993 DM 32,50
- V 8: **Verkehrssicherheit und modernes Verkehrsmanagement**
Symposium der Deutschen Verkehrswacht am 29. Oktober 1992 in Stuttgart
52 Seiten, 1993 kostenlos
- V 9: **Verkehrssichere Anlage und Gestaltung von Radwegen**
von W. Angenendt, J. Bader, Th. Butz, B. Cieslik, W. Draeger, H. Friese, D. Klöckner, M. Lenssen und M. Wilken
96 Seiten, 1993 DM 28,00
- V 10: **Linienbusse im Stadtverkehr**
von I. Birk, O. Kampschulte, H. Luda, M. Schünemann, A. Strauß, B. Wewers und D. Winkler-Hübsch
52 Seiten, 1993 DM 22,50
- V 11: **Digitale Bildverarbeitung zur Verkehrsanalyse**
von H. H. Topp, Th. Horstmann und Ch. Hupfer
36 Seiten, 1993 DM 20,00
- V 12: **Haltestellenformen an innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen**
von H. H. Topp, M. Haag, Ch. Hupfer und K. Ackermann
144 Seiten, 1993 DM 33,50
- V 13: **Parkleitsysteme – Wirksamkeitsuntersuchung und Konzeptentwicklung**
von H. H. Topp, S. Körntgen, U. Gevatter, A. Theiß und S. Vincenzi
128 Seiten, 1994 DM 31,50
- V 14: **Straßenbeleuchtung und Verkehrssicherheit**
von G. Uschkamp, R. Hecker, H.-U. Thäsler und D. Breuer
196 Seiten, 1994 DM 40,00
- V 15: **Grundlagen für Beschilderung**
von H. Erke, M. Latzel, D. Ellinghaus und K. Seidenstecher
184 Seiten, 1994 DM 38,50
- V 16: **Abwicklung des Lieferverkehrs an innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen**
von A. Hamed
132 Seiten, 1994 DM 32,00
- V 17: **Auswirkungen der Umweltgesetzgebung auf den Straßenbetriebsdienst**
von B. Gallenkemper, M. Fritsche und G. Walter
88 Seiten, 1995 DM 27,00
- V 18: **Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit zur Bewertung des Tausalzverbrauchs**
von J. Breitenstein
32 Seiten, 1995 DM 21,50

Zu beziehen durch:

Wirtschaftsverlag NW

Verlag für neue Wissenschaft GmbH

Postfach 10 11 10

D-27511 Bremerhaven

Telefon (04 71) 4 60 93–95, Telefax (04 71) 4 27 65

