

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 200 95 308/04
UBA-FB 000404



**Machbarkeitsstudie zur
Formulierung von Anforderungen
für ein neues Umweltzeichen
für Enteisungsmittel für
Straßen und Wege, in Anlehnung
an DIN EN ISO 14024**

von

**Dipl. Geogr./Hydrol. Stefan Gartiser
Dr. Rudolf Reuther**

Hydrotox Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH

und

Dipl. Ing. Carl-Otto Gensch

Öko-Institut e.V.

Diese TEXTE-Veröffentlichung kann bezogen werden bei
Vorauszahlung von 7,50 Euro
durch Post- bzw. Banküberweisung,
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der
Postbank Berlin (BLZ 10010010)
Fa. Werbung und Vertrieb,
Ahornstraße 1-2,
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte
eine schriftliche Bestellung mit Nennung
der **Texte-Nummer** sowie des **Namens**
und der **Anschrift des Bestellers** an die
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in dem Bericht geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 1.3
Dr. Jörn-Uwe Thurner

Berlin, Februar 2003

Berichts – Kennblatt

1. Berichtsnummer FKZ 200 95 308/04	2. Produktbewertung/ Umweltzeichen	3.
Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Straßen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024		
5. Autor(en) (Name, Vorname(n)) Gartiser, Stefan und Reuther, Rudolf ¹⁾ Gensch, Carl-Otto ²⁾		6. Abschlußdatum des Vorhabens
		7. Veröffentlichungsdatum
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ¹⁾ Hydrotox GmbH Bötzing Str. 29, D-79111 Freiburg		9. UFOPLAN-Nr. 200 95 308/04
		10. Seitenzahl 121
²⁾ Öko-Institut e.V. Freiburg Postfach 62 26, D-79038 Freiburg		11. Literaturangaben 120
12. Fördernde Institutionen (Name, Adresse) Umweltbundesamt Postfach 33 00 22, D-14191 Berlin		13. Tabellen 17
		14. Abbildungen 7
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung <p>Im Rahmen der Machbarkeitsstudie in Anlehnung an DIN EN ISO 14024 sollte überprüft werden, ob die Vergabe eines Umweltzeichens für ein Enteisungsmittel auf der Basis von <u>Kaliumformiat</u> im kommunalen Winterdienst aus ökologischen Gründen sinnvoll ist. Hierzu wurde ein ökologischer Vergleich innerhalb der Produktgruppe der Streu- und Enteisungsmittel durchgeführt, unter Einbeziehung einer orientierenden Ökobilanz.</p> <p>Nach bisherigem Kenntnisstand kann der Einsatz von Formiaten im Winterdienst für Straßen und Wege nicht empfohlen werden. Die sehr geringe aquatische Ökotoxizität ist zwar mit der von Kochsalz und Calcium/Magnesiumchlorid vergleichbar. Untersuchungen zur terrestrischen Ökotoxizität fehlen jedoch. Die Formiate sind zwar selbst bei winterlichen Temperaturen leicht biologisch abbaubar, inwieweit hierdurch jedoch die Ökotoxizität günstig beeinflusst wird, lässt sich nicht abschätzen. Im Vergleich mit Streusalzen oder auch abstumpfenden Streumitteln wird jedoch für die Herstellung von Formiaten wesentlich mehr Primärenergie verbraucht und es ist mit mindestens 10fach höheren Kosten zu rechnen. Demgegenüber ist der Einsatz von Formiaten als Ersatzstoff für Glykole und Harnstoff in der Flugzeug- und Bewegungsflächenenteisung (vgl. RAL-UZ 99) weiterhin zu begrüßen.</p> <p>Im Rahmen der Studie wurden allgemeine Kriterien für Streumittel sowie praktische Empfehlungen für einen ökologischen Winterdienst ausgearbeitet. Zur weiteren Optimierung bestehender Ansätze sollte u.a. die orientierende Ökobilanz durch eine Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff unter Einbeziehung einer kritischen Prüfung verifiziert und Datenlücken zur terrestrischen Ökotoxizität von Formiaten geschlossen werden.</p>		
17. Schlagwörter Formiate, Winterdienst, Streumittel, Streusalz, abstumpfende Streustoffe, Splitt, Umweltzeichen, Umweltverträglichkeit, Machbarkeitsstudie, ISO 14024		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. FKZ 200 95 308/04	2. Product assessment/ environmental Label	3.
4. Report Title Feasibility study for the formulation of requirements for a new eco-label for de-icing agents for roads and ways following DIN EN ISO 14024		
5. Autor(en) (Name, Vorname(n)) Gartiser, Stefan und Reuther, Rudolf ¹⁾ Gensch, Carl-Otto ²⁾		6. Report Date
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ¹⁾ Hydrotox GmbH Bötzing Str. 29, D-79111 Freiburg ²⁾ Öko-Institut e.V. Freiburg P.O. Box 62 26, D-79038 Freiburg		7. Publication Date
		9. UFOPLAN-No. 200 95 308/04
		10. No. of Pages 121
12. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt P.O. Box 33 00 22, D-14191 Berlin (Germany)		11. No. of References 120
		13. No. of Tables 17
15. Supplementary Notes		14. No. of Figures 7
16. Abstract Main objective of the study was to assess the awarding of de-icing agents based on <u>potassium formiate</u> and used within municipal winter maintenance operation with an eco-label, considering the standard DIN EN ISO 14024 methods. For this, an ecological comparison was performed for the product groups of gritting and de-icing agents, also by including a screening life-cycle analysis (LCA). According to our present knowledge, the use of formiate for winter road and way maintenance can not be recommended, although it has very low aquatic ecotoxicity comparable with normal salt (sodium chloride) and calcium/magnesium chloride. Studies on the terrestrial ecotoxicity of formiates are still lacking. Although these organic salts are rather easily biologically degradable even at the low winter temperatures, we do not know how this may reduce their ecotoxicity. However, compared with thawing salts or even with gritting agents, the production of formiates needs more primary energy and one has to calculate with in total about 10 fold higher application costs. Nevertheless, the further use of formiates can still be recommended as substitute for aircraft de-icing fluids (glycols) and for the use of urea on airport surfaces (see RAL-UZ 99). The study elaborated general criteria and requirements for the performance of de-icing agents as well as practical recommendations for a more ecologically compatible winter road maintenance. To further optimise conclusions and approaches, the results of the screening life-cycle analysis should be verified by performing a LCA according to DIN EN ISO 14040, in particular by including a more rigid data analysis. This also needs to close our existing gap of knowledge concerning the terrestrial ecotoxicity of formiates. .		
17. Keywords Formiate, winter road maintenance, de-icing agents, gritting agents, salt, ecolabel, environmental label, environmental soundness, feasibility study, ISO 14024		
18. Price	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Aufgabenstellung	5
3	Einleitung	7
3.1	Winterdienst.....	7
3.2	Umweltkennzeichnung nach DIN EN ISO 14024	8
3.3	Bestehende Umweltzeichen für Enteisungsmittel	10
4	Herangehensweise	12
4.1	Literatur und Datenbankrecherchen	12
4.2	Konsultation interessierter Kreise	13
4.3	Orientierende Ökobilanz	13
4.3.1	Methodisches Vorgehen und Datengrundlagen.....	14
4.3.2	Zielsetzung	15
4.3.3	Betrachtete Streumittel	15
4.3.4	Funktionelle Einheit	16
4.3.5	Systemgrenzen.....	16
4.3.6	Datengrundlagen der Sachbilanz.....	16
4.3.7	Wirkungsabschätzung	18
5	Ergebnisse der Machbarkeitsstudie	22
5.1	Systemvergleich ausgewählter Produkte.....	22
5.1.1	Streusalze auf Chloridbasis	23
5.1.2	Calcium-/Magnesiumacetat	27
5.1.3	Harnstoff	27
5.1.4	Formiate	28
5.1.5	Abstumpfende Streumittel.....	30
5.1.6	Freiflächenheizung	32
5.1.7	Glättebildungshemmende Fahrbahnen.....	33
5.1.8	Nullstreuung.....	33
5.2	Marktüberblick	34

5.2.1	Winterdienst.....	34
5.2.2	Anbieter am Markt	42
5.3	Umweltwirkungen	46
5.3.1	Allgemeiner Überblick.....	46
5.3.2	Ressourcenentnahme.....	47
5.3.3	Verteilung und Transport	48
5.3.4	Ökotoxische Wirkung.....	48
5.3.5	Auswirkungen auf Grund- , Oberflächen- und Trinkwasser	58
5.3.6	Auswirkungen auf Böden.....	64
5.3.7	Entsorgung	69
5.3.8	Wirtschaftliche und Sekundärschäden.....	76
5.3.9	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	78
5.4	Ergebnisse der orientierenden Ökobilanz.....	79
5.4.1	Sachbilanz	79
5.4.2	Wirkungsabschätzung	80
5.4.3	Vergleichsuntersuchung	83
5.4.4	Schlussfolgerungen	85
5.5	Bewertung der Ergebnisse	86
6	Potential für Produktverbesserungen.....	90
6.1	Allgemeine Einführung.....	90
6.2	Gebrauchstauglichkeit und Produktqualität	92
6.2.1	Technische Lieferbedingungen für Streustoffe	93
6.2.2	Wirksamkeit von Tausalzen	95
6.3	Geltende Rechtsvorschriften und Vereinbarungen	95
6.4	Vorschläge für Produkthanforderungen	97
6.4.1	Vermeidung von Gefahrstoffen	98
6.4.2	Begrenzung von Nährstoffen	101
6.4.3	Ökotoxizität.....	102
6.4.4	Korrosion	103
7	Fazit und Empfehlungen	104

8	Quellenangaben	107
9	Gesetze und Richtlinien	116
10	Anhang: Liste der kontaktierten Kreise	118

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Matrix zur Auswahl von Umweltkriterien für die wichtigsten Lebenswegabschnitte eines Produktes	9
Tabelle 2:	Grundstruktur und Bestandteile von Ökobilanzen (eigene Zusammenstellung nach DIN EN ISO 14040 ff.)	14
Tabelle 3:	Datenquellen für die orientierende Ökobilanz.....	18
Tabelle 4:	Gewichtungsfaktoren zur Berechnung der Wirkungskategorien	21
Tabelle 5:	Chemisch-Physikalische Daten von Auftaumitteln.....	26
Tabelle 6:	Streumittelverbrauch der Kommunen	37
Tabelle 7:	Länge der öffentlichen Straßen im Jahr 1998 in km	38
Tabelle 8:	Salzproduktion in Deutschland [1000 t]	42
Tabelle 9:	Verbrauch von Auftausalzen in Deutschland	43
Tabelle 10:	Aquatische Ökotoxizität von Auftaumitteln.....	51
Tabelle 11:	Grenz-, Richtwerte und natürliche Gehalte für Natrium und Chlorid in Grund- und Oberflächenwasser (Brod 1993, aktualisiert).....	61
Tabelle 12:	Biologische Abbaubarkeit von Auftaumitteln.....	72
Tabelle 13:	Ergebnisse der Sachbilanz bezogen auf 1000 km Straße (4 km ²).....	80
Tabelle 14:	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung bezogen auf 1000 km Straße	80
Tabelle 15:	Grundannahmen der Transportvorgänge (Vergleich)	84
Tabelle 16:	Zulässige Schwermetallgehalte in mg/kg TS	99
Tabelle 17:	Prüf- und Grenzwerte von Schwermetallen im Eluat nach DIN 38414-4 bzw. im Industrieabwasser [mg/l].....	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Absoluter Verbrauch von Auftausalzen auf Fernstraßen (nach Angaben der BAST, 2001).....	39
Abbildung 2:	Spezifischer Verbrauch von Auftausalzen auf Fernstraßen (nach Angaben der BAST, 2001).....	40
Abbildung 3:	Hilfsmittel für den Winterdienst im Flughafenbereich (Bewegungsflächen).....	41

Abbildung 4: Vergleich der ausgewählten Streumittel und der Flächenheizung hinsichtlich ihres Energieverbrauchs (KEA).....	81
Abbildung 5: Vergleich der ausgewählten Streumittel und der Flächenheizung hinsichtlich ihres Emissionspotentials an klimarelevanten Gasen (CO ₂ -Äquivalente)	81
Abbildung 6: Anteil von Herstellung und Ausbringung am Gesamtverbrauch energetischer Ressourcen (KEA)	82
Abbildung 7: Primärenergiebedarf Salz/Splittstreuung (Ruess 1998).....	85

Abkürzungsverzeichnis:

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AbwV	Abwasserverordnung
AEA	Association of European Airlines
AMS	Aerospace Material Specification der SAE
AOX	Adsorbierbare organische Halogenverbindungen
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATV	Abwassertechnische Vereinigung e. V.
AP	Azidifizierungspotenzial
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
CAS	Chemical Abstracts
CMA	Calcium-/Magnesiumacetat
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOC	Dissolved Organic Carbon
Dose	Dictionary of Substances and Their Effects
EP	Eutrophierungspotenzial
EnviChem	Data Bank of Environmental Properties of Chemicals
EU	Europäische Union
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Entwurf zur TL-Streu von 1997
FS30	Feuchtsalzverfahren mit Zugabe von 30% Sole zum Streusalz

KEA	kumulierter Energieaufwand
HSDB	Hazardous Substances Data Bank
ISO	International Standard Organisation
IUCLID	International Uniform Chemical Information Database
KBwS	Kommission zur Bewertung wassergefährdender Stoffe
Kfz	Kraftfahrzeug
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft
LC50	50% letale Konzentration
LOEC	Low Observed Effect Concentration
NOEC	No Observed Effect Concentration
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
RAL	Deutsches Inst. f. Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.
SAE	International Engineering Society for Advancing Mobility Land, Sea, Air and Space
SWIS	Straßenzustands- und Wetterinformationsdienst
TASI	Technische Anleitung Siedlungsabfälle
TLStreu	Technische Lieferbedingungen und Richtlinien für Streustoffe des Winterdienstes (Entwurf 2002)
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VwVwS	Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe
WGK	Wassergefährdungsklassen
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

1 Zusammenfassung

Aufgabe des kommunalen Winterdienstes ist es, die Verkehrssicherheit von Fußgängern, Rad- und Autofahrern bei Schnee- und Eisglätte zu gewährleisten. Dazu wird in Deutschland seit den 50er Jahren Streusalz als Auftaumittel eingesetzt. Aufgrund des umfangreichen Ausbringens von Streusalz traten vermehrt Schäden an Pflanzen, Fahrzeug-Karosserien und Betonbauwerken auf und es wurden lokal erhöhte Salzgehalte in Grund- und Oberflächenwasser beobachtet. Infolgedessen wurde die Salzstreuung seit den 70er Jahren in den meisten Kommunen stark eingegrenzt und vermehrt abstumpfende Streumittel eingesetzt. Nachdem der ökologische Vorteil dieser Mittel erneut in Frage gestellt wurde, werden in jüngerer Zeit in einigen Gemeinden zur Glättebeseitigung wieder verstärkt chemische Auftaumittel eingesetzt und/oder Nebenstraßen überhaupt nicht gestreut.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie sollte in Anlehnung an DIN EN ISO 14024 überprüft werden, ob die Vergabe eines Umweltzeichens für ein Enteisungsmittel auf der Basis von Kaliumformiat aus ökologischen Gründen sinnvoll ist. Im Flughafenbereich werden Formiate bereits als Enteisungsmittel für die Rangier- und Bewegungsflächen der Flugzeuge eingesetzt. Hierfür wurde das Umweltzeichen RAL-UZ 99 vergeben. Zur Bewertung des ökologischen und wirtschaftlichen Nutzens von Formiaten als Auftausalz im kommunalen Winterdienst wurde ein ökologischer Vergleich innerhalb der Produktgruppe der Streu- und Enteisungsmittel durchgeführt, unter Einbeziehung einer orientierenden Ökobilanz. Bewertet werden chemische Auftaumittel auf Formiat-Basis, Calcium/Magnesiumacetat, herkömmliches Streusalz, Calciumchlorid sowie abstumpfende Streumittel (z.B. Splitt). Vergleichszahlen zu thermischen Methoden des Winterdienstes (Freiflächenheizung) wurden ebenfalls bewertet. Am 6. März 2002 wurden die Ergebnisse auf einem Fachgespräch beim Umweltbundesamt unter Einbeziehung der interessierten Kreise vorgestellt.

Nach bisherigem Kenntnisstand kann der undifferenzierte Einsatz von Formiaten im Winterdienst für Straßen und Wege nicht empfohlen werden. Die Vergabe eines RAL-Umweltzeichens für diesen Zweck erscheint daher nicht gerechtfertigt. Die sehr geringe aquatische Ökotoxizität ist zwar mit der von Kochsalz und Calcium/Magnesiumchlorid vergleichbar. Untersuchungen zur terrestrischen Ökotoxizität (insbesondere zur Phytotoxizität), aus denen gegebenenfalls Vorteile

gegenüber Kochsalz abgeleitet werden könnten, fehlen derzeit jedoch. Ergebnisse zu anderen organischen Auftausalzen (Calcium/Magnesiumacetat) zeigen jedoch, dass organische Auftausalze nicht prinzipiell besser zu bewerten sind als Kochsalz. Phytotoxische Effekte von Acetaten und Natriumchlorid treten im selben Konzentrationsbereich (ca. 1-3 g/kg Boden) auf. Die Formiate sind zwar selbst bei winterlichen Temperaturen leicht biologisch abbaubar und weisen im Vergleich zu anderen organischen Auftausalzen einen geringeren Sauerstoffbedarf bei der Mineralisierung auf. Inwieweit hierdurch jedoch die Ökotoxizität günstig beeinflusst wird, lässt sich aufgrund fehlender Untersuchungen nicht abschätzen. Im Vergleich mit Streusalzen oder auch abstumpfenden Streumitteln wird für die Herstellung von Formiaten jedoch wesentlich mehr Primärenergie verbraucht, die Freisetzung von Treibhausgasen und das Versauerungspotential sind dementsprechend ebenfalls erhöht. Allerdings konnte der Aufwand für die Entsorgung insbesondere der abstumpfenden Streumittel aufgrund des begrenzten Budgets und des fehlenden örtlichen Bezugsrahmens nicht in die ökobilanziellen Betrachtungen einbezogen werden. Zudem ist gegenüber Kochsalz als Auftaumittel mit mindestens 6-8fach höheren Kosten zu rechnen. Demgegenüber ist der Einsatz von Formiaten als Flugzeug- und Bewegungsflächenenteiser weiterhin zu begrüßen. Hier sind Formiate Ersatzstoffe für Glykole und Harnstoff, die aufgrund der sehr hohen Nährstofffracht zu erheblichen Belastungen im Grund- und Oberflächenwasser (bis hin zur vollständigen Sauerstoffzehrung) geführt haben.

Obwohl sich aufgrund dieser Ergebnisse die Aufstellung von Kriterien zur Vergabe eines Umweltzeichens für Formiate als Auftaumittel erübrigen würde, wurden folgende allgemeine Kriterien für Streumittel sowie praktische Empfehlungen für einen ökologischen Winterdienst ausgearbeitet:

Die flächendeckende Umsetzung des Konzeptes „differenzierter Winterdienst“, das eine abgestufte Verwendung von Streustoffen nach Straßen- und Wetterlage in Hinblick auf Salzstreuung, Splittstreuung und Nullstreuung vorsieht, erscheint als geeignetes Instrument zur Optimierung des Winterdienstes. Ziel ist es, die Verwendung von Tausalz auf das notwendige Mindestmaß zu begrenzen. Eine Einbeziehung der "Nullstreuung" bzw. des "weißen Winterdienstes" als ernstzunehmende Alternative sollte im kommunalen Bereich für untergeordnete Straßen in Betracht gezogen werden, da gezeigt wurde, dass die Unfallhäufigkeit hierbei

durch umsichtiges Fahren teilweise geringer ist als bei der Anwendung abstumpfender Streumittel, die eine größere Griffigkeit als gegeben vortäuschen. Durch verstärkte mechanische Schneeräumung ("Schwarzräumen") wird oftmals ein befriedigendes Ergebnis erzielt und die nachfolgende Streuung mit Auftausalzen - sofern noch erforderlich - deutlich reduziert.

Durch konsequente Einführung der Feuchtsalzstreuung lässt sich die Salzmenge bei gleicher Wirkung gegenüber der Granulatstreuung halbieren. Weitere Einsparmöglichkeiten bestehen in der effektiven Nutzung von Witterungsvorhersagen und von neuen Dosiertechniken, wie Thermostreuern. Beim Einsatz von Streusalz ist durch eine effiziente Straßenentwässerung sicherzustellen, dass das Straßenbegleitgrün und das Grundwasser nicht beeinträchtigt werden. Die unvermeidbare Salzfracht ist nach ausreichender Verdünnung nicht problematisch für Kläranlagen und Vorfluter. Eine Erhöhung der Salzkonzentration im Trinkwasser aus Uferfiltrat ist allerdings nicht vermeidbar, im Vergleich zu anderen Salzeinleitungen (Abraumhalden Kalibergbau, Meeresintrusion) jedoch unbedeutend. Nur etwa 5% der Salzproduktion in Deutschland entfällt auf die Anwendung von Auftausalz, 3% wird zu Speisesalz weiterverarbeitet, während die Hauptmenge als Industriesalz Verwendung findet. Rechnerisch führt der Einsatz von Auftausalz zu einer mittleren Erhöhung der Chloridkonzentration in Fließgewässern von etwa 4 mg/l (Trinkwassergrenzwerte 200-250 mg/l).

Harnstoff sollte sowohl im kommunalen Winterdienst als auch im Flughafenbereich nicht eingesetzt werden, wenn eine vollständige Ableitung des belasteten Abwassers in eine kommunale Kläranlage mit Denitrifikationsstufe nicht gewährleistet wird.

Abstumpfende Streumittel verursachen nach mehreren Studien höhere Kosten und sind unter Berücksichtigung der Transportwege und der Entsorgung auch ökologisch nicht besser zu beurteilen als Streusalz im Straßenverkehr. Der Einsatz von Splitt und Sand auf Geh- und Radwegen ermöglicht jedoch den Schutz der angrenzenden Grünstreifen vor Streusalz ohne dass die im Straßenverkehr bekannten negativen Eigenschaften abstumpfender Streumittel (geringere Kraftschlusswerte, höhere Streudichten, Wegschleudern an den Straßenrand durch Verkehr, Entsorgung) in diesem Umfang auftreten. Im Einzelfall kann die Verwendung abstumpfender Streumittel auch im Straßenbereich ökologisch sinnvoll sein, z.B. wenn wertvolle

Baumbestände geschützt werden sollen oder der Einsatz von Streusalz wegen der Umgebungstemperatur ($< -15^{\circ}\text{C}$) nicht opportun ist.

In der orientierenden Ökobilanz schnitt die Freiflächenheizung überraschend gut ab. Allerdings dürften die hohen Installationskosten die Anwendung auf sensiblen Bereichen (Treppen, Abgänge, Rampen) beschränken. Weitere neuere Technologien, wie glättebildungshemmende Straßenbeläge sollten ebenfalls weiterverfolgt werden.

Zur weiteren Optimierung bestehender Ansätze und Verfahren wurde ein beträchtlicher Forschungsbedarf festgestellt. Die durchgeführte orientierende Ökobilanz sollte durch eine Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 unter Einbeziehung einer obligatorischen kritischen Prüfung verifiziert werden. Datenlücken zur terrestrischen Ökotoxizität von Formiaten in definierten Testsystemen sowie Praxiserfahrungen und Freilandbeobachtungen nach Anwendung von Formiaten im Winterdienst sind Voraussetzung für eine weitergehende Prüfung eines möglichen ökologischen Nutzens.

2 Aufgabenstellung

Aufgabe des kommunalen Winterdienstes ist es, die Verkehrssicherheit von Fußgängern, Rad- und Autofahrern bei Schnee- und Eisglätte zu gewährleisten. Dazu wird in Deutschland seit den 50er Jahren Streusalz als Auftaumittel eingesetzt (Moritz 1999). Aufgrund des umfangreichen Ausbringens von Streusalz traten vermehrt Schäden an Pflanzen, Fahrzeug-Karosserien und Betonbauwerken auf. Daneben wurden lokal erhöhte Salzgehalte in Grund- und Oberflächenwasser sowie weitere salzbedingte Folgeschäden wie die Verdichtung des Bodens beobachtet. In den 70er Jahren setzte ein Umdenkungsprozess ein und es wurden neue Konzepte wie der „differenzierte Winterdienst“ entwickelt. In den meisten Kommunen wurde die Salzstreuung stark eingegrenzt oder verboten. Dafür wurden im innerörtlichen Bereich vermehrt abstumpfende Streumittel eingesetzt. Nachdem der ökologische Vorteil dieser Mittel erneut in Frage gestellt wurde, werden in jüngerer Zeit zur Glättebeseitigung in einigen Gemeinden wieder verstärkt chemische Auftaumittel - insbesondere Feuchtsalz - eingesetzt und/oder Nebenstraßen überhaupt nicht gestreut (Nullstreuung im "differenzierten Winterdienst").

Ein Hersteller von Formiaten hat die Vergabe eines Umweltzeichens für ein Enteisungsmittel auf der Basis von Kaliumformiat vorgeschlagen. Die geplanten Anwendungsgebiete des Produktes liegen im Bereich des kommunalen Winterdienstes und der Enteisung von Verkehrsflächen durch Anlieger. Demgegenüber empfiehlt die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) im Kommentar zum Entwurf zur TL-Streu , sonstige tauende Stoffe wie technischen Harnstoff oder Natriumformiat nicht einzusetzen, aufgrund einer stärker wassergefährdenden Wirkung und einer weniger anhaltenden Tauleistung im Vergleich zu normalem Streusalz (FGSV, 2001).

Im Flughafenbereich werden Formiate bereits als Enteisungsmittel für die Rangier- und Bewegungsflächen der Flugzeuge eingesetzt. Hierfür wurde das Umweltzeichen RAL-UZ 99 vergeben. Formiate bilden für diesen Anwendungsbereich eine Alternative zu Harnstoff und Glykol.

Ziel der hier vorgelegten Machbarkeitsstudie ist es, zu prüfen, ob eine Umweltzeichenvergabe für Enteisungsmittel auf Kaliumformiatbasis gerechtfertigt ist,

und welche Anforderungen diese Produktgruppe im Vergabefall erfüllen sollte. In Anlehnung an DIN EN ISO 14024 („Umweltkennzeichnungen und –deklarationen; Umweltkennzeichnung Typ I; Grundsätze und Verfahren“) soll eine Bewertung des ökologischen und wirtschaftlichen Nutzens eines Einsatzes von Formiat als Auftausalz im kommunalen Winterdienst vorgenommen werden. Dazu wurde innerhalb der Produktgruppe der Streu- und Enteisungsmittel ein ökologischer Produktvergleich durchgeführt, unter Einbeziehung einer orientierenden Ökobilanz. Bewertet wurden chemische Auftaumittel auf Formiat-Basis im Hinblick auf herkömmliches Streusalz und abstumpfende Streumittel. Aufgabe des Hauptteils der Studie ist die Durchführung einer vertiefenden Analyse der Umweltrelevanz von Streustoffen, insbesondere im Hinblick auf Auswirkungen auf Gewässer, Pflanzen und Böden. Daraus sollen schließlich Anforderungen an die Vergabe eines Umweltzeichens für Enteisungsmittel auf Formiatbasis für Straßen und Wege abgeleitet werden.

3 Einleitung

3.1 Winterdienst

Unter Winterdienst versteht man allgemein die "Gesamtheit der Maßnahmen zur Aufrechterhaltung und zur Erleichterung des Verkehrs sowie zur Verkehrssicherung bei winterlichen Witterungsverhältnissen" (DIN 30706-3, 1998). Die rechtliche Grundlage hierfür ist im Bundesfernstraßengesetz und den Straßen- und Straßenreinigungsgesetzen der Länder sowie in den Satzungen der Kommunen festgelegt. Man schätzt, dass ungefähr 10-15% aller Unfälle mit Personenschäden auf den Straßen Mitteleuropas auf winterliche Fahrbahnzustände zurückgeführt werden können. Nach erfolgter Salzstreuung sinkt die Zahl der Unfälle auf ein Viertel des Standes vor der Salzstreuung und auch die Schwere der Unfälle nimmt deutlich ab (Ruess 1998). Im Merkblatt "Winterdienst" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) werden wesentliche Handlungsempfehlungen für die für den Straßenunterhalt verantwortlichen Stellen genannt (Wagner and Hanke 1997). Durch den Einsatz von Streustoffen gerät der Winterdienst ins Spannungsfeld zwischen Verkehrssicherheit und Umweltschutz. Insbesondere tauende und abstumpfende Streustoffe werden eingesetzt, um die Leistungsfähigkeit und Nutzbarkeit des Straßen- und Wegenetzes auch im Winter zu erhalten. Gemische aus beiden Gruppen werden nicht empfohlen, da sie auch die Nachteile beider verbinden. Alle Winterdienst-Maßnahmen müssen präventiv auf den Erhalt der natürlichen Stoffkreisläufe und der Biodiversität abgestimmt werden. Dadurch erlangen vorbeugende Maßnahmen, wie die Pflanzung von Hecken oder das Aufstellen von Zäunen gegen Schneeverwehungen eine besondere Bedeutung. Soweit möglich und wirtschaftlich vertretbar wird die mechanische Schneeräumung empfohlen, trotz vielerorts begrenzter Flächen zur Schneeablagerung.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob und inwieweit eine Umweltzeichenvergabe für Streumittel auf Formiatbasis geeignet ist, im Rahmen der öffentlichen Beschaffung den Straßenwinterdienst umweltfreundlicher zu gestalten.

3.2 Umweltkennzeichnung nach DIN EN ISO 14024

Diese internationale Norm gilt für die Umweltkennzeichnung von Produkten, die unter Berücksichtigung des Produktlebensweges aufgrund von Umweltaspekten innerhalb bestimmter Produktkategorien vorzuziehen sind (Umweltkennzeichnung Typ I). Es werden Grundlagen und Verfahren für die Entwicklung von Umweltkennzeichnungsprogrammen festgelegt, einschließlich der Auswahl von Produktkategorien, Umweltkriterien und charakteristischen Funktionen. Im Rahmen dieser Umweltkennzeichnungsprogramme, deren Teilnahme grundsätzlich freiwillig ist, werden Lizenzen zum Gebrauch eines bestimmten produktspezifischen Umweltzeichens vergeben. Umweltzeichen als einfache Einkaufshilfen sollen die ökologisch intelligentere Lösung bzw. das Produkt mit der geringsten Umweltbelastung fördern und ausweisen. Dadurch soll die Produktakzeptanz erhöht und ein zusätzlicher Kaufanreiz für den Anwender geschaffen werden. Das übergeordnete Ziel einer Umweltkennzeichnung nach Typ I ist es, durch Mitteilung von überprüfbaren, genauen und nicht irreführenden Angaben zu Umweltaspekten Angebot und Nachfrage jener Produkte zu unterstützen, die weniger Umweltbelastungen verursachen (DIN EN ISO 14024, 2001). Umweltzeichen sollen auch jene Produkte ausweisen, die darüber hinaus Anforderungen des Gesundheits- und Arbeitsschutzes, der Verbrauchersicherheit und der Gebrauchstauglichkeit entsprechen.

Der "Typ I Umweltkennzeichnung" liegt ein iteratives Verfahren zugrunde, und umfasst die Konsultation interessierter Kreise, die Auswahl von Produktkategorien, die Entwicklung von Umweltkriterien, die Identifizierung wesentlicher Produkteigenschaften sowie die Festlegung von Verfahren zur Zertifizierung. Dies erfolgt im Rahmen einer Machbarkeitsstudie, in der aufgrund einer Marktanalyse und von Literaturrecherchen die Umweltauswirkungen der Produkte sowie das Potential für Verbesserungen bewertet werden. Die Machbarkeitsstudie umfasst auch die Gebrauchstauglichkeit der Produkte, die Festlegung des Geltungsbereiches einer Produktkategorie und die Berücksichtigung nationaler und internationaler Bestimmungen.

Die EN ISO 14024 legt fest, dass bei der Auswahl von Umweltkriterien der gesamte Lebensweg eines Produktes berücksichtigt werden muss. Wie in Tabelle 1 werden hierbei die verschiedenen Produktlebensabschnitte in Form einer Matrix den wesentlichen Input/Output-Indikatoren gegenübergestellt.

Tabelle 1: Matrix zur Auswahl von Umweltkriterien für die wichtigsten Lebenswegabschnitte eines Produktes

Lebenswegabschnitt	Umweltrelevante Input/Output-Indikatoren (Kriterienbeispiele)					
	Energie	Rohstoffe	Emissionen in			Sonstiges
	Erneuerbar/ nicht erneuerbar	Erneuerbar/ nicht erneuerbar	Wasser	Luft	Boden	
Ressourcenentnahme						
Produktion						
Verteilung						
Gebrauch						
Entsorgung						

Von Seiten der Europäischen Union wird eine Harmonisierung der nationalen Umweltzeichensysteme angestrebt, um die gemeinsamen Ziele eines umweltverträglichen Verbrauchs zu fördern. In der Verordnung 1980/2000/EG zur "Revision des gemeinschaftlichen Systems zur Vergabe eines Umweltzeichens" sind die Kriterien hierfür festgelegt. Hierbei werden die Umweltauswirkungen im Rahmen einer Untersuchung der Wechselwirkungen eines Produktes mit der Umwelt, einschließlich des Verbrauchs an Energie und natürlichen Ressourcen während des Lebenszyklus eines Produkts ermittelt (Artikel 1, 1980/2000/EG). Bei der Bewertung ist die Netto-Ökobilanz zu berücksichtigen, die sich aus der Gegenüberstellung von Umweltbe- und -entlastungen ergibt, und sowohl Gesundheits- wie Sicherheitsaspekte berücksichtigt (Artikel 3 (1), 1980/2000/EG). Die Richtlinie der Europäischen Union sieht ein Verfahren zur Ermittlung und Auswahl der wichtigsten Umweltaspekte sowie zur Festlegung von Kriterien für die Vergabe eines Umweltzeichens vor, durch Erstellung einer Durchführbarkeits- und Marktstudie und einer Bewertung des Produkt-Lebenszyklus (Anhang II, 1980/2000/EG).

3.3 Bestehende Umweltzeichen für Enteisungsmittel

In Deutschland wurde die Einführung von Umweltzeichen bereits im Jahr 1977 durch die zuständigen Minister des Bundes und der Länder beschlossen. Grund für die

Vergabe eines Umweltzeichens ist es, den Verbrauch von Produkten in Richtung umweltfreundliche Produkte zu lenken. Das Umweltzeichen ist für Produkte vorgesehen, die sich bei ganzheitlicher Betrachtung unter Beachtung aller Gesichtspunkte des Umweltschutzes einschließlich des sparsamen Rohstoffeinsatzes durch besondere Umweltfreundlichkeit auszeichnen, ohne dass die Gebrauchstauglichkeit oder die Sicherheit beeinträchtigt werden. Die Betrachtung des Produktlebensweges ist nicht explizit vorgesehen. Beim Umweltzeichen-Verfahren wirken die Jury Umweltzeichen, das Deutsche Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (RAL) und das Umweltbundesamt zusammen. Zur Zeit (Stand 31.12.2001) sind mehr als 3500 Produkte in 85 Produktkategorien mit dem "Blauer Engel", dem ältesten und am weitesten verbreiteten Umweltzeichen ausgezeichnet (www.blauer-engel.de). Für die Produktgruppe "Streumittel" gibt es bislang zwei Umweltzeichen:

- Für abstumpfende Streumittel wurde das RAL-UZ 13 ("Salzfreie, abstumpfende Streumittel") vergeben. Bewertungskriterien sind hierbei die Abwesenheit von Auftaumittel, organischen Bestandteilen und umweltschädlichen Beimengungen, die Limitierung der Schwermetallgehalte sowie der Eignungsnachweis hinsichtlich Körnung, Streufähigkeit, und Schlagfestigkeit. Derzeit nutzen 26 Firmen dieses Umweltzeichen.
- Für "Bewegungsflächenenteiser für Flugplätze" gilt das Umweltzeichen RAL-UZ 99. Als Bewertungskriterien wurden die biologische Abbaubarkeit, die aquatische Ökotoxizität, die Limitierung der Nährstofffracht hinsichtlich CSB, Stickstoff und Phosphat sowie die Gebrauchstauglichkeit festgelegt. Derzeit ist nur eine Firma Zeichennehmer des RAL-UZ 99 für zwei Produkte auf Kaliumformiatbasis.

Für den Einsatz von Formiaten auf Wegen und Straßen besteht bisher europaweit, wie eine Internetrecherche zu den vorhandenen europäischen Umweltzeichen ergab, nur das vom Nordischen Rat (Schweden, Finnland, Norwegen und Island) herausgegebene Umweltzeichen "Ecolabelling of ice combatting agents" (Anonym 1997-2000). Der Kriterienkatalog setzt Anforderungen bzgl. Chloridgehalt, pH (5-11.5), Ökotoxizität (akute aquatische Ökotoxizität, Hemmung des Pflanzenwachstums sowie biologischer Abbaubarkeit), Schwermetalle (Schwellenwerte), Nährstoffe (Phosphor- und Stickstoffgehalt < 1%), sowie

gegenüber Zusätzen (Korrosionshemmer), die als schädlich (gem. 67/548/EEC) eingestuft wurden oder persistente oder umweltgefährliche Abbauprodukte bilden. Neben Kriterien zum Schutz der menschlichen Gesundheit wie auch zur Korrosion (ASTM G31-72: 1999) werden darin auch Anleitungen zum richtigen Umgang v. a. hinsichtlich einer Senkung des Verbrauchs sowie zum Schutz empfindlicher Pflanzenarten genannt. Auch Anforderungen zur Einhaltung gesetzlicher Vorgaben zum Schutz der Beschäftigten im Winterdienst, zur Sicherung von Umwelt- und Produktqualität sowie zur Einweisung des Verkaufspersonals werden gestellt.

4 Herangehensweise

4.1 Literatur und Datenbankrecherchen

Grundlegende Arbeiten zum Stand der Technik im „Winterdienst“ wurden bei der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (www.fgsv.de) recherchiert, die "Merkblätter" zum Winterdienst, "Technische Lieferbedingungen" zum Einsatz von Materialien im Straßenbau sowie Schriften zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von Mineralstoffen herausgibt (Schönfeld 1994; Wagner und Hanke 1997). Die Bundesanstalt für Straßenwesen (www.bast.de) hat seit 1995 mehrere umfangreiche Studien und Gutachten zu den Umweltauswirkungen von Streusalz und abstumpfenden Streumitteln veröffentlicht (siehe Brod 1993; Brod 1995; Nicolas 1996; Tegethof 1998; Moritz 1999). Die wichtigsten vom Umweltbundesamt veröffentlichten Studien stammen aus den 80er Jahren (Augustin und Gregor 1980, Balder und Nierste 1988). Die von uns durchgeführten Recherchen zu Ökotoxizität und biologischer Abbaubarkeit von Auftausalzen basieren in erster Linie auf Stoffdatensammlungen und Faktendatenbanken. Systematisch durchgesehen wurden folgende Quellen:

- Datenblätter Wassergefährdende Stoffe
- International Uniform Chemical Information Database (IUCLID)
- Hazardous Substances Data Bank (HSDB)
- Data Bank of Environmental Properties of Chemicals (EnviChem)

Darüber hinaus wurden neuere wissenschaftliche Arbeiten zu Umweltwirkungen von Streustoffen in den Literaturdatenbanken „Biological Abstracts“, "Science Citation Index", „Current Contents“ und der Literaturdatenbank des Umweltbundesamtes (UMPLIS) erfasst und ausgewertet. Zusätzlich wurde eine Literaturrecherche am Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau zum Thema „Glatteisbekämpfung“ in Auftrag gegeben (Anonym 2001).

Eine weitere wichtige Datenquelle waren Internetrecherchen zu den Stichworten „Auftausalz, Streumittel, Streusalze, Winterdienst etc.“ Dabei konnten wichtige

Studien zum Winterdienst in den U.S.A., Schweden, Finnland und in der Schweiz gefunden werden.

4.2 Konsultation interessierter Kreise

Um einen ersten Überblick über die tatsächlichen Stoffmengen, Einsatzgebiete, Herstellungs- und Anwendungsverfahren zu bekommen, wurde eine umfangreiche Produktrecherche (Bestandsaufnahme) durchgeführt. Wichtige Informationen über das Marktumfeld und die im Winterdienst eingesetzten Streumittel wurden durch direkte Kontaktaufnahme mit Herstellern, Verbänden, Straßenverkehrsbehörden, Kommunen und Verbraucherverbänden möglich. Ebenso wurde eine Internetrecherche zu vergleichbaren Umweltzeichen in anderen Ländern durchgeführt, um festzustellen, ob auftauende Streumittel auf Formiatbasis bereits anderswo zertifiziert wurden. Alle Zeichennehmer für das Umweltzeichen RAL-UZ-13 ("abstumpfende Streustoffe") wurden angeschrieben und um Angaben zu Art der Streumittel und Absatzmengen etc. gebeten. Auch wurden alle internationalen Großflughäfen in Deutschland kontaktiert, um aktuelle Verbrauchsmengen an Formiaten und anderer Streumittel zu erhalten.

Des Weiteren wurden insgesamt 54 Städte angeschrieben und um Auskunft zum Einsatz und den Jahresverbrauchsmengen von Streumitteln sowie der Einwohnerzahl und Straßenlänge gebeten. Insgesamt 9 Fragebögen wurden von den Kommunen zurückgesandt und ausgewertet. Eine Übersicht der kontaktierten Kreise ist in Anhang wiedergegeben. Der Verkauf von Streumitteln an Privathaushalte wurde in Freiburger Bau- und Gartenmärkten recherchiert.

4.3 Orientierende Ökobilanz

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde auch eine erste, orientierende Ökobilanz ausgewählter Streumittel durchgeführt. Während der „Blaue Engel“ die Durchführung von Ökobilanzen nicht zwingend vorsieht, ist die Erstellung einer Ökobilanz bei der Vergabe des Europäischen Umweltzeichens „Euromargerit“ vorgeschrieben.

Bereits in der Angebotsphase dieser Studie wurde angesichts des zur Verfügung stehenden zeitlichen und finanziellen Rahmens dargestellt, dass hier nur erste Abschätzungen im Sinne einer orientierenden Ökobilanz möglich sind.

4.3.1 Methodisches Vorgehen und Datengrundlagen

Ökobilanzen sind eine international eingeführte und anerkannte Methode, um im Rahmen einer Systembetrachtung die durch Produkte, Prozesse oder Dienstleistungen hervorgerufenen Umweltbelastungen entlang der verschiedenen Produkt- und Prozessphasen transparent zu machen, ökologische Optimierungspotenziale offen zu legen und umweltorientierte Entscheidungen vorzubereiten. Mit der Rahmennorm DIN EN ISO 14040 sowie den konkretisierenden Normen DIN EN ISO 14041 bis 14043 ist es inzwischen gelungen, bei den wichtigsten methodischen und prozeduralen Anforderungen sowie auf begrifflicher Ebene eine internationale Übereinkunft zu schaffen.

Die in DIN EN ISO 14040 vorgegebene Grundstruktur von Ökobilanzen mit den Bestandteilen Zielfestlegung und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung ist in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2: Grundstruktur und Bestandteile von Ökobilanzen (eigene Zusammenstellung nach DIN EN ISO 14040 ff.)

Bestandteil	Inhalt
Zielfestlegung und Untersuchungsrahmen	<ul style="list-style-type: none"> – Festlegung der beabsichtigten Anwendung und der Gründe für die Durchführung, Aufführung der angesprochenen Zielgruppen – Beschreibung und Festlegung der untersuchten Produktsysteme und des Untersuchungsrahmens (Systemgrenzen, Allokationsverfahren, Wirkungskategorien) – Beschreibungen zu den Anforderungen an die bilanzierten Daten – Hinweise zur kritischen Prüfung
Sachbilanz	<ul style="list-style-type: none"> – Datensammlung und Berechnungen zur Quantifizierung der stofflichen und energetischen Input- und Outputflüsse der untersuchten Produktsysteme – Beschreibung der Datensammlung und der Berechnungen
Wirkungsabschätzung	<ul style="list-style-type: none"> – Beurteilung der Bedeutung potenzieller Umweltwirkungen mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz – Zuordnung (Klassifizierung und Charakterisierung) von Sachbilanzdaten zu spezifischen Umweltwirkungen
Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> – Zusammenfassung der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung entsprechend der festgelegten Ziele und des Untersuchungsrahmens – Durchführung von Signifikanz-, Dominanz- und Sensitivitätsanalysen – Ableitung von Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Wie bereits einleitend erwähnt, wurde im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie nur eine erste, orientierende Ökobilanz erstellt, die in folgenden Punkten von den Anforderungen der genannten Normen abweicht:

- Eine sonst obligatorische kritische Prüfung der Ökobilanz wurde nicht durchgeführt. Auch weitere methodische und prozedurale Anforderungen, die an normkonforme Ökobilanzen gestellt werden (etwa Sensitivitätsanalysen bei vergleichenden, zur Veröffentlichung vorgesehenen Ökobilanzen), konnten nicht erfüllt werden.
- Es wurde lediglich die Herstellung (Rohstoffentnahme bis "Werkszaun") sowie die Ausbringung der ausgewählten Streumittel betrachtet; d.h. der Transport zu den Zwischenlagern, die Entsorgung bzw. der Verbleib der ausgebrachten Streumittel wurde nicht innerhalb der Ökobilanz erfasst, da hierzu ein örtlicher Bezugsrahmen fehlt.
- Die orientierende Ökobilanz basiert praktisch ausschließlich auf Daten, die aus Datenbanken oder verfügbaren Veröffentlichungen stammen. Eine eigenständige Erhebung spezifischer Daten war nicht vorgesehen.

4.3.2 Zielsetzung

Mit der hier durchgeführten orientierenden Ökobilanz sollte eine erste Einschätzung des Umweltpotentials ausgewählter Streumittel vorgenommen werden, v. a. im Hinblick darauf, ob signifikante Unterschiede in Herstellung und Aufwendungen zur Ausbringung bestehen und ob für die Vergabe eines Umweltzeichens eine eingehende, normkonforme Ökobilanz angezeigt ist.

4.3.3 Betrachtete Streumittel

Folgende Streumittel wurden für die orientierende Ökobilanz ausgewählt:

- Natriumchlorid
- Natriumformiat
- Harnstoff
- Granulat (Kalkstein und Granit)

Daneben wurde noch die Freiflächenheizung betrachtet.

4.3.4 Funktionelle Einheit

Um insgesamt einen Vergleich der o.a. Varianten zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse in dieser Studie grundsätzlich auf eine einheitliche Vergleichsbasis bezogen. Ausgehend von spezifischen Ausbringungsmengen wurde die (einmalige) Behandlung von jeweils 4 km² Straßenfläche (1.000 km Länge bei 4 m Streubreite) als Vergleichseinheit zu Grunde gelegt. Damit verbunden sind folgende Dosiermengen:

- Natriumchlorid, Natriumformiat und Harnstoff: jeweils 15 g/m² bzw. 60.000 kg absolut
- Granulat: 120 g/m² bzw. 480.000 kg absolut

Für die Freiflächenheizung lag nur ein Wert zum elektrischen Energieverbrauch vor, der sich auf eine gesamte Winterperiode zur Beheizung von Treppen in Aufgängen von U-Bahnstationen bezog (82 kWh/(a*m²), vgl. 5.1.6). Um diesen Verbrauch in Beziehung zu den Enteisungsmitteln zu setzen, wurde angenommen, dass die elektrische Beheizung zehn Streueinsätze pro Jahr vermeiden hilft (vorsichtige Schätzung).

4.3.5 Systemgrenzen

Mit der Festlegung der Systemgrenzen wird bestimmt, welche Module in einer Ökobilanz enthalten sind. Module wiederum stellen diejenigen Teile der untersuchten Systeme dar, für die zur Erstellung der Ökobilanz Daten gesammelt werden.

Grundsätzlich besteht bei der Durchführung einer Ökobilanz der Anspruch, dass der gesamte Lebensweg der untersuchten Systeme von der Rohstoffgewinnung bis zur Behandlung von Abfällen bilanziert wird. Aus Gründen der praktischen Durchführbarkeit sowie aus Zeit- und Ressourcengründen müssen jedoch Vereinfachungen getroffen und Systemgrenzen bestimmt werden. Bei der hier erstellten orientierenden Ökobilanz wurden, wie bereits erwähnt, aus Gründen der Datensymmetrie lediglich die Herstellung sowie die Ausbringung der Streumittel (durch Lkw-Transport) bilanziert.

4.3.6 Datengrundlagen der Sachbilanz

Grundsätzlich kann bei den Datengrundlagen einer Ökobilanz zwischen allgemeinen und spezifisch ermittelten Daten unterschieden werden. Unter allgemeinen Daten

werden Mittelwerte zum Energie- und Rohstoffverbrauch und zu Emissionen verstanden, d.h. Zahlenwerte, die den Stand der Technik eines bestimmten Produktionsprozesses repräsentieren. Spezifisch ermittelte Daten beschreiben hingegen die Verhältnisse an einem bestimmten Produktionsstandort. Je nach Umsetzungsgrad des Standes der Technik (Effizienz von Schadstoffabscheidung oder ähnliches) können spezifisch ermittelte Daten erheblich (nach oben und unten) von allgemeinen Daten abweichen.

Bei der hier durchgeführten orientierenden Ökobilanz wurden - außer bei den Daten zur Herstellung von Natriumformiat – allgemeine Daten aus Datenbanken herangezogen.

Prozesse zur Energiebereitstellung wurden auf der Basis vorhandener Bilanzmodule der Ökobilanzsoftware umberto 4.0 (2000) des Institutes für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU) berechnet. Diese Module basieren wiederum auf anerkannten Grundlegendaten aus Fritsche et al. (1997) und Frischknecht et al. (1996).

Transportprozesse (hier nur relevant für die Ausbringung der Streumittel) wurden generell auf der Grundlage von Datenmodulen der Ökobilanz-Software umberto 4.0 berechnet. Es handelt sich dabei um funktionsdefinierte Module, die den Treibstoffverbrauch sowie die Abgasemissionen in Abhängigkeit transportspezifischer Rahmenparameter abbilden. Für die Modellierung wurden Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für LKW in der Bundesrepublik Deutschland verwendet (Hassel et al. 1995). Für das Streufahrzeug wurden folgende spezifischen Bedingungen abgeschätzt:

- Solo-Lkw mit der Nutzlast von max. 15,3 t
- Fahrsituation: Landstraße
- Auslastungsgrad durch Ladung: 50%
- Fahrstrecke: 1.000 km

Für die Herstellung der Streumittel wurden folgende Datenquellen zugrunde gelegt:

Tabelle 3: Datenquellen für die orientierende Ökobilanz

Streumittel	Quellen	Bemerkungen
Natriumchlorid	umberto 4.0, 2000 basierend auf "Eco-profiles of the European polymer industry, Report 6: Polyvinyl Chloride. A Report for APME, Brussels, April 1994	Mix aus Bergbau und Soleförderung. Datensatz umfasst auch Energiebereitstellung der Prozesse.
Natriumformiat	BASF 2001	Datensatz beschreibt die Synthese aus NaOH mit CO
Harnstoff	umberto 4.0, 2000 basierend auf Patyk, A., Reinhardt, G.: Düngemittel- Energie- und Stoffstrombilanzen. Vieweg Umweltwissenschaften. Braunschweig 1997.	
Granulat – Kalkstein	umberto 4.0, 2000 basierend auf BUWAL (1998): Schriftenreihe Umwelt 250 / II, Ökoinventare für Verpackungen Band II, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, Schweiz, (2.Auflage).	
Granulat – Granit	GEMIS 4.07, 2001	
Freiflächenheizung	Persönliche Mitteilung Herr Haupt, Fa. Resch+Haupt Elektroanlagen, Augsburg, 2001	

4.3.7 Wirkungsabschätzung

Allgemein werden im Rahmen der Wirkungsabschätzung die Ergebnisse der Sachbilanz im Hinblick auf ihre Umweltrelevanz eingeschätzt. Hierzu werden (als verbindliche Bestandteile gemäß DIN EN ISO 14042) relevante Wirkungskategorien (einschließlich der zugehörigen Indikatoren und Modelle) ausgewählt, die Sachbilanzergebnisse nach Kategorien klassifiziert und in Form von Wirkungsindikatorergebnissen charakterisiert. Diese Ergebnisse bilden zusammengefasst das sogenannte Wirkungsabschätzungsprofil. Das konkrete Vorgehen wird nachfolgend näher beschrieben.

Aufgrund der Zielsetzung der Studie und in Anbetracht der hier zur Verfügung stehenden Daten wurden folgende Wirkungskategorien quantitativ beschrieben:

- Ressourcenbeanspruchung,
- Treibhauspotential,
- Photooxidantienbildung,
- Versauerung,
- Eutrophierung (terrestrisch).

Weitere in der Fachwelt diskutierte Wirkungskategorien und -indikatoren (und damit in Zusammenhang stehende Umweltprobleme wie Human- und Ökotoxizität, Belästigungen durch Geruch, Lärm und Licht, Strahlung, allgemeine Risiken) können hingegen derzeit mit den zur Verfügung stehenden Methoden und dem zugänglichen Dateninventar nicht befriedigend quantifiziert werden.

Nachstehend wird für die o.a. Kategorien das konkrete Vorgehen näher erläutert:

Ressourcenbeanspruchung: Hier wurden ausschließlich energetische Ressourcen auf der Grundlage des *kumulierten Energieaufwands (KEA)* berücksichtigt. Auf die Berücksichtigung nicht-energetischer Ressourcen wurde verzichtet, da davon ausgegangen werden kann, dass die in der Bilanzierung erfassten mineralischen Rohstoffe in solch hohem Umfang vorhanden sind, dass sie bei den hier untersuchten Varianten nicht bewertungsrelevant sind. Umweltbeeinträchtigungen durch die Rohstoffentnahme selbst (wie Flächennutzung) wurden nicht bilanziert, da hierfür die Datenbasis aus der Sachbilanz nicht ausreicht.

Treibhauspotential: Schadstoffe, die zur zusätzlichen Erwärmung der Erdatmosphäre beitragen können, wurden unter Berücksichtigung ihres *Treibhauspotenzials* bilanziert, das die Schadwirkung des Einzelstoffes relativ zu Kohlendioxid (CO₂) kennzeichnet. Als Indikator für die Emission an treibhausrelevanten Gasen wird das Gesamt-Treibhauspotenzial in CO₂-Äquivalenten angegeben. Die mengenmäßig bedeutendsten treibhausrelevanten Schadstoffe sind hierbei Kohlendioxid, Methan und Distickstoffmonoxid. Als Bilanzzeit zur Berechnung der Werte wurden 100 Jahre angesetzt, indirekte Effekte wurden nicht einbezogen.

Versauerung von Ökosystemen: Schadstoffe, die als Säuren oder aufgrund ihrer Fähigkeit zur Säurefreisetzung zur Versauerung von Ökosystemen beitragen können, werden unter Berücksichtigung ihres *Versauerungspotenzials (Azidifizierungspotenzial, AP)* bilanziert und aggregiert. Das Versauerungspotenzial kennzeichnet

die Schadwirkung eines Stoffes als Säurebildner relativ zu Schwefeldioxid (SO_2). Als Indikator für die Gesamtbelastung wird das Gesamt-Versauerungspotenzial in SO_2 -Äquivalenten angegeben. Die mengenmäßig bedeutendsten Säuren bzw. Säurebildner sind Stickoxide, Schwefeldioxid, Chlorwasserstoff und Fluorwasserstoff.

Bildung von Photooxidantien: Zu den Photooxidantien gehören Luftschadstoffe, die zum einen zu gesundheitlichen Schädigungen beim Menschen, zum anderen zu Schädigungen von Pflanzen und Ökosystemen führen können. Leichtflüchtigen organischen Verbindungen kommt eine zentrale Rolle in diesem Umweltproblemfeld zu, da sie Vorläufersubstanzen sind, aus denen Photooxidantien entstehen können. Zur Gruppe der leichtflüchtigen organischen Verbindungen („Volatile Organic Compounds“, VOC) gehören sehr viele Einzelsubstanzen. Sie können hinsichtlich ihres *Photooxidantien-Bildungspotenzials* im Vergleich zu Ethylen als Bezugssubstanz charakterisiert werden.

Eutrophierung von Ökosystemen: Die übermäßige Anreicherung von Böden und Gewässern mit Nährstoffen - meist in Form von Stickstoff- und Phosphorverbindungen - wird als Überdüngung oder Eutrophierung bezeichnet. Zur Quantifizierung wird das *Eutrophierungspotenzial (EP)* der relevanten Luft- und Wasseremissionen relativ zu demjenigen von Phosphat bewertet. Zusätzlich wird der Chemische Sauerstoffbedarf als Maß für den Eintrag organischen Kohlenstoffes benutzt. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass alle Emissionen von Nährstoffen in die Luft in den Boden gelangen und entsprechend ausschließlich die ins Wasser emittierten Nährstoffe zur aquatischen Eutrophierung beitragen. Der Anteil der über die Luft emittierten Nährstoffe, die ins Gewässer gelangen, ist nur gering (vgl. Huijbregts und Seppälä 2000), weshalb diese Vereinfachung keinen nennenswerten Fehler darstellt. Aus Gründen der Datensymmetrie konnte in dieser Studie lediglich die terrestrische Eutrophierung abgebildet werden.

Die für die quantifizierten Kategorien eingesetzten Charakterisierungsfaktoren sind in Tabelle 4 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4: Gewichtungsfaktoren zur Berechnung der Wirkungskategorien

Treibhauspotenzial	Gewichtungsfaktor
Kohlendioxid, fossil	1
Methan	11
Distickstoffmonoxid	270
Versauerungspotenzial	
Ammoniak	1,88
Schwefeldioxid	1
No _x	0,7
NO	1,07
Stickstoffdioxid	0,7
Chlorwasserstoff	0,88
Fluorwasserstoff	1,6
Photooxidantienpotenzial	
NMVOG	0,432
Methan	0,007
Methylethylketon	0,473
Formaldehyd	0,421
VOC unspezifisch	0,432
Eutrophierungspotenzial terrestrisch	
NO (L)	0,2
NO ₂ (L)	0,13
NO _x (L)	0,13
Ammoniak (L)	0,33

(CML 1992a, CML 1992b, Klöpffer und Renner 1994)

5 Ergebnisse der Machbarkeitsstudie

5.1 Systemvergleich ausgewählter Produkte

Nachfolgend werden auftauende Streustoffe, wie Tausalze auf Chloridbasis, Harnstoff, Calcium-/Magnesiumacetat, Formiat sowie abstumpfende Streumittel hinsichtlich ihrer Herstellung, Gebrauchstauglichkeit und Ausbringung miteinander verglichen. Da Alkohole, wie Propylenglykol oder Diethylenglykol überwiegend zur Enteisung von Flugzeugen bzw. zur Pistenenteisung auf Flughäfen, (z. T. in Kombination miteinander und mit Harnstoff), nicht aber im kommunalen Bereich (auch aufgrund ihres hohen BSB-Potentials) eingesetzt werden, wurden diese Enteisungsmittel nicht in den Vergleich mit einbezogen (Koryak et al. 1998). In Tabelle 5 sind die wesentlichen chemisch-physikalischen Eigenschaften von Auftausalzen wiedergegeben. Die Auftauvorgang ist unter u.a. von der Anzahl der gelösten Teilchen abhängig, so dass Salze mit einem niedrigen Molekulargewicht theoretisch eine effektivere Auftauleistung haben als solche mit höherem Molekulargewicht. Des Weiteren ist jedoch auch die Thermodynamik bei der Auflösung der Salze in Wasser zu beachten. So entzieht Natriumchlorid bei der Auflösung in Wasser der Umgebung Energie, so daß sich die Lösung abkühlt, während bei der Auflösung von Calcium- und Magnesiumchlorid Energie freigesetzt wird (Badelt et al. 1999). Zudem ist die Auftaugeschwindigkeit u.a. auch von der Körnung der Auftausalze abhängig. Grobkörnige Salze reagieren zwar deutlich langsamer als feinkörnige, haben jedoch eine größere lokale Tiefenwirkung, so dass sich das Eis nachfolgend besser vom Untergrund lösen und abgeräumt werden kann. Ein wesentlicher Faktor ist die Umgebungstemperatur, da Streusalze unterhalb ihrer "eutektischen Temperatur" rasch ihre Wirksamkeit verlieren. So wird der Einsatz von Kochsalz generell unterhalb von -15°C nicht empfohlen und es kommen andere Auftausalze wie Calciumchlorid zum Einsatz (Götzfried und Badelt, 2002). Die Auftaugeschwindigkeit spielt ebenfalls eine große Rolle, da langsam wirkende Tausalze tendenziell überdosiert werden, um die gleiche Wirkung zu erzielen (Hanke, 2002).

5.1.1 Streusalze auf Chloridbasis

Natriumchlorid

Natriumchlorid (NaCl , Steinsalz, z. T. vergälltes Kochsalz) ist das am häufigsten eingesetzte und preiswerteste Taumittel. Die Auftauleistung ist von der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit abhängig. Eine Gefrierpunktserniedrigung von -5 °C erfolgt bei Einsatz von 90 g NaCl pro kg Eis (Brod 1993). Die optimale Tauwirkung liegt bei einer Dosiermenge von 10 g/m^2 und einer Temperatur zwischen -1 und -8 °C , wobei man bei -8 °C etwa die doppelte Menge zum Auftauen von Schnee und Eis benötigt wie bei -1 °C (Hanke 1996). Streusalz wird meist erst nach dem Einsatz von Schneepflügen ausgebracht (Wagner und Hanke 1997).

Calciumchlorid

Calciumchlorid (CaCl_2) ist stark hygroskopisch und setzt in Gegenwart von Feuchtigkeit Wärmeenergie frei, so dass der Auftauvorgang schneller eingeleitet wird. Die Auftauwirkung von Calciumchlorid ist noch bei -50 °C gegeben, daher wird es bevorzugt bei sehr tiefen Temperaturen oder auch als Sole bei der Feuchtsalzmethode (siehe unten) eingesetzt. Calciumchlorid fällt überwiegend als Nebenprodukt bei der Herstellung von Natriumcarbonat aus Natriumchlorid und Calciumcarbonat (Solvay Prozess) an (vgl. u.a. Entwurf TL-Streu, FGSC 2002). Von weit geringerer Bedeutung ist seine Gewinnung aus natürlichen Solen durch Eindampfung (Kemp und Keegan 1993). CaCl_2 wird auch zur Bindung von Staub (stark hygroskopisch) benutzt, und um NaCl bei anhaltend tiefen Temperaturen feucht zu halten (Persson und Ihs 1998). Der höhere Anschaffungspreis ($70\text{ US\$/t}$) gegenüber NaCl ($25\text{-}50\text{ US\$/t}$) wiegt jedoch die bessere Wirksamkeit dieses Tausalzes wieder auf. In Schweden wird CaCl_2 heute aufgrund seiner höheren Betonaggressivität nicht mehr eingesetzt. Da dieses Salz pro Gewichtseinheit auch mehr Chlorid-Ionen als NaCl enthält, würde bei dessen Ausbringung auch insgesamt mehr Chlorid, bezogen auf die gleiche Einsatzmenge, in die Umwelt gelangen (Persson und Ihs 1998).

Magnesiumchlorid

Meersalz besteht zu 17% aus Magnesiumchlorid (MgCl_2) und ist die wichtigste Quelle für dieses Salz. Daneben fällt Magnesiumchlorid insbesondere in Deutschland

bei der Gewinnung von Kaliumchlorid an (Pottasche-Industrie). Die weltweite Produktion von Magnesiumchlorid wird für 1988 mit 1,3 Mio. t angegeben. Hiervon wird der größte Teil zur Herstellung von elementarem Magnesium und Magnesiumoxid verwendet (Seeger, Otto et al. 1990).

Kaliumchlorid:

Kaliumchlorid (KCl) wirkt schneller und effektiver bei niedrigeren Temperaturen als NaCl, erweist sich aber nicht als Alternative im Bezug auf Korrosion, Betoneinwirkung, Umweltwirkungen und Wirtschaftlichkeit (Persson und Ihs 1998).

Mischsalze

Neben den Einzelsalzen werden auch Mischsalze, wie NaCl+CaCl₂ oder NaCl+MgCl₂, angeboten, die unter -8 °C ebenfalls eine höhere Tauwirkung aufweisen als NaCl allein und somit Wirksamkeit und Anwendungsbereich der einzelnen Salze kombinieren und erweitern.

Feuchtsalze

Taustoffe werden heute überwiegend angefeuchtet ausgebracht, um Streuverluste durch Verwehungen zu vermeiden. Hierbei kommt insbesondere die "Feuchtsalz 30"-Methode zur Anwendung, bei der das Salz während des Streuens mit einer Salzlösung (entsprechend 30% der ausgebrachten Menge, oftmals in Form von CaCl₂) angefeuchtet wird. Hierdurch und mit einer bedarfsgerechten Dosierung der Auftausalze kann die Ausbringungsmenge an Natriumchlorid auf 10 bis 40 g/m² begrenzt werden, wobei die höheren Werte insbesondere bei tiefen Temperaturen (etwa bei -15°C) anfallen (Wagner und Hanke 1997). Bei dieser Ausbringungstechnik wird das Auftausalz in die Feststoffbehälter der Fahrzeuge geladen. In separaten, seitlich an den Feststoffbehältern angebrachten Soletanks befinden sich die vorbereiteten NaCl-, CaCl₂- oder MgCl₂-Lösungen. Die Vermischung von Auftausalz und Lösung erfolgt unmittelbar vor der Ausbringung auf dem Streuteller in einem Mischungsverhältnis von 70 Gew.-% Auftausalz und 30 Gew.-% Salzlösung. Feuchtsalz verhindert nicht nur Verwehungen während der Ausbringung, es ermöglicht auch größere Streubreiten und haftet auf reif- und eisglatter Fahrbahn besser als Trockensalz. Die oftmals vertretene Ansicht, dass angefeuchtetes Salz den Auftauprozess schneller in Gang setzt, lässt sich im Laborexperiment jedoch

nicht bestätigen. Auch die Tauleistung von Feuchtsalz ist gegenüber Natriumchlorid im Anlieferungszustand verringert (4,4 g Eis/g Taustoff gegenüber 5,3 g Eis/g Taustoff vgl. Götzfried und Badelt 2002). Der Einspareffekt durch Feuchtsalz beruht demnach überwiegend auf der gezielteren Dosierung und den geringeren Verlusten durch Winddrift. Die Feuchtsalzstreuung hat sich außerorts innerhalb der achtziger Jahre stark verbreitet und wird seit Anfang der neunziger Jahre zunehmend auch innerorts eingesetzt. Bei konsequenter Anwendung der Feuchtsalztechnik mit allen zuvor erwähnten Vorteilen werden im Winterdienst Einsparungen beim jährlichen Salzverbrauch von durchschnittlich 24 Prozent in Städten und bis zu 44 Prozent auf Straßen außerorts erreicht (Anonym 2001). Weniger Tausalzmengen pro Fahrbahnkilometer bedeuten auch weniger Korrosion, einen geringeren Salzeintrag in Böden und Gewässer und weniger Ablagerungen auf oberirdische Pflanzenteile (Assmann 1999). In den USA wird vermehrt eine NaCl-Salzlösung zum Anfeuchten der Straßenoberfläche noch vor dem eigentlichen Ausbringen des Streusalzes praktiziert.

Additive

Den Tausalzen werden oftmals Zusätze zur Verhinderung des Zusammenbackens (Cyanidsalze) beigemischt. So wird Kalium- (oder Natrium-) Ferrocyanid ($\text{Na}_4\text{- bzw. K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$) in Konzentrationen von 20-100 mg/l (neben Eisen(II)Ferrocyanid $\text{Fe}_4(\text{Fe}_3(\text{CN})_5)_3$) mit dem Salz vermengt, um ein Verklumpen der einzelnen Salzkörner zu vermeiden (Brod 1993; Faith-Ell 2000).

Tabelle 5: Chemisch-Physikalische Daten von Auftaumitteln

Wirkstoffe	CAS	Formel	Molekulargewicht [g/mol]	Wasserlöslichkeit [g/l]	Spezifische Dichte (g/cm ³)	theoretischer Wirkstoffverbrauch (NaCl = 100%) ¹⁾	theoretischer Sauerstoffverbrauch [g O ₂ /g Enteisler]	Eutektische Temperatur [°C] ²⁾	Stoffmenge zum Tauen von 1 kg Eis [g]	Kostenvergleich
Natriumchlorid	7647-14-5	NaCl	58,44	358	2,17	100	-	-21	163	100
Kaliumchlorid	7447-40-7	KCl	74,55	330	1,98	128	-			
Calciumchlorid	10043-52-4	CaCl ₂	111,0	740	2,15	127	-	-51,6		
Magnesiumchlorid	7786-30-3	MgCl ₂	95,2	542	2,32	109	-	-33	309	200-230
Kaliumacetat	127-08-2	C ₂ H ₃ KO ₂	98,2	2530	1,57	168	0,65	-50		
Natriumacetat	127-09-3	C ₂ H ₃ NaO ₂	82,0	365	1,52	140	0,78	-17		
Natriumformiat	141-53-7	CHNaO ₂	68,0	820	1,92	116	0,24	-18		
Kaliumformiat	590-29-4	CHKO ₂	84,1	3310	1,91	144	0,19	-50		1500
Magnesiumacetat Tetrahydrat	16674-78-5	C ₄ H ₁₆ MgO ₄ ·4H ₂ O	214,5	1200	1,45	245	0,60	-18	263	1300-2000
Calciumacetat Hydrat	62-54-4	C ₄ H ₆ CaO ₄ ·H ₂ O	158,2	300	1,5	180	0,81			
Harnstoff	57-13-6	CH ₄ N ₂ O	60,1	590	1,34	206	2,13	-12	380	250-400
1,2-Propanediol (Propylenglykol)	57-55-6	C ₃ H ₈ O ₂	76,1	mischbar	1,04	260	1,68			

Quellenangaben: Merck-Katalog Chemikalien und Reagenzien, HSDB, Schwäke et al. (1998), Ihs (2000), Frankrone (2002), Dietle (2002) und eigene Berechnungen

¹⁾ Entspricht dem Verhältnis bei jeweils gleicher Anzahl auftauwirksamer Teilchen (Moleküle bzw. Ionen)

²⁾ Temperatur, bei der eine Salzlösung noch Eis und Schnee schmelzen kann

5.1.2 Calcium-/Magnesiumacetat

Calcium-/Magnesium-Acetat (CMA) gilt gegenüber NaCl als weniger fischtoxisch, weniger mobil im Boden und biologisch leicht abbaubar (damit aber sauerstoffzehrend). Es kann jedoch Schwermetalle im Boden mobilisieren. CMA wirkt langsamer als Streusalz und gilt bei Temperaturen unter -5 °C als weniger effektiv. Um die gleiche Menge Eis wie mittels Streusalz zu schmelzen, muss eine ca. 1.3 mal höhere Dosis CMA eingesetzt werden. Unter -5 °C muss ca. 20% mehr CMA als NaCl ausgebracht werden (Anonym 1991). Als 3%-ige Salzlösung ist CMA im Vergleich zu Streusalz weniger korrosiv und greift auch Beton weniger stark an. Deshalb wird CMA, wie CaCl_2 , v. a. in speziellen Fällen wie auf Brücken ausgebracht, um die Korrosion tragender Bauteile gering zu halten (Leppänen 1995, Ihs 2000, Alppivuori 1995).

Auf dem Markt ist Ca-Acetat ("Clearway 1") als 50%-ige wässrige Lösung (+ 0.6% Korrosionsinhibitor) erhältlich. Dieses Produkt gilt als gut abbaubar, weniger korrosiv gegen Metalle, und im Unterschied zu Harnstoff ohne Düngewirkung (da ohne Stickstoff) (Ihs 2000). CMA besitzt jedoch auch das Potential für eine wirtschaftliche großtechnische Herstellung. Diese erfolgt bislang über eine Reaktion von Dolomit mit Essigsäure aus Erdgas. Die Herstellungskosten hierfür liegen bei 600-700 US\$/t (Anonym 1991). Damit ist CMA ungefähr 20-30 mal teurer als NaCl und ca. 5-10 mal so teuer wie Harnstoff (Ihs 2000). Eine zukünftig auch großtechnisch mögliche Herstellung von CMA aus Biomasse-Abfällen (Holzabfällen, Klärschlamm, Kompost, Industriemolkerückständen), anstelle von Erdöl und Erdgas, könnte den Preis auf ca. 58 US\$/t senken (zum Vergleich: NaCl 25-50 US\$/t, CaCl_2 100 US\$/t, Trantolo, Gresser et al. 1990).

5.1.3 Harnstoff

Harnstoff ist das natürliche Endprodukt des Stickstoffwechsels beim Abbau von Protein. Jeder Mensch produziert 20 bis 30 g Harnstoff pro Tag. Als weltweit wichtigster landwirtschaftlicher Stickstoffdünger wird Harnstoff nach dem Haber-Bosch-Verfahren aus Ammonium und Kohlendioxid bei hohem Druck und hoher Temperatur über Ammoniumcarbamat als Zwischenprodukt gewonnen. Der weltweite Harnstoffbedarf wird für das Jahr 1997 mit 89 Mio. t angegeben. Harnstoff (Urea, Karbamid, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) gilt verglichen mit Streusalz als weniger korrosiv, vor allem

gegenüber Aluminium, weshalb es überwiegend im Flughafenbereich (wie z. B. noch immer in Schweden und Kanada) zum Einsatz kommt. Dort wird technischer Harnstoff oft auf vereisten Flughafenpisten eingesetzt, was jedoch zur Überdüngung von Pistenrändern, Grundwasser, Flughafenabwässer und Kläranlagen führt (siehe Kap. 5.3.5.3). Aufgrund dieser starken Düngewirkung, wurde die Anwendung von Harnstoff in einigen Ländern (wie z. B. in England, wo Glykole bevorzugt eingesetzt werden) verboten. Verglichen mit gewöhnlichem Streusalz ist Harnstoff teurer und hat auch keine so lange Tauwirkung (Assmann 1999). Der Marktpreis ist großen Schwankungen unterworfen und bewegt sich zwischen 100 und 250 US\$/t (Meessen und Petersen 1996). Bei der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Markterhebung wurden auch Produkte auf Harnstoffbasis, die als „umweltfreundliches, salzfreies“ Auftaumittel für Privathaushalte angeboten wurden, ermittelt. Ausbringungsmengen für eine wirkungsvolle Glatteisbekämpfung werden in der Literatur mit bis zu 5 kg/m² (!) angegeben (Assmann 1999, Porst 1999).

5.1.4 Formiate

Formiate sind Salze der Ameisensäure. Die weltweite Produktionskapazität für Ameisensäure wird für das Jahr 1988 mit 330.000 t/a angegeben. Die weltgrößte Anlage (100.000 t/a) wurde 1981 bei der BASF in Ludwigshafen installiert. Die Ameisensäure wird hier aus der Reaktion von Methanol und Kohlenmonoxid in Anwesenheit von Katalysatoren über Methylformat als Zwischenprodukt hergestellt. Der Haupteinsatzbereich von Ameisensäure besonders in Europa besteht in der Verwendung als Silage-Additiv. Hierbei wird dem frisch geschnittenen Gras vor der Silagebehandlung Ameisensäure zugesetzt, um die Milchsäuregärung zu begünstigen und die unerwünschte Bildung von Buttersäure zu unterdrücken. Als Folge wird der Nährwert der Silage erhöht. Weitere Verwendungsbereiche von Ameisensäure sind u.a. seine Verwendung als Futterzusatz (aufgrund der Wirkung gegen *Salmonella* Bakterien) sowie als Färbehilfsmittel in der Textil- und Lederindustrie. Der Preis für die Ameisensäure wird für das Jahr 1992 mit etwa 0,9 US\$/kg angegeben (Drury 1994, Reutemann und Kieczka 1989).

Die bisherige Anwendung von Formiat beschränkt sich überwiegend auf Flughäfen, wo nach Herstellerangaben seit etwa 4 Jahren Kaliumformiat eingesetzt wird. Dieses Tausalz hat in gelöster Form eine gefrierpunktserniedrigende Wirkung die zwar unter

der von NaCl liegt, aber höher als die von Harnstoff und Glykol (siehe Tabelle 5). (Das Natriumformiat ist aufgrund seines niedrigeren Molekulargewichts noch etwas günstiger). Weiter vorteilhaft ist die leichte biologische Abbaubarkeit der Formiate in Boden und Kläranlage, ein geringer CSB bzw. BSB, der insgesamt verminderte Eintrag von Chlor in die Straßenrandvegetation sowie seine (nach Herstellerangaben) gegenüber normalem Tausalz (NaCl) um 75% geringere Korrosionswirkung. Trotz des werkseitig aufgrund des Korrosionsschutzes eingestellten pH von 11,5 wird in der Praxis durch die Verdünnung während des Tautvorgangs ein pH von 7,5-8,5 bestimmt, bei dem keine ätzende Wirkung zu befürchten sind. Die Verschiebung des pH in den leicht alkalischen Bereich wird sogar als "zusätzlicher Puffer gegenüber dem Einfluss sauren Regens" positiv beurteilt. Natriumformiat ist jedoch 5-6 mal so teuer und wird im Entwurf zur TLStreu nicht als Streumittel empfohlen.

Bisher liegen nur wenige Erfahrungsberichte über den Einsatz von Formiaten als Auftausalz im kommunalen Bereich vor sowie über Langzeitwirkungen in natürlichen Systemen. Nach Herstellerangaben hat sich v. a. für den Einsatz im größeren Maßstab als hinderlich erwiesen, dass ältere Streufahrzeuge zur Ausbringung von Streugranulat kein flüssiges Kaliumformiat einsetzen können. Die für die Feuchtsalzausbringung eingesetzten Fahrzeuge könnten hingegen problemlos umgerüstet werden. Die Wirtschaftsbetriebe in Oberhausen testeten Formiat bereits 1997 und 1998, wobei die Tauleistungen als sehr gut eingestuft wurden. Der flüssige Enteisener konnte mit herkömmlichen Kehrmaschinen ausgebracht werden. Der bisherige Einsatzbereich beschränkt sich auf kleinere Flächen wie Zufahrtwege, Parkplätze etc. Weitere Anwender sind die Siemens AG München, die MAN Thyssen Stahlrohrwerke in Duisburg, die Daimler Benz Werke in Bremen und die Volkswagenwerke in Braunschweig. Für die Auswahl des Enteisungsmittels spielen meist die spezifischen Bedingungen vor Ort eine Rolle. Ein Beispiel ist die Reinigung des Betriebsgeländes mit Kehrmaschinen, bei der die Staubbelastung durch Anfeuchten mit Kaliumformiatlösung verringert werden soll (der Zusatz von Wasser würde bei Frost zu einem Funktionsausfall führen). Auch in einer Gemeinde in Österreich wurden Formiate in einem Pilotversuch bereits eingesetzt. Weitere Einsatzbereiche betreffen Standorte, an denen eine erhöhte Korrosionsgefährdung durch Streusalz befürchtet wird, wie Parkhäuser, die Öresundbrücke sowie Hubschrauberlandeplätze (dort wegen der höheren Windverfrachtung von Streusalz).

Auch einzelne Kaufhäuser tragen sich aufgrund schlechter Erfahrungen mit abstumpfenden Streumitteln (Kratzspuren am Boden, Schäden an Rolltreppen) mit dem Gedanken, Formiate einzusetzen. Genauere und überprüfbare Berichte über die Anwendungserfahrungen konnten jedoch nicht ermittelt werden. Derzeit wird daran gearbeitet, das Enteisungsmittel auch in granulierter Form anzubieten, damit es mit dem in den Kommunen vorhandenen Maschinenpark ausgebracht werden kann (siehe Leistungsbeschreibung und Herstellerangaben).

5.1.5 Abstumpfende Streumittel

Auf dem Markt werden vor allem natürliche, gebrochene Gesteine als abstumpfende Stoffe angeboten. Unter Splitt versteht man gebrochene Mineralstoffe mit Korngrößen über 2 mm und mindestens 90% bruchflächigen Körnern, unter Sand gebrochene oder ungebrochene Mineralstoffe bis 2 mm (Knirsch 2002). Verwendung finden verschiedene Materialien wie Quarz, Lavaschlacke, Kalkstein, Granit u.a. Daneben gibt es jedoch eine Vielzahl anderer Feststoffe, wie Bergbauabraum, gebrochene Hochofenschlacke, Schmelzkammergranulate, gebrochener Bauschutt, Asche, Sägespäne u.a., die als Streumittel zum Einsatz kommen (Moritz 1999), wobei hinsichtlich Umfang und Menge keine Daten vorliegen. Abstumpfende Streumittel erhöhen die Griffigkeit (gekennzeichnet durch den Kraftschluss- bzw. Gleitbeiwert) der Fahrbahnoberfläche, wenn sie sich mit der Glätteschicht verzahnen. Versuche zeigten, dass durch abstumpfende Stoffe ($\geq 100 \text{ g/m}^2$) Gleitbeiwerte (Griffigkeit) erzielt werden können, die denen einer nassen Straße entsprechen. Nach dem Ende der Glätteperiode wirken auf der Fahrbahn verbliebene Streumittelreste hingegen entgegengesetzt und senken den Kraftschlussbeiwert deutlich herab (Moritz 1999). Sie wirken mechanisch und gelten als nahezu wirkungslos bei Temperaturen unter -10 °C sowie bei Lockerschnee (Ihs 2000). Eine Studie in Berlin ergab, dass die Verwendung von Granulat bei normaler Glätte zu einer Verdoppelung der Unfallrate gegenüber nichtvereisten/schneefreien Fahrbahnen führt, während Tausalz die Unfallrate auf das Niveau nicht-winterlicher Fahrbahnverhältnisse senkte (Hofmann 1986 in Ruess 1998). Zum Erzielen einer abstumpfenden Wirkung ist eine Streumenge von mindestens 100 g/m^2 nötig. Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen empfiehlt eine Regelstreuichte von 150 g/m^2 (Wagner und Hanke 1997). Allerdings hängt die Dosiermenge im wesentlichen von der Anzahl und Größe der pro Flächeneinheit

ausgebrachten Körner und damit auch von der Dichte des Materials ab, die zwischen $0,7 \text{ g/cm}^3$ (Bims) bis $3,05 \text{ g/cm}^3$ (Basalt) schwankt. Zudem wird von Herstellerkreisen hervorgehoben, dass der Einsatz von Streusalz bei Temperaturen unter -10 C° nicht zielführend ist und die verschiedenen Anwendungsfälle wie Schneeglätte, Reifglätte oder Glatteis eine differenziertere Bewertung abstumpfender Streumittel verlangen (Knirsch, 2002). Neben der verglichen mit Streusalz ($10\text{-}20 \text{ g/m}^2$) höheren Einsatzmenge, gilt als weiter nachteilig für den Einsatz dieser Stoffe im Winterdienst, dass sie von den Fahrzeugen an den Straßenrand geschleudert werden, und damit häufig Wiederholungsstreuungen erforderlich sind. Zum Vergleich: bei einer normalen Streudichte von 15 g/m^2 Trockensalz werden zum Abstreuen eines 800 km langen Straßennetzes einer typischen Großstadt mittels Aufsaltzstreuer mit 5 Tonnen Ladekapazität, bezogen auf eine 6 Meter breite Fahrbahn, ca. 14 Einsatzfahrten benötigt. Hingegen machen abstumpfende Mittel bei einer Dosierung von 120 g/m^2 (siehe Annahme orientierende Ökobilanz) etwa 115 Einsatzfahrten erforderlich (in Anlehnung an Moritz 2000). In der Schweiz rechnet man für Splitt bei einer Streudichte von $20\text{-}250 \text{ g/m}^2$ mit Streumengen pro Winter von $3.4\text{-}14 \text{ t/km}$, gegenüber Streumengen von $0.4\text{-}2 \text{ t/km}$ für Tausalz bei einer Streudichte von $5\text{-}14 \text{ g/m}^2$ (Ruess 1998). Trotz des verglichen mit Streusalz (ca. 130 DM/t) geringeren Anschaffungspreises (ca. $25\text{-}30 \text{ DM/t}$) liegen die Kosten für den Einsatz abstumpfender Streumittel insgesamt aufgrund der wesentlich höheren Streumenge und der damit verbundenen höheren Lagerungs- und Transportkosten (ungeachtet der zusätzlichen Kosten für Wiederaufnahme, Entsorgung und Reinigung (ca. $75\text{-}150 \text{ DM/t}$) sowie anfallender Deponiekosten (zwischen $200\text{-}500 \text{ DM/t}$) (vgl. Kap. 5.3.7) um das 5 bis 10 fache über den Kosten für eine Salzstreuung (Wagner und Hanke 1997). Allein das Recyceln der abstumpfenden Stoffe wird auf insgesamt 3 mal so teuer geschätzt wie der gesamte Winterdienst mit Streusalz (Moritz 2000). Kempe (1985) berichtet, dass die Umstellung von Salz- auf Splittstreuung in Erlangen einen 4 -fachen Anstieg der Kosten verursachte. Und in der Slowakei konnten Untersuchungen zeigen, dass allein die Kosten für das Splittrecycling höher lagen als die Einkaufskosten dieses Materials in Steinbrüchen. Die Schweizer Studie kommt bei gleicher Gewichtung von Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Umwelt zu dem Schluss, dass die Salzstreuung der Splittstreuung weit überlegen ist (Ruess 1998, Moritz 2000).

Im Vergleich zu industriellen Reststoffen weisen die meisten Streumittel natürlichen Ursprungs einen geringeren Schwermetallgehalt auf, der deutlich unterhalb der Kriterien zur Vergabe eines Umweltzeichens liegt. Von einigen Produkten werden selbst die strengeren LAGA Z0 Werte eingehalten (Anforderungen an die stoffliche Verwertung von Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall). Entsprechende Daten für Schmelzkammer-granulate liegen nicht vor.

Um das Gefrieren feuchter abstumpfender Streumittel zu vermeiden, wurde noch in den 60er Jahren empfohlen, diesen Streustoffen 1-5% Tausalz hinzuzugeben. Und auch heute werden noch immer Sand und Streusandlager mit ca. 25-50 kg/m³ Salz versetzt (Ihs 2000). Aufgrund der bereits hohen Einsatzmengen für abstumpfende Streumittel wird auf diese Weise fast die selbe Menge Salz ausgebracht wie bei alleiniger Salzstreuung (Moritz 1999). Die Verwendung von abstumpfenden Streumitteln mit geringer Wasserhaltekapazität oder eine trockene Lagerung der Streustoffe wäre demnach geboten.

5.1.6 Freiflächenheizung

Fahrbahnen können grundsätzlich auch durch Wärme von Winterglätte freigehalten werden. Bisherige Systeme nutzen fossile bzw. elektrische Wärmeenergie, Fernwärme oder Erdwärme mit Hilfe von Wärmetauschern. Wegen der hohen Bau- und Betriebskosten ist ihr Einsatz bislang nur auf Sonderfälle (wie z. B. Treppenabgänge, steile Rampen) begrenzt (Wagner und Hanke 1997). In der Schweiz wurde in einem Pilotprojekt ein Konzept umgesetzt, in dem die im Sommer auf der Brückenfahrbahn einfallende Sonnenenergie im Felsuntergrund gespeichert wird. Diese Energie reicht im wesentlichen aus, um Brücken im Winter eisfrei zu halten. In Japan wird Sonnenenergie, Energie aus Biogasanlagen und aus heißen Quellen ebenfalls für diesen Zweck eingesetzt (Speth 1998). Die Stadt München hat nach Angaben der Stadtwerke München die Abgänge zu allen U-Bahn-Höfen mit Freitreppenheizungen ausgerüstet. Prinzipiell werden die dafür verwendeten Granitplatten von unten eingesägt und ohne Wärmedämmung zum Mörtelbett verlegt. Die Heizleistung beträgt 500-600 W/m² und wird über Temperatur- und Feuchtefühler gesteuert. Die Flächen sind ca. 20-50 m² groß. Vergleichsmessungen am Michaeli-Bahnhof ergaben bei einer Fläche von 24,5 m² und einem

Anschlusswert von 13,5 kW einen Gesamtverbrauch von ca. 82 kWh/(a*m²) innerhalb einer Heizperiode von 6 Monaten. Bei einem Strompreis von 0,25 DM/kWh fallen demnach 20,6 DM pro Winterperiode bzw. 3,43 DM/Monat an. Weitere Flächen in München wie die Stachusrampe zur Tiefgarage mit 1200 m² sowie diverse Park&Ride-Parkplätze werden ebenfalls über Freiflächenheizung eisfrei gehalten. In Wien wird die warme Abluft aus den U-Bahn-Schächten für denselben Zweck eingesetzt (persönliche Mitteilung Herr Haupt, Fa. Resch+Haupt Elektroanlagen, Augsburg vom November 2001). Diese Angaben werden von den Stadtwerken München bestätigt, die einen Stromverbrauch von 71 kWh/m² und spezifischen Kosten von 11 DM/m² pro Winterperiode ermittelt haben. Ein Kostenvergleich ergab, dass die Unterhaltskosten von Festtreppen durch konventionelle Streuung aufgrund des höheren Personalaufwandes nahezu um 50% höher liegen als bei der Steintreppenheizung (persönliche Mitteilung Herr Geier, Stadtwerke München vom Dezember 2001). Ein großflächiger Einsatz der Freiflächenheizung scheitert jedoch schon an den hohen Installierungskosten, so dass diese sicherlich nur für eng umgrenzte Einsatzbereiche in Frage kommt.

5.1.7 Glättebildungshemmende Fahrbahnen

In jüngerer Zeit wurden "eishemmende Fahrbahnen" entwickelt. Hierbei werden den Deckschichten Taustoffe beigemischt, die im Vergleich zu einem Streueinsatz nur sehr geringe Taustoffmengen freisetzen (Wagner und Hanke 1997). Ein zweijähriger Praxisversuch auf 12 Erprobungsstrecken ergab, dass eishemmende Fahrbahnen technische und wirtschaftliche Vorteile bieten können (Arand 1995, Schlemmer 2001).

5.1.8 Nullstreuung

Nach den Erfahrungen der BAST sind bei der Nullstreuung (nur mechanisches Räumen, kein Streuen) geringere Unfalldichten und Unfallkosten zu verzeichnen als auf gestreuten (abstumpfende und tauende Streumittel) Fahrbahnen. Dies wird damit erklärt, dass einerseits auf untergeordneten Straßen ohne Winterdienst bewusster auf die winterlichen Gefahren reagiert wird und es sich andererseits bei Straßen mit Salzstreuung um sehr verkehrsreiche oder gefährliche Strecken handelt (Brod 1995). Insbesondere die Splittstreuung suggeriert dem Fahrzeugführer eine stärkere Erhöhung der Griffigkeit als sich tatsächlich einstellt, was unvertretbar hohe

Geschwindigkeiten zur Folge hat. Im Innerortsbereich wird diese Aussage jedoch dadurch relativiert, dass die einbezogenen Straßen meist nicht direkt miteinander vergleichbar sind. So wurden auf den mit Salz gestreuten Strecken meist höhere Unfalldichten bestimmt als auf den mit Splitt gestreuten Strecken, wobei insbesondere die hochbelasteten oder gefährlichen Straßen mit Salz gestreut werden (Durth und Böhm 1998). Die Nullstreuung (auch als „weißer Winterdienst“ bezeichnet) muss jedoch als ernstzunehmende Alternative in Erwägung gezogen werden und bietet sich insbesondere auf Nebenstraßen oder Quartierstraßen ohne eindeutige Gefahrenstellen an. Bezüglich Wirtschaftlichkeit, Umweltrelevanz und Verkehrssicherheit gilt sie als günstiger als die Splittstreuung und könnte innerorts stufenweise als Teil des differenzierten Winterdienstes eingeführt werden. Auch im Bereich der mechanischen Schneeräumung hat sich die Technik entscheidend weiterentwickelt. Insbesondere mit sog. Räum-Kehr-Kombinationen (Pflug mit zusätzlicher Kehrmaschine) lässt sich bei Schneehöhen bis 15 cm der auf der Fahrbahn verbleibende Restschnee auf $0,2 \text{ kg/m}^2$ begrenzen. Grundsätzlich gilt jedoch auch hier, dass festgefahrener Schnee von keinem Schneeräumgerät zuverlässig beseitigt werden kann (Stöckert 2001).

5.2 Marktüberblick

5.2.1 Winterdienst

Der Winterdienst wird auf überörtlichen Straßen sowie in den Kommunen durchgeführt, wobei für die Fußwege auch die Privathaushalte (über die Streupflicht) mit verpflichtet werden.

5.2.1.1 Privathaushalte

Eine Umfrage in Freiburger Bau- und Gartenmärkten im November 2001 ergab, dass sowohl Streusalz, wie abstumpfende Streumittel, aber auch Splitt-Salz-Gemische und schlecht charakterisierte Auftausalze (vermutlich Calcium-/Magnesiumchlorid) im Handel sind. Die Gebindegröße schwankt von 5 bis 25 kg. Die Kilopreise für Streusalz und abstumpfende Streumittel liegen in Abhängigkeit von der Gebindegröße zwischen 0,2 und 0,35 EUR, für Alternativprodukte werden bis zu 1,5 EUR/kg verlangt. Bei Auftausalzen werden mit Bezug auf das Merkblatt Winterdienst der FGSV oftmals Dosierhinweise gegeben.

In Stuttgart darf seit 1988 auf öffentlichen Gehwegen grundsätzlich kein Salz mehr gestreut werden. Bei Eis- und Schneeglätte sind nach dem Räumen des Gehwegs statt dessen Splitt, Sand und anderes salzfreies, abstumpfendes Streugut zu verwenden (http://www.stuttgart.de/umwelt/umweltberatung/u_tips/salz.htm, Stand 29.12.98).

In Kiel empfiehlt das Kieler Umweltschutzamt den Einsatz abstumpfender Streumittel mit dem Blauen Engel. Auftaumittel dürfen auf öffentlichen Gehwegen laut Straßenreinigungssatzung nur bei Eisregen sowie bei Glatteis an gefährlichen Stellen wie Treppen, Rampen oder starken Gefällen ausgebracht werden (<http://www.kiel.de/presse/991223145239.html>, 23.12.99).

5.2.1.2 Kommunalen Winterdienst

Die zunehmende Anwendung von Tausalz in den 60er und 70er Jahren und die erheblichen Salzschäden an Straßenbäumen führten bei den Kommunen zu einer Umkehrung des Trends, bis hin zum teilweise völligen Salzverzicht. In den folgenden Jahren hat sich bei vielen Gemeinden das Konzept des „differenzierten Winterdienstes“ durchgesetzt, das eine abgestufte Verwendung von Streustoffen nach Straßen- und Wetterlage vorsieht. In der Regel wird eine dreistufige Einteilung des Straßennetzes nach Salzstreuung, Splittstreuung und Nullstreuung durchgeführt, bei der die Verkehrsbedeutung der Straße und die Örtlichkeiten berücksichtigt werden. Ziel ist es, die Verwendung von Tausalz auf das notwendige Mindestmaß zu begrenzen ("so wenig wie möglich, so viel wie nötig") (Hanke 1995). In München gilt seit 1999 die Strategie des „differenzierten Winterdienstes“ als bestmöglicher Kompromiss zwischen den Erfordernissen der Verkehrssicherheit, der Wirtschaftlichkeit und des Umweltschutzes. Unter Berücksichtigung neuerer Erkenntnisse, wonach auch von Splitt eine Umweltbelastung ausgeht, wird eine maßvolle Ausweitung des Salzstreunetzes angestrebt, wobei gleichzeitig alle technischen Möglichkeiten, den spezifischen Salzverbrauch je Quadratmeter, z. B. durch Schneeräumung und präzisere Dosierung zu senken, ausgeschöpft werden sollten (Pressedienst der Landeshauptstadt München <http://hn.munich-info.de/muc/1999/12/ru-2753.html>).

In Trier wird ein reduzierter Winterdienst unter besonderer Berücksichtigung abstumpfender Streumittel (Bimssplitt) durchgeführt. Es wird grundsätzlich auf eine

vorbeugende Salzstreuung verzichtet und, wo möglich, vor dem Streuen mit auftauenden oder abstumpfenden Mitteln eine mechanische Räumung des Schnees durchgeführt. Auftauende Mittel werden nur auf Steil- und Gefällstrecken, Brücken, Treppen, Rampen und besonders gefährlichen Wegstrecken sowie bei auftretendem Glätteis/Eisregen eingesetzt. Bei einer Schneehöhe von bis zu 5 cm wird auf verkehrsarmen Straßen ohne Gefälle nicht gestreut (Null-Streuung), ab 5 cm wird der Schnee geräumt. Der Einsatz elektronischer Feuchtsalzstreuer trägt zusätzlich zur weiteren Verringerung der Streumengen durch genaue Dosierung und Einstellung der Streubreite bei (<http://www.trier.de/dezernat/stadtrein5.htm>).

In der aktuellen Diskussion, die sich in den Hinweisen, Empfehlungen und entsprechenden Regelungen des Ende 1997 neu herausgegebenen „Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen, Teil: Winterdienst“ sowie in der vom Verband kommunale Abfallwirtschaft 1997 herausgegebenen InfoSchrift 29 „Differenzierter Winterdienst im kommunalen Bereich“ widerspiegelt, wird sogar der weitestgehende Verzicht auf Splitt im Winterdienst empfohlen (Hanke 1998).

Auf Radwegen werden in der Regel abstumpfende Streumittel eingesetzt. Die Anzahl der Nutzer ist im Winter ohnehin eingeschränkt. Die Gefahr, dass abstumpfende Streumittel durch den fließenden Verkehr, ähnlich wie auf Straßen, zur Seite geschleudert werden, besteht hier weniger. Die Anwendung scharfkantiger abstumpfender Streumittel wird häufig von Radfahrern beanstandet, da diese Stoffe u.U. Fahrradreifen in Mitleidenschaft ziehen können. Daher ist die Anwendung von Sand zu bevorzugen (Hanke et al. 1998).

Um einen Eindruck über die aktuelle Verteilung des Streustoffeinsatzes zu erhalten, wurden im Dezember 2001 insgesamt 54 deutsche Städte angeschrieben und um Angaben zu Verbrauchsmengen in den letzten vier Jahren ersucht. Die Auswertung der zurückgesandten Fragebögen ist in Tabelle 6 dargestellt. Die Volumenangaben zu Calciumchlorid- und Natriumchloridsolen wurden hierbei in Verbrauchsmengen an Feststoffen umgerechnet. Über den spezifischen mittleren Jahresverbrauch pro Einwohner errechnet sich in erster Näherung bei Berücksichtigung der Einwohnerzahl Deutschlands ein Gesamtverbrauch von 302.000 t Salz und 244.000 t abstumpfende Streumittel, wobei die Größe der Städte sowie die unterschiedliche

klimatische Situation nicht berücksichtigt werden konnten, so dass diese Zahlen nur einen Eindruck von der Größenordnung geben können.

Tabelle 6: Streumittelverbrauch der Kommunen

	Einwohner [n]	Straßennetz [km]	Zeitraum	Natriumchlorid [t/a]	Calcium-/ Magnesium- chlorid [t/a]	Harnstoff [t/a]	Abstumpfende Streumittel [t/a]
Biberach	31.346	237	97 - 00	300			768
Braunschweig	240.000	640	97 - 00	490			235
Darmstadt	148.000	356	97 - 00	260	15		200
Esslingen	90.000	245	98 - 00	453			69
Frankfurt	649.600	1.250	97 - 00	790	36	5	1.936
Kassel	194.770	670	97 - 00	1.433			110
Marburg	77.000	250	97 - 00	720	22		338
Regensburg	142.000	383	97 - 00	1.410			1.218
Worms	89.000	360	97 - 00	265	41		80
Summe	1.661.716	4.391		6.121	114	5	4.954
Verbrauch pro Einwohner			[kg/(E*a)]	3,683	0,069	0,003	2,981
Geschätzte Jahresverbrauch für D *)			[t/a]	302.038	5.638	234	244.449

*) Bei Annahme 82 Mio. Einwohner

Nach Angaben von Hanke (1993) hat sich seit 1990 im Bundesdurchschnitt aller Städte ein Anteil von etwa 40% Salzstreuung, 30% abstumpfende Streuung und etwa 30% Nullstreuung, bezogen auf die Straßenlänge eingependelt. Unter Berücksichtigung der höheren Streudichten abstumpfender Streumittel wären demnach deutlich höhere Verbrauchsmengen für abstumpfende Streumittel zu erwarten als in Tabelle 6 errechnet. Möglicherweise ist hieran bereits die neue Tendenz einer Abkehr von abstumpfenden Streumitteln zu erkennen.

5.2.1.3 Winterdienst auf Fernstraßen und Autobahnen

Für das Jahr 1998 sind die in Tabelle 7 wiedergegebenen Längen öffentlicher Straßen dokumentiert:

Tabelle 7: Länge der öffentlichen Straßen im Jahr 1998 in km

Bundesautobahnen ¹⁾	Bundesstraßen ¹⁾	Landesstraßen ¹⁾	Kreisstraßen ¹⁾	Stadt- und Gemeindestraßen ²⁾	Summe
11.400	41.400	86.800	91.100	395.400	626.100

Quellen: ¹⁾ Statistisches Bundesamt 2001; ²⁾ Hanke 2002

Auf Autobahnen und Fernstraßen werden ausschließlich Streusalze und keine abstumpfenden Streumittel eingesetzt. Ausnahmen betreffen kleinere Strecken wie die Stadtautobahn Berlin (persönliche Mitteilung Dr. Breitenstein, BAST vom Dezember 2001). Der Tausalzverbrauch auf westdeutschen Bundesautobahnen und Bundesstraßen war in den vergangenen Jahrzehnten starken Schwankungen unterworfen. Bis 1970 war ein kontinuierlicher Anstieg auf bis zu 500.000 t/a zu verzeichnen, dann nahm der Verbrauch bis Mitte der 80er Jahre wieder auf etwa 250.000 t/a ab. In den Wintern 1978/79 und 1980/81 wurde mit knapp 800.000 t/a ein vorläufiges Maximum in der Streusalzanwendung erreicht, während der milde Winter 1989/90 zu einem minimalen Verbrauch von rd. 170.000 t/a führte. Aktuelle Verbrauchszahlen über den Einsatz von Streusalz auf deutschen Autobahnen und Fernstraßen wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen zur Verfügung gestellt. In Abbildung 1 sind die absoluten Mengen, in Abbildung 2 die spezifischen Verbrauchsmengen dargestellt (persönliche Mitteilung Dr. Breitenstein, BAST vom Dezember 2001).

Aus den Zahlen lässt sich kein Trend hin zu geringeren Streusalzmengen ableiten, aus dem der Erfolg verbesserter Räumung oder Streusalzdosierung erkennbar wäre. Vielmehr wird die Höhe des Streusalzeinsatzes, wie erwartet, von der Witterung bestimmt. Um die tatsächliche Verminderung der Tausalzmengen durch verbesserte Technik zu berechnen, wurden Zeitreihen der Verbrauchsstatistik mit Kenngrößen zur Beschreibung der "Winterlichkeit" (Lufttemperatur, Niederschlagshöhe, Anzahl der Schneetage, Anzahl der Frosttage, Anzahl der Eistage) korreliert. Über verschiedene Modelle wurde eine bereits in den letzten 20 Jahren erreichte Tausalzeinsparung von 25-30% ermittelt (Breitenstein 1995, 1996).

Insbesondere durch verbesserte Witterungsprognosen wird eine deutliche Steigerung der Effektivität des Straßenwinterdienstes erwartet. Hierzu wurde in Zusammenarbeit des Bundesministeriums für Verkehr, der Straßenbauverwaltungen der Länder und des Deutschen Wetterdienstes das „SWIS“-System (Straßen-Wetter-Informationssystem) eingeführt. Ein weiteres Einsparpotential wird in einer verbesserten mechanischen Schneeräumung durch neue Fahrzeugtechniken sowie im Einsatz von Sensoren zur Erfassung von Temperatur, Luftfeuchte und eventuell noch vorhandenem „Restsalz“ gesehen. Alle diese Techniken zielen darauf hin, Streumittel gezielter einzusetzen und zu dosieren (Hanke 1996).

Die Erfahrungen in Schweden wurden in einem umfangreichen Forschungsprojekt (MINSALT 1985-91) analysiert und die darin gemachten Empfehlungen können wie folgt zusammengefasst werden: die ausgebrachte Tausalzmenge kann auf Fernstraßen durch den Einsatz der Feuchtsalztechnik, durch effizientes Räumen sowie vorsorgliche Streuung auf ein notwendiges Mindestmaß verringert werden, unter Beibehaltung eines hohen Sicherheitsstandards. Innerorts wird auf Quartierstraßen die Splittstreuung nahegelegt, auf Fuß- und Fahrradwegen die Splitt- und Sandstreuung (wo das gestreute Gut auch weitgehend liegen bleibt) (Öberg, Gustafson et al. 1991).

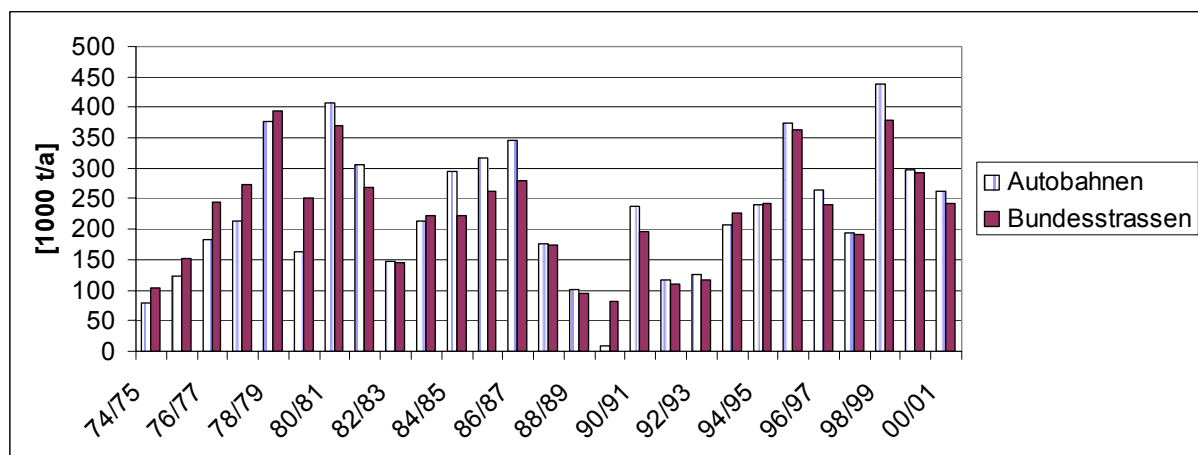


Abbildung 1: Absoluter Verbrauch von Auftausalzen auf Fernstraßen (nach Angaben der BAST, 2001)

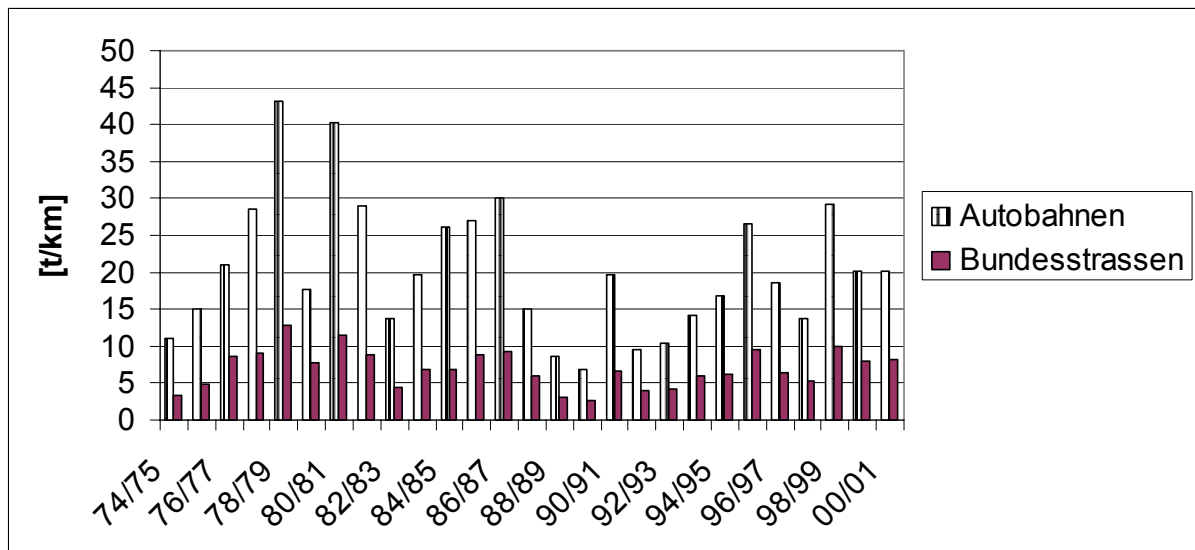


Abbildung 2: Spezifischer Verbrauch von Auftausalzen auf Fernstraßen (nach Angaben der BAST, 2001)

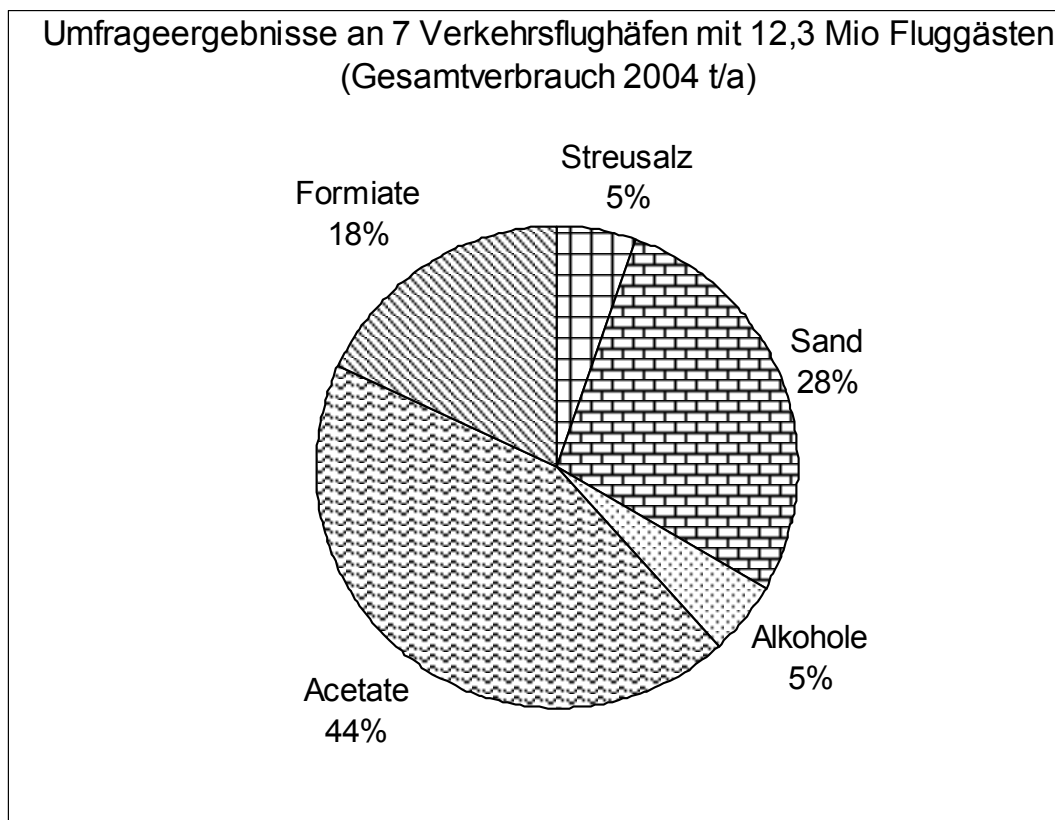
5.2.1.4 Flughäfen

In Deutschland werden 16 internationale Flughäfen mit einem Passagieraufkommen von 133 Mio. Fluggästen pro Jahr betrieben. Etwa 1/3 der Passagiere werden im größten Flughafen in Frankfurt am Main abgefertigt (Gallenkemper, Fritsche et al. 1999). Die Ursache mehrerer schwerer Flugzeugunglücke in den 90er Jahren wurde auf die Vereisung von Tragflächen und Leitwerken zurückgeführt. Für einen sicheren Start müssen die Flugzeuge enteist werden. Auch Bewegungsflächen, wie Start- und Landebahnen, sind zu enteisen. Als Flugzeugenteisungsmittel werden überwiegend Glykole, als Bewegungsflächenenteiser überwiegend Formiate und Acetate eingesetzt. Harnstoff, Isopropanol und Glykole werden in Deutschland für diesen Zweck nur noch in geringem Umfang verwendet (Merkblatt "Enteisungsabwasser von Flugplätzen" Stand 12/98). Obwohl Enteisungsmittel auf Glykolbasis im Rahmen dieser Studie nicht weiter betrachtet werden sollen, sei doch der Vollständigkeit halber erwähnt, dass diese nach den Richtlinien der Association of European Airlines (AEA) und der International Standard Organization (ISO) in zwei unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden. Typ 1 (Enteiser) ist ein dünnflüssiges Glykol/Wasser-Gemisch mit einem Glykolanteil von mindestens 80%, der dickflüssige Typ 2

(Vereisungsschutz) enthält neben mindestens 50% Glykol noch Stützgele, die einen längeren Schutz gegen Wiedervereisung bieten. Die verbrauchten Glykollösungen wurden lange Zeit wenig beachtet und versickerten im Boden oder gelangten in Oberflächengewässer, wo sie aufgrund ihres hohen Sauerstoffbedarfs zu Beeinträchtigungen führten. Am Münchner Flughafen wurde daher eine Sammel- und Recyclinganlage eingerichtet, mit der 50% des eingesetzten Glykols zurückgeführt werden können. Da 16% bis 20% der Enteisungsmittel am Rumpf verbleiben und weitere 18% vom Wind verblasen werden, ist die erzielte Recyclingquote als sehr hoch anzusehen (Anspach 1995).

Sieben der 16 angeschriebenen Verkehrsflughäfen mit einem Passagieraufkommen von 12,3 Mio. Fluggästen stellten Verbrauchsdaten für die im Winterdienst für die Bewegungsflächen eingesetzten Streumittel zur Verfügung. Als abstumpfende Streumittel wird ausschließlich Sand eingesetzt.

Das Ergebnis der Befragung ist in Abbildung 3 zusammengefasst.



**Abbildung 3: Hilfsmittel für den Winterdienst im Flughafenbereich
(Bewegungsflächen)**

Es zeigt sich, dass Harnstoffe in diesem Bereich keine Bedeutung mehr haben und im wesentlichen von organischen Auftausalzen auf Basis von Acetat und Formiat ersetzt wurden.

5.2.2 Anbieter am Markt

5.2.2.1 Streusalz

Für die Gewinnung von Salz sind in der Bundesrepublik Deutschland ausschließlich Steinsalzvorkommen von Bedeutung. Deutsche Salzlagerstätten befinden sich überwiegend in Norddeutschland, einzelne bedeutende Lagerstätten gibt es ferner in Nordrhein-Westfalen, in Baden-Württemberg, Bayern und in Sachsen. Die Salzgewinnung erfolgt entweder bergmännisch oder im Soleverfahren unter Einsatz von Wasser als Lösungsmittel, das kontrolliert in Bohrlöcher eingeleitet und abgepumpt wird.

Tabelle 8: Salzproduktion in Deutschland [1000 t]

	1960	1970	1980	1990	1995
Alte Bundesländer	5.176	10.447	12.269	11.593	12.431
DDR/Neue Bundesländer	1.968	2.408	3.448	3.916	

Quelle: Verein der Deutschen Salzindustrie (2001b)

Im Jahr 1995 wurden etwa 12 Mio. t Salz (vgl. Tabelle 8) gefördert, davon etwa 5 Mio. t Sole. Derzeit betreiben sechs bedeutende Unternehmen acht Salzbergwerke und fünf Salinen. Es werden etwa 2.200 Personen beschäftigt. Von der abgesetzten Menge entfielen 85% auf Industriesalz, 6,6% auf Gewerbesalz, 5,2% auf Tausalz und 3,2% auf Speisesalz (Anonym 2001). Alleine der Verbrauch von Natriumchlorid für die Regeneration von Ionenaustauschern zur Wasserenthärtung liegt in derselben Größenordnung wie der Verbrauch an Tausalz (Westphal und Kristen et al. 1993).

Der durchschnittliche Jahresverbrauch an Tausalz in Westdeutschland in den Jahren von 1968 bis 1988 lag nach Angaben des Vereins der Deutschen Salzindustrie bei 1,3 Mio. t (Brod 1995). In den 90er Jahren wurden nach Angaben der Deutschen Salzindustrie im Mittel 1,4 Mio. t an Streusalz abgesetzt. Der Verbrauch auf Autobahnen und Bundesstraßen wurde von der BAST mitgeteilt (Tabelle 9, vgl. auch

Abb. 1 und 2). Aus der Differenz errechnet sich näherungsweise ein Verbrauch für Kommunen (einschließlich Privathaushalte) und Kreisstraßen von etwa 0,93 Mio. t/a. Da der Anteil der Kommunen in erster Näherung mit rd. 0,3 Mio. t/a angenommen werden kann (vgl. Tabelle 6), müsste die restliche Menge von etwa 0,6 Mio. t/a dem Verbrauch auf den Kreiss- und Landstraßen sowie auf Privatgeländen zugeordnet werden.

Tabelle 9 : Verbrauch von Auftausalzen in Deutschland

	Fernstraßen ¹⁾ (Autobahnen, Bundesstraßen) [Mio t/a]	Rest ²⁾ (Kommunen, Kreis- und Landstraßen, Privatgelände) [Mio t/a]	Gesamtabsatz ³⁾ [Mio t/a]
1992	0,23	0,38	0,608
1993	0,24	0,83	1,075
1994	0,43	0,43	0,865
1995	0,48	1,15	1,635
1996	0,74	1,61	2,35
1997	0,50	0,86	1,365
1998	0,39	1,00	1,384
1999	0,82	1,54	2,356
2000	0,59	0,55	1,142
Mittelwert	0,49	0,93	1,42

¹⁾ pers.Mitteilung von Herrn Dr. Breitenstein, BAST vom 3.12.01

²⁾ = Differenz Gesamtverbrauch - Verbrauch Fernstrassen

³⁾ pers.Mitteilung von Herrn D. Krüger, Verein der Deutschen Salzindustrie e.V. vom Dez. 2001 (Absatzmengen der Mitgliedsunternehmen)

Es liegen nur wenige Vergleichszahlen aus anderen Ländern vor. In den USA kommen jährlich etwa 8-15 Mio. t Streusalze und ca. 100 Mio. t Salz/Splitt-Gemische zum Einsatz (Novotny und Muehring et al. 1998, Demers und Sage 1990, Trantolo und Gresser et al. 1990, (Anonym 2001). In den Nordischen Staaten Norwegen, Schweden, Finnland und Dänemark werden etwa 700.000 t Natriumchlorid und 10.550 t organische Auftausalze als Streumittel verwendet (Anonym 1997). Der Gesamtverbrauch an Calciumchlorid in Schweden betrug im Jahr 1983 bis zu 1,2

Mio. t, von denen etwa 30% als Auftausalze ausgebracht wurden (Persson und Ihs 1998).

5.2.2.2 Abstumpfende Streumittel

Die Hersteller abstumpfender Streumittel sind u.a. im Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. (Berlin) organisiert. Unter dessen Mitgliedsverbänden wird die Produktgruppe "Splitt" von Mitgliedsfirmen des Bundesverbands Natursteinindustrie e.V. (Köln) sowie des Bundesverbands der Deutschen Kies und Sandindustrie e.V. (Duisburg) angeboten. Im Bundesverband Natursteinindustrie sind 370 Steinbruchbetriebe, im Bundesverband der Deutschen Kies und Sandindustrie 481 Unternehmen mit 688 Gewinnungsstellen vertreten. Eine Anfrage an den Bundesverband Natursteinindustrie ergab jedoch, dass die Absatzmengen abstumpfender Streumittel nicht getrennt erfasst werden.

Man schätzt insgesamt, dass Anfang der 90er Jahre der Anteil abstumpfender Streumittel im kommunalen Winterdienst bei etwa 30% lag. Daraus kann auf einen Gesamtverbrauch von ca. 500.000 t geschlossen werden, wovon ca. 70% auf Splitte und ca. 30% auf Granulat, Sand u.ä. entfielen (Hanke1993, Moritz 1999). Die Hochrechnung der Verbrauchszahlen in den Kommunen (vgl. Tabelle 6) ergab, dass im kommunalen Winterdienst mit etwa 250.000 t/a zu rechnen ist. Hinzu kommen noch die Verbrauchsmengen für Privatgrundstücke. Außerhalb der Kommunen werden nach vorliegender Datenlage kaum abstumpfende Streumittel eingesetzt.

Das RAL-UZ 13 ("Salzfreie, abstumpfende Streumittel") wird derzeit von 26 Firmen genutzt. Aus einer Umfrage des Umweltbundesamtes bei den Zeichennehmern für das Umweltzeichen für „salzfreie, abstumpfende Streumittel“ geht hervor, dass 1998 etwa 50.000 bis 60.000 t Streumittel mit dem RAL-UZ 13 verkauft wurden. Anhand einer aktuellen Umfrage sollten diese Zahlen verifiziert werden. Da nur sehr wenige der angeschriebenen Firmen Unterlagen zur Verfügung stellten, liegen bislang keine aktuelleren Zahlen über dieses Marktsegment vor.

5.2.2.3 Harnstoff

Harnstoff ist eine Grundchemikalie, die u.a. von der BASF AG sowie von Hydro Chemicals Deutschland und der Hydro Agri Brunsbüttel GmbH hergestellt werden. Das Firmenhandbuch "Chemische Industrie" weist insgesamt 12 Firmen aus, die

Harnstoff herstellen oder vertreiben (Verband der Chemischen Industrie e.V. 1998/1999). Verbrauchszahlen hinsichtlich des Einsatzes von Harnstoff liegen nur für die Nordischen Staaten Norwegen, Schweden, Finnland und Dänemark vor, die insgesamt etwa 2.800 t/a im Winterdienst verwenden (Anonym 1997). Eine Hochrechnung des Harnstoffverbrauchs im Winterdienst für deutsche Kommunen ergab hingegen lediglich eine Gesamtmenge von rd. 200 t/a (vgl. Tabelle 6).

5.2.2.4 Formiate

Die Fa. Hydro Chemicals Deutschland (Oberhausen) vertreibt Kaliumformiat als Auftausalz mit dem Schwerpunkt Flughafenbereich und ist einziger Zeichennehmer des RAL-UZ 99. Die Firma stellt die Grundchemikalie Ameisensäure jedoch nicht selber her. Der Preis für Kaliumformiat wird mit etwa 0,75 EUR/kg angegeben. Bei einer höheren Produktionsmenge könnte der Preis auf etwa 0,5 EUR gesenkt werden. Zumindest für das Kaliumformiat ist eine weitere Reduktionskapazität nach Herstellerangaben schon durch den Marktpreis des Reaktionsproduktes Kaliumhydroxid begrenzt. Die Clariant GmbH (Bergkirchen) vertreibt Kalium- und Natriumformiat als Auftaumittel ebenfalls für den Flughafenbereich. Als dritte Firma ist die Nola Chemie GmbH (Swisttal-Heimerzheim) mit Auftausalzen auf Basis von Natriumformiat auf dem Markt vertreten. Alle drei Firmen kaufen demnach die Ameisensäure zu. Der Standort der Produktionsstätten ist nicht bekannt, so dass die Transportwege in der orientierenden Ökobilanz nicht berücksichtigt werden konnten. Vor wenigen Jahren war als weitere Firma noch die BP-Deutschland vertreten. Diese hat den Geschäftszweig jedoch an die britische Fa. Kill Frost abgegeben, die auf dem deutschen Markt nicht präsent ist.

5.2.2.5 Calcium-/Magnesiumacetat

Calcium- und Magnesiumacetat wird u.a. ebenfalls von der BASF AG und der Leuna-Tenside GmbH hergestellt. Das Firmenhandbuch "Chemische Industrie" weist insgesamt 7 Calcium-/Magnesiumacetat herstellende bzw. vertreibende Betriebe aus (VCI 1998/1999). Genauere Angaben liegen nicht vor.

5.3 Umweltwirkungen

5.3.1 Allgemeiner Überblick

Tausalze treten v. a. saisonal und regional auf und sind nur eine von zahlreichen Belastungsquellen, die mit dem Straßenverkehr verbunden sind. Weitere Schadstoffquellen ergeben sich aus der Abnutzung von Straßenoberflächen und Reifen (Staub, Asphalt, Gummi, Schwermetalle wie Zink und Cadmium), der Verbrennung von Mineralölprodukten (Rauch, Blei, Cadmium, Gase wie CO und SO₂, Kohlenwasserstoffe), der Stahl-, Bauwerk- und Fahrzeugkorrosion (v. a. Eisen, Nickel, Chrom, Vanadium, Wolfram, Kupfer und Molybdän) sowie aus der Auslaugung von Straßenmaterial (Faith-Ell 2000). Man schätzt, dass etwa 14% der Chloreinträge in die Umwelt allein über die Tausalzanwendung erfolgt, was in etwa dem jährlichen Eintrag von Chlor mit den Niederschlägen entspricht (15%) (Brod 1995). Weitere wichtige Eintragsquellen von Chlor in die Umwelt sind Düngemittel, tierische Abfälle, kommunale Abwässer, Regenerationssalz für Ionentauscher u.a. (Wang und Huang et al. 1991).

Ausgebrachte Streusalze werden durch den Abfluss von Schmelzwasser, durch Spritzwasser und Schneepflüge in den Straßenrandbereich, als Aerosole teilweise sogar bis in eine Entfernung von einigen 100 Metern von der Straße verfrachtet. Sie können dort in Böden, Gewässern und Pflanzen in deutlich erhöhten Konzentrationen vorkommen. Wenn das Schmelzwasser nicht mit der Straßenentwässerung abgeleitet wird, gelangen etwa 40% der ausgebrachten Salze mit dem Schmelzwasser in die Straßenrandböden, während sich der Rest überwiegend mit dem Spritzwasser auf oberirdische Pflanzenteile ablagert (Assmann 1999). Der Hauptteil der ausgebrachten Tausalze verbleibt jedoch innerhalb eines Bereiches nur wenige Meter vom Straßenrand entfernt. Feldstudien zeigen, dass ungefähr 20-98% der Tausalze über die Luft (als Aerosole oder salzhaltiges Sprüh-/Spritzwasser) in einem Abstand von 2-50 m vom Straßenrand zur Ablagerung kommen. Der genaue Transportmechanismus hängt von den jeweiligen Witterungsverhältnissen ab. Insgesamt geht man davon aus, dass mehr als 90% der Tausalze innerhalb der ersten 20 m abgelagert werden (Demers 1990, Blomqvist und Johansson 1999, Legret und Pagotto 1999).

Tausalze können Brücken, Straßenoberflächen und Fahrzeuge korrodieren, das Straßenbegleitgrün, Grund- und Oberflächenwasser sowie die Trinkwasserversorgung regional beeinträchtigen (Amrhein, Strong et al. 1992).

Hingegen sind keine Beeinträchtigungen des chemischen Gleichgewichts oder von geogenen Schwermetallgehalten in Böden und Gewässern durch natürliche abstumpfende Stoffe (wie Sand oder Gesteinssplitt) bekannt. Innerorts hingegen kann es durch diese Stoffe zu Bodenverdichtung durch Feinpartikelstaub kommen (Moritz 1999).

5.3.2 Ressourcenentnahme

Die Entnahme von Rohstoffen muss in Zusammenhang mit der Knappheit an Ressourcen und dem Energie- und Landschaftverbrauch gesehen werden. Im Rahmen der orientierenden Ökobilanz können diese Faktoren jedoch nicht berücksichtigt werden, da ein lokaler/konkreter Bezugsrahmen fehlt. Zumindest sollen die Auswirkungen der Rohstoffentnahme in groben Zügen skizziert werden.

Die Salzreserven in Deutschland werden auf etwa 100.000 km³ geschätzt (Westphal, Kristen et al. 1993). Der Abbau erfolgt überwiegend unter Tage, so dass der Landschaftsverbrauch begrenzt ist. Abraumhalden, die beim Kalisalzabbau zu Sekundärschäden durch Aufsalzung des Grund- und Oberflächenwassers führen, treten bei der Steinsalzgewinnung nicht auf (Götzfried, 2002). Abstumpfende Streumittel werden in der Regel aus offenen Steinbrüchen gewonnen, wobei eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes unvermeidbar ist. Allerdings fallen abstumpfende Streumittel teilweise auch als Reststoffe bei der Gewinnung höherwertiger Steinerzeugnisse an.

Die Herstellung organischer Auftausalze (Azetate, Formiate) und von Harnstoff erfordert den Einsatz von Primärenergie in Form fossiler Brennstoffe, deren Ressourcen begrenzt sind.

Die Emissionen, die bei der Herstellung und Verteilung der verschiedenen Streumittel entstehen, werden in der orientierenden Ökobilanz dargestellt (vgl. Teil 5.4).

5.3.3 Verteilung und Transport

Wie bereits in Kap. 5.1.5 ausgeführt, können bei einer normalen Streudichte von 15 g Salz/m² gegenüber 120 g Splitt/m², und einer 6 m breiten Fahrbahn, pro Fahrzeugeinsatz mit 5 Tonnen Ladekapazität etwa 56 (Salzstreuung) bzw. 7 Straßenkilometer (Splittstreuung) abgestreut werden. Dies bedeutet bei der Splittstreuung nicht nur einen etwa achtfach höheren Aufwand an Zeit, Material und Treibstoff gegenüber der Salzstreuung, sondern auch eine beträchtlich höhere Verlustzeit für Leerfahrten vom Einsatzort zum Streugutlager. Da Streusalz einen Preis von ca. 120-130 DM/t und Splitte von ca. 25-30 DM/t haben, sind die reinen Materialkosten der Salzstreuung aber nur geringfügig günstiger (vgl. 5.1.1). Fahrzeuge, die zur Ausbringung von Streumittel zum Einsatz kommen, verursachen zusätzlich ökobilanzrelevante Emissionen von NO_x, CO₂, und VOCs, und tragen damit zu CO₂-Anstieg, Versauerung, Eutrophierung, oberflächennahen Ozonentstehung sowie zu allgemeinen Gesundheitsproblemen (Atemwege) bei (vgl. Kap. 5.3.9). Sowohl bei der Ausbringung abstumpfender Stoffe wie auch nach Abtrocknen der Fahrbahn kann es durch Staubaufwirbelungen zur gesundheitlichen Belastung von Verkehrsteilnehmern, insbesondere aber von Winterdienst- und Straßenreinigungspersonal kommen. Studien aus Helsinki, Denver, Wien und Berlin belegen, dass ein bedeutender Teil der Staubbelastung auf abstumpfende Streumittel zurückgeführt werden kann (Moritz 1999).

5.3.4 Ökotoxische Wirkung

Ziel dieses Kapitels ist es, anhand der gesichteten Daten zur ökotoxischen Wirkung von Auftaumittel in definierten Testsystemen, ein einheitliches Bezugssystem zu erhalten, das eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Stoffe erlaubt. Darüber hinaus werden neuere Untersuchungen zur Ökotoxizität von Streustoffen unter Feldbedingungen vorgestellt. Die in der klassischen Chemikalienbewertung gemäß europäischem Chemikalienrecht (67/548/EWG Anhang V) eingesetzten Ökotoxizitätstests entsprechen internationalem Standard und sind eng an die "OECD Guidelines for Testing of Chemicals" angelehnt. Die Bewertung erfolgt nach internationalen Richtlinien und wurde im Technical Guidance Document spezifiziert (Commission 1996). In der Verwaltungsvorschrift Wassergefährdende Stoffe vom 17. Mai 1999 werden Natrium-, Calcium und Magnesiumchlorid sowie Calcium- und Magnesiumacetat als „schwach wassergefährdend“ (WGK 1) eingestuft. (In der

vorangegangenen VwVwS vom 18.04.96 wurden diese Auftausalze noch der Gruppe der „im allgemeinen nicht wassergefährdenden“ Stoffe zugeordnet.) Auch Natriumformiat und Harnstoff sind WGK 1 Stoffe.

5.3.4.1 Aquatische Ökotoxizität

Als Ergebnis werden die Konzentrationen angegeben, bei denen 50% der Testorganismen geschädigt sind (letale Konzentration=LC50 bzw. 50% Effektdosis=EC50). Diese Werte werden u.a. zur Einstufung der Chemikalien in das Gefahrenmerkmal "umweltgefährlich" verwendet. Chemikalien mit einer LC50 bzw. EC50 über 100 mg/l gegenüber Algen, Daphnien und Fischen gelten gemeinhin als nicht schädlich gegenüber Wasserorganismen. Um chronische Effekte zu erfassen, werden auch toxische Schwellenwerte (z. B. No Observed Effect Concentration = NOEC) erfasst, wobei hier in der Regel empfindlichere Endpunkte (Reproduktionstoxizität, Life Cycle Test gegenüber Daphnien und Fischen nach OECD) bestimmt werden. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Datenbankrecherchen zur aquatischen Ökotoxizität verschiedener Auftaumittel zusammengefasst. Insbesondere hinsichtlich der NOEC-Werte im chronischen Test bestehen erhebliche Datenlücken. Nur für Natriumchlorid wurde ein NOEC von >1060 mg/l im Fisch "early life stage" Test mit der Regenbogenforelle (*Salmo gairdneri*) gefunden (IUCLID-Recherche). Insgesamt belegen die erfassten Werte, dass die Ökotoxizität der untersuchten Auftausalze im Kurzzeittest vergleichbar ist. Die Konzentrationen, die einen 50%igen Effekt hinsichtlich Letalität oder Wachstumsrate auslösen, liegen weit über 1 g/l. Deshalb lassen sich für die ausgewählten Auftaumittel bezüglich ihrer aquatischen Ökotoxizität keine Präferenzen ableiten. Prinzipiell könnte zwar postuliert werden, dass die Ökotoxizität organischer Auftausalze durch den biologischen Abbau weiter stetig abnimmt, entsprechende Belege hierzu fehlen aber.

Eine Sichtung der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur zeigte, dass bereits ein umfangreiches Datenmaterial zu den Wirkungen von Tausalz auf natürliche aquatische Systeme vorliegt (siehe v. a. Brod 1993 und 1995). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bereits ab 200 mg/l Chlorid mit Auswirkungen auf aquatische Lebensgemeinschaften gerechnet werden muss. Bei Werten zwischen 400-2000 mg setzt ein allmählicher Rückgang der Artenzahl auch weniger empfindlicher Arten ein, sowie ein Auftreten salztoleranter Arten (Brod 1995). Entsprechende Labor- und

Freilandversuche legen einen Schwellenwert von 1000 mg/l Chlorid nahe, bei dem eine Schädigung der natürlichen Wasserfauna bei Einleitung salzhaltiger Abwässer erfolgt. Es wird berichtet, dass Werte über 1000 mg/l die Photosyntheseleistung und damit das Wachstum bestimmter Planktonarten in Oberflächengewässern beeinträchtigen. In höheren Organismen führen diese Werte zu letaler metabolischer Acidose sowie osmotischem und Verhaltensstress (Williams et al. 1999). Bei 2000-5000 mg/l Cl⁻ ist mit einer Verarmung ganzer aquatischer Lebensgemeinschaften zu rechnen, während ab 5000 mg/l Cl⁻ Süßwasserorganismen aussterben und eine Verödung der Artenvielfalt einsetzt (Brod 1995). Mit einem Fischsterben muss ab 4000 mg Cl⁻/l gerechnet werden. Allgemein gelten Konzentrationen zwischen 7-15 g NaCl/l als fischtoxisch. Eine Störung der natürlichen Selbstreinigungskraft im Vorfluter wurde bei 2000 mg/l Cl⁻ beobachtet, während Konzentrationen ab 1000 mg NaCl im Zulauf die Reinigungsleistung von Kläranlagen beeinträchtigten. Die Ablaufqualität einer biologischen Versuchskläranlage (Labor-Belebtschlamm-Anlage) wurde bei einer NaCl-Konzentration von 6,25 g/l verschlechtert. Ab 20 g/l NaCl erfolgt die Hemmung des mikrobiellen Peptonabbaus, während eine vollständige Hemmung mikrobieller Aktivität bei 80 g/l NaCl einsetzt (Brod 1993).

Tabelle 10: Aquatische Ökotoxizität von Auftaumitteln

Wirkstoffe	CAS	aquatische Ökotoxizität			
		Daphnien EC50 [mg/l]	Fische LC50 [mg/l]	Bakterien EC50 [mg/l]	Algen EC50[mg/l]
Natriumchlorid	7647-14-5	6.175 (16 h) 3.412 (24 h) 1.000 (48 h) 4.135 (48 h)	7.650 (96 h) PP 12.946 (96 h) LM 14.125 (24 h) LM 11.100 (DF 96 h) S 21.500 (1 h) CC	23.564 (4 d) AV	4.967 (3 d) CR 40.000 (28 d) CV
Kaliumchlorid	7447-40-7	825 (48 h)	4.200 (48 h) GA 2.010 (96 h) LM 2.300 (48 h) L		2.500 (72 h) ScS 1.337 (120 h) NL
Calciumchlorid	10043-52-4	3.526 (24 h) 1.285-3.005 (48 h) 759 (72 h)	10.650 (96 h) LM 10.000-13.400 (96 h) GA		140 (LOEC 120 d) CV
Magnesiumchlorid	7786-30-3		16.350 (24 h) L 7.700 (48 h) L 16.500-17.750 (48 h) GA	77.200 (24 h) Vibr. f. 36.300 (30 Min.) Vibr. f. 26.140 (1 h) Ps. p.	2.200 (72 h) ScS 4.680 (24 h) ScS
Kaliumacetat	127-08-2	> 1.000 (48 h) und 560 (EC0 48 h) Safeway KA, Fa. Clariant 575 (48 h) EPA- Norm Safeway KA	6.800 (96 h) O 6.100 (72 h) S > 1.000 (96 h) B Safeway KA, Fa. Clariant 1.150 (96 h) PP EPA- Norm Safeway KA	22.500 (15 Min.) Vibr. f. > 12,5 g/l BS Safeway KA, Fa. Clariant	750 - 2.600 (72 h), 20-30 (NOEC 72 h) Safeway KA, Fa. Clariant
Natriumacetat	127-09-3	>1.000 (48 h) >1.000 (48 h), Safeway SD, Fa. Clariant	>=100 (LC0 96 h) B >1.000 (LC0 48 h) L >1.000 (48 h) L, Safeway SD, Fa. Clariant	7.200 (18 h) Ps. p. 22.500 (15 Min.) Vibr. f. 8.700 (EC10) Ps. p. Safeway SD, Fa. Clariant	
Natriumformiat	141-53-7	>1.000 (24 h) >4.000 (46 h) Safeway SF, Fa. Clariant	>1.000 (48 h) L	57.725 (EC10 18 h) Ps. p. >10.000 (3 h, BS) Safeway SF, Fa. Clariant	>1.000 (NOEC 72 h) Sc. s. >10.000 (72 h) Safeway SF, Fa. Clariant
Kaliumformiat	590-29-4	>1.000 (24 h) und 540 (48 h) Aviform L50 Fa. Hydrochem bez. auf Reinsubstanz 90 (48 h) und 5 (EC0), Safeway KF, Fa. Clariant	3.500 (96 h) O Aviform L50 Fa. Hydrochem bez. auf Reinsubstanz 1.930 (72 h) und 1.580 (LC0) L, Safeway KF, Fa. Clariant	>10.000 (30 Min.) und 880 (EC20) Vibr. f., Safeway KF, Fa. Clariant	>=1.000 (NOEC, 72 h) Sc. S. Aviform L50 Fa. Hydrochem bez. auf Reinsubstanz >10.000 (72 h) und 2.500 (NOEC 72 h) Safeway KF, Fa. Clariant
Calciumacetat Hydrat	62-54-4		5.000 (24 h) LM		
Harnstoff	57-13-6	>10.000 (24 h)	> 6.810 (96 h) L >10.000 (48 h) L 17.000 (LC0 168 h) PR	> 10.000 (16 h) Ps. p. 24.000 (5 Min.) Vibr. f. >100 NH	>10.000 (8 d) ScQ

a) Fische: B= Brachydanio rerio; CA=Carassius auratus; CC=Cyprinus carpio; GA=Gambusia affinis; L = Leuciscus idus; PP = Pimephales promelas; S = Salmo gairdneri; LM = Lepomis macrochirus; O = Oncorhynchus mykiss;

b) Bakterien: Vibr. f. = Vibrio fischeri; Ps.p. = Pseudomonas putida; BS = Belebtschlammatmungshemmtest; NH = Nitrifikationshemmung; AV=Anabaena variabilis

c) Algen: ScS=Scenedesmus subspicatus, ScQ=Scenedesmus quadricauda; CV=Chlorella vulgaris; CR=Chlamydomonas reinhardtii; NL=Nitscheria linearis

Calcium-/Magnesiumacetat (CMA) gilt gegenüber NaCl als weniger fischtoxisch. Freilanduntersuchungen bei natürlichen Oberflächengewässern, die auch Abflüsse von mit CMA behandelten Fernstraßen entwässern, ergaben kaum negative Effekte durch CMA auf die aquatische Fauna, solange diese Gewässer ausreichend mit Sauerstoff versorgt waren. Aquatische Invertebraten überleben und pflanzen sich gut fort bei CMA-Werten bis zu 5000 mg/l, während Fischlarven noch bis zu einer Konzentration von 1000 mg/l schlüpfen können. Erst ab einer Konzentration von ca. 5000 mg/l CMA wird der Laich von Regenbogenforellen beeinträchtigt. Hingegen hemmt CMA bereits ab 85 mg/l (NaCl erst ab 1000 mg/l) das Wachstum von Algen (*Selenastrum capri* und *Anabaena flosaquae*). Auch gegenüber Wasserflöhen (*Daphnia magna*) tritt eine Schädigung schon bei Werten zwischen 25-250 mg/l CMA ein, während NaCl erst ab 2500 mg/l negative Wirkungen zeigt (Anonym 1991, Horner und Brenner 1992).

Untersuchungen an natürlichen Seen ergaben indes keine Beeinträchtigung der Algenbiomasse durch CMA aus salzhaltigen Zuflüssen. Labortests mit natürlichen Mikroorganismen zeigten, dass CMA die Primärproduktion und die Aufnahme von Acetat durch Bakterien nicht hemmt. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass ab 10 mg/l CMA die Phosphor-Aufnahme in Süßwasseralgen (Größe > 3 µm) zunimmt, die Algenbiomasse aber insgesamt zurückgeht (Goldman und Lubnow 1992).

Der Vollständigkeit halber sei hier auch kurz auf die Toxizität von Enteisungsmitteln auf Glykollbasis, die im Flughafenbereich zum Einsatz kommen, eingegangen. Die toxische Wirkung dieser Stoffe lässt sich v. a. auf Zusätze in diesen Enteisungslösungen zurückführen. Glykollösungen, die diese Zusätze enthalten, weisen eine deutlich höhere aquatische Ökotoxizität auf als Lösungen ohne diese Zusätze. Die festgestellte Giftigkeit ließ sich insbesondere auf die Gruppe der Tolytriazole (z. B. Methylbenzotriazol) zurückführen, die als Flammenschutzmittel und Korrosionsinhibitor in diesen Produkten eingesetzt werden. Da aber eine genaue Kenntnis der stofflichen Zusammensetzung dieser Enteisungsmittel aus patentrechtlichen Gründen nicht möglich ist, ist es schwierig, die jeweilige toxische Wirkung quantitativ auch einer ganz bestimmten Stoffklasse zuzuschreiben. Man geht des Weiteren davon aus, dass zusätzlich Wechselwirkungen zwischen diesen Zusätzen und dem Glykol die toxische Wirkung dieser Enteisungsmittel beeinflussen. Allerdings werden Propylen- und Ethylenglykol in der Umwelt schnell abgebaut, was

jedoch eine damit einhergehende hohe biologische Sauerstoffzehrung (BSB) bedingt. Eine ausführliche Darstellung der Problematik findet sich bei Kent et al. 1999; Pillard und Dufresne 1999; Cancilla et al. 1998; Rice et al. 1997; Bausmith und Neufeld 1999.

Streusalzzusätze (bis 0,01%), wie Na- oder Fe(II)-Cyanid, die das Zusammenbacken dieser Salze verhindern sollen, sind nicht direkt toxisch gegenüber aquatischen Organismen (U.S. Salt Institute). Diese Cyanidsalze können aber in der Umwelt (in wässriger Lösung) unter Einwirkung von Sonnenlicht (Photodegradation) zu freien toxischen Cyanid-Ionen ($\text{pH} > 9,2$) bzw. zu HCN (Blausäure, $\text{pH} < 9,2$) abgebaut werden. Man geht allerdings davon aus, dass aufgrund einer raschen Verdünnung sowie durch Volatilisation von HCN diese Cyanide unter natürlichen Verhältnissen keine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen (Novotny et al. 1998; Paschka et al. 1999).

5.3.4.2 Terrestrische Ökotoxizität

Die klassischen Tests in der Chemikalienbewertung zur terrestrischen Toxizität sind der Pflanzenwachstumshemmtest nach OECD 208 und der Regenwurmtoxizitätstest nach OECD 207 bzw. 88/302/EWG. Allerdings wurden in den Literatur- und Datenbankrecherchen nahezu keine vergleichbaren Daten zur terrestrischen Ökotoxizität von Auftaumitteln in definierten Testsystemen gefunden. Für Natriumchlorid wird im Filterkontakttest mit Regenwürmern eine LC50 von 0,1 bis 1 mg/cm^2 nach 48 h berichtet. Der LC50 gegenüber dem Schlammröhrenwurm (*Tubifex tubifex*) nach 48 h wurde zu 1016 mg NaCl/l bestimmt (IUCLID Recherche). Über die tatsächliche Wirkung von Auftausalzen auf Bodenorganismen gibt es bislang jedoch relativ wenig gesicherte Erkenntnisse.

Für Natrium in Straßenrandböden gibt es keine verbindlichen Grenz- bzw. Richtwerte, ausgenommen die Richtwerte des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) für landwirtschaftlich genutzte Böden (Brod 1993, VDLUFA 1999). Für Chlorid gibt es hingegen keine entsprechenden VDLUFA-Werte. Mit einer erhöhten Salzaufnahme durch die Pflanzenwurzel aus der Bodenlösung und mit sichtbaren Schäden an Gehölzen muss ab Bodengehalten von 600 mg/kg Cl^- und 1.200 mg/kg Na^+ gerechnet werden (Brod 1995). Bodenwerte für Natrium und Chlorid von $> 250 \text{ mg}/\text{kg}$

werden als schädlich für die meisten Baumarten angesehen (Hootman und Kelsey et al. 1994). Nach VDLUFA (1991) liegt der Grenzwert für eine Pflanzenschädigung durch Salz in karbonatfreien Böden bei 2000 mg/kg, in karbonatreichen Böden bei 4000 mg/kg. Die durch Tausalzanwendung bedingte Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit im Boden nimmt mit der Entfernung vom Straßenrand wieder ab, aber mit der Bodentiefe zu. Pflanzenschäden treten ab einem empirischen Wert der elektrischen Leitfähigkeit von 4 mS/cm (bei gleichem Boden:Wasser-Verhältnis) auf. Nach dem US Salinity Laboratory erfahren salzempfindliche Pflanzenarten eine erste Schädigung jedoch schon ab 2 mS/cm, weshalb die Grenze zwischen versalzten und nicht versalzten Böden bei 2 mS/cm gezogen wird (U.S. Salinity Laboratory, Riverside, CA, zitiert in: BROD 1993).

Sowohl Chlorid als auch Natrium und Calcium gelten als pflanzliche Mikronährstoffe und werden von den Pflanzen in geringen Mengen zum Wachstum benötigt. Die eingesehene Literatur dokumentiert eine große Variationsbreite in der Konzentration von Natrium und Chlorid in verschiedenen Pflanzengeweben. Chlor ist u. a. bei der Osmoregulation und bei der Photosynthese beteiligt. Allgemein werden für Pflanzen folgende Grenzwerte (% Trockengewicht Blätter) genannt, von wo an eine Schädigung einsetzt: 0.5% Chlorid (für immergrüne Koniferen) sowie 0,5-1,5% Chlorid und 0.1-0.8% Natrium (für salzempfindliche Pflanzenarten) (in BROD 1993 1993 und BROD 1995). In Gehölzen erfolgt eine Anreicherung von Chlor in der Reihenfolge: Blätter > Zweige > Winterknospen > Früchte. Zumindest in Koniferen hat man auch eine natürliche Konzentrationszunahme von Na und Ca in den Nadeln mit Alter und Wachstum festgestellt (Viskari und Kärenlampi 2000).

Das Straßenbegleitgrün hat v. a. innerstädtisch einen hohen ökologischen Wert, weshalb die Phytotoxizität von Tausalzen (Na^+ - und Cl^- -Ionen) gerade innerörtlich, z. B. auf Gehwegen, kritisch zu betrachten ist. Nach Angaben von Ruge (1972) gilt eine Gesamtmenge von $1 \text{ kg/m}^2 \text{ NaCl}$ pro Jahr im innerörtlichen Bereich als pflanzenphysiologisch noch akzeptabel. Dieser Wert gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass nicht mehr als 10% des auf die Fahrbahn ausgebrachten Auftausalzes in den Wurzelbereich der Bäume gelangt (zit. nach Ruess 1998). Dieses sollte im innerörtlichen Bereich auch technisch einhaltbar sein (Brod 1995). Pflanzenschäden erfolgen außerörtlich v. a. durch das Verspritzen von salzhaltigem Schmelzwasser (osmotische bedingte Ätz- und Verbrennungsschäden) und, wie

innerörtlich, über den Bodenabfluss. Neben der Bodenversalzung (und Aufnahme/Schädigung über die Wurzel) und oberirdischen Salzkontaktschäden, wird die Straßenrandvegetation auch durch andere verkehrsbedingte gasförmige Emissionen (wie SO₂, NO_x, CO) sowie flüssige und feste Stoffe (wie Öle, Fette, Ca-, Si- und Schwermetallverbindungen) oftmals stark belastet, was eine klare Abgrenzung in vielen Fällen erschwert. Zusätzlicher Stress entsteht durch witterungsbedingte Temperaturschwankungen, Krankheiten, Schädlinge, mechanische Verletzungen, Bodenverdichtung und Versiegelung. In der deutschsprachigen Literatur wurde erstmals im Jahr 1964 von deutlichen Pflanzenschädigung durch Auftausalzschäden berichtet (Brod 1993).

Natürlich variieren Empfindlichkeit und Toleranz von Gehölzen gegenüber Auftausalzen auch mit dem Einfluss anderer Faktoren, wie Vitalität und Umgebungsbedingung. Gräser und Kräuter gelten allgemein als salztoleranter als Holzgewächse. Die Salztoleranz von Begleitgrün nimmt in folgender Reihenfolge ab: Gräser > Laubbäume > Nadelgehölze. Als relativ wenig gefährdet gelten die Stieleiche (*Quercus robur*), die Robine (*Robinia pseudoacacia*), die Platane (*Platanus acerifolia*) und die Esche (*Fraxinus excelsior*) (Brod 1995). Die Salztoleranz ändert sich aber auch im Laufe der Pflanzenentwicklung. Interessanterweise zeigen Untersuchungen außerdem ein Zunehmen salztoleranter Arten auf Straßenrandböden sowie einen Zusammenhang zwischen Schädigungsausmaß und Straßenart (Bundesautobahn > Bundesstraße > Landstraße), Verkehrsgeschwindigkeit (Aufwirbeln von salzhaltigem Spritzwasser), Entfernung zur Fahrbahn und Windrichtung bzw. -stärke (Exposition) (Brod 1993).

Physiologisch besteht die Wirkung von Auftausalzen auf Pflanzen in einer Erhöhung des osmotischen Potentials der Bodenlösung und dadurch bedingt in einer erschwerten Wasseraufnahme. Des Weiteren erfolgt eine Erhöhung der Ionengehalte in den Zellen und des Blatt-Diffusionswiderstandes, was zur Einschränkung von Transpiration, Photosynthese und Stoffproduktion führt, zu einer Störung des Mineralstoffhaushalts durch verstärkte Aufnahme von Na⁺- und Cl⁻-Ionen (bis hin zu toxischen Konzentrationen), zu salzinduzierten morphologischen Wirkungen und hormonalen Veränderungen (vorzeitiges Altern) sowie zu einer negativen Beeinflussung der Teilungsaktivität des Kambiums in Straßenbäumen und damit zu einer Abnahme der Jahresringbreite. Natrium blockiert in der Bodenlösung

insbesondere die Aufnahme essentieller Nährstoffe, wie Ca, Mg, und K. Bei Straßenbäumen wird auch eine kausale Beziehung zwischen der Bildung von Stresshormonen (wie Abscisinsäure, Prolin) und der Salzbelastung diskutiert. Chlorid stört nicht nur den Wasserhaushalt von Pflanzen, sondern kann auch in jungen Teilen der Wurzel die Aufspaltung von Aminosäuren blockieren (Faith-Ell 2000). Ein Chlorid-Überschuss in Bäumen kann die Bildung organischer Säuren hemmen und die Aufnahme essentieller Kationen (K^+ , Ca^{++} , Mg^{++}). Als einfacher Indikator für eine Baumschädigung kann das K/Cl-Äquivalenzverhältnis in den Blättern herangezogen werden. So kann es z. B. bei einem $K/Cl < 1$, trotz ausreichender Kaliumversorgung ($K > 1\%$ Trockengewicht), zu Blattrandnekrosen kommen (siehe Brod 1993, u. a. mit einem 5-stufigen Bewertungsschema für Blattschädigung).

Allgemeine Schadsymptome einer NaCl-Anreicherung in Pflanzen reichen von der Hellfärbung der Blätter über chlorotische Blattränder sowie Nekrosen und Blattfall bis zum Absterben von Sprosssteilen und Gesamtpflanzen (Hootman und Kelsey et al. 1994).

In salzgeschädigten Straßenbäumen werden beträchtliche Na^+ - und Cl^- -Anreicherungen beobachtet. Aufgrund einer internen Verlagerung im Holz ist aber oft kein direkter Zusammenhang zwischen winterlicher Streumenge und Salzgehalt und einer dadurch möglicherweise bedingten Baumschädigung erkennbar (Brod 1993).

Aufgrund des Salzkreislaufs innerhalb der Bäume (winterliche Speicherung in Knospen und Zweigen sowie Verlagerung von $Na^+ + Cl^-$ aus Blättern in die Wurzel und wieder zurück in die Bäume) kann es über Jahre hinweg zu einer stetigen Salzanreicherung kommen, bis hin zu letalen Konzentrationen. Einer Studie des Umweltbundesamtes (Augustin 1981) zufolge geht man davon aus, dass ca. 1% aller registrierten Baumschäden in Deutschland durch das Ausbringen von Tausalzen verursacht werden (ca. 2 Mio. Straßenbäume).

In einer 2-jährigen Feldstudie in Finnland konnte gezeigt werden, dass die Anreicherung von Na^+ und Cl^- in Kiefernadeln sowie sichtbare Verletzungen der Nadeloberfläche (aufgrund salzhaltigen Spritzwassers) nach einer Verringerung der Tausalzanwendung in unmittelbarer Fahrbahnnähe (< 20-30 m) wieder zurückgingen. Andererseits nahmen die Konzentration von Na^+ und Cl^- in den Nadeln bis in den Mai/Juni hinein zu, obwohl von April an kein Salzeinsatz mehr erfolgte.

Auch das Wettergeschehen, so berichten die Autoren, beeinflusste signifikant Salzzakkumulation und Schädigung der Nadeln, nicht zuletzt auch aufgrund der mit den Witterungsverhältnissen einhergehenden unterschiedlichen Einsatzmengen. Die Studie kommt zum Ergebnis, dass die Salzaufnahme in Pflanzen überwiegend durch Spritzwasser und über die Blattoberfläche, und weniger über den Wurzelbereich erfolgt. Bei Einsatz von CaCl_2 konnte im Gegensatz zu NaCl keine zusätzliche Anreicherung von Ca^{++} in den untersuchten Nadeln festgestellt werden (Viskari und Kärenlampi 2000).

Auch eine Studie des Umweltbundesamtes zeigt, dass im innerstädtischen Bereich, nach mehrjährigem Verzicht auf Streusalz, Schadsymptome sowie Na^+ - und Cl^- -Gehalte in Blättern und Zweigen von wenig geschädigten Bäumen wieder zurückgingen (Balder und Nierste 1988).

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Durch das Überangebot an Chlorid- und Natriumionen kann es zu osmotisch bedingten Ätz- und Verbrennungsschäden an Pflanzengewebe kommen, zu einer Anreicherung von Na^+ und Auswaschung von Nährstoffen im Boden, und damit zu einer verringerten Nährstoffaufnahme. Alkalisierte Böden hemmen schließlich die Bildung von Mykorrhizen, Bäume altern frühzeitig und zeigen einen verspäteten Austrieb, Nekrosen und kleinflächige Blätter. Chlorid hemmt das Pflanzenwachstum, trägt dazu bei, dass Blätter und Nadeln früher welken, abfallen und ganze Pflanzen vorzeitig absterben (Assmann 1999).

Wie bereits für aquatische Systeme dargestellt (siehe vorheriges Kapitel), gilt CMA als wenig phytotoxisch. Untersuchungen mit diversen Pflanzenarten (u.a. Sonnenblume *Helianthus balsamina* und Ahorn *Acer rubra*) ergaben bei Konzentrationen um 0,5 g CMA/kg Boden keine negativen Effekte, die meisten Pflanzen tolerieren bis zu 1 g CMA/kg, während 4 g CMA/kg jedoch deutlich phytotoxisch wirken. Auch in Feldstudien wurden durch CMA-Applikation keine nennenswerten negativen Effekte auf terrestrische Systeme, insbesondere auf Struktur und Vegetation von Straßenrandböden beobachtet (Horner und Brenner 1992). Dennoch ist CMA gegenüber Kochsalz, das im vergleichbaren Konzentrationsbereich phytotoxisch ist, nicht grundsätzlich günstiger zu bewerten.

Hinsichtlich der abstumpfenden Streumittel lassen sich keine negative Auswirkungen auf die betroffene Fauna im näheren Straßenumfeld nachweisen. Nur in Kombination

mit Tausalzen können abstumpfende Mittel, z. B. auf Gehwegen, für Haustiere gefährlich werden ("Wundlaufen"). Weidendes Vieh, so wird berichtet, meidet meist an Splittstreulflächen angrenzendes Weideland (Moritz 1999).

5.3.5 Auswirkungen auf Grund-, Oberflächen- und Trinkwasser

5.3.5.1 Allgemeiner Überblick

Die Hauptbelastung von Oberflächen- und Grundwasser mit Chloridsalzen in Deutschland erfolgte jahrzehntelang durch die Ableitung von Reststoffen aus den Kaliminen und von Grubenwasser aus dem Kohlebergbau. Aufgrund des Rückgangs der Kali- und Kohlegewinnung in den letzten Jahren konnte auch eine deutliche Reduktion der Chloridgesamtfracht beobachtet werden. Die wichtigsten in der Landwirtschaft verwendeten Kalidünger enthalten neben Kaliumchlorid auch Kochsalz, so dass die Chloridkonzentration im Grundwasser insbesondere unter landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Regel erhöht ist (Kölle 2001).

Allgemein werden mit Tausalz nur jene Gewässer belastet, deren Einzugsgebiet auch direkt von Straßen tangiert wird. Auftausalze gelangen mit dem Straßenabfluss (Schmelzwasser) über das Straßenentwässerungssystem (Fahrbahnkanalisation und Sickerwasserleitungen) in Oberflächengewässer (Kläranlage, Flüsse, Seen) bzw. über die Straßenrandzonen und Bodenpassage ins Grundwasser (Brod 1995). Eine Erhöhung der Natrium- und Chloridkonzentration in Oberflächen- und Grundwasser ist letztlich auch abhängig vom natürlichen Rückhaltevermögen des Bodens und von der Abflussmenge im Einzugsgebiet. Im innerstädtischen Bereich wird der größte Teil des Auftausalzes aus dem Fahrbahnbereich direkt mit dem Schmelzwasser der Kanalisation zugeführt. Nur ein kleinerer Teil gelangt in den Randzonenbereich. Auf Fernstraßen dagegen erfolgt der Salzeintrag in Boden, Grund- und Oberflächenwässern auch über salzhaltiges Spritzwasser. Die Salzkonzentration von Fernstraßenabflüssen kann dabei Werte, in Abhängigkeit von Wetter, Ausbringungsmenge und Größe des Einzugsgebiets, bis zu 1 % NaCl erreichen und damit zu einem entsprechenden Anstieg im Vorfluter (z. B. Fließgewässer) führen. Ad- und Desorptionsvorgänge im Boden können die Verlagerung der durch Streusalz verursachten Salzfrachten verzögern. Doch trotz des starken Verdünnungseffekts beim Abfluss und bei der Bodenpassage, werden v. a. im Frühjahr aufgrund der hohen Schmelzwasserabflüsse deutlich erhöhte Salzkonzentrationen im Vorfluter

beobachtet. Aus einer Tausalzapplikation von 2 t/km wurde eine mittlere Salzkonzentration im Straßenabfluss von 6 g/l Cl⁻ abgeleitet (Brod 1993, Tegethof 1998). Nach einer Berechnung von Brod (1995) würde sich der Chloridgehalt in den Oberflächengewässern durch den Einsatz von Streusalz im Mittel um 4 mg/l erhöhen, wenn der gesamte Jahresverbrauch an Streusalz im gesamten Oberflächenabfluss gelöst würde.

5.3.5.2 Grund- und Trinkwasser

Tausalze können mit dem Sickerwasserstrom ins Grundwasser gelangen und sind eine der Ursachen für eine "Aufsalzung" des Grundwassers. Die mittleren Na- und Cl⁻-Gehalte im Grundwasser der Bundesrepublik Deutschland liegen bei 9-21 mg/l bzw. 21-36 mg/l. Bei einem geschätzten mittleren Jahresverbrauch von Tausalz in der BRD von 1,3 Millionen Tonnen (1968-88) und einer jährlichen Ausbringungsrate von 5,2 t Chlor pro Jahr und km², kann mit einer Erhöhung der mittleren Cl⁻-Konzentration im Grundwasser um ca. 6 mg/l (entsprechend ca. 10 mg/l NaCl) gerechnet werden, d. h. mit einem Viertel des von der EU-Trinkwasserrichtlinie 88/778/EWG für Chlorid angegebenen Richtwertes für Trinkwasser von 25 mg/l (dieser Richtwert wurde jedoch nicht in die aktuelle EU-Trinkwasserrichtlinie 98/83/EG übernommen). Ab einer Chloridkonzentration von 200 - 300 mg/l ergeben sich Probleme für die Trinkwassergewinnung und die landwirtschaftliche Nutzung (siehe Tabelle 11). In einer weiteren Studie konnte gezeigt werden, dass der Salzgehalt von Grundwasser, das zu Trinkwasserzwecken genutzt wird, nahe einer Bundesautobahn, kurz nach erfolgter Salzstreuung von 20 auf 300 mg/l anstieg (Assmann 1999). In den Begründungen zur Trinkwasserrichtlinie der WHO (1993, 1996) finden sich jedoch keine gesundheitlich begründeten Grenzwerte für Natrium und Chlorid, da ein Zusammenhang mit dem Bluthochdruck nicht belegt werden konnte. Die aufgestellten Richtwerte orientieren sich daher an der Geschmacksgrenze.

Obwohl geschätzt wird, dass bis zur Hälfte aller Tausalze in tiefere Bodenschichten und ins Grundwasser gelangen, sind kaum Fälle bekannt, in denen Trinkwasserbrunnen durch Auftausalze beeinträchtigt wurden, da dies zumeist aus Tiefbrunnen gefördert wird (Ausnahme: Harnstoff). Man geht allgemein davon aus, dass die wichtigsten Grundwasserspeicher aufgrund ihrer Volumina und Durchflussraten unempfindlich gegenüber einer möglichen Salzbelastung bleiben.

Ein Anstieg der Salzkonzentration im oberflächennahen Grundwasser erfolgt v. a. in Abhängigkeit von der Entfernung zu Fahrbahn und Fließrichtung. Unter bestimmten hydrogeologischen Verhältnissen (hoher Grundwasserstand, Nähe zur Straße, durchlässige Böden, geringe Durchflussrate) ist aber damit zu rechnen, dass selbst tiefere Grundwässer von Auftausalzen beeinflusst werden (Brod 1993). Die bei der Bodenpassage durch Na^+ verdrängten Ca^{++} - und Mg^{++} -Ionen können lokal zu einem Anstieg der Wasserhärte im Grundwasser führen (Tegethof 1998).

Tabelle 11: Grenz-, Richtwerte und natürliche Gehalte für Natrium und Chlorid in Grund- und Oberflächenwasser (Brod 1993, aktualisiert)

	Natrium mg/l	Chlorid mg/l
Trinkwasserverordnung 2001 Indikatorparameter	200 vgl. TVO 1990: 150	250 (Wasser soll nicht korrosiv wirken) vgl. TVO 1990: 200
DIN 2000 Trinkwasser		250
80/778/EWG Trinkwasserrichtlinie		
Richtzahl	20	25
Zulässige Höchstkonzentration	150	200 (annähernde Konz. ab der Wirkungen auftreten können)
98/83/EG EU-Trinkwasser- Richtlinie Indikatorparameter	200	250 (soll nicht korrosiv wirken)
WHO Trinkwasserqualität 2001 Richtwert (Geschmacksgrenze)	200	250
75/440/EWG Leitwert Oberflächenwasser zur Trinkwassergewinnung		200
US Public health service	200	250
Kanadischer Trinkwasser- Standard		250
dt. Mineralwässer	5-1000	5-600
Chlorid in Süßwasser (mittlerer Gehalt)		8,3 (Demers und Sage 1990)
mittlere Grundwasserwerte in Deutschland	9-21	21-36

Als Gründe für in Deutschland und den angrenzenden Nachbarländern bekanntgewordene Fälle der Grundwasserversalzung wurden in Norddeutschland

die Intrusion von Meerwasser und die Auslaugung von Salzstöcken (Wichmann und Grube 2000), in Mitteldeutschland und in der Rheinebene hingegen die Einleitungen der Kaliindustrie bzw. die Auslaugung derer ehemaligen Abraumhalden (Elsass 2000) beschrieben. Als Folge des Kalibergbaus erhöhte sich die Salzfracht des Rheins an der holländischen Grenze (bei Lobith) von der Hintergrundbelastung (etwa 50 kg/s) auf bis zu 400 kg/s in den 80er Jahren. Im „Rheinsalzvertrag“ wurde ab 1976 eine maximal zulässige Chloridkonzentration an der holländischen Grenze von 200 mg/l festgelegt. Aufgrund nachweisbarer Schäden durch die erhöhte Salzkonzentration für den Anbau von Pflanzen und aufgrund von Korrosionsschäden im Trinkwassernetz wurden mehrere Schadensersatzklagen erhoben und teilweise auch anerkannt (Jülich 2000). Gleichzeitig breitete sich das versalzte Grundwasser in der Nähe der Abraumhalden weiter aus und erreichte 1975, also 60 Jahre nach Beginn des Kaliabbaus im Elsass, das 25 km südlich gelegene Colmar. Obwohl Gegenmaßnahmen eingeleitet wurden, sollen die Trinkwasserbrunnen von Colmar nun verlegt werden (Ciglia 2000).

5.3.5.3 Oberflächengewässer

Eine erhöhte Salzkonzentration (Chlorid) durch Tausalzanwendung konnte auch in Seen beobachtet werden, so im Lake Michigan (USA), wo der Anteil der Tausalze am Gesamtchloridgehalt 11 % erreichte (der Rest kam aus industriellen und kommunalen Zuflüssen, vgl. Brod 1993). Salzhaltige Fahrbahnabwässer gelangen oftmals über Zuflüsse in Seen, wo sie aufgrund ihrer höheren Dichte sich im Tiefenwasser anreichern und eine Dichteschichtung (Chemokline) ausbilden. Diese Schichtung hemmt die saisonale Rezirkulation und Wiederbelüftung/Durchmischung des Wassers und damit die Versorgung mit Sauerstoff, was zu einer erhöhten Mortalität benthischer Organismen führen kann (Anonym 1991, Brod 1995, Goldmann und Lubnow 1992). In Deutschland wurde das Beispiel eines Baggersees von rd. 10 ha Größe bekannt, der als Vorfluter für die Autobahntwässerung dient und der aufgrund der eingetragenen Auftausalze eine stabile Schichtung ausbildet. Diese verhindert bzw. verzögert die Durchmischung des Wassers während der Vollzirkulation im Frühjahr und Herbst, mit der Folge, dass das Tiefenwasser über mehrer Monate sauerstofffrei bleibt (Hutterer 1995).

Eine weitere Studie aus den USA belegt einen signifikanten Anstieg der Chloridkonzentration in vier Flüssen, die im Einzugsgebiet einer Fernstraße (Highway) liegen. Dieser Chloridanstieg hielt auch 6 Monate nach Beendigung der Streusalzanwendung an, was darauf hinweist, dass eine Erhöhung der Chloridkonzentration in Fließgewässern durchaus kein kurzzeitiges Ereignis darstellen muss. Diese erhöhten Chloridkonzentrationen reichten aus, um selbst den Chloridgehalt im Tiefenwasser eines im Einzugsgebiet liegenden Sees noch geringfügig zu erhöhen (Demers und Sage 1990).

Der hohe BSB in Oberflächenwasser, welches durch Flughafenabwässer verunreinigt wird, lässt sich meist auf den mikrobiellen Abbau von Glykol, welches dort als Enteisungsmittel in Form von Diethylen- oder Propylenglykol auch in Verbindung mit Harnstoff eingesetzt wird, zurückführen (Cancilla et al. 1998). Die Anwendung von Harnstoff als Enteisungsmittel war oftmals auch Ursache für die hohen Ammoniumwerte in Vorflutern und Kläranlagen. Es wurde beobachtet, dass die hohe organische Belastung von Flughafenabwasser auf dem Grund von Fließgewässern die Bildung von biologischen Schleimüberzügen stimulieren und die Invertebratenfauna stark beeinträchtigen kann, die schließlich immer mehr von verschmutzungstoleranten Arten, wie Chironomiden und Oligochaeten, dominiert wird. Auch Amphibien- und Fischpopulationen in Oberflächengewässern, die im direkten Einzugsgebiet von enteisten Flächen (Flughäfen, Straßen) liegen, können durch Tausalzanwendung geschädigt werden (vgl. Kapitel 5.3.3.1, Koryak et al. 1998, Turtle 2000).

Der z. T. exzessive Einsatz von Harnstoff als Bewegungsflächenenteiser für Flughäfen hat aufgrund der dadurch bedingten hohen Sauerstoffzehrung wiederholt zu Fischsterben in davon betroffenen Oberflächengewässern geführt (Stöver 1998). Auch im Bereich des Flughafens Frankfurt/Main traten erhöhte Nitratbelastungen (bis zu 200 mg/l) infolge des Einsatzes von Harnstoff auf. Der Flughafen investierte daraufhin rd. 16 Mio. DM in eine aufwendige Wasserreinigungsanlage, um in den nächsten 10 Jahren die Nitratbelastung im Frankfurter Stadtwald zu beseitigen (Schäfer 1998).

Auch kann die durch Tausalzanwendung verursachte erhöhte Bildung von stabilen Metall-Chloro-Komplexen, wie in einer amerikanischen Laborstudie demonstriert, ab

einer Konzentration von 2×10^{-2} M Cl^- (700 mg/l) das Adsorptionsvermögen aquatischer Sedimente verringern und zu einer Freisetzung toxischer Schwermetalle, insbesondere von hochgiftigem Quecksilber, führen (Wang, Huang et al. 1991).

Im Rahmen der eingesehenen Literatur wurden keinerlei negative Effekte auf die Wasserqualität durch abstumpfende Stoffe natürlicher Herkunft bekannt oder Hinweise auf entsprechende Untersuchungen über deren chemische Wirkung auf die Gewässergüte gefunden. Wiedereingesammeltes Streugut kann jedoch aufgrund der Belastung mit Schwermetallen und Organika aus dem Straßenverkehr nicht direkt wieder verwendet werden, sondern muss deponiert oder einer Reinigungsanlage zugeführt werden (siehe 5.3.7.2 und 5.3.7.3). Hierbei werden der Umwelt allerdings auch Schadstoffe des Straßenverkehrs entzogen (Knirsch, 2002). Inwieweit Recyclingmaterialien wie Schmelzkammergranulate, Hüttensande, Gießereireststoffe und Eisenhüttenschlacken u.a., die im Straßenbau unter Deckschichten verwendet werden, auch als abstumpfende Streumittel eingesetzt werden (Verkehrswesen 1980; 1991; 1995; 1999; 2000), ist nicht bekannt. Grundsätzlich sind diese Recyclingmaterialien aber aufgrund der Schwermetallgehalte nicht für eine offene Verwendung geeignet.

5.3.6 Auswirkungen auf Böden

Ein Teil der auftauenden und abstumpfenden Streumittel wird durch den Verkehr über die Fahrbahnränder hinaus durch sogenanntes Spritzwasser auf angrenzende Flächen verfrachtet. Auch durch mechanische Schneeräumung gelangen Streustoffe in den straßennahen Randbereich.

Straßenrandböden gehören zu jenen verkehrsnahen Standorten, die am stärksten durch Streumittel beeinflusst werden. Unmittelbar neben der Fahrbahn handelt es sich hierbei meist um künstlich verdichtete, skelett- und kalkreiche Aufschüttungsböden (aus Zement-, Betonresten, karbonathaltigen Stäuben, Geröll, Sand, Kies, und weiteren Baureststoffen). Die Funktion dieser Böden als Lebensraum für Organismen sowie als Wurzelraum geht dadurch weitgehend verloren. Insgesamt zeichnen sich Straßenrandböden durch eine hohe und kleinräumig auftretende Variabilität von Bodenmerkmalen, wie Porenvolumen, Korngröße und Dichte aus, was v. a. bei der Beurteilung von Umwelteinflüssen zu berücksichtigen ist. Durch ihre grobe Struktur und dem hohen Sand- und

Skelettanteil findet kaum eine Beeinträchtigung der Wasserbewegung durch Tausalze statt. Die ansonsten in tausalzbelasteten Böden beobachtbare Tondispersierung und die daraus folgende verminderte Strukturstabilität gilt nur bedingt für Straßenrandböden. Bei einer Breite von 9-18 m, nehmen Randstreifen bei 2-spurigen Fahrbahnen immerhin eine Fläche von 2 ha/km ein, bei einer 4-spurigen Fahrbahn 3 bzw. 6 ha/km. Sie bilden oftmals Landschaftsrassen aus Gräsern und Kräutern mit einer Fläche von 2-3 ha/km. Verglichen mit der Austauschkapazität natürlicher Böden (8-35 mval/100 g) weisen Straßenrandböden nur eine geringe Sorptionskapazität auf. Hingegen besitzen diese Böden aufgrund des Ausgangsmaterials eine hohe Basensättigung (zw. 90-100%), v. a. im Hinblick auf Ca und Mg, aber auch Na, gegenüber dem Eintrag von Tausalz (Tegethof 1998).

Zusammen mit anderen verkehrsbedingten Schadstoffen gelangen Auftausalze mit dem Schmelzwasser oder Spritzwasser (als Aerosol) in den Straßenrandbereich und können dort von Pflanzen entweder direkt über die Blätter oder über Boden und Wurzel aufgenommen werden. Der Wirkungsbereich von Auftausalzen beschränkt sich jedoch i.d.R. auf einen 2-10 m breiten Fahrbahnrandbereich. Nach Abtrocknung der Fahrbahn kann Salzstaub u. U. noch weiter (bis zu 100-200 Meter) transportiert werden. Auf Fernstraßen gelangen etwa 10-15% der ausgebrachten Salze als Salzaerosole in den Straßenrandbereich (Tegethof 1998). Der höchste Eintrag erfolgt durch Oberflächenwasserversickerung in einem Abstand von 0-2 m neben dem Fahrbahnrand, durch Spritzwasser in einem Bereich zwischen 2-10 m, und durch Wind verteilte Stoffe im Abstand von 10-60 m von der Fahrbahn (Tegethof 1998). Nach einer Abschätzung von Brod (1993) gelangt bei einem mittleren Tausalzverbrauch von 4 t/km eine Tausalzmenge von 2 kg/m² auf eine 6-spurige, 22,5 m breite Fahrbahn. Bezogen auf den Straßenrandbereich fallen demnach 11,3 kg NaCl pro Laufmeter an, die entweder über Entwässerungsmaßnahmen abgeführt werden oder im angrenzenden Boden versickern (Brod 1993). Einer Schweizer Untersuchung zufolge (zitiert in Brod 1993) entsprechen Streusalzfrachten am Straßenrand von durchschnittlich 6-48 g/(m²·14 d) einer natürlichen Meeressalzsedimentation in küstennahen Bereichen.

Bodenchemische Parameter werden durch Tausalze bis zu einem Abstand von 5 m vom Fahrbahnrand verändert, wobei sich Chlorid aufgrund seiner vergleichsweise höheren Mobilität deutlich weniger anreichert als Natrium. Besonders in humiden

Klimaten wird das eingetragene Chlorid aufgrund der geringeren Sorption rasch ausgewaschen und in tiefere Bodenschichten verlagert. Bodenuntersuchungen im US-Bundesstaat Vermont ergaben, dass bei einem Tausalzverbrauch von 6-9 t/km der Salzgehalt in den betroffenen Böden 0,11 bis 0,3% betragen kann. Dabei wird Cl^- in geringer verdichteten Böden schneller ausgewaschen, in stark verdichteten Böden hingegen stärker angereichert (Brod 1995).

Neben natürlichen Bodenparametern ist der Bodensalzgehalt letztlich abhängig von der eingesetzten Tausalzmenge, der Anzahl Fahrspuren sowie der Fläche des Straßenrandbereichs. Insgesamt liegen die Salzgehalte in Straßenrandböden deutlich über denen straßenferner Bodenstandorte und über den nach Meyer-Spasche (1988) (zitiert in Brod, 1993) tolerierbaren Werten, zeigen aber eine große Variationsbreite. Die Verlagerung von Salzen in Böden hängt daher stark von Niederschlagsmenge, Bodendurchlässigkeit und Bodenfeuchte ab. Hohe Niederschläge und Böden mit einer hohen Wassersättigung führen zur vollständigen Auswaschung der eingebrachten Salze. Hingegen kann es in trocken-warmen Perioden durch hohe Evapotranspiration zu einem Konzentrationsanstieg im Oberboden kommen (Brod 1993).

Tausalze lagern sich in diesen Böden oberflächlich ab oder werden weiter tiefer in den Boden ausgewaschen. Damit einher geht eine zunehmende Verschlammung und Verdichtung des Bodens sowie eine verringerte Bodendurchlüftung und Wasserspeicherung, was zu einer insgesamt erschwerten Wasseraufnahme im Wurzelbereich führt. Durch den Streusalzeinsatz und den vermehrten Eintrag von Na^+ findet v. a. eine Alkalisierung des Bodens statt und damit eine erhöhte Auswaschung von Ca^{++} und Mg^{++} . Die damit einhergehende Dispergierung von Bodenpartikeln sowie die verminderte Gesamthydratation führt zu einer Solausflockung von Bodenkolloiden und damit zu einer insgesamt weniger stabilen Bodenstruktur. Übersteigt die Na^+ -Sättigung eines Bodens 15-20% (Sandböden) bzw. 5-10% (tonreiche Böden), dann sind Meliorationsmaßnahmen notwendig, da eine Erhöhung der Na^+ -Sättigung zur Abnahme von Krümelstabilität, Porenvolumen und Plastizitätsgrenze führt (Brod 1993).

Eine vermehrte Auswaschung von Calcium und Magnesium erfolgt nicht nur durch Natrium, sondern auch durch die miteingebrachten Chlorid-Ionen und die Bildung

leichtlöslicher Chloridkomplexe. Hohe Calcium-Bodenwerte in Fahrbahnnähe können indes teils auch auf vorhandene Zement- bzw. Betonreste im Randboden selbst, teils auch auf normalen Fahrbahnabrieb zurückgeführt werden. Feldversuche haben jedoch gezeigt, dass in Straßenrandböden keine ähnlich starke Auswaschung von Ca und Mg durch Tausalze erfolgt wie in natürlichen Böden.

Man geht davon aus, dass pH-Werte $> 8,3$ einen Einfluss von Tausalz (Na-Ionen) im Boden anzeigen. Jedoch kann einerseits ein vermehrter Eintrag von NaCl und CaCl₂ z. B. durch Hydrolyse der Na⁺ und Ca²⁺-Ionen und Dissoziation der gebildeten NaOH und Ca(OH)₂ den pH-Wert der Bodenlösung anheben, andererseits aber auch zu einer pH-Erniedrigung infolge Desorption von H⁺ und Al³⁺-Ionen durch Na⁺ führen. Ein Vergleich mit den pH-Richtwerten nach Meyer-Spasche (1988) zeigt, dass neutrale bis alkalische Bodenreaktionen überwiegen und damit eine eingeschränkte Nährstoff- (aber auch Schwermetall-) Verfügbarkeit (Hootman, Kelsey et al. 1994). Gemessen an den Richtwerten für Phosphor und Kalium der VDLUFA-Düngeempfehlungen (nach Meyer-Spasche) ist der Versorgungsgrad von Straßenrandböden mit diesen Nährstoffen überwiegend gering (Brod 1993). Die Auswaschung von Nährstoffen, der Entzug von Wasser im Wurzelbereich sowie eine zusätzliche Behinderung der Nährstoffaufnahme (P, K, N) können zu indirekten Pflanzenschädigungen führen.

Auch der verminderte Gasaustausch zwischen Luft und Boden sowie die verminderte Infiltration von Regenwasser als Folge der Verdichtung und Versiegelung, machen Straßenrandböden insgesamt zu ungünstigen Vegetationsstandorten (Brod 1993).

Salz verändert auch die Verteilung zwischen adsorbierten (ausgefällten) und gelösten Schwermetallen. Eine Auswaschung von gelösten Schwermetallen (zwischen 50-90%) erfolgt bereits mit der ersten Schmelzwasserfracht (Novotny, Muehring et al. 1998). Die Löslichkeit von Schwermetallen im Boden wird durch Austausch- (Natrium) und Komplexierungsvorgänge (Chlorid) unterschiedlich beeinflusst und kann z. B. zur Bildung von leichtlöslichen Cadmium-Chloro-Komplexen führen (Brod 1993). Dabei gelten Ca⁺⁺ und Mg⁺⁺ als stärkere Kationenaustauscher als Na, was insbesondere hinsichtlich der Auslaugung von Cadmium eine Rolle spielen dürfte (Amrhein, Strong et al. 1992). So konnte ein Anstieg der Blei, Cadmium und Zink Konzentration sowie von suspendiertem

Material, CSB und Kohlenwasserstoffen in einem winterlichen Straßenabfluss aufgrund des Einsatzes von chloridhaltigen Tausalzen beobachtet werden (Legret und Pagotto 1999). Obwohl Chlorid-Ionen in Böden allgemein als weniger schädlich als Na-Ionen gelten, vermögen sie doch darin sorptierte Schwermetalle zu mobilisieren (Brod 1993).

Auslaugungsversuche an Böden mit NaCl und CMA zeigten eine verstärkte Schwermetallmobilisierung (Cr, Pb, Ni, Fe, Cd, Cu) mit zunehmendem Salzgehalt aufgrund Ligandenkomplexbildung und Ionenaustausch, insbesondere aber durch die erhöhte Dispersion der organischen Bodensubstanz durch Natrium, und der damit einhergehenden Störung der ursprünglich gewachsenen Bodenstruktur. Im Gegensatz dazu führte ein Eintrag von CMA zu einer besseren Durchlässigkeit der betroffenen Böden. Aufgrund der vergleichsweise geringeren Dispersion organischer Stoffe sowie von Tonpartikeln konnte sogar eine Verbesserung des hydraulischen Leitungsvermögens in diesen Böden beobachtet werden (Amrhein, Strong et al. 1992). Ebenfalls ließ sich zeigen, dass Acetat eine stärkere Ionenpaarbindung mit Schwermetallen eingeht als Chlorid. Die Mobilisierung organischer Verbindungen (v. a. gelöster Humin- und Fulvinsäuren) bei hohen Anteilen austauschbaren Natriums und niedrigem Elektrolytgehalt trug v. a. zu einer vermehrten Auslaugung von Chrom bei. Jedoch blieb die Schwermetallkonzentration in den Auslaugungslösungen deutlich unterhalb der Grenzwerte für Trinkwasser (siehe Tabelle 9). Während die Konzentration von Cadmium, Blei und Chrom in der Bodenlösung gleichfalls unter dem Grenzwert für Süßwasserorganismen (für weiche Wässer) blieb, überschritten 78% der Proben den entsprechenden Wert für Kupfer von 6.5 µg/l. Da jedoch ein Großteil des gelösten Kupfers organisch komplexiert vorlag, konnte insgesamt von einer geringeren Toxizität ausgegangen werden. Es sei jedoch daran erinnert, dass sich das Komplexbildungsvermögen organischer Substanzen auch mit der Bodenart verändert (Amrhein, 1992).

Andere Untersuchungen kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Danach vermag Ca-/Mg-Acetat (CMA) nicht mehr Metalle als NaCl einschließlich Eisen, Aluminium, Natrium und Kalium aus Straßenrandböden durch Ionenaustausch (Ca^{++} , Mg^{++}) zu extrahieren. Auch konnten keine negativen Auswirkungen auf Bodenstruktur und Kompaktheit festgestellt werden, sondern vielmehr eine

Verbesserung von Durchlässigkeit und Produktivität der untersuchten Böden (Henry 1991; Horner und Brenner 1992).

Auch in einer neueren schwedischen Studie wurden erhöhte Schwermetalle (Cd, Pb, Zn) im Boden etwa einen halben Meter vom Fahrbahnrand entfernt sowie in einem Infiltrationsteich gemessen. Die Gehalte überschritten den Richtwert für landwirtschaftlich genutzte Böden im Grundwasserschutzbereich. Erhöhte Gehalte von Cadmium, Zink, Blei, Kupfer und PAKs in Infiltrationsbecken mit zunehmender Tiefe legten dabei einen abwärtsgerichteten Transport dieser Schadstoffe nahe. Der Anteil an austauschbarem Natrium in diesen Böden war ausreichend (21-27%), um eine Dispergierung von Bodenkolloiden zu bewirken. In diesem Zusammenhang muss auch mit einer Auslaugung der in die Fahrbahnrandböden eingebrachten Schwermetalle durch Natrium gerechnet werden. Eine Regressionsanalyse der gewonnenen Bodendaten ergab, dass die gemessenen Na^+ -Konzentrationen ausreichen, um selbst Ca^{++} von seinen Bodenaustauscherplätzen zu verdrängen. Die daraus resultierenden Grundwasserwerte lagen gleichfalls über den natürlichen Hintergrundwerten. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine Dispergierung von Bodenkolloiden nicht nur die hydraulischen Bodeneigenschaften verändert, sondern auch eine Mobilisierung toxischer Schwermetalle bewirken kann (Norrström und Jacks 1998).

5.3.7 Entsorgung

Die Frage der Entsorgung von Streustoffen stellt sich nur für mechanisch wirkende Produkte, da Tausalze aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit in der Regel rasch ausgewaschen bzw. (bei organischen Auftausalzen) abgebaut werden. Die Entfernung abstumpfender Streumittel von den angrenzenden Böden nach Winterende gilt jedoch als nicht praktikabel, so dass die zu entsorgenden Mengen auf Straßen und Gehwegen anfallen.

5.3.7.1 Biologische Abbaubarkeit

Die biologische Abbaubarkeit von Auftausalzen ist nur für organische Verbindungen relevant. In der Chemikalienbewertung wird die biologische Abbaubarkeit anhand definierter Testbedingungen bestimmt, wobei entsprechend der

Inokulumkonzentration Versuche zur „leichten biologischen Abbaubarkeit“ (OECD 301 Tests), Versuche zur potentiellen Abbaubarkeit (OECD 302 Tests) und Simulationstests (z.B. Laborkläranlage nach OECD 303 A) unterschieden werden. Als leicht biologisch abbaubar gelten Verbindungen, die innerhalb von 28 Tagen zu 60% mineralisiert werden (Kriterium Sauerstoffzehrung oder Kohlendioxid) oder deren gelöster organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon, DOC) zu 70% abgebaut wird. Diese Schwellenwerte müssen innerhalb eines Zeitraums von 10 Tagen nach dem Ende der Adaptationsphase (lag-Phase, entspricht dem Zeitraum der für einen Abbau von 10% benötigt wird) erreicht werden (=10 Tages-Fenster). Die Rechercheergebnisse zur biologischen Abbaubarkeit sind in Tabelle 12 wiedergegeben. Demnach können alle Verbindungen als leicht biologisch abbaubar eingestuft werden. Allerdings liegt die Temperatur in der routinemäßigen Versuchsdurchführung bei 22-25°C während die Auftausalze bei Frost eingesetzt werden. Im Versuch (nach OECD 301D und 301E) erweist sich Kaliumformiat in seiner handelsüblichen Form als biologisch gut abbaubar, d. h. nach 10 Tagen sind mehr als 80% abgebaut. Inwieweit dies die Ökotoxizität günstig beeinflusst kann derzeit nicht abgeschätzt werden.

Vergleichende Versuche zur biologischen Abbaubarkeit von Auftausalzen bei unterschiedlichen Temperaturen belegen, dass die für einen vollständigen Abbau benötigte Zeit bereits bei 8°C deutlich verlängert ist. Die Harnstoffspaltung durch Urease in Ammoniak und Kohlendioxid und die nachfolgende Oxidation des Ammoniums zu Nitrat ist unterhalb von 8°C vernachlässigbar (IUCLID-Recherche). Selbst bei einem raschen biologischen Abbau von Polyglykolen, Acetaten oder Formiaten in der Bodenzone oder im Grundwasser sind bei höheren Konzentrationen Beeinträchtigungen durch den dadurch bedingten erhöhten Sauerstoffbedarf nicht auszuschließen, der bis hin zu anoxischen Bedingungen führen kann. So konnte durch die Anwendung von Tausalz auch in eisbedeckten Flüssen ein Rückgang an gelöstem Sauerstoff während der Wintermonate beobachtet werden (Brenner und Horner, 1992). Der im Vergleich zu Polyglykolen geringere Sauerstoffbedarf von Kalium- und Natriumformiat ist der Hauptgrund für deren zunehmende Verwendung als Bewegungsflächenenteiser im Flughafenbereich. Wenn die bei der Enteisung anfallenden Abwässer hingegen gesammelt und einer kommunalen Kläranlage zugeleitet werden, sind keine Beeinträchtigungen zu erwarten. Im Gegenteil werden leicht abbaubare Kohlenstoffquellen für die Denitrifikation des Nitratstickstoffs

benötigt und in einigen Kläranlagen gezielt zudosiert. Versuche zur Abbaubarkeit von Kaliumformiat in Laborkläranlagen ergaben, dass die Verbindung in Konzentrationen von 360 bis 1150 mg/l gut abgebaut wird. Bei einer Stoßbelastung von rd. 1500 mg/l war Kaliumformiat hingegen im Ablauf nachweisbar (Metzner 1998).

Da Salze auch die Dichte des ablaufenden Wassers erhöhen (vgl. Kap. 5.3.5.3), wird eine ausreichende Sauerstoffversorgung im Hypolimnion noch zusätzlich erschwert. Z. B. reichen bereits 10 mg/l CMA aus, um den Gehalt an gelöstem Sauerstoff im Wasser signifikant zu senken (Brenner und Horner 1992). Laborexperimente zeigen, dass Routinekonzentrationen von 100 mg/l CMA eine vollständige Zehrung des gelösten Sauerstoffs bei 20 °C bereits innerhalb von 2 Tagen bewirken. Ein vollständiger Abbau findet bei 2 °C innerhalb von 4 Wochen, bei 10 °C innerhalb von 2 Wochen statt (Horner und Brenner 1992). CMA in granularer Form wird in deutlich höheren Einsatzmengen benötigt und hat so einen höheren BSB als in flüssiger Form. In Böden wird CMA hingegen rasch zu ungiftigen Calcium-/Magnesiumcarbonaten oxidiert (Trantolo, Gresser et al. 1990).

Aufgrund des raschen biologischen Abbaus von Glykol-Enteisungsmitteln, können damit verunreinigte Böden entlang von Bewegungsflächen auf Flughäfen durch Mischkulturen kältetoleranter Pflanzen saniert werden. In Versuchen konnte ein rascher Abbau von Enteisungsmitteln auf Propylenglykol-Basis mittels Belüftung, Kalkzugabe und Klärschlamm, von anfangs 7.016-28.064 mg/kg auf Restwerte zwischen 10-17 mg/kg demonstriert werden. Allerdings ließ sich auch zeigen, dass der biologische Abbau bei einer 40%-igen Propylenglykol-Lösung praktisch zum Erliegen kam (Rice und Anderson et al. 1997).

Mit Hilfe isolierter Bodenbakterien konnten Glykolkonzentrationen > 10% auf < 5% gesenkt werden. Hingegen gelten 1-5% Glykol als maximale Konzentration für die Einleitung von Abwasser in Kläranlagen, um noch einen ausreichenden mikrobiellen Abbau und tolerierbare O₂-Werte zu gewährleisten (Strong-Gunderson et al. ohne Jahr).

Tabelle 12: Biologische Abbaubarkeit von Auftaumitteln

Wirkstoffe	CAS	leichte biologische Abbaubarkeit					inhärente biologische Abbaubarkeit					
		Norm	Konzentration [mg/l]	Ergebnis	10 Tage Fenster	Randbedingungen	Quelle	Norm	Konzentration [mg/l]	Ergebnis	Randbedingungen	Quelle
Kaliumacetat	127-08-2	OECD 301 E	40 DOC	98% (4 d), 99% (6 d)	ja	Raumtemperatur, Inokulum 30 mg TSI/	Produkttestung Safeway KA, Fa. Clariant	DIN 38412-L25	1063 CSB	100% (1 d) 100% (2 d)	voradapt. Inok. 1 g TSI, 23°C	Produkttestung Safeway KA, Fa. Clariant
		OECD 301 E	35 DOC	95% (4 d), 95% (6 d)		8°C, Inokulum 30 mg TSI/	Produkttestung Safeway KA, Fa. Clariant	DIN 38412-L25	1138 CSB	49% (1 d) 100% (3 d)	voradapt. Inok. 1 g TSI, 8°C	Produkttestung Safeway KA, Fa. Clariant
Natriumacetat	127-09-3	DOC-Die Away test	10,2 DOC	99% (28 d)	ja	nicht adaptierter BS	IUCLID	OECD 302 B	160 Subst.	100% (5 d)	BS	IUCLID
		OECD 301 E	34 DOC	98% (4 d), 99% (6 d)	ja	Raumtemperatur, Inokulum 30 mg TSI/	Produkttestung Safeway SD, Fa. Clariant	OECD 303 A	10 DOC	97, 4% (Plateauphase)	BS	IUCLID
		OECD 301 E	40 DOC	95% (4 d), 96% (6 d)		8°C, Inokulum 30 mg TSI/	Produkttestung Safeway SD, Fa. Clariant	DIN 38412-L25	1000 CSB	100% (1 d) 100% (2 d)	voradapt. Inok. 1 g TSI, 23°C	Produkttestung Safeway SD, Fa. Clariant
Ameisensäure	64-18-6	OECD 301 E	20 DOC	2 % (2 d), 13% (7 d), 100% (9 d)	ja	Ablauf kommunale Kläranlage	IUCLID					
		OECD 301 E	20 DOC	12% (7 d), 93% (13 d)	ja							
Natrium-formiat	141-53-7	OECD 301 E	40 DOC	98% (4 d), 99% (6 d)	ja	Raumtemperatur, Inokulum 30 mg TSI/	Produkttestung Safeway KA, Fa. Clariant	DIN 38412-L25	1063 CSB	100% (1 d) 100% (2 d)	voradapt. Inok. 1 g TSI, 23°C	Produkttestung Safeway KA, Fa. Clariant
		OECD 301 E	35 DOC	95% (4 d), 95% (6 d)		8°C, Inokulum 30 mg TSI/	Produkttestung Safeway KA, Fa. Clariant	DIN 38412-L25	1138 CSB	49% (1 d) 100% (3 d)	voradapt. Inok. 1 g TSI, 8°C	Produkttestung Safeway KA, Fa. Clariant
Kalium-formiat	590-29-4	OECD 301 E		14% (1 d), 11% (4 d), 98% (8 d), 100% (13 d)	ja	Raumtemperatur, Inokulum 30 mg TSI/	Produkttestung Safeway KF, Fa. Clariant	DIN 38412-L25	1000 CSB	11% (1 d), 47% (4 d), 97% (8 d), 99% (13 d)	voradapt. Inok. 1 g TSI, 23°C	Produkttestung Safeway KF, Fa. Clariant
		OECD 301 E		0% (1 d), 44% (5 d), 100% (9 d), 100% (14 d)		8°C, Inokulum 30 mg TSI/	Produkttestung Safeway KF, Fa. Clariant	DIN 38412-L25	1000 CSB	0% (1 d), 8% (7 d), 41% (15 d), 100% (19 d)	voradapt. Inok. 1 g TSI, 8°C	Produkttestung Safeway KF, Fa. Clariant
Harnstoff	57-13-6	k.A.	1 - 15	geringer Abbau (14 d) vollständiger Abbau (6 d)		Flusswasser <=8°C	HSDB	OECD 302 B	400 DOC	3% (3 h), 51% (7 d), 60% 10 d, 96% (16 d)	voradapt. Inok. Laborkläranlage	IUCLID
		k.A.	1 - 15			Flusswasser 20°C	HSDB					

BS=Belebtschlamm; TS=Trockensubstanz; DOC=dissolved organic carbon; CSB=Chemischer Sauerstoffbedarf

5.3.7.2 Infrastrukturabfälle

Abstumpfende Streumittel können nach Gebrauch nur teilweise mit dem Straßenkehricht wieder eingesammelt und einer geordneten Entsorgung bzw. einer Wiederverwertung (Recycling) zugeführt werden. Ein Teil dieser Stoffe gelangt in die Sinkkästen der Straßenabflüsse und in Regenrückhaltebehälter (Trennkanalisation) oder in die Abwasserkanalisation und damit in kommunale Kläranlagen (Mischkanalisation). Aufgrund der Korngröße und des spezifischen Gewichts setzen sich abstumpfende Streumittel im Sandfang kommunaler Kläranlagen ab und werden anschließend entsorgt. Abfälle aus Sinkkästen und Sandfangrückstände sowie Straßenkehricht werden als Infrastrukturabfälle bezeichnet. Rückstände aus Sinkkästen bestehen aus Abrieb von Fahrbahnoberfläche und Straßenfahrzeugen, Streusplitt, Laub, Sand und Bodenmaterial. Im Mittel fallen pro Einwohner und Jahr rd. 2,1 kg an Rückständen aus Sinkkästen an. Hochgerechnet auf ganz Deutschland ergibt das einen jährlichen Anfall von 170.000 t. Diese Rückstände sind mit Schwermetallen (insbesondere Kupfer und Zink,), Kohlenwasserstoffen, Phenolen und organischem Material kontaminiert. Aufgrund hoher Organik-Gehalte ist eine Deponierung der Sinkkastenrückstände gemäß der „Technischen Anleitung Siedlungsabfälle“ (TASI) ab 2005 nicht mehr zulässig. Ihre Aufbereitung sowie eine Weiterverwendung der Sandfraktion (LAGA Einbauklasse ZO) durch nasse Verfahren ist grundsätzlich möglich (Gallenkemper, Hegemann et al. 1999). Die durchschnittliche aus dem Sandfang zu entsorgende Menge wird mit rd. 3,3 kg pro Einwohner und Jahr angegeben. Dem entsprechen in Deutschland rd. 200.000 t Trockenmasse. Da Sandfangrückstände üblicherweise einen Wassergehalt von 30-70% aufweisen, müssen zwischen 400.000 bis 500.000 t jährlich entsorgt werden. Sandfanggut aus kommunalen Kläranlagen wird bisher zu 97% deponiert. Wie auch bei den Sinkkastenrückständen wird dies ab dem Jahr 2005 nicht mehr zulässig sein, da hierfür geltende Grenzwerte (Glühverlust < 5%, TOC<3%) auch von Sandfangrückständen weit überschritten werden (Stein, Günthert et al. 1998). Auch in diesem Bereich wird mit Hochdruck an Aufbereitungsanlagen gearbeitet (Klinger und Barth 1994). Derzeit ist mit Entsorgungskosten von rd. 100 EUR/t zu rechnen (Moritz 2000).

5.3.7.3 Recycling

Straßenkehrsicht besteht neben Streumitteln des Winterdienstes, Müll, Laub und Bodenbestandteilen aus weiteren Komponenten wie Fahrbahn-, Reifen- und Bremsabrieb (rd. 5 Gew. %). Es liegen jedoch keine zuverlässigen Daten über den Anteil der Winterstreumittel am Straßenkehrsicht vor. Verschiedentlich wurde ein Recycling des Straßenkehrsichts und seine Wiederverwendung als abstumpfendes Streumittel für den Winterdienst angedacht bzw. durchgeführt (Zamhöfer und Schmidt 2001).

Verschiedene Schätzungen über den Anteil der abstumpfenden Streumittel, der nach der Winterperiode wieder aufgenommen wird, schwanken zwischen 10% und maximal 70% innerorts und zwischen 20% und 35% außerhalb geschlossener Ortschaften (Moritz 1999). Eine Umfrage für das Jahr 1990 ergab, dass 2/3 der wiederaufgenommenen Menge deponiert und 1/3 einer weiteren Verwendung (Wegebau, Aufbereitung) zugeführt wurden. Weder ein Mehrfachrecycling noch eine Einspeisung in andere Stoffkreisläufe sollte zu einer zusätzlichen Schadstoffanreicherung in der Umwelt führen. In der Regel ist eine direkte Wiederverwertung abstumpfender Streumittel im Winterdienst aufgrund der Schadstoffgehalte und des hohen Feinstaubanteils nicht möglich. Seit Ende der 80er Jahre sind jedoch Verfahren entwickelt worden, um die eingesammelten abstumpfenden Streumittel aufzubereiten und wiederzuverwerten. Hierbei werden Verfahren der Trocken- bzw. Heißreinigung und der Nassreinigung unterschieden.

Bei der Trockenreinigung von Splitt werden Fremdkörper und grobe Verunreinigungen mittels Schwingsieb abgetrennt, der so gereinigte Splitt auf eine wintergerechte Endfeuchte getrocknet und mittels Luftstromschichtung vom Feinstaub getrennt. Etwa 70 - 75% des so behandelten Splitts können auf diese Weise wiederverwendet werden, der Rest wird deponiert. Es wird jedoch berichtet, dass der wiederverwendete Splitt immer noch Staubemissionen verursacht (Moritz 1999).

Bei der Nassreinigung wird das Material grob vorgesiebt und dann gewaschen. Die überwiegend an die Feinpartikelfraktion gebundenen Schadstoffe werden mit diesen über das Waschwasser abgetrennt und absedimentiert. Das Waschwasser wird einer

Abwasserbehandlung zugeführt. Auch hier fallen ca. 25-30% zu deponierende Reststoffe an (Moritz 1999).

(Hanke 1993) schätzt, dass in Deutschland die Wiederaufbereitung von Splitt durch Heißreinigung inklusive Deponierung der Reststoffe für 1 Tonne Kehrgut bei 200-250 DM/t liegen (ohne die Kosten für das Einsammeln), im Vergleich zu reinen Deponiekosten von bis zu 400 DM/t (siehe auch Ruess 1998). Problematisch bleibt die Splittstreuung aber auch bezüglich der Entsorgung nach den Vorgaben des Krw-/AbfG, da es sich hierbei definitionsgemäß um eine Abfallproduktion (verunreinigter Altsplitt) handelt (Ruess 1998).

In Wien wird seit 1997 eine Streusplittrecyclinganlage (Nassreinigung) mit einer Kapazität von 70 t/h betrieben, mit der die jährlich anfallenden 45.000 bis 60.000 t Streumittel (Maximum 133.500 t) einer Wiederverwertung zugeführt werden sollen. Das anfallende Waschwasser wird weitgehend im Kreislauf geführt, der Frischwasserbedarf wird mit 50 m³/h angegeben (Anonym 2000). In Zürich wird ca. 50% des wiedereingesammelten Splitts in einer Recyclinganlage zurückgewonnen (Ruess 1998).

In Berlin fielen im Jahr 2000 insgesamt 82.000 t Straßenkehricht an, das entsprach ca. 4,5% des gesamten Siedlungsabfallaufkommens. Der mit Maschinen eingesammelte Teil bestand durchschnittlich aus 80% mineralischen Stoffen und 20% Störstoffen (wie Laub, Zweige, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Feinkorn, etc.). Beim Handreinigerkehricht ist das Verhältnis mineralische Stoffe zu Störstoffe etwa 50:50. Etwa 80.000 t wurden durch eine nass-physikalische Behandlung einer weiteren Verwertung zugeführt (siehe oeffentlichkeit@senstadt.verwalt-berlin.de).

In Hamburg und Düsseldorf müssen jährlich etwa 20.000 t bzw. 18.000 t Straßenkehricht entsorgt werden. In Kiel, wo etwa 5000 t/a anfallen, wurde eine Studie zu den Schwermetallgehalten in verschiedenen Korngrößenfraktionen des Straßenkehrichts durchgeführt. Es sollte geklärt werden, ob durch die Abtrennung der feinkörnigen Fraktion < 0,5 mm, die immerhin rd. 40-50% der Gesamtmenge ausmacht, die Schwermetallgehalte in den übrigen Fraktionen akzeptabel bleiben und diese als Streumittel im Winterdienst eingesetzt werden können. Die mit der Studie beauftragte Arbeitsgruppe stellte jedoch fest, dass eine Akkumulation von Schwermetallen bei der mehrfachen Wiederverwertung von Streumitteln

wahrscheinlich ist, wenn das Recyclingverfahren alleine auf der Abtrennung der Feinfraktion beruht (Zamhöfer and Schmidt 2001).

5.3.8 Wirtschaftliche und Sekundärschäden

Tausalz trägt ganz wesentlich zu einer verstärkten Korrosion an Brücken und Gebäuden (Betonbauteilen, Stahlträgern), von Fahrzeugen, Verkehrsschildern und Erdkabeln bei. Während $MgCl_2$ nur langsam Beton angreift, wirken $NaCl$ und $CaCl_2$ sehr rasch betonaggressiv (American Concrete Institute 1992). Man schätzt, dass allein etwa 50% der Kraftfahrzeug-Korrosion auf die Anwendung von Streusalz zurückzuführen ist. Für Deutschland wird geschätzt, dass salzbedingte Korrosionsschäden an Fahrzeugen pro Jahr ca. 175 DM/Kfz erreichen (Schweiz: insgesamt 300 Mio. Franken/Jahr). Alleine in den USA werden die durch Salzstreuung hervorgerufenen jährlichen Kosten an Infrastruktureinrichtungen auf 425 bis 925 Mio. US\$ geschätzt (Ruess 1998). Neuere Untersuchungen zeigen indes, dass die Salzkorrosion bei modernen Kraftfahrzeugen aufgrund eines verbesserten Korrosionsschutzes praktisch keine Rolle mehr spielt (Kurzmann 1993, zit. nach Ruess 1998).

Auch abstumpfende Mittel können durch Lackschäden die Korrosion von Fahrzeugen verstärken und durch zunehmenden Abrieb die Laufleistung von Winterreifen verringern (Assmann 1999), wobei von Seiten der Industrie darauf hingewiesen wird, dass die Korngröße und die Art der Kornoberfläche (Breckorn, Rundkorn) hierbei einen wesentlichen Einfluß haben (Knirsch, 2002). Ebenso wird von einem vorzeitigen Verschleiss der Fahrbahnmarkierung durch abstumpfende Streustoffe berichtet. Umweltwirkungen durch abstumpfende Streumittel könnten sich aber auch indirekt aus Ablagerungen möglicherweise schadstoffbelasteten Streuguts auf den angrenzenden Fahrbahnbereich (auf Banketten, Rinnen, Gräben, Böschungen innerhalb eines Abstandes von maximal 10-15 m) ergeben, oder durch daraus sich ergebende Mindererträge (Moritz 1999). Allerdings liegen keine aussagekräftigen Studien hierzu vor. Desweiteren kann die Aquaplaninggefahr infolge aufgehörter und nicht frühzeitig wieder abgetragener Bankette steigen. Abstumpfende Streumittel können letztlich auch direkte mechanische Schäden an Straßenbegleitgrün oder Mähgeräten verursachen. Zudem kann es zu Verstopfungen von Entwässerungsanlagen, Kanalisation und Kläranlagen kommen. Schäden an

Brückenbauten oder Fahrbahndecken (Beton, Asphalt) durch abstumpfende Stoffe sind indes kaum bekannt.

Der Einsatz von Streustoffen verursacht auch sog. sekundäre Kosten, beispielsweise durch zusätzlichen Treibstoffverbrauch aufgrund einer Verzögerung des Verkehrsflusses während Reparaturarbeiten an beschädigten Straßen und Brücken, durch den damit verbundenen zusätzlichen Materialtransport, oder durch den vermehrten Einsatz von Wasch- und Reinigungslösungen. Ein geringerer bzw. schonungsvollerer Taumiteileinsatz hätte u. a. weniger Autowäschen, und damit auch einen geringeren Verbrauch von Reinigungsmitteln, sowie weniger Rost und damit zusammenhängend weniger Reparaturkosten zur Folge. (Faith-Ell 2000). Allein im US-Bundesstaat New-York entstehen jährlich Sekundärkosten durch Streustoffe in Höhe von etwa 500 Millionen US\$ (Trantolo, Gresser et al. 1990). Abstumpfende Mittel sollten bei offenporigen Fahrbahnbelägen (Drän- oder Flüsterasphalt) nicht eingesetzt werden, da dies zu einer Verstopfung der Poren und damit zu einer Verschlechterung der Fahrbahnbeschaffenheit führen könnte (Moritz 1999).

Ein volkswirtschaftlicher Kostenvergleich muss Schäden an Brücken und Betontragwerken, Schäden durch Korrosion von Kraftfahrzeugen sowie durch mögliche gesundheitliche Beeinträchtigungen von Mensch und Tier mitberücksichtigen. Nach einem in den USA von Benner & Moshman 1976 entwickelten Modell zur volkswirtschaftlichen Bewertung unterschiedlicher Winterdienststrategien kann in Deutschland mit folgenden jährlichen Streusalzschäden gerechnet werden: 650 DM pro Bauwerk, 175 DM pro Kraftfahrzeug, und 133 Millionen DM an Stadtbäumen (Stellungnahme der Stadt Ludwigshafen zum Einsatz organischer Taustoffe vom 06.12.2000).

Ein Kosten/Nutzen-Vergleich muss den zur Aufrechterhaltung des Winterdienstes erforderlichen Betriebskosten (Personal, Fahrzeuge, Administration sowie indirekte Kosten) den volkswirtschaftlichen Nutzen (z. B. geringerer Energieverbrauch, kürzere Reisezeiten, weniger glättebedingte Unfälle etc.) gegenüberstellen. So schätzt man, dass die Unfallkosten auf winterglatten Fahrbahnen ca. 6 mal so hoch liegen wie auf nicht-winterlichen, und dass sie nach erfolgter Salzstreuung wieder auf ein normales Niveau zurückgehen. Bei Straßennutzerkosten auf salzgestreuten Fahrbahnen von ca. 0,36 DM (weniger als auf winterglatter Fahrbahn) und geschätzten Winterdienst-

Betriebskosten von 50 DM/km übersteigt nach 140 Fahrzeugüberfahrten der Nutzen einer Salzstreuung bereits die betriebsbedingten Kosten. Der volkswirtschaftliche Nutzen des Winterdienstes aufgrund verminderter Unfallkosten wird für das Netz der Bundes-, Landes- und Kreisstraßen auf 340 Mio. DM pro Winter beziffert (Durth 1995). Über 80% der Einsparungen ergeben sich durch vermiedene Unfälle (Ruess 1998). Eine vergleichbare Bewertung des Winterdienstes auf Autobahnen ist deshalb schwer zu führen, da die volkswirtschaftlichen Kosten unter normalen Verkehrs- und Witterungsverhältnissen durch den Winterdienst gar nicht erst in Erscheinung treten (Durth 1995). Innerorts ist eine Bewertung aufgrund des zu geringen Datenumfangs z. Zt. noch nicht möglich und damit dessen volkswirtschaftlicher Nutzen nach Bark et al. (1994) innerorts auch noch nicht nachgewiesen. Ruess (1998) stellte ein Rechenbeispiel für die volkswirtschaftlichen Schäden durch Produktionsausfälle infolge von Verkehrsbehinderungen durch Schnee vor. Demnach entstünden unter der Annahme, dass die Pendler aufgrund schlecht geräumter Straßen einen halben Tag lang nicht am Arbeitsplatz erscheinen, für die Stadt Zürich ein volkswirtschaftlicher Schaden von über 50 Mio. Franken. Pichler (1997) erstellte für den kommunalen Bereich eine Kosten/Nutzenrechnung als Funktion des "durchschnittlich täglichen Verkehrs" und kam zu der Schlussfolgerung, dass unterhalb einer Straßennutzung von 500 bis 1000 Fahrzeugen pro Tag abstumpfende Streumittel gegenüber Streusalz günstiger zu bewerten sind (zit. nach Ruess 1998 und Moritz 2000).

5.3.9 Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Der Mindestbedarf an Chlorid liegt für Erwachsene bei etwa 770 mg/Tag, die tatsächliche Aufnahme wird in Deutschland auf 10-15 g/Tag geschätzt. Eine erhöhte Salzaufnahme würde auf Dauer Bluthochdruck begünstigen, einer der Risikofaktoren für Herzinfarkt und Schlaganfall. Jedoch beträgt der durchschnittliche Anteil des Trinkwassers an der Salzaufnahme des Menschen nur 1% (Kölle 2001). In welchem Ausmaß der Einsatz von chloridhaltigem Tausalz die Aufnahme von Chlorid über den Pfad Grundwasser-Trinkwasser-Mensch begünstigt, lässt sich aus der eingesehenen Literatur nicht quantifizieren.

Nach dem Abtrocknen der winternassen Straßen kann es zu Aufwirbelungen von Feinstaub in Aerosolgröße kommen und damit zu einer Beeinträchtigung der

Luftqualität in unmittelbarer Straßenumgebung. Auch lungengängige Partikel aus dem vermehrten Straßenabrieb können insbesondere für Asthmatiker problematisch sein. In einer Berliner Studie (1987 und 1991) konnte gezeigt werden, dass durch silikogene Bestandteile des durch den Kfz-Verkehr aufgewirbelten Feinstaubes nach Streuung von Quarzkiessplitt zwar weniger eine Gefährdung für Verkehrsteilnehmer und Passanten bestand, das Straßenkehrpersonal jedoch direkt betroffen war. Indessen wird davon ausgegangen, dass die Schwermetallanteile im Feinstaub keine Gesundheitsgefährdung für die Bevölkerung darstellen (Moritz 1999). In der TRGS 900 "Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz" wurde ein allgemeiner Staubgrenzwert für die alveolengängige Fraktion von 6 mg/m^3 für Arbeiten in der Bau-, Steine- und Erdenindustrie sowie für Abbrucharbeiten, Baustoffrecyclinganlagen und ähnliche Bereiche festgelegt. Für das als silikoseerzeugende Quarz wird ein Luftgrenzwert von $0,15 \text{ mg/m}^3$ (alveolengängige Fraktion) angegeben (TRGS 900, Ausgabe Oktober 2000). In diesem Zusammenhang nicht unerwähnt sei das vermehrte Auftreten von Wildunfällen durch Wildtiere, die verstreutes Tausalz auf der Straße nutzen (Brod 1993).

5.4 Ergebnisse der orientierenden Ökobilanz

5.4.1 Sachbilanz

Die Ergebnisse der durchgeführten orientierenden Sachbilanz sind in Tabelle 12 zusammengefasst; dabei wurden aus den Berechnungsprotokollen der verwendeten Software bewusst nur diejenigen Größen dargestellt und zusammengefasst, bei denen die Datensymmetrie unter den einbezogenen Streumitteln näherungsweise gegeben ist. Im Kern beinhaltet damit die Sachbilanz im wesentlichen die energiebedingten Ressourcenverbräuche und Emissionen für die Herstellung der Streumittel sowie den jeweiligen Transport zur Ausbringung (einschließlich Bereitstellung des Kraftstoffs).

Die Angaben beziehen sich dabei grundsätzlich auf die definierte funktionelle Einheit, d.h. 4 km^2 bei einmaliger Anwendung der jeweiligen Streumittel.

Tabelle 13: Ergebnisse der Sachbilanz bezogen auf 1000 km Straße (4 km²)

	Einheit	Natrium- chlorid	Natrium- formiat	Harnstoff	Kalkstein	Granit	Flächen- heizung
Input							
<i>Rohstoffe</i>							
Summe KEA	GJ	275	1.959	1.618	867	879	426
KEA (Kernenergie)	GJ	13	282	23	0	0	0
KEA (Wasserkraft)	GJ	3	24	3	0	0	0
KEA, fossil gesamt	GJ	258	1.653	1.592	867	878	213
KEA, sonstige	GJ	1	0	0	0	0	213
Gestein in Lagerstätte	t	1	0	0	480	480	0
Natriumchlorid	t	64	21	0	0	0	0
Wasser	t	276	215	k.A.	182	k.A.	0
Output							
<i>Atmosph. Emissionen</i>							
Kohlendioxid	t	18	77	76	65	66	21
Kohlenmonoxid	kg	23	83	135	139	147	5
Nox	kg	164	534	199	596	623	30
Schwefeldioxid	kg	73	482	165	58	58	16
Methan	kg	2	427	163	18	20	41
NMVOC	kg	10	290	19	77	77	1
<i>Wasseremissionen</i>							
BSB-5	g	60	312	k.A.	k.A.	8	1
CSB	g	240	780	k.A.	k.A.	257	9
<i>Abfälle</i>							
Abfälle, hausmüllähnlich	kg	12	522	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Abraum	kg	1.260	3.786	k.A.	k.A.	50.880	99.030
Sonderabfall	kg	k.A.	312	k.A.	0	k.A.	0
Abfälle, un spez.	kg	720	k.A.	k.A.	k.A.	27	k.A.

5.4.2 Wirkungsabschätzung

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zusammengefasst.

Tabelle 14: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung bezogen auf 1000 km Straße

	Einheit	Natrium- chlorid	Natrium- formiat	Harnstoff	Kalkstein	Granit	Flächen- heizung
Umweltproblemfeld, Indikator							
Knappheit energetischer Ressourcen, KEA	GJ	275	1.959	1.618	867	879	426
Treibhauseffekt, Erderwärmung, CO ₂ -Äquivalente	kg	18.561	82.219	78.997	66.463	67.698	21.319
Versauerung Böden und Gewässer, SO ₂ -Äquivalente	kg	188,4	862,0	494,7	475,5	494,9	38,0
Bodennahe Ozonbildung, POCP	kg	49,7	124,1	9,5	35,7	35,8	0,6
Terrestrische Eutrophierung, NPt	kg	21,4	69,4	58,9	77,6	81,0	3,9

Ergänzend dazu sind in Abbildungen 4 und 5 der Verbrauch energetischer Ressourcen als KEA sowie die Klimarelevanten Gase als CO₂-Äquivalente dargestellt.

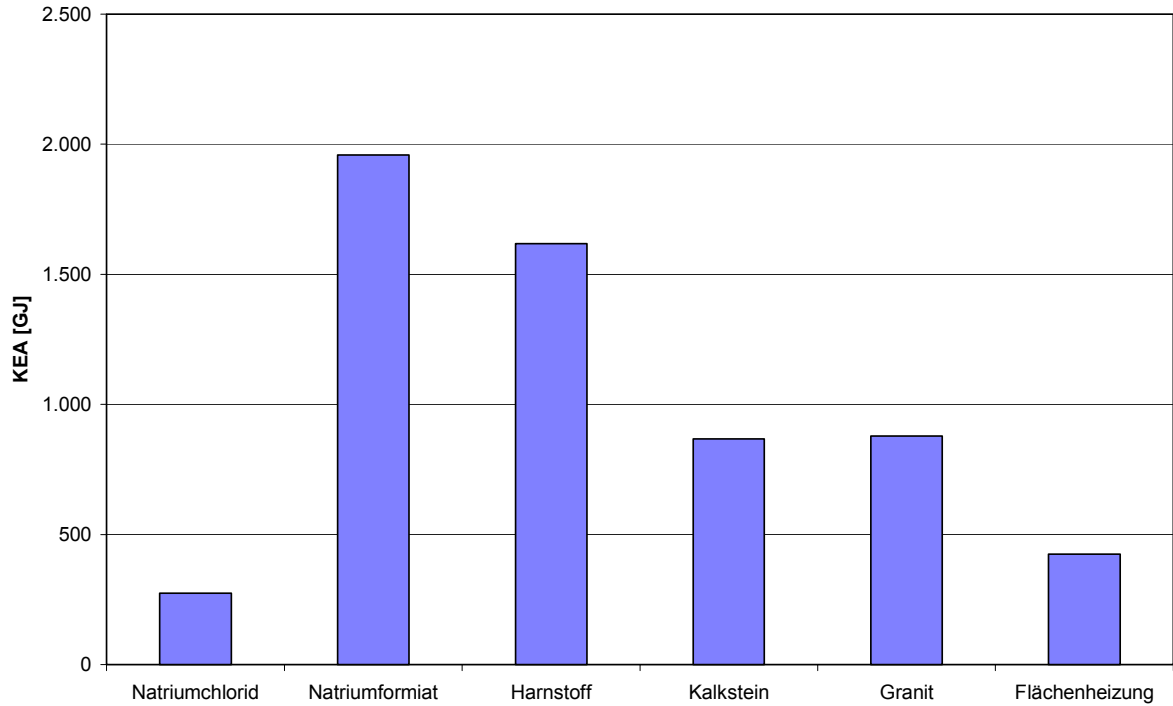


Abbildung 4: Vergleich der ausgewählten Streumittel und der Flächenheizung hinsichtlich ihres Energieverbrauchs (KEA)

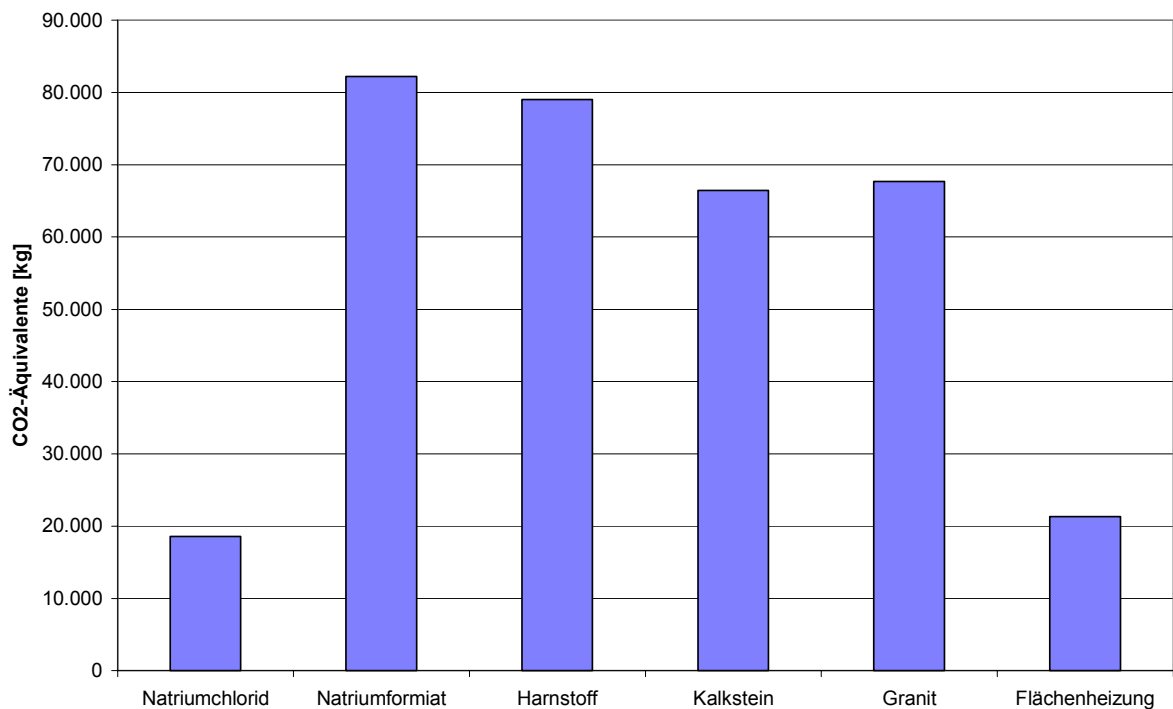


Abbildung 5: Vergleich der ausgewählten Streumittel und der Flächenheizung hinsichtlich ihres Emissionspotentials an klimarelevanten Gasen (CO₂-Äquivalente)

Aus den Abbildungen 4 und 5 lassen sich folgende Zusammenhänge erkennen:

- Natriumchlorid sowie die Flächenheizung liegen in gleicher Größenordnung am unteren Feld der einbezogenen Varianten
- Mit deutlichem Abstand folgen die beiden Granulatvarianten Kalkstein und Splitt.
- An der Spitze liegen bei beiden Indikatoren Natriumformiat und Harnstoff

Eine differenziertere Betrachtung (vgl. Abbildung 6) macht deutlich, dass bei Natriumchlorid, Natriumformiat sowie Harnstoff jeweils die Herstellung des Enteisungsmittels für den Verbrauch an energetischen Ressourcen bestimmend ist. Bei Kalkstein und Granulat ist demgegenüber die Ausbringung ausschlaggebend. Dies kommt auch durch die geringere Einsatzmenge pro Fläche für Taustoffe (15 g/m²) gegenüber abstumpfenden Streumitteln (120 g/m²) zum Ausdruck.

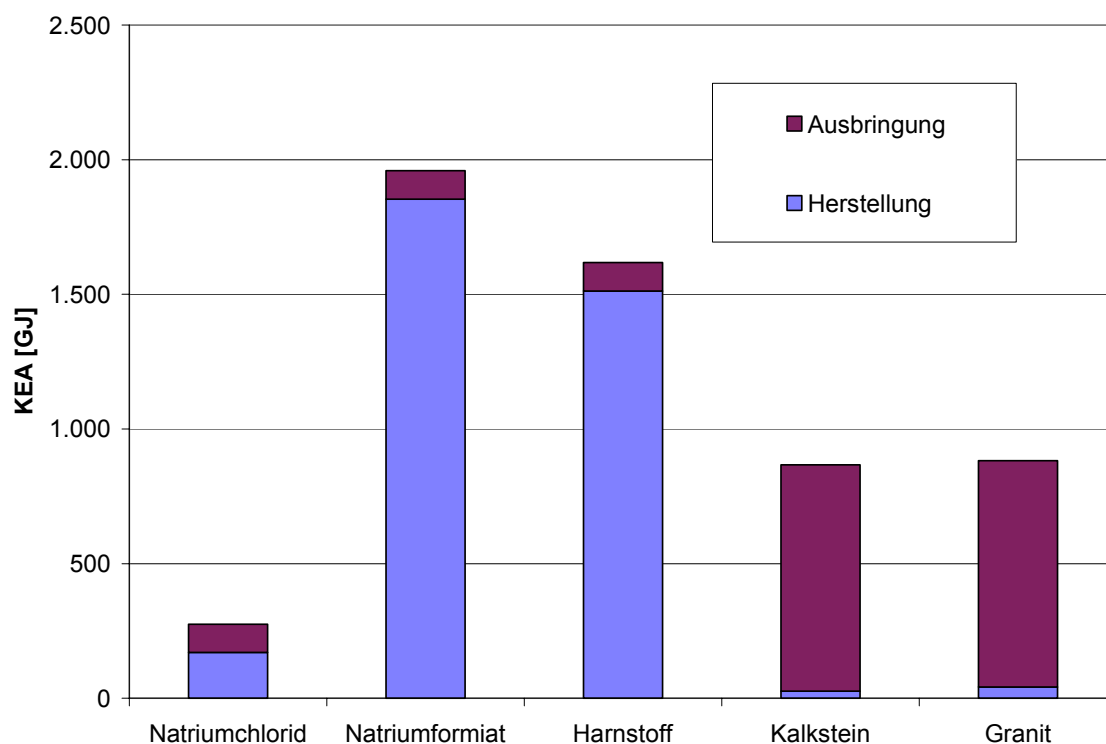


Abbildung 6: Anteil von Herstellung und Ausbringung am Gesamtverbrauch energetischer Ressourcen (KEA)

5.4.3 Vergleichsuntersuchung

Vergleichszahlen zu den ökobilanziellen Betrachtungen liegen bisher nur aus der Studie von Ruess (1998) vor. Als Grundlage dienten Erhebungen in Zürich an Teststraßen mit Salz- und Splittstreuung. Anders als in der orientierenden Ökobilanz der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurde von Ruess auch der Transport zum Lager und die Entsorgung des Splitts mit berücksichtigt. Hierbei wurden drei Szenarien betrachtet:

- Deponierung in einer 20 km entfernten Deponie (nur Übergangslösung, da künftig nicht mehr zulässig)
- Aufbereitung zu Kies und Sand in einer Bodenwaschanlage (Weiterverwertung von 900 kg Kies/Sand aus 1 t Splitt)
- Mobile Reinigungsanlage (Trockenverfahren, rd. 2/3 des Splitts wird für Streuzwecke wiedergewonnen)

Hierbei wurden die einzelnen Werte der Sachbilanz (Primärenergiebedarf, Wasserverbrauch, Luft-/Wasseremissionen, Abfälle) anhand zweier Bewertungsmethoden (Umweltbelastungspunkte, Eco-indicator 95) gewichtet.

Das Streusalz für Zürich wird in der Saline Rheinfelden gewonnen. Hierbei wird das in einigen hundert Metern Tiefe gelagerte Steinsalz als Sole an die Oberfläche gepresst. Dort wird die Sole enthärtet und gereinigt, wonach das Wasser mit Thermokompressoren unter Verwendung elektrischer Energie verdampft wird. Der Transport nach Zürich erfolgt zu 80% über die Bahn und zu 20% über LKW. Die Streumenge im Beobachtungszeitraum betrug 1.360 kg/km. Die effektiv gefahrene Distanz, um einen Kilometer Straße abzustreuen, wurde mit 1,1 km/km Straßenlänge angenommen.

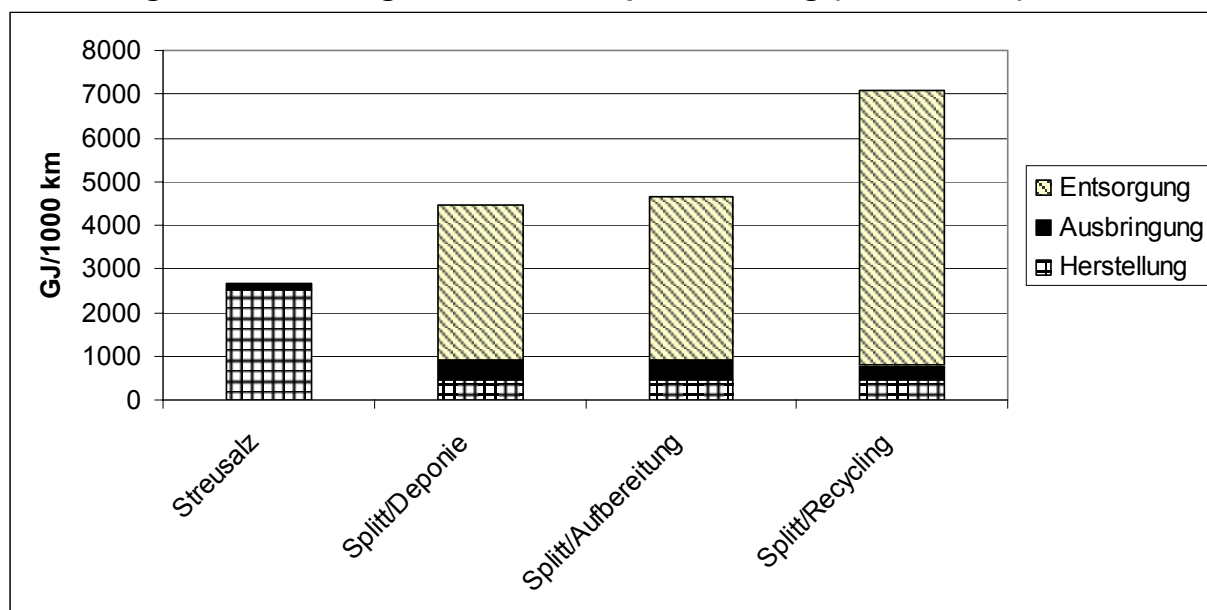
Der Splitt wird 30 km von Zürich entfernt in Glattfelden abgebaut. Aus der Wandkiesfraktion werden Brechsand (0-3 mm) und der im Straßendienst eingesetzte Splitt (3-6 mm) gebrochen. Der Transport nach Zürich wird mittels LKW durchgeführt. Die Streumenge im Beobachtungszeitraum betrug 9.500 kg/km. Als Folge der höheren Einsatzmengen waren mehr Leerfahrten zu den Depots erforderlich, so dass eine effektiv gefahrene Distanz von 1,4 km/km Straßenlänge angenommen wurde. Die Einsammlung des Splitts erfolgte im Frühjahr, schätzungsweise 50% der ausgebrachten Menge wird erfasst. Weitere 30% des Splitts wird über die

gewöhnliche Straßenreinigung zusammen mit gemischten Abfällen eingesammelt und einer Müllverbrennungsanlage zugeführt. Etwa 10% des Splitts gelangt in die Straßenentwässerung, setzt sich im Schlammsammler ab und wird nach Entwässerung derzeit noch deponiert. Hinsichtlich der Transportvorgänge und Entsorgung unterscheiden sich die beiden hier vorgestellten orientierenden Ökobilanzen in folgenden Punkten:

Tabelle 15: Grundannahmen der Transportvorgänge (Vergleich)

	Orientierende Ökobilanz (diese Studie)	Vereinfachte Ökobilanz Ruess (1998)
Systemgrenzen	Transport Lager nicht berücksichtigt (örtliche Gegebenheiten) Ausbringung	Transport Lager (am Bsp. Zürich) Ausbringung Entsorgung
Zeiteinheit	Einmalstreuung	Eine Winterperiode
Funktionelle Einheit	1000 km * 4 m = 4 km ² Salze: 15 g/m ² bzw. 60 t Granulate: 120 g/m ² bzw. 480 t	1 km * 7 m = 7000 m ² Streusalz 1,6 t (229 g/m ²) Splitt 6,33 t (904 g/m ²)
Nutzlast LKW	15,3 t	16 t
Fahrsituation Ausbringung	Landstraße	Innerstädtisch
Auslastungsgrad durch Ladung	Ausbringung: 50%	Transport zum Lager: 50% Ausbringung: 50%?
Faktor Leerfahrten	Nicht berücksichtigt (ideale Rundtour)	Salz: 1,1 Splitt: 1,4

Das Ergebnis der vereinfachten Ökobilanz ergab sowohl nach der Bewertungsmethode „Umweltbelastungspunkte“ als auch nach dem Modell „Eco-indicator 95“ deutlich höhere Umweltbelastungen für die Varianten mit Splitt, wenn die Entsorgung mit berücksichtigt wird. Um die Ergebnisse mit vorliegender orientierenden Ökobilanz vergleichen zu können, ist in Abb. 7 der Primärenergiebedarf für das Abstreuen von je 1000 km Straße dargestellt (umgerechnet nach Angaben aus Russ 1998, der nicht getrennt ausgewiesene Energieaufwand für das Streuen und Einsammeln von Splitt wurde zu 2/3 der Ausbringung und zu 1/3 der Einsammlung zugeordnet).

Abbildung 7: Primärenergiebedarf Salz/Splittstreuung (Ruess 1998)

Ein direkter Vergleich der Studie von Ruess mit der orientierenden Ökobilanz vorliegender Machbarkeitsstudie ist aufgrund der unterschiedlichen Bezugsgrenzen (Streumenge pro Winterperiode gegenüber Einmalstreuung) sowie der unterschiedlichen Grundannahmen bei der Ausbringung (Berücksichtigungen von Leerfahrten und abnehmender Ladung während des Einsatzes) nicht möglich. Dennoch ist auffallend, dass bei der Ruess-Studie ohne Berücksichtigung des Energieaufwandes für die Entsorgung die Variante Splitt günstiger erscheint als die Variante Streusalz. Der Grund hierfür liegt in den günstigeren Annahmen hinsichtlich der Transportwege und der Fahrzeugauslastung. Allerdings verschiebt sich dieses Verhältnis unter Berücksichtigung der Entsorgung deutlich zugunsten des Streusalzes.

5.4.4 Schlussfolgerungen

Insgesamt zeigt die durchgeführte orientierende Ökobilanz, dass zwischen den Varianten vergleichsweise große Unterschiede bestehen. Im Sinne einer fundierten Vergabegründung und Kriterienfestlegung sollten die Streumittel mit Hilfe einer vollständigen, normkonformen Ökobilanz eingehender untersucht werden. Angesichts des vorläufigen Charakters der hier durchgeführten groben, orientierenden Ökobilanz können noch keine eindeutigen Festlegungen zugunsten bestimmter Mittel getroffen werden, wenngleich aus den Ergebnissen gewisse Tendenzen erkennbar sind. Was eine Gegenüberstellung von Salz und Splitt im

Verhältnis ökobilanzrelevanter Belastungen (wie Emissionen und Energieverbrauch) angeht, lässt sich jedoch klar erkennen, dass die Salzstreuung tendenziell deutlich günstiger abschneidet. Im Hinblick auf die Freiflächenheizung, die in den Ergebnissen (überraschend) günstig liegt, muss festgestellt werden, dass die zugrundeliegenden Daten recht unsicher sind und noch einer Validierung bedürfen. Zudem konnten der ökobilanzielle Aufwand und die Herstellungskosten der Freiflächenheizung nicht berücksichtigt werden.

Der Vergleich der orientierenden Ökobilanz der vorliegenden Machbarkeitsstudie mit der vereinfachten Ökobilanz von Ruess (1998) zeigt, dass die lokalen Verhältnisse sowie die jeweiligen Herstellungs-, Ausbringungs- und Entsorgungswege berücksichtigt werden müssen. Dies erschwert eine allgemeine Aussage hinsichtlich einer Streustoffauswahl und bekräftigt die Forderung nach einer normkonformen Ökobilanz unter Einbeziehung einer kritischen Prüfung.

In einer vollständigen Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff sollten zudem einige der hier getroffenen Grundannahmen hinsichtlich der Einsatzmengen, Nutzlast des LKW und Entsorgung präzisiert und der Einfluß dieser Input-Größen auf das Gesamtergebnis anhand von Sensitivitätsanalysen bestimmt werden.

5.5 Bewertung der Ergebnisse

Eine Bewertung der Umweltwirkungen von Streustoffen kann nicht losgelöst von einer Vielzahl anderer Faktoren erfolgen, die gleichermaßen Luft, Wasser, Boden, Mensch, Pflanzen und Tiere beeinträchtigen, wie z. B. Stoffe aus dem Kfz-Verkehr, oder anderweitige Maßnahmen zum Straßenunterhalt oder zur Verkehrssicherheit. Auch sollte für eine abschließende Bewertung die gesamte Lebensdauer der ausgewählten Streustoffe berücksichtigt werden. Dies lässt sich jedoch aus der vorhandenen Literatur insbesondere aufgrund der noch unsicheren Datenlage bezüglich Verbleib und Entsorgung abstumpfender Streustoffe zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht hinreichend realisieren.

Insgesamt scheint die Belastung von Böden, Grund- und Oberflächengewässer durch Tausalze im Vergleich zu den Schadensmeldungen aus den 60er und 70er Jahren eher abgenommen zu haben und zeitlich wie örtlich begrenzt zu sein. Dies insbesondere bei Einhaltung eines differenzierten Winterdienstes, wenn Tausalz bei

vorsichtiger Dosierung und in der heute üblichen Menge (z. B. als Feuchtsalz), nur auf gewissen Strecken und nur wenn Sand und Splitt ungeeignet sind, zum Einsatz kommt. Eine Ausbringungsmenge von bis zu 1 kg/m^2 pro Jahr gilt nach Ruge (1972) als unschädlich, wenn maximal 10% des ausgebrachten Auftausalzes in den Wurzelbereich der Bäume gelangt (zit. nach Ruess 1998). Bei einer mittleren Jahresniederschlagsmenge von etwa 700 Liter/m^2 errechnet sich hieraus eine Erhöhung der NaCl-Konzentration um 142 mg/l , die deutlich unter den EU-Trinkwasserrichtwerten für Chlorid und Natrium liegt. Dennoch darf die Salzbelastung der innerörtlichen Vegetation (Bäume) nicht unterschätzt werden. Im Gegensatz zu Salz gewährleistet das Ausbringen von Splitt nur eine geringe Verkehrssicherheit und steht zudem im Widerspruch zum Vorsorge- und Vermeidungsprinzip des Krw-/AbfG, da hierbei Abfälle produziert werden. Der eingeschränkte Winterdienst (Splittstreuung) stellt ausserorts keine Alternative zum Winterdienst mit Streusalz dar. Eine Nullstreuung (starkes Räumen, kein Streuen, nur in Sonderfällen wenig salzen) erweist sich innerorts bezgl. Wirtschaftlichkeit, Umwelt- und Verkehrssicherheit als die günstigere Alternative gegenüber Splittstreuung und ließe sich stufenweise ausbauen. Nach Pichler (1987) könnten aus gesamtwirtschaftlichen Gründen für 2-spurige Straßen abstumpfungsfähige Mittel innerorts bei einer durchschnittlichen Verkehrsbelastung unterhalb von 500-1000 Fahrzeugen pro Tag eingesetzt werden, bei höherer Verkehrsfrequenz sind auftauende Mittel günstiger zu bewerten (Ruess 1998).

In den letzten Jahren hat sich in den Städten verstärkt das Konzept des differenzierten Winterdienstes als das umweltfreundlichste, kostengünstigste und verkehrssicherste durchgesetzt. Insgesamt ergeben die Recherchen, dass Streusalz das wirksamste, wirtschaftlichste, und "relativ umweltverträglichste" Streumittel darstellt, dessen Wirksamkeit selbst bei niedrigeren Temperaturen ($< -10 \text{ }^\circ\text{C}$) durch Beimengungen an CaCl_2 und MgCl_2 aufrechterhalten werden kann. Unter normalen Winterverhältnissen sind Streumengen bis max. 20 g/m^2 ausreichend. Tatsächlich wird Streusalz heute in wesentlich geringeren Einsatzmengen als früher dosiert. Wurden in den 60er Jahren noch 40 g/m^2 und mehr Auftausalz benötigt, sind es heute nur noch zwischen 10 und 20 g/m^2 (<http://www.salzindustrie.de>). Die Streumenge hängt dabei ganz besonders von der Schnee- bzw. Eisdicke, von Temperatur, Luftfeuchte und Verkehrsdichte ab. Wo immer machbar sollte möglichst viel mechanisch geräumt und nur ein geringer Restschnee aufgetaut werden. Die

unbestreitbaren Folgeschäden einer Salzstreuung müssen gegenüber dem volkswirtschaftlichen Nutzen (weniger Verkehrsunfälle mit all den Folgen, Aufrechterhaltung von Handel und Verkehr während der Wintermonate) sorgfältig abgewogen werden.

Der Einsatz abstumpfender Stoffe ist aufgrund der mit ihrer Ausbringung und Wiederaufnahme verbundenen hohen Kosten, aber auch wegen ihrer geringen Effizienz und dem ungelösten Konfliktpotential mit dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, weder ökonomisch, verkehrstechnisch noch von der Entsorgungsproblematik her zu empfehlen. Da diese Stoffe nicht enteisen, bleiben sie wirkungslos bei Eis- oder Reifglätte. Eine abstumpfende Wirkung lässt sich nur auf einer noch nicht festgefahrenen/festgefrorenen Schneedecke nachweisen. Aufgrund der höheren Dosiermenge (in der Regel 100-150 g/m², mindestens aber 100 g/m²) erfordern sie darüberhinaus einen insgesamt höheren Einsatz an Streufahrzeugen, verursachen Lack- und Felgenschäden an Fahrzeugen, eine hohe Staubbelastung nach Fahrbahnabtrocknung und eine Verstopfung des Regenwasserkanalnetzes (Kanäle, Gräben, Sandfang, Sinkkästen) sowie von Pumpensümpfen. Allerdings kann ihr gezielter Einsatz in sensiblen Bereichen durchaus sinnvoll sein, z. B. bei gefährdeten Baumbeständen sowie im Fußgänger- und Fahrradwegbereich. Ob und inwieweit Formiate eine Alternative zu den konventionellen Streustoffen darstellen, bleibt nach dem bisherigen Erkenntnisstand fraglich. Trotz guter Tauleistung (auch bei tieferen Temperaturen), einer geringen aquatischen Ökotoxizität sowie guter biologischer Abbaubarkeit existieren noch keine Langzeitbeobachtungen unter Feldbedingungen und keine Daten zur terrestrischen Ökotoxizität. Eine abschließende Bewertung ist somit noch nicht möglich.

Auch das als Alternative zu Streusalz immer wieder in die Diskussion gebrachte Calcium/Magnesiumacetat sollte nur bedingt zum Einsatz kommen. Innerorts sind zwar kaum negative Effekte auf das Straßenbegleitgrün bekannt. Es sollte jedoch nicht auf Straßen in der Nähe von zugefrorenen Seen und Flüssen mit einem geringen Verdünnungspotential oder mit einer sensiblen Fischpopulation ausgebracht werden (Brenner und Horner 1992).

Anhand der hier gesammelten Daten und Fakten liegt es nahe, nicht weiter über die Formulierung von Kriterien zur Vergabe eines Umweltzeichens für Formiate und

abstumpfende Mittel nachzudenken, sondern die Entwicklung des differenzierten Winterdienstes weiter zu fördern und hierbei sowohl den Einsatz der hier untersuchten auftauenden und abstumpfenden Stoffe zu optimieren und eine Nullstreuung sowie das Fahrverhalten aller Verkehrsteilnehmer stärker in den praktischen Entscheidungsprozess miteinzubeziehen. Entsprechende Vorschläge hinsichtlich einer Verbesserung der Produktqualität der hier diskutierten Streumittel als integraler Bestandteil eines effizienten und umweltschonenden, differenzierten Winterdienstes werden im nachfolgenden Kapitel dargestellt und diskutiert.

6 Potential für Produktverbesserungen

6.1 Allgemeine Einführung

Bei der umweltfreundlichen Beschaffung und Einführung von Streumitteln müssen bestimmte Umweltkriterien erfüllt sein, wie z. B. eine optimale Produktlebensdauer, minimaler Energie-, Wasser und Rohstoffverbrauch, Wiederverwendbarkeit und die bevorzugte Entwicklung abfall-, schadstoff- und komponentenarmer Produkte (Faith-Ell 2000). Maßnahmen zur Verbesserung der Umweltakzeptanz, aber auch von Wirtschaftlichkeit und Verkehrssicherheit können weiter optimiert werden durch:

- effizientere Straßenzustands- und Wetterprognosen (Luft-/Straßenoberflächentemperatur, Feuchte, Restsalzgehalt etc), unter Einbeziehung des sogenannten Winterindex (einer Kenngröße zur Beschreibung der Winterstrenge) in Verbindung mit einem Glättefrüherkennungssystem (seit 1992/93 hat der Dt. Wetterdienst den Straßenzustands- und Wetterinformationsdienst (SWIS) eingeführt, um Trendvorhersagen der Glättemessstellen mit Wettervorhersagen zu kombinieren).
- großräumige Überwachung der Wetterentwicklungen, durch Einrichten einer Wetterdienstzentrale, welche ein frühzeitiges Alarmieren und dadurch rechtzeitiges und vorbeugendes Streuen ermöglicht.
- stationäre Taumittelsprühanlagen, Automatisierung, Optimierung und permanentes Monitoring der Tausalzdosierung nach Temperaturerfassung durch IR-Kameras und Ermittlung der Fahrbahnfeuchte.
- verstärkten Einsatz der Feuchtsalztechnologie (z.B. FS30 ermöglicht eine jährliche Einsparung von etwa 25%).
- Optimierung der Einsatzrouten von Winterdienstfahrzeugen und der Standorte von Streustofflagerhallen.
- gezielten Einsatz von eishemmenden Deckschichten.
- vermehrten Bau von Betriebszufahrten an Autobahnen zur Verkürzung der Umlaufzeiten.
- verstärkte Fortbildung des Wetterdienstpersonals.
- vorausgehende verbesserte "Schwarzräumung" bei Schneefall (Moritz 2000).

Eine effiziente Straßenentwässerung ist unabdingbare Voraussetzung dafür, dass die Hauptmenge des Auftausalzes nicht in den Straßenrandbereich gelangt und in die Wurzelzone und das Grundwasser infiltriert. In Kläranlagen und Oberflächengewässern sind bei ausreichender Verdünnung keine ökotoxischen Effekte zu erwarten. Allerdings kann eine Erhöhung der Salzkonzentration in Trinkwassergewinnungsanlagen mit einem hohen Anteil an Uferfiltrat nicht verhindert werden.

Der Einsatz von Streumitteln kann durch flankierende straßenbautechnische präventive Maßnahmen unterstützt werden. Hierzu zählen der gezielte Einsatz von Freiflächenheizungen in sensiblen Bereichen, der bevorzugte Bau von glättebildungshemmenden Fahrbahnen, aber auch die umweltschonende Ableitung der Straßenabflüsse oder die Anpflanzung salztoleranter Arten. Da Straßenrandböden meist unterversorgt an K^+ , Mg^{++} , P und Mn^{++} , und überversorgt an Ca^{++} , Na^+ , und Cl^- sind, könnte eine gezielte Nährstoffdüngung die Bodenverhältnisse vor Ort verbessern.

Im innerstädtischen Bereich könnte eine Auflockerung des Bodens für gute Niederschlag-Infiltrationsbedingungen und damit für eine rasche Salzauswaschung sorgen. In trockenen Perioden könnte eine Zusatzbewässerung an innerstädtischen Standorten eine ausreichende Bodenfeuchte garantieren und damit einen zusätzlichen Stoffeintrag aus tieferen Bodenschichten verhindern (Brod 1995).

Der gegenwärtige Stand der Technik erlaubt einen differenzierten Winterdienst, bei dem sich die Auswahl an Streustoffen (Auftausalze, abstumpfende Mittel) an der jeweils vorherrschenden Witterung und den spezifischen Straßenverhältnissen orientiert. Sand sollte nur in Gebieten mit geringer Verkehrsdichte eingesetzt werden. Eine effiziente Ausbringung von Streustoffen setzt jedoch voraus, dass bei Schneefall zunächst so gut wie möglich und wirtschaftlich vertretbar mechanisch geräumt wird (Wagner 1989).

Tausalze sollten je nach Witterung trocken, feucht oder als Lösung ausgebracht werden. Trockenes Salz sollte ausschließlich bei Regen oder Schneeregen zum Einsatz kommen. Befeuchtetes Salz wird oftmals auch vorbeugend angewandt und zeichnet sich v. a. durch seine homogenere Verteilung, geringere Randverluste, einer längeren und schnelleren Wirkung, auch bei niedrigen Temperaturen, einer größeren

Streugeschwindigkeit und insgesamt geringeren Einsatzmenge (ca. 20% Mengenreduktion) aus. Insbesondere das Feuchtsalzverfahren FS30, mit Ausbringungsmengen von $< 10 \text{ g/m}^2$ Salz sei hier nochmals erwähnt (Brod 1993).

Auch Salzlösungen (ca. 23% NaCl) enthalten nur noch ca. 1/4 der Menge an Trockensalz, und erlauben damit eine weitere Reduktion der Dosiermenge von 20 g/m^2 auf ca. 5 g/m^2 . Auch Salzlösungen lassen sich insbesondere vorbeugend einsetzen, nicht aber auf nassen oder bereits vereisten Fahrbahnen (Ihs 2000).

Ein differenzierter Winterdienst legt nahe, Streusalz innerorts nicht auf Gehwegen, sondern nur an wichtigen und kritischen Stellen, wie z. B. Kreuzungen, Steigungen und wichtigen Straßenabschnitten einzusetzen und dabei auf eine optimale Dosierung zu achten ($10 \text{ g/m}^2/\text{Streugang}$). Hingegen sollten abstumpfende Mittel nur innerorts verwendet, dabei auf geeignete Entsorgungsmöglichkeiten geachtet und einer Belastung von Kehrpersonal durch Staubentwicklung entgegengewirkt werden (Assmann 1999).

Obwohl organische Auftausalze hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen (Phytotoxizität, terrestrische Toxizität) noch nicht abschließend bewertet werden können, wäre ein Einsatz dieser Streumittel (wie z. B. von Kaliumformiat) trotz des höheren Preises kleinräumig auf besonders umweltsensitiven Standorten oder Nebenwegen denkbar, um die Chloridbelastung des Straßenbegleitgrüns zu verringern. Voraussetzung wäre jedoch, dass die vorhandenen Datenlücken geschlossen werden. Auch bei organischen Streumitteln sollte die Mengendosierung und Ausbringung weiter optimiert werden.

In Schweden werden zusätzlich ökonomische Anreize in Relation zur Wetterstatistik angeboten. Kosten für zuviel ausgebrachtes Streusalz werden von den Kommunen nicht kompensiert, wenn die von der Wettervorhersage vorgegebene Streusalzmenge von den mit der Durchführung des Winterdienstes beauftragten Unternehmen überschritten wird (persönliche Mitteilung Charlotta Faith-Ell, 2001).

6.2 Gebrauchstauglichkeit und Produktqualität

Generell sollte die Gebrauchstauglichkeit von umweltzertifizierten Produkten denen herkömmlicher Produkte entsprechen. Die Produkte sollten normgerecht und zulassungsfähig sowie ökologisch am günstigsten sein, und der Energiemehr-

aufwand sollte nicht höher sein als der eines vergleichbaren herkömmlichen Produktes. Für den Energieaufwand gilt der Nachweis am Beispiel von Recyclingbauprodukten dann als erbracht, wenn der zur Herstellung notwendige kumulative Energieaufwand (KEA) um nicht mehr als 10% höher liegt als für vergleichbare, herkömmliche Produkte. Umweltzertifizierte Produkte sollen nach den geltenden technischen Regelwerken (z. B. nach DIN) die mögliche Einsatzmenge von sekundären Rohstoffen voll ausschöpfen. Es wird die völlige Einhaltung technischer Regelwerke und Normanforderungen (Produktnormen) sowie entsprechender technischer Vorschriften vorausgesetzt. Die Frage der Ressourcenknappheit muss lokal betrachtet werden. Die Produkte müssen nachweislich für den vorgesehenen Anwendungsbereich technisch geeignet sein. Auch muss der Nachweis der gefahrlosen Einspeisung in den Stoffkreislauf ohne zulässige Schadstoffanreicherung erbracht werden (Schließl und Heinz 2001).

6.2.1 Technische Lieferbedingungen für Streustoffe

Nach dem Entwurf der FGSV zu den Technischen Lieferbedingungen und Richtlinien für Streustoffe des Winterdienstes und dem Kommentar zur TLStreu (FGSV, 2001, 2002) sollen tauende Stoffe folgende Kriterien einhalten:

Natriumchlorid:

- tauwirksame Substanz ≥ 96 Gew.-%,
- betonaggressive Sulfate ≤ 2 Gew.-%,
- zur Erhaltung der Streufähigkeit $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-} \leq 200$ mg/kg,
- keine wasserabweisenden (hydrophoben) Bestandteile,
- Wassergehalt bei Anlieferung $\leq 2\%$ (Hallenlagerung) bzw. $0,6\%$ (Silolagerung)
- Korngrößenverteilung: Anteil $< 0,16$ mm ≤ 5 Gew.-% und keine Anteile > 5 mm

Calcium/Magnesiumchlorid:

- tauwirksame Substanz ≥ 77 Gew.-% (CaCl_2) bzw. 47 Gew.-% (MgCl_2),
- $\text{SO}_4^{2-} \leq 2$ Gew.-%,
- keine hydrophobierende Stoffe,

- nur zur Herstellung der Lösung für Feuchtsalze; festes CaCl_2 und MgCl_2 bleiben Sonderfälle,
- zulässige Korngröße 0-20 mm mit Anteil < 2 mm max. 25 Gew.-% und Anteil 10-20 mm max. 5 Gew.-%.

Lösungen für die Feuchtsalzherstellung oder für Taumittel-Sprühanlagen werden zur Verhinderung des Auskristallisierens des Tausalzes auf eine Konzentration knapp unter der eutektischen Konzentration (für NaCl 22,4 Gew.-%) gelagert, bei einem pH zwischen 5-10, und einem Sulfatgehalt ≤ 0.6 Gew.-%. Andere Taustoffe, wie Formiate, Acetate aber auch Harnstoff werden gemäß dem Kommentar zur TLStreu für den Einsatz auf Straßen nicht empfohlen. Auch Abfallsalze, z. B. aus der Aluminium- und Lederindustrie, oder Rauchgasreinigung, dürfen nach Vorgaben der TLStreu nur verwendet werden, wenn obige Kriterien erfüllt werden. Weiter dürfen die Schwermetalle einer 10 Gew.-%igen Lösung bei pH 4 die in Tabelle 16 wiedergegebenen Konzentrationen nicht überschreiten. Das Umweltverhalten dieser Taustoffe ist im Einzelfall sowohl herstellungs- als auch anwendungsbezogen zu bewerten. Für neue Produkte sind umfangreiche Untersuchungen zu Taugeigenschaften, Umweltverhalten und Arbeitsschutz erforderlich. Der Eignungstest für tauende Stoffe ist gemäß Produktbeschreibung vom Anbieter zu erbringen.

Für abstumpfende Streustoffe gelten folgende Kriterien:

- Feinstkornanteil mit Anteil <0,063 mm max. 5 Gew.-%, Größtkorn ≤ 8 mm,
- Anteil kubisch geformter Körner > 50 Gew.-%, um Verzahnung mit der Glätteschicht zu gewährleisten (keine scharfkantigen Formen),
- Bruchflächigkeit nach DIN EN 933-5 > 90%,
- Schlagzertrümmerungswert nach DIN EN 1097-2 < 30% (bei Lavaschlacke < 15%),
- bei Trockenlagerung Zusatz von Taustoffen < 10%,
- Schwermetallgrenzwerte im Eluat (pH 4-Stat-Verfahren nach Goetz und Gläseker, 1996) limitiert (vgl. Tabelle 16)
- Wassergehalt bei Anlieferung ≤ 2 Gew.-%.

Nach dem Entwurf zur TL Streu können auch sonstige abstumpfende Streustoffe (wie granulierten Hochofen- und andere Schlacken, Haldenmaterialien, Bauschutt)

eingesetzt werden, sofern jede Einzelcharge die genannten Kriterien erfüllt. Nach Auffassung der Forschungsnehmer sollte eine offene Anwendung von Schlacken und Bauschutt für diesen Zweck jedoch aufgrund der Schadstoffgehalte ausgeschlossen werden, indem nicht nur die auswaschbaren Schadstoffe im Eluat sondern auch die Gesamtgehalte nach Königswasseraufschluss begrenzt werden. Gemische aus tauenden und abstumpfenden Stoffen werden nicht empfohlen, da zuviel Taustoffe benötigt werden.

Das in der TLStreu geforderte Schutzniveau regelt die Bereiche Sicherheit, Gesundheit und Gebrauchstauglichkeit. Vom Hersteller/Anwender muss der Nachweis erbracht werden, dass auch Zusätze keine Umweltgefährdung darstellen und die Tauwirkung des Streumittels nicht behindern.

6.2.2 Wirksamkeit von Tausalzen

Vor der Einführung neuer Auftausalze sollte deren Eignungsfähigkeit unter definierten Testbedingungen untersucht werden. Für die Enteisung von Flugzeugen liegen entsprechende Prüfvorschriften vor, mit denen die Dauer der Vereisungsschutzwirkung von behandelten, leicht geneigten Prüfplatten gegenüber einem Wassersprühnebel unter definierten klimatischen Bedingungen bei -5°C bestimmt wird. Als Prüfergebnis wird die Zeit bis zum ersten Auftreten von Eiskristallen festgehalten (DIN ISO 11075 und DIN ISO 11078 Entwürfe 1995). Für den Verkehrsbereich ist diese Methode nicht geeignet. Hier wurde von der BAST das sogenannte "Inzeller Eisplatten-Verfahren" entwickelt, bei dem 4 g eines Taustoffs auf eine $0,05\text{ m}^2$ große und 3,5 cm starke Eisplatte verteilt und die Schmelzwirkung bei verschiedenen Temperaturen (-2 und -10°C) und Einwirkzeiten (10 und 60 Min.) bestimmt wird. Bisherige Erkenntnisse mit dieser Methode, die eine vergleichsweise schlechte Übertragbarkeit auf andere Laborstandorte ergaben, führten dazu, das Prüfergebnis als relative Beurteilungsgröße der Tauleistung des Prüfsalzes gegenüber einem Vergleichssalz anzugeben.

6.3 Geltende Rechtsvorschriften und Vereinbarungen

Bei der Umweltzeichenvergabe muss die Einhaltung bestehender Regelwerke beachtet werden, u. a. des BImSchG und KrW-/AbfG, WHG, BBodSchG, und der dazugehörigen Technischen Regeln (z. B. für Boden, Straßenaufbruch, Bauschutt,

Schlacken/Aschen aus der Müllverbrennung und Heizkraftwerken, Gießereisande, Schlacken aus der Eisen/Stahlerzeugung), einschließlich der Anwendung von Elutionsverfahren zur Beurteilung der über den Wasserpfad mobilisierbaren Anteile sowie von Vorsorgewerten (z. B. Zuordnungswerte nach LAGA) zur Verhinderung diffuser Umweltbelastungen durch Abfälle/Reststoffe und deren Wiederverwertung.

Der Gehalt an Schwermetallen in natürlichen Streumitteln ist generell gering. Grenzwerte für wasserlösliche Schwermetallanteile werden sowohl für tauende als auch für abstumpfende Mittel entsprechend dem Arbeitsblatt 115 "Hinweise für das Einleiten von Abwasser in eine öffentliche Kläranlage" (Ausgabe 10/94) der ATV festgelegt. Nach TLStreu wird eine Absenkung dieser als veraltet angesehenen Grenzwerte gefordert. Grenzwerte für Böden werden in der AbfKlärV (1992), mittels der LAGA-Zuordnungswerte - "Stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen" (11/97) sowie durch die VDLUFA-Richtwerte '80 vorgegeben. Da wasserlösliche Anlagerungen an Streustoffe v. a. beim Schmelzen des Schnees in Lösung gehen, werden wasserlösliche Schwermetallanteile gem. Abwasserverordnung nach 24stündiger Elution im Verhältnis 1:10 mit Wasser (DIN 38414 S4) bewertet. Zur Ermittlung der langfristigen Auslaugbarkeit von Schwermetallen auch bei pH 4 (Saurer Regen) wurde vom AK 6.4.1 "Elutionsverfahren für Mineralstoffe" das pH-stat-Verfahren vorgeschlagen. Der Einsatz abstumpfender Mittel muss aufgrund des Gebots der Abfallvermeidung (nach KrW-/AbfG) in Frage gestellt werden. Danach bliebe zu klären, inwieweit abstumpfende Stoffe rechtlich noch als Streustoffe akzeptiert werden dürfen (Moritz 1999).

Das Bundes-Bodenschutzgesetz gebietet einen flächendeckenden Grundwasserschutz vor Einträgen aus verunreinigten Böden, u.a. anhand der Einhaltung von Prüfwerten (Vorsorgewerte) für Sickerwasser. Zwar sind Auftausalze nicht selbst Gegenstand der Bodenschutzverordnung, sie können aber z.B. die Löslichkeit von Schwermetallen (insbesondere von Cadmium!) erhöhen. Ein Maßstab zur Bewertung möglicher Einflüsse nach dem Bundes-Bodenschutzgesetz ist die Gegenüberstellung von Messwerten und Prüfwerten nach Anhang 2 Punkt 3 der Bodenschutzverordnung. Eine Beurteilung des Gefährdungspotentials erfolgt auch durch die LAGA-Zuordnungswerte (Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln), im Bezug auf das Schutzgut Grundwasser. Auflagen des Boden- und Grundwasserschutzes gelten als

eingehalten, wenn Z0-Werte der LAGA Richtlinien erfüllt sind sowie Verwendungsverbote und Beschränkungen für den Einsatz von Gefahrstoffen beachtet werden (LAGA 1997).

Bezüglich der Anwendung von Umweltkriterien im öffentlichen Beschaffungswesen herrschen auch europaweit noch immer keine abgestimmten Empfehlungen. So gibt es auf europäischer Ebene z. B. die Directive on Public Works (93/37), sowie das Green Paper (EC 1996). Das grüne Beschaffungswesen soll danach einerseits die am meisten umweltfreundlichen Alternativen fördern, darf aber andererseits nicht dazu führen, neue technologische Entwicklungen zu begrenzen. In diesem Zusammenhang muss auch auf die Vermeidung von unbeabsichtigten Handelsvorteilen durch eine Umweltzeichenvergabe geachtet werden. Eine Lizenzvergabe sollte nur dann erfolgen, wenn das geprüfte Produkt mit den ausgewählten Umweltkriterien und charakteristischen Funktionen übereinstimmt.

6.4 Vorschläge für Produktanforderungen

Ökologische Basisanforderungen an die Vergabe eines neuen Umweltzeichens für Auftaumittel ergeben sich aus den Kriterien zur Vergabe des bereits bestehenden Umweltzeichens RAL-UZ99, aus dem Bundesbodenschutzgesetz sowie den dazugehörigen technischen Anforderungen. Der Kriterienkatalog für das Nordische Umweltzeichen ("Ecolabel for Ice-Combating Agents") beinhaltet Anforderungen bzgl. Chlorid, Nährstoff, Ökotoxizität der Produkte und Gehalt an Additiven, die als umweltschädlich eingestuft werden können sowie die Durchführung von Korrosionstests. Umweltaforderungen müssen insbesondere folgende allgemeine Bedingungen erfüllen: sie müssen relevant sein, d. h. sie müssen die Vorgaben der Politik erfüllen, spezifisch (um die richtige Maßnahme zu finden), erreichbar und messbar (hinsichtlich Wirkungsgrad) (Feith 2000).

Aus dem Blickwinkel eines vorbeugenden Umweltschutzes schließt die Entwicklung eines neuen Umweltzeichens insbesondere die Vermeidung von Gefahrstoffen, Anforderungen gegenüber Wirkungen auf terrestrische und aquatische Organismen sowie technische Anforderungen zur Ausbringung mit ein.

Zu den Produktanforderungen, deren Einhaltung negative Umweltwirkungen durch ein neues Produkt gering halten, gehören insbesondere: vergleichbare Gebrauchs-

tauglichkeit, problemloses Ausbringen, geringer Verbrauch bei hohem Wirkungsgrad, gute Lagerfähigkeit, einfache Handhabung, unbegrenzte und unmittelbare Verfügbarkeit, preisgünstiger Einkauf sowie keine Schädigung von Gesundheit, Flora, Fauna, Boden, Gewässer, Kläranlagen, Bauwerke und Kraftfahrzeugen (Moritz 1999). Auch die Prüfungskriterien im Anhang zum "Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen, Teil: Winterdienst außerhalb geschlossener Ortslagen" (1984) können als Entscheidungshilfe und zur Eignungsprüfung herangezogen werden. Weitere Anforderungen im Hinblick auf eine Verwendung abstumpfender Streustoffe auf Gehwegen und bezogen auf die Belange des privaten Endverbrauchers ergeben sich aus den Vergabekriterien für das Umweltzeichen RAL-UZ13. Auch im Anhang "Produktbeschreibung" der TLStreu werden relevante Qualitätskriterien genannt, die in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen sind (siehe Kap. 6.2). Eine regelmäßige Güteüberwachung dieser Streustoffe, wie z. B. nach den "Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen" (RGMin), insbesondere hinsichtlich ihrer granulometrischen Eigenschaften (wie Korngröße und Verteilung, Form, Festigkeit, organische Bestandteile) und ihres Schwermetallgehalts, sollte erfolgen (Moritz 1999).

6.4.1 Vermeidung von Gefahrstoffen

Es ist sicherzustellen, dass mit der Ausbringung von Streumitteln keine umweltgefährdenden Verunreinigungen oder Zusätze, wie Korrosionsinhibitoren oder andere Additive, in die Umwelt gelangen. Gemäß Richtlinie 1980/2000/EG darf das Umweltzeichen nicht für Stoffe oder Zubereitungen vergeben werden, die entsprechend den Vorgaben der Richtlinien 67/548/EWG (Gefahrstoffe) oder 1999/45/EG (gefährliche Zubereitungen) als giftig, umweltgefährdend, krebserzeugend, fortpflanzungsgefährdend oder mutagen eingestuft wurden. Für die Vergabe des Umweltzeichens "Ecolabelling of ice combatting agents" wurde daher der Gehalt an Gefahrstoffen entsprechend auf 0,1 Gew.% für Einzelsubstanzen bzw. 0,2 Gew. % insgesamt begrenzt (Anonym 1997). Insbesondere für abstumpfende Streumittel sind die Gehalte an Schwermetallen in den Vergabekriterien berücksichtigt (siehe Tabelle 14).

Tabelle 16: Zulässige Schwermetallgehalte in mg/kg TS

	RAL-UZ 13	Nordischer Schwan	Prüf- und Vorsorgewerte des Bundes-Bodenschutzgesetz vom 12.07.99				LAGA (1994)
	Salzfreie abstumpfungsfähige Streumittel	Ecolabelling of ice combatting agents	Aufnahme von Schadstoffen Kinderspielflächen	Aufnahme von Schadstoffen Park- und Freizeitanlagen	Pflanzenqualität Ackerbau	Vorsorgewerte für Böden (Ton / Lehm / Sand)	Stoffliche Verwertung mineralischer Reststoffe Einbauklasse Z0 ³⁾
Arsen	20	20	25	125	200		20
Blei	100	100	200	1000	0,1	100 / 70 / 40	100
Cadmium	3	1	10	50	0,04/ 0,1 ²⁾	1,5 / 1 / 0,4	0,6
Chrom, gesamt	? ¹⁾	25	200	1000	-	100 / 60 / 30	50
Nickel	50	50	70	350	-	70 / 50 / 15	40
Kupfer	100	100	-	-	-	60 / 40 / 20	40
Quecksilber	2	1	10	50	5	1 / 0,5 / 0,1	
Tallium	1		-	-	0,1		--
Zink	300	300	-	-	-	200 / 150 / 60	120

¹⁾ Vgl. Protokoll zur Anhörung RAL-UZ-13 vom 07.11.1996: für Chrom, gesamt noch 50 mg/kg festgelegt!

1) Maßnahmenwert

2) LAGA Obergrenze für uneingeschränkten offenen Einbau (Zuordnungsklasse Z0)

Die Forschungsgemeinschaft für Straßen- und Verkehrswesen hat ein Arbeitspapier zur wasserwirtschaftlichen Umweltverträglichkeit von Mineralstoffen veröffentlicht, in dem jedoch nicht die Gesamtgehalte an Schwermetallen, sondern nur der eluierbare Anteil bewertet wird. Grundlage ist das Elutionsverfahren nach DIN 38414-4, das ein Elutionsverhältnis Feststoff/Wasser von 1:10 und eine Elutionsdauer von 24 h

vorsieht (siehe Tabelle 15, Schönfeld 1994). Grundsätzlich gelten natürliche gebrochene Streustoffe als wesentlich weniger mit Schwermetallen belastet als künstliche Materialien wie Schlackengranulate (Ruess, 1998).

Im Bundes-Bodenschutzgesetz von 1999 sind in Abhängigkeit von der Nutzung verschiedene Prüf- und Maßnahmenwerte festgelegt. Wenn die gemessenen Bodenkonzentrationen unterhalb der Prüfwerte liegen, ist der Verdacht einer schädlichen Bodenveränderung ausgeschlossen, werden die Messwerte überschritten, ist im Einzelfall zu ermitteln, ob die Schadstoffkonzentrationen die Prüfwerte im Sickerwasser überschreiten. Ist dieses der Fall, werden gegebenenfalls Sanierungsmaßnahmen eingeleitet. Die Richtwerte können jedoch nur dann mit den für abstumpfende Streumittel geltenden Werten verglichen werden, wenn das Aufschlussverfahren vergleichbar ist. Die Bestimmung der Gesamtgehalte für den Wirkungspfad durch direkte Aufnahme (Boden-Mensch) erfolgt im Königswasseraufschluss bei Korngrößen $< 150 \mu\text{m}$. Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze werden Arsen und Quecksilber im Königswasseraufschluss, die übrigen Schwermetalle nach Extraktion mit Ammoniumnitrat bestimmt. Das Bodenschutzgesetz legt auch Vorsorgewerte für Böden sowie maximale zusätzliche Jahresfrachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade fest. Die zulässige Jahresfracht z.B. für Blei beträgt $400 \text{ g/ha}^* \text{a}$.

Tabelle 17: Prüf- und Grenzwerte von Schwermetallen im Eluat nach DIN 38414-4 bzw. im Industrieabwasser [mg/l]

	TLStreu pH 4-Stat (Entwurf 26.02.02)	Grenzwert FGSV- Arbeitspapier Nr. 28/1 ¹⁾	Prüfwerte Bundes- Bodenschutzgesetz vom 12.07.99	Anhang 22 AbwasserVO Chemische Industrie Spalte I	ATV-Arbeitsblatt A 115 Einleiten nicht häuslichen Abwassers	Abwasserabgaben- gesetz Schwellenwerte
Arsen	0,25	0,5 - 2	0,01	-	0,5	
Blei	0,5	0,4 - 1	0,025	0,05	1	0,05
Cadmium	0,2	0,05 - 0,3	0,005	0,005	0,5	0,005
Chrom, gesamt	0,5	0,5	0,05	0,05	1	0,05
Nickel	0,5	0,2 - 1	0,05	0,05	1	0,05
Kupfer	0,5	1 - 5		0,01	1	0,1
Quecksilber	0,05	0,01	0,001	0,001	0,1	0,001
Zink	2	2 - 5	0,5	0,2	5	

¹⁾ Angaben in mg/kg

6.4.2 Begrenzung von Nährstoffen

Der Eintrag von Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff wird sowohl für die Vergabe des Umweltzeichens "Bewegungsflächenenteiser für Flugplätze" (RAL-UZ 99) als auch für das Nordische Zeichen "Ecolabelling of ice combatting agents" begrenzt. Im RAL-UZ 99 ist der maximale Gehalt an Stickstoff auf 0,01 Gew.-% und der von Phosphor auf 0,008 Gew.-% festgelegt (Anonym 1997 und 1999). Das Nordische Umweltzeichen sieht für beide Maximalwerte von 1 Gew.-% vor (Anonym 1997). Mit dieser Festlegung kann der Einsatz von Harnstoff, der zur Überdüngung natürlicher Gewässer führen kann, ausgeschlossen werden. Beim Nordischen Umweltzeichen wird darüber hinaus auch der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB) der Produkte auf 0,25 g/g (Anonym 1999) bzw. 0,125 g/g Produkt limitiert, um den Eintrag abbaubarer organischer Verbindungen zu verringern (Anonym 1997). Grundsätzlich gilt, dass

organische Auftausalze in der Umwelt leicht biologisch abbaubar sein müssen (vgl. 5.3.7.1).

6.4.3 Ökotoxizität

6.4.3.1 Aquatische Ökotoxizität

Das Umweltzeichen "Bewegungsflächenenteiser für Flugplätze" (RL-ZU 99) legt keine Kriterien hinsichtlich der aquatischen Ökotoxizität dieser Produkte fest, fordert allerdings die Vorlage entsprechender Prüfberichte. Unter den Kriterien des vom Nordischen Rat (Schweden, Finnland, Norwegen) herausgegebenen Umweltzeichens "Ecolabelling of ice combatting agents" werden hingegen folgende Kriterien hinsichtlich Ökotoxizität und Toxizität genannt (Anonym 1997).

Fischtoxizität	OECD 203	LC50 (96 h) >1 g/l
Daphnientoxizität	OECD 202	LC50 (24 h) > 1 g/l
Algtoxizität	OECD 201	EC50 (72 h) > 1 g/l
Orale Toxizität Ratten	OECD 420	LD50 > 3 g/kg Körpergewicht

Wie die zu den verschiedenen Auftaumitteln erhobenen Daten zeigen, liegt die akute aquatische Ökotoxizität sowohl der organischen als auch der anorganischen Salze weit über dem Grenzwert von 1 g/l, so dass dieses Kriterium für eine vergleichende Bewertung als ungeeignet erscheint (vgl. Tabelle 8).

6.4.3.2 Terrestrische Ökotoxizität

Die Datenlage zur terrestrischen Ökotoxizität ist wie oben beschrieben lückenhaft. Es wäre zu fordern, dass die organischen Auftausalze eine deutlich geringere Toxizität aufweisen als Kochsalz. Hierzu sollten insbesondere folgende standardisierten Tests der Chemikalienbewertung verwendet werden:

Phytotoxizität	OECD 208
Regenwurmtoxizität	OECD 207
Collembolentest	ISO 11267:1999

Genauere Kriterien können zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht festgelegt werden.

6.4.4 Korrosion

Organische Auftausalze sollten zumindest keine höhere Korrosivität aufweisen als Natriumchlorid, um Schäden gegenüber Bauwerken und Fahrzeugkarosserien gering zu halten. Im vom Nordischen Rat herausgegebenen Umweltzeichen "Ice combatting agents" werden Untersuchungen zur Gewichtsabnahme von Stahl im ASTM G31-72 Test gefordert, ohne dass genauere Kriterien festgelegt sind (Anonym 1997). Flugzeug- und Bewegungsflächenenteiser müssen gemäß internationaler Vereinbarungen einer ganzen Reihe von Eignungstests einschließlich der Prüfung der Korrosivität gegenüber verschiedenen Materialien unterzogen werden. In den "Aerospace Material Specifications" sind entsprechende Prüfmethode beschrieben (u.a. AMS 1435). So beträgt die maximal zulässige Gewichtsabnahme von Stahl im Immersions-Korrosionstest beispielsweise $0,8 \text{ mg/cm}^2$ in 24 h. Allerdings wird den organischen Auftaumitteln, um die AMS-Vorgaben einzuhalten, oftmals bis zu 1% an Korrosionsschutzmittel wie Triazole zugesetzt, von denen eine größere Umweltgefährdung ausgeht als von den Auftaumitteln selbst (u.a. Cancilla et al. 1998). Im Rahmen einer Umweltzeichenvergabe wäre daher zu fordern, dass Korrosionsschutzmittel, sofern diese zugegeben werden, zu spezifizieren sind.

7 Fazit und Empfehlungen

Aufgabe des kommunalen Winterdienstes ist es, die Verkehrssicherheit von Fußgängern, Rad- und Autofahrern bei Schnee- und Eisglätte zu gewährleisten. Im Rahmen der hier vorgelegten Machbarkeitsstudie sollte in Anlehnung an DIN EN ISO 14024 überprüft werden, ob die Vergabe eines Umweltzeichens für ein Enteisungsmittel auf der Basis von Kaliumformiat aus ökologischen Gründen sinnvoll ist.

Nach derzeitigem Kenntnisstand kann der undifferenzierte Einsatz von Formiaten im Winterdienst und die Vergabe eines RAL-Umweltzeichens für diesen Zweck nicht empfohlen werden. Die sehr geringe aquatische Ökotoxizität ist zwar mit der von Kochsalz und Calcium/Magnesiumchlorid vergleichbar. Untersuchungen zur terrestrischen Ökotoxizität (insbesondere zur Phytotoxizität), aus denen gegebenenfalls Vorteile gegenüber Kochsalz abgeleitet werden könnten, fehlen derzeit. Formiate sind zwar leicht biologisch abbaubar und weisen im Vergleich zu anderen organischen Auftausalzen einen geringeren Sauerstoffbedarf bei der Mineralisierung auf. Inwieweit hierdurch jedoch die Ökotoxizität günstig beeinflusst wird, lässt sich nicht abschätzen. Auch sind noch keine Erkenntnisse in Hinblick auf langfristige Effekte in natürlichen Systemen vorhanden. Im Vergleich mit Streusalzen oder auch abstumpfenden Streumitteln wird für die Herstellung von Formiaten wesentlich mehr Primärenergie verbraucht und demzufolge werden mehr Treibhausgase freigesetzt. Zudem muss mit mindestens 6-8fach höheren Kosten gegenüber Kochsalz als Auftaumittel gerechnet werden. Inwieweit sich die Ökobilanz der Formiate unter Einbeziehung des Aufwandes für die Entsorgung insbesondere im Vergleich zu den abstumpfenden Streumitteln verbessert, konnte im Rahmen der Studie nicht abgeschätzt werden. Demgegenüber ist der Einsatz von Formiaten als Flugzeug- und Bewegungsflächenenteiser weiterhin zu begrüßen. Hier sind Formiate wichtige Ersatzstoffe für Flüssigenteiser (Glykole) und Harnstoff, die aufgrund der sehr hohen Nährstofffracht zu erheblichen Belastungen im Grund- und Oberflächenwasser (bis hin zur vollständigen Sauerstoffzehrung) geführt haben.

Hinsichtlich allgemeiner praktischer Empfehlungen für einen ökologischen Winterdienst lassen sich aus der vorliegenden Machbarkeitsstudie folgende Ansätze ableiten:

Durch eine Optimierung der Organisation des Winterdienstes und der Ausbildung des Betriebspersonals lässt sich die Effizienz, die in den vergangenen 20 Jahren erreicht wurde, weiter steigern.

Die flächendeckende Umsetzung des Konzeptes „differenzierter Winterdienst“, das eine abgestufte Verwendung von Streustoffen nach Straßen- und Wetterlage und eine dreistufige Einteilung des Straßennetzes nach Salzstreuung, Splittstreuung und Nullstreuung vorsieht, erscheint als geeignetes Instrument zur Optimierung des Winterdienstes. Ziel ist es, die Verwendung von Tausalz auf das notwendige Mindestmaß zu begrenzen.

Eine Einbeziehung der "Nullstreuung" bzw. des "weißen Winterdienstes" als ernstzunehmende Alternative sollte im kommunalen Bereich für untergeordnete Straßen in Betracht gezogen werden. Diese Empfehlung ergibt sich aus der Beobachtung, dass die Unfallhäufigkeit hierbei durch umsichtiges Fahren teilweise geringer ist als bei der Anwendung abstumpfender Streumittel, die eine größere Griffigkeit als gegeben vortäuschen.

Durch verstärkte mechanische Schneeräumung ("Schwarzräumen") wird oftmals ein befriedigendes Ergebnis erzielt und die nachfolgende Streuung mit Auftausalzen - sofern noch erforderlich - deutlich reduziert.

Durch konsequente Einführung der Feuchtsalzstreuung für Straßen und Fahrbahnen lässt sich die Salzmenge bei gleicher Wirkung gegenüber der Granulatstreuung halbieren. Weitere Einsparmöglichkeiten bestehen in der effektiven Nutzung von Witterungsvorhersagen und von neuen Dosierungstechniken, wie Thermosteuern.

Beim Einsatz von Streusalz ist durch eine effiziente Straßenentwässerung sicherzustellen, dass das Straßenbegleitgrün und das Grundwasser nicht beeinträchtigt werden. Die unvermeidbare Salzfracht ist nach ausreichender Verdünnung nicht problematisch für Kläranlagen und Vorfluter. Eine Erhöhung der Salzkonzentration im Trinkwasser aus Uferfiltrat ist nicht vermeidbar, im Vergleich zu anderen Salzeinleitungen jedoch unbedeutend.

Harnstoff sollte sowohl im kommunalen Winterdienst als auch im Flughafenbereich nicht eingesetzt werden, wenn eine vollständige Ableitung des belasteten Abwassers in eine kommunale Kläranlage mit Denitrifikationsstufe nicht gewährleistet wird. Der

Vertrieb von Harnstoff als "umweltverträgliches, weil salzfreies" Auftaumittel an Privathaushalte muss als Täuschung des Verbrauchers angesehen werden.

Die Begrenzung des Einsatzes von Splitt und Sand auf Geh- und Radwegen ermöglicht den Schutz der angrenzenden Grünstreifen vor Streusalz, ohne dass die im Straßenverkehr bekannten negativen Eigenschaften abstumpfender Streumittel (geringere Kraftschlusswerte, höhere Streudichten, Wegschleudern an den Straßenrand durch Verkehr, Entsorgung) in diesem Umfang auftreten. Gleichzeitig werden Geh- und Radwege "oberhalb des Randsteins" in der Regel schlechter entwässert als die angrenzenden Straßen, so dass es bei Salzstreuung eher zu einer Belastung des Straßenbegleitgrüns kommt als beim Einsatz von Streusalz auf der Straße.

Im Einzelfall kann die Verwendung abstumpfender Streumittel auch im Straßenbereich ökologisch sinnvoll sein, z.B. wenn wertvolle Baumbestände geschützt werden sollen oder besondere klimatische Verhältnissen (Umgebungstemperaturen $< -15^{\circ}\text{C}$) einen Einsatz von Streusalz nicht zulassen.

In der orientierenden Ökobilanz schnitt die Freiflächenheizung überraschend gut ab. Allerdings dürften die hohen Installationskosten die Anwendung auf sensiblen Bereichen (Treppen, Abgänge, Rampen) beschränken. Weitere neuere Technologien, wie glättebildungshemmende Straßenbeläge sollten ebenfalls weiterverfolgt werden.

Zur weiteren Optimierung bestehender Ansätze und Verfahren besteht ein nicht unbeträchtlicher Forschungsbedarf, u. a. zur weiteren Vertiefung und Verifizierung der durchgeführten orientierenden Ökobilanz (Staub, Entsorgungsproblematik etc.), zur Schadstoffbelastung von Altsplitt, zur Langzeitwirkung von Splitt (mechanische Schädigung angrenzender Vegetation) sowie hinsichtlich gesundheitlicher Aspekte (Feinquarzstaub). Um den Winterdienst bereits mit den bestehenden Mitteln insgesamt umweltfreundlicher, kostengünstiger und verkehrssicherer zu gestalten, bedarf es zunächst einer konsequenten Anwendung der differenzierten Salz- und Nullstreuung. Weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Rahmenbedingungen beinhalten eine Verstärkung der Öffentlichkeitsarbeit, des öffentlichen Verkehrsangebots, verkehrlenkende Maßnahmen, eine Veränderung des Fahrverhaltens, die wintergerechte Ausrüstung der Verkehrsmittel aber auch den Gebrauch passenden Schuhwerks durch die Fußgänger.

8 Quellenangaben

Alppivuori, K. e. a. (1995). The socio-economic effects of winter maintenance in the "Road Traffic in Winter" - programme. Finnra Research Reports (in Finnish) English Abstract: 78 S.

American Concrete Inst. Guide for making a condition survey of concrete in service. ACI 201.2R-92 Report 1992

Amrhein, C., J. E. Strong, et al. (1992). "Effect of Deicing Salts on Metal and Organic Matter Mobilization in Roadside Soils." Environ. Sci. Technol. **26**: 703-709.

AMS 1435 (Apr. 1995). Fluid, Generic, Deicing/Anti-Icing Runways and Taxiways. Aerospace Material Specification, The Engineering Society for Advancing Mobility Land, Sea, Air and Space (SAE International)

Anonym (1991). Highway deicing - Comparing salt and calcium magnesium acetate. TRB Special Report **235**:165 S. (U.S. Transportation Research Board).

Anonym (1997). Ecolabelling of Ice Combatting Agents - Criteria document, 6 February 1997 - 5 February 2000, Version 1.0, Nordic Ecolabelling: 11 S.

Anonym (1999). Grundlage für Umweltzeichenvergabe RAL-Bewegungsflächenenteiser für Flugplätze RAL-UZ 99, Jury Umweltzeichen: 6 S.

Anonym (1999). Richtwerte, Vorsorgewerte und Grenzwerte-Bedeutung für Landwirtschaft, Ernährung und Umwelt. Kongressband 1999. VDLUFA-Verlag Halle

Anonym (2000a). Einsatz von organischen Taustoffen für die Enteisung der Straßen, Wege und Fahrradbahnen in Ludwigshafen. Schreiben der Stadtverwaltung Ludwigshafen an das Umweltbundesamt vom 6.12.2000, 8 S.

Anonym (2000b). "Streusplitt - so gut wie neu." Baustoff-Recycling und Deponietechnik **16**(6): 46-47.

Anonym (2001a). Glatteisbekämpfung - Literaturdokumentation. Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau (IRB Verlag).

Anonym (2001b). Highway deicing and anti-icing for safety and mobility. Salt institut (www.saltinstitut.org).

Anonym (2001c). Webseite des Vereins der Deutsche Salzindustrie (<http://www.salzindustrie.de>).

Anspach, I. (1995). "Flugzeuge umweltschonend enteisen. Auf dem Flughafen München wird die verbrauchte Enteisungsflüssigkeit aufgefangen, aufbereitet und wiederverwendet." Umwelt (VDI) **25**(1/2): 24-25.

Arand, W. (1995). "Erfahrungen mit einem glättebildungshemmenden Füller." Strasse und Autobahn **46**(12): 696-707.

Assmann, G. (1999). "Ökologie contra Glatteis." Informationsdienst Wissenschaft: 5. S.

ASTM G31-72 (1999). "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals"

Augustin, K., H.-D. Gregor, et al. (1980). Streusalzbericht I. Berlin, Erich-Schmidt Verlag.

Badelt, H., K. Moritz, et al. (1999). Entwicklung eines vereinfachten Prüfverfahrens zur Ermittlung der Wirksamkeit von Tausalzen. Bergisch Gladbach/Inzell, Bundesanstalt für Straßenwesen, Außenstelle Inzell: 30 S. + Anhang.

Badelt, H., G. Pohle, et al. (1998). Entwicklung einer relativen Beurteilungsgröße der Tauleistung und Bestimmung der Wiederholbarkeit für Inzeller Tauleistungsmeßwerte. Inzell, Bundesanstalt für Straßenwesen, Außenstelle Inzell: 34 S. + Anhang.

Balder, H. und J. Nierste (1988). Ökologische Auswirkungen eines tausalzfreien innerstädtischen Winterdienstes. Pflanzenschutzamt Berlin, Umweltbundesamt 106 07 066, Texte 3/88, 69 S.

Blomqvist, G. und E.-L. Johansson (1999). "Airborne spreading and deposition of de-icing salt - a case study." The Science of the total Environment **235**: 161-168.

Boustead, I. (1994). Eco-profiles of the European Polymer Industry. Report: Polyvinyl-Chloride. A Report for APME, Brussels, April 1994

Breitenstein, J. (1995). Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit zur Bewertung des Tausalzverbrauchs. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - ." Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen bast: Verkehrstechnikheft V29

Breitenstein, J. (1996). Bewertung des Streusalzverbrauchs. Strasse und Autobahn **47**:68-73.

Brenner, M. V. und R. R. Horner (1992). "Effects of Calcium Magnesium Acetate (CMA) on Dissolved Oxygen in Natural Waters." Resources, Conservation and Recycling **7**: 239-265.

Brod, H.-G. (1993). Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt. Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen: 165 S.

Brod, H.-G. (1995). "Risiko-Abschätzung für den Einsatz von Tausalzen - Folgen für die Umweltmedien unter Berücksichtigung neuester Tendenzen." Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - bast (Verkehrstechnik Heft V 21): 60 S.

Cancilla, D. A., J. Martinez, et al. (1998). "Detection of Aircraft Deicing/Antiicing Fluid Additives in a Perched Water Monitoring Well at an International Airport." Environ. Sci. Technol. **32**: 3834-3835.

Ciglia, J.-P. (2000). Versuchsanlage zur Chlorid-Entfernung aus Trinkwasser in Colmar. Seiten 97-112 in AWBR Jahresbericht 2000. Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke Bodensee-Rhein.

CML (1992a). Environmental Life Cycle Assessment of Products. Band 1: Guide. Final Editor: R. Jeijungs. Centrum voor Milieukunde (CML), Leiden 1992

CML (1992b). Environmental Life Cycle Assessment of Products. Band 2: Backgrounds. Final Editor: R. Jeijungs. Centrum voor Milieukunde (CML), Leiden 1992

Commission, E. (1996). Technical Guidance Documents in Support of the Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for New Notified Substances and the Commission Regulation (EC) 1488/94 on Risk Assessment for Existing Substances, Part I: Risk Assessment for Human Health. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.

Demers, C. L. und R. W. j. Sage (1990). "Effects of Road Deicing Salt on Chloride Levels in Four Adirondack Streams." Water, Air and Soil Pollution **49**: 369-373.

Dietl, H. (2002). Persönliche Mitteilung vom 22.03.02 mit Anmerkungen zum Berichtsentwurf.

Drury, D. (1994). Formic Acid. in Kirk-Othmer, editor. Encyclopedia of Chemical Technology, Fourth Edition, S. 951-958, John Wiley & Sons, New York.

Durth, W. (1995). Kosten und Nutzen des Winterdienstes. Strasse und Autobahn **46**:505-509.

Durth, W., und P. M. Böhm. (1998). Winterdienst und Verkehrssicherheit auf Innerortsstraßen. Der Strassenwärter **93**:44-46.

Elsass, P. (2000). Die Versalzung des Grundwassers im südlichen Elsass. Seiten 123-132 in AWBR Jahresbericht 2000. Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke Bodensee-Rhein.

Faith-Ell, C. (2000). Environmental Management of Road Maintenance - with Emphasis on "Green Procurement". Stockholm, Kungl Tekniska Högskolan, Royal Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Div. of Land and Water Resources.

FGSV (Arbeitsstand September 2001). Kommentar und Empfehlung zur Handhabung Technische Lieferbedingungen für Streustoffe, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit.

FGSV (Entwurf vom 26.02.02). Technische Lieferbedingungen und Richtlinien für Streustoff des Winterdienstes (Entwurf TLStreu), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit.

Fritsche, U. et al. (1997). Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 3.08: EDV-Modell im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten. Darmstadt/Freiburg/Berlin/Kassel 1997

Frischknecht, R. et al. (1996). Ökoinventare für Energiesysteme. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. 3. Auflage. Bern 1996

Gallenkemper, B., M. Fritsche, et al. (1999). Behandlung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen aus öffentlichen Einrichtungen (Infrastrukturabfälle). Münster, Fachhochschule Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen: Labor für Abfallwirtschaft Siedlungswasserwirtschaft Umweltchemie (LASU), Institut für Abfall- und Abwasserwirtschaft GmbH: 150 S.

Gallenkemper, B., G. Hegemann, et al. (1999). Untersuchung von Rückständen aus Sinkkästen, Institut für Abfall- und Abwasserwirtschaft e. V.: 23 S. + Anhang.

Goetz, D. und W. Gläseker (1996). "pH4-stat-Verfahren zur Untersuchung der langfristigen Auslaugbarkeit von Mineralstoffen." Straße und Autobahn(5): 268-274.

Götzfried, F. (Südsalz GmbH). Persönliche Mitteilung vom 25.03.02 mit Kommentaren zum Entwurf des Abschlußberichtes

Götzfried, F. und Badelt, H.: Wirksamkeit verschiedener Tausalze. Unveröffentlichtes Manuskript 2002

Goldman, C. R. und F. S. Lubnow (1992). "Seasonal Influence of Calcium Magnesium Acetate on Microbial Processes in 10 Northern Californian Lakes." Resources, Conservation and Recycling 7: 51-67.

Habersatter, K. und Fecker, I. 1996. Ökoinventare für Verpackungen. Band I und II. Schriftenreihe Umwelt Nr. 250. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern

Hanke, H. (1993). Splitt im Strassenwinterdienst: Wiederaunahme und Entsorgung. Der Städtetag: S. 631.

Hanke, H. (1995). "Sparsamkeit als Devise. Forschungsergebnisse und Erfahrungen zum 'Differenzierten Winterdienst'." Entsorga - Magazin 14(7-8): 48-52.

Hanke, H. (1996). "Neue Technologien zur Steigerung der Effektivität des Strassenwinterdienstes." Städtetag 49(5): 370-373.

Hanke, H. (1998). "Winterdienst ohne Splitt: Umdenken bei Städten und Gemeinden." Städtetag 51(11): 767-771.

Hanke, H. und e. al. (1998). Winterdienst auf Radwegen, Winterdienst auf Fußgängerquerungen, Verband Kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung: 20 S.

Hanke, H. (2002). Persönliche Mitteilungen und Kommentare zum Entwurf des Abschlußberichtes vom 10.04.02

Hassel, D. et al. (1995). Abgas-Emissionsfaktoren von Nutzfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland für das Bezugsjahr 1990. Im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin.

Henry, J. J. C. et al. (1991). Highway Deicing - Comparing Salt and Calcium Magnesium Acetate. Washington, D.C., Committee on the Comparative Costs of Rock Salt and Calcium Magnesium Acetate (CMA) for Highway Deicing / Transportation Research Board, National Research Council Washington, D.C.: 158 S.

Hootman, R. G., P. D. Kelsey, et al. (1994). "Factors Affecting Accumulation of Deicing Salts Around Trees." Journal of Arboriculture **20**(3): 196-201.

Horner, R. R. und M. V. Brenner (1992). "Environmental Evaluation of Calcium Magnesium Acetate for Highway Deicing Applications." Resources, Conservation and Recycling **7**: 213-237.

Huijbregts und Seppälä (2000). Towards Region-Specific European Fate Factors for Airborne Nitrogen Compounds Causing Aquatic Eutrophication. International Journal for LCA **5**(2) 65-67, 2000.

Hutterer, E. (1995). Morphologie und Salzgehaltsverteilung in einem streusalzbelasteten Baggersee. GWf - Wasser/Abwasser (Das Gas- und Wasserfach) **136**: 74-77.

Ihs, A. (2000). Kemisk halkbekämpning. Vinterdrift vägar, gator, järnvägar och flygfält. Göteborg, Chalmer Lindholmen Högskola: 78-86 (auf Schwedisch).

Jülich, W. (2000). Juristisches um die Salzproblematik aus niederländischer Sicht. Seiten 133-142 in AWBR Jahresbericht 2000. Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke Bodensee-Rhein.

Kemp, R. und S. E. Keegan (1993). Calcium Chloride. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. B. e. a. Elvers. Weinheim, VCH-Verlag. **A4**: 547 ff.

Klinger, H. und H. Barth (1994). "Entwicklung einer Sandrecyclinganlage für Kläranlagen." Korrespondenz Abwasser **1**: 48-53.

Klöpffer, W.; Renner, I.; Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umweltkategorien. Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich (C.A.U.), Dreieich 1994

Knirsch, T. (Rheinische Provinzial- Basalt- und Lavawerke). Persönliche Mitteilung vom 31.03.02 mit Kommentaren zum Entwurf des Abschlußberichtes

Kölle, W. (2001). Wasseranalysen - richtig beurteilt. Weinheim, Wiley-VCH.

Koryak, M., L. J. Stafford, et al. (1998). "The Impact of Airport Deicing Runoff on Water Quality and Aquatic Life in a Pennsylvania Stream." Journal of Freshwater Ecology **13**(3): 287-298.

Kurzmann, P. (1993): Fortschritte beim Korrosionsschutz, Rostschutz durch Autolacke. Polizei verkehr technik, 12

Legret, M. und C. Pagotto (1999). "Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway." The Science of the total Environment **235**: 143-150.

Leppänen, A. (1995). Finish Road Administration: Final results of the Road Traffic in Winter project. Finnish Road Administration, Helsinki.

Meessen, J. H. und H. Petersen (1996). Urea. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. B. e. a. Elvers. Weinheim, VCH-Verlag. **A27**: 333ff.

Metzner, G. (1998). Abbauversuche mit Enteisungsmitteln. München, Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft - Seminar "Enteisungsabwasser von Flugplätzen" am 28./29.10.1998 in München.

Meyer-Spasche, H. (1988). Sanierung umweltgeschädigter Straßenbäume und Böden, sowie Ermittlung geeigneter Schutzmaßnahmen bei Neupflanzungen. Teil 1: Bodenkunde. Naturschutz und Landschaftspflege in Hamburg **H 21**:1-145.

Moritz, K. (1999). "Umweltauswirkungen abstumpfender Streustoffe im Winterdienst - Literaturanalyse." Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - bast (Verkehrstechnik Heft V 66): 83 S.

Moritz, K. 2000. Straßenwinterdienst - Abstumpfende Streuung. Straße + Autobahn **51**:123-128.

Nicolas, J.-P. (1996). "Glättebildung durch Überfrieren - Schwellenwerte der Oberflächenfeuchte auf Fahrbahnen." Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - bast (Verkehrstechnik Heft V 36).

Norrström, A. C. und G. Jacks (1998). "Concentration and fractionation of heavy metals in roadside soils receiving de-icing salts." The Science of the Total Environment **218**: 161-174.

Novotny, V., D. Muehring, et al. (1998). "Cyanide and Metal Pollution by Urban Snowmelt: Impact of Deicing Compounds." Wat. Sci. Tech. **28**(10): 223-230.

Öberg, G., K. Gustafson, und L. Axelson. 1991. Effektivare halkbekämpning med mindre salt,. MINSALT-projektets huvudrapport (auf Schwedisch).

Patyk, A., Reinhardt, G. (1997). Düngemittel-, Energie- und Strombilanzen. Vieweg Umweltwissenschaften, Braunschweig.

Persson, K., und A. Ihs (1998). Kaliumklorid i vinterväghållningen. Mitteilungen des VTI, Schwedisches Strassen- und Transportforschungsinstitut (auf Schwedisch)

Pichler, W. (1997): Gedanken zu einer gesamtwirtschaftlichen Beurteilung des Winterdienstes. Strassen- und Tiefbau 41, 12, S. 5-8

Porst, F. (1999). "Auswirkungen der Ableitung von Auftausalzen an Bundesautobahnen und Bundesfernstrassen auf Flora und Fauna in Regenbecken und Gewässern." Schriftenreihe der Thueringer Landesanstalt fuer Umwelt 34: 37.

Reutemann, W. und H. Kieczka (1989). Formic Acid. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. B. et all. Elvers. Weinheim, VCH-Verlag. **A12**.

Rice, P. J., T. A. Anderson, et al. (1997). "Evaluation of the Use of Vegetation for Reducing the Environmental Impact of Deicing Agents." 162-176.

Ruge, U. (1972): Ursachen des Strassenbaumsterbens und mögliche Gegenmaßnahmen. Garten und Landschaft 82 (10). 456-458

Schäfer, K. (1998). Winterdienst auf Flughäfen - Einsatz neuer Technologien / Was bedeutet Winterdienst am Flughafen Frankfurt? München, Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft - Seminar "Enteisungsabwasser von Flugplätzen" am 28./29.10.1998 in München.

Schließl, P., und D. Heinz. (2001). Untersuchung von Möglichkeiten zur Förderung von Recyclingbauprodukten für den Hochbau durch das Umweltzeichen. Abschlußbericht F+E 29795381, UBA-Texte 24/01, Umweltbundesamt, Berlin.

Schlemmer, F.-J. (2001). "Einfluss eines eishemmenden Verglimit-Zusatzes auf die bautechnischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten." Straße und Autobahn 1: 12-17.

Schönfeld, A. L. A. (1994). Umweltverträglichkeit von Mineralstoffen, Teil: Wasserwirtschaftliche Verträglichkeit. FGSV-Arbeitspapier Nr. 28/1 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln - Berlin.

Seeger, M., W. Otto, et al. (1990). Magnesium Compounds. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. B. e. a. Elvers. Weinheim, VCH-Verlag. **A15**.

Speth, O. (1998). "Internationaler Strassenwinterdienstkongress in Lulea, Schweden (Xth International Road." Strasse und Autobahn 49(7): 365-372.

Statistisches Bundesamt. (2001). Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Basisdaten und ausgewählte Ergebnisse. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

Stein, A., F. W. Günthert, et al. (1998). "Sandabscheideanlagen (Sandfänge und Sandfaggutaufbereitungsanlagen)." Korrespondenz Abwasser 45(3): 535-549.

Stöckert, R. (2001). Intensivierte mechanische Schneeräumung. Straßenverkehrstechnik 1:7-10.

Stöver, H.-J. (1998). Entwicklung des Verfahrens zum Schutz der Flugzeughbewegungsflächen (BF) vor Vereisung bei der Bundeswehr. München,

Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft - Seminar "Enteisungsabwasser von Flugplätzen" am 28./29.10.1998 in München.

Strong-Gunderson, J. M., S. Wheelis, et al. "Degradation of High Concentrations of Glycols, Antifreeze, and Deicing Fluids." *Microbial Processes for Bioremediation*, S. 265-271. **Jahr?**

Tegethof, U. (1998). "Straßenseitige Belastungen des Grundwassers." Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - bast (Verkehrstechnik Heft V 60): 34 S.

Trantolo, D. J., J. D. Gresser, et al. (1990). "The Feasibility of a Residue Biomass Bioconversion Process to Prepare Calcium Magnesium Salt Acetate Deicing Salt." Resources, Conservation and Recycling **4**: 215-232.

Verband der Chemischen Industrie e.V. Firmenhandbuch Chemische Industrie 1998/99 Bundesrepublik Deutschland, Econ Verlag Düsseldorf.

FGSV (1980). Merkblatt über Hochofenschlacken im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: 8 S.

FGSV (1991). Grundsätze für die umweltverträgliche Verwendung und Wiederverwendung von Straßenbaustoffen. FGSV 752, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: 16 S.

FGSV (1995). Merkblatt über die Verwendung von Hüttensand in Frostschutz- und Schotterertragsschichten. FGSV 628, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: 12 S.

FGSV (1995). Technische Lieferbedingungen für Recycling-Baustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel. FGSV 621, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: 10 S.

FGSV (1995). Technische Lieferbedingungen für Stahlwerkschlacken im Straßenbau. FGSV 632, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: 10 S.

FGSV (1999). Merkblatt über die Verwendung von Eisenhüttenschlacken im Straßenbau. FGSV 634, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: 20 S.

FGSV (1999). Merkblatt über die Verwendung von Gießereireststoffen im Straßenbau. FGSV 641, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: 8 S.

FGSV (2000). Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (Gesteinskörnungen und Werksteine im Straßenbau). FGSV 613, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: 48 S.

Viskari, E. L. und L. Kärenlampi (2000). "Roadside scots pine as an indicator of deicing salt use - a comparative study from two consecutive winters." Water, Air and Soil Pollution **122**: 405-419.

Wagner, F.-J. (1989). "Güteanforderungen an Streustoffe zur Glättebekämpfung im Straßenwinterdienst." Straße und Autobahn(2): 41-45.

Wagner, F.-J. L. A. und H. L. A. Hanke (1997). Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen, Teil: Winterdienst. Köln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.: 27 S.

Wang, J. S., P. M. Huang, et al. (1991). "Kinetics of the desorption of mercury, from selected freshwater sediments as influenced by chloride." Water, Air, and Soil Pollution **56**: 533-542.

Westphal, G., G. Kristen, et al. (1993). Sodium Chloride. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. B. e. a. Elvers. Weinheim, VCH-Verlag. **A24**: 317 ff.

Wichmann, K., und A. Grube. 2000. Wasserressourcen und Grundwasserversalzung in Norddeutschland. Fachliche Berichte Hamburger Wasserwerke **19**:37-45.

Zamhöfer, S., und B. Schmidt. 2001. Recycling von Straßenkehricht - Möglichkeit der Nutzung als Streugut nach Schwermetallentfrachtung. UWSF-Z Umweltchem Ökotox **13**:145-152.

9 Gesetze und Richtlinien

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen vom 17. Mai 1999 (VwVwS). Bundesanzeiger (51. Jahrgang), 29. Mai, 1999

ATV-Arbeitsblatt A115: Einleitung von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage. Abwassertechnische Vereinigung e.V., Ausgabe 10/1994

BBodSchG - Bundes-Bodenschutzgesetz Vom 17. März 1998 (BGBl. I 1998 S. 502, 2001 S. 2331).

DIN EN 933-4: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 4: Bestimmung der Kornform-Kornkennzahl

DIN EN 1097-2: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung

DIN ISO 11075 (Entwurf 10-1995). Newtonsche Flüssigkeiten für Enteisung/Vereisungsschutz von Luftfahrzeugen, ISO-Typ I.

DIN ISO 11078 (Entwurf 10-1995). Nicht-newtonsche Flüssigkeiten für Enteisung/Vereisungsschutz von Luftfahrzeugen, ISO-Typ II.

DIN EN ISO 14040 (August 1997): Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen.

DIN EN ISO 14041 (1998): Umweltmanagement – Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz

DIN EN ISO 14042 (Juli 2000): Umweltmanagement – Ökobilanz - Wirkungsabschätzung

DIN EN ISO 14043 (Juli 2000): Umweltmanagement – Ökobilanz - Auswertung.

DIN 2000 (Oktober 2000): Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen - Technische Regel des DVGW

DIN EN ISO 14024 (Februar 2001): Umweltkennzeichnung und -deklarationen, Umweltkennzeichnung Typ I, Grundsätze und Verfahren

Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz - AbwAG), Fassung vom 3. November 1994 (BGBl. I S. 3370; 1996 S. 1690; 1997 S. 582; 1998 S. 2455, 2001 S. 2331)

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen KrW-/AbfG - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom 27. September 1994 (BGBl. I 1994 S. 2705; 1996 S. 1354; 1998 S. 509, 1485, 2455; 2000 S. 632; 27.7. 2001 S. 1950, 2001 S. 2331; S. 2785 Art. 57)

Klärschlammverordnung (AbfKlärV) Vom 15. April 1992 (BGBl. I 1992 S. 912; 1997 S. 446)

LAGA (11/1997): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen-Technische Regeln

Richtlinie 75/440/EWG des Rates vom 16. Juni 1975 über die Qualitätsanforderungen an Oberflächenwasser für die Trinkwassergewinnung in den Mitgliedstaaten (ABl. Nr. L 194 vom 25.07. 1975 S. 26; Änderungen: 79/869/EWG - ABl. Nr. L 271 vom 29.10. 1979 S. 44; 91/692/EWG - ABl. Nr. L 377 vom 31.12. 1991 S. 48)

Richtlinie des Rates 80/778/EWG vom 15. Juli 1980 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (ABl. Nr. L 229 vom 30.8. 1980 S. 11) Änderungen: 81/857/EWG - ABl. Nr. L 318 vom 7.11. 1981 S. 18; 89/427/EWG - ABl. Nr. L 201 vom 14.7. 1989 S. 53; 91/692/EWG - ABl. Nr. L 377 vom 31.12. 1991 S. 48), gemäß RL 98/83/EG gültig bis 12/2003

Richtlinie 98/83/EG des Rates vom 3. November 1998 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch - Trinkwasser-Richtlinie - (ABl. Nr. L 330 vom 5.12. 1998 S. 32; ber. ABl. Nr. L 45 vom 19.2. 1999 S. 55)

TRGS 900 "Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz" Ausgabe Oktober 2000 (BArbBl. Heft 10/2000 S. 34-63) mit Änderungen und Ergänzungen BArbBl. Heft 4/2001 S. 56

TRGS 901 "Begründungen und Erläuterungen zu Grenzwerten in der Luft am Arbeitsplatz" Ausgabe April 1997 (BArbBl. Heft 4/1997 S. 42-55) mit Änderungen und Ergänzungen BArbBl. Heft 4/2001 S. 56

TASl: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) Vom 27. Februar 1986 (GMBl. S. 95, ber. S. 202)

Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall). Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz vom 14. Mai 1993, Bundesanzeiger S. 4967

Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer AbwV - Abwasserverordnung Fassung vom 20. September 2001 (BGBl. I Nr. 49 vom 28.09. 2001 S. 2240)

Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch TrinkwV 2001 - Trinkwasserverordnung - vom 21. Mai 2001 (BGBl. I Nr. 24 vom 28.5. 2001 S. 959)

Wasserhaushaltsgesetz - WHG Fassung vom 12. November 1996 (BGBl. I S. 1695; 1998 S. 832, 2455; 2000 S. 632, 2048; 27.7. 2001 S. 1950, 2001 S. 2331)

WHO: Guidelines für drinking water quality, 2nd ed. Vol. 1: Recommendation (1993) and Vol. 2: Health criteria and other supporting information (1996), World Health Organisation Geneva

10 Anhang: Liste der kontaktierten interessierten Kreise

Themenkreis Formiate			
Hydro Chemicals Deutschland	Buschhausener Str. 153 46003 Oberhausen	Herr Frankrone, Teilnahme Workshop	Tel.: 0208-85999-66 Fax: 0208-85999-70 Michael.frankrone@hydro.com Www.hydrochemicals.de
Clariant GmbH	84504 Burgkirchen	Herr Stankowiak, Herr Dr. Dietl, Teilnahme Workshop	Tel.: 08679-75280 Achim.stankowiak@clariant.co harald.dietl@clariant.com http://surfactants.clariant.com
Nola Chemie GmbH	Breniger Str. 42 53913 Swisttal- Heimerzheim	Herr Claas	Tel.: 06173/937314 Fax: 02254-81631 m.claas@costenoble.de
Socomor GmbH Finishing Technologies Deutschland	Schmaedelstr. 22, 81245 München		Tel. 089-889-19815 http://socomor.com
Themenkreis Streusalz			
Verein Deutsche Salzindustrie VDS	53115 Bonn Herwarthstraße 36	Dieter Krüger	Tel.: 0228-604730 Fax: 0228-6047310 info@salzindustrie.de www.salzindustrie.de
Südsalz GmbH	Saline 5 74177 Bad Friedrichshall	Dr. Götzfried, Teilnahme Workshop	Tel.: 07136-929541 Fax: 07136-960-159 franz.goetzfried@suedsalz.de
European Salt Producers Association (ESPA)			www.eu-salt.com
Salt Institute (SI, USA)			www.saltinstitute.org
Themenkreis abstumpfende Streumittel			
Kontaktaufnahme mit 26 Zeichennehmer RAL-ZU 13			
Bundesverband Baustoffe Steine und Erden	Kochstraße 66 10969 Berlin		Tel.: 030- 726-1999-0 Fax: 030- 726-1999-12 Info@bvbaustoffe.de www.baustoffindustrie.de
Bundesverband Naturstein-Industrie e.V	Annastraße 67- 71 50968 Köln		Tel. 0221- 934674-60 Fax: 0221- 934674 -64 BV-Naturstein@netcologne.de www: http://www.naturstein- netz.de/bv-naturstein

Rheinische Provinzial-Basalt- und Lavawerke GmbH&Co.oHG Zentrallaboratorium	56653 Wasserbach	Herr Thomas Knirsch, Teilnahme Workshop	Tel.: 02636-929541 Fax: 02636-923372 thomas.knirsch@t-online.de
AB Umwelttechnik GmbH Streusplitt- recycling)	D-255566 Lägerdorf	Herr Backsen	Tel. 04828-97-97-0 Jens.Backsen@abu-laegerdorf.de
Abwassertechnische Vereinigung ATV	Theodor-Heuss- Allee 17 53773 Hennef	Sinkkästen- und Sandfangrück- stände	Tel.: 02242-872-0 Fax: 02242-872-135
Themenkreis Winterdienst			
Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)	Brüderstraße 53 51427 Bergisch Gladbach	Herr Dr. Breitenstein	Tel.: 02204/43- 0 Fax: 02204/43-673 Info@bast.de http://www.bast.de/
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW)	Dienstgebäude Invalidenstraße 44 10115 Berlin		Tel. 030/2008-0 Fax: 030/2008-1920 oder 1922 buergerinfo@bmvbw.bund.de http://www.bmvbw.de/
Forschungsgesell- schaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) e.V.	Konrad- Adenauer-Straße 13 50996 Köln		Tel.: (0221) 93 58 3-0 Fax: (0221) 93 58 373 E-Mail: koeln@fgsv.de http://www.fgsv.de
Verband Kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e.V.	Brohler Str. 13 50968 Köln	Herr Dr. Schröter 0221/3770390 schroeter@vks- koeln.de	Tel.: 0221/ 3770 -385 oder -395 Fax: 0221/ 3770 -371 http://www.vks-koeln.de/
Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen	Wilhelmstr. 10 65185 Wiesbaden	Herr Dr. Hanke (Vorsitzender Fachausschuss „Winterdienst“), Teilnahme am Workshop	Tel.: 0611-366-3301 Fax: 0611-366-3232 h.hanke.hlsv@hsvv.hessen.de
Technische Universität Darmstadt Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik	Petersenstraße 30 64287 Darmstadt	Prof. Dr.-Ing. Manfred Boltze	Tel: 06151 / 16-2025 Fax: 06151 / 16-4625 fgvv@verkehr.tu-darmstadt.de boltze@verkehr.tu-darmstadt.de
Swedish National Road and Transport Research Institute (Schweden)		Jan Ölander Gudrun Öberg Charlotta Feith	www.vti.se

Städtischer Winterdienst (von 54 angeschriebenen Kommunen)			
Eigenbetrieb Abfallwirtschaft und Stadtreinigung der Stadt Darmstadt	Niersisiner Str. 6 64295 Darmstadt	Herr Kiefer	Tel.: 06151/ 133304
Stadt Esslingen a. N.		Herr Baumann	Tel.: 0711 / 3512-2559 Horst.baumann@esslingen.de
Frankfurter Entsorgungs- und Service GmbH	Weidenbornstr. 40 60389 Frankfurt	Herr Braunberger	Tel.: 069 / 22-37628 Straßenreinigung@fes- frankfurt.de
Dienstleistungs- betrieb der Stadt Marburg	Gisselberger Str. 33 35037 Marburg	Herr Gärtner	Tel.: 06421 / 201-685 Herbert.gaertner@marburg- stadt.de
Stadt Biberach a. d. R. Baubetriebsamt		Herr Merkle	Tel.: 07351 / 51-597 Mmerkle@Biberach-Riss.de
Stadtverwaltung Regensburg - Amt für Abfallentsorgung, Straßenreinigung und Fuhrpark		Roland Herr Kappler	Tel.: 0941-507-2707
Entsorgungsbetriebe Worms	Hohenstaufenring 2 67547 Worms	Herr Schneider	Tel.: 06241-910080 EBW=-worms@-online.de
Berliner Stadt- reinigungsbetriebe	Ringbahnstr. 101-103	Herr Björn Weiß	Tel. 030-7592-2771 Fax: 030-7592-4403 Umweltschutz@bsr-online.de
Finnish Road Administration (Finnland)	P.O.Box 33, FIN- 00521 Helsinki Finnland		Tel.: +358 (0)204 22 11 Fax: +358 (0)204 22 2202
Themenkreis Flughäfen			
Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrs- flughäfen (ADV)	Postfach 230462 70624 Stuttgart	Herr Schwäke	Tel.: 0711-948-4309 Fax: 0711-948-4746
Kontaktaufnahme mit 17 internationalen Verkehrsflughäfen			
Luftfahrt-Bundesamt	Hermann-Blenk- Str. 26, 38108 Braunschweig,		Tel. 0531-2355-0 Fax 0531-2355-710 http://www.lba.de/www.lba.de
Deutscher Verkehrs- sicherheitsrat e.V	Bahnhofsplatz 16 53222 Bonn		Tel. 0228/4 00 01-0 Fax. 0228/4 00 01-67 dvr-info@dvr.de. http://www.dvr.de/www.dvr.de

Sonstige kontaktierte Adressen			
Stadtwerke München GmbH	Hans-Jensen-Weg 10 80287 München	Herr Geier	089-2361-0 www.swm.de
Verein Deutscher Zementwerke e.V. Forschungsinstitut der Zementindustrie	Tannenstr. 2 40476 Düsseldorf	Anfrage Korrosion	Tel. 0211/45781 Fax. 0211/4578296