

Optimierung der Streustoffausbringung – Modell zur Festlegung der objektiv notwendigen Streudichten im Straßenwinterdienst

FA 4.237

Forschungsstelle: KOMMZEPT – Ingenieurbüro Hausmann e. K., Bannewitz

Bearbeiter: Hausmann, G.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: November 2013

1 Aufgabenstellung

Die Festlegung der Streudichte wird in der aktuellen Winterdienstpraxis zumeist vom Einsatzpersonal auf den Fahrzeugen vorgenommen. Aus der Auswertung von automatisierten Datenaufzeichnungen ist bekannt, dass dabei persönliche Erfahrungen eine wesentliche Rolle spielen. Das drückt sich darin aus, dass beim Vergleich des Dosierverhaltens von mehreren Mitarbeitern unter vergleichbaren Randbedingungen der durchschnittlich eingestellte Dosierwert bis zu 100 % abweicht. Zumeist wird während der Streutouren keine Anpassung der Streudichte an veränderte Rahmenbedingungen vorgenommen. Das ist dadurch begründet, dass nicht alle relevanten Daten auf dem Fahrzeug zur Verfügung stehen. Außerdem ist der Einfluss unterschiedlicher Faktoren so komplex, dass eine Entscheidungsfindung ohne automatisierte Verarbeitung der verfügbaren Daten nicht denkbar ist.

Das Ziel der Forschungsarbeit bestand darin, einen Algorithmus zu entwickeln, der alle für die Berechnung der objektiv notwendigen Streudichte relevanten Daten berücksichtigt. Auf Basis der während der Einsätze ständig aktualisierten und mit einem Bordrechner ausgewerteten Daten wurden auf vier Fahrzeugen der Autobahnmeistereien Erkner in Brandenburg und Werl in Nordrhein-Westfalen Pilotversuche durchgeführt und ausgewertet. Mit diesen Versuchen wurden umfangreiche Erfahrungen gesammelt, die als Grundlage für die weitere Entwicklung von Systemen zur Bestimmung der optimalen Streudichte dienen können. Durch die zu erwartende Entwicklung mobiler Sensoren für die Bestimmung von Restsalzmengen und Flüssigkeitsfilmdicken auf der Fahrbahn, deren Messdaten in die Berechnung der optimalen Streudichte einbezogen werden können, besteht die Möglichkeit einer weitgehend automatisierten Wahl der Streudichte. Damit werden subjektive Faktoren bei der Wahl der Streudichte verringert.

2 Einflussfaktoren auf die Glättebildung

Glättebildung auf Verkehrsflächen ist bei Anwendung von Tausalzen von drei Primärfaktoren abhängig:

1. Fahrbahnoberflächentemperatur (genaue Temperatur in der Salzlösung auf der Fahrbahn)
2. Konzentration der Salzlösung auf der Fahrbahn
3. Art des Tausalzes

Diese Primärfaktoren sind von weiteren Einflüssen (Sekundärfaktoren) abhängig. Das sind im Wesentlichen meteorologische, fahrbahnspezifische, verkehrsunabhängige und technologische

Faktoren. In Bild 1 sind die Primärfaktoren in Verbindung mit den Sekundärfaktoren aufgeführt. Die Primärfaktoren Fahrbahntemperatur und Taustoffkonzentration werden teilweise von den gleichen Sekundärfaktoren beeinflusst. Beispielsweise hat die Art des Fahrbahnbelags Einfluss auf die Fahrbahntemperatur und auf die Taustoffkonzentration (zum Beispiel OPA). Aus der Vielzahl der Einflussfaktoren entsteht für die Prognose von Glättezuständen beziehungsweise für die optimale Festlegung von Streudichten eine relativ komplexe Ausgangssituation.

Fahrbahnoberflächentemperatur	Konzentration des gelösten Taustoffes an der Fahrbahnoberfläche	Taustoffart
<ul style="list-style-type: none"> – Lufttemperatur – Untergrundtemperatur – Strahlung – Bewölkung – Wind – Verkehrsmenge – Fahrbahnbelag – Taustoffart – Taustoffmenge – Wasserfilmdicke 	<ul style="list-style-type: none"> – Salzmenge – Streudichte – Qualität der Taustoffausbringung – Technologie der Taustoffausbringung – Taustoffqualität 	<ul style="list-style-type: none"> – NaCl – CaCl₂ – MgCl₂
	<ul style="list-style-type: none"> – Restsalz – Qualität der Taustoffausbringung – Technologie der Taustoffausbringung – Taustoffqualität – Fahrbahnbelag – Verkehrsmenge 	
	<ul style="list-style-type: none"> – Wasserfilmdicke – Niederschlag – Wasserabfluss – Abtrocknung – Fahrbahntemperatur – Lufttemperatur – Relative Luftfeuchte – Taustoffart – Kondensation – Fahrbahntemperatur – Lufttemperatur – Relative Luftfeuchte – Fahrbahnbelag – Fahrbahnoberfläche – Struktur – Geometrie – Verkehrseinfluss – Menge – Geschwindigkeit 	

Bild 1: Einflussfaktoren auf die Glättesituation auf taustoffbehandelten Fahrbahnoberflächen

3 Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus für die optimale Streudichte

Unter optimaler Streudichte (SD_{Opt}) wird die Mindestmenge an Taustoff verstanden, die pro Quadratmeter ausgebracht werden muss, um Glätte auf Verkehrsflächen kurzfristig zu beseitigen oder innerhalb eines technologisch erforderlichen beziehungsweise sinnvollen Zeitraums (Planzeitraum) zu verhindern.

Unter dem technologisch erforderlichen Zeitraum ist die Zeitspanne zu verstehen, innerhalb derer eine Wiederholungstreuung ausgeführt werden könnte oder sollte. Das kann von den Umlaufzeiten, der Schichtplanung und dem Wetterverlauf abhängig sein.

Die nachfolgenden Betrachtungen werden für den Einsatzfall "Präventive Streuung" durchgeführt. Das heißt, die optimale Streudichte wird für einen Glättefall errechnet, der für maximal acht Stunden nach dem Streuzeitpunkt prognostiziert wurde. Bei den Berechnungen in nachfolgenden Beispielen werden die Daten für NaCl verwendet. Der Berechnungsalgorithmus gilt gleichfalls für andere Tausalze.

Nach der Abhängigkeit von den Primärfaktoren lässt sich für einen bestimmten Taustoff allgemein folgender Zusammenhang formulieren:

$$SD_{Opt} = f(T_{Fmin}, WFD_{max}, SM_R, SM_{verl})$$

Darin bedeuten:

T_{Fmin} in °C Niedrigste Fahrbahnoberflächentemperatur, die innerhalb des technologisch erforderlichen Zeitraums zu erwarten ist.

WFD_{max} in mm In Wasserfilmdicke umgerechnete Flüssigkeitsmenge, die innerhalb des technologisch erforderlichen Zeitraums maximal auf der Fahrbahnoberfläche vorhanden ist.

SM_R in g/m² Vorhandene Streustoffmenge aus zurückliegenden Streuungen, die sich zum Zeitpunkt der aktuellen Streuung auf der Fahrbahn befindet.

SM_{verl} in g/m² Streustoffmenge auf der Fahrbahn, mit deren Verlust innerhalb des Planzeitraums gerechnet werden muss.

Abgeleitet aus den Phasengrenzl意思 wurde ein Diagramm erstellt, das die Gefriertemperatur in Abhängigkeit von Streustoffmenge und Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn darstellt.

Aus den in Bild 2 dargestellten Zusammenhängen lässt sich vereinfacht ableiten:

$$SD = \frac{T_F \cdot WFD}{-0,0637}$$

SD Streudichte in g/m²

T_F Fahrbahntemperatur

Die kalkulierte Fahrbahntemperatur T_{FK} kann durch eine Kombination aus aktueller Messung der Fahrbahntemperatur (Infrarot-Pyrometer) und dem zum Beispiel aus der Punktvorhersage

des DWD ermittelten Temperaturtrend für die Zeit von 0 bis 8 Stunden berechnet werden. Die Punktvorhersagen des DWD werden stündlich aktualisiert auf die Einsatzfahrzeuge übertragen. Diese Lösung verspricht nach allen bisherigen Erfahrungen eine größere Genauigkeit der Temperaturprognose als eine Verfahrensweise, die auf "Thermal Mapping" basiert, da die an der Position des Einsatzfahrzeugs gemessenen Fahrbahntemperaturen in die Berechnung eingehen. Abgeleitet aus den praktisch realisierbaren Umlaufzeiten wurde in den Feldversuchen mit einem Prognosezeitraum von maximal drei Stunden gerechnet. In die Berechnung geht der kleinste innerhalb der nächsten drei Stunden prognostizierte Temperaturwert T_{PX} ein. Die Software ist jedoch so konzipiert, dass jederzeit mit anderen Prognosezeiträumen gerechnet werden kann.

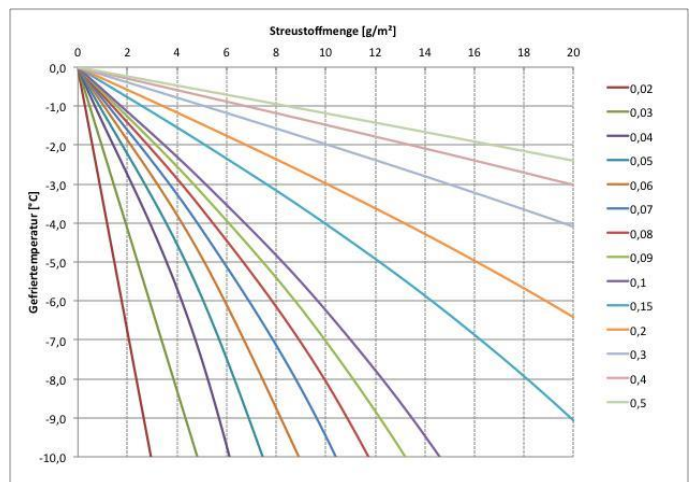


Bild 2: Gefriertemperatur in Abhängigkeit von Streustoffmenge und Wasserfilmdicke in mm

Die Prognose der Wasserfilmdicke wird aus dem in der Vorhersage prognostizierten Straßenzustand abgeleitet. Es handelt sich bei dieser Zuordnung um einen ersten Denkansatz, der durch praktische Einsätze überprüft werden muss.

Tabelle 1: Zuordnung von Wasserfilmdicken (WFD) zu prognostizierten Straßenzuständen

Straßenzustand (SZ)	DWD-Code	Wasserfilmdicke [mm]
trocken	0	0,01
feucht	1	0,02
nass	2	0,06
Reif	3	0,02
Schnee	4	0,10
Eis	5	0,06

Die Prognosewerte basieren auf den Messdaten von Straßenwetterstationen auf der jeweiligen Strecke. Eine der Versuchsstrecken befand sich auf der Autobahn A 46 im Bereich der Autobahnmeisterei Werl. Die in die Prognose einbezogenen Straßenwetterstationen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

In die Berechnung der optimalen Streudichte werden außerdem ein Liegezeitfaktor und die zum Streuzzeitpunkt vorhandene Restsalzmenge einbezogen. Bei der Berechnung des Liegezeit-

faktors fließen die bei Liegezeitmessungen gewonnenen Erkenntnisse über prozentuale Verluste pro Zeiteinheit, aber auch praktische Erfahrungen ein ([1], [2], [3]). Die in den letzten Jahren durchgeführten Liegezeitmessungen hatten ergeben, dass in der ersten Stunde nach der Streustoffausbringung die mit Abstand größten Taustoffverluste auftreten. Darüber hinaus ergaben die Messungen, dass bei der Ausbringung von Tausalzlösungen wesentlich geringere Taustoffverluste auftreten.

Tabelle 2: Straßenwetterstationen an der A 46

Kennung	GMA-Name	Streckentyp	Streckenlage	Streckenbelag	Breite	Länge
H459	TB Neheim (Moehne)	2	5	5	51,45000	7,95000
H571	TB Wannebach	2	1	5	51,41667	0,05000
H465	TB Rumbecke	2	1	1	51,39444	8,10042
H462	TB Deitmecke	2	1	1	51,38328	8,13494
H583	Echterberg	1	3	1	51,38381	8,14000
H580	TB Fulmecke	2	1	3	51,35000	8,26667
H582	Graenscheid	1	1	1	51,36092	8,27669

Legende:

- TB Talbrücke
- Streckentyp 1 eben zur Umgebung
- 2 Brücke
- Streckenlage 1 Dammlage
- 3 über großen Fluss
- 5 über kleinen Fluss
- Streckenbelag 1 Asphalt
- 3 Betonkonstruktion
- 5 Hohlkastenbrücke

Aus in den vergangenen Jahren im Auftrag der BAST durchgeführten Untersuchungen ist bekannt, dass in einem Zeitraum bis 24 Stunden nach der letzten Streuung, eine Salzmenge von mindestens 2 g/m² auf der Fahrbahn vorhanden ist [1]. Nach Regenniederschlag und am Anfang der Winterdienstperiode ist davon auszugehen, dass kein Restsalz auf der Fahrbahn vorhanden ist. Wenn die technische Möglichkeit der mobilen Restsalzmessung besteht, kann der gemessene Wert in die Berechnung der Streudichte einbezogen werden.

Der für die Restsalzmenge angesetzte Wert ist von der errechneten Streudichte abzuziehen.

In der programmtechnischen Umsetzung des Algorithmus wird die Streudichte in drei Stufen berechnet (Streudichte A, B, C). In den einzelnen Stufen werden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

Streudichte A: Rechenwert unter Berücksichtigung der Wasserfilmdicke und der Berechnungstemperatur für die Fahrbahnoberfläche auf Grundlage der Phasengrenzlinie (chemisch-physikalische Zusammenhänge)

Streudichte B: Qualifizierter Rechenwert unter zusätzlicher Berücksichtigung der Liegezeitverluste

Streudichte C: Optimale Streudichte unter zusätzlicher Berücksichtigung der Restsalzmengen.

Die Zusammenhänge zwischen den Eingangswerten und der stufenweisen Streudichteberechnung sind in einem Programmablaufplan dargestellt (Bild 3).

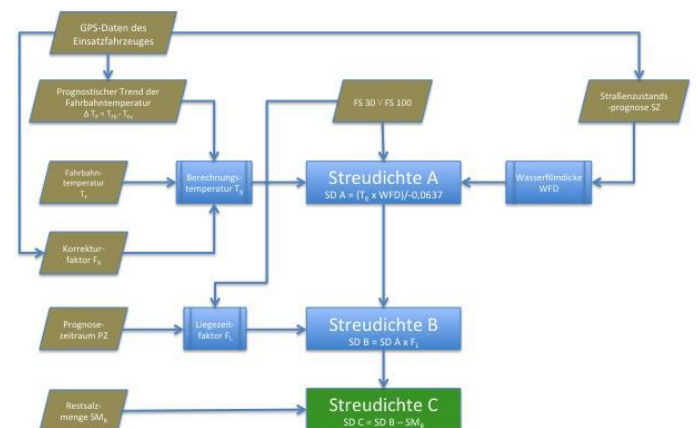


Bild 3: Programmablaufplan zur Berechnung der optimalen Streudichte

4 Realisierung des Systems in Einsatzfahrzeugen

Die Erprobungsanlagen wurden in zwei Autobahnmeistereien auf jeweils zwei Streufahrzeugen im Parallelbetrieb eingesetzt. Die berechneten und die vom Fahrpersonal eingestellten Streudichten wurden zeit- und ortsbezogen aufgezeichnet. Auf dieser Basis wird in einem ersten Schritt die Plausibilität der Berechnungen unter Feldbedingungen im praktischen Einsatz überprüft.

Mit den zusätzlich in den Fahrzeugen installierten Bordcomputern wurden alle eingehenden internen und externen Daten verarbeitet. Im Ergebnis wurde die optimale Streudichte (Streudichte C) mit dem programmierten Algorithmus im Sekunden-takt berechnet. Die Quelle der externen Daten war die Punkt-wettervorhersage des DWD (Deutscher Wetterdienst), die stündlich aktualisiert wurde.

Die Datenübertragung erfolgte vom DWD über den Server des Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI) in Dresden auf die Einsatzfahrzeuge.

Die Komponenten der Streumengenprognose sind schematisch in Bild 4 dargestellt.

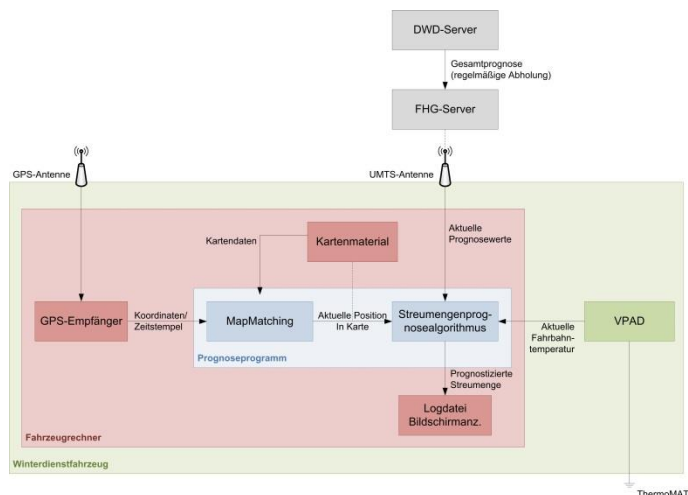


Bild 4: Detaillierte Darstellung der Komponenten der Streumengenprognose



Bild 5: Hardwarekomponenten des System in Laboranordnung

Als Hardware wurde für den Versuchsaufbau ein lüfterloser Box-PC des Typs PICE-V6200-NI für den Fahrzeugeinbau eingesetzt. Er verfügt über einen DualCore-Prozessor mit 1,66 GHz Taktfrequenz. Der Fahrzeug-PC ist außerdem mit einem GPS-Modul für die Positionsbestimmung und einem GSM/UMTS-Modul für die Übermittlung von Daten zwischen dem Fahrzeug und dem Zentralserver ausgerüstet. Die Hardware des Versuchsaufbaus wird in Verbindung mit einem Vpad und einem Thermomat betrieben (Bild 5).

5 Untersuchungsergebnisse

Die Praxistests wurden in den Winterdienstperioden 2011/12 und 2012/13 durchgeführt [4]. Die Montage der Bordcomputer und der GPS-Antennen war an allen Fahrzeugen sehr einfach und schnell möglich. Das konzipierte Funktionsprinzip wurde ohne wesentliche Änderungen in die Praxis umgesetzt und hat grundsätzlich die gestellten Erwartungen erfüllt.

Aus dem Vergleich der Streudichten ist zu erkennen, dass bei der Straßenzustandsprognose "trocken" oder "feucht" immer eine wesentlich geringere Streudichte errechnet wird, als vom Bedienpersonal in der Praxis eingestellt wird. Bei Schneefall werden durch den Algorithmus eher höhere Streudichten errechnet, als in der Praxis ausgebracht werden.

Die Berechnung der optimalen Streudichte mit einem Algorithmus unter Berücksichtigung von Mess- und Prognosewerten erschließt mit den derzeitigen Möglichkeiten mit der Verringerung der Salzmengen vor allem bei präventiven Streueinsätzen ein bisher ungenutztes Einsparungspotenzial.

Der Dosierungsalgorithmus kann in Verbindung mit der im Fahrzeug installierten Hardware den bei der Winterdienststreuung stark ausgeprägten subjektiven Faktor bei der Wahl der Streudichte verringern. Insofern besteht die Möglichkeit, mit derartigen Assistenzsystemen beim Salzeinsatz ein großes Einsparungspotenzial zu erschließen. Die Stärke des Systems liegt im Vergleich zum Infrarot-Pyrometer-System in der besseren Berücksichtigung der zu erwartenden Flüssigkeitsmengen auf der Fahrbahn. Das erhöht die Sicherheit des Fahrpersonals bei der Wahl der Streudichte im Falle von präventiven Streuungen. Die Funktionsfähigkeit des erprobten Systems wurde nachgewiesen. Für eine praxisingerechte Umsetzung muss die Funktion des Systems stabilisiert werden. Danach kann der Algorithmus direkt für die Einstellung der Streudichte an den Streumaschinen eingesetzt werden. Idealerweise sollte das System so konfiguriert sein, dass es mit Streumaschinen der gängigen Hersteller kompatibel ist. Die Voraussetzungen dafür sind gegeben.

Aus den bei der Erprobung gewonnenen Erfahrungen leiten sich zwei Vorschläge ab, die auch unabhängig von der Einführung des Systems kurzfristig realisiert werden könnten.

1. Ausrüstung von Streumaschinen mit einer "Restsalz-taste". Mit deren Bedienung könnte bei der Dosierung die aus der Kenntnis durchgeführter Streuungen anzunehmende Restsalzmenge mit einem fixen Wert (zum Beispiel 2 g/m²) bei der Streustoffausbringung berücksichtigt werden.
2. GPS-gesteuerte Temperaturkorrektur ca. 100 m vor Großbrücken, um die systembedingten Verzögerun-

gen bei der Dosierungsanpassung zu kompensieren. Die Temperaturkorrektur könnte nach den ersten Metern auf der Brücke wieder abgeschaltet werden, wenn das System die real gemessene Temperatur direkt in die optimale Streudichte umsetzen kann. Diese Maßnahme könnte das Vertrauen in die temperaturabhängige Dosierung erhöhen.

Mit Ziel der Einführung derartiger Systeme in die Winterdienstpraxis sollten folgende Schritte unternommen werden:

1. Modifizierung des Algorithmus in Auswertung der Praxisversuche und unter Berücksichtigung der Fachdiskussionen.
2. Anpassung des Systems an die Streumaschinen weiterer Hersteller.
3. Durchführung von überwachten Praxiseinsätzen mit direkter Übertragung der errechneten Streudichte auf die Steuerung der Streumaschinen.
4. Einbeziehung einer mobilen Restsalzmengenmessung, sobald die technischen Möglichkeiten dafür bestehen.

6 Literatur

- [1] HAUSMANN, G.: "Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn", Berichte der BAST, Heft V 180, Bergisch Gladbach, Mai 2009
- [2] HAUSMANN, G.: "Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen", Berichte der BAST, Heft V 218, Bergisch Gladbach, Dezember 2012
- [3] BADEL T, H.; HAUSMANN, G.: "Distribution of Spreading Agents on the Road Surface", Routes/Roads, Paris 2010, N2 345, 1st Quarter
- [4] HAUSMANN, G.: "Optimierung der Streustoffausbringung, Modell der objektiv notwendigen Streudichten im Straßenwinterdienst", unveröffentlichter Forschungsbericht im Auftrag der BAST, 2013