

# **Streusalz: Auswirkungen auf die Stadtbäume und Gegenmassnahmen**

## **Literaturstudie**

Chur, 11.November 2013

**Verfasser:**

Dr.Rudolf Zuber, dipl. Forsting. ETH/SIA

Büro für forstliche Beratung und Planung,Teuchelweg 2, CH-7000 Chur

+41 (0)81 353 53 77 [ruedi.zuber@spin.ch](mailto:ruedi.zuber@spin.ch)

Im Auftrag der VSSG Vereinigung Schweizerischer Stadtgärtnereien und Gartenbauämter, CH-8802 Kilchberg

# Inhalt

	Seite
<b>1. Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1 Bedeutung der Stadtbäume	4
1.2 Umgang mit Streusalz im Rückblick	4
<b>2. Auswirkungen von Streusalz auf die Strassenbäume</b>	<b>7</b>
2.1 Streusalz schädigt die Bäume durch direkten Kontakt	7
2.1.1 Ausbreitung des Salzes	7
2.1.2 Orte des Eindringens in das Blatt bei direktem Kontakt	7
2.1.3 Mechanismen der Schädigung	8
2.1.4 Abtötung von Knospen und Rindengeweben	9
2.2 Streusalz verändert den Boden und den Nährstoffhaushalt	10
2.2.1 Wege des Streusalzes vor der Versickerung im Boden	10
2.2.2 Eintrag beim Abbau von Pflanzenteilen	10
2.2.3 Transport im Boden	11
2.2.4 Ionentauscher	12
2.2.5 Kationenadsorption	13
2.2.6 Zusammenfassung	14
2.2.7 Folgerungen für Natrium	14
2.2.8 Anionenadsorption	15
2.2.9 Folgerungen für Chlorid	16
2.2.10 Auswirkungen auf das Ökosystem	16
2.3 Streusalz schädigt die Bäume über den Stoffwechsel	18
2.3.1 Aufnahme von Stoffen durch die Wurzeln	18
2.3.2 Transport in der Pflanze und Aufnahme in die Blätter	20
2.3.3 Reaktion der Pflanze auf Salzbelastung	21
2.3.3.1 Dehydratationsstress	21
2.3.3.2 Ionenstress	22
2.3.4 Schäden durch hohe Salzbelastung	25
2.3.4.1 Versorgungsnotstand	25
2.3.4.2 Beeinträchtigung der Wachstumsvorgänge	27
2.3.4.3 Absterbesymptome	27
2.3.4.4 Ökologische Auswirkungen	28
2.3.5 Kumulative Wirkungen	29
2.4 Kreislauf der Salze zwischen Baumkrone und Substrat	30
2.5 Salztoleranz	31
2.5.1 Glykophyten und Halophyten	31
2.5.2 Reaktionsmechanismen	32
2.5.3 Salztolerante Baumarten	34
2.5.4 Anpassungserscheinungen	39
2.5.4 Grenzwert für NaCl	39
<b>3. Andere Einflüsse auf Strassenbäume</b>	<b>43</b>

	Seite
<b>4. Einflüsse von Streusalz auf die Gewässer</b>	<b>46</b>
<b>5. Haftungsrechtliche Fragen</b>	<b>50</b>
<b>6. Alternativen zum Streusalz-Trockenverfahren</b>	<b>53</b>
6.1 Bedürfnisse	53
6.2 Rechtliche Vorgaben	53
6.3 Abstumpfende Mittel	54
6.3.1 Splitt	55
6.3.2 Sand	57
6.3.3 Blähton	57
6.4 Alternative Auftaumittel	58
6.4.1 Allgemeines	58
6.4.2 Calciumchlorid	60
6.4.3 Magnesiumchlorid	62
6.4.4 Harnstoff	62
6.4.5 Calcium-Magnesium-Acetat	63
6.4.6 Safecote	64
6.4.7 SnowFree	65
6.5 Kombinierte Einsatzmittel	66
6.5.1 Splitt/Salz und Sand/Salz	66
6.5.2 Ökotau und Liapor Tau	66
6.5.3 Stop Gliss Bio	67
6.6 Feuchtsalz-Verfahren	68
6.7 Flüssig-Verfahren (Sole)	70
6.8 Vorbeugende Streuung	71
<b>7. Empfohlene Massnahmen (Zusammenfassung)</b>	<b>73</b>
7.1 Umweltschonender Winterdienst	73
7.2 Differenzierter Winterdienst	74
7.3 Bauliche Massnahmen	76
7.4 Auswahl geeigneter Baum- und Straucharten	76
7.5 Reduktion von Stress für Bäume und Sträucher	77
7.6 Möglichkeiten im Zusammenhang mit Streusalz	78
<b>Verwendete Literatur</b>	<b>80</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Bedeutung der Stadtbäume

Freude am Schönen, das Anlegen von Lustgärten und Parks nach ausländischen Mustern, Neugierde und Experimentierfreudigkeit hinterliessen in den Bildern zahlreicher Städte ihre Spuren. Früher wurden exotische Bäume und Sträucher vor allem aus botanischen Versuchsgärten bezogen oder stellten Mitbringsel von „Studienreisen“ dar. Heute verfügen Gärtnereien und Baumschulen über eine grosse Auswahl fremdländischer Holzgewächse. Was wir als Zierde älterer Villen und gepflegter Anlagen oder als dendrologische Bereicherung empfinden, widerspiegelt gleichsam den Zeitgeist vergangener Jahrhunderte bis in die jüngste Gegenwart. (Bruderer/Zuber, 1991; Löbel, 2011)

Nicht zuletzt wegen der Freude am Ästhetischen erhielt die Förderung des Stadtgrüns seit etwa Mitte des 18. Jahrhunderts neue Impulse. Entsprechend den verschiedenen Funktionen werden auf Plätzen und an Strassen Bäume gepflanzt und gepflegt. Die Gestaltung mit Pflanzen zeigte denn auch ihre Wirkung.

In Anbetracht der heutigen Situation und der Bedürfnisse hat das Stadtgrün neben ästhetischen auch umfassende städtebauliche und grünpolitische Aufgaben zu erfüllen. Von Bedeutung sind insbesondere die Verkehrslenkung, strassenräumliche und städtebauliche Gliederung, bewusste Prägung der Stadtgestalt, Filterung von staub- und gasförmigen Immissionen, Dämpfung von Lärm, Erhöhung der assimilationsfähigen Biomasse, Temperaturabsenkung durch Beschattung, Erhöhung der Luftfeuchtigkeit, Produktion von Sauerstoff, Förderung der Biodiversität, Wohlbefinden und psychologische Effekte. (Jost, 2008; Bauverwaltung Kreuzlingen, 2010; GALK, 2008; Stadtgärtnerei Basel, 2010)

Im Vergleich zu natürlichen und naturnahen Standorten ist der Stadtbaum im urbanen Freiraum und meist befestigten Umfeld enormen Belastungen ausgesetzt. Eine dieser Belastungen ergibt sich aus dem Winterdienst, namentlich durch die Ausbringung von Auftausalzen.

## 1.2 Umgang mit Streusalz im Rückblick

Das Thema Streusalz und dessen Auswirkungen auf die Vegetation haben in Mitteleuropa seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts an Aktualität zugenommen. Beleg dafür sind die zahlreichen Forschungsberichte, Medienberichte, politischen Vorstösse, Verordnungen, technischen und amtlichen Weisungen.

Besonders gut erkennbar sind Verbräunungen der Nadeln und Blätter entlang der Strassen ausserorts infolge von Gischt oder innerorts entlang von Gartenhecken infolge von Gischt und Pflugschneeablagerungen. Solche Bilder entstehen vor allem nach einem oder mehreren schneereichen und kalten Wintern mit vermehrter Streusalzausbringung. Ähnliche Situationen wiederholen sich immer wieder in unregelmässigen Abständen. **Die Reaktionen in den Medien und allfällige politische Vorstösse beziehen sich in erster Linie auf das äusserlich eindeutig Erkennbare** und weniger auf das, was sich nachher im Boden und im ganzen Ökosystem auf teils dramatische Weise abspielt.

**Auch ohne Streusalzeintrag stehen sehr viele Stadtbäume unter Dauerstress.** Die Zusammenhänge zwischen Ursachen und Wirkungen sind aber in der Regel ziemlich kompliziert und selten monokausal zu erklären.

Die Auswirkungen des Streusalzeintrags auf den Boden und die Pflanze sowie die daraus entstehenden Rückkoppelungen werden in der Öffentlichkeit im allgemeinen kaum wahrgenommen. Auch gegenüber anderen Einflüssen auf die Stadtbäume ist die Bevölkerung wenig sensibilisiert. Die Sicherheit auf der Strasse und die unbegrenzte Benützbarkeit der Verkehrsträger scheinen in der Regel Vorrang zu haben.

Der Winterdienst hat zweifellos in den vergangenen 50 Jahren eine Entwicklung durchgemacht. Er sah sich dabei dem Verlangen der Strassenbenützer nach jederzeit ausreichender Sicherheit ausgesetzt, und dies beinahe unabhängig von der Kostenfrage. (Ellinghaus/Steinbrecher, 2004) Auf der anderen Seite wurden die Entscheide der verantwortlichen Stellen beeinflusst durch die wissenschaftlichen Erkenntnisse, die gesetzlichen Vorschriften wie auch die Verbesserung der Technik.

In der Schweiz können verschiedene **zeitliche Abschnitte** unterschieden werden:

### 1955-1982

Zunahme des Strassenverkehrs, **Beginn des systematischen Streusalzeinsatzes im Winter** (ab etwa 1955), wobei es sich vorwiegend um NaCl handelt; **stetige Zunahme der ausgebrachten Mengen**; teilweise – vor allem in höheren Lagen – wurde dem NaCl auch CaCl<sub>2</sub> oder MgCl<sub>2</sub> beigemischt, zudem kam versuchsweise Harnstoff zum Einsatz; ganz beachtliche Mengen Streusalz auch auf Trottoirs und Fusswegen, wo vor allem von Hand gestreut wurde; zunehmende Sensibilisierung der Bevölkerung; Forschungsprojekte betreffend Auswirkungen auf die Vegetation, umfangreiche chemische Nadel- und Blattanalysen als Beweismittel, Untersuchung der Salzempfindlichkeit der verschiedenen Baum- und Straucharten; Untersuchung der Auswirkungen auf den Boden; **Zusammenhang zwischen Streusalz und Schädigung der Bäume eindeutig nachgewiesen** (Joos Reimer, 2005)

### 1983-1987

Vorübergehende Verdrängung des Themas durch die öffentlichen Debatten über die Kronenverlichtungen bei den Waldbäumen (Waldsterben); Erweiterung der ökologischen Erkenntnisse durch Forschungsprojekte zu Einflüssen von Immissionen auf den Wald, wobei Streusalz da und dort als ein Randthema mitberücksichtigt wurde; Untersuchung der ökologischen und physiologischen Zusammenhänge durch neue Experimente; weitere Nadelanalysen als Beweismittel; politische Vorstösse; **Bestätigung und Erweiterung der bisherigen Kenntnisse; Regelung des Einsatzes von chemischen Auftaumitteln im Bundesgesetz über den Umweltschutz und in der Eidg. Stoffverordnung StoV (1986)**

### 1988-1997

**Sparsamerer Einsatz von Auftaumitteln** aufgrund der Vorgaben in der StoV, dank verbesserter Technik und vermehrtem Umweltbewusstsein; Überarbeitung der Räumungskonzepte (differenzierter Winterdienst), **vermehrter Einsatz von Splitt als Abstumpfmittel** (Joos Reimer, 2005); Bedenken bei der "Entsorgung" und Wiederverwendung von Splitt; teilweise Verwendung von Gemischen aus abstumpfenden Mitteln und Auftausalz; teilweise Einsatz von Granulaten; **spürbarer Rückgang der Streusalzschäden**; 1990 in den USA erstmals Verwendung von Safecote als Ersatz für CaCl<sub>2</sub> in der Sole (Feuchtsalz-Methode)

Bericht "**Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entfernte Grundwasser**" (1997) und Bericht "**Salz- oder Splittstreuung im Winterdienst**" (1998, technische und ökonomische Studie) im Auftrag des Bundesamtes für Strassen (Astra)

### ab 1998

Aufgrund der Ergebnisse der Studien im Auftrag des Astra: **Rückkehr zur Streusalzpraxis**, teilweise technische Verbesserungen in der Ausrüstung der Sprühfahrzeuge (sparsamerer Einsatz von Streusalz), Propagierung Feuchtsalzmethode; erneut Nadelanalysen als Beweismittel; Bodenanalysen wegen der Komplexität der Zusammenhänge eher selten; **erneut deutliche Zunahme von Streusalzschäden durch direkten Kontakt wie auch über den Boden und die Stoffwechselfvorgänge** (Joos Reimer, 2005); **Zunahme der Schäden auch trotz reduziertem Austrag von Sulfaten, Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen** (als Folge des Verbots von Schweröl und des Obligatoriums von Abgaskatalysatoren für Motorwagen); 2005 Ersatz der StoV durch die **Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung ChemRRV**; Safecote (mit Rohrzucker-Melasse): seit 2002 in England, seit 2005/06 im Flüssig-Verfahren (Sole), 2008 erstmals in der Schweiz (Kt. BE); Stop Gliss Bio (mit  $MgCl_2$  imprägniert): ab 2009 in La Chaux-de-Fonds u.a.; **neue Erkenntnisse zur Verbesserung der Streutechnik; Propagierung des differenzierten Winterdienstes**. Der Anspruch auf uneingeschränkte Nutzung der Verkehrsflächen ist stark gestiegen. Die Nachteile eingeschränkter Nutzungen werden von verschiedensten Interessensvertretern auch wissenschaftlich untersucht und ansatzweise monetär dargestellt.

In den vergangenen Jahren wurden, in Abhängigkeit von Ort und Witterung, schätzungsweise 100 bis deutlich über 1000 g NaCl pro  $m^2$  Fahrbahn und Winter ausgestreut. Die Unterschiede zwischen Nationalstrassen und innerstädtischen Bereichen sind zum Teil beträchtlich, wobei die Belastungen in innerstädtischen Bereichen als deutlich grösser eingeschätzt werden. Dank der modernen Streutechnik besteht ein bedeutendes Einsparpotenzial.

Hauptlieferant des NaCl sind die Rheinsalinen in Pratteln. An die Schweizer Abnehmer wurden in den Jahren 2010–2012 etwa 300'000–350'000 t Auftausalz pro Jahr geliefert.

Die Klimaveränderung wirkt sich nachteilig auf die Stadtbäume aus. **Perioden extremer Trockenheit und Hitze im Sommer** stellen einen zusätzlichen Stressfaktor für die Bäume, welche in einem streusalzbelasteten Milieu wachsen müssen, dar. Zudem wird bei **vermehrtem Winterniederschlag im Frost-Taubereich** mehr Salz gestreut als bei trockenen und kalten Schneeverhältnissen. Die Belastung der Bäume ist damit kumulativ. Da es aber beim Klimawandel um noch bedeutend wichtigere Aspekte geht, wurde diese kumulative Wirkung von Streusalz und Trockenheit in der Öffentlichkeit bis heute nicht speziell thematisiert.

Die Suche nach Alternativen zum Streusalz resp. die Bemühungen zum sparsameren Umgang mit Salzen hängen nicht zuletzt auch zusammen mit den **enormen Schäden an Betonbelägen sowie an Kunstbauten aus Beton und Stahl**. (Tambour/Nischer, 1989; Brandes, 2002; Diethelm, 2012)

## 2. Auswirkungen von Streusalz auf die Strassenbäume

### 2.1 Streusalz schädigt die Bäume durch direkten Kontakt

#### 2.1.1 Ausbreitung des Salzes

Direkte Kontakte zwischen Streusalz und Baum entstehen bei

- Salzverfrachtung durch die Sprühfahrzeuge
- Gischt in Form von Sprühwasser, Sprühmatsch, Sprühnebel (Aerosole), Trockensalz (bei grösserer Fahrgeschwindigkeit, v.a. ausserorts)
- an den Strassen- und Wegrand gestossenem Schnee (Pflugschnee), der mit Salz durchtränkt ist (inner- und ausserorts)

Das Salz bleibt auf der Oberfläche der Nadeln und Blätter (immergrüne Laubbäume) und auf den Zweigen haften. Dort vertrocknet es und bildet eine Kruste, welche abfällt oder weggeweht wird.

Als Feuchtsalz oder unter dem Einfluss von Wasser (Schnee, Regen, Nebel) aufgelöstes Salz (Ionen-Form) wirkt über die Blätter und Nadeln, Knospen, Rinde, Lentizellen, Wundstellen usw. auf die Pflanze ein. Denkbar, aber bisher wenig untersucht, ist das Eindringen von Salzlösungen an Wurzeln und Wurzelanläufen unterhalb der Bodenoberfläche. Bei starkem Niederschlag wird das aufgelöste Salz abgewaschen und setzt sich direkt (Kronentraufe) oder über den Stammabfluss auf dem Boden ab. (Blum, 1974; Ruge, 1974)

#### 2.1.2 Orte des Eindringens in das Blatt bei direktem Kontakt

Werden die Na- und Cl-Ionen durch Niederschläge nicht abgewaschen, so wirken sie direkt über die Zellen auf die Pflanze (den Baum) ein.

Der bevorzugte Ort des Eindringens in die Nadel resp. in das Blatt ist nicht restlos geklärt:

##### **über die Epidermis**

Die Aussenwand der Epidermis ist von einer wasserundurchlässigen Wachsschicht, der Cuticula, überzogen. Allerdings ist das Ektoderm der Cuticula nicht homogen, es verfügt über hydrophilere Domänen (Zonen), die mindestens das Wasser durchdringen (diffundieren) lassen. Denkbar ist aber auch – im Beisein und in Wechselwirkung mit anderen Umweltchemikalien – die teilweise Auflösung der Cuticula durch aggressive Stoffe, indem die Tertiärstruktur der Wachse (Stäbchen, Röhrchen) verändert wird (Holdenrieder, 2007). Dadurch erfolgt der Eintritt in die Epidermis, von dort in das Palisaden- und in das Schwammgewebe.

##### **über die Stomata**

Über die Spaltöffnungen (Stomata) findet der Gasaustausch mit der Umgebung statt. Bei der Photosynthese wird CO<sub>2</sub> aufgenommen und O<sub>2</sub> abgegeben, durch die Transpiration wird Wasserdampf abgegeben. Wenn keine Photosynthese stattfindet, sind die Stomata unter normalen Bedingungen meistens geschlossen. (Bayrhuber/Kull, 1998)

Das Eindringen von Na- und Cl-Ionen über die Stomata in den Vorhof, welcher mit einem porösen Wachspfpfropf abgeschirmt ist, setzt das Vorhandensein eines Wasserfilmes voraus, welcher die Cuticula überzieht und sich ununterbrochen in den Vorhof fortsetzt. Ein zusammenhängender Wasserfilm ist dann vorhanden, wenn der Wachspfpfropf beschädigt ist oder ganz ausfällt und gleichzeitig die Stomata (mindestens teilweise) geöffnet sind. (Bosch, 1983; Holdenrieder, 2007)

Vom Vorhof gelangen die Na- und Cl-Ionen in den Apoplasten. Es handelt sich um den Diffusionsraum ausserhalb des Protoplasten, d.h. die Gesamtheit von Zellwänden und Zellzwischenräumen (Interzellularen). Dieser Raum ist für H<sub>2</sub>O wie auch für darin gelöste Substanzen durchlässig (Holdenrieder, 2007). Der Apoplast dient als Reaktions-, Speicher- und Transportraum. In den Interzellularen befinden sich auch Lösungen von Gasen, aus welchen z.B. Säuren entstehen können. (Anonymus, 1982)

Wegen der erhöhten Ionenkonzentration im Apoplasten, d.h. dem Konzentrationsgefälle zwischen Apoplast und Protoplast, können zum Ausgleich H<sub>2</sub>O-Moleküle von innen nach aussen, d.h. vom Protoplasten durch das semipermeable Plasmalemma in den Apoplasten, diffundieren. Dies erfolgt jedoch nur, wenn eine kritische Konzentration im Apoplasten überschritten wird. Eine Plasmolyse ist eher unwahrscheinlich (Holdenrieder, 2007).

Hingegen werden die relativ kleinen Na-Ionen mit Hilfe von spezialisierten Träger-Proteinen (Protein-Rezeptoren) durch das Plasmalemma hindurch in den Cytoplasten hineingeschleust. Diese erleichterte Diffusion erfolgt aufgrund des Konzentrationsgefälles und ist nicht mit Energieaufwand verbunden. Die Cl-Ionen ihrerseits diffundieren ebenfalls mit Hilfe von Protein-Rezeptoren in den Cytosol hinein, wobei die Spannungsänderung (Potentialänderung) an der Membran das Signal dazu gibt. (Bayrhuber/Kull, 1998)

Sind die Ionen einmal ins Plasma eingedrungen, so können sie über Plasmodesmen (Öffnungen in den Zellwänden) von einer Zelle in die andere gelangen. (Bayrhuber/Kull, 1998)

### 2.1.3 Mechanismen der Schädigung

Die Auswirkungen von Na- und Cl-Ionen als **Kontaktgifte** sind mehrschichtig und nicht restlos geklärt. Sie sind abhängig von weiteren vorhandenen Substanzen und physiologischen Vorgängen, aber auch von der Aktivität der Pflanze ausserhalb der Vegetationsperiode. Entscheidend ist während dieser Zeit insbesondere der fehlende Wassernachschub aus dem Wurzelraum. Folgende Mechanismen werden diskutiert:

- **Direkte Schädigung der Chloroplasten**

In einer ersten Reaktion dürfte eine Überdosis an Cl- und Na-Ionen infolge veränderter Membranpotentiale in das Cytoplasma eindringen. Gelangen von dort beispielsweise Na<sup>+</sup>-Ionen in das Stroma der Chloroplasten, beeinflussen sie den Protonengradienten zwischen Aussen- und Innenseite der Thylakoide und hemmen dadurch die ATP-Bildung. Inaktiv gewordene Biomembranen (Thylakoide) werden zerstört. (Lichtenthaler/Buschmann, 1984)

- **Vertrocknung**

Im Cytosol vorhandenes H<sub>2</sub>O wird durch die Na- und Cl-Ionen sehr stark gebunden (Hydratationshülle). Es steht dann weder für die Osmose noch für andere physio-

logische Vorgänge zur Verfügung. Insbesondere die Proteine, bei welchen die räumliche Struktur nur in einem wässrigen Milieu erhalten bleibt, sind auf das H<sub>2</sub>O angewiesen. Fehlt das Wasser, so verlieren die von ihnen produzierten Enzyme ihre Funktionsfähigkeit. Dadurch **oxydieren verschiedene Stoffe in der Zelle** (z.B. Phenole) **und werden braun**. Beim Zusammenbruch des Systems verbraunen allmählich die ganzen Zellinhalte. (Holdenrieder, 2007)

Die anschliessende Nekrose ist demnach eine Folge der Austrocknung ("Überhitzung"). Das äussere Erscheinungsbild versteht sich als eine **Verbräunung von Nadeln und Blättern**, an welcher sekundär ein Oxydationsvorgang mitbeteiligt ist ("Verbrennung").

Das Wasserdefizit kann sich mit Beginn der Vegetationsperiode noch verstärken, weil dann besonders viel Wasser benötigt wird. Die Verbräunung der Nadeln tritt deshalb in der Regel nicht unmittelbar nach dem Streusalzeintrag, sondern eher etwas später ein. Andererseits sind die braunen Nadeln und Blätter vom Frühjahr bis weit in den Sommer hinein deutlich erkennbar, bevor sie abfallen.

**Die sichtbare Schädigung ist begrenzt auf den direkten Kontaktbereich des Streusalzes (Höhe, Exposition) und kann damit in der Regel als ein Beweismittel beigezogen werden.** Typisch ist auch, dass bei diesem Schadenbild nicht die neuen Nadeln und Blätter, sondern die überwinterten Blattorgane verbräunt sind. Allerdings treiben die stark belasteten Bäume an diesen Stellen nicht mehr aus, wenn auch die Knospen abgestorben sind. (ATR-FG-VSS, 1974; Wentzel, 1974; Flückiger, 1982; Mühle, 1987; Heuerding, 1999)

### **Verwechslungsmöglichkeit**

Ragen die Assimilationsorgane im Winter aus dem gefrorenen Boden heraus, so kann bei intensiver Sonneneinstrahlung die Photosynthese einsetzen. Fehlt der Nachschub an Wasser aus dem Wurzelraum, dann können die Nadeln vertrocknen (**Frosttrocknis**). Das Phänomen der Frosttrocknis steht in keinem Zusammenhang mit der Ausbringung von Streusalz. Es tritt immer wieder in Gebieten auf, die keiner Salzbelastung ausgesetzt sind (v.a. im Waldgrenzökoton, häufig auch in Gärten an Holzgewächsen aus wärmeren Gegenden, die nicht ganz an mitteleuropäische Klimabedingungen angepasst sind).

## **2.1.4 Abtötung von Knospen und Rindengeweben**

Eine weitere, mehrfach nachgewiesene Möglichkeit besteht darin, dass Na- und Cl-Ionen über Knospen, Lentizellen und Wundstellen den Zutritt zu ungenügend geschützten, physiologisch aktiven Zellen erhalten. Dadurch können **junge Triebe und Knospen vollständig absterben**. Dies wird immer wieder bei unbelaubten Zweigen in auffälliger Weise beobachtet und konnte auch experimentell nachvollzogen werden. (ATR-FG-VSS, 1974; Chrometzka, 1974; Ruge, 1974; Flückiger, 1982; GALK, 1998). Cl<sup>-</sup> konnte im Rindenparenchym nachgewiesen werden (Dimitri, 1973, in Ruge, 1974).

Der Mechanismus der scheinbar direkten Abtötung derartiger Gewebe ist nicht restlos geklärt. Es wird angenommen, dass – ähnlich wie bei der Verbräunung von Nadeln und Blättern – durch den Kontakt der Salzlösung den physiologisch aktiven Zellen Wasser entzogen und dadurch die Nekrose verursacht wird (GALK, 1998). Somit wären diese Nekrosen ebenfalls als Folge eines osmotisch bedingten Wasserentzugs zu interpretieren, welcher letztlich bis zum Zelltod führt. (Wohlers, 2005) Auch hier

könnte man das Absterben von Geweben als Verbrennungen („Verätzungen“) bezeichnen.

An Wundstellen entstehen **Rindennekrosen**, welche den Ast oder Stamm anfällig machen für Pilzbefall und **Fäulnis**. Wegen der Bildung von Wundgewebe und weiterer Abwehrreaktionen ist diese Gefahr örtlich begrenzt und zeitlich befristet. (GALK, 1998; Joos Reimer, 2005; Wohlers, 2005)

## 2.2 Streusalz verändert den Boden und den Nährstoffhaushalt

### 2.2.1 Wege des Streusalzes vor der Versickerung im Boden

Das Streusalz (NaCl) wird durch den Tauprozess von Eis und Schnee, aber auch durch Niederschläge (Schnee, Regen) in Na<sup>+</sup>- und Cl<sup>-</sup>- Ionen aufgelöst und hydratisiert.

Das **Schmelzwasser** von schwarzgeräumten Strassen und Trottoirs wie auch von salzgetränktem Schneematsch oder Pflugschnee fliesst entweder über die Strassenentwässerung (Wasserableitung) direkt in die Kanalisation und von dort in die kommunale Abwasserentsorgung (Kläranlage, Bach, Fluss), oder es gelangt über einen Vorfluter auf unversiegelte Flächen und versickert dort im Boden.

Bei Strassen und Wegen ohne versiegelten Oberbau versickert das Schmelzwasser nach dem Auftauen des Bodens direkt an Ort und Stelle.

Das Schmelzwasser von Pflugschnee, welches seitlich auf unversiegelten Flächen deponiert wird, versickert ebenfalls an Ort und Stelle, sofern es nicht durch eine Sickerleitung aufgefangen wird. Dasselbe gilt für Schmelzwasser von natürlich gelagertem Schnee. Dieses kann in der Nähe der Infrastrukturanlage eine erhöhte Salzkonzentration aufweisen.

Bei den ersten intensiven Niederschlägen im Frühjahr werden Na- und Cl-Ablagerungen auf den Nadel- (und Blatt-) Oberflächen **abgewaschen** und gelangen über den Trauf oder den Stammabfluss auf den Boden.

Es gibt Hinweise dafür, dass während der Vegetationsperiode in den Blättern und Nadeln überflüssig gewordene Ionen, die weder chemisch noch durch physiologische Prozesse gebunden sind (Mg, Ca und K, aber auch Na und Cl) nicht nur gespeichert, sondern auch durch natürlichen Regen **ausgewaschen** werden (Blum, 1974; Ruge, 1974; Glatzel, 1974; von Sury/Flückiger, 1983; Lichtenthaler/Buschmann, 1984; Leonardi/Flückiger, 1985; Joos Reimer, 2005).

Im Verlaufe des Sommers und Herbstes kommen weitere erhebliche Mengen an Na<sup>+</sup>- und Cl<sup>-</sup>-Ionen aus dem **vorzeitigen und dem herbstlichen Blattfall** hinzu. (Joos Reimer, 2005)

### 2.2.2 Eintrag beim Abbau von Pflanzenteilen

Abgestorbene Pflanzenteile werden meistens zuerst durch Primärzersetzer unter den Bodentieren zerkleinert und so, zum Teil in Form von Exkrementen, den Mikroben zugänglich gemacht. Oft müssen vorher gewisse Stoffe (z.B. wasserlösliche Polypheno-

le) ausgewaschen werden, bevor die Bodentiere in der Lage sind, die Blätter zu fressen. (Scheffer, 1984)

An den Abbauprozessen sind körpereigene Enzyme massgeblich beteiligt. Die Mikroorganismen setzen beim Abbau pflanzenverfügbare Nährstoffe und CO<sub>2</sub> frei. Die Mineralisierung durch Bodenorganismen ergänzt dabei zum Teil (z.B. bei N und P) die nur geringe Nährstoffnachlieferung durch Verwitterung des Muttergesteins. Teilweise werden Nährstoffe durch Einbau in die Körpersubstanz vorübergehend festgehalten. (Scheffer, 1984)

Zu den Stoffwechselprodukten gehören organische und anorganische Säuren sowie relativ viel CO<sub>2</sub>. Mit ihnen können schwer lösliche Verbindungen – zum Teil durch Komplexbildung – gelöst und so deren Bestandteile für die höheren Pflanzen verfügbar gemacht werden. **Durch die Säuren wird auch die Bodenreaktion verändert.** (Scheffer, 1984)

Zwischen den Tonmineralen und den organischen Verbindungen bestehen Ionenbindungen, Wasserstoffbrücken und Ion-Dipol-Bindungen über O-Brücken. Die Kationenaustauschkapazität der Tonminerale wird dadurch nicht verändert. Hingegen kann die Bildung von Ton-Humuskomplexen u.a. die Sorption anorganischer Anionen an Tonmineralen und Oxiden konkurrenzieren. (Scheffer, 1984)

Bei der Zersetzung abgestorbener Pflanzenteile **werden auch Na<sup>+</sup> und Cl<sup>-</sup> aus stark belastetem Milieu freigelegt**. Wird aber bei Strassenbäumen im Spätherbst das Laub eingesammelt, so nicht, um diesen Prozess zu unterbinden. Vielmehr geht es dort um Fragen der "Sauberkeit" (Pflege von Anlagen) und der Verkehrssicherheit (aufwirbelndes Laub, klebendes Laub auf nasser Verkehrsfläche). Dabei gilt es jedoch zu bedenken, dass mit der Entfernung der Streu der Nährstoffkreislauf beeinflusst resp. beeinträchtigt wird. Gleichzeitig wird die Verbesserung der physikalischen Bodeneigenschaften durch Bodenorganismen erschwert oder gar verhindert.

Was mit dem eingesammelten Laub im Bereich von stark belastetem Milieu gemacht wird, entzieht sich unserer Kenntnis. Da es auch ohne Streusalz bereits durch Staub und Schwermetalle etc. angereichert ist, sollte es eher der Kehrichtverbrennung, wenn nicht gar der Sondermüllentsorgung zugeführt werden.

### 2.2.3 Transport im Boden

Die Na<sup>+</sup>- und Cl<sup>-</sup>-Ionen werden mit dem Wasserdurchfluss in gelöster (hydratisierter) Form im Boden transportiert.

Innerhalb des Bodens erfolgen die Adsorption, d.h. die Bindung von Stoffen an die feste Bodenmatrix oder an biologische Oberflächen, und die Desorption, d.h. die Lösung von Stoffen aus der Bodenmatrix im Bodenwasser, bei entsprechend langsamer Wassergeschwindigkeit, thermodynamisch. Es wird ein **Gleichgewicht zwischen der gebundenen und der gelösten Form eines Stoffes** angestrebt. Mit steigender Fliessgeschwindigkeit des Bodenwassers (grösserer Durchlässigkeit des Bodens) bestimmt zunehmend die Reaktionsgeschwindigkeit (Kinetik) die Verteilung zwischen gelösten und gebundenen Stoffen. Verläuft bei raschem Wasserfluss die Reaktion eines Stoffes mit der Bodenmatrix oder der Bodenlösung langsam, so ist der Stoffaustausch begrenzt. (Scheffer, 1984)

Aktive Böden zeichnen sich durch eine gute Krümelstruktur aus. Krümel sind rundliche, poröse Aggregate, bestehend aus mineralischen Partikeln und Ton-Humus-Komplexen. Diese werden durch Schleimabsonderungen der Bodenbakterien und Algen, das Geflecht der Pilze sowie weitere chemisch-physikalische Kräfte zusammengehalten. (Scheffer, 1984)

Feste Bodenteilchen können an ihrer Oberfläche sowohl Gase als auch Moleküle und Ionen aus der wässrigen Lösung adsorbieren. Neutrale Moleküle (z.B.  $H_2O$ ) können adsorbiert werden, ohne dass dafür andere Stoffe abgegeben werden. Die Adsorption von Ionen an Ionentauscher ist hingegen mit der Desorption einer äquivalenten Menge anderer Ionen verknüpft, die dann in die Bodenlösung übergehen. (Scheffer, 1984)

## 2.2.4 Ionentauscher

Als Ionentauscher kommen in erster Linie Tonminerale und organische Substanzen (v.a. Huminstoffe) in Frage. Von geringerer Bedeutung sind Oxide und Hydroxide. Die Austauschkapazität ist abhängig von ihrem Gehalt, der Grösse ihrer zugänglichen Oberfläche und der Art und Höhe ihrer Ladung. (Scheffer, 1984; Walthert et al., 2004)

### **Tonminerale** (Scheffer, 1984)

Silicatische Tonminerale sind aufgrund ihrer Kristallstruktur und Kristallchemie sehr unterschiedliche Ionentauscher. Dies hängt in erster Linie zusammen mit den Ladungsverhältnissen.

Bei den Schichtsilicaten herrscht die **permanente** Ladung, d.h. die Ladung zwischen den Silicatschichten, vor. Sie kommt durch isomorphen Ersatz höherwertiger durch niederwertige Kationen in den Tetraeder- und Oktaederlücken bei der Bildung des Tonminerals zustande. Die permanente Ladung weist im gesamten pH-Bereich der Böden einen negativen Überschuss auf. Die negative Überschussladung wird durch die positive Ladung von Kationen oder von positiven Hydroxidschichten ausgeglichen, die zwischen die Silicatschichten plziert werden und sie auf diese Weise zusammenhalten. Durch  $K^+$ -Ionen werden die Schichten besonders fest zusammengehalten.

Der Austausch der Kationen zwischen den Schichten ist unabhängig von äusseren Bedingungen. Die Austauschkapazität der Tonfraktion in Böden mit vorwiegend Schichtsilicaten nimmt deshalb bei Erhöhung des pH-Wertes nur unbedeutend zu. Umfang und Zugänglichkeit der permanenten Ladungen sind jedoch bei den Tonmineralen unterschiedlich. **Über eine relativ grosse Austauschkapazität zwischen den Silicatschichten verfügen die Dreischicht-Tonminerale, bei welchen die durch permanente Ladungen gebundenen Kationen austauschbar sind.**

Neben der permanenten Ladung treten an den Seitenflächen der Tonminerale  $SiOH-$ ,  $AlOH-$  und  $Al(OH)_2-$  Gruppen auf, die vor allem im neutralen und schwach alkalischen Bereich (meistens ab pH 7) Protonen abspalten und daher **variable**, d.h. vom pH resp. von der Salzkonzentration in der Bodenlösung abhängige, Ladung tragen. In diesem Bereich weist die variable Ladung einen negativen Überschuss auf. Der Ionentausch erfolgt durch Abdissoziation von  $H^+$ -Ionen oberflächennaher  $OH-$  und  $OH_2-$  Gruppen. **Bei zweischichtigen Tonmineralen und bei jenen dreischichtigen Tonmineralen, welche nicht über aufweitbare Schichten verfügen, überwiegt die variable Ladung, d.h. die Austauschkapazität ist an den Seitenflächen relativ gross.**

An den Oberflächen der Tonminerale findet umso leichter ein Abtausch von  $H^+$ -Ionen gegen Metall-Kationen statt, je höher der pH-Wert und je höher die Salzkonzentration der Gleichgewichtslösung sind, aber auch je höher die Wertigkeit der Ionen in der Lösung ist. **Mit der Zeit entsteht ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Ionentauscher und der Salzlösung.**

Die Abdissoziation von  $H^+$ -Ionen ist in stark saurem Milieu auch umkehrbar. Gewisse Tonminerale sind bei hoher  $H^+$ -Ionen-Konzentration in der Lage, wieder Protonen anzulagern und dadurch eine positive Überschussladung entstehen zu lassen. Zum Ladungsausgleich können dort Anionen adsorbieren. **In der Regel überwiegt jedoch gesamthaff die negative Überschussladung.**

#### **Oxide und Hydroxide** (Scheffer, 1984)

Oxide und Hydroxide können sowohl positive als auch negative Überschussladungen aufweisen. Reine Fe- und Al-Oxide sind von Natur aus Anionentauscher. Durch die Adsorption spezifischer Anionen, insbesondere aus organischen Verbindungen, werden sie jedoch teilweise neutralisiert oder können gar Kationentauscher werden.

#### **Organische Substanzen** (Scheffer, 1984)

Organische Substanzen (v.a. Huminsäuren) sind wegen der Protonenabgabe in alkaalischem Milieu Kationentauscher. Die Austauschkapazität ist deutlich grösser als bei den Tonmineralen. Besonders hoch ist die Austauschkapazität im Oberboden, d.h. in jenem Teil des Bodens mit grossem Anteil organischer Substanz.

#### **2.2.5 Kationenadsorption** (Scheffer, 1984)

Die Bindungsstärke der Kationen an der Austauscheroberfläche hängt von ihrer Ladung und Grösse ab. Sie steigt mit zunehmender Ladung, da mit ihr die Anziehung durch die Oberfläche wächst (**Wertigkeitseffekt**). Bei gleicher Ladung wird ein Kation stärker gebunden, je stärker es sich der Oberfläche nähern kann, weil es dann in ein immer stärkeres elektrisches Feld gerät.

Da sich die Kationen in Anwesenheit von Wasser mit einem Mantel von  $H_2O$ -Molekülen umgeben (**Hydratation**), werden sie an einer starken Annäherung an die Oberfläche des Ionentauschers gehindert. Kleine und hochgeladene Kationen sind stärker hydratisiert als grosse und niedrig geladene. Ein Teil der Hydrathülle wird allerdings wieder abgestreift, wenn das Ion vom Ionentauscher adsorbiert wird (**Dehydratisierung**). Bei unspezifischer Adsorption gilt in Böden generell folgende Reihe abnehmender Adsorbierbarkeit:

**Al > Ca > Mg > K > Na**

Da aber bei einzelnen Kationen die **Adsorption selektiv** und spezifisch ist, gibt es Abweichungen von den rein chemisch-physikalischen Verhältnissen. So werden beispielsweise bei organischen Ionentauschern das  $Ca^{2+}$ - wie auch das  $Mg^{2+}$ - und das Al-Ion gegenüber dem  $Na^+$ - und dem  $K^+$ -Ion bevorzugt. Die Ursache liegt in der Wirkung **kovalenter Kräfte** (Van der Waals Kräfte), wenn sich ein Kation der Austauscheroberfläche sehr stark nähern kann.

Eine ausgesprochene Selektivität einiger Tonminerale bei der Adsorption von Kationen besteht auch gegenüber  $K^+$  und  $NH_4^+$ . Diese relativ grossen Kationen werden einerseits leicht dehydratisiert, andererseits passen sie gut in die vorbereiteten Plätze

hinein. Auf diese Weise erfolgt auch die K-Fixierung zwischen den Silicatschichten der Tonminerale, welche nicht mehr voll reversibel ist.

### 2.2.6 Zusammenfassung (Scheffer, 1984)

Die Austauschkapazität an den Oberflächen der Tonminerale sowie an organischen Kationentauschern ist bei höherem pH wesentlich besser. Der Austausch "innerer" - Kationen bei aufweitbaren Dreischichtmineralen ist hingegen nicht vom pH abhängig.

Im Kationenbelag der Böden kommen vor allem die Kationen Ca, Mg, K, und Na vor, im stark sauren Bereich ausserdem Al und Mn und im extrem sauren Bereich auch  $\text{Fe}^{3+}$  und  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Alle anderen Kationen, darunter auch die Spurenelemente, machen einen geringen Anteil an der Austauschkapazität aus. Da beispielsweise  $\text{Na}^+$  nur sehr schwach gebunden wird, nimmt sein Anteil am Kationenbelag erst bei hoher Konzentration in der gesättigten Bodenlösung (Streusalzeintrag) deutlich zu.

Wegen der ausgeprägten Selektivität der verschiedenen Austauschersubstanzen sind bei saurer Reaktion die  $\text{H}^+$ -Ionen an den organischen Austauschern und den Seitengruppen der Tonminerale gebunden. Ca-, Mg- und Al-Ionen finden sich hauptsächlich an den organischen Austauscherteilchen sowie zwischen den Schichten der aufweitbaren Tonminerale. Keilförmig aufgeweitete Randzonen bestimmter Dreischicht-Tonminerale sowie hochgeladene aufgeweitete Dreischichtminerale sind der bevorzugte Ort der  $\text{K}^+$ - und  $\text{NH}_4^+$ -Ionen, während Schwermetallionen wie Cu und Pb bevorzugt von der organischen Substanz komplex gebunden werden.

### 2.2.7 Folgerungen für Natrium (Scheffer, 1984)

In wässriger Lösung werden die  $\text{Na}^+$ -Ionen zuerst hydratisiert. Diese Hydratisierung ist stärker als bei K, Ca oder Al, jedoch schwächer als bei Mg. Wegen dieser Hydrationshülle und der Einwertigkeit können die  $\text{Na}^+$ -Ionen weniger gut als K, Mg, Ca oder Al an die Oberflächen der Kationentauscher adsorbiert werden. Es braucht immer 2  $\text{Na}^+$ -Ionen, um den Ladungsausgleich gegenüber einem  $\text{Ca}^{2+}$ - oder  $\text{Mg}^{2+}$ -Ion herzustellen.

Bei starkem und wiederholtem Streusalzeintrag werden jedoch die  $\text{Na}^+$ -Ionen zu einem grossen Teil im Austausch gegen die  $\text{H}^+$ -Ionen an die Bodenteilchen adsorbiert. Ein teilweiser Ersatz anderer Kationen durch  $\text{Na}^+$  ist bei genügend langer Verweildauer ebenfalls denkbar. Ermöglicht wird dies durch die hohe Konzentration in der Bodenlösung und die dadurch bewirkte Erhöhung des pH-Wertes. Begünstigt wird der Austausch an variablen Ladungen ausserdem, weil die Böden im Bereich von Stadtbäumen in der Regel ohnehin einen relativ hohen pH-Wert aufweisen.

Bei Tonmineralen mit aufweitenden Silicatschichten, namentlich auch bei Mischkristallen, ist die negative Überschussladung zwischen den Silicatschichten relativ gering. Die Schichten werden aber durch die ladungsausgleichenden  $\text{K}^+$ -,  $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen eher schwach zusammengehalten. Bei hoher Konzentration in der gesättigten Lösung sind deshalb die  $\text{Na}^+$ -Ionen in der Lage, bei dreischichtigen Tonmineralen in teilweise geöffnete Randzonen und insbesondere in bereits aufgeweitete Schichten einzudringen und  $\text{K}^+$ -, vor allem aber auch  $\text{Mg}^{2+}$ - und  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen zu verdrängen. Da  $\text{Na}^+$ -Ionen stärker hydratisieren und weniger stark gebunden werden als adsorbierte  $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen, können sie durch die Hydratation die Silicatschich-

ten stärker ausweiten. Die zwischen den Silicatschichten (Elementarteilchen) wirkenden Kräfte werden aufgehoben. **Dadurch zerfallen die Tonminerale.** Dies hat weitreichende Konsequenzen für die physikalischen Eigenschaften des Bodens.

Einzelteilchen (Kolloide) können sich in der Bodenlösung vereinigen (Flockung) oder dispergieren (Peptisation). Geflockte Teilchen sind voluminöser. Böden mit geflockten Teilchen haben ein grösseres Porenvolumen und sind daher wasserdurchlässiger, d.h. weniger verdichtet.

Böden mit einseitig hoher Na-Sättigung, aber insgesamt geringer Salzkonzentration in der Bodenlösung, flocken nicht aus. Da die  $\text{Na}^+$ -Ionen vorwiegend an der äusseren Kolloidoberfläche sitzen, stark hydratisiert sind und weit abdissoziieren können, verstärken sie nicht nur das Quellen und Schwinden, sondern bewirken auch eine **fortschreitende Dispergierung (Verteilung) der Kolloidfraktion.** Dies hat zur Folge, dass die Bodenaggregate mehr und mehr zerfallen und die dispergierten Teilchen den Boden dicht schlämmen. (Kreutzer, 1974) Die Kolloide befinden sich in peptisiertem Zustand. Wegen der **relativ dichten Lagerung** (Verschlämmung) sind sowohl die Durchlässigkeit als auch die Drainierbarkeit solcher Böden stark gehemmt.

Eine Verringerung dieser negativen Eigenschaften kann durch Austausch von  $\text{Na}^+$  gegen  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen erzielt werden. Allerdings sind für die Erhöhung der Salzkonzentration in der Bodenlösung sehr grosse Mengen  $\text{Ca}^{2+}$  erforderlich, was in ohnehin stark alkalischen Böden mit zusätzlichen Nachteilen verbunden ist.

Der Vollständigkeit halber ist noch zu erwähnen, dass durch Zuführung von  $\text{K}^+$ -Ionen (Düngung) der Zerfall der Tonminerale teilweise wieder rückgängig gemacht werden kann. Die Wiederherstellung der Krümelstruktur ist hingegen ein längerer Prozess, an welchem in erster Linie die Bodenorganismen beteiligt sind.

### 2.2.8 Anionenadsorption (Scheffer, 1984)

Positive Ladungen, als Voraussetzung für Anionenadsorption am Ionentauscher, entstehen in erster Linie bei der Anlagerung eines Protons ( $\text{H}^+$ -Ion) an eine (Al, Fe)-OH-Gruppe. Bei der Adsorption von Anionen an  $[(\text{Al}, \text{Fe})\text{-OH}_2]^+$  werden immer äquivalente  $\text{H}^+$ -Mengen mitadsorbiert. Eine starke Bindung ist nur in saurem Milieu möglich. Von dieser unspezifischen Adsorption betroffen sind namentlich  $\text{Cl}^-$  und  $\text{NO}_3^-$ , meistens auch  $\text{SO}_4^{2-}$ . Da aber kleine Anionen stark hydratisiert sind, werden sie nur schwach gebunden und leicht gegen weniger hydratisierte und höherwertige Anionen ausgetauscht. Dann steigt das pH, und die positive Ladung verschwindet. Sie werden desorbiert und gehen in die Bodenlösung.

Mit steigender Menge organischer Substanz sinkt die adsorbierte Menge anorganischer Anionen an Tonminerale und Oxide trotz tieferem pH ab, weil die organischen Stoffe spezifischer und deshalb besser adsorbiert werden und dadurch die anorganischen Anionen konkurrenzieren (Bildung von Ton-Humuskomplexen).

Die spezifische Adsorption bestimmter Anionen ist bedingt durch ihre hohe Affinität zu den in der Oberfläche von Oxiden und Tonmineralen lokalisierten Al- und Fe-Atomen. Dies hat zur Folge, dass sie OH- und  $\text{OH}_2$ -Liganden verdrängen (Ligandenaustausch) und Sauerstoffbrücken zu den Al- und Fe-Atomen schlagen. Davon profitieren vor allem die Anionen Phosphat, Molybdat, Silicat, Arsenat und zum Teil Sulfat und Borat, aber auch organische Stoffe. Besonders stark gebunden wird das Phosphat.

Bei der Adsorption von Phosphat steigt die negative Ladung (und damit der pH-Wert), was durch die Adsorption eines Kations kompensiert werden muss. In oxidreichen Böden begünstigt dies die Austauschkapazität für Kationen (Nährstoffkationen).

### 2.2.9 Folgerungen für Chlorid

Im allgemeinen wird die unspezifische Adsorption von  $\text{Cl}^-$  (wie auch von  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{HSO}_4^-$ ) durch tieferes pH begünstigt. Massgebend ist dabei, dass sich die Konzentrationen der Bodenlösung unterhalb der Ladungsnullpunkte (Gleichgewichtslösung) befinden. Diese Ladungsnullpunkte liegen aber im sauren Bereich. (Scheffer, 1984)

Da der pH-Wert im Substrat und in der Bodenlösung der Stadtbäume meistens relativ hoch ist, können Anionen wie z.B.  $\text{Cl}^-$  nicht an kationentauschende Tonminerale und auch nicht an (Fe, Al)-Oxide resp. -Hydroxide adsorbiert werden. Sie bleiben in der Bodenlösung zurück.

Die  **$\text{Cl}^-$ -Ionen** nehmen also wegen ihrer negativen Ladung unter alkalischen Verhältnissen nicht am Austausch an den Ton-Humus-Komplexen teil. **Sie werden aus der Bodenlösung direkt von den Wurzeln aufgenommen und gelangen dadurch in den Nährstoffkreislauf.** Am wahrscheinlichsten ist die  $\text{Cl}^-$ -Aufnahme im Frühjahr, solange das  $\text{Cl}^-$  in hoher Konzentration vorliegt (Ruge, 1972; Joos Reimer, 2005). Das Chlor wird von der Pflanze nur in sehr kleinen Mengen benötigt. Durch Streusalzeintrag aufgenommenes  $\text{Cl}^-$  übersteigt diesen Bedarf um ein Vielfaches.

Nicht aufgenommene  $\text{Cl}^-$ -Ionen werden zum grössten Teil mit dem Sickerwasser aus dem Boden ausgewaschen und können ins Grundwasser gelangen.

Im weiteren ist zu beachten, dass die Aufnahme von  $\text{Cl}^-$  bei einem grossen Angebot an  $\text{NO}_3^-$  durch dieses konkurrenziert wird.  $\text{Cl}^-$  seinerseits drängt die  $\text{SO}_4^-$ -Aufnahme zurück. (Chrometzka, 1974)

### 2.2.10 Auswirkungen auf das Ökosystem

Bei hoher  $\text{Na}^+$ -Sättigung in der Bodenlösung nimmt die Stabilität des Gefüges ab, die Bodenteilchen zerfallen. Die **Krümelstruktur geht verloren**. Mit dieser Abnahme der Gefügestabilität ist ein Verlust an Porenvolumen verbunden. Die Folgen sind Verdichtung ("**Verschlämmung**"), geringere Durchlüftung und geringere Wasserdurchlässigkeit. (Kreutzer, 1974; Flückiger, 1982; Scheffer, 1984; Dettwiler, 1986; Joos Reimer, 2005; Heuerding, 1999) Vernässung, Stau des chloridhaltigen Wassers und Denitrifikation nehmen zu (Kreutzer, 1974).

Durch die geringere Durchlüftung des Bodens wird die **Wurzelatmung behindert**.

Durch die Veränderung des Bodengefüges wird die biologische Bodenaktivität beeinträchtigt (**Beinflussung der Bodenlebewesen, im speziellen auch der Mykorrhiza**).

Die Substrate der Stadtbäume weisen auch ohne Einfluss von Tausalz neutrale bis schwach basische pH-Werte auf. Durch den Eintrag von Streusalz (v. a.  $\text{Na}^+$ ) werden sie zusätzlich alkalisiert. Man geht davon aus, dass pH-Werte über 8,3 einen Einfluss von Tausalz ( $\text{Na}^+$ -Ionen) im Boden anzeigen. Jedoch kann einerseits ein vermehrter Eintrag von  $\text{NaCl}$  und  $\text{CaCl}_2$ , z. B. durch Hydrolyse der  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen und Dis-

soziation der gebildeten NaOH- und  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Moleküle den pH-Wert der Bodenlösung anheben, andererseits aber auch zu einer pH-Erniedrigung infolge Desorption von  $\text{H}^+$ - und  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen durch  $\text{Na}^+$  führen. (Gartiser et al., 2003)

Erhöhte Ionenkonzentration (= erhöhter osmotischer Wert) bedingt zu dessen Ausgleich genügend Wasser. Dies führt zu einem **Anstieg des osmotischen Wasserpotentials in der Bodenlösung**. Namentlich stark hydratisierende Ionen bewirken eine Bindung grosser Mengen Wasser, welches dann der Pflanze nur gegen erheblichen Energieaufwand zu Verfügung steht. Vor allem bei trockener Frühjahrswitterung und auf dichten Böden wird so die Wasseraufnahme durch die Wurzeln erschwert. (Kreutzer, 1974)

Bei der Adsorption von  $\text{Na}^+$ -Ionen an die Bodenkolloide (vorwiegend Tonminerale) gehen im Austausch  $\text{K}^+$ -,  $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen in die Bodenlösung. Diese müssen aber von den Wurzeln rasch und prioritär als Nährstoffe aufgenommen werden, was nur bei grosser Konzentration in der Bodenlösung möglich ist. Andernfalls werden sie aus dem Boden ausgewaschen und stehen für die Ernährung nicht mehr zur Verfügung.

Bei der (Wurzel-)Atmung werden vorwiegend Kohlenhydrate mit Hilfe von Sauerstoff in Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) umgewandelt. Die frei werdende Energie dient der Synthese energiereicher Moleküle. Gelöstes ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) steht in wässriger Lösung im Gleichgewicht mit Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Unter Mitwirkung des Enzyms Carboanhydrase entstehen daraus in wässriger Lösung von Organismen vorwiegend  $\text{H}_3\text{O}^+$  und  $\text{HCO}_3^-$ . Zur Herstellung des Gleichgewichtes (Neutralisierung, Ausgleich des osmotischen Druckes) wird  $\text{H}_3\text{O}^+$  gegen Kationen aus der Bodenlösung ausgetauscht. Der Austausch erfolgt über die äussere Wurzelmembran.  $\text{H}_3\text{O}^+$  geht in Bodenlösung und spaltet  $\text{H}^+$  ab, welches am Ionentausch der Bodenteilchen teilnehmen kann.

Sehr hohe Konzentration an  $\text{Na}^+$ -Ionen in der Bodenlösung und damit erhöhter pH-Wert erleichtert die Aufnahme der Ionen durch die Wurzel. Da aber die Pflanze selber wenig Na benötigt und die Aufnahme unspezifisch erfolgt, **stellt  $\text{Na}^+$  einen Konkurrenten für die "wichtigen" Nährstoffionen  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  dar**.

Aus der Bodenlösung nicht aufgenommene und auch nicht adsorbierte, "überschüssige" Nährstoffionen (wie auch  $\text{Na}^+$ -Ionen) werden zum grössten Teil durch das Sickerwasser ausgewaschen. Dies führt zu einer **Verarmung des Bodens**.

Wie Untersuchungen der Hauptnährstoffe in den Blättern salzgeschädigter Bäume gezeigt haben, sind die Gehalte an Stickstoff, Phosphat und Kalium in den Blättern tatsächlich erniedrigt, jene von Calcium und Magnesium hingegen beträchtlich erhöht. (Hock/Elstner, 1988) Erniedrigte Gehalte an N, P, K stimmen mit der Ionenaufnahme-Konkurrenz überein. Da aber Ca und Mg trotz Ionenaufnahme-Konkurrenz nicht zum Minimumfaktor für die Pflanze werden, müssen noch andere Mechanismen mitspielen (vgl. Kap. 2.3.1 und 2.4.3.2)

Wenn nun der pH-Wert der Bodenlösung durch Eintrag von Salzen (v.a.  $\text{Na}^+$ ) zunimmt, hat dies einen weiteren negativen Effekt auf die Pflanze. Salz verändert die Verteilung zwischen adsorbierten (ausgefällten) und gelösten Schwermetallen. Bereits mit der ersten Schmelzwasserfracht werden etwa 50-90 % der gelösten Schwermetalle ausgewaschen. (Novotny et al., 1998 in Gartiser et al., 2003) Die Mobilisierung von Schwermetallen (Cr, Pb, Ni, Fe, Cd, Cu) mit zunehmendem Salzgehalt erfolgt auf-

grund von Ligandenkomplexbildung (Chlorid) und Kationentausch (Natrium), insbesondere aber infolge erhöhter Dispersion der organischen Bodensubstanz durch Natrium, und der damit einhergehenden Störung der ursprünglich gewachsenen Bodenstruktur. (Amrhein et al., 1992 in Gartiser, 2003) Obwohl Cl<sup>-</sup>-Ionen in Böden allgemein als weniger schädlich als Na<sup>+</sup>-Ionen gelten, vermögen sie doch darin sorptierte Schwermetalle wie etwa Cd durch Bildung leichtlöslicher Cadmium-Chloro-Komplexe zu mobilisieren (Brod 1993). Für den Austausch von Cd an den organischen Austauscherteilchen sind jedoch eher Ca<sup>2+</sup> und Mg<sup>2+</sup> verantwortlich, weil sie stärkere Kationen-Tauscher sind als Na<sup>+</sup>. (Amrhein et al., 1992 in Gartiser et al., 2003) Bei der Bildung von Chloridkomplexen gehen Ca<sup>2+</sup> und Mg<sup>2+</sup> in die Bodenlösung.

Die leicht löslichen und bereits in Lösung befindlichen Schwermetalle gelangen bei erhöhter Perkolation (Infiltration bei Regen- und Tauwetter) direkt ins Grundwasser. Essentielle Spurenelemente (z.B. Fe) stehen damit der Pflanze nicht mehr zur Verfügung (Amrhein et al., 1992 in Gartiser, 2003) Aber auch die Pflanzenverfügbarkeit anderer wichtiger Spurenelemente (Mn, Zn, B) nimmt im alkalischen Milieu ab, was zu **Mangelercheinungen** führen kann. (Scheffer, 1984)

## 2.3 Streusalz schädigt die Bäume über den Stoffwechsel

### 2.3.1 Aufnahme von Stoffen durch die Wurzeln

Zu den Hauptnährelementen der Pflanzen zählen N, P, K, S, Ca und Mg. Wichtige Spurenelemente sind Fe, Mn, Zn, Cu, Cl, B und Mo. Na zählt zu den nützlichen Nährstoffen und kann teilweise die Funktion von K übernehmen. Viele Elemente sind in geringen Konzentrationen wachstumsfördernd, bei Überdosis wirken sie jedoch als Gifte. Die Bodenlösung enthält verschiedene dieser Stoffe. Deren Herkunft ist vielfältig:

- Zufuhr durch Niederschlag (inkl. Staub, Salzeintrag, Schwermetalle aus Strassenabrieb etc.)
- Verwitterung des Muttergesteins
- Zersetzung und Abbau organischer Substanzen
- Ausscheidungen der Pflanzenwurzeln und der Bodenorganismen

Die Pflanze nimmt die Stoffe im Wasser gelöst (in Ionenform) auf, indem sie Protonen (H<sup>+</sup>-Ionen) gegen Kationen und Karbonsäureionen (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ionen) gegen Anionen austauscht. (Bayrhuber/Kull, 1998)

Der Transport der Ionen im Boden Richtung Wurzeln (Wurzelhaare, Mykorrhiza) erfolgt vorwiegend durch Massenfluss (Konvektion) und durch Diffusion. Der Massenfluss ist eine Folge der Transpiration der Pflanzen. Dabei verarmt die Wurzelzone an Wasser, d.h. in unmittelbarer Umgebung der Wurzel erhöht sich die Bodenwasserspannung, und das Wasserpotential nimmt ab. Es entsteht eine Bewegung der Bodenlösung in Richtung Pflanzenwurzel. Dadurch werden die gelösten Stoffe den Wurzeln zugeführt. (Scheffer, 1984)

Die Diffusion tritt stark in Erscheinung, wenn die durch den Massenfluss angelieferte Nährstoffmenge nicht den Pflanzenbedarf deckt. In diesem Fall ist die Konzentration des betreffenden Nährstoffes in der Umgebung der Wurzel kleiner, sodass ein Kon-

zentrationsabfall zur Wurzel hin entsteht, der in gleicher Richtung eine Diffusion dieses Nährstoffes bewirkt. (Scheffer, 1984)

Zuerst gelangen Wasser und darin gelöste Ionen passiv und ohne Auswahl in die freien Räume der Wurzeln. Es sind dies die Hohlräume der Zellwände der Wurzelhaare, wie auch der Wurzelepidermiszellen und der Rindenzellen. Die Pflanze vermag also gewisse Substanzen in den äussersten Wurzelräumen nicht fernzuhalten (**Ausschlussunvermögen der Wurzel**). (Klötzli, 1993; Bayrhuber/Kull, 1998)

Bei den meisten Waldbäumen übernimmt die **Mykorrhiza** die Aufgabe der Wurzelhaare. Sie ist verantwortlich für die Aufnahme von Wasser und darin gelösten Ionen. (Dettwiler, 1986)

Bei den Endodermiszellen können Wasser und gelöste Stoffe nicht mehr zwischen den Zellwänden durchwandern. Um zu den Leitzellen zu gelangen, führt der Weg über die Zellmembranen (Plasmalemma, Tonoplast) der Endodermiszellen. Dies erfolgt mit Hilfe der Osmose, wobei zu unterscheiden ist zwischen einfacher Diffusion (polare Moleküle, z.B.  $H_2O$ ), passivem Transport (mit Hilfe von Membran-Transportproteinen oder über Ionenkanäle, z.B. die meisten kleinen Ionen) und aktivem Transport unter Energieaufwand (Transport gegen das Konzentrationsgefälle mit Hilfe von ATP-Proteinen / Ionenpumpen). (Richter, 1969; Klötzli, 1993; Bayrhuber/Kull, 1998)

Energieaufwand ist dann erforderlich, wenn die Sogwirkung der Transpiration nicht ausreicht, d.h. wenn bei anhaltend trockener Witterung nur noch stärker gebundenes Wasser zur Verfügung steht. Dies kann beispielsweise bei hohen Salzkonzentrationen zutreffen, weil sich kleine und hochgeladene Ionen stärker hydratisieren. Andererseits werden aber auch entgegen dem Konzentrationsausgleich gewisse Nährstoffe mit Energieaufwand in das Cytoplasma befördert.

Wesentlich ist, dass viele schädliche oder nur in kleinen Mengen benötigte Stoffe beim Transport mittels unspezifischen Boten- und Trägersubstanzen von der Pflanze nicht erkannt werden, wenn sie ähnlich aufgebaut sind wie die benötigten Nährstoffe. Die erforderliche Energie bezieht die Pflanze aus Stoffwechselfvorgängen, vornehmlich aus der Atmung. (Klötzli, 1993)

Die Aufnahme der Ionen hängt von ihrer Konzentration in den Lösungen, aber auch vom pH-Wert ab. So wird beispielsweise im ohnehin eher alkalischen Milieu der Stadtbäume **durch  $Na^+$  der pH-Wert zusätzlich erhöht**. Dies wäre an und für sich günstiger für die Ionenaufnahme. Bei hoher  $Na^+$ -Konzentration besteht aber eine Konkurrenz gegenüber  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ - und allenfalls  $Mg^{2+}$ -Ionen. Dadurch wird die Versorgung mit diesen wichtigen Nährstoffen erschwert und vor allem  $K^+$  in ungenügenden Mengen zugeführt. Aber auch Spurenelemente können zum Minimumfaktor werden.

Auch andere Ionen können sich in der Bodenlösung gegenseitig konkurrenzieren, wenn sie ähnlich reagieren. So verhält sich Ca ähnlich wie sein "Antagonist" Ammonium ( $NH_4^+$ ), K wie Na, aber auch wie Mg. Andererseits wird die Aufnahme bestimmter Ionen durch andere Ionen angereizt: Pflanzen nehmen mehr K auf, wenn Ca vorhanden ist, die Aufnahme des Ca wird durch die Anwesenheit von Nitrat stimuliert etc. (Klötzli, 1993)

Erhöhte Cl-Konzentrationen infolge Streusalzeintrags sind v.a. im Frühjahr vorhanden, wenn das Chlor noch nicht ausgewaschen und damit von der Pflanze als Konkurrent

gegenüber anderen Anionen aufgenommen werden kann. Bekannt ist beispielsweise die Konkurrenz zwischen Chlorid und Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) resp. Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Während  $\text{PO}_4^{3-}$  spezifisch und fest adsorbiert wird, kann  $\text{NO}_3^-$ , welches wie  $\text{Cl}^-$  unspezifisch adsorbiert wird, leicht mit  $\text{Cl}^-$  "verwechselt" werden.  **$\text{Cl}^-$  ist also durchaus in der Lage, die Makronährstoffe P und N zu verdrängen** oder mindestens deren Aufnahme zu erschweren, was zu **Unterversorgung** mit negativen Auswirkungen auf das Wachstum führt. (Scheffer, 1984; Joos Reimer, 2005)

### 2.3.2 Transport in der Pflanze und Aufnahme in die Blätter

Die Elektrolyte werden in den Leitgefässen im Transpirationsstrom bis in die Krone und von dort in die Blätter resp. Nadeln transportiert. Im Blatt spielen die Nährstoffe ihre wichtige Rolle bei den Stoffwechselfvorgängen, der Photosynthese, der Atmung, der Proteinsynthese, der Bildung von Aminosäuren, beim Aufbau von Pflanzen (Zellbildung) usw. (Klötzli, 1993)

Verantwortlich für den Stofftransport ist in erster Linie die Sogwirkung der transpirierenden Blätter, welche die durch Kohäsionskräfte zusammengehaltenen Wasserfäden in den toten Leitungsbahnen hochzieht, ohne dass die Pflanze dafür Energie aufzuwenden braucht. Der Sog kommt zustande, weil die Interzellularräume der Blätter infolge Transpiration durch die Spaltöffnungen (Stomata) laufend Wasserdampf verlieren. Der Nachschub aus dem Apoplasten erfolgt, indem die Zellwände im Blatt einerseits miteinander und andererseits im Bereich der Leitbündel mit den Wasserleitungsbahnen verbunden sind. (Klötzli, 1993; Bayrhuber/Kull, 1998)

Das Öffnen und Schliessen der Stomata beruht auf folgenden Mechanismen: Durch Photosynthese in den Schliesszellen werden  $\text{H}^+$ -Ionen abgespalten. Diese werden durch Ionenpumpen (ATPasen) in der Membran mit Energieaufwand in die Nachbarzellen befördert. Es entsteht ein negativeres Membranpotential. Durch die negative Ladung in den Schliesszellen werden die positiven  $\text{K}^+$ -Ionen angezogen. Sie diffundieren vom Apoplasten in das Innere der Schliesszellen und erhöhen so den osmotischen Wert. Als Ladungsausgleich strömen auch Chlorid-Ionen nach innen. Auf Grund der erhöhten Ionenkonzentration strömt nun Wasser aus den Nachbarzellen in die Schließzellen. Diese erweitern sich bis zu ihrem doppelten Volumen und geben so die Spaltöffnungen frei. Solange Sonne auf die Schließzelle scheint, d.h. solange Photosynthese geleistet wird, werden durch diese Reaktionen die Stomata offengehalten. Für die Photosynthese ist aber auch die Zufuhr von  $\text{CO}_2$  erforderlich. Lässt die Lichtintensität nach, so finden alle Reaktionen nicht mehr in vollem Umfang statt, der osmotische Wert der Schließzellen nimmt ab und sie werden schlaff - die Stomata schließen sich. (Bayrhuber/Kull, 1993)

Bei ungenügendem Wassernachschub aus dem Wurzelbereich bricht auch die Transpiration ab. Einerseits kann nicht mehr genügend Wasserdampf aus den Zellwänden in die Interzellularräume und in den Vorhof diffundieren. Andererseits diffundiert weniger Wasser in die Schliesszellen, wodurch dort der osmotische Wert abnimmt. Die Stomata werden geschlossen. (Bayrhuber/Kull, 1993; Wikipedia)

Durch die Verengung der Stomata transpiriert die Pflanze weniger, sie trocknet langsamer aus. Der Verschluss der Stomata stellt somit einen natürlichen Schutz vor Austrocknung (übermässiger Transpiration) dar. (Wikipedia)

### 2.3.3 Reaktion der Pflanze auf Salzbelastung

#### 2.3.3.1 Dehydratationsstress

Dehydratationsstress (mit Austrocknungsgefahr) kann rein witterungsbedingt sein, im Zusammenhang mit der Bodenstruktur und dem Wasserspeichervermögen stehen oder eine Folge hoher Salzkonzentrationen sein. Er manifestiert sich an verschiedenen Stellen in der Pflanze:

- **bei der Transpiration:** Wenn bei grosser Hitze und anhaltender Trockenheit so viel transpiriert wurde, dass die verfügbaren Reserven im Boden aufgebraucht sind, reicht der Wassernachschub aus dem Boden nicht mehr aus. Die Pflanze stellt die Transpiration ein. Wird gleichzeitig die Photosynthese, welche ja das Öffnen der Schliesszellen durch Produktion von Ionenpumpen ermöglicht, fortgesetzt, so fehlt das Wasser, d.h. die Pflanze beginnt zu welken. Allerdings wird bald auch die Photosynthese eingestellt, wenn bei Verschluss der Stomata kein CO<sub>2</sub> mehr nachgeliefert wird.
- **in den Wurzeln:** Durch Erhöhung der Menge gelöster Salze im Bodenwasser nimmt die physiologische Verfügbarkeit des Bodenwassers für die Pflanze ab. So entziehen Wurzeln beispielsweise in einem Sandboden mit einer Saugspannung von 2 bar 70 % des speicherbaren Wassers, während eine 0.5 %ige NaCl-Lösung das Wasser mit einem Sog von 4.2 bar festhält. (GALK, 1998)
- Hohe Salzkonzentration verursacht in der Bodenlösung einen überhöhten osmotischen Wert. Einerseits wird das Wasser für die Hydratation der freien Ionen benötigt, wodurch das Wasserpotential in der Bodenlösung zunimmt (Scheffer, 1984). Andererseits muss bei der Aufnahme in die Wurzeln der osmotische Druck in den Wurzelzellen ausgeglichen werden. Um trotzdem Wasser aus dem Boden aufnehmen zu können, braucht die Pflanze einen grösseren Energieaufwand. Voraussetzung dazu ist Photosynthese (Energieproduktion), verbunden mit Transpiration (CO<sub>2</sub>-Aufnahme). Dies bedeutet Stress. Fehlt diese Energie, so fehlt auch das Wasser im Kronenbereich.
- **im Apoplasten:** Fatalerweise gelangen über die Membranen der Wurzelzellen neben dem Wasser und den essentiellen Nährstoffen unspezifisch auch andere nicht oder nur in geringen Mengen benötigte Stoffe in den Transpirationsstrom. Infolge Hydratation der Ionen bleibt auch im Apoplasten viel Wasser gebunden, das nur durch hohen Energieaufwand oder anderweitige Bindung der Ionen verfügbar gemacht werden kann. Dabei ist stets zu beachten, dass die Hydratation bei den Na-Ionen stärker ist als bei K, Ca oder Al, jedoch schwächer als bei Mg. Kleine und hoch geladene Kationen sind stärker hydratisiert als grosse und niedrig geladene.
- **im Cytosol (Cytoplasma):** Grundsätzlich wird auch hier infolge Hydratation Wasser an die freien Ionen gebunden. Erhöhte Salzkonzentrationen im Cytosol erfordern aber Wasser für den Ausgleich der Konzentrationen. In einer ersten Reaktion produziert die Pflanze spezifische Osmolyte und verschiebt das osmotische Potential im Cytosol auf ein höheres Niveau. Dadurch gelingt es, das Wasser vorübergehend im Cytosol zurückzubehalten. Sobald der maximale Turgor erreicht ist, umgeht die Pflanze dieses Problem, indem sie mit Hilfe von Proteinen das überflüssige Na<sup>+</sup> und Cl<sup>-</sup> in die Vakuole resp. in den Apoplasten "versenkt". Erst wenn diese

Speicher gefüllt sind, kommt es zu einem Kollaps (Alterung, Nekrosen, Blattwurf).

An diesem Kollaps sind noch weitere Mechanismen beteiligt. So benötigen auch die Proteine ein wässriges Milieu, um ihre Struktur zu erhalten. Ein spezifisches Protein bildet Enzyme, welche den Aufbau von Chlorophyll induzieren. Ungünstige Bedingungen für dieses Protein verunmöglichen aber die Bildung von Chlorophyll, was die Zerstörung der Strukturen im Chloroplasten verursacht (Schulze, 2002; Holdenrieder, 2007)

Wird zu viel Wasser im Cytoplasma gebunden und fehlt ausreichender Nachschub aus dem Boden, so steht auch nicht genügend Wasser für den Konzentrationsausgleich in den Schliesszellen zur Verfügung. Es entsteht ein erhöhter Diffusions-Widerstand. Der Konzentrationsausgleich wäre aber nötig, um die Schliesszellen „aufzublähen“ und dadurch die Spalten zu öffnen. Wenn die Stomata nicht geöffnet sind, findet auch keine Transpiration statt, und der Nachschub an CO<sub>2</sub> für die Photosynthese ist nicht gewährleistet.

### 2.3.3.2 Ionenstress

Die Nährstoffe wie auch die Schadstoffe gelangen aus dem Apoplasten **über das Plasmalemma in das Zellplasma** (Cytosol) und – je nach Anpassungs- und Reaktionsvermögen – **über den Tonoplasten in die Vakuole** hinein. Für den aktiven Transport mit Ionenpumpen (ATPasen) ist ein Energieaufwand erforderlich. Zwischen den Zellen erfolgt der Austausch über die Plasmodesmen. Dabei handelt es sich um Poren in der Zellwand, welche von Cytoplasma durchzogen sind. (Schulze, 2002; Bayrhuber/Kull, 1998)

Hohe Konzentrationen biologisch aggressiver Osmolyte (z.B. Na, Cl) im Apoplasten führen zu **Ungleichgewichten im Wasser- und Ionenhaushalt**. Salinitätsstress ist demzufolge neben Dehydratations- gleichzeitig auch Ionen-Stress. (Schulze, 2002)

Ionenungleichgewichte bedeuten nicht nur andere Konzentrationsverhältnisse in den verschiedenen Kompartimenten (Apoplast, Cytosol, Vakuole), sondern verursachen auch **Veränderungen der Membranpotentiale**, wobei man unter Membranpotential die elektrische Spannung, welche zwischen der Innen- und der Aussenseite einer Membran anliegt, versteht. Eine derartige Veränderung kommt dann zustande, wenn Innenseite und Aussenseite unterschiedliche Konzentrationen der geladenen Teilchen aufweisen und die trennende Membran eine Leitfähigkeit für diese besitzt. Deshalb kann ionischer Stress auch zur **Zerstörung von Zellmembranen** führen. (Wikipedia) Gleich wie beim Dehydratationsstress beugt die Pflanze aber dem Ionenstress vor, indem sie in einer ersten Phase kompatible Osmolyte (zur Erhöhung des osmotischen Potentials) bildet. In einer zweiten Phase werden überflüssige Na<sup>+</sup>- und Cl<sup>-</sup>- Ionen mit Hilfe von Proteinen in die Vakuole oder in den Apoplasten versenkt. (Schulze, 2002)

Ohne Salzbelastung ist die Ionenkonzentration im Cytoplasma auf tiefem Niveau homöostatisch, d.h. sie befindet sich in einem "natürlichen" Gleichgewicht. Dieses wird grossenteils durch **elektrophoretische (d.h. passive) Flüsse** konstant gehalten, die an H<sup>+</sup>-ATPasen und H<sup>+</sup>-Pyrophosphatasen im Plasmalemma bzw. in der Tonoplastenmembran gekoppelt sind. Für K<sup>+</sup> und Anionen sind ausserdem **durch das Membranpotential regulierbare Import- und Exportkanäle**, für Ca<sup>2+</sup> auch eine **Ca<sup>2+</sup>-ATPase** beschrieben worden. Dabei ist das Cytoplasma sowohl gegenüber dem

Apoplasten als auch gegenüber dem Tonoplasten negativ geladen. Gleichzeitig weist das Cytoplasma einen höheren pH-Wert auf als die beiden umgebenden Kompartimente. Er liegt immer bei etwa 7. (Schulze, 2002)

Hohe Salzkonzentration im Apoplasten stellt eine starke Belastung des Gleichgewichtes im Cytoplasten dar.  $\text{Na}^+$  und  $\text{Ca}^{2+}$  folgen dem Gradienten und strömen passiv in die Zelle ein, wo sie grosse Pools bilden können. **Die Akkumulation von positiven Ladungen im Cytosol beseitigt die natürliche Barriere des Membranpotentials für  $\text{Cl}^-$** , wodurch es zu massivem Einströmen dieses Anions durch die **Anionenkanäle** kommt. (Schulze, 2002)

Der **K-Gehalt ist durch hohe Na-Konzentrationen gefährdet**. Einerseits konkurrenzieren  $\text{K}^+$  und  $\text{Na}^+$  vor allem um die weniger selektiven, aber sehr leistungsfähigen  $\text{K}^+$ -Aufnahmesysteme. Bei diesen handelt es sich um Kanäle oder  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ -Symporter. Entsprechend wird bei hohen apoplastischen  $\text{Na}^+$ -Konzentrationen die Kaliumaufnahme in die Zelle stark gedrosselt, und der (relative) cytoplasmatische Kaliumpool schrumpft. (Schulze, 2002)

Andererseits zieht die Überschwemmung des Cytosols mit  $\text{Na}^+$  eine erhöhte Aktivität der Protonenpumpen, vor allem der Plasmamembran-ATPasen, aber auch der tonoplastischen  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ -Antiportsysteme, und damit einen **gesteigerten ATP-Verbrauch** nach sich. (Schulze, 2002)

Die Situation wird zusätzlich verschärft, indem eine erhöhte Protonentransportaktivität auch eine **Veränderung der intrazellulären pH-Verhältnisse** zur Folge hat. Diese Alkalisierung des Cytosols beeinträchtigt die Aktivität verschiedener cytosolischer Enzyme, vor allem jener Enzyme, die für den katabolischen (abbauenden) Energiestoffwechsel verantwortlich sind. (Schulze, 2002)

Bis zu einem gewissen Grad ist das Cytoplasma in der Lage, sich zu "entsalzen", indem es  $\text{Na}^+$  an die Vakuole abgibt. Dazu dienen  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ -Antiporter, welche die gesteigerte Protonenbeladung der Vakuole mit der Natriumaufnahme koppeln. Rein technisch wäre auch eine Versenkung in den Apoplasten denkbar. (Schulze, 2002)

Während  $\text{Ca}^{2+}$  einerseits zusammen mit  $\text{Na}^+$  vom Apoplasten in das Cytoplasma hineinfließt, bewirkt die Überschwemmung der Zelle mit  $\text{Na}^+$  andererseits auch die Freisetzung von  $\text{Ca}^{2+}$  aus zellulären Kompartimenten und somit zum **Anwachsen des cytosolischen  $\text{Ca}^{2+}$ -Pools**. Der cytosolische Pool an freiem  $\text{Ca}^{2+}$  hat aber Signalfunktion, d.h. eine Zunahme dieses Pools löst in der Zelle regulatorische Prozesse aus. Diese können bis zu einem gewissen Grad als Reparatur- oder Anpassungsreaktionen aufgefasst werden. (Schulze, 2002)

Parallel zur Entsorgung von  $\text{Na}^+$  in der Vakuole wäre eine "Entgiftung" des Cytoplasmas hinsichtlich  $\text{Cl}^-$  möglich. Mit dem Protonen-Natrium-Antiport ist aber eine Alkalisierung der Vakuole verbunden. (Schulze, 2002)

Stattdessen **wirkt eine Überdosis an  $\text{Cl}^-$  ziemlich aggressiv auf die intrazellulären Strukturen:**

- $\text{Cl}^-$  trägt infolge starker Hydratisierung zur **Reduktion der Transpiration** und damit zum Dehydratationsstress bei (Ionenhomöostase auf erhöhtem Niveau).

- Cl<sup>-</sup> trägt zum **hohen osmotischen Wert im Cytosol** bei (Chrometzka, 1974) und hemmt dadurch die Aktivität der Enzyme, welche für die Chlorophyllsynthese zuständig sind. (Holdenrieder, 2007) Dadurch beschleunigt sich der **Abbau von Pigmenten**, was zur Reduktion der Photosynthese und schliesslich zu geringerer Energieproduktion führt. Äusserlich lässt sich der Abbau von Chlorophyll als Vergilbung (Chlorose) erkennen.
- Parallel dazu – vermutlich wegen erhöhter Na<sup>+</sup>-Konzentration und damit einhergehendem K<sup>+</sup>-Entzug – weiten sich die Thylakoidstapel auf und lassen die Chloroplasten aufquellen. (Hock/Elstner, 1988).
- In neuerer Zeit wird angenommen, dass sich im salzgestressten Milieu (v.a. unter dem Einfluss von Cl<sup>-</sup> und bei reduziertem K<sup>+</sup>-Gehalt) durch Belichtung im Chloroplasten vermehrt ROS (= reaktive Sauerstoffspezies) bilden, welche die Ausweitung der Thylakoidstapel induzieren. (Schulze, 2002) Dies führt schliesslich zur **Zerstörung der Chloroplasten-Feinstruktur**.
- Mit dem Abbau des Blattfarbstoffes (Pigmentes) Chlorophyll, in welchem Mg das Zentralatom bildet, und der Zerstörung von Thylakoidstapeln, welche durch Mg zusammengehalten werden (Lichtenthaler/Buschmann, 1984), wird auch das **Mg<sup>2+</sup>** mobilisiert und zusammen mit dem im Chloroplastenstroma überflüssig gewordenen Mg **im Cytosol angereichert**.
- Unter dem Einfluss von Cl<sup>-</sup>, vermutlich zusammen mit Na<sup>+</sup>, **nimmt die Durchlässigkeit der Zellmembranen zu** (Abbau von Fetten). Ab einem bestimmten Cl<sup>-</sup>-Spiegel verlieren die Membranen ihre Funktion und können neben Wasser auch Ionen wie Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> und Mg<sup>2+</sup> nicht mehr zurückhalten. (von Sury/Flückiger, 1983)

Über den Einfluss des Salzes auf die Öffnung der Stomata bestehen unterschiedliche Meinungen. Einerseits wird angenommen, dass die Hemmung der photosynthetischen CO<sub>2</sub>-Assimilation primär nicht durch den Effekt von Salz auf die Öffnung der Stomata hervorgerufen wird. Diese bleiben auch bei relativ hoher Salinität funktionsfähig. (Schulze, 2002). Vielmehr sei der Elektronentransport bei der Photosynthese bereits durch relativ geringe Salzkonzentrationen beeinträchtigt.

Anhand von Versuchen konnte immerhin gezeigt werden, dass unter dem Einfluss von Salz das **Wasserpotential in den Blättern vorerst erhöht und gleichzeitig die Transpiration durch stärkeren Widerstand in den Schliesszellen gehemmt** wird. (Leonardi/Flückiger, 1985) Dieser scheinbare Widerspruch lässt sich dadurch erklären, dass infolge Hydratation das Wasser in grossen Mengen stark gebunden ist und deshalb nicht für die Transpiration zur Verfügung steht.

**Mit beginnender Blattrandnekrose haben dann das Wasserpotential wie auch der stomatische Widerstand abgenommen, d.h. der Schliessmechanismus ist erschlafft.** Ob aber das Offenbleiben der Stomata der Auslöser des Absterbens der Blätter oder die Folge eines bereits vorher eingeleiteten Vorganges ist, bleibt ungeklärt. (Leonardi/Flückiger, 1985)

Ist die beginnende Nekrose das Ergebnis einer latenten Schädigung durch erhöhte Salzkonzentration – und nicht die Folge funktionsuntauglicher Stomata –, wäre die **übermässige Mobilisierung von Ca<sup>2+</sup> und Mg<sup>2+</sup> als Reaktion auf strukturelle Zerstörungen zu interpretieren**.

Da durch reduzierte  $K^+$ -Versorgung die Schliesszellen weniger quellen, ist der vorläufige stärkere stomatäre Widerstand nachvollziehbar. Die spätere Erlahmung des Schliessmechanismus könnte dadurch erklärt werden, dass durch Zerstörung der Membranstrukturen  $Ca^{2+}$  und  $Mg^{2+}$  (und auch  $Cl^-$ ) ungehindert in das Cytosol der Schliesszellen eindringen und an Stelle von  $K^+$  beim Schliessmechanismus dasselbe bewirken, allerdings ohne reversibel zu sein. Der normale Elektrolyt-Transport funktioniert nicht mehr. Tatsächlich wurde in diesen Zellen auch eine übermässige Akkumulation von  $Ca^{2+}$  und  $Mg^{2+}$  nachgewiesen. (Leonardi/Flückiger, 1986) Da die Schliesszellen keinen genügenden Widerstand mehr leisten, bleiben die Stomata offen.

Anhand von Nadel- / Blattanalysen salzgeschädigter Bäume kann festgestellt werden, dass die Gehalte an Stickstoff, Phosphat und Kalium erniedrigt, jene an Calcium und Magnesium beträchtlich erhöht sind. Hieraus resultiert wahrscheinlich die **vorzeitige Alterung des Gewebes**. (Hock/Elstner, 1988)

**Chloridschäden** an oberirdischen Pflanzenteilen treten in erster Linie **in der Terminalregion der Xylembahnen** auf, das heisst an den Spitzen und Rändern der Blätter. An diesen Stellen sind im allgemeinen auch die höchsten Chloridkonzentrationen zu beobachten. Dabei ist zu beachten, dass mittelstark geschädigte Blätter häufig höhere Chloridkonzentrationen aufweisen als stark geschädigte, weil Chlorid aus abgestorbenen Blatteilen durch Niederschläge leicht ausgewaschen wird. (Glatzel, 1974)

Der Xylemsaft führt  $Cl^-$  mit, das eigentlich nicht gebraucht wird. Der Beginn der Nekrose an den Blatträndern kann deshalb auch damit erklärt werden, dass am Blattrand die Transpiration grösser ist. **Durch Dehydrierung bleibt relativ mehr  $Cl^-$  im Blattrandbereich**, d.h. es konzentriert sich dort auf. Damit verbunden ist ein höherer osmotischer Wert im Cytosol, aber auch eine zunehmende Überforderung des ganzen Systems infolge Toxizität des  $Cl^-$ . (Joos Reimer, 2005; Holdenrieder, 2007) Insbesondere junges Laub reagiert empfindlich auf Chlor. Gleichzeitig besteht im Frühjahr bereits hoher Wasserbedarf für den Laubaustrieb, und das Chlorid liegt noch in grossen Mengen ungebunden und leicht pflanzenverfügbar in der Bodenlösung im Wurzelhorizont vor. (Ruge, 1972; Joos Reimer, 2005)

Nekrosen an Blattorganen können somit als **Zellvergiftung** interpretiert werden. Der Absterbeprozess setzt sich durch **Zunahme toxischer Abfallprodukte** fort. Bei anhaltender Transpiration führt letztlich die **Verrocknung** zum Absterben des Blattes resp. der Nadel.

### 2.3.4 Schäden durch hohe Salzbelastung

Grundsätzlich entstehen Schäden an der Pflanze erst dann, wenn interne Entgiftungskapazitäten, Reparaturmechanismen und Kompensationsmechanismen überschritten sind und sich die Pflanze auf die gegebene Belastungssituation nicht mehr einstellen kann.

#### 2.3.4.1 Versorgungsnotstand

**Eingeschränkte Funktion der Wurzelmembranen:** Hohe Salzkonzentrationen in der Bodenlösung beeinflussen die Funktion der Zellmembranen der Wurzeln über die Veränderung der Membranpotentiale. (Scheffer, 1984) Eine direkte Schädigung oder Zerstörung von Membranen durch "Verätzung" ist denkbar.

**Reduktion der Wurzelmasse:** Im Extremfall sterben Wurzelspitzen, einzelne Wurzeln oder ganze Wurzelpartien ab. Dies ist mindestens für Luftschadstoffe bereits nachgewiesen worden, wobei dort die Wurzelschädigung von der Schädigung der Assimilationsorgane (reduzierte Photosyntheseleistung, Vitalitätseinbusse, Leaching) ausgeht. (Blaschke, 1980; Krause, 1983; Liss, 1984, in Dettwiler, 1986; Heuerding, 1999)

**Ungenügende Neubildung von Feinwurzeln, Wurzelhaaren und Mykorrhiza:** Reduziertes Zellteilungswachstum (Schulze, 2002) wirkt sich auch auf den Wurzelbereich aus. (Heuerding, 1999)

In allen drei Situationen verringert sich das Aufnahmevermögen für Wasser und Nährstoffe.

**Fehlernährung:** In der Bodenlösung durch die Salzbelastung häufiger vorkommende Ionen (z.B.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) werden wegen der teilweise unspezifischen Aufnahme auch über den eigentlichen Bedarf hinaus zugeführt. Aufgrund seiner begrenzten homöostatischen Kapazität ist das Cytoplasma damit überfordert. Daraus ergeben sich Konkurrenzsituationen, Ungleichgewichte und ungenügende Verfügbarkeit essentieller Nährstoffe für verschiedene Stoffwechselforgänge, insbesondere für die Photosynthese, aber auch für den Aufbau der Zellen. Die Folge davon sind Stress, ineffizienter Energieverbrauch, Mangelerscheinungen, Schädigung der Chloroplasten durch ROS (= reaktive Sauerstoffspezies), Abbau von Chlorophyll etc. (Scheffer, 1984; Schulze, 2002)

Durch Ionentausch ( $\text{Na}^+$ ) und Komplexbildung ( $\text{Cl}^-$ ) gehen wichtige Nährstoffe ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), aber auch Spurenelemente (z.B. Fe, Cu) in die Bodenlösung und werden bei starker Infiltration ausgewaschen. Ausserdem stehen in alkalischem Milieu verschiedene Spurenelemente (Mn, Zn, B, Mo) nicht in genügenden Mengen zur Verfügung. Dies kann insbesondere **bei den Spurenelementen zu Mangelerscheinungen** führen. (vgl. Kap. 2.2.10)

Bei unspezifischer Aufnahme durch die Wurzeln stellt  $\text{Na}^+$  einen Konkurrenten von  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  dar.  $\text{K}^+$  kann zum Mangelfaktor werden, während  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  bei veränderter Zellmembranstruktur in der Pflanze in ausreichenden Mengen und häufig als Überdosis zu Verfügung stehen.  $\text{Ca}^{2+}$  stellt aber einen Konkurrenten von Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) dar.

$\text{Cl}^-$  stellt bei unspezifischer Aufnahme einen Konkurrenten für Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) und Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) dar. Insbesondere  $\text{NO}_3^-$  kann mit  $\text{Cl}^-$  „verwechselt“ werden, was zu N-Mangel führt.  $\text{PO}_4^{3-}$  wird spezifisch und fest adsorbiert und steht nur bei sehr hoher  $\text{Cl}^-$ -Konzentration nicht ausreichend zur Verfügung.

Konkurrenz grosser Mengen  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  führt insgesamt zur **Unterversorgung durch K, N und P**. (vgl. Kap. 2.3.1)

**Reduktion des Stofftransportes:** Reduziertes Zellteilungswachstum bedeutet Bildung schmalere Jahrringe. Dadurch wird das Wasserleitungsvermögen in den Folgejahren eingeschränkt. (Flückiger, 1982)

**Behinderung des photosynthetischen Elektronentransportes:** Behinderter photosynthetischer Elektronentransport bedeutet reduzierte Photosyntheseleistung. Wegen des grossen Bedarfs an Energie für Reaktionen und Anpassungen an hohe Salzkon-

zentrationen und gleichzeitig der Schwächung des Photosyntheseapparates werden auch weniger Produkte für wichtige Stoffwechselfvorgänge und für den Aufbau der Gewebe (Kohlenhydrate, O<sub>2</sub>) hergestellt.

#### 2.3.4.2 Beeinträchtigung der Wachstumsvorgänge

**Zellstreckungswachstum:** Dieses setzt einen ausgewogenen Wasserhaushalt voraus, was bei hohen Salzkonzentrationen nur noch teilweise oder nicht mehr gegeben ist. (Schulze, 2002)

**Zellteilungswachstum:** Es besteht ein Mangel an Bausteinen und an Energie für diesen Vorgang, d.h. für das Wachstum schlechthin. Ein erheblicher Teil der Energie wird für Abwehr- und Anpassungsreaktionen sowie für die Produktion von kompatiblen Osmolyten (zur Erhöhung des osmotischen Potentials) bei der Photosynthese gebraucht und steht somit nicht zur Verfügung. Die Folge davon sind **geringeres Dicken-** (kleinere Jahrringbreiten, weniger Holzzuwachs) **und Längenwachstum** (kürzere Triebblängen, sowohl ober- als auch unterirdisch). (Schulze, 2002)

#### 2.3.4.3 Absterbesymptome

Wird das Streusalz in Ionenform über das System, d.h. vom Boden über den Stoffwechsel aufgenommen, so lassen sich folgende Symptome erkennen:

- **Blattrand- und Nadelnekrosen**

Blattrandnekrose (Blattranddürre) ist in der Regel ein gutes **Merkmal für Streusalzschäden über den Stoffwechsel**. Es handelt sich um Blattrandvergilbungen und anschliessendes nekrotisches Absterben von Zellen und Geweben an den Blatträndern und an den jüngsten Nadeljahrgängen. Die Absterbeprozesse können sich auf die ganze Blatt- bzw. Nadelfläche ausdehnen. (Butin, 1989)

Wichtige Schritte sind Überforderung des Mechanismus der Osmose, Vergiftung durch eine Überdosis an Cl<sup>-</sup>, Zerstörung von Strukturen im Chloroplasten, Zunahme toxischer Abfallprodukte, Schädigung von Zellmembranen, Lähmung des Schliessmechanismus der Stomata, Vertrocknung.

Vergilbungen, Blattrandnekrosen und vorzeitiger Blattfall bedeuten geringere Photosyntheseleistung und damit verbunden Einschränkung sämtlicher Stoffwechselfvorgänge (Energieproduktion, Atmung, Bereitstellung von Baustoffen für den Aufbau der Zellen usw.). (Heuerding, 1999) Negative Rückkoppelungen sind z.B. reduzierte Aufnahme von Nährstoffen und Spurenelementen (Schädigung der Wurzeln und der Mykorrhiza), reduzierte Leitfähigkeit für Wasser und Nährstoffe (engere Jahrringe), reduzierte Festigkeit der Zellwände (geringerer Gehalt an Zellulose), Freisetzung von Mg (Leaching).

#### **Verwechslungsmöglichkeiten**

Beim direkten Kontakt mit Streusalz im Winter (Verwehungen, Salzsnee, Gischt, Pflugsneeablagerungen) entstehen vor allem akute Schäden (Verbräunungen) auf der ganzen Blatt- resp. Nadelfläche. Sie können auch ältere Gewebe betreffen und sind oft im darauffolgenden Frühjahr und Sommer an besonders exponierten Partien der Pflanzen gut sichtbar. Hier handelt es sich hingegen um **latente Schäden**, welche **erst in der Schlussphase zu einem plötzlichen Absterben** führen.

Von den Blattrand- und Nadelnekrosen infolge Streusalzeinwirkung zu unterscheiden sind auch Schadsymptome durch Pilze und Insekten, Milben, Ozon etc. Mit Hilfe einer Lupe können Pilze, Zonierungen saugender Insekten usw. oft gut erkannt werden.

- **Kleinblättrigkeit**

Als Folge eines ausgeprägten Kreislaufes der Tausalze zwischen Baumkrone und Boden sind die Blätter häufig klein und kümmerlich ausgebildet. Dies kann als eine mehrjährige Dauerbelastung interpretiert werden. (Schrage, 1983; Heuerding, 1999; Joos Reimer, 2005; Wohlers, 2005) Sie entsteht im Zusammenhang mit der Beeinträchtigung der Wachstumsvorgänge. Die Bäume erleiden offensichtlich Vitalitätsverluste.

- **Beschleunigte Fäulnisprozesse**

Ein vitaler Baum ist in der Lage, den Angriff durch holzabbauende Pilze (z.B. nach Verletzungen) abzuwehren resp. den Schaden einzugrenzen. Bei einem gestressten Baum vermindert sich diese Kompartimentierungsfähigkeit. (Schrage, 1983; Joos Reimer, 2005)

- **Dürre Kronenpartien**

Eine offensichtliche Folge der geringeren Blatt- oder Nadelmasse ist die reduzierte Photosyntheseleistung, was mit der Zeit zum Absterben des Baumes führen kann. (Wohlers, 2005)

#### **Verwechslungsmöglichkeit**

Während mehreren Jahren durch Streusalz gestresste Bäume verlieren ihre Vitalität und die Widerstandskraft gegenüber ungünstigen Witterungsbedingungen oder Wassermangel. Da das Absterben dieser Bäume häufig mit anhaltend trockener Witterung zusammenfällt, werden die Abgänge fälschlicherweise der Trockenheit zugeschrieben. (ATR-FG-VSS, 1974; Schrage, 1983; Hock/Elstner, 1988; Heuerding, 1999; Joos Reimer, 2005; Wohlers, 2005)

### **2.3.4.4 Ökologische Auswirkungen**

#### **Sturmanfälligkeit**

Geschwächtes Wurzelwerk und veränderte Bodenstruktur (Verschlammung durch Na) reduzieren die Standfestigkeit und erhöhen dadurch die Sturmanfälligkeit der Bäume. (Heuerding, 1999)

#### **Befall durch Parasiten**

Der Dauerstress (Dehydratations-, Ionenstress), oft kombiniert mit Trockenperioden und Staubbelastung, reduziert die Leistungs- und Widerstandsfähigkeit (Vitalität) des Baumes. Er wird anfällig gegenüber Parasiten, aber auch deren natürliche Feinde werden beeinflusst (negative Rückkoppelung). (Flückiger, 1982; Joos Reimer, 2005)

#### **Gefährdung der Bodenlebewesen und der Mykorrhizapilze**

Störungen des Wasserhaushaltes, der Nährstoffverhältnisse und vor allem des pH-Wertes im Boden wirken sich direkt auf die Mikrofauna und -flora und damit unmittelbar auf die Ernährungssituation der Bäume aus. (Heuerding, 1999)

### 2.3.5 Kumulative Wirkungen

- **Abgase und Staub**

Bei abgas- und staubbelasteten Pflanzen ist der Schliessmechanismus der Spaltöffnungen beeinträchtigt. Die Pflanzen sind gezwungen, fortwährend zu transpirieren und gleichzeitig Wasser mit darin gelösten Ionen aus dem Bodenwasser zu beziehen.

Enthält aber die Bodenlösung neben den essentiellen Nährstoffen auch erhebliche Konzentrationen an Na und Cl, so sind diese bald in einer Überdosis vorhanden. Sie müssen am Ende des Saftstromes, d.h. in den äusseren Blatteilen, deponiert werden und beeinflussen dadurch den Stoffwechsel. Die anhaltende Überlastung führt zu einer schnellen Alterung des Gewebes und damit zum Blattwurf. Eine eigentliche "Chlorose" tritt erst in Erscheinung, wenn das Chlorophyll abgebaut wird. (Flückiger/Flückiger/Oertli/Guggenheim, 1977; Flückiger/Flückiger/Oertli, 1978; Flückiger/Oertli/Flückiger, 1979; Guggenheim/Flückiger/Flückiger/Oertli, 1979; Thompson/Mueller/Flückiger/Rutter, 1984)

- **Trockenheit**

Erhöhter osmotischer Druck in der Bodenlösung erschwert die Wasseraufnahme aus dem Boden. Besonders fatal wirkt sich dies unter witterungsbedingter Trockenheit aus. Kann nicht mehr genügend Flüssigkeit aus dem Boden nachgeliefert werden, so versagt schliesslich der Transpirationsmechanismus. Infolge von Wasserstress verdurstet, vertrocknet die Pflanze, was zu deren Tod führt.

Anhand von Versuchen mit jungen Bäumen konnte gezeigt werden, dass Trockenheit und Salz das Triebwachstum nicht stärker beeinträchtigt als Trockenheit allein. Trockenheit und Salz führt hingegen zu deutlich mehr nekrotischen Schäden als Trockenheit allein. (Flückiger/Örtli/Flückiger, 1979)

- **Klimawandel**

Längere Trockenheits- und Hitzeperioden führen zu vermehrtem Dehydrationsstress (vgl. 2.3.3.1) und als dessen Folge zu vermehrtem Ionenstress (vgl. 2.3.3.2) sowie zu Engpässen in der Nährstoffversorgung (vgl. 2.3.4.1). Damit verbunden sind die Beeinträchtigung der Wachstumsvorgänge (vgl. 2.3.4.2) und die Akzentuierung der Absterbevorgänge (vgl. 2.3.4.3) resp. die Verkürzung der Lebensdauer der Bäume.

Eine erhöhte Gefährdung besteht ebenso für Bodenlebewesen und im speziellen für die Mykorrhiza. Im weiteren wird das „Gleichgewicht“ zwischen den Bäumen und den Schaderregern infolge Schwächung der Bäume und Förderung von Pilzen, Insekten etc. verändert.

Der Einfluss von Tausalzen wirkt bei anderweitig gestressten Bäumen kumulativ.

Bei früherem Austrieb infolge Klimaerwärmung ist mit erhöhter Frostempfindlichkeit zu rechnen. Gleichzeitig weisen die Böden vor allem im Frühjahr erhöhte Salzkonzentrationen auf. Der Einfluss von Tausalzen auf die Frostempfindlichkeit zu diesem Zeitpunkt bedarf weiterer Abklärungen.

Eine besondere Situation stellen Föhntäler mit plötzlichen Wärmeeinbrüchen und grösseren Hitzewellen dar. Auch dort bedeutet Streusalz eine Zusatzbelastung für die Bäume.

- **Saure Niederschläge**

Nachgewiesen ist die **Auswaschung von K, Mg und Ca aus den Blättern und Nadeln** am Baum unter dem Einfluss von Säuren (Krause, 1983; Flückiger/Flückiger, 1984; Dettwiler, 1986). Immissionsbedingte saure Oxide (vorwiegend SO<sub>2</sub> und NO<sub>2</sub>) lösen sich im Regen und können als Säuren (schweflige Säure, Salpetersäure) bei hoher Konzentration die Struktur der Cuticula verändern. Dann dringen sie über die Epidermis in das Zellplasma ein, wo sie Protonen (H<sup>+</sup>-Ionen) gegen Kationen, v.a. Mg-Ionen, austauschen. Dadurch entstehen leicht lösliche Salze, welche ausgewaschen werden können (**Leaching-Effekt**).

Saure (gasförmige) Oxide können aber auch über die Stomata in den Apoplasten diffundieren. Daraus entstehen durch Reaktion mit H<sub>2</sub>O die entsprechenden Säuren. (Anonymus, 1982)

Durch saure Niederschläge geschwächte Bäume sind anfälliger auf eine Zusatzbelastung durch Tausalze. Insbesondere die Zerstörung der Struktur der Cuticula und abgestorbene Wurzelpartien stellen Schwachstellen dar. Aber auch die Mobilisierung von Kationen fördert Blatttrandnekrosen und Absterbeprozesse. (vgl. Kap. 2.1.2)

## 2.4. Kreislauf der Salze zwischen Baumkrone und Substrat

Es gibt Standorte von Strassenbäumen, welche jeden Winter einer hohen Salzfracht ausgesetzt sind. Die Menge des ausgebrachten Streusalzes pro Winter ist dort relativ gross, aber gegenüber dem für Bäume erträglichen Mass fast immer zu gross.

Daneben sind andere Standorte, je nach Strenge des Winters, unterschiedlich belastet. Winter mit grossen Streusalzgaben wiederholen sich aber in unregelmässigen Abständen.

Da das Salz in gelöster Form ins Ökosystem (Substrat, Begleitvegetation, Baum) aufgenommen und nur teilweise, z.B. durch Bodenauswaschung, eliminiert wird, bleibt es im System erhalten und wird jeden Winter zusätzlich aufdotiert. (Blum, 1974) Die Bäume können sich nie vollständig erholen, sie sind einem Dauerstress ausgesetzt.

Ein direkter Zusammenhang zwischen der im vergangenen Winter ausgebrachten Salzmenge, dem Salzgehalt in den Blättern und einer allenfalls äusserlich erkennbaren Baumschädigung lässt sich im Normalfall nicht nachweisen. Obwohl beachtliche Na<sup>+</sup>- und Cl<sup>-</sup>-Anreicherungen zu beobachten sind, findet eine interne Verlagerung im Holz und im Substrat über mehrere Jahre statt. (Brod, 1993 in Gartiser et al., 2003) Aufgrund des Salzkreislaufs innerhalb der Bäume (winterliche Speicherung in Knospen und Zweigen sowie Verlagerung von Na<sup>+</sup> und Cl<sup>-</sup> 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.

Der **Kreislauf der Salze** (Blum, 1974; Flückiger, 1982) zwischen Baumkrone und Boden entsteht durch folgende Mechanismen:

- Abwaschung von Salzen an Nadeln und Ästen durch Niederschläge im Winter (Kronentraufe, Stammabfluss)
- Auswaschung von freigesetzten Ionen aus den Nadeln und Blättern (Leaching)
- Rückführung des in den Blättern akkumulierten Salzes (Na und v.a. Cl) in den Boden beim vorzeitigen Blattfall infolge Nekrose
- Verlagerung von Cl und Na vor dem herbstlichen Laubfall in das Speichergewebe der Knospen, der Zweige, des Stammes und der Wurzeln, Mobilisierung im nächsten Frühling als "Altlast", wo sie wieder an die austreibenden Blätter und Nadeln abgegeben werden (Blum, 1974; Joos Reimer, 2005; Heuerding, 1999)
- Rückführung des in den Blättern "gespeicherten" Salzes in den Boden beim herbstlichen Blattfall, wo es nach der Zersetzung der organischen Substanzen und der Verlagerung in den Bereich der Feinwurzeln wieder aufgenommen werden kann
- Neuzufuhr über Salzstaub, Gischt, Pflugschnee und Schmelzwasser; Haftung an den Nadeln und Blättern (bei immergrünen Laubbäumen) und an den Zweigen oder Versickerung im Boden
- "Speicherung" in der Bodenlösung (Na, Cl)
- Adsorption an Bodenteilchen (v.a. Na)
- Aufnahme von Cl-Ionen aus der Bodenlösung über die Wurzeln (v.a. im Frühjahr, wenn noch grosse Cl-Konzentrationen im Boden sind und ein grosser Wasserbedarf besteht)
- Aufnahme von Na-Ionen aus der Bodenlösung, im Tausch gegen positiv geladene Teilchen aus dem Stoffwechsel ( $\text{CO}_2$  resp.  $\text{H}^+$  von  $\text{HCO}_3^-$  als Endprodukt der Atmung)
- Transport über die Leitgefässe in die Nadeln und Blätter

Selbst wenn die Streusalzausbringung nach strengen Wintern in den Folgejahren reduziert oder gänzlich unterlassen wird, **bleibt der verhängnisvolle Kreislauf** mit den akkumulierten Salzen – je nach Konzentration und Verfügbarkeit im Boden resp. in den Speichergeweben – **noch über mehrere Jahre erhalten**.

Auch in den Folgejahren reagieren die Bäume durch Bildung kleiner Blätter, Blatt-  
randnekrosen, verringerten Zuwachs, Krankheiten, Schädlinge, Trockenheitsstress etc. oder auch durch plötzliches Absterben. Kurzfristige positive Erfolge können deshalb in der Regel nicht aufgezeigt werden. (Schrage, 1983; Heuerding, 1999)

Deutliche Verringerungen der Schadenssymptome und Abnahme der  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ -Gehalte in den Blättern und Zweigen wenig geschädigter Bäume sind hingegen erkennbar, wenn mehrere Jahre hintereinander auf Streusalzeinsatz verzichtet wird (Balder/Nierste, 1988 in Gartiser et al., 2003).

## 2.5 Salztoleranz

### 2.5.1 Glykophyten und Halophyten (Schulze, 2002)

Je nachdem, ob die in der Natur auftretenden Salzkonzentrationen (hauptsächlich  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaSO}_4$ ) toxisch wirken, toleriert oder vielleicht sogar als Osmolytikum benötigt werden, spricht man von **Glykophyten** (Nicht-Salzpflanzen) oder **Halophyten** (Salz-

pflanzen). Alle in unseren Städten klimabedingt in Frage kommenden Bäume und Sträucher zählen zu den Glykophyten.

Ein osmotischer Stressor, wie z.B. Salz, erzeugt in den Pflanzenzellen "strain" (Druck). Die Reaktion darauf kann man als Adaptation (Anpassung) an die neuen osmotischen Verhältnisse interpretieren. Adaptation bedeutet Neusynthese von Proteinen, welche der Stresslinderung dienen. Im Falle der osmotischen Belastung umfasst die Stresslinderung

- Reaktionen zur Wiederherstellung einer Ionenhomöostase
- Reaktionen zur Anpassung des osmotischen Potentials
- Synthese von spezifisch wirkenden Schutzproteinen

Im Prinzip verfügen Glykophyten und Halophyten über die gleichen Mechanismen, um Salzbelastungen abzufangen. Halophyten können schnell adaptieren und extreme Salinität ertragen, Glykophyten adaptieren schrittweise bis zur Toleranz mässig hoher Salinität. Ausserdem verfügen Halophyten über gewisse Anpassungs- und Reaktionsmechanismen, welche den Glykophyten im Verlaufe der Evolution weitgehend verloren gegangen sind.

Die Übergänge von extrem salzempfindlichen bis zu extrem salztoleranten Pflanzen sind fließend, und eine scharfe Trennung wird durch die Fähigkeit zur Anpassung sehr schwierig.

### 2.5.2 Reaktionsmechanismen (Schulze, 2002)

Bei der **Reaktion der Pflanze auf hohe Salzkonzentrationen** können folgende Schritte unterschieden werden:

- **Aufnahme (Perzeption) des osmotischen Stresses durch Osmosensoren**
- **Entsendung von Signalen:** Signale werden z.B. bei erhöhtem cytosolischem  $\text{Ca}^{2+}$ -Spiegel ausgelöst und sind als "Alarm" (hier wegen der ungenügenden K-Versorgung) aufzufassen. Signale werden auch ausgelöst, wenn der osmotische Druck zwischen den Kompartimenten nicht ausgeglichen ist. In diesem Fall gibt das Signal den "Auftrag", Proteine zu bilden resp. zu mobilisieren, welche die Aufgabe haben, die Ionen vom einen Kompartiment in das andere zu befördern (z.B. Plasmamembran- $\text{Na}^+$ -ATPase, tonoplastische  $\text{Na}^+/\text{H}^+$ -Antiporter). Sehr anpassungsfähige Pflanzen bilden auch selektive  $\text{K}^+/\text{H}^+$ -Symporter, welche die ausreichende Versorgung mit K gewährleisten.
- **Adaptationsreaktionen zur Wiederherstellung einer Ionenhomöostase:** Was die Signale auslösen, wird nun vollzogen. Mit Hilfe der Proteine wird letztlich das Cytoplast entlastet, indem nicht benötigte Ionen in der Vakuole und im Apoplasten gespeichert werden. Die Speicherung in der Vakuole kann durchaus effizient sein, solange es dort genügend Platz hat. Eher problematisch ist die Abschiebung auf den Apoplasten, weil dort im Transpirationsstrom laufend Nachschub erfolgt. Entscheidend ist, dass die Ionenhomöostase nicht auf dem ursprünglichen, sondern auf einem höheren Niveau hergestellt wird. **Als Hauptproblem bleibt aber die Unausgeglichenheit im  $\text{K}^+$ -Haushalt.**

- **Adaptation des osmotischen Potentials:** Die Pflanze ist bis zu einem gewissen Grad in der Lage, Osmolyte, d.h. niedermolekulare organische Verbindungen zu bilden, welche das osmotische Potential zu erhöhen und damit das Wasser im Cytoplasma zurückzuhalten vermögen. Daneben haben diese Osmolyte auch Schutzfunktionen zu erfüllen.
- **Bildung von Schutzproteinen:** Es handelt sich u.a. um Proteine, die vielfach auch bei Pathogenitätsbefall gebildet werden. Da solche Proteine Doppelfunktionen haben, ist deren Bedeutung im Zusammenhang mit Salinitätsstress nicht restlos geklärt.
- **Beeinflussung der Stabilität von Zellwänden:** Spezifische Proteine sind mit Polysacchariden durch Quervernetzung in der Zellwand fixiert und verleihen dadurch der Zellwand ihre Stabilität. Dafür verantwortlich sind die Extensine. Zellwände von an Salz adaptierten Zellen weisen einen wesentlich geringeren Gehalt an Zellulose und an Extensin und damit eine geringere Zugfestigkeit auf. Dies wird dadurch erklärt, dass Salzstress die Dynamik des Polysaccharidstoffwechsels hemmt.

Vereinfacht ausgedrückt, beinhaltet die Salztoleranz der Glykophyten die Bereitschaft, in der Zelle mehr  $\text{Cl}^-$  und  $\text{Na}^+$  aufzunehmen, bevor eine schädliche Reaktion erfolgt. (Braun, 2007) Da es aber nicht nur um die plasmatische Salztoleranz geht, kann die **Salztoleranz bei Glykophyten** umfassender umschrieben werden mit der Fähigkeit und dem Ausmass

- "überschüssige" Salze (v.a. Na, Cl) in der Vakuole und im Apoplasten zu deponieren
- Osmolyte zur Erhaltung der Ionenhomöostase auf höherem Niveau zu produzieren
- Schutzproteine zu bilden
- mit verändertem Zellwandaufbau zu reagieren
- kleinere Zellen zu bilden und trotz geringeren Wachstumsraten die Versorgung mit Wasser und Nährstoffen sicherzustellen
- gesamthaft widerstandsfähig genug zu sein gegenüber osmotischem Stress und verschiedenen Pathogenen.

Diese **Salztoleranz ist artspezifisch**. Es gibt aber auch **innerhalb der Arten genetische Unterschiede**. (Chrometzka, 1974) Eine Selektion über das Saatgut ist bei Bäumen wegen der Langlebigkeit schwierig erreichbar. Zudem enthält jeder Same eine individuelle Genkombination. Versuche mit vegetativer Vermehrung (z.B. über Stecklinge) haben hingegen gewisse Erfolge gezeigt.

**Eine eigentliche Salzresistenz gibt es** (mindestens unter den Glykophyten) **nicht**. Auch hier gilt die Erkenntnis von Paracelsus:

*"All Ding' sind Gift und nichts ohn' Gift; allein die Dosis macht, dass ein Ding kein Gift ist."*

Massgebend für die Stärke der Salztoleranz sind aber auch die "Grundverfassung" (Konstitution) der Pflanze, das Milieu und die weiteren Einflussfaktoren.

### 2.5.3 Salztolerante Baumarten

Die Kenntnisse über die Salztoleranz von Bäumen und Sträuchern beruhen zum Teil auf eigenen Erfahrungen der Autoren, welche mit verschiedenen Arten selber Versuche durchgeführt oder mindestens im Freiland Beobachtungen gemacht haben. Einige Autoren zitieren Angaben, die sie in der Literatur gefunden haben, bei anderen wiederum handelt es sich um kopierte "Lehrmeinungen".

Werden die Voraussetzungen, unter welchen die Arten getestet wurden, oder die Einschränkungen, unter welchen die Angaben gemacht werden, nicht berücksichtigt, so ergeben sich zum Teil widersprüchliche Aussagen. Deshalb ist bei nachstehenden Ausführungen besondere Vorsicht geboten.

#### **W.C.Shortle / A.E. Rich, 1970**

Relative Toleranz von Strassenbäumen gegenüber NaCl:

##### tolerant

Quercus rubra, Quercus alba, Thuja plicata, Robinia pseudoacacia\*, Populus tremuloides, Betula lenta, Betula papyrifera, Betula populifera, Betula alleghaniensis, Prunus serotina, Fraxinus americana, Populus grandidentata

##### nicht tolerant

Tilia americana, Carya ovata, Ulmus americana, Acer rubrum, Pinus strobus, Tsuga spec., Acer saccharum, Alnus incana, Pinus resinosa

#### **U.Ruge, 1972**

Besonders empfindlich gegenüber dem Cl<sup>-</sup> aus dem Streusalz verhalten sich Rosskastanie, Ahorn und in vielen Fällen auch die Linde.

Dagegen erwiesen sich bisher die Platane, deutsche und amerikanische Eichen, Sorbus und Crataegus, Sophora, Robinie\*, Silberlinde, Esche und auch die Rotbuche als relativ „resistent“.

Allgemeine Empfehlung: am Strassenrand nur tiefwurzelnde, dürre- und immissionsresistente Laubbäume pflanzen, die ursprünglich von Kalkböden stammen.

**ATR – FG – VSS, 1974 (Technische Dreiländerkommissionen)**(Bericht der Kommission VII)

Die Angaben beziehen sich auf Erfahrungen mit Pflanzungen im fahrbahnnahen Bereich von Autobahnen und Autostrassen ausserorts.

Art		widerstandsfähig gegen		empfindlich gegen	
		Boden-salz	Gischt	Boden-salz	Gischt
Acer campestre	Feldahorn		x		
Acer platanoides	Spitzahorn		x	x	
Acer pseudoplatanus	Bergahorn		x	x	
Betula verrucosa	Birke	x			
Caragana arborescens	Erbsenstrauch	x	x		
Carpinus betulus	Hagebuche			x	x
Colutea arborescens	Blasenstrauch	x	x		
Cornus sanguinea	Hartriegel				x
Corylus avellana	Hasel			x	
Elaeagnus angustifolia	Ölweide	x	x		
Fagus sylvatica	Rotbuche			x	x
Hippophae rhamnoides	Sanddorn	x	x		
Ligustrum vulgare	Liguster	x			x
Lonicera tatarica	Russische Heckenkirsche		x		
Lonicera xylosteum	Rote Heckenkirsche		x		
Prunus avium	Vogelkirsche			x	
Pyracantha coccinea	Feuerdorn			x	
Quercus robur	Stieleiche	x			
Ribes alpinum	Alpenjohannisbeere		x		
Ribes aureum	Goldjohannisbeere		x		
Robinia pseudoacacia*	Robinie	x			
Rosa canina	Hundsrose				x
Rosa rugosa	Apfelrose		x		
Rubus fruticosus	Brombeere				x
Sambucus nigra	Schwarzer Holunder				x
Sambucus racemosa	Roter Holunder				x
Tamarix sp.	Tamariske	x			
Tilia sp.	Linde			x	
Ulmus carpiniifolia	Feldulme		x	x	
Ulmus glabra	Bergulme		x	x	
Coniferae	Nadelgehölze			x	x

Es wird postuliert, durch Versuchspflanzungen auf besonders salzgefährdeten Mittelstreifen von Autobahnen weitere salztolerante Gehölze herauszufinden. Im weiteren sollen bei Weiden und Pappeln salztolerante ökologische Rassen herausgefunden und vegetativ vermehrt werden.

**F.H.Evers, 1974** (Aussagen bezogen auf Bodensalz, nicht unmittelbar am Strassenrand)

Als weitgehend salztolerant erwiesen sich Tanne (*Abies alba*), Föhre (*Pinus sylvestris*) sowie Eichen (*Quercus* sp.).

Empfindlich sind Fichte (*Picea abies*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Weymouthföhre (*Pinus strobus*).

Jüngere Fichten überstehen den Salzscha den meist besser als ältere. Sie treiben im Mai wieder aus und können mit diesem einzigen Nadeljahrgang weiterleben; ihre Vitalität ist jedoch stark herabgesetzt.

**F.H.Evers, 1981** (Waldschutz-Merkblatt)

Wegen der von Fall zu Fall wechselnden Kombinationen der übrigen Umweltfaktoren, der Bewurzelungstiefe und auch der genetischen Varianz, sowie bei jeweils mehr oder weniger unbekanntem Grössenordnungen der Salzeinwirkungen nach Menge, Konzentration und Zeit gibt es zum Teil sich widersprechende Befunde.

Die hier wiedergegebene Reihung nach Salzempfindlichkeit der Baumarten ist (1981) als vorläufig und noch nicht gesichert zu betrachten. Sie gilt vornehmlich für die Toleranz gegen Salzwirkung im Wurzelbereich.

Sehr empfindlich: Douglasie, Fichte, Rosskastanie, Hainbuche.

Empfindlich: Ahorn, Buche, Kirsche, Linde, Strobe.

Weniger empfindlich: Birke, Erle, Esche, Föhre, Robinie\*, Sorbus-Arten, Tanne, Ulme.

Unempfindlich: Aspe, Eibe, Eiche, Grau- und Silberpappeln, Platanen, Weidenarten.

Bei sehr hohen Chloridzufuhren leiden alle Baumarten. In unbelaubtem Zustand können Schäden auch durch Eintritt von Chlorid in die Knospen auftreten.

**W.Flückiger / J.J.Oertli, 1982** (3-jährige Feldversuche zur Prüfung der Gischtsalz-, Bodensalz- und Trockenheitstoleranz)

Art		Gischt	Bodensalz
<b>gut tolerant</b>			
<i>Acer campestre</i>	Feldahorn	1	1
<i>Alnus glutinosa</i>	Schwarzerle	1	1
<i>Hippophae rhamnoides</i>	Sanddorn	1	1
<i>Rosa rugosa</i>	Kartoffelrose	1	1
<i>Pinus nigra</i>	Schwarzföhre	1	1
** <i>Tamarix tetrandra</i>	Tamariske	1	1

<i>Taxus baccata</i>	Eibe	1	1
<b>tolerant</b>			
<i>Crataegus monogyna</i>	Eingrifflicher Weissdorn	2	1
<i>Fraxinus excelsior</i>	Esche	1	3
** <i>Ligustrum ovalifolium</i>	Ovalblättriger Liguster	3	1
<i>Ligustrum vulgare</i>	Gemeiner Liguster	3	1
<i>Prunus spinosa</i>	Schwarzdorn	2	1
<i>Quercus robur</i>	Traubeneiche	3	2
<i>Rhamnus cathartica</i>	Kreuzdorn	2	2
<i>Robinia pseudoacacia*</i>	Robinie	1	2
<i>Ulmus carpinifolia</i>	Feldulme	2	3
<i>Viburnum lantana</i>	Wolliger Schneeball	3	2
<b>wenig tolerant</b>			
<i>Aesculus hippocastanum</i>	Rosskastanie	1	4
<i>Betula pendula</i>	Hängebirke	3	3
<i>Fagus sylvatica</i>	Rotbuche	2	4
<i>Lonicera xylosteum</i>	Gemeine Heckenkirsche	3	2
<i>Pinus sylvestris</i>	Waldföhre	2	3
<i>Platanus x acerifolia</i>	Platane	3	3
<i>Populus tremula</i>	Zitterpappel, Aspe	1	2
<i>Ribes alpinum</i>	Alpenjohannisbeere	2	4
<i>Tilia cordata</i>	Winterlinde	1	4
<i>Cornus sanguinea</i>	Hartriegel	3	3
<i>Euonymus europaea</i>	Pfaffenhütchen		
<b>empfindlich</b>			
<i>Thuja occidentalis</i>	Abendländischer Lebensbaum	4	3
<i>Viburnum opulus</i>	Gemeiner Schneeball	4	4
<i>Abies alba</i>	Tanne, Weisstanne	2	4
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	2	4
<i>Caragana arborescens</i>	Erbsenstrauch	3	4
<i>Carpinus betulus</i>	Hagebuche	3	4
<i>Corylus avellana</i>	Haselstrauch	3	4
<i>Larix decidua</i>	Europäische Lärche	3	4
<i>Picea abies</i>	Fichte	4	4
<i>Pinus mugo</i>	Legföhre, Bergföhre	3	4
<i>Prunus padus</i>	Traubenkirsche	-	4
<i>Salix caprea</i>	Salweide	-	4
<i>Salix viminalis</i>	Korbweide	1	4
<i>Sorbus aucuparia</i>	Vogelbeere, Eberesche	3	4

1=gut tolerant, 2=tolerant, 3=wenig tolerant, 4=empfindlich.

Mit \*\* markierte Arten sind frostempfindlich.

### (Anonymus) Forschungsreport über Umweltschutz in Baden-Württemberg, 1983

Unter den Bäumen reagieren auf Streusalz sehr empfindlich: Douglasie, Fichte, Hainbuche, Ahorn, Linde, während sich Eibe, Silberpappel, Eichen und Weidenarten als verhältnismässig unempfindlich erwiesen haben.

**H.M.Schiechl, 1983** (gestützt auf zehnjährige laufende Untersuchungen an der Inntal-Autobahn; die jährlich ausgebrachte Streusalzmenge betrug im Mittel ungefähr 10 t pro Autobahnkilometer, d.h. ca. 1.3 kg NaCl/m<sup>2</sup>)

Es zeigte sich, dass keine einzige der untersuchten Gehölzarten diese Menge ohne Schaden ertragen konnte.

Aufgrund dieser Langzeittests werden nur noch folgende Gehölzarten für die Anpflanzung an regelmässig salzgestreuten Strassen für geeignet gehalten: Schneebeere, Ölweide, Erbsenstrauch, Rote Heckenkirsche, Gemeine Esche, Alpen-Stachelbeere, Apfelrose, Bocksdorn, Strandbeifuss.

**H.Butin, 1989** (aus Evers, F.H., 1981; Alt, D./Zimmer, R./Stock, M./Peter, I./Krupp, J., 1982; Kloke, A., 1978; Leh, O., 1973)

Unter den Nadelbäumen wird die Serbische Fichte (*Picea omorica*) als besonders empfindlich eingestuft.

Unter den Laubbäumen gelten die Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*), der Ahorn (*Acer* sp.) und die Linde (*Tilia* sp.) als extrem empfindlich. Zu den salztoleranten Baumarten werden Eiche (*Quercus* sp.), Platane (*Platanus* sp.) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*)\* gezählt. Von den ausländischen Baumgattungen haben sich *Ailanthus* (Götterbaum)\*, *Gleditsia* (Gleditschie) und *Sophora* (Schnurbaum) als relativ salzresistent erwiesen.

**K.Joos Reimer, 2005** (Angaben aus der Literatur)

Sehr salzempfindlich sind erfahrungsgemäss Ahorne (*Acer*), Rosskastanien (*Aesculus*) und Linden (*Tilia*, insbesondere *T.platyphyllos*, *T.cordata*, und *T.tomentosa*) - Gattungen, die den Hauptteil des Strassenbaumbestandes ausmachen.

Nadelgehölze sind gegenüber Salzschäden generell empfindlich, da sie die Salzlast nicht nur im Wasser gelöst über die Wurzeln, sondern als Salzgischt direkt auch über die immergrünen Nadeln aufnehmen.

Als relativ salztolerant gelten *Ailanthus altissima* (Götterbaum)\*, *Ginkgo biloba* (Ginkgo), *Gleditsia triacanthos* (Gleditschie), *Platanus x acerifolia* (Platane), *Robinia pseudoacacia* (Robinie)\* und *Sophora japonica* (Schnurbaum).

**A.Wohlens, 2005**

Als besonders salzempfindlich bei direktem Kontakt gelten beispielsweise Ahorn, Linde, Rosskastanie, Baumhasel.

Bei Aufnahme von Salzen über den Boden sind negative Folgen langfristig auch bei weniger empfindlichen Baumarten möglich: Eiche, Platane, Robinie\*.

**D.Rose / J.Webber, 2011**

Toleranz gegenüber Bodensalz:

gross

*Alnus glutinosa*, *Elaeagnus angustifolia*, *Gleditsia triacanthos*, *Pinus nigra* (alle Varietäten und Unterarten), *Picea pungens*, *Quercus robur*, *Robinia pseudoacacia*\*, *Salix alba*, *Ulmus glabra*

mässig

*Acer campestre*, *Alnus incana*, *Crataegus monogyna*, *Carpinus betulus*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Picea abies*, *Pinus contorta*, *Pseudotsuga menziesii*, *Sorbus aucuparia*, *Thuja occidentalis*

gering

*Acer pseudoplatanus*, *Aesculus spec.*, *Betula pubescens*, *Cornus spec.*, *Corylus spec.*, *Larix decidua*, *Platanus x hispanica*, *Prunus avium*, *Tilia cordata*, *Tilia platyphyllos*

---

**\*Anmerkung:**

Arten der Schwarzen Liste (invasive Neophyten) fallen ausser Betracht. Dazu gehören die wiederholt erwähnten Arten *Ailanthus altissima* (Götterbaum) und *Robinia pseudoacacia* (Robinie).

**2.5.4 Anpassungserscheinungen**

Angeblich sind gewisse (Baum-)Arten im Verlaufe ihrer Entwicklung in der Lage, ihre Salztoleranz zu verändern. (Brod, 1993 in Gartiser et al., 2003) Nach welchen Kriterien dies beurteilt und gemessen wird, geht aus den verfügbaren Quellen nicht hervor.

Untersuchungen zeigen ausserdem eine Zunahme salztoleranterer Arten auf Strassenrandböden. Brod, 1993 in Gartiser et al., 2003) Diese Aussage lässt sich weniger als eine Anpassung an das salzige Milieu, denn vielmehr als Selektion salztoleranterer Arten interpretieren, während andere Arten sowohl wegen der hohen Salzkonzentrationen als auch aufgrund des Konkurrenzdruckes zurückgedrängt werden.

**2.5.5 Grenzwert für NaCl****Ausgebrachte Salzmengen**

In den 1960er und 1970er Jahren wurde fast bedenkenlos Salz gestreut. Im Winter 1969/70 beispielsweise brachte man es in Städten Deutschlands auf Hauptverkehrsstrassen bis auf 2.6 kg NaCl/m<sup>2</sup>. (Ruge, 1972) Ausgehend von der Annahme, dass von der ausgebrachten Salzmenge nicht mehr als 10 % in die Wurzelregion der Bäume eindringen, wurde postuliert, Stadtbäume würden bei einer guten physiologischen Pflege eine aufsummierte Winterstreuung von **1 kg NaCl/Jahr/m<sup>2</sup>** ertragen. (Ruge, 1972) Ob diese Angaben auf Versuchen und Messungen beruhen, geht aus der Quelle nicht hervor. Die Vorgabe könnte auch aus opportunistischen Überlegungen gemacht worden sein, da man davon ausging, eine Reduktion von 2.6 auf 1 kg sei technisch und organisatorisch möglich, ohne auf die Sicherheit im Strassenverkehr verzichten zu müssen.

Der angeblichen "Empfehlung", Streusalz sei bis zu jährlichen Streumengen von 1 kg pro m<sup>2</sup> ökologisch unbedenklich, wurde in der Zwischenzeit mehrfach widersprochen.

Diese Streumenge sei für Strassenrandvegetation höchst gefährlich, da die Salzmenge von mehreren Quadratmetern Strassenfläche seitlich aufsummiert auf die Randvegetation einwirkt und zu den genannten Schäden führt. (GALK, 1998)

Neuere Untersuchungen vermögen "angeblich" zu belegen, dass Mengen von unter 1 kg pro m<sup>2</sup> und Jahr unschädlich sind. (Brod, 1994 in Hanke, 1998-1) Wo sich dieser Grenzwert befindet, wurde allerdings nicht festgestellt und ist auch nicht möglich. Unberücksichtigt blieben nämlich die Tatsache der Akkumulation über mehrere Jahre hinweg nach wiederholter Ausbringung und der verhängnisvolle Kreislauf der Tau-salze im ganzen System (vgl. (2.4).

In der konsultierten Literatur werden folgende Fragen nicht beantwortet:

- Welche Auswirkungen auf Strassenbäume haben Streusalzmengen, wenn sie den Grenzwert von 1 kg/m<sup>2</sup>/Jahr überschreiten? (Schäden, Wuchshemmungen?) Diese noch akzeptable Menge ist für ein Milieu mit einer üblicherweise ungenügenden mineralischen Nährstoffversorgung nicht nachvollziehbar. (Heuerding, 1999)
- Welche wissenschaftlich durchgeführten Feldversuche belegen die Aussage, dass 1 kg Salz pro m<sup>2</sup> und Jahr für die Vegetation unbedenklich ist? (Heuerding, 1999)

Anzunehmen ist hingegen, dass die gesamte ausgebrachte Menge von 1 kg/ m<sup>2</sup> heute im kommunalen Bereich häufig weit unterschritten wird oder unterschritten werden könnte. Dass bei vorsichtiger Dosierung und Ausbringung eine merkliche Entlastung der Umwelt möglich ist, darf mit Sicherheit angenommen werden. Ob aber damit keine kritischen Umweltschäden mehr hervorgerufen werden (Hanke, 1998-1), bleibt vorderhand fraglich.

Inzwischen weiss man auch, dass Mengen von über 10 g/m<sup>2</sup> pro Streugang im Normalfall keine erhöhte Tauwirkung haben, sondern wegen der Kristallisation des überschüssigen Salzes (NaCl) für die Verkehrssicherheit sogar kontraproduktiv sein können. (vgl. Kap. 6.4.1) Folglich lässt sich bei unnötiger Ausbringung zu grosser Mengen auch nicht von Wirtschaftlichkeit sprechen. Um auf 1 kg Salz pro m<sup>2</sup> zu kommen, braucht es immerhin 100 Streugänge à 10 g/m<sup>2</sup>. Bei der vorbeugenden Streuung im Soleverfahren genügen bereits 5 g/m<sup>2</sup>.

Einer früheren Untersuchung zufolge entsprechen Streusalzfrachten am Strassenrand von durchschnittlich 6-48 g/m<sup>2</sup> pro 14 Tage einer natürlichen Meeressalzsedimentation in küstennahen Bereichen. (Brod, 1993 in Gartiser et al., 2003) Über eine Winterperiode von 3 Monaten entspricht dies einem seitlichen Eintrag von 36-272 g/m<sup>2</sup>. Bei Annahme einer 6 m breiten schneefrei gehaltenen Fahrbahn und einseitigem seitlichem Eintrag von 10 % errechnen sich daraus gestreute Salzmenngen von 60-453 g/m<sup>2</sup> und Winter.

### **Grenzwerte für Böden**

Massgebend ist letztlich nicht die gesamte ausgebrachte Streusalzmenge, sondern die Menge Na<sup>+</sup> und Cl<sup>-</sup>, welche direkt auf die Pflanze gelangt resp. welche über die Bodenlösung von den Pflanzen aufgenommen wird und zu Schäden an den Bäumen führt. **Mitzubberücksichtigen ist dabei stets der Kreislauf der Salze im System im Verlaufe der vergangenen Jahre. Vorhandene Konzentrationen können deshalb das Ergebnis der Akkumulation und Mobilisierung von mehreren Jahren sein.** (vgl. Kap. 2.4)

Auf die Fahrbahn ausgebrachtes Streusalz bildet ein Gemisch mit Eis und Schnee. Ein Teil des Salzes geht in Lösung und wird mit dem von der Strasse abfliessenden

Schmelzwasser über die Abflusssysteme der Strasse in die Oberflächengewässer befördert; dadurch wird es verdünnt. Wieviel NaCl-haltiges Schmelzwasser in den bepflanzten Strassenrandbereich gelangt, hängt vom Ausbau bzw. der Effektivität der Entwässerungseinrichtungen sowie vom Zeitpunkt und der Art der „Schneeräumung“ ab. Ein Teil gelangt zuerst nicht auf den Boden, sondern direkt auf die Nadeln, Blätter, Zweige usw.

Generell ist es schwierig, genaue Messungen über die Mengen, welche auf verschiedene Weise verfrachtet bzw. „entsorgt“ werden, durchzuführen. Deshalb gibt es in der Literatur darüber nur wenige Angaben.

Der Wirkungsbereich von Auftausalzen beschränkt sich i.d.R. auf einen 2-10 m breiten Fahrbahnrandbereich. Vom Streusalz, das auf die trockene oder „eisig-trockene“ Fahrbahn gestreut wird, kann Salzstaub unter Umständen bis zu 100-200 Meter weit verweht werden. Auf Fernstrassen gelangen etwa 10-15% der ausgebrachten Salze als Salzaerosole in den Strassenrandbereich (Tegethof, 1998 in Gartiser et al., 2003). 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 in Gartiser et al., 2003) Die Entwässerungen der Strassen ausserorts sind sehr unterschiedlich. Man geht von etwa 60 % des Schmelzwassers aus, welches nicht über die Strassenentwässerung „entsorgt“ wird, d.h. in die angrenzenden unversiegelten Flächen gelangt.

Im innerstädtischen Bereich werden schätzungsweise 40 % der ausgebrachten Salz-mengen mit dem Schmelzwasser in die Strassenrandböden verfrachtet. Etwa 5 – 15 % gelangen mit der Verkehrsgischt als Salz-Aerosole zu den oberirdischen Pflanzenteilen und können dort in die Pflanzen eindringen. Dies hängt hauptsächlich vom Verhalten der Autofahrer ab. (Assmann, 1999)

Da  $\text{Na}^+$  am Kationenaustausch in der Bodenmatrix teilnimmt und dadurch andere Kationen zu ersetzen vermag, bleibt nur ein Teil des Eintrags in der Bodenlösung. Das  $\text{Cl}^-$  wird in der ungesättigten Zone zwischengespeichert. Durch erhöhte Infiltration (Regen- oder Tauwetter) kann es in stark durchlässigen Böden innerhalb weniger Tage ausgewaschen werden und gelangt so in den Grundwasserkörper. Allerdings können Restkonzentrationen auch noch während Jahrzehnten in der ungesättigten Zone verbleiben. (Brod, 2009) In stark verdichteten Böden – wie sie im Bereich von Stadtbäumen häufig vorkommen – bleiben  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  wesentlich länger in der Bodenlösung und können sich laufend aufsummieren.

Mit einer erhöhten Salzaufnahme durch die Pflanzenwurzel aus der Bodenlösung und mit **sichtbaren Schäden** an Gehölzen muss **ab Bodengehalten von 1200 mg/kg  $\text{Na}^+$  und von 600 mg/kg  $\text{Cl}^-$**  gerechnet werden (Brod, 1995) Aber bereits **Bodenwerte für  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  von über 250 mg/kg werden für die meisten Baumarten als schädlich angesehen.** (Hootman und Kelsey et al., 1994)

### **Grenzwerte für Blätter und Nadeln**

Sowohl Chlorid als auch Natrium und Calcium gelten als pflanzliche Mikronährstoffe und werden von den Pflanzen in geringen Mengen zum Wachstum benötigt. In grossen Mengen sind sie jedoch für die pflanzlichen Organe nachteilig oder sogar schädlich. Allgemein werden für Pflanzen folgende Grenzwerte (% Trockengewicht Blätter) genannt, von wo an eine Schädigung einsetzt: **0.5% Chlorid bei immergrünen Na-**

**delbäumen sowie 0,5-1,5% Chlorid und 0.1-0.8% Natrium bei salzempfindlichen Pflanzenarten** (Brod, 1993; Brod, 1995). In Gehölzen erfolgt eine Anreicherung von Chlor in der Reihenfolge Blätter > Zweige > Winterknospen > Früchte. In Nadelbäumen hat man auch eine natürliche Konzentrationszunahme von Na und Ca in den Nadeln mit zunehmendem Alter und Wachstum festgestellt (Viskari/Kärenlampi, 2000).

Gemäss VDLUFA (1991) liegt der Grenzwert für eine Pflanzenschädigung durch Salz in der Landwirtschaft **auf karbonatfreien Böden bei 2000 mg/kg und in karbonatreichen Böden bei 4000 mg/kg Trockengewicht der Blätter**. Der Wert von 2000 mg Cl<sup>-</sup>/kg Blattmasse wurde im Jahre 2012 in Basel bei 81.9 % der analysierten Bäume, der Grenzwert von 4000 mg/kg bei 72.1 % der Bäume überschritten. Beprobt wurden insgesamt 989 Stadtbäume verschiedener einheimischer und exotischer Arten. Die Analyseergebnisse stimmen recht gut mit der visuellen Taxation überein. 78.8 % aller beprobten Bäume wurden als salzgeschädigt eingestuft. Bemerkenswert ist die Feststellung, dass auch äusserlich gesund erscheinende Blätter Chloridgehalte von deutlich über 4000 mg/kg aufwiesen. (Flückiger/Braun, 2013)

Als grösster Risikofaktor erwiesen sich Standorte in der Nähe von Einfahrten und Fussgängerstreifen. Ausserdem waren die Chloridkonzentrationen bei hochgestellten Randsteinen grösser als bei flachen. (Flückiger/Braun, 2013)

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den ausgebrachten Salzmengen, so führen auch Mengen weit unter 1 kg/m<sup>2</sup> zu toxischen Konzentrationen in den Blattmassen. Im Durchschnitt der Winter 2005/06 – 2011/12 wurden auf 328 km Stadtstrassen in Basel etwa 325 g/m<sup>2</sup> ausgebracht, im Spitzenjahr 2009/10 waren es 800 g/m<sup>2</sup>. (Jeanret, 2013). Dabei gilt es festzuhalten, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der im vergangenen Winter ausgebrachten Salzmenge und den festgestellten Gehalten in den Blättern besteht. **Es handelt sich vielmehr um Konzentrationen, welche im System drin über mehrere Jahre aufsummiert und im Kreislauf reaktiviert werden.** (vgl. Kap. 2.4)

Als Indikator für eine Baumschädigung wird von anderen Autoren auch das **K/Cl – Äquivalenzverhältnis** in den Blättern herangezogen. So kann es z.B. bei einem **K/Cl < 1**, trotz ausreichender Kaliumversorgung ( $K > 1$  % Trockengewicht), zu Blattrandnekrosen kommen. (Brod, 1993, in Gartiser et al., 2003) Damit wird die Blockierung des K<sup>+</sup> bei hoher Cl<sup>-</sup> Konzentration angezeigt.

## Folgerungen

So wie es unter den Glykophyten keine salzresistenten Baum- und Straucharten gibt, lässt sich auch kein einheitlicher Grenzwert für die Menge des eingebrachten Streusalzes (NaCl) festlegen. Die relative Salztoleranz ist nicht nur artspezifisch, sondern sie hängt auch von den verschiedensten Standortsfaktoren wie Klima (Witterung), Exposition (Sonneneinstrahlung), Boden (Nährstoffhaushalt, Durchlässigkeit, Durchwurzelbarkeit etc.), aber auch von der Jahreszeit (Entwicklungsphase, Phänomenologie), den weiteren Umwelteinflüssen und letztlich von der Art der Salzeinwirkung (über direkten Kontakt, über den Stoffwechsel) ab. Die Pflanze reagiert unterschiedlich, je nachdem, ob die gesamte Menge Salz auf einmal oder in verschiedenen Portionen eingetragen wird. Schliesslich ist entscheidend, ob ein Baum schon während mehrerer Jahre grosser Salzbelastung und weiteren Umwelteinflüssen ausgesetzt war. Für eine allfällige Bewertung und Beurteilung ist immer das System als Ganzes zu betrachten. (vgl. Kap. 2.4)

### 3. Andere Einflüsse auf Strassenbäume

#### Unmittelbare Belastungen

Das Gedeihen von Stadtbäumen kann durch verschiedenartige, in direktem Zusammenhang mit menschlichen Aktivitäten stehende Einflüsse beeinträchtigt sein. Zu diesen spezifischen Einflüssen zählen (Ruge, 1974; Encke, 1983; Schrage, 1983):

- Abdeckung und Versiegelung der Baumscheiben/ -streifen (Verhinderung Belüftung und Wasserversorgung)
- zu kleine Baumscheiben (Boden verdichtet, schlechte Belüftung des Wurzelraumes, ungenügende Wasserversorgung)
- ungeeignetes Bodensubstrat
- fehlende oder ungenügende Nährstoffversorgung
- geschädigte oder fehlende Mykorrhiza
- Beschädigungen der Wurzeln bei Bauarbeiten
- Beschädigungen der Rinde durch parkierende Autos
- pilzliche Erkrankungen, z.B. nach Verletzungen (Stammfäulnis, Schwächung Assimilationsorgane)
- Lichtmissionen (Einfluss auf die Insekten und auf die Photosynthese)
- undichte Gasleitungen
- Hundefäkalien
- Schäden durch Herbizide
- weitere Verunreinigungen (z.B. Motorenöl)

Bei den Böden unmittelbar neben der Fahrbahn (Strassenrandböden) handelt es sich meist um künstlich verdichtete, skelett- und kalkreiche Aufschüttungen, welche Zement- und Betonreste, karbonathaltige Stäube, Geröll, Sand, Kies und andere Baureststoffe enthalten. Die Funktion dieser Böden als Lebensraum für Organismen sowie als Wurzelraum ist dadurch weitgehend eingeschränkt.

Ganz generell zeichnen sich Strassenrandböden durch eine grosse 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 den hohen Sand- und Skelettanteil findet kaum eine Beeinträchtigung der Wasserbewegung durch Tausalze statt, d.h. sie sind sehr stark durchlässig. Die normalerweise in tausalzbelasteten Böden beobachtbare Ton-dispergierung und die daraus folgende verminderte Strukturstabilität gilt nur bedingt für solche Strassenrandböden. Sie bilden oft Landschaftsrasen aus Gräsern und Kräutern.

Verglichen mit der Austauschkapazität natürlicher Böden weisen derartige Strassenrandböden nur eine geringe Sorptionskapazität auf. Hingegen verfügen sie aufgrund des Ausgangsmaterials über eine hohe Basensättigung, v. a. im Hinblick auf Ca und Mg, aber auch Na, gegenüber dem Eintrag von Tausalz (Tegethof, 1998 in Gartiser et al., 2003).

In Strassenrandböden überwiegen neutrale bis basische Bodenreaktionen. Die Verfügbarkeit an Nährstoffen und Spurenelementen ist eingeschränkt. (Brod, 1993, Hootman et al., 1994 in Gartiser et al., 2003) Die Auswaschung von Nährstoffen, der Entzug von Wasser im Wurzelbereich sowie eine zusätzliche Behinderung der Nähr-

stoffaufnahme (P, K, N) können zu indirekten Pflanzenschädigungen führen. (Gartiser et al., 2003)

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, in Gartiser et al., 2003).

### **Chronische Belastungen**

Auch ohne Streusalzbelastung sind Strassenbäume und Begleitgrün zahlreichen Belastungen und damit anhaltendem Stress ausgesetzt. Dazu zählen (Ruge, 1974; Flückiger, 1982; Encke, 1983; Schrage, 1983; Zeller, 1983):

- verkehrsbedingte Immissionen (CO, NO<sub>x</sub>, Kohlenwasserstoffe, Pb, Cd, Rauch)
- Abnutzung von Strassenoberflächen und Reifenabrieb (Staub, Asphalt, Gummi, Schwermetalle wie Zn und Cd)
- Korrosion von Stahl- und Bauwerken sowie von Fahrzeugen (Fe, Ni, Cr, V, W, Cu, Mo)
- Auslaugung von Strassenmaterial
- Böden mit hohen Schadstoffkonzentrationen (z.B. Schwermetalle)
- Fahrtwind
- starker Parasitenbefall (auch unabhängig vom Streusalz)
- Mäusefrass am Wurzelwerk
- Trockenheitsstress (u.a. wegen ungeeigneter Bodenstrukturen, aber auch wegen zu geringem Eintrag von Niederschlägen auf der kleinen Fläche, oberflächlicher Abfluss infolge Versiegelung)
- Hitzestress (Rückstrahlung der Fahrbahn)
- Stadtklima ("Backofeneffekt", Wärmeinseln)

### **Stadtklima und Klimawandel**

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel werden erwähnt (Bernhofer et al., 2007):

- höhere Jahres-Durchschnittstemperaturen
- längere und häufigere Trockenheits- und Hitzeperioden
- Niederschläge in Form von Regen vermehrt im Winterhalbjahr, weniger häufig im Sommerhalbjahr
- häufigere Starkniederschläge
- häufigere Nassschneeeignisse
- häufigere Spätfröste bei früherem Beginn der Vegetationsperiode

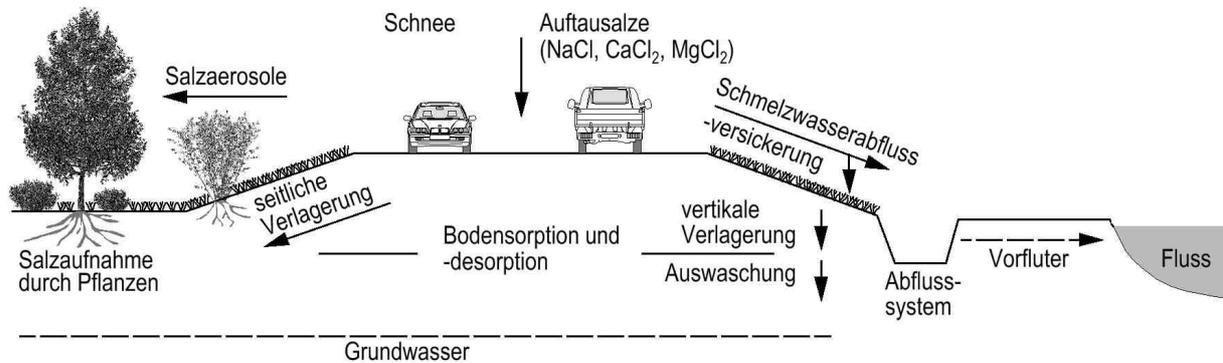
Für die Stadtbäume sind dabei von besonderer Bedeutung:

- häufigerer Trockenheitsstress
- grössere Frostempfindlichkeit bei frühem Austrieb
- häufigere Astbrüche bei Nassschnee
- Ausbreitung von Krankheiten und Schädlingen

Der Klimawandel findet nicht nur global oder landesweit statt. Bereits in Stadtteilen ist er spürbar. Er verstärkt den sogenannten Wärmeinsel-Effekt in den Agglomerationen und Städten. Verantwortlich für dieses Phänomen sind die Versiegelung der Bodenflächen im städtischen Raum sowie die Abwärme von Fahrzeugen, Industrie und Klimaanlagen. In den Zentren ist ein Grossteil des Bodens asphaltiert, undurchlässig und sehr trocken. Gleichzeitig absorbieren Gebäude grosse Mengen an Strahlung, die entweder direkt von der Sonne stammt oder als Infrarotstrahlung von den umliegenden Oberflächen reflektiert. So entstehen Wärmeinseln, die tagsüber die Erwärmung verstärken und nachts die Abkühlung erheblich einschränken. Beispielsweise in Zürich sind nächtliche Temperaturunterschiede zwischen Stadt und ländlicher Umgebung von 4 bis 5° gemessen worden. Dadurch ergibt sich ein völlig anderes Klima für die Stadtbäume. Dieses ist aber nicht auf der gesamten Stadtfläche homogen und ausgeglichen. (Mühleberger de Preux, 2012)

## 4. Einflüsse von Streusalz auf die Gewässer

### Streusalz beeinträchtigt das Oberflächen- und das Grundwasser



Wege der Auftausalze in der Umwelt (aus: Brod, H.G., 1993)

Das Streusalz gelangt entweder durch oberflächlichen Abfluss oder durch Versickerung im Boden in die Gewässer.

Auf dem Strassenbelag aufgelöste Salze fließen zusammen mit dem Schmelzwasser entweder über die Strassenentwässerung (Wasserableitung) direkt in die Kanalisation oder über einen Vorfluter auf unversiegelte Flächen. Je nach Entsorgungssituation fließt das salzhaltige Wasser in einen Bach oder Fluss und von dort eventuell in einen See, oder es wird der Kläranlage zugeführt. Im Nahbereich eines Oberflächengewässers kann es auch ins Grundwasser gelangen.

Die Effizienz der künstlichen Entwässerung eines Verkehrsträgers in bezug auf die Ausbreitung von Streusalz ist schlechter, als dies aus bisherigen, weniger breit angelegten Untersuchungen hervorgeht. Es ergibt sich die unerwartete und für den Streusalzeinsatz unerfreuliche Aussage einer bedeutenden Salzverfrachtung durch die Fahrzeuge, durch Windverfrachtungen sowie durch diffuses Versickern des Schmelzwassers von Pflugschnee. Bei einem Versuch im Kanton Zürich (Versuchsfeld A3) gelangten trotz Strassenabdichtung und künstlicher Entwässerung etwa 40 % des ausgebrachten Streusalzes in die Quellen (Link AG, 1997, in Heuerding, 1999)

Versickert das Salzwasser an Ort und Stelle im Boden, so kann es direkt das Grundwasser beeinflussen oder später wieder in ein Oberflächengewässer einfließen. Vor allem in Grundwasserströmen im Bereich von Strassen kann bei ungenügender Ableitung von salzhaltigem Wasser die Chloridkonzentration massiv ansteigen.

Besonders hohe Gehalte an Na<sup>+</sup> und Cl<sup>-</sup> wurden im deponierten und im seitlich abgestossenen Pflugschnee festgestellt, wo die Fahrbahn vorgängig mit Streusalz behandelt wurde. Im Frischschnee waren die Gehalte an Na<sup>+</sup> bis 100 Mal und an Cl<sup>-</sup> bis 300 Mal höher als im länger gelagerten Altschnee. Die grossen Unterschiede beruhen auf den Schmelz- und Auslaugvorgängen, durch welche das Salz rasch in den Untergrund ausgewaschen wird. Allerdings wird der deponierte Altschnee zusätzlich mit

Schwermetallen wie Pb, Zn, Fe und Mn aus der Verschmutzung der Verkehrsflächen angereichert. (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1999; Jungclaus, 1984)

Im weiteren wurde festgestellt, dass im Bankettbereich Cadmium mobilisiert wird. Bei gleichzeitig hoher Cl-Konzentration im Boden kann dieses Cd nicht mehr von der Bodenmatrix adsorbiert werden. (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1999)

Kläranlagen können wegen des Eintrags grosser Mengen Wasser mit hohen Cl-Konzentrationen überlastet werden. Neben dem grossen Cl-Gehalt ist es vor allem die Abkühlung, welche die biologischen Abbauprozesse behindert. (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1999)

Aus der Sicht der Wasserqualität wird in erster Linie der Chloridgehalt beurteilt. Grund- und Oberflächenwasser, das Cl-Konzentrationen von über 50 mg pro Liter aufweist, ist als Brauchwasser in der Industrie ungeeignet, da erhöhte Korrosion auftritt. (Anonymus, 1989) Für das Trinkwasser geben die WHO und die EU einen oberen Wert von 250 mg/l als Richtgrösse an. Massgebend sind dabei vor allem die Geschmacksveränderungen.

Bei Chloridkonzentrationen über 200 mg/l muss mit Auswirkungen auf aquatische Lebensgemeinschaften gerechnet werden. Bei Werten zwischen 400 und 2000 mg setzt ein allmählicher Rückgang der Artenzahl auch weniger empfindlicher Arten sowie ein Auftreten salztoleranter Arten ein (Brod, 1995 in Gartiser et al., 2003). Entsprechende Labor- und Freilandversuche legen einen Schwellenwert von 1000 mg/l 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 Stress bei der Osmose und beim Verhalten. (Williams et al., 1999 in Gartiser, 2003). Bei Chloridkonzentrationen von 2000- 5000 mg/l ist mit einer Verarmung ganzer aquatischer Lebensgemeinschaften zu rechnen, während ab 5000 mg/l Süsswasserorganismen aussterben und eine Verödung der Artenvielfalt einsetzt (Brod, 1995 in Gartiser et al., 2003). Mit einem Fischsterben muss ab 4000 mg Cl-/l gerechnet werden.

Allgemein gelten Konzentrationen zwischen 7-15 g NaCl pro l als fischtoxisch. Eine Störung der natürlichen Selbstreinigungskraft im Vorfluter wurde bei 2000 mg Chlorid pro l beobachtet, während Konzentrationen ab 1000 mg NaCl im Zulauf die Reinigungsleistung von Kläranlagen beeinträchtigen. Die Ablaufqualität einer biologischen Versuchskläranlage (Labor-Belebtschlamm-Anlage) wurde bei einer NaCl-Konzentration von 6,25 g/l verschlechtert. Ab 20 g NaCl pro l erfolgt die Hemmung des mikrobiellen Peptonabbaus, während eine vollständige Hemmung mikrobieller Aktivität bei 80 g NaCl pro l einsetzt (Brod, 1993 in Gartiser et al., 2003).

In städtischen Abwässern kann der Tausalzgehalt ohne weiteres auf Grössen von 100 mg/l und mehr ansteigen. Wird bei Strassenentwässerungen das ablaufende Wasser nicht verdünnt, so kann es in der Hauptwasserleitung in Extremfällen bis 5000 mg Tausalz pro Liter enthalten. (Ruess, 1998-1)

Entscheidend für die Kontamination sind:

- Konzentration der Salze (v.a. Cl-) im anfallenden Wasser
- Verbleib des salzhaltigen Wassers nach der Ableitung von der Strasse

- Grösse der Fliessgewässer (Durchflussvolumen pro Zeiteinheit)
- geologische und hydrologische Bedingungen im Bereich der Grundwasserträger (Ruess, 1998-1)

Aufgrund von Untersuchungen kann gesagt werden, dass

- grosse Grundwasserträger mit hoher Durchflussrate gegenüber Zufluss von Salzwasser im allgemeinen unempfindlich sind
- die Belastung des Grundwassers gross sein kann, wenn der Grundwasserstand hoch liegt, das Grundwasser sich in der Nähe einer Strasse befindet, der Boden durchlässig ist, die Durchflussrate gering ist (Ruess, 1998-1)

Bei Grundwasser mit grosser bis mässiger Ergiebigkeit entstehen somit im allgemeinen keine Probleme. Andererseits ergeben sich unter Umständen kritische Situationen bei Grundwasservorkommen und bei Quellen mit bescheidener Ergiebigkeit. (Blaser et al., 1997, in Ruess, 1998-1)

Die von Auftausalzen ausgehenden Belastungen stellen vor allem bei kleinen Fliessgewässern in forstlich und landwirtschaftlich genutzten Gebieten, deren Einzugsgebiete von stark frequentierten Verkehrswegen durchquert werden, den Hauptteil der Gesamtbelastung dar. In grösseren Flüssen, die durch Siedlungs- und Industriegebiete fließen, fällt der Einfluss der Auftausalze hingegen anteilmässig nur wenig ins Gewicht. (Ruess, 1998-1; Blasius/Merritt, 2002; Lenz/Bärschneider, 2010)

Am Rande sei noch bemerkt, dass beispielsweise in der Stadt Chur gemäss Weisung des kantonalen Amtes für Natur und Umwelt seit dem Winter 2005/06 der gesetzte und verschmutzte Schnee nicht mehr in die Plessur oder in den Rhein gekippt werden darf. (Trempe, 2005)

Auch wenn es die Stadtbäume nur ausnahmsweise betrifft, muss der Vollständigkeit halber auf das Problem der **Gischt-Abdrift** und der **Abschwemmung** hingewiesen werden. Es kann zu ernsthafterer Gefährdung von Bäumen und Baumgruppen kommen, wenn bestimmte Konstellationen der Geländemorphologie (Relief), der Bodenverhältnisse und der Baumarten vorliegen. (ATR-FG-VSS, 1974; Wentzel, 1974; Evers, 1981)

Die Einleitung salzbelasteter Vorfluter in unversiegeltes Gelände kann, meist örtlich begrenzt, den Bäumen ebenfalls Schäden zufügen.

Bedeutenden Einfluss auf die Stadtbäume hat hingegen der salzgetränkte Schnee, welcher neben die Strasse geschoben resp. an bestimmten Stellen deponiert wird (**Pflugschnee**), sei es **durch direkten Kontakt oder durch Versickerung im Boden**.

In den Jahren 1995-2000 wurde verschiedentlich über eine erfreuliche Abnahme der ausgebrachten Streusalzmengen berichtet. (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1999). Seit die Nachteile von Split bekannt sind, ist allerdings wieder eine deutliche Zunahme der Verwendung von NaCl und anderen Salzen feststellbar, was sich auch auf die Gewässer nachteilig auswirkt. Der Einsatz des hauptsächlich gebräuchlichen Auftaumittels NaCl lässt sich insbesondere im Winter und Frühjahr im Grundwasser, in Oberflächengewässern und in Kläranlagen feststellen. Schädliche Auswirkungen sind hier in besonders gelagerten Situationen zu erwarten.

Völlig gewässerneutrale chemische Auftaumittel zur Gefrierpunktniedrigung des Wassers sind nach Meinung der Gewässerschutzexperten nicht denkbar. Die Nebenwirkungen von Streusalz-Ersatzmitteln müssten sich wenigstens an den derzeitigen Hauptprodukten NaCl und gegebenenfalls CaCl<sub>2</sub> bzw. MgCl<sub>2</sub> messen lassen. Unter Berücksichtigung aller Aspekte wird daher im Strasseneinsatz in der Regel der Verwendung herkömmlicher Salze (NaCl, möglichst mit CaCl<sub>2</sub>/MgCl<sub>2</sub> als Feuchtsalz) der Vorzug gegeben. (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1999)

## 5. Haftungsrechtliche Fragen

Im Zusammenhang mit der Haftung für Sicherheit beim Winterdienst kommen insbesondere folgende Bestimmungen zum Tragen (Ammann, 2012; GALK-AGS, 2011):

- **OR 58 Haftung des Werkeigentümers** (Instandhaltung, Unterhaltspflicht)

Der Eigentümer eines Gebäudes oder eines anderen Werkes hat den Schaden zu ersetzen, den diese infolge von fehlerhafter Anlage oder Herstellung oder von mangelhafter Unterhaltung verursachen. Vorbehalten bleibt ihm der Rückgriff auf andere, die ihm hierfür verantwortlich sind.

Die öffentlichen Verkehrsträger dürfen dem ihnen zugewiesenen Zweck entsprechend von der Allgemeinheit benützt werden. Einschränkungen werden speziell geregelt, verfügt, signalisiert etc.

Der Werkeigentümer ist für die dauernde Betriebsbereitschaft zuständig. Spezielle Regelungen gelten für Nationalstrassen. Die Strassen sind nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten so zu unterhalten und zu betreiben, dass sie ihrem Zweck entsprechend, sicher und für die Umgebung möglichst schonend benützt werden können. Die Betriebsbereitschaft umfasst insbesondere die Instandhaltung, die Ausbesserung von Schäden, die Staubbekämpfung, die Reinigung, den Winterdienst und die Öffnung nach ausserordentlichen Naturereignissen.

Oder anders ausgedrückt: Ein Werk muss grundsätzlich jenen Ansprüchen genügen, zu deren Zweck es gebaut worden ist. Dies beurteilt sich nach den Erwartungen, die bei vernunftgemäsem Gebrauch des Werkes vorausgesetzt werden dürfen. Damit wird angesprochen, dass nicht zu hohe Ansprüche bei der Benützung eines Werkes erwartet werden dürfen. Es wird von einer normalen Benutzung und von angemessener Vorsicht ausgegangen, die ein vernunftgemäss handelnder Mensch an den Tag legt. (Waldmeier, 2009; Waldmeier, 2011).

- **OR 59 Sichernde Massregeln** (Abwendung von Gefahren, Zumutbarkeit)

Wer von dem Gebäude oder Werke eines andern mit Schaden bedroht ist, kann von dem Eigentümer verlangen, dass er die erforderlichen Massregeln zur Abwendung der Gefahr treffe. Vorbehalten bleiben die Anordnungen der Polizei zum Schutze von Personen und Eigentum.

Der Werkeigentümer muss bei einem Werk besorgt sein, dass dieses für den bestimmungsgemässen Gebrauch taugt. Bei der Auslegung dieses Begriffs ist ein objektiver Massstab anzulegen. Die konkreten Massnahmen, die zur Gewährleistung des sicheren Gebrauchs vorzukehren sind, müssen zudem auch zumutbar sein.

Im konkreten Fall heisst das, dass der Benutzer eines Werks dem Eigentümer eine gewisse Zeit zugestehen muss, die für die Räumung nötig ist. Er darf nicht erwarten, dass bereits morgens um sieben Uhr das gesamte öffentliche Wegnetz einer Gemeinde vom Schnee befreit ist. Eine Prioritätenfolge, bei der wichtige Abschnitte früher und weniger wichtige erst später geräumt werden, ist absolut vertretbar und unter dem Aspekt der Angemessenheit nur folgerichtig. Der Benutzer darf insbesondere nicht erwarten, dass überall und zu jeder Zeit die Strassen schwarz geräumt sind. Bei der Zumutbarkeit des Werkunterhalts stellen sich für den Werkeigentümer damit Fragen in zeitlicher, finanzieller sowie technischer Hinsicht. (Waldmeier, 2009; Waldmeier, 2011)

Der Eigentümer hat nur zumutbare Massnahmen zwecks Gefahrenabwehr vorzukehren. Unterlässt er zumutbare Vorkehrungen, so ist ein Mangel festzustellen. (Besmer, 2012)

Ist die Beseitigung einer Gefahrenquelle im Einzelfall unzumutbar, so ist doch immer ein Gefahrenhinweis durch eine Warntafel zumutbar.

**Wird der reduzierte Winterdienst lediglich auf einigen ausgewählten Strassen oder Strassenabschnitten einer Gemeinde vorgenommen, muss also diese besondere Gefahrenquelle signalisiert werden.** (Besmer, 2012)

Gemäss Art. 15 Abs. 1 SSV ist dazu das Signal „Andere Gefahren“ (1.30) zu verwenden. Dabei ist die Gefahr auf beigefügter Zusatztafel anzugeben.

Das Signal "Schleudergefahr" (Nr. 105) ist vor Fahrbahnen mit übermässig glattem Belag und vor Strassenstrecken aufzustellen, die in besonderem Masse der Vereisung ausgesetzt sind.

- **OR 41 Voraussetzung der Haftung**

Wer einem andern widerrechtlich Schaden zufügt, sei es mit Absicht, sei es aus Fahrlässigkeit, wird ihm zum Ersatze verpflichtet.

Ebenso ist zum Ersatze verpflichtet, wer einem andern in einer gegen die guten Sitten verstossenden Weise absichtlich Schaden zufügt.

- **OR 42 Festsetzung des Schadens** (Verhältnismässigkeit)

Wer Schadenersatz beansprucht, hat den Schaden zu beweisen.

Der nicht ziffermässig nachweisbare Schaden ist nach Ermessen des Richters mit Rücksicht auf den gewöhnlichen Lauf der Dinge und auf die vom Geschädigten getroffenen Massnahmen abzuschätzen.

In Auslegung der Gesetzesbestimmungen und der Rechtsprechung beinhaltet der zweckentsprechende und vernunftmässige Gebrauch auch die Anpassung an die jeweilige Situation (Strassenzustand) und entsprechende Ausrüstung. Dies gilt für den motorisierten ebenso wie für den nichtmotorisierten Verkehr. Unter den durch den Geschädigten getroffenen angemessenen Massnahmen verstehen sich persönliches Verhalten, zweckmässige Ausrüstung und Rücksicht auf andere Verkehrsteilnehmer (Eigenverantwortung).

- **OR 61 Verantwortlichkeit öffentlicher Beamter und Angestellter**

Über die Pflicht von öffentlichen Beamten oder Angestellten, den Schaden, den sie in Ausübung ihrer amtlichen Verrichtungen verursachen, zu ersetzen oder Genugtuung zu leisten, können der Bund und die Kantone auf dem Wege der Gesetzgebung abweichende Bestimmungen aufstellen.

Für gewerbliche Verrichtungen von öffentlichen Beamten oder Angestellten können jedoch die Bestimmungen (dieses Abschnittes) durch kantonale Gesetze nicht geändert werden.

- **ZGB 679 Schadenersatzklage**

Wird jemand dadurch, dass ein Grundeigentümer sein Eigentumsrecht überschreitet, geschädigt oder mit Schaden bedroht, so kann er auf Beseitigung der Schädigung oder auf Schutz gegen drohenden Schaden und auf Schadenersatz klagen.

Wenn infolge von mangelhaftem oder fehlendem Winterdienst Verkehrsteilnehmer verunfallen, können gegenüber einem Gemeinwesen Schadenersatzansprüche geltend gemacht werden. Die Unterhaltsmassnahmen müssen zumutbar sein. (Poldervaart, 2012)

Für die Gewährleistung des Unterhaltes resp. der Betriebsbereitschaft der Werke (Verkehrsinfrastruktur) und zum Schutz von Natur und Umwelt gibt es eine Reihe weiterer rechtsverbindlicher Vorgaben:

- Strassenverkehrsgesetz (SVG)
  - Verkehrsregelverordnung (VRV)
- Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG)
  - Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) (vorher Verordnung über umweltgefährdende Stoffe StoV)
- Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (GSchG)  
etc.

In Anlehnung an die Rechtsprechung (Gerichtsentscheide) und zum Vollzug der Gesetzesbestimmungen wurden Weisungen, Normen, Empfehlungen erlassen (Vögeli, 2011). Darauf stützt sich die Rechtsprechung bei Interpretationsfragen, soweit sich diese nicht direkt aus den Gesetzesbestimmungen herauslesen lassen:

- Merkblätter der SUVA
- Normen des Fachverbandes VSS (insbesondere Winterdienstnormen)
- Leitfaden Winterdienst von Kommunale Infrastruktur
  - Anhang 2: Ablauf-Schema für Winterdienstvorbereitungen
  - Anhang 3: Muster Alarmschema
  - Anhang 4: Muster-Rapporte
  - Anhang 5: Muster Winterdienstkonzept

Ausserdem gibt es eine Reihe kantonaler Gesetzeserlasse, z.B. das Strassengesetz des Kantons Zürich (StrG).

Das Bundesgericht verweist mit Bezug auf das Mass der Strassenunterhaltungspflicht im Winter auf das öffentliche Recht. (Besmer, 2012) So gilt beispielsweise für den Kanton Zürich:

- Die Strassen sind nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten so zu unterhalten und zu betreiben, dass sie ihrem Zweck entsprechend, sicher und für die Umgebung möglichst schonend benützt werden können.
- Der Strassenunterhalt umfasst insbesondere die Instandhaltung, die Ausbesserung von Schäden, die Staubbekämpfung, die Reinigung, den Winterdienst und die Öffnung nach ausserordentlichen Naturereignissen.
- Unterhaltungspflichtig ist das baupflichtige Gemeinwesen (§ 26 Abs. 1 StrG).

## 6. Alternativen zum Streusalz-Trockenverfahren

### 6.1 Bedürfnisse

Aufgabe der Strassendienste ist es, die Sicherheit für den Strassenverkehr zu gewährleisten. Dazu gehört auch, bei Frost und Eisglätte die Rutschgefahr möglichst klein zu halten. Da die öffentlichen Mittel nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen, soll dies nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgen. Schliesslich verlangen die Öffentlichkeit wie auch Private, dass der Winterdienst möglichst umweltschonend erfolgen und Natur und Lebensräume nicht über Gebühr beeinträchtigen soll.

Sicherheit für den Strassenverkehr kann nach heutigem Stand der Technik im Rahmen des Zumutbaren gewährleistet werden. Es liegt im Ermessen der Bevölkerung und teilweise der Behörden, die Grenzen der Eigenverantwortung im Sinne angepassten Benutzerverhaltens bei besonderen Wetterverhältnissen, für gewisse Strassenkategorien und Benutzergruppen zu definieren.

Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren im Winterdienst verzeichnet in den letzten 10 – 15 Jahren beachtliche Fortschritte. Es ist bereits viel Wissen vorhanden, welches aber noch vermehrt umzusetzen wäre. Daneben besteht Forschungs- und Optimierungsbedarf bei den neueren Verfahren und den technischen Einsatzmöglichkeiten.

Die Umweltverträglichkeit ist im Hinblick auf das Verkehrsgrün, im speziellen die Stadtbäume, die Böden und die Gewässer in der Praxis bei weitem noch nicht gewährleistet. Hinzu kommen neue Herausforderungen beispielsweise durch die Wärmeinseln in Agglomerationen und durch den Klimawandel. Aber auch einzelne Gruppen von Verkehrsteilnehmern, so etwa die Fussgänger und die Radfahrer, sind in den Überlegungen des Winterdienstes noch zu wenig berücksichtigt. Namentlich aus Sicht der Pendler, welche mit dem Velo zur Arbeit fahren, besteht ein erheblicher Handlungsbedarf.

### 6.2 Rechtliche Vorgaben

Die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung ChemRRV (früher Stoffverordnung StoV) gibt im Anhang 2.7 den Rahmen für den Einsatz von Auftaumitteln beim Winterdienst.

#### 1. Begriff

Auftaumittel sind Stoffe und Zubereitungen zur Bekämpfung von Glatteis und Schneeglätte mit mehr als 10 Massenprozent tauwirksamen Stoffen.

#### 2. Abgabe

Auftaumittel dürfen nicht abgegeben werden, wenn sie andere tauwirksame Stoffe enthalten als:

- a) Natrium-, Kalzium- oder Magnesiumchlorid;
- b) Harnstoff;
- c) abbaubare niedere Alkohole;
- d) Natrium- oder Kaliumformiat;
- e) Natrium- oder Kaliumacetat.

#### 3. Verwendung

##### 3.1 Einschränkungen

- a) Auftaumittel, die andere als die in Ziffer 2 genannten tauwirksamen Stoffe enthalten, dürfen nicht verwendet werden.
- b) Auftaumittel, die Harnstoff enthalten, dürfen nur auf Flugplätzen und auf korrosionsgefährdeten Strassenabschnitten verwendet werden.

- c) Auftaumittel, die Natrium- oder Kaliumformiat oder Natrium- oder Kaliumacetat enthalten, dürfen nur auf Flugplätzen verwendet werden.

### 3.2 Ausnahmen

Das BUWAL kann einzelnen VerwenderInnen erlauben, Auftaumittel, die andere als die in Ziffer 2 genannten tauwirksamen Stoffe enthalten, zum Zweck der Eignungsprüfung anzuwenden. Die Bewilligung ist auf höchstens drei Monate zu befristen.

Sie kann verlängert werden.

### 3.3 Verwendung im öffentlichen Winterdienst

- a) Soweit zweckmässig, sind schneebedeckte Strassen mechanisch zu räumen, bevor Auftaumittel eingesetzt werden.
- b) Auftaumittel dürfen im öffentlichen Winterdienst
- nur verwendet werden, wenn bei der maschinellen Streuung Geräte eingesetzt werden, welche die zu behandelnden Flächen mit einer gleichbleibenden Menge pro Flächeneinheit bestreuen.
  - nur bei kritischen Wetterlagen und an exponierten Stellen vorbeugend verwendet werden.
- c) Die Kantone sorgen dafür, dass für öffentliche Strassen, Wege und Plätze festgelegt wird, wann, wo und wie Auftaumittel verwendet werden oder andere Verfahren zur Bekämpfung von Glätteis und Schneeglätte zum Einsatz kommen.

Ziffer 3.3 lit.c verpflichtet die Kantone, anhand von Routenverzeichnissen zu bestimmen, wo und wann Auftaumittel verwendet werden sollen und wie sie auszubringen sind. Dies bedeutet wohl ebenso, dafür zu sorgen, dass diese Konzepte in den Gemeinden auch umgesetzt werden.

Ziffer 3.3 lit.a gibt vor, bei fallendem Schnee und auf schneebedeckten Strassen in erster Linie mechanisch zu räumen.

Ziffer 3.3 lit.b verbietet nicht grundsätzlich die manuelle Streuung, gibt aber vor, bei maschineller Streuung nur Geräte einzusetzen, welche pro Flächeneinheit die gleichbleibende Menge Streugut ausbringen.

## 6.3 Abstumpfende Mittel

Als abstumpfende Streumittel werden alle zur Verbesserung der Griffigkeit aufgestreuten Mittel bezeichnet. Darunter fallen Mineralstoffe wie Splitt, Kies, Sand, aber auch Blähton und Hackschnitzel. Daneben gibt es eine Reihe weiterer Feststoffe wie Bergbauabraum, gebrochene Hochofenschlacke, Schmelzkammergranulate, gebrochenen Bauschutt, Asche, Sägespäne etc., die als abstumpfende Streumittel zum Einsatz kommen. (Gartiser et al., 2003)

Durch Einbringen von abstumpfenden Mitteln wird die Schnee- bzw. Eisschicht zwischen Fahrbahn und Reifen mit grobkörnigem, meist kantigem Material durchsetzt. Dadurch erhöht sich die Griffigkeit der Autoreifen auf der Fahrbahnoberfläche, gekennzeichnet durch den Kraftschluss- bzw. Gleitbeiwert. Versuche zeigten, dass durch abstumpfende Stoffe (über 100 g/m<sup>2</sup>) Gleitbeiwerte (Griffigkeiten) erzielt werden können, die denen einer nassen Straße entsprechen. (Gartiser et al., 2003)

Der Vorteil der abstumpfenden Mittel liegt in der unmittelbaren Wirksamkeit nach der Streuung und der Erhöhung der Griffigkeit auch auf bereits festgefahrenen Schneedecken, da sich das Streugut beim Überfahren der Schneedecke durch die Fahrzeuge in den Schnee bzw. in das Eis eindrückt. (Hoffmann et al., 2011)

### 6.3.1 Splitt

Nach Inkraftsetzung der eidg. Stoffverordnung (1986) mit dem Ziel, unter anderem auch die Salzbelastung der Umwelt zu reduzieren, haben zahlreiche Kantone, Städte und Gemeinden den Salzverbrauch im Winterdienst gesenkt oder gar verboten. Als Ersatz wurde vielerorts die Verwendung von Splitt vorgeschrieben, in der Überzeugung, Splitt belaste die Umwelt wesentlich weniger und sei bezüglich Verkehrssicherheit ähnlich wirksam. (Ruess, 1998) Seither gehörte Splitt zu den am häufigsten verwendeten Alternativen zum Streusalz bei der Schneeräumung. (Info CH, 2011).

Splitt zählt zu den natürlichen, gebrochenen Gesteinen. Die Körner sind grösser als 2 mm, der Anteil bruchflächiger Körner beträgt über 90 %. Verwendung finden verschiedene Materialien wie Quarz, Lavaschlacke, Kalkstein, Granit u.a. (Gartiser et al., 2003)

In der Praxis zeigte sich, dass die Anwendung von Splitt in grösseren Mengen wesentliche Nachteile mit sich bringt:

- Zum Erzielen einer abstumpfenden Wirkung ist eine Streumenge von mindestens 100 g/m<sup>2</sup> erforderlich. In der Regel werden 150 g/m<sup>2</sup> und mehr empfohlen. Dies hängt von der Anzahl und Grösse der pro Flächeneinheit ausgebrachten Körner und damit auch von der Dichte des Materials ab. (Gartiser et al., 2003)
- Die Splittkörner werden von den Fahrzeugen an den Strassenrand geschleudert. Bei Eis- und Reifglätte sind sie deshalb nahezu wirkungslos. Dadurch sind häufige Wiederholungstreuerungen, d.h. grosse Einsatzmengen notwendig. (Gartiser et al., 2003; Koller, 2005) Es ergeben sich vermehrte Transportfahrten und Versorgungsengpässe. (Ruess, 1998)
- Die Verkehrssicherheit wird nicht im gleichen Umfang wie ursprünglich angenommen gewährleistet. Das Streumittel wirkt mechanisch und gilt als nahezu wirkungslos bei Temperaturen unter -10°C. sowie bei Lockerschnee. (Gartiser et al., 2003) Nach dem Ende der Glätteperiode wirken auf der Fahrbahn verbliebene Streumittelreste entgegengesetzt und senken den Kraftschlussbeiwert deutlich herab. (Gartiser et al., 2003) Bei Tauwetter versinkt der Splitt im Schnee und verliert dadurch seine Wirkung. (Info CH, 2011)
- Zudem spicken die Körner auf der Autobahn an die Windschutzscheiben der Autos und verursachen Schäden und Behinderungen. (Info CH, 2011)
- Das Einsammeln des Splitts im Frühling ist aufwendig. Altsplitt ist aufgrund der Grobverunreinigung mit Strassenabfall, Kunststoffen, Laub etc. und der Anreicherung mit Feinstaub, Schwermetallen und Gummiabrieb als Sondermüll auf einer Reaktordeponie zu entsorgen oder muss gereinigt, aufbereitet und wiederverwendet werden. (Ruess, 1998)
- Im innerstädtischen Bereich ist zudem eine aufwendige mechanische Reinigung der Fahrbahnrippen und Einlaufschächte der Kanalisation notwendig. (Koller, U., 2005) Doch nur ein Teil des Streugutes kann ordnungsgemäss wieder eingesammelt werden. Ein Teil gelangt in Sinkkästen der Strassenabflüsse, in Regenrückhaltebehälter (Trennkanalisation) oder in die Abwasserkanalisation und damit in die kommunalen Kläranlagen (Mischkanalisation). Aufgrund der Korngrösse und des spezifischen Gewichtes setzt sich Splitt im Sandfang der Kläranlagen ab und muss anschliessend dort entsorgt werden. Ein nicht unwesentlicher Rest gelangt direkt in die Grünflächen neben den Fahrbahnen und Wegen. (Gartiser et al., 2003)

- Das Recycling von Splitt ist aufwendig. Hierbei wird unterschieden zwischen dem Verfahren der Trocken- bzw. Heissreinigung und der Nassreinigung. Beide Verfahren sind relativ teuer, weshalb ein Teil des eingesammelten Streugutes als Inertstoff oder Sondermüll deponiert wird. (Moritz, 1999 in Gartiser et al., 2003)
- Feinpartikelstaub fördert die Verdichtung der Böden. Vor allem im innerstädtischen Bereich mit sehr unterschiedlichen Substraten trägt dies zur ungünstigen Ernährungssituation der Bäume bei (Moritz, 1999 in Gartiser et al., 2003)

In einer **Vergleichsstudie zwischen Salz (NaCl) und Splitt im Auftrag des VSS** (Ruess, 1998) schneidet Splitt bezüglich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit deutlich schlechter ab. Kriterium der Sicherheit war der Rückgang des Unfallrisikos, welcher beim Einsatz von Streusalz unbestritten ist. Beim Splitt hingegen wird dem Autofahrer eine erhöhte Griffigkeit suggeriert, als sich tatsächlich einstellt. Dies hat hohe Geschwindigkeiten zur Folge. So ergibt sich bei der Splittstreuung eine häufigere Überschreitung des Risikofaktors als bei der Salzstreuung.

Hinsichtlich Wirtschaftlichkeit wurden die Einsparungen bei den Unfallkosten, die Schäden an den Betonkonstruktionen (vor allem ältere Brücken), die Korrosionsschäden durch Salzstreuung und die Lackschäden an den Fahrzeugen durch die Splittstreuung (mit Korrosionsschäden bei Salzeinwirkung) den Winterdienstkosten gegenübergestellt. Auch hier schliesst die Salzstreuung eindeutig besser ab. Es ist allerdings anzumerken, dass zum volkswirtschaftlichen Nutzen der Splittstreuung innerorts keine Untersuchungsergebnisse vorlagen.

Für den Vergleich der Umweltbelastungen wurden die Belastung der Böden (inkl. Verdichtung durch Verschlammung), die Belastung der Oberflächengewässer und des Grundwassers, die Beeinträchtigung der Vegetation (insbesondere der Bäume), die Staubbelastung beim Wiedereinsammeln des Splitts, der Transport und der Energieverbrauch bei der Reinigung des Altsplitts aufgezählt. Bei beiden Verfahren besteht eine erhebliche Umweltbelastung und ein entsprechender Handlungsbedarf zur Reduktion der Streumengen. Die Ökobilanzen hinterlassen allerdings einen zwiespältigen Eindruck. So wurden etwa folgende Gesichtspunkte zu wenig oder überhaupt nicht berücksichtigt:

- Die Umweltschäden durch die Streusalzausbringung wurden ausser acht gelassen und infolgedessen nicht monetär bewertet. Bei einer ganzheitlichen Sichtweise sollte dies ein unerlässlicher Bestandteil der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sein. (GALK, 2011)
- Ein Teil des Chlors (Cl<sup>-</sup>) geht nicht ins Gewässer, sondern gelangt im Bereich des Siedlungsgrüns in den Boden und hat indirekte Auswirkungen auf Pflanzen und Bodenleben. Dasselbe trifft für Natrium (Na<sup>+</sup>) zu.
- Ein Teil des Chlors und des Natriums kommt durch Verwehung, Gischt oder Pflugschnee direkt in Kontakt mit den Pflanzen.
- Der Abgang grosser Bäume stellt den Verlust ideeller, kultureller, ökologischer, städtebaulicher, verkehrssichernder Werte usw. dar. Diese unersetzbaren Werte lassen sich nicht mit den Unterhaltskosten für das Stadtgrün begleichen.
- Für die Reinigung und das Recycling von Splitt stehen statt fossiler Energieträger andere Möglichkeiten zur Verfügung.
- Das Tragen von Schutzmasken gegen Staub bei der Strassenreinigung und beim Einsatz mobiler Recyclinganlagen wäre zumutbar.

- Ansammlung von Strassenabfällen und Plastik sowie Anreicherung von Schwermetallen etc. gibt es auch ohne Splitt. Diese müssen in jedem Fall fachgerecht entsorgt werden.

Nach der Publikation des VSS-Fachgutachtens ist man in der Schweiz grösstenteils wieder vom Splitt abgekommen. Gelegentlich beobachtet man die Verwendung von Splitt noch auf Trottoirs, Gehsteigen, Treppen, Radwegen, an engen Stellen, wo eine Ausbringung von Hand erforderlich ist oder die Nachteile des schnellen Fahrens ausser Betracht fallen. Dadurch kann fallweise mehr Rücksicht auf die Stadtbäume und das übrige Siedlungsgrün genommen werden. Meistens sind es aber lediglich die etwas „umweltbewussteren“ Privatpersonen, welche den durch die Tiefbauämter zur Verfügung gestellten Streusplitt ausbringen. Ausserdem gelangt Splitt im Zusammenhang mit der Weissräumung wenig befahrener Quartierstrassen und vor allem in Bergdörfern und Winterkurorten zum Einsatz, wo das „Erlebnis Winter“ zur Kundenwerbung gehört.

### 6.3.2 Sand

Im Unterschied zum Splitt handelt es sich beim Sand um gebrochene oder ungebrochene Mineralstoffe mit einer Korngrösse von weniger als 2 mm. (Gartiser et al., 2003)

Ähnlich wie Splitt, gelangt heute Sand nur noch im Bereich des Langsamverkehrs zum Einsatz, aber in wesentlich geringeren Mengen. Die Ausbringung erfolgt in der Regel von Hand.

Vorteil von Sand auf Radwegen ist die Schonung der Reifen dank dem weitgehenden Fehlen scharfkantiger Körner. (Gartiser et al., 2003)

Wesentlichste Nachteile von Sand als Streumittel sind die enorme Staubentwicklung und der Aufwand für die Reinigung der Strassen und Wege. Auf schmalen Wegen, etwa durch Parkanlagen, erfolgt dies an den meisten Orten mit kleinen Geräten oder von Hand.

### 6.3.3 Blähton

Beim Blähton handelt es sich um aufgeblähte und anschliessend gebrochene poröse Tonkügelchen. Die Tongranulate durchlaufen ein Drehrohrofen-System und werden bei ca. 1200°C gebrannt. Die im Ton eingeschlossenen organischen Stoffe verbrennen und die Tonkügelchen blähen sich auf. Gleichzeitig schmilzt die Oberfläche ein wenig und bildet eine gesinterte Außenhaut. So entstehen feinporige, leichte Tonperlen mit luftdurchsetztem Kern und hoher Druckfestigkeit. Diese werden in einem weiteren Arbeitsgang mechanisch gebrochen und abgeseibt. (ökotau, 1987)

Seit etwa 1986 ist Blähton ohne Zusatzstoffe als abstumpfendes Mittel unter dem Namen **Ökostreu** im Handel. Es beinhaltet dasselbe Granulat wie Ökotau, jedoch ohne Harnstoff, d.h. es zählt nicht zu den Taumitteln. (Bucher, 1987; Wat., 1987). Blähton als abstumpfendes (= rutschhemmendes) Mittel ist auch mit der Bezeichnung **Liapor Streu** im Handel erhältlich.

Im Vergleich zu Streusalz und anderen Auftaumitteln sind keine nachteiligen Auswirkungen auf Natur und Umwelt bekannt. Weil das Granulat durch seine Porosität Was-

ser zu speichern vermag, reguliert es sowohl im Sommer als auch im Winter den Feuchtigkeitshaushalt. Dadurch entsteht keine überfrierende Nässe. (ökotau, 1987)

Nach Auskunft der Hersteller lässt sich Ökostreu/Liapor Streu bei Neuschnee mit Eisbildung, bei Temperaturen unter  $-10^{\circ}\text{C}$ . und auf fester Schneedecke mit Auftauwirkung am Tag einsetzen. (ökotau, 1987) Angaben zur Griffbarkeit im Strassenverkehr sind nicht bekannt.

Ökotau/Liapor Streu eignet sich im Langsamverkehr vorzugsweise auf Trottoirs, Vorplätzen, Zufahrten und Quartierstrassen mit sehr wenig Verkehr, aber auch im Sommer in Parkanlagen. Bei grösseren Geschwindigkeiten wird das Granulat, ähnlich wie der Splitt, an den Strassenrand geschleudert. (Bucher, 1987)

Die Kügelchen weisen ein geringes Gewicht auf und lassen sich nach Gebrauch leicht wieder über die Strassenräumung einsammeln. (Info CH, 2011)

Die Vertreiber des Produktes werben aber mit dem Vorteil, dass Blähton nicht wieder eingesammelt werden müsse, sondern über Kanäle ohne Verstopfungsrisiko abgeschwemmt werden könne. Dabei gilt jedoch zu bedenken, dass auch Schwimmstoffe in der Kläranlage oder im Regenrückhaltebecken entfernt werden müssen. Das Einarbeiten in die angrenzenden Strauchflächen kann ebenfalls nicht unbegrenzt erfolgen. (Kainz/Peintner/Stark, 2010)

Nach Aussagen von Strassenfachleuten wird das Granulat allerdings durch den Verkehr zerrieben und bildet rasch eine schlammige Masse, die dann eher rutschfördernd ist. Zudem stellt diese Masse durch Sedimentation und Verkrustung in Schächten und Leitungen ein Problem dar. (Barandun, 1985)

Gleich wie beim Splitt ist mit der Anreicherung von Staub und Schwermetallen zu rechnen. Zudem könnte der Staub zu Belastungen der Atemluft führen. Dazu sind jedoch keine Angaben verfügbar.

Wichtigste Nachteile sind der grosse Energieaufwand bei der Herstellung (Info CH, 2011), daraus abgeleitet der Preis und die Gesamtkosten, unter Berücksichtigung der mehrmaligen Ausbringung und des Einsammelns des Streugutes. Deshalb gelangte Ökostreu/Liapor Streu als rein abstumpfendes Mittel wohl kaum in grösseren Mengen zum Einsatz.

## **6.4 Alternative Auftaumittel**

### **6.4.1 Allgemeines**

Als „auftauende Streumittel“ werden alle Streumittel bezeichnet, die durch einen chemischen Vorgang den Gefrierpunkt von Wasseraggregaten unter die Fahrbahntemperatur absenken können und so eine Fahrbahnglätte verhindern. Im allgemeinen sind dies Salze, die auf die Fahrbahn aufgebracht werden und mit Regen, Schnee, Reif bzw. Tau eine Lösung (Sole) bilden. Das Ziel der Salzstreuung besteht also darin, eine Eisbildung durch die herbeigeführte Gefrierpunktniedrigung zuverlässig zu verhindern, indem der Gefrierpunkt der Lösung bzw. Sole unter jene der Fahrbahntemperatur abgesenkt wird. (Hoffmann et al., 2011)

Die Tauwirkung setzt unmittelbar nach dem Streuen mit der Herabsetzung der Temperatur ein. Bei diesem endothermen Vorgang wird Energie benötigt, die aus der „Wärme“ des Schnees bezogen wird, wodurch die Oberflächentemperatur der Schneedecke abfällt. Beim Übergang von Schnee in „flüssiges“ Wasser, welches das feste (körnige) Salz auflöst, entsteht eine Salzlösung. Während des Auftauprozesses verringert sich die Konzentration dieser Salzlösung. Die maximal mögliche Konzentration (Sättigung) ist abhängig von der Salzart und wird bei einer bestimmten Temperatur (eutektischer Punkt) erreicht. Diese Temperatur kann von der Salzlösung nicht unterschritten werden. Für NaCl liegt der eutektische Punkt bei einer Oberflächentemperatur der Schneedecke resp. der Salzlösung von  $-21.3^{\circ}\text{C}$ . und einem Salzgehalt von 23.4 % (Gewichts-%). (Hoffmann et al., 2011)

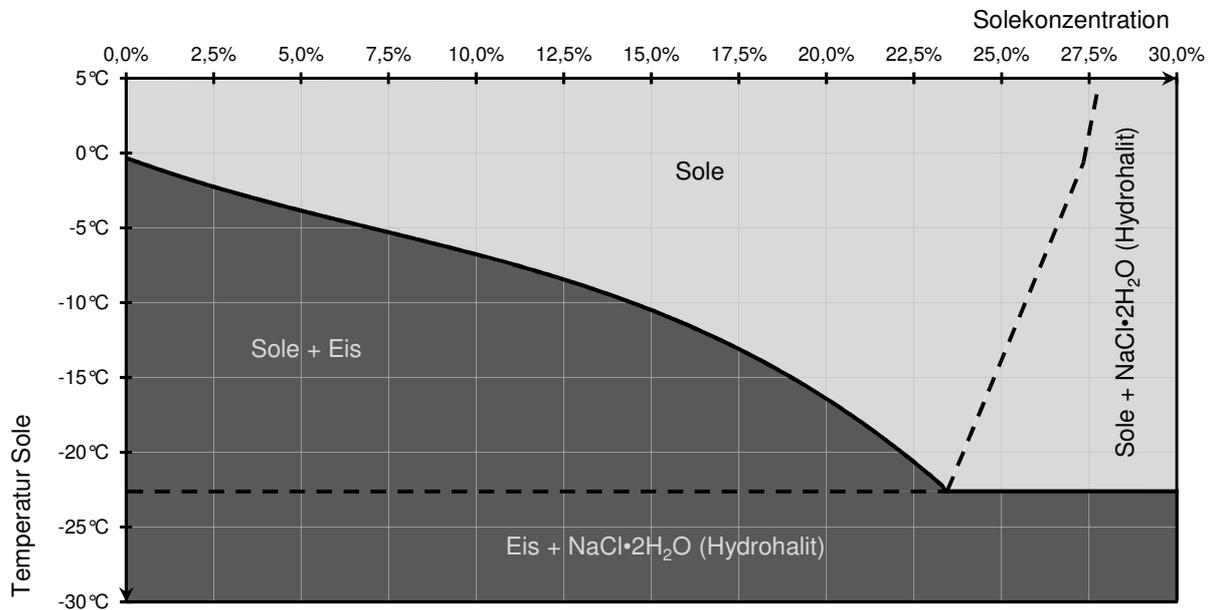
Nun setzt sich der Tauvorgang fort, was zu einer weiteren Verdünnung der Salzlösung und damit zu einer Erhöhung der Temperatur in der Lösung führt. Im weiteren Verlauf des Tauvorgangs verlangsamt sich die Abnahme der Temperaturdifferenz zwischen Lösung und Schneedecke, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Schneetemperatur und zugehöriger Solekonzentration einstellt. Eine direkte Umlegung der (gemessenen) Temperaturabsenkung auf die Fahrbahntemperatur ist nicht zulässig, da nur die oberste Schicht in den Tauvorgang einbezogen ist und die Fahrbahn allein schon aufgrund der Masse eine größere Wärmespeicherkapazität besitzt. (Hoffmann et al., 2011)

Das Gleichgewicht zwischen Solekonzentration und Schneetemperatur ist von der Schneetemperatur abhängig, d.h. es geht nur so viel Salz in Sole über, bis dieser Punkt erreicht ist. Ist die Solekonzentration dann grösser, bedeutet dies, dass zu viel Salz gestreut wurde.

Bei Luftfeuchtigkeit unter 100 % trocknet das „überschüssige“ Salz auf der Fahrbahnoberfläche aus. Bei Plusgraden entsteht daraus das NaCl-Kristall Halit. Die Halit-Kristalle können mit Niederschlag eine Sole bilden. Während des anschliessenden langsamen Lösungsvorgangs bildet sich an der Oberfläche ein Film aus gelöstem Salz und Schmutz, und die Fahrbahn wird durch die gefüllte Textur glatter, d.h. rutschiger. (Hoffmann et al., 2011)

Bei Minusgraden hingegen entsteht aus dem überschüssigen Salz das Hydrohalit ( $\text{NaCl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), welches bei tiefen Temperaturen aus der Sole ausfällt. Die Kristallbildung ist bei  $-15^{\circ}\text{C}$ . merklich und beginnt ab  $-23^{\circ}\text{C}$ . sprunghaft anzusteigen. Hydrohalit weist keine Tauwirkung auf. Die Kristalle sind Ansatzpunkte für Eisbildung, und Eis / Hydrohalitkonglomerate können rasch zu einer schmierigen Masse auf der Fahrbahn werden. Hydrohalit ist zudem ein stabiles Mineral, das erst bei einer Erwärmung auf über  $0^{\circ}\text{C}$  wieder in Halit und Wasser zerfällt, wodurch eine erneute Solebildung möglich wird. (Hoffmann et al., 2011)

Anhand von Versuchsreihen konnte ein Diagramm (eutektisches Diagramm) erstellt werden, mit dessen Hilfe für jede Temperatur an der Fahrbahnoberfläche die richtige erforderliche Streusalzmenge ermittelt und am Streugerät eingestellt werden kann. (Hoffmann et al., 2011)



Eutektisches Diagramm einer Natriumchloridsole in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur, wobei der Aggregatzustand im hellen Bereich flüssig, im dunklen fest ist (nach LIGHT, 2007)

Ziele der Suche nach anderen Auftaumitteln sind:

- Herabsetzung des Gefrierpunktes und damit grössere Tauwirksamkeit resp. Verbesserung der Tauwirksamkeit bei kleinerer Salzkonzentration (weniger Salzbedarf)
- grössere Unabhängigkeit vom Streusalz NaCl im Falle von Versorgungsengpässen
- Kostenoptimierung ohne Einbusse an Sicherheit für die Verkehrsteilnehmer
- Reduktion der Kosten für den Winterdienst
- Reduktion der Schäden an Bauten aus Beton und Stahl
- geringere Belastung der Umwelt, namentlich der Gewässer, des Bodens und des Siedlungsgrüns (Stadtbäume)

#### 6.4.2 Calciumchlorid

Wie NaCl hat auch  $\text{CaCl}_2$  einen eutektischen Punkt, unterhalb dessen eine weitere Herabsetzung des Gefrierpunktes nicht möglich ist und der weit unter jenem von NaCl liegt. Da damit Eis bei bis zu  $-20^\circ\text{C}$ . Lufttemperatur noch aufgetaut werden kann, hat es eine deutlich bessere Tauleistung. Die Wirkung tritt rascher und auch bei tieferen Temperaturen ein und hält länger an. Ab  $-5^\circ\text{C}$ . ist die Tauwirksamkeit grösser als mit NaCl allein. (Encke, 1983)  $\text{CaCl}_2$  wurde deshalb früher bei der Trockenstreuung vermehrt dem NaCl beigemischt (Joos Reimer, 2005)

Wegen seiner stärkeren Betonaggressivität wird  $\text{CaCl}_2$  kaum mehr als vollständiger Ersatz von NaCl verwendet. (Gartiser et al., 2011)

$\text{CaCl}_2$  ist stark hygroskopisch, d. h. es zieht Wasser an (Feuchtigkeit aus der Luft!), was es zu einem guten Trocknungsmittel in der Industrie bei der Lebensmittelverarbeitung macht. Für den Winterdienst führt diese Eigenschaft aber zum Problem, dass eine mit  $\text{CaCl}_2$  gestreute Fahrbahn auch dann feucht aussieht, wenn kein Niederschlag fällt bzw. sich kein Reif bildet. Der Fahrer lässt dann streuen, da die Fahrbahn feucht ist und er das Gefrieren des Wasserfilms befürchtet, obwohl die Feuchtigkeit erst durch das Salz auf die Fahrbahn gelangt ist und in der Regel keine Gefahr besteht. (Hoffmann et al., 2011)

Heute findet  $\text{CaCl}_2$  vor allem bei sehr tiefen Temperaturen Anwendung. In solchen Fällen wird  $\text{CaCl}_2$  jedoch meist nur der Sole bei der Feuchtsalzstreuung FS30 (70% Trockensalz, 30% Sole) beigefügt, wodurch diese „aggressiver“ sein soll. Als wesentlicher wird jedoch allgemein der Umstand angesehen, dass die Sole im Tank des Streufahrzeuges nicht während der Streufahrt friert. Dies wird durch die Verwendung von  $\text{CaCl}_2$  bei der Soleherstellung zuverlässig für bis zu  $-45^\circ\text{C}$  bei Sättigung der Sole verhindert. In der Praxis erfolgt eine Anwendung von  $\text{CaCl}_2$  in der Feuchtsalzstreuung vielfach bereits ab Temperaturen von weniger als  $-6^\circ\text{C}$ , was aber die Streukosten deutlich erhöht. (Hoffmann et al., 2011)

Daneben wird  $\text{CaCl}_2$  auch bei der Flüssigausbringung von „reiner“ Sole (FS100) verwendet. Die Einsparung von Streumengen ist bei dieser vorbeugenden Streuung beträchtlich.

Eigentlich müsste davon ausgegangen werden, dass  $\text{CaCl}_2$  umweltverträglicher ist als  $\text{NaCl}$ .  $\text{Ca}$ -Ionen können nämlich bei entsprechender Konzentration besser an die Oberflächen der Tonminerale adsorbieren (höhere Ladung, bessere Adsorbierbarkeit). Ausserdem können sich  $\text{Ca}$ -Ionen zwischen den Silicatschichten gegen  $\text{Na}$ -Ionen austauschen und dadurch die Gefügestabilität erhöhen (Umkehr resp. Verhinderung des Zerfalls der Tonminerale durch  $\text{Na}$ , Verbesserung der Gefügestabilität). (Scheffer, 1984) Hinsichtlich des Anteils anfallender  $\text{Cl}$ -Ionen besteht hingegen kein Unterschied gegenüber  $\text{NaCl}$ . Zur Belegung von 2 negativen Ladungen braucht es 1  $\text{CaCl}_2$  mit 2  $\text{Cl}$ -Ionen oder 2  $\text{NaCl}$  mit 2  $\text{Cl}$ -Ionen. Da aber  $\text{Cl}^-$  im alkalischen Milieu der meisten Stadtbäume ohnehin geringe Chancen zur Adsorption hat, fällt es in dieser Überlegung ausser Betracht.

Auch die Tatsache, dass die K-Aufnahme der Wurzeln durch das Vorhandensein von  $\text{Ca}$  stimuliert und damit gegenüber  $\text{Na}$  selektiv begünstigt wird, ist hier zweitrangig. Im alkalischen Milieu mit vielen „freien“ resp. hydratisierten  $\text{Cl}$ -Ionen bewirkt zusätzliches  $\text{Ca}^{2+}$  gerade das Gegenteil, weil es gleichzeitig die  $\text{Cl}$ -Aufnahme begünstigt.

Anhand von Versuchen konnte festgestellt werden, dass Mischungen von  $\text{NaCl}$  und  $\text{CaCl}_2$  wesentlich phytotoxischer wirken als  $\text{NaCl}$  allein (von Sury/Flückiger, 1983). Zum einen ist zu beachten, dass  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen bei organischen Substanzen gegenüber  $\text{Na}^+$ - und  $\text{K}^+$ -Ionen bevorzugt werden. Sie bringen dadurch keine  $\text{Na}$ -Ionen, hingegen pro Ion gleichzeitig 2  $\text{Cl}$ -Ionen in die Bodenlösung. Je höher die  $\text{Cl}$ -Konzentration in der Bodenlösung, desto grösser ist der Anteil der  $\text{Cl}$ -Ionen bei der unspezifischen Aufnahme durch die Wurzeln.

Im weiteren ist zu bedenken, dass bei direktem Kontakt über die Nadel- und Blattoberflächen  $\text{CaCl}_2$  hygroskopischer wirkt als  $\text{NaCl}$ .  $\text{CaCl}_2$  ist eher in der Lage, Wasserdampf aus der Luftfeuchtigkeit (Nebel) aufzunehmen. Dadurch bleibt es länger in

gelöster Form pflanzenwirksam. NaCl hingegen trocknet (kristallisiert) schneller und fällt dadurch eher von der Nadel ab. (Flückiger, 1982)

Ein negativer Aspekt von NaCl fällt bei ausschliesslicher Verwendung von  $\text{CaCl}_2$  dennoch weg: In den untersuchten Nadeln konnte keine zusätzliche Anreicherung von  $\text{Ca}^{2+}$  festgestellt werden. (Viskari/Kärenlampi, 2000 in Gartiser, 2003) Die Freisetzung von  $\text{Ca}^{2+}$  aus zellulären Kompartimenten wird wahrscheinlich durch hohe  $\text{Na}^+$ -Konzentration verursacht, was hier entfällt. Da aber in erster Linie die hohe Konzentration von  $\text{Cl}^-$  für die Blattrandnekrosen und die Vergilbungen verantwortlich ist, spielt dies lediglich graduell eine Rolle. Hingegen bleibt mit nahezu fehlendem  $\text{Na}^+$  die Konkurrenzierung des  $\text{K}^+$  bei der Aufnahme durch die Wurzeln, beim Transport in den Apoplasten, bei der Aufnahme in das Cytoplasma sowie bei der Einschleusung in die Schliesszellen aus. Ebenso entfällt der Stress durch  $\text{Na}^+$  wegen erhöhter Aktivität der Protonenpumpen im Cytosol (hoher Energieverbrauch). (vgl. Kap. 2.3.3.2)

### 6.4.3 Magnesiumchlorid

$\text{MgCl}_2$  hat eine ähnliche Wirkung wie NaCl. Gemäss Presseberichten soll es angeblich bis  $-38^\circ\text{C}$ . auftauende Wirkung haben (Marusczyk, 2007). In Laborversuchen wurde der eutektische Punkt bei  $-33^\circ\text{C}$ . ermittelt.  $\text{MgCl}_2$  ist ebenfalls stark hygroskopisch und weist deshalb ähnlich negative Eigenschaften auf wie  $\text{CaCl}_2$ . (Hoffmann et al., 2011)

Wegen seines weniger häufigen Vorkommens ist  $\text{MgCl}_2$  teurer und deshalb wenig gebräuchlich.

Im Boden verhält es sich ähnlich wie  $\text{CaCl}_2$ , wobei die Adsorbierbarkeit von  $\text{Mg}^{2+}$  an Oberflächen der Tonminerale etwas schwächer ist als bei  $\text{Ca}^{2+}$ . Pro  $\text{MgCl}_2$ -Molekül fallen aber auch wieder 2 Cl-Ionen an.

### 6.4.4 Harnstoff ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ )

Harnstoff kann als Auftaumittel eingesetzt werden. (Wresowar/Sieghart, 2000)

Harnstoff gilt für die Pflanze als organischer Dünger. Eine Überdosis wirkt sich negativ auf die Pflanze (einseitige Überdüngung, im Extremfall Plasmolyse), auf die Bodenorganismen (Abnahme Vielfalt, Abnahme N-bindende Bakterien), auf den Boden (Versauerung) und auf das Grundwasser (Anreicherung infolge N-Auswaschung) aus. (Dettwiler, 1986; Wresowar/Sieghart, 2000)

Die mengenmässige Nährstoffaufnahme der Pflanze hängt von der Leistung der Wurzelatmung ab. Diese ist in verdichteten, verschlammten Böden mit kleinen Baumscheiben oft eingeschränkt. Zur biologischen Aufarbeitung von Harnstoffdünger braucht es zudem mehr Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ), als in kritischen Fällen im Boden vorhanden ist. Dies kann zu Vergiftungen des Bodens führen. (Ruge, 1972)

Harnstoff fördert die meist unerwünschte Chloridaufnahme durch die Pflanzen. (Flückiger, 1982)

Häufig sind Baumscheiben auch ohne Streusalz in Form von Harnstoff durch Hundefäkalien mit Nitraten stark belastet.

Harnstoff wird in den Gewässern zu Ammoniumverbindungen und schliesslich zu Nitrat abgebaut. Die Verwendung von Harnstoff in grossen Mengen hätte deshalb eine übermässige Belastung der Oberflächengewässer und des Grundwassers mit diesen Stoffen zur Folge. (Wresowar/Sieghart, 2000)

Verglichen mit gewöhnlichem Streusalz ist Harnstoff teurer und hat auch keine so lange Tauwirkung (Assmann 1999). Der Marktpreis ist großen Schwankungen unterworfen. Aus Kostengründen kommt er deshalb ebenfalls nicht in Frage. (Gartiser et al., 2011)

Da Harnstoff vor allem gegenüber Aluminium weniger korrosiv gilt, kommt er im Flughafenbereich zum Einsatz. Ausserdem ist Harnstoff auf korrosionsgefährdeten Strassenabschnitten zugelassen. Abgesehen von diesen Ausnahmen, dürfen Auftaumittel, welche Harnstoff enthalten, gemäss ChemRRV in der Schweiz nicht verwendet werden (Gartiser et al., 2011; Müller, 1986)

#### 6.4.5 Calcium-Magnesium-Acetat (CMA)

CMA ( $\text{Ca}_x\text{Mg}_y(\text{CH}_3\text{COO})_{2(x+y)}$ ) ist ein Taumittel, welches aus gebranntem Dolomit ( $\text{Ca,MgCO}_3$ ) und Essigsäure hergestellt wird. In wässriger Lösung (25% CMA-Sole) ist es klebrig und besitzt eine leichte Tauwirkung. Diese Eigenschaften werden dazu verwendet, auf innerstädtischen Strassen entstehenden Feinstaub zu binden und so die Luftgüte zu verbessern. Die Tauwirkung ist allerdings nicht gross genug. Um die gleiche Menge Eis wie mittels Streusalz ( $\text{NaCl}$ ) zu schmelzen, bedarf es einer etwa 1.3 Mal so grossen Dosis CMA. Um unterhalb  $-5^\circ\text{C}$ . noch wirksam zu sein, muss etwa 20 % mehr CMA als  $\text{NaCl}$  ausgebracht werden. Die gewünschte Doppelwirkung als „Taumittel und Feinstoffkleber“ kann somit ohne zusätzliche andere Streumittel oder grosse Mengen CMA nicht immer erreicht werden. (Hoffmann et al., 2011, Gartiser et al., 2011; Hafner, 2012)

Da CMA nur als Flüssigkeit (im Sole-Verfahren) ausgebracht wird, kann es nicht mit den herkömmlichen Streumaschinen gestreut werden. Es sind reine Solestreuwagen zu verwenden, die so adaptiert werden, dass die Klebrigkeit von CMA keine Probleme verursacht. (Hoffmann et al., 2011; Hafner, 2012)

Als 3 %-ige Salzlösung ist CMA im Vergleich zu Streusalz weniger korrosiv und greift auch Beton weniger stark an. Deshalb wird CMA, wie  $\text{CaCl}_2$  v. a. in speziellen Fällen wie auf Brücken ausgebracht, um die Korrosion tragender Bauteile gering zu halten. (Gartiser et al., 2011)

Calcium-Magnesium-Acetat (CMA) gilt im Vergleich zu  $\text{NaCl}$  als weniger fischtoxisch, weniger mobil im Boden und biologisch leicht abbaubar (damit aber sauerstoffzehrend). Es kann jedoch Schwermetalle im Boden mobilisieren. (Gartiser et al., 2011; Hafner, 2012)

CMA ist etwa 4.5 Mal so teuer wie  $\text{NaCl}$ . Es hat eine geringere Wirkung und muss alle 2 Tage erneuert werden, auch wenn es nicht schneit oder gefriert. Was mit dem gebundenen Feinstaub geschieht, geht aus dem Bericht nicht hervor. (Hafner, 2012)

CMA wird nicht nur als Taumittel, sondern auch als reines Bindemittel für Feinstaub in den Sommermonaten verwendet. Durch den unangenehmen Geruch von CMA kann es trotz der geringen in freier Natur ausgebrachten Mengen unter Umständen zu Geruchsbelästigungen kommen. Versuche und praktische Erfahrungen zeigen,

dass CMA bei Einhaltung der vom Hersteller angegebenen maximalen Streumengen keine negative Auswirkung auf die Griffigkeit hat. (Hoffmann et al., 2011; Hafner, 2012)

Nachdem damit in den USA und in Schweden trotz hohen Kosten bereits positive Erfahrungen gemacht und in Deutschland Versuche durchgeführt worden sind (GEWU, 1992, in Ruess, 1998), hat man sich auch in Teilen Österreichs (Klagenfurt, Lienz, Bruneck) auf diese Alternative eingelassen und grossangelegte Versuche durchgeführt. (Maruszyk, 2007, Hoffmann et al., 2011; Hafner, 2012)

In der Schweiz ist CMA gemäss ChemRRV nicht zugelassen.

#### **6.4.6 Safecote** (Zuckerhaltige Melasse)

Safecote ist ein Nebenprodukt aus der Agrarindustrie. Bei der Verarbeitung von Zuckerrohr fällt eine dunkle Melasse als Abfallprodukt an. Diese wird aufbereitet, damit sie als Auftaumittel verwendet werden kann.

Safecote besteht zu 56 % aus flüssiger Materie, zu 22 % aus mineralischen Stoffen (davon 6 % Kalium), zu 8 % aus organischen Stoffen und 15.7 % Zucker. Daneben enthält Safecote geringe Anteile Chlorid, Sulfat und wenig Schwermetalle. (Rösti, 2010)

Wegen der auftauenden Wirkung des Zuckers vermag Safecote den Gefrierpunkt (eutektischer Punkt) in Reinform auf bis  $-70^{\circ}\text{C}$ ., in üblicher Mischung mit Wasser und  $\text{NaCl}$  bzw.  $\text{CaCl}_2$  bzw.  $\text{MgCl}_2$  auf  $-30^{\circ}\text{C}$ . zu senken. (Hoffmann et al., 2011; Rösti, 2010; Info CH, 2011)

Die Lieferfirma unterstreicht folgende Vorteile:

- Safecote ist in der handelsüblichen flüssigen Form wegen des geringeren Mischaufwandes mit Flüssigkeiten einfacher zu bedienen.
- Safecote hat die besseren Haftungseigenschaften als Streusalz und all die herkömmlichen Zusätze.
- Einsätze mit Safecote anstelle von Chloriden weisen deutlich bessere Korrosionseffekte, d.h. geringere Korrosionsschäden auf. Das wirkt sich positiv auf die Lebensdauer von Fahrzeugen und Geräten aus.
- Bezüglich der Arbeitssicherheit bietet es Vorteile, da es für Mitarbeitende im Einsatz schonender für deren Gesundheit ist (geringer Anteil von Chloriden)

Als Nachteil gilt der deutlich höhere Preis im Vergleich zu  $\text{NaCl}$ . Deshalb wird Safecote nur als Zuschlagstoff in der Sole bei der Feuchtsalz-Streuung verwendet. Es ersetzt in der Sole-Komponente das  $\text{CaCl}_2$  und das  $\text{MgCl}_2$  und wird dem  $\text{NaCl}$  beigegeben.

Als weiterer Nachteil gilt der Patentschutz (keine Alternativenanbieter).

Das Gemisch kann mittels Salzstreuern oder Sprühfahrzeugen auf die Fahrbahnen aufgetragen werden.

Bei Streueinsätzen auf schneebedeckten Fahrbahnen hat Safecote zusammen mit  $\text{NaCl}$  praktisch keine Wirkung. Deshalb kommt es nur als präventives Taumittel in Fra-

ge. Es kann dadurch das problematische  $\text{CaCl}_2$  und das  $\text{MgCl}_2$  ersetzen, nicht aber Streusalz ( $\text{NaCl}$ ) ablösen. (Rösti, 2010; Info CH, 2010)

Nachteilig für die Umwelt sind:

- Zucker (Glukose) kann zu Sauerstoffdefizit in den Gewässern und damit zur Eutrophierung führen.
- Ebenso kann es die Leistungsfähigkeit von Abwasserreinigungsanlagen beeinträchtigen. (Rösti, 2010)

Die Technologie mit Safecote wurde anfangs 1990 in den USA entwickelt und dann erstmals in den USA und in Kanada angewandt. Später wurden verschiedene Untersuchungen an Universitäten gemacht. Das Produkt kam dann in einigen europäischen Ländern zum Einsatz. Lizenzinhaberin ist die Firma Safecote in England.

In den Jahren 2007- 2010 hat der Kanton Bern im Einzugsgebiet Spiez des kantonalen Tiefbauamtes Versuche mit Safecote auf National- und Kantonsstrassen durchgeführt, wobei nur Mischungen mit  $\text{NaCl}$  gemacht wurden. Der Anteil Safecote betrug 2-3 %. Da Safecote in der ChemRRV nicht aufgeführt ist, bedurfte es dazu einer Spezialbewilligung. (Rösti, 2010) Weitere Erfahrungen sollen bei der temperaturabhängigen richtigen Dosierung gesammelt werden. Dies ist anhand eines eutektischen Diagrammes möglich.

#### **6.4.7 SnowFree** (Traubenkelter und Salz)

SnowFree ist ein Gemisch aus Traubenkelter (Trester) und Salz ( $\text{NaCl}$ ) im Verhältnis von etwa 70:30 und wird als Körner von 0.5 bis 3 mm Grösse verwendet.

Traubenkelter weist einen sehr hohen Zuckergehalt auf. Bei dessen Zersetzung (Verrottung) wird Wärme freigesetzt. Diese Beobachtung nach dem Ausstreuen in den Rebbergen, wobei dort der liegende Schnee schneller schmilzt, wurde zum Anlass genommen, damit ein Auftaumittel herzustellen.

Vorteile des Produktes sind:

- langanhaltende Wirkung (langsamer Abbau)
- vollständiger biologischer Abbau
- sinnvolle wirtschaftliche Verwendung des Abfalls aus der Weinproduktion
- Einsparung umweltbelastender Streusalze

Nachteile:

Zucker (Glukose) kann zu Sauerstoffdefizit in den Gewässern und damit zur Eutrophierung führen. Ebenso kann die Leistungsfähigkeit von Abwasserreinigungsanlagen beeinträchtigt werden.

Industriell hergestelltes SnowFree wird seit 2011 in begrenzten Mengen in Frankreich getestet und anschliessend patentiert.

Ob es in grossen Mengen anstelle von Streusalz angewendet oder beim Feuchtsalzverfahren der Sole beigegeben und vorbeugend eingesetzt werden soll, ist noch nicht abgeklärt. Dies hängt neben der Fähigkeit, auch Schnee aufzutauen, ebenso vom Preis ab. (Guignier, 2011; Sutter, 2011; Swisscom, 2012)

## 6.5 Kombinierte Einsatzmittel

### 6.5.1 Splitt/Salz und Sand/Salz

Um das Gefrieren feuchter abstumpfender Streumittel (Splitt, Sand) zu vermeiden, wurde noch in den 1960er Jahren empfohlen, diesen Streustoffen 1-5% Tausalz (NaCl) beizugeben. Und auch heute werden noch immer Sand und Streusandlager mit ca. 25-50 kg/m<sup>3</sup> Salz versetzt. Aufgrund der bereits hohen Einsatzmengen für abstumpfende Streumittel wird auf diese Weise fast dieselbe Menge Salz ausgebracht wie bei alleiniger Salzstreuung. Die Verwendung von abstumpfenden Streumitteln mit geringer Wasserhaltekapazität oder eine trockene Lagerung der Streustoffe wäre demnach geboten. (Gartiser et al., 2011)

Beimengung von Salz bedeutet eine doppelte Belastung für die Umwelt und wäre wirtschaftlich kaum vertretbar. Damit würden die Vorteile von Salz als Auftaumittel bei richtiger Ausbringung (Zeitpunkt, Ort, Menge) völlig ignoriert.

### 6.5.2 Ökotau und Liapor Tau

Beim **Ökotau** handelt es sich um ein Granulat aus Blähton (Ökostreu), das mit etwa 10% Harnstoff getränkt wurde. Harnstoff wirkt auftauend. Der eutektische Punkt, d.h. die Gefrieretemperatur bei gesättigter Lösung, beträgt -12° C. (Gartiser et al., 2011) Das Granulat selbst bleibt auf der bestreuten Oberfläche haften und bildet einen sehr wirksamen Gleitschutz. (Ökotau, 1987)

Daneben gibt es Präparate aus Blähton, welche mit Kaliumcarbonat (KCO<sub>3</sub>) getränkt sind. Sie laufen unter den Handelsnamen **Liapor Tau, POLAR ULTRA GRIP SOLE, Kaliumcarbonat + KASOLID** usw. Sie lassen sich bei Temperaturen bis -11° C. tauwirksam einsetzen und haben hinsichtlich Rutschhemmung dieselben Eigenschaften wie Ökotau. (Kainz/Peintner/Stark, 2010)

Ökotau, Liapor Tau etc. eignen sich vor allem für den Einsatz im kommunalen Bereich auf Trottoirs, Vorplätzen, Zufahrten und auf allen Strassen, auf welchen Höchstgeschwindigkeiten von weniger als 50 km/h gelten. Bei grösseren Geschwindigkeiten wird das Granulat, ähnlich wie der Splitt, an den Strassenrand geschleudert. (Bucher, 1987; Ökotau, 1987)

Zum Ökotau sind Experten unterschiedlicher Meinung. Harnstoff wirkt im Randbereich der Strasse als organischer Dünger. Eine Überdosis kann zu Überdüngung, im Extremfall zu Plasmolyse führen. Zudem kann Harnstoff in Gewässern zu Ammonium und zu fischgiftigem Ammoniak hydrolysieren. Letztlich wird er zu Nitrat abgebaut und kann die Oberflächengewässer und das Grundwasser mit diesen Stoffen zusätzlich belasten.

Beim Liapor Tau etc. wird Kaliumcarbonat als Dünger eher positiv gewertet. Insbesondere bei bereits vorgeschädigten Bäumen ist es dem NaCl vorzuziehen. Nachteilig ist hingegen die Alkalisierung des Bodens bei mehrmaliger und hochdosierter Anwendung. Die Folge sind Strukturzerfall der Böden durch Verschlammung und damit Verdichtung. Wegen der Entstehung von Ammoniak dürfen aber Kaliumcarbonat-Schmelzwässer nicht als Abwässer in die öffentliche Kanalisation geleitet werden. (Kainz/Peintner/Stark, 2010)

Nach Aussagen von Strassenfachleuten wird das Granulat sowohl bei Ökotau als auch bei Liapor Tau etc. durch den Verkehr zerrieben und bildet rasch eine schlammige Masse, die dann eher rutschfördernd ist. Zudem stellt diese Masse durch Sedimentation und Verkrustung in Schächten und Leitungen ein Problem dar. (Barandun, 1985). In Kläranlagen und Regenrückhaltebecken muss das Granulat als Schwimmstoff herausgesiebt werden. (Kainz/Peintner/Stark, 2010)

Ökotau wurde gegenüber NaCl als das kleinere Übel betrachtet und wegen seiner ökologischen "Unbedenklichkeit" im Jahre 1987 vom Bundesamt für Umweltschutz freigegeben, nachdem es auch in den Nachbarländern bereits in grossen Mengen eingesetzt worden war. (Bucher, 1987)

Gemäss ChemRRV darf Harnstoff seit 2005 als Auftaumittel nicht mehr verwendet werden. Ausnahmegewilligungen sind möglich. Solche Ausnahmen bilden z.B. Flugplätze und korrosionsgefährdete Strassenabschnitte.

Liapor Tau etc. mit dem Zuschlagstoff Kaliumcarbonat ist in der Schweiz gemäss ChemRRV nicht zugelassen.

### 6.5.3 Stop Gliss Bio (imprägnierte Holzschnitzel)

Stop Gliss Bio kombiniert die abstumpfende mit der auftauenden Wirkung. Holzspäne (Holzschnitzel) werden mit einer Magnesiumchlorid-Lösung getränkt und vor Gebrauch getrocknet aufbewahrt. Nach dem Ausstreuen, von Hand oder mit einem traditionellen Schneckenstreuer, gelangen die Schnitzel in Bodenkontakt und werden durch Betreten oder Befahren angedrückt. Im feuchten Milieu löst sich das  $MgCl_2$  langsam auf, während gleichzeitig Schnee oder Eis geschmolzen wird. Im weichen Schnee verkeilen sich die Schnitzel, was die Bodenrauigkeit zusätzlich erhöht. (CPAG, 2013)

Die Schnitzel (Holzplättchen) haben die Form eines Parallelepipedes von geringer Dicke. Sie sind etwa 10x15 (maximal 20) mm gross und aufnahmefähig für Wasser und darin gelöste Substanzen. Gesättigte  $MgCl_2$ -Lösung weist einen Gefrierpunkt von  $-33^\circ C$ . auf und ist deshalb tauwirksamer als NaCl. Der Wassergehalt der Holzspäne wurde so abgestimmt, dass es der Feuchtigkeitsgrad dem Salz gestattet, sofort seine Wirkung zum Schmelzen von Schnee und Eis zu entfalten.

Das Verfahren ist für den Winterdienst auf Fusswegen (Gehsteige, Fussgängerzonen, Plätze etc.) entwickelt worden, kann aber auch auf Strassen mit geringem Verkehrsaufkommen und schwachem Verkehr benutzt werden (Wohnquartiere, Garageneinfahrten etc.). Nicht geeignet sind städtische Strassen mit starkem Verkehrsaufkommen. Die Holzplättchen würden durch den Strassenverkehr aufgrund des geringen Gewichtes aufgewirbelt. Dadurch kann das Auftaumittel seine Wirkung auf der Fahrbahn nicht entfalten.

Grösster Vorteil ist die biologische Abbaubarkeit des Streugutes. Tests und Analysen haben gezeigt, dass die aufgenommenen Mengen an Schwermetall weit unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte liegen (Ausnahme Cadmium). Deshalb kann Stop Gliss Bio nach dem Einsammeln kompostiert werden.

Die Form der Plättchen hat sich bewährt:

- grosse spezifische Oberfläche: Diese ermöglicht es, eine gute Abdeckung der vereisten Oberfläche mit wenig Material zu gewährleisten
- grosse Kontaktfläche: Diese Beschaffenheit garantiert dem Fussgänger einen exzellenten Halt
- leichte Zuspitzung der Ecken: Diese Eigenschaft garantiert dem Fussgänger eine gute Stabilität, denn das Material rollt nicht unter den Schuhen, wie dies bei Split der Fall sein kann.

Die Wirkung des Auftaumittels wird bei zunehmendem Kontakt mit dem Schnee laufend verbessert. Allerdings vermag die Salzlösung, wie beim Einsatz von Salz allein, nur bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes mit der Schneetemperatur auftauend zu wirken.

$MgCl_2$  hat nur eine geringe korrosive Wirkung auf Metallstrukturen.

Dank seiner geringen Dichte sinkt das Holzplättchen nur langsam in die Unterlage ein und stoppt dann. Es verfestigt sich in der Unterlage, ohne von der Oberfläche zu verschwinden. Das imprägnierte Salz wirkt über mehrere Tage und verhindert oder begrenzt die Eisbildung auf schneebefreiten, aber nassen Strassen. Bei leichtem Schneefall bringt es den Schnee, von dem es zugedeckt wird, ebenfalls zum Schmelzen. (CPAG, 2013)

Im Vergleich zu reiner Salzstreuung muss Stop Gliss Bio nur etwa alle 5 Tage nachgestreut werden. (CPAG, 2013) Ausserdem ist ein schonender Umgang mit dem Streugut im Bereich des Stadtgrüns problemlos möglich. Die Nachteile von  $MgCl_2$  können damit kompensiert werden.

Trotz des relativ hohen Preises ist Stop Gliss Bio bei einer Vollkostenrechnung, unter Berücksichtigung der Ökobilanz, für den vorgesehenen Anwendungsbereich wirtschaftlicher als die meisten anderen Verfahren.

Stop Gliss Bio wurde in La Chaux-de-Fonds entwickelt und seit 2005 mit Erfolg getestet und angewendet. (Turtschy/Mucaria, 2009) Inzwischen haben zahlreiche andere Gemeinden nachgezogen, so z.B. Bern, Interlaken, und damit ebenfalls positive Erfahrungen gemacht. Der Vertrieb erfolgt über die Waadtländer Firma CPAG-SA. (Günter, 2009; Schwendener, 2009; Aberle, 2010; CPAG, 2013)

## 6.6 Feuchtsalz-Verfahren

Bei der Feuchtsalztechnik (Feuchtsalz-Verfahren) wird das Salz nicht mehr trocken ausgebracht, sondern mit Salzlösung (Sole) befeuchtet. Die Fahrzeuge müssen das trockene Salz und die Salzlösung getrennt befördern, gemischt wird erst unmittelbar vor der Ausbringung auf dem Streuteller. (Hanke, 2010)

Beim jährlichen Salzverbrauch können in Städten durchschnittlich 24 % und auf Strassen ausserorts bis zu 44 % eingespart werden. (Anonymus, 2001 in Gartiser et al., 2003) Der Einspareffekt beruht überwiegend auf der gezielteren Dosierung und den geringeren Verlusten durch Verwehungen. Weniger Salzverluste sowie die bessere Haftung auf der Fahrbahn machen das Feuchtsalz-Verfahren sowohl aus der Sicht des

Verkehrs als auch wirtschaftlich und ökologisch dem Trockensalzverfahren überlegen, sodass diese Technik heute Standard ist. (Hanke, 2010)

Versuche mit der Feuchtsalz-Methode wurden in der Schweiz in den 1960er Jahren und in Deutschland 1972 bis 1975 (Koblenz) resp. 1976-1979 durchgeführt. Anstoss dazu gaben die Streusalzschäden an Pflanzen, Fahrzeugen und Bauwerken und damit die Forderung, weniger Streusalz auszubringen. Dank der positiven Erfahrungen findet das Verfahren seither in Deutschland und auch in der Schweiz verbreitete Anwendung. Trotz der erforderlichen Zusatzausrüstung und dem teureren Streugut  $\text{CaCl}_2$  resp.  $\text{MgCl}_2$  sind auch die Wirtschaftlichkeitsberechnungen positiv. (Hanke, 1998-2)

Die Feuchtsalztechnik wurde in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt, sodass heute ein sehr gutes Streubild, d.h. eine optimale Längs- und Querverteilung des Streustoffes möglich ist. (Hanke, 2010)

Praxisüblich ist ein Gewichtsverhältnis Trockensalz zu Salzlösung von 7 zu 3 (30 % Lösungsanteil, deshalb die Bezeichnung **FS 30**). Als Salzlösung werden in der Regel  $\text{CaCl}_2$  oder  $\text{MgCl}_2$ , ausnahmsweise auch  $\text{NaCl}$ , meist in einer Konzentration von 20 % verwendet. (Hanke, 1998-2)

Vorteile des Feuchtsalz-Verfahrens gegenüber dem Trockensalz sind (pd, 1987; Hanke, 1998-2; Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 1999; Koller, 2005):

- Verringerung der Wehverluste beim Streuen des Salzes
- Verringerung der Wehverluste durch Seitenwind und den nachfolgenden Verkehr
- gleichmässige Aufbringung des Streugutes auf die Fahrbahn, d.h. bessere Homogenität des Streubildes
- grössere Streubreiten und höhere Streugeschwindigkeiten (raschere Fahrten oder raschere Ausbringung, damit das Streugut bei tiefer Temperatur nicht gefriert)
- Verbesserung des Haftvermögens des Salzes auf der Fahrbahn (weniger Streu- und Wehverluste, geringerer Mengenbedarf)
- beschleunigte Tauwirkung durch Beigabe von  $\text{CaCl}_2$  resp.  $\text{MgCl}_2$  (bessere Wärmebilanz), Tauwirkung von FS 30 bei Temperaturen bis  $-20^\circ\text{C}$  (resp.  $-38^\circ\text{C}$ ).
- wesentlich längere Wirkungsdauer auf trockener Fahrbahn, ergibt höhere Verkehrssicherheit, dadurch auch vorbeugende Streuungen bei kritischer Witterung möglich
- dank effektiverer Ausnutzung weniger Salz im Strassenbegleitgrün, d.h. weniger Eintrag in die Böden und weniger Verwehung direkt zu den oberirdischen Pflanzenteilen
- dank effektiverer Ausnutzung auch geringere Korrosionsgefährdung von Bauten (Beton- und Stahlbauten) sowie von Fahrzeugen
- finanzielle Einsparungen bei Nachladefahrten, Stützpunkten oder den Streugeräten (kleinere Kapazitäten)

Als Nachteile werden gegenübergehalten:

- Das besondere Haftvermögen bewirkt zugleich ein längeres Verweilen auf der Vegetation, sodass speziell im innerstädtischen Bereich vermehrt Kontaktschäden auftreten können.

- Das bessere Haftvermögen bewirkt auch ein längeres Verweilen auf Karosserien und Brückenbauwerken.
- Wegen der höheren Hygroskopizität von  $\text{CaCl}_2$  und  $\text{MgCl}_2$  im Vergleich zu  $\text{NaCl}$  bleiben diese länger auf der Pflanzenoberfläche in gelöster Form und damit pflanzenwirksam. (Flückiger, 1982)
- Gischt lässt sich auch beim Feuchtsalzverfahren nicht vermeiden. Aerosole können teilweise bis in eine Entfernung von einigen 100 Metern von der Strasse verfrachtet werden (Gartiser et al., 2011) Die Rinde der Strassengehölze kann das aufgespritzte Salzwasser nicht auf Dauer abhalten, da das Abschlussgewebe nach längerer Einwirkungszeit zersetzt wird und die Salzionen, dem Konzentrationsgefälle folgend, in die lebenden Zellen des Zweiginneren eindringen. Junge Zweige und deren Knospen sind am empfindlichsten gegen das Eindringen. (GALK, 1998)
- Bei vergleichbarem Chloridangebot im Boden ist die Chloridaufnahme beim  $\text{CaCl}_2$  grösser als beim  $\text{NaCl}$ . Deshalb wirkt eine Mischung von  $\text{NaCl}$  mit  $\text{CaCl}_2$  wesentlich toxischer als  $\text{NaCl}$  allein. (Flückiger, 1982)

## 6.7 Flüssig-Verfahren (Sole)

Ziel der Ausbringung reiner Salzlösungen ist die weitere Optimierung der vorbeugenden Streuung. Dank verbesserten und weiterentwickelten Geräten ist es möglich, mit extrem geringen Salzmengen, bis zu einem Minimum von  $10 \text{ ml/m}^2$  ( $2 \text{ g Salz/m}^2$ ), bei grossen Streugeschwindigkeiten auszukommen.

Wichtig ist eine gute und gleichmässige Benetzung der Fahrbahn und die Haftung über längere Zeit, auch während über 2 Stunden bei starkem Verkehr.

Bisherige Versuche und Erfahrungen sind vielversprechend und gestatten neben grösserer Wirtschaftlichkeit eine zusätzliche Schonung der Umwelt dank geringerem Streumittelbedarf.

Wichtige Vorteile des Flüssigverfahrens mit Wasserlösung sind die bessere und differenziertere Dosierung, die raschere Wirkung und der günstigere Preis der Salzlösung.

Weniger effizient ist die Ausbringung bei unebenen Stellen, weil die Flüssigkeit wegfließen kann. Deshalb ist der guten Haftung besondere Beachtung zu schenken. Ein weiterer Nachteil von Sole ist, dass sich bei der Schnee-Schmelzung der Wassergehalt in der Sole erhöht und somit der Salzgehalt sinkt. Dies wiederum birgt die Gefahr, dass sich bei tieferen Temperaturen Eis bildet. (Info CH, 2011) Deshalb ist die Ausbringung reiner Lösungsmittel nur bei Temperaturen von mindestens  $-6^\circ \text{C}$ . (d.h. oberhalb  $-6^\circ \text{C}$ .) sinnvoll und kommt nur präventiv in Frage. Sie ersetzt dadurch die Feuchtsalz-Methode nur in dieser begrenzten, aber relativ häufigen Situation. (Hanke, 2010)

Das Flüssigverfahren kommt bereits in mehreren Kantonen und Gemeinden, namentlich auch beim Unterhalt der Nationalstrassen zur Anwendung.

Weitere Verbesserungen sind durch die Automatisierung, z.B. durch den Einsatz eines Thermographen, möglich. Der Thermograph misst die Fahrbahntemperatur vom fahrenden Streufahrzeug aus mithilfe einer Infrarotkamera. Dadurch wird die Streudichte vollautomatisch der Temperatur der Strassenoberfläche angepasst. (Hanke, 2010)

Versuche zur automatischen Messung der vorhandenen Streugutmenge unmittelbar vor dem nächsten Streudurchgang verbessern ebenfalls den Einsatz der Streumittel, ermöglichen es insbesondere aber auch, nachteilige Überdosierungen zu vermeiden. (Hanke, 2010)

**Die Ausbringung einer reinen Sole eignet sich auf flachen bis wenig geneigten Strassen für die präventive Streuung bei Temperaturen oberhalb  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Solche Situationen treten in tieferen Lagen im Verlaufe des Winters sehr häufig auf. Beim Soleverfahren handelt es sich deshalb um eine echte wirtschaftliche und umweltschonende Alternative.**

## 6.8 Vorbeugende Streuung

Verbesserungen gegenüber der Umwelt sind nach bisherigem Wissensstand nur durch eine weitere Effizienzsteigerung möglich. Wichtige Erkenntnisse dazu gibt es in den letzten Jahren vor allem bei der **vorbeugenden Streuung**.

Für die präventive Streuung stehen heute zur Verfügung:

- bessere Kenntnisse über die physikalisch-meteorologischen Zusammenhänge bei der Glättebildung
- detaillierte Wetterprognosen in Verbindung mit modernen Glättemeldeanlagen
- genaue Kenntnisse über das zu bedienende Strassennetz
- Kenntnisse über den Streumittelbedarf in Abhängigkeit von Oberflächentemperatur, Art des Streumittels und wirksamer Tauleistung (eutektische Diagramme)
- wesentlich verbesserte Hilfsmittel zur Ausbringung des Streugutes (Fahrzeuge, Geräte, Speichermöglichkeiten etc.)

Die richtig angewandte vorbeugende Streuung auf der Basis guter Daten und Kenntnisse stellt einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsflusses im Winter dar. Gleichzeitig spart eine vorbeugende Streuung zum richtigen Zeitpunkt auch Salz ein, da zur Vermeidung von Glättebildung deutlich weniger Salz benötigt wird als zum Auftauen vorhandener Glätteschichten. Je nach Witterungslage und Temperatur braucht man zur vorbeugenden Streuung zwischen 30 und 70 % weniger Salz als zur Bekämpfung vorhandener Eisschichten. (Hanke, 2010)

In Deutschland ist die vorbeugende Streuung im Feuchtsalz- und im Soleverfahren Bestandteil moderner Winterdienstkonzepte. Der Maschinen- und Gerätepark wird entsprechend umgerüstet resp. modernisiert, das Personal sorgfältig geschult.

In der Schweiz ist aktuell eine vorbeugende Streuung gemäss ChemRRV nur bei kritischen Wetterlagen und nur an exponierten Stellen zugelassen. Aus der Sicht des Umweltschutzes wäre es notwendig, diese Einschränkungen bedarfsgerecht und unter den entsprechenden Voraussetzungen zu lockern. Ziel sollte es sein, die vorbeugende Streuung zum richtigen Zeitpunkt und mit dem richtigen Verfahren auszuführen. Die Einsparung erheblicher Streusalzmengen würde nicht nur die Umwelt wesentlich entlasten, sondern auch erheblich Kosten einsparen.

Bei der teilweisen Vergabe des Winterdienstes sollen in Zukunft die Leistungen nicht mehr an der verbrauchten Streugutmenge, sondern ganzheitlich nach der Betriebsbereitschaft gemäss Winterdienstkonzept und dem sparsamen Umgang mit dem Streugut gemessen werden.

### Winterdienst-Strategie gemäss Handbuch Strassen-Winterdienst (Hanke, 2012)

Zu bekämpfender Zustand	Empfohlene Winterdienst-Maßnahme
<b>Reifglätte</b>	Vorbeugende Streuung - bevorzugt Flüssigstreuung* - sonst mit Feuchtsalz
<b>überfrierende Feuchte</b> (dünne Eisglätte)	Vorbeugende Streuung - bevorzugt Flüssigstreuung* - sonst mit Feuchtsalz
<b>überfrierende Nässe</b> (Eisglätte)	Vorbeugende Streuung - Feuchtsalz oder Flüssigstreuung*
<b>Eisregen</b> (Glatteis)	Wenn möglich vorbeugende Streuung - bevorzugt Flüssigstreuung* - sonst mit Feuchtsalz
<b>Schneefall</b> (Schneeglätte)	1. Soweit möglich vorbeugende Streuung als Flüssigstreuung* oder Feuchtsalz 2. Während Schneefall Räumen und Streuen mit geringer Streudichte mit Feuchtsalz 3. Nach Ende des Schneefalls aggressives Räumen und Streuen mit Feuchtsalz
	<i>*Hinweis: Flüssigstreuung nur bis -6 °C, bei tieferer Temp. nur Feuchtsalz</i>

Winterliche Glättearten werden je nach der Entstehung wie folgt unterschieden:

- Glatteis** entsteht, wenn Niederschläge auf eine unterkühlte, trockene Verkehrsfläche fallen und diese mit einer glatten Eisschicht überziehen.
- Eisregen** entsteht, wenn unterkühlte Niederschläge auf die unterkühlte Verkehrsfläche fallen und dort schlagartig gefrieren.
- Eisglätte** entsteht, wenn eine feuchte Verkehrsfläche allmählich gefriert (Pfützen vorangegangener Niederschläge, Schmelzwasser, geschmolzener Schnee usw.), weil die Abkühlung unter 0° C absinkt.
- Reifglätte** entsteht, wenn warme, feuchte Luft über eine trockene, unterkühlte Verkehrsfläche streicht, so dass sich die Feuchtigkeit in Reife umwandelt.
- Schneeglätte** entsteht, wenn eine Schneesicht durch den Verkehr (bei Temperaturen um 0°C) zusammengepresst wird. Je nach Verkehrsbelastung kann dies nach Beginn des Schneefalles bei einer dünnen Schneedecke oder nach der Schneeräumung, wenn Schneereste zurückbleiben, eintreten. (aus: Leitfaden Winterdienst, Anhang 5, Muster Winterdienstkonzept)

## 7. Empfohlene Massnahmen (Zusammenfassung)

Die Möglichkeiten zur Verbesserung der Bedingungen für das Siedlungsgrün und im speziellen für die Stadtbäume sind vielfältig. Sie reichen vom umweltschonenden Winterdienst über bauliche Massnahmen, die Auswahl und Pflege geeigneter Baum- und Straucharten bis hin zur Verbesserung der Lebensbedingungen und der Abwendung anderer Gefährdungen für die Bäume. Letztlich entscheidend ist die Wertschätzung der Stadtbäume und die Bereitschaft, für die Verbesserung der Situation etwas zu tun resp. die organisatorischen, technischen und finanziellen Mittel zur Verfügung zu stellen. Aber auch das persönliche Verhalten jedes Einzelnen im Alltag und bei besonderen winterlichen Verhältnissen trägt entscheidend zur Erhaltung gesunder Stadtbäume bei. Davon hängt auch die Akzeptanz von Beschlüssen und Massnahmen seitens der Behörden und der Verwaltungen ab.

Die Vorschläge und Empfehlungen in der Literatur, in Weisungen, Merkblättern etc. sind vielfältig und können hier nur summarisch aufgeführt werden. Zahlreiche Gemeinden und Kantone gehen beispielhaft voran und zeigen mit ihren Konzepten, aber auch bei der praktischen Umsetzung, dass noch ein enormes Handlungspotential besteht.

### 7.1 Umweltschonender Winterdienst

**Ziel: Streusalz so viel wie nötig – so wenig wie möglich**

- **Verbesserung bzw. Optimierung der Technik zur Reduktion der erforderlichen Streumenge**
  - Räumgeräte: z.B. Kombination Schneepflug – Kehrblasgerät
  - Streufahrzeuge und Streugeräte:  
Steuerung der Salzausbringung (Tachosteuerung; voll elektronisch geregelte Streuautomaten; stufenlos einstellbare, voll synchronisierbare Streubreiteneinstellung; Streudienstrechner – Streudatenverarbeitung über Mikroprozessorrechner im Digitalsystem)
- **Begrenzung der maximalen Streumenge und der Streubreite**  
maximal 10 (-15) g/m<sup>2</sup> pro Streugang, Optimierung Abstand Streugerät – Fahrbahn
- **trockenes Streugut**  
Verzicht auf CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, Harnstoff etc.  
Der Einsatz von anderen chemischen Auftaumitteln wie Harnstoff, Phosphatverbindungen, Ammoniumsalzen usw. stellt aus ökologischer Sicht keine Alternative zum Streusalz dar.
- **Feuchtsalz-Verfahren**  
Das Feuchtsalz-Verfahren hat grundsätzlich Vorrang vor der Trockensalz-Ausbringung
- **Flüssig-Verfahren (Sole-Verfahren)**  
Bei der präventiven Streuung und bei Temperaturen oberhalb -6° C. sollte das Sole-Verfahren zum Standard werden.
- **Optimierung des Einsatzes**  
Räum- und Streupläne: mit EDV-Unterstützung, witterungskonform
- **Einsatzzeitpunkt und -zeitraum**  
z.B. zuerst Räumen, dann Streuen; Verzicht auf Streuen bei mässigem und starkem

Schneefall; möglichst Verzicht auf Streuen im Bereich austreibender Pflanzen (Frühjahr); Wenn Salzstreuung erforderlich ist, sollte die Streumenge, je nach Strassenzustand, dem Wetter und dem noch vorhandenen Restsalz angeglichen werden. Um eine größere Schädigung der Umwelt zu vermeiden, sollte die Richtgröße von 10 g Salz/m<sup>2</sup> und pro Einsatz nicht überschritten werden.

- **präventive Streuung**

Ja, wenn erforderlich; Beachtung des Strassenzustandes, der Witterungsverhältnisse, der Glättegefahr; Ausbringung der minimal erforderlichen Streumenge, bei Temperaturen über -6° C. Flüssigverfahren

- **Dosierung der Streumenge**

Dosierung automatisch und laufend anpassen an Fahrbahnzustand und Temperaturverteilung auf der Fahrbahn (Messung mit dem Einsatzfahrzeug, "Thermographie"), laufende Erfassung der Menge Restsalz auf der Fahrbahn (optoelektronisch)

- **Instruktion: weniger ist oft mehr**

Aufklärung, Sensibilisierung und Instruktion des Personals des Winterdienstes, insbesondere der Einsatzleiter, der Maschinenführer und der Fahrzeuglenker; Verzicht auf „vorsorgliche“ Überdosierung (kontraproduktiv! reduzierte Sicherheit für die Verkehrsteilnehmer)

## 7.2 Differenzierter Winterdienst

Ein differenzierter Winterdienst mit verringertem Salzeinsatz versucht, den bestmöglichen Kompromiss zwischen den Erfordernissen der Verkehrssicherheit, der Wirtschaftlichkeit und des Umweltschutzes zu erreichen.

Grundlage des differenzierten Winterdienstes ist ein umsetzbares Winterdienstkonzept. (vgl. Leitfaden Winterdienst, Anhang 5, Muster Winterdienstkonzept, Beispiel Uster)

Ein Winterdienstkonzept nach heutigem Stand des Wissens beinhaltet:

- Umschreibung der Zielsetzung
- gesetzliche Vorgaben
- Definition von Begriffen
- Dringlichkeitsstufen
- verbindliche Zuweisung sämtlicher Strassen und Wege etc. zu den Dringlichkeitsstufen (Strassenplan)
- Umschreibung des Inhaltes der Streueinsätze (Kategorien)
- Inhalte des Winterdienstes (Umfang der Räumungen)
- begleitende Massnahmen (z.B. Zurückschneiden der Bäume und Sträucher, Benachrichtigung der Eigentümer der Liegenschaften etc.)

Überlegungen zum umweltschonenden Winterdienst (z.B. präventive Streuung) sind integrierender Bestandteil des differenzierten Winterdienstes.

Weitere allgemeine Vorgaben sind nicht zielführend. Jede Gemeinde, jede Stadt weist ihre Besonderheiten und damit auch ihre eigenen Chancen und Risiken auf. Die Konzepte sollen bei der Wahl der Streumittel und der Ausbringungstechnik ebenso den verschiedenen Verkehrsträgern und den einzelnen Örtlichkeiten Beachtung schenken. So ist beispielsweise eine Fahrbahn zur Benützung mit Motorfahrzeugen nicht gleich zu behandeln wie ein Radweg, und ein Gehsteig ist keine befahrbare Brücke usw. Gischt und Abdrift haben wegen der unterschiedlichen Fahrgeschwin-

digkeiten innerorts und ausserorts ebenfalls nicht dieselbe Bedeutung. Präventiver Einsatz von Sole kommt nur in flachem Gelände in Frage. Eine Quartierstrasse ist im Hinblick auf das Verkehrsaufkommen und die Fahrgeschwindigkeiten nicht gleichzusetzen mit einer Transitstrasse. Eine Strasse mit Stadtgrün verlangt einen schonenderen Umgang mit Streumitteln als eine Strasse ohne Stadtgrün usw. Auch die klimatischen Verhältnisse verlangen ein differenzierteres Vorgehen.

Zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit dienen noch folgende Hinweise und Empfehlungen:

- **Prioritäten setzen – Unterschiede machen**

Nach der mechanischen Räumung kann die Salzung auf Ausserortsstrassen und stark befahrene Strassen innerorts sowie auf Gefahrenstellen (starke Steigungen, verkehrsreiche Kreuzungen, Engstellen, Brücken, Fussgängerüberwege) beschränkt werden. Auf allen anderen Strassen empfiehlt sich grundsätzlich die Nullstreuung, d.h. der Verzicht auf jegliche Streumittel. (Koller, 2005)

- **Mechanische Schneeräumung hat Vorrang**

je intensiver und effizienter, desto geringere Notwendigkeit der Salzstreuung, entsprechende Reduktion der Fahrgeschwindigkeit (den Strassenverhältnissen angepasstes Fahrverhalten)

- **Deponie des geräumten Schnees**

mit Salz vermischten Schnee nicht im Bereich der (Baum-) Vegetation und im Bereich von Tauwasserabflüssen (Vermeidung von erheblichen Salzkonzentrationen)

- **Radwege**

innerorts bevorzugt behandeln, keine Versperrung durch Schneehaufen, Berücksichtigung der Radstreifen bei der Schneeräumung (mechanisch und bei Schwarzräumung)

- **Schneesleudern und Schneefräsen**

Meidung von Hecken und Bäumen (Gebläse, Druck, Salz im Schnee)

- **Salzstreuung gemäss Konzept**

Verwendung von Streustoffen entsprechend der Verkehrsbedeutung der Strassen, der Trassierung und dem Einsatzfall (keine Generalisierung; strikte Einhaltung des Dispositivs, d.h. keine Schwarzräumung, wo dies nicht ausdrücklich vorgesehen ist); präventive Streuung je nach Strassenzustand, Witterungsverhältnissen, Glättegefahr

- **Einsatz von Splitt**

als Alternative zur Nullstreuung bei Weissräumung; Abwägen Wirkung, Kosten und Umweltbelastung; keine Beimischung von Salz; abstumpfende Streumittel sollten nur auf Gehwegen und in besonderen Gebieten zum Beispiel in höheren Lagen oder dort, wo Bäume zu schützen sind, eingesetzt werden.

- **Sand**

ausnahmsweise und in lokal begrenztem Umfang (Handstreuung), keine Beimischung von Salz

- **Blähton (Ökostreu)**

als Option, fallweise und im Bereich des Langsamverkehrs

- **Stop Gliss Bio**

als Option, fallweise und im Bereich des Langsamverkehrs

- **Nullstreuung**

als Option im Rahmen eines Konzeptes, entsprechende Kommunikation und Signalisation unerlässlich

### 7.3 Bauliche Massnahmen

- Beim Bau und der Instandstellung von Strassen und Wegen:
  - Beachtung einer effizienten Entwässerung, d.h. gezielte Ableitung zwecks Verhinderung flächiger Vereisungen (Kainz/Peintner/Stark, 2010)
  - Abfluss des Oberflächenwassers nicht an Stellen mit gestresster Vegetation
  - Rücksichtnahme auf ökologische Situationen im Zusammenhang mit winterlichen Streusalzlösungen
  - Sensibilisierung des Personals beim Bau von Anlagen und Einrichtungen, z.B. durch Instruktion und Herausgabe von Merkblättern (Beispiel Bauverwaltung Kreuzlingen, 2010)
- eishemmende (aufheizbare) Strassenbeläge?
- Schutzvorkehrungen gegenüber dem Siedlungsgrün

### 7.4 Auswahl geeigneter Baum- und Straucharten

Bei der Wahl geeigneter Baum- und Straucharten hat die Berücksichtigung der Salztoleranz einen sehr hohen Stellenwert. Die Winterdienstproblematik lässt sich jedoch damit nicht lösen.

Bei der Baumartenwahl spielen Gesichtspunkte der Biodiversität (ökologische, genetische Vielfalt), des Standortes (Wurzelaum, Stadtklima), Pflegemöglichkeiten (Wuchseigenschaften, technische Möglichkeiten an stark befahrenen Strassen), Erscheinungsbild und Wirkung (Gestaltung, Blüten, Farbe, Jahreszeiten etc.) oft eine ebenso grosse, wenn nicht gar vorrangige Rolle. Die Qual der Wahl beschränkt sich deshalb weniger auf die Auswahl bei einer Fülle von Angeboten, sondern konzentriert sich auf das Abwägen verschiedener Vor- und Nachteile und die Suche nach Kompromissen.

Daneben haben, je nach Situation, folgende Gesichtspunkte eine zunehmende Bedeutung (GALK, 2013):

- geringe Empfindlichkeit gegenüber Pathogenen (allgemeine Schwächung, Klimawandel, Ästhetik, epidemieartiges Auftreten von Krankheiten und Schädlingen) (Balder, 2007, Flückiger/Braun, 2007)
- Diversifizierung der Artengarnitur, zwecks Verteilung der Risiken
- keine invasive Neophyten (Arten der Schwarzen Liste sind ausgeschlossen)
- allgemeine Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel (Roloff/Rust, 2007; Roloff, 2010; Roloff/Bonn/Gillner, -)
- Trockenstress-Toleranz (Klimawandel, Wärmeinseln in städtischem Milieu)
- geringe (Spät-)Frostempfindlichkeit (Klimawandel, früherer Austrieb)
- geringe Empfindlichkeit gegenüber Luftschadstoffen
- keine grossen Ansprüche an die physikalischen Bodeneigenschaften
- Toleranz gegenüber einem alkalischen Milieu im Boden (hohe pH-Werte)

Auf die Pollenallergie kann nur ausnahmsweise Rücksicht genommen werden (siehe Rechtsfall in Deutschland, GALK, 2008)

Frisch gepflanzte Bäume sind weniger widerstandsfähig (Pflanzschock). Deshalb sollten Bäume beim Risiko von Salzbelastung im Frühjahr gepflanzt werden.

Für die Pflanzung an Strassen mit niedrigem und mittlerem Verkehrsaufkommen, d.h. nur mit Einfluss von Schmelzwasser über den Boden (ohne Gischt und Aerosole), können folgende einheimischen Baumarten empfohlen werden:

**Feldahorn** (*Acer campestre*)

**Esche** (*Fraxinus excelsior*)

**Stieleiche** (*Quercus robur*)

**Wolliger Schneeball** (*Viburnum lantana*)

**Gemeiner Schneeball** (*Viburnum opulus*)

**Liguster** (*Ligustrum vulgare*)

**Birke** (*Betula verrucosa*)

**Tamariske** (*Tamarix europaeus*)

**Schwarzföhre** (*Pinus nigra*)

**Platane** (*Platanus x hybrida*)

Der Arbeitskreis Stadtbäume des GALK verfügt über eine laufend aktualisierte Liste von Baumarten, welche sich für die Pflanzung im Strassenbereich von Städten eignen (Strassenbaumliste, GALK 2013). Vor der Aufnahme ins Verzeichnis werden diese Strassenbäume umfassenden Eignungstests unterzogen (Bauer, 2007; Bauer, 2008; Schmidt, 2007; GALK 2013)

## 7.5 Reduktion von Stress für Bäume und Sträucher

Selbstredend muss jeglicher Stress für Bäume im Siedlungsmilieu so weit wie möglich vermieden oder mindestens reduziert werden. Dazu gehören beispielsweise:

- regelmässige Düngung mit einem harmonisch zusammengesetzten Volldünger, welcher organische Komponenten enthält
- Einbau von Bewässerungs- und Belüftungssystemen
- periodische gründliche Wässerung mit Schlauch oder besser über einen in die Baumscheibe eingebrachten Bewässerungskanal
- regelmässiges Lockern der Baumscheiben und Einarbeiten von Humus zur Förderung der Durchlüftung und Belebung der Bodenmikroorganismen
- nach Abgängen und bei Neubepflanzungen: Ersatz von ungeeignetem Substrat durch humus- und nährstoffreiche „Erde“
- Verhinderung und Beseitigung von Bodenverdichtungen
- grosszügige Bemessung der Baumscheiben und Baumstreifen
- Schliessung der Pflanzräume durch Unterwuchs

### Düngung

Anhand zahlreicher Boden- und Blattanalysen konnte festgestellt werden, dass den Strassenbäumen zu wenig  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $P_2O_5$ ,  $NO_3$ , B und Mn zur Verfügung steht. Da-

gegen werden sie mit CaO und NaCl überreichlich versorgt. Eine nicht ausreichend und nicht ausgeglichen gedüngte Pflanze wird aber überempfindlich gegenüber physiologischen Krankheiten. (Ruge, 1972)

Es ist dafür zu sorgen, dass die Strassenbäume ausreichend mit Nährstoffen versorgt sind. Vorgängig einer Düngung sollen Boden- und Blattanalysen durchgeführt werden. Es kann keine allgemeine Regel für die Düngung aufgestellt werden. Nach dem Stand des damaligen Wissens (Ruge, 1972) wird vorgeschlagen:

- zur Förderung des Wurzelwachstums sowie zur Steigerung der Dürre-resistenz eine reichliche  $K_2O$ - und  $P_2O_5$ -Düngung
- wenig N, um das vegetative Wachstum der Bäume nicht zu stark zu fördern und damit ihre physiologische Resistenz zu vermindern. Das N:P:K:Mg-Verhältnis soll zwischen 6:10:18:2 und 10:15:20:2 liegen. Hinzu kommen die Spurenelemente B und Mn.
- Der Dünger soll nicht zu stark wasserlöslich sein, um über eine längere Zeit zur Wirkung zu kommen (slow release).
- Der Dünger muss frei von Cl- und physiologisch sauer sein und darf den N nicht als  $NH_4$  oder als Harnstoff enthalten.

Die Düngung wird sich erst im 2. oder 3. Jahr bemerkbar machen und ist alle 3 – 4 Jahre zu wiederholen.

Es wird empfohlen, weitere Versuche mit Vergleichsvarianten durchzuführen und diese gut zu dokumentieren.

Im Rahmen einer Ökobilanz vergleicht die Stadt Basel die Gesamtkosten für Pflanzung und durchschnittlichen jährlichen Pflegeaufwand von Stadtbäumen an unbelasteten und belasteten Standorten. Die durchschnittliche Lebenserwartung wird für den unbelasteten Standort mit 100 und für den belasteten Standort mit 60 Jahren veranschlagt. Unter Berücksichtigung des grösseren Pflegeaufwandes im höheren Alter (v.a. Baumschnitt, Gefahrenbeseitigung) gelangt sie zu jährlichen Gesamtkosten in etwa derselben Grössenordnung. (Stadt Basel, 2013) Dies mag erstaunen im Hinblick auf die Bedeutung der Stadtbäume und die Kosten für die öffentliche Hand.

In diesen Berechnungen nicht berücksichtigt sind jedoch der Verlust der ökologischen Leistungen kränkelder und kranker Bäume, ebenso der Verlust an ideellen, kulturellen, städtebaulichen, siedlungsplanerischen Werten etc.

Allein zur Kompensation des ökologischen Verlusts müssten neben den streusalzgeschädigten Bäumen hunderte zusätzliche Bäume gepflanzt und gepflegt werden. Dies würde zu erheblichen Mehrkosten führen.

## 7.6 Möglichkeiten im Zusammenhang mit Streusalz

Die Vorschläge sind nicht abschliessend und nicht generell anwendbar. Es ist stets abzuwägen zwischen Machbarkeit und Verhältnismässigkeit. Zu berücksichtigen sind ausserdem bereits getroffene Massnahmen und die damit gemachten Erfahrungen. Es wird empfohlen, darüber genau Buch zu führen und eine **Erfolgskontrolle** aufzubauen.

- intensivierte mechanische Schneeräumung anstelle von Streusalz (und Splitt)
- Einsatz von Mischsalz nur im Feuchtsalz- und im Soleverfahren
- Verwendung von Harnstoff nur als Kompromiss, z.B. beim Ökotau-Verfahren, unter Beachtung der Vorschriften in der ChemRRV (Bewilligungspflicht) und unter Berücksichtigung der geringen Tauwirksamkeit von Harnstoff (vgl. Kap. 6.4.4)
- Austausch von verschmutztem Bodensubstrat bei Ersatz- und Neupflanzungen
- Pflanzung von salz- und trockenheitstoleranten Baum- und Straucharten
- ausreichender Pflanzabstand vom Strassenrand
- Sicherung einer ausreichenden Wasserversorgung
- Abwaschen und Auswaschen von Salz, das auf der Pflanzenoberfläche haftet, mit Wasser
- überlegtes Auswaschen von Salz, das sich in der Bodenlösung befindet (Risiko der Bodenverschlammung und des Auswaschens von Nährionen)
- Austauschen von Salz im Boden durch Verabreichen von Nährlösung (Ionentauscher), anschliessend Ausschwemmung des Salzes mit Wasser, dann Nachdüngung

In der Landwirtschaft werden versalzte Böden melioriert, indem zuerst Na-armes, aber relativ salzreiches Wasser zugeführt wird, um zuerst die Flockung und Wasserdurchlässigkeit des Bodens zu verbessern. Bei der nachfolgenden Zufuhr von salzarmem Wasser wird durch den Verdünnungseffekt das sorbierte Na durch zweiwertige Kationen verdrängt. Dieses Verfahren ist für Böden mit einer höheren Wasserleitfähigkeit bei Beginn der Bewässerung geeignet, z.B. für Salznatriumböden. (Scheffer, 1984)

Für die Sanierung bereits geschädigter Omorika-Fichten haben sich in Versuchen hohe Gaben von Magnesiumsulfat ( $\text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , Bittersalz) bewährt. (Kloke, 1978, in Butin, 1989)

Im Rahmen eines Versuches, bei welchem dem Boden neben NaCl eine Nährsalzlösung im Verhältnis  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 : \text{KNO}_3 : \text{MgSO}_4 : \text{KH}_2\text{PO}_4 = 10 : 5 : 2 : 1$  appliziert wurde, konnten bei Eschen ein ausgeglichenes Wasserpotential in den Blättern und eine ausgeglichene Transpiration erzielt werden. (Leonardi/Flückiger, 1985)

Ein anderer Versuch mit einem Ionentauscher im Raum Basel brachte keine eindeutigen Ergebnisse. Weil der Ionentauscher zu rasch durch die Grobporen des Bodens durchgeflossen ist, waren die Messungen der Austauschwirkung nicht befriedigend. (Braun, 2007)

### **Der Erfolgskontrolle der Massnahmen im Sektor Gartenbau wird ein erhöhter Stellenwert beigemessen.**

Langfristige Beobachtungen und Beurteilungen von ausgewählten Bäumen hinsichtlich Habitus, Wachstum und Gesundheitszustand (Baumbonitierungen) sind geeignet, Veränderungen wahrzunehmen, für die Dynamik zu sensibilisieren und auf Signale hinzuweisen (Sonderegger et al., 2008)

## Verwendete Literatur

*Abdelly, C.; Öztürk, M.; Ashraf, M.; Grignon, C.* (2008) **Biosaline Agriculture and High Salinity Tolerance**. Basel: Birkhäuser Verlag, 310 S.

*Aberle, W.* (2010) **Nachwachsendes Streugut**. DEGA-Praxisratgeber Winterdienst 2010/2011. Stuttgart: Ulmer. 10-12

*Accola, Th.* (1984) **Was die Schwarzräumung den Wald kostet**. Bündner Zeitung, 19.12.1984

*admin* (2012) **Ein Gespür für Schnee**. [www.eradhafen.de/2012/01/ein-gespur-fur-schnee/](http://www.eradhafen.de/2012/01/ein-gespur-fur-schnee/)

*Aellen, Y.* (2012) **Winterdienst aus Sicht der Stadtgärtnereien. Ein Zielkonflikt zwischen vitalen grünen Bäumen und sicheren schwarzen Strassen**. Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 10.05.2012

*Albert, R.; Falter, J.* (1978) **Stoffwechselphysiologische Untersuchungen an Blättern streusalzgeschädigter Linden in Wien**. I.Salzgehalt und Ionenbilanz. Phytion (Austria), Bd. 18, Heft 3-4, 173-197. Horn: Verlag Berger+Söhne

*Altermatt, E.; Hofer, R.* (2012) **NSNW – ein Kind des NFA. Kosten für den Steuerzahler reduziert und Gewinn für Firma erwirtschaftet**. Strasse und Verkehr 9/2012. 15-18

*Ammann, H.* (2012) **Weissgeräumte Strassen fordern besondere Umsicht**. Winterdienst. Schweizer Gemeinde 11/2012. 44-45

*Amt für Umweltschutz Stuttgart* (2004) **Schnee und Eis. Streusalz. Umwelt-Tipp. Die Umweltberatung**. Amt für Umweltschutz Landeshauptstadt Stuttgart. 2 S.

*Anonymus* (1982) **Waldschäden durch Luftverunreinigung**. Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 273. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag. 75 S.

*Anonymus* (1983) **Forschungsreport über Umweltschutz in Baden-Württemberg**. Allg. Forstzeitung 51/52, S.1380

*Anonymus* (1989) **Zum Winterdienst auf unseren Strassen: Weshalb weniger Salz?** Natur und Mensch 6/1989. Aus Traktandum-Magazin, Information über kommunale Politik, 4/1989

*Aregger, H.* (2011) **Salzbeschaffung im europäischen Markt: Erfahrungen aus Sicht eines Logistikunternehmens**. Vortrag am 1.Nationalen Winterdienstkongress Bern, 12.05.2011

*Arnet, H.* (2010) **Mehr Salz als Schnee auf Zürichs Strassen**. Tages-Anzeiger, 13.01.2010

*ATR-FG-VSS* (1974) **Einwirkung der Auftaumittel auf Gehölze**. Technische Dreiländerkommissionen ATR-FG-VSS. Schriftenreihe der Forschungsgesellschaft für Strassenwesen e.V., Köln (FG), Heft 8/1974. Aus: strasse und verkehr 9, 12.09.1974 und 10, 10.10.1974

*Badelt, H.* (2012) **Ein neues Modell für einen Winterindex zur Abschätzung und Bewertung des Salzverbrauchs.** Strassenverkehrstechnik 2/2012. 105-110

*Balder, H.* (2007) **Biotische und abiotische Schäden an Bäumen in der Stadt bei Klimaerwärmung.** In: Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage Dresden/Tharandt 15./16.03.2007. 29-41

*Balder, H.* (2012) **Wirkungen von Auftausalz (NaCl) auf die urbane Vegetation und Folgerungen.** Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 10.05.2012

*Barandun, V.* (1985) **Ökotau – Alternative zum Salz.** Bündner Zeitung, 20.03.1985

*Bauer, J.* (2007) **Überarbeitung der GALK-Strassenbaumliste – neue Baumarten.** In: Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage Dresden/Tharandt 15./16.03.2007. 67-79

*Bauer, J.* (2008) **Der Arbeitskreis Stadtbäume stellt sich vor.** Stadt + Grün 10/2008, 8-10

*Bauverwaltung Kreuzlingen* (2010) **Merkblatt Baumschutz.** Bauverwaltung Kreuzlingen, Umweltbeauftragter, 2 S.

*Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft* (1999) **Salzstreuung – Auswirkungen auf die Gewässer.** Merkblatt Nr. 3.2/1, München.

*Bayrhuber, H.; Kull, U.* (Hrsg.) (1998) **Linder Biologie.** Lehrbuch für die Oberstufe. 21. Aufl. Schroedel Verlag. 480 S.

*Bergmann, M.; Soldan, St.* (2008) **Krankheiten und Schädlinge an Bäumen.** Stadt + Grün 10/2008, 20-26

*Bergström, A.; Magnusson, R.* (2003) **Potential of transferring car trips to bicycle during winter.** Transportation Research Part A. 649-666

*Besmer, J.* (2012) **Reduzierter Winterdienst. Was ist rechtlich möglich? Wer steht in der Verantwortung? Erfahrungen am Beispiel der Stadt Dübendorf.** Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 10.05.2012

*Bernhofer, C.; Franke, J.; Goldberg, V.; Küchler, W.* (2007) **Stadtklima - Klimaerwärmung: Was ist zu erwarten?** In: Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage Dresden/Tharandt 15./16.03.2007. 10-15

*Blaser, P. et al.* (1997) **Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entferntere Grundwasser.** Forschungsauftrag 18/92 EVED-BAS/VSS

*Blasius, B.J.; Merritt, R.W.* (2002) **Field and laboratory investigations on the effects of road salt (NaCl) on stream macroinvertebrate communities.** Environmental Pollution 120, 219-231

*Blum, W.E.* (1974) **Salzaufnahme durch die Wurzeln und ihre Auswirkungen.** European Journal of Forest Pathology 4/1974, S. 41-44

*Blust, O.* (1998) **Räumkehreinheit für einen verkehrssicheren, ökologischen Winterdienst.** strasse und verkehr 6, Juni 1998

- Bolzern, H.* (1986) **Fahrtwind, Abgase und Streusalz beeinträchtigen die Vegetation entlang der Autobahn. Geplagte Pflanzenwelt am Fahrbahnrand.** Bündner Tagblatt, 29.05.1986
- Bosch, Chr.* (1983) **Die sterbenden Wälder. Fakten, Ursachen, Gegenmassnahmen.** München: Beck. 159 S.
- Boschung, R.* (2011) **Differenziertes Streusalz.** Vortrag am 1. Nationalen Winterdienstkongress Bern, 12.05.2011
- Brandes, C.* (2002). **Streuung der Ergebnisse von Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren. Literatúrauswertung.** TU München, Inst. für Baustoffe und Konstruktion. Projektleitung K.-H. Wiegink. Fraunhofer IRB Verlag. 107 S.
- Braun, S.* (2007) mündliche Mitteilung 16.01.2007
- Breitenstein, J.* (1995) **Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit zur Bewertung des Tausalzverbrauchs.** Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen. Verkehrstechnik Heft V 18
- Brod, H.G.* (1993) **Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt.** Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen - bast. Verkehrstechnik Heft V2
- 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 V21, 60 S.
- Bruderer, W.; Zuber, R.* (1991) **Parkbäume – Schmuckstücke und Raritäten im Churer Stadtbild.** Bündner Wald 5, Oktober 1991, 44.Jhrg., 61-67
- Brunner, M.* (2012) **Winterdienst und Baumschutz: Auswege aus dem Dilemma?** Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 10.05.2012
- Brunner, M.* (2012) **Salzschäden an Gehölzen: Fakten aus Laboranalysen sollen mehr Klarheit bringen.** Strasse und Verkehr 11/2012, 34-35
- Bucher + Cie. AG* (1987) **Alternativen zum Streusalz.** Wasser-Boden-Luft. Umweltschutz 4/1987
- Butin, H.* (1989) **Krankheiten der Wald- und Parkbäume.** Diagnose – Biologie – Bekämpfung. 2. überarb. und erweit. Auflage. Thieme Verlag, 216 S.
- BVD BS* (2009) **Schneefall und Glatteis: Pflichten der Grundeigentümer.** Medienmitteilung des Bau- und Verkehrsdepartementes des Kantons Basel-Stadt, 21.12.2009
- Cantieni, S.* (1998) **Superlösung gibt es nicht.** Das Salzen und Splitten erfolgt je nach Ansprüchen. Bündner Zeitung, 16.12.1998
- Chrétien, R.* (2011) **Winter.** Basler Veloblatt Nr. 175, Januar 2011, S.1

*Chrétien, R.* (2011) **Stadt Basel: Bald besserer Winterdienst für Velos?** Interview mit Alexander Isenburg, Chef der Basler Stadtreinigung. Basler Veloblatt Nr. 179, Dezember 2011, 4-5

*Cekstere, G.; Nikodemus, O.; Osvalde, A.* (2008) **Toxic impact of the de-icing material to street greenery in Riga, Latvia.** Urban Forestry + Urban Greening 7/2008, 207-217

*Chrometzka, P.* (1974) **Salztoleranz, Ursachen und praktische Möglichkeiten zu deren Steigerung.** European Journal of Forest Pathology 4/1974, S. 50-52

*Collins, S.J.; Russell, R.W.* (2009) **Toxicity of road salt to Nova Scotia amphibians.** Environmental Pollution 157, 320-324

CPAG (2013) **Glätteschutzmittel Stop Gliss Bio.** [www.stopglissbio.com](http://www.stopglissbio.com) > deutsch > Überblick

*Crowther, R.A.; Hynes, H.B.N.* (1977) **The effect of road de-icing salt on the drift of stream benthos.** Env. Pollution, 113-126.

*Dauscheck, H.; Bischofsberger, W.* (1986) **Beeinträchtigungen von Grund- und Oberflächenwasser durch Auftausalze in Schutzzonen.** Ber. a. Wassergütewirtschaft u. Gesundheitsingenieurwesen, Inst. f. Bauingenieurwesen TU München, Nr. 30.

*de Jong, P.* (1985) **Schneeräumung: ohne Salz geht es nicht.** Bündner Zeitung, 17.01.1985

*de La Chevallerie, H.* (1985) **Der Winter wird den Bäumen versalzen.** Die Welt, 17.12.1985

*Dettwiler, J.* (1986) **Ausgewählte Probleme in Waldböden.** Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 56. Bundesamt für Umweltschutz (Hrsg.). 100 S.

*Diethelm, A.* (2011) **Der Schnee ist weg – das Salz bleibt.** Neue Zürcher Zeitung, 07.04.2011

*Diethelm, A.* (2012) **Hände weg vom Schnee!** Tages-Anzeiger. Das Magazin, 21.12.2012

*Druelle, J.P.; Vilain, M.* (1973) **Etude des causes de dépérissement de la végétation à proximité immédiate des autoroutes.** Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie d'Agriculture de France 59, 1495-1504.

*Dües, G.* (1987) **Sanierung umweltgeschädigter Strassenbäume und -böden sowie Ermittlung geeigneter Schutzmassnahmen bei Neupflanzungen (mit Erweiterung auf Parkbäume und -böden).** Abschlussbericht über das Forschungsvorhaben. Hamburg, Umweltbehörde

*Dürst, P.* (1998) **Salz- oder Splittstreuung in der Stadt Chur.** Umsetzung von Forschungsergebnissen. strasse und verkehr 6, Juni 1998

*Ellinghaus, D.; Steinbrecher, J.* (2004) **Fahren im Winter. Untersuchung über objektive Risiken und subjektiv empfundene Gefahren.** Bericht im Auftrag der Continental AG, Hannover. 195 S.

*Encke, B.-G.* (1983) **Zwischen Baumsterben und Verkehrssicherheit. Zum Einsatz von Streusalz.** Möglichkeiten der Reduzierung. AFZ 36, 10.09.1983

*Erdmenger, C.; Führ, V.* (2005) **Versteckte Kosten des städtischen Autoverkehrs. Öffentliche Gelder für den privaten Verkehr.** VCD Verkehrsclub Deutschland. 6 S.

*Evers, F.H.* (1974) **Fernwirkung abgeschwemmter Auftausalze im Innern von Waldbeständen.** European Journal of Forest Pathology 4, S. 46-48

*Evers, F.H.* (1981) **Streusalzschäden an Waldbäumen.** Waldschutz-Merkblatt Nr. 3. Hrsg. H.Butin, E.König, P.Schütt. Verlag Paul Parey, Hamburg/Berlin

*Faith-Ell, C.; Balfors, B.; Folkesson, L.* (2006) **The application of environmental requirements in Swedish road maintenance contracts.** Journal of Cleaner Production 14/2006, 163-171

*Fay, L.; Volkening, K.; Gallaway, C.; Shi, X.* (2008) **Performance and Impacts of Current Deicing and Anti-icing Products: User Perspective versus Experimental Data.** 87<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 13-17, 2008. 23 p.

*Flückiger, W.; Flückiger-Keller, H.; Oertli, J.J.; Guggenheim, R.* (1977) **Verschmutzung von Blatt- und Nadeloberflächen im Nahbereich einer Autobahn und deren Einfluss auf den stomatären Diffusionswiderstand.** European Journal of Forest Pathology Bd. 7, Heft 6, S. 358-364

*Flückiger, W.; Flückiger-Keller, H.; Oertli, J.J.* (1978) **Der Einfluss von Strassenstaub auf den stomatären Diffusionswiderstand und die Blatt-Temperatur – ein antagonistischer Effekt.** Staub – Reinhaltung Luft 38, Nr.12, S. 502-505

*Flückiger, W.; Oertli, J.J.; Flückiger, H.* (1979) **Relationship between Stomatal Diffusive Resistance and Various Applied Particle Sizes on Leaf Surfaces.** Zeitschr. Pflanzenphysiol. Bd. 91/1979, S.173-175

*Flückiger, H; Oertli, J.J.; Flückiger, W.* (1979) **Auswirkungen von Streusalz und Trockenheit auf das Wachstum und die Wasserbeziehungen verschiedener Gehölze.** Schweiz. Zeitschr. Forstwes. 4, S. 294-301

*Flückiger, W.* (1982) **Streusalz und die strassennahe Vegetation: Physiologische und ökologische Auswirkungen und mögliche Sanierungsmassnahmen.** Referat an der Streusalztagung der Vereinigten Schweizerischen Rheinsalinen AG, Schweizerhalle. Mskr. 7 S.

*Flückiger, W.* (1983) **Streusalz und die strassennahe Vegetation: Physiologische und ökologische Auswirkungen und mögliche Sanierungsmassnahmen.** Die Stadt/les villes Heft 2, S. 35-40.

*Flückiger, W.; Braun, S.* (2007) **Wirkung von Streusalz auf Forstgehölze.** Zusammenfassung von Untersuchungen aus dem Botanischen Institut der Universität Basel. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie Schönenbuch, 10 S.

*Flückiger, W.; Braun, S.* (2013) **Diverse Untersuchungen an Allee- und Parkbäumen in der Stadt Basel 2012.** Bericht zuhanden der Stadtgärtnerei Basel. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie Schönenbuch, unveröffentlichter Bericht, 16 S.

*Fu, L.; Trudel, M.; Kim, V.* (2009) **Optimizing winter road maintenance operations under real-time information.** European Journal of Operational Research 196, 332-341

*GALK-DST* (1980) **Resolution gegen die Vernichtung des Strassengrüns durch Streusalz.** Ständige Konferenz der Gartenbauamtsleiter beim Deutschen Städtetag. Neue Landschaft, S. 698

*GALK-DST* (1998) **Positionspapier zur Verwendung von Streusalz und seine Wirkung auf die Vegetation.** Stellungnahme des Arbeitskreises "Stadtbäume" der GALK-DST. Stadt und Grün 9/1998, 2 S.

*GALK* (2008) **Grün zur Senkung von Pollenallergien.** Positionspapier der GALK Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz Arbeitskreis Stadtbäume. Stadt + Grün 10/2008, 42-45

*GALK* (2008) **Grün zur Senkung der Feinstaubkonzentration.** Positionspapier der GALK Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz Arbeitskreis Stadtbäume. Stadt+Grün 10/2008, 46-49

*GALK* (2011) **Auswirkung des Einsatzes von Streusalz auf Strassenbäume.** Positionspapier der GALK Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz Arbeitskreis Stadtbäume und der VSSG Vereinigung Schweizerischer Stadtgärtnereien und Gartenbauämter. 8 S.

*GALK* (2012) **Strassenbaumfest II.** GALK, Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz Arbeitskreis Stadtbäume

*GALK* (2013) **Strassenbaumliste.** GALK, Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz Arbeitskreis Stadtbäume

*GALK* (2013) **Schaderreger und Krankheiten an Bäumen.** GALK, Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz Arbeitskreis Stadtbäume

*GALK* (2013) **Schadinsekten an Bäumen.** GALK, Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz Arbeitskreis Stadtbäume

*Gartiser, St.; Reuther, R.; Gensch, C.-O.* (2003) **Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Strassen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024.** Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 200 95 308/04 UBA-FB 000404. 121 S.

*Gattlen, N.* (2012) **Nachhaltige Siedlungen. Schweizer Städte im Wandel.** Magazin Umwelt 4/ 2012, 4-7. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt BAFU

*Gemeinderat Stadt Chur* (1985) **Postulat A.Bianchi** betreffend vermehrten Verzicht auf Salzstreuung auf dem kommunalen Strassennetz

*Gisler, H.* (1998) **Salz sparen mit thermogesteuerten Streuern.** strasse und verkehr 6, Juni 1998

*Giuliani, F.; Merusi, F.; Polacco, G.; Filippi, S.; Paci, M. (2012) Effectiveness of sodium chloride-based anti-icing filler in asphalt mixtures. Construction and Building Materials 30, 174-179*

*Glatzel, G. (1974) Analytische Methoden zum Nachweis der Schädigung von Pflanzen durch Auftausalze. European Journal of Forest Pathology 4/1974, S. 52-53*

*Glatzel, G.; Krapfenbauer, A. (1975) Streusalzschäden am Baumbestand der Strassen in Wien. Institut für forstliche Standortforschung der UNI BOKU Wien*

*Gloor, D.; Conus, S. (2011) Sole gegen Eis und Schnee. Vortrag am 1. Nationalen Winterdienstkongress Bern, 12.05.2011*

*Gluschitsch, G. (2010) Radwege sind keine Schneedepots. Der Standard, 05.12.2010*

*Götzfried, F. (2012) Die Versorgung Europas mit auftauenden Streustoffen. Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 09.05.2012*

*Golwer, A.; Schneider, W. (1979): Belastung des unterirdischen Wassers mit anorganischen Spurenstoffen im Gebiet von Straßen. Gas- und Wasserfach, Ausg. Wasser, Abwasser 120 (10), 461-467.*

*Gregor, H.-D. (-) Baum oder Salz: Baumphysiologische Aspekte des Tausalzeinsatzes – Schadfaktoren für Alleebäume und Möglichkeiten der Schadensbegrenzung –*

*Grosser Rat GR (1985) Postulat Dr.S.Vonmoos betreffend Salzstreuung auf Bündner Strassen. Protokoll des Grossen Rates*

*Grosser Rat GR (1986) Schriftliche Anfrage H.Stoffel betreffend Zusammenhang von Salzen auf der A13 im Rheinwald und den Waldschäden*

*Günter, A.-M. (2009) Holzschnitzel wurden von Hand gestreut. Jungfrau Zeitung, 25.02.2009*

*Guggenheim, R.; Flückiger, W.; Flückiger-Keller, H.; Oertli, J.J. (1979) Verschmutzung von Blatt-Oberflächen im Nahbereich einer Autobahn. Berichte des Umweltbundesamtes*

*Gugger, E. (2012) Geheizte Velowege gegen kalte Winter in den Niederlanden. NZZ am Sonntag, 28.10.2012*

*Guidon, C. (1999) Ökologie und Sparsamkeit sprechen für Salzeinsatz. Bündner Tagblatt, 30.11.1999*

*Guignier, B. (2011) Un parfumeur découvre à Etoy le raisin déneigeur. 24 heures, 30.11.2011*

*Habich, C. (2011) Die Versorgung der Schweiz mit Auftausalz. Vortrag am 1. Nationalen Winterdienstkongress Bern 12.05.2011*

*Hafner, W.* (2012) **EU-projekt CMA + Calcium-Magnesium-Acetat gegen Feinstaub und Eisglätte ?** Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 09.05.2012

*Hanke, H.* (1998-1) **Winterdienst ohne Splitt: Folgerungen für Städte und Gemeinden.** strasse und verkehr 6, Juni 1998

*Hanke, H.* (1998-2) **Vorteile der Feuchtsalz-Streuung.** strasse und verkehr 6, Juni 1998

*Hanke, H.* (2010) **Die Streutechnik der Zukunft. Wirkungsoptimierung und Qualitätssicherung.** Strasse und Verkehr 10/2010, 18-24

*Hanke, H.* (2012) **Ein Quantensprung in der Streutechnik – Neue Empfehlungen für den praktischen Winterdienst.** Strassenverkehrstechnik 1/2012. Special Strassenwinterdienst, 49-53

*Hanke, H.* (2012) **Neue Erkenntnisse und Strategien zum Einsatz von Streustoffen in Deutschland.** Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 09.05.2012, 5 S.

*Hanke, H.* (2012) **Grosser Fortschritt bei der Europäischen Normung im Strassenwinterdienst.** Strassenverkehrstechnik 8/2012. Special Strassenbetriebsdienst, Strassenwinterdienst, 508-514

*Hedinger, H.W.* (1998) **Winterdienst in der Stadt Zürich.** Umsetzung neuer Forschungsergebnisse. strasse und verkehr 6, Juni 1998

*Heuerding, E.* (1999) **Streusalz bleibt umweltbelastend und gefährdet die Bäume.** Auszüge und Kommentare zu den Streusalzberichten der RUS AG (B.Ruess, 1998) und der Link AG (1997), 13.10.1999

*Hochuli, W.* (1998) **Splitt kostet mehr, nützt aber weniger als Salz.** Kommunalmagazin 7-8/1998

*Hock, B.; Elstner, E.* (Hrsg.) (1988) **Schadwirkungen auf Pflanzen.** Lehrbuch der Pflanzentoxikologie. 2., überarbeitete Auflage. Mannheim/Wien/Zürich: BI Wissenschaftsverlag

*Hoffmann, M.; Blab, R.; Nutz, P.* (2011) **Optimierung der Feuchtsalzstreuung.** Forschungsbericht TU Wien, Institut für Verkehrswissenschaften. 117 S.

*Hofreiter, T.; Herzog, R.* (2011) **Salz ist ungesund (Winterdienst).** AKP Fachzeitschrift für Alternative Kommunalpolitik 1/2011, S.23

*Holdenrieder, O.* (2007) **mündliche Mitteilung** 15.01.2007

*Holdenrieder, O.* (2007) **mündliche Mitteilung** 18.01.2007

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

*Hutter, G.* (2011) **Differenzierter Winterdienst.** Vortrag am 1. Nationalen Winterdienstkongress Bern, 12.05.2011

Info CH (2011) **Schnee räumen – Die Alternativen zu Salz.** Info CH. Das Online Lexikon [www.conviva-plus.ch/index.php?page=185](http://www.conviva-plus.ch/index.php?page=185)

Jaccard, A. (2011) **Zunehmende Herausforderungen für eine sichere Mobilität im Winter.** Vortrag am 1. Nationalen Winterdienstkongress Bern, 12.05.2011

Jeanneret, D. (2009) **Streusalz vergiftet Strassenbäume.** Medienmitteilung der VSSG Vereinigung Schweizerischer Stadtgärtnereien und Gartenbauämter, 23.12.2009

Jeanneret, D. (2010) **Streusalz vergiftet Strassenbäume.** Der Gartenbau 1/2010, S. 4

Jeanneret, D. (2013) **persönliche Mitteilung.** Email vom 17.06.2013

Jecklin, P. (1998) **Sicherer und wirtschaftlicher: Salz schneidet besser ab als Splitt.** Kommunalmagazin 7-8/1998

Jonas (2012) **Winterdienst für Fahrradwege.** [www.beweg-die-stadt.de/idee/5979-winterdienst-fuer-fahrradwege](http://www.beweg-die-stadt.de/idee/5979-winterdienst-fuer-fahrradwege)

Joos Reimer, K. (2005) **Die Wirkungsweise winterlichen Auftausalzes auf die Strassenbäume.** Zusammenstellung zhd. Gartenbauamt der Stadt Chur, 22.09.2005

Jost, A. (2008) **Kulturobjekt Stadtbäume.** Kult Chur Nr. 11, Herbst 2008, S.7

Jungclaus, G. (1984) **Erfassung der von Blei, Cadmium und Streusalz ausgehenden Vegetationsbelastung aus ausgewählten Verkehrswegen von Kiel.** Diss. Univ. Kiel. 163 S.

Kainz, M.; Peintner, A.; Stark, S. (2010) **Heisses Thema Eis und Schnee. Wie Sie Strassen und Gehsteige im Winter benutzbar und sicher halten, ohne die Umwelt unnötig zu belasten.** Die Umweltberatung in Österreich. [www.umweltberatung.at](http://www.umweltberatung.at)

Kern, G. (1980) **Tausalzschäden an Strassenbäumen.** Neue Landschaft, 717-719

Kietzmann, M. (1986) **Stellungnahme hinsichtlich einer potentiellen Gefährdung von Tieren durch das salzfreie Winterstreumittel Öko-Tau.** Institut für Pharmakologie, Toxikologie und Pharmazie. Tierärztliche Hochschule Hannover. 8 S.

Klaffke, K. (1980) **Winterschäden an Strassenbäumen und Verkehrsgrünflächen. Befragung der Gartenämter – Überarbeiteter Bericht zur 22. Arbeitstagung der GALK-DST.** Neue Landschaft, 699-700

Klaffke, K. (1981) **Auswirkungen des Streusalzes (NaCl) auf die Pflanzen.** Das Gartennamnt 30, 805-809

Klötzli, F. (1993) **Ökosysteme.** Aufbau, Funktionen, Störungen. 3. Aufl. Stuttgart/Jena: Fischer. 447 S.

Koller, U. (Red.) (2007) **Feinstaubquelle Streusalz? – Pro und Contra im Einsatz gegen Schnee und Glatteis.** Hintergrundinformation. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit. 5 S.

Kreutzer, K. (1974) **Bodenkundliche Aspekte der Streusalzanwendung**. European Journal of Forest Pathology 4/1974, S. 39-41

Lenz, U.; Bärschneider, H. (2010) **Über die voraussichtliche Tausalzbelastung der Ohre durch Versickerung/Ableitung von Strassenabwässern im Zusammenhang mit dem Lückenschluss der BAB 14**. Gutachten Büro für Hydrologie und Bodenkunde Gert Hammer, im Auftrag der DEGES, Deutsche Einheit Fernstrassenplanungs- und -bau GmbH Berlin. 46 S.

Leonardi, S.; Flückiger, W. (1985) **Water relations of differentially salinized ash-tree in view of the effect of a protective nutrient solution**. Plant and Soil 85, S. 299-304

Leonardi, S.; Flückiger, W. (1986) **The influence of NaCl on leaf water relations and the proportions of K, Na, Ca, Mg and Cl in epidermal cells of *Fraxinus excelsior* L.** Tree Physiology 2, p. 115-121

Leuzinger, S.; Vogt, R.; Körner, C. (2009) **Tree surface temperature in an urban environment**. Agricultural and Forest Meteorology, 23.09.2009

Lichtenthaler, H.K.; Buschmann, C. (1984) **Das Waldsterben aus botanischer Sicht**. Karlsruhe: Braun, 88 S.

Link AG (1997) **Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entfernte Grundwasser**. Link AG, Ebnat-Kappel, 1997

Litman, T. (2012) **Evaluating Non-Motorized Transportation Benefits and Costs**. Victoria Transport Policy Institute. [www.vtppi.org/nmt-tdm](http://www.vtppi.org/nmt-tdm). 80 S.

Löbel, St. (2011) **Die Strassenbaumartenverwendung in Dresden – Rück- und Ausblick**. In: Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage Dresden/Tharandt 10./11.03.2011. 112-131

Love, V. (2012) **Selbst ist der Schneepflug**. Velojournal 1/2012, S.55

Macdonald, B. (2007) **Valuing the benefits of cycling. A report to Cycling England**. [www.sqw.co.uk](http://www.sqw.co.uk) 85 S.

Marusczyk, I. (2007) **Kalk und ein Schuss Essig. Neue Spezialmischung bindet Feinstaub – eine ökologische Alternative zu Streusalz**. SonntagsZeitung, 28.01.2007

Meyer, F.H.; Höster, H.R. (1980) **Streusalzschäden an Bäumen in Hannover als Folge des Winters 1978/79**. Das Gartenamt 29, 165-175

Meyer-Spasche, H. (1981) **Absenkung der Streusalzkonzentration im Boden durch Ionenaustausch**. Das Gartenamt 30, 810-814

Miglbauer, E.; Pfaffenbichler, P.C.; Feilmayr, W. (2009) **Kurzstudie Wirtschaftsfaktor Radfahren. Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen des Radverkehrs in Österreich**. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Umwelt, Wien. 16 S.

*Morandi, D.* (1984) **Auch in Graubünden bröckelt der Beton von den Kunstbauten im Strassennetz. Bausünden oder ganz einfach "nagender Zahn der Zeit"?** Bündner Zeitung, Magazin-Thema, 11.02.1984

*Morard, D.* (2011) **Le traitement hivernal selon l'altitude, quelle solution à favoriser? Expérience de la Commune de Bagnes / VS.** Vortrag am 1.Nationalen Winterdienstkongress Bern, 12.05.2011

*Mühle, H.* (1987) **Wintersalz lässt Föhren "rosten".** Massive Schäden an Nadelbäumen entlang den Autobahnen. Tages-Anzeiger, 21.05.1987

*Mühleberger de Preux, C.* (2012) **Wärmeinseln. Die aufgeheizte Stadt.** Magazin Umwelt 4/2012. Hrsg. Bundesamt für Umwelt BAFU. 26-27

*Müller, E.* (1986) **Vorschriften in der Stoffverordnung: Anwendung der chemischen Auftaumittel.** Referat an der Tagung Winterdienst FES/ORED vom 25.11.1986. Kommunal Magazin 1986, S. 12-13

*Muster, F.* (2012) **Streusalz greift Strassen und Bäume an.** bz Region Basel-Stadt, Basel-land, Schwarzbubenland, 16.02.2012

*Natur und Umwelt (-)* **Winterdienst und Streumittleinsatz.** Informationsblatt Natur und Umwelt Luxemburg. [www.naturemwelt.lu](http://www.naturemwelt.lu) 5 S.

*Neuhold, J.* (2012) **Situation und Trends im Winterdienst in Österreich.** Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 09.05.2012

*Niebrügge, L.* (2012) **Praktische Erfahrungen mit der Ausbringung von Tausalzlösungen.** Strassenverkehrstechnik 5/2012, 288-296

*Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft* (1985) **Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen: Belastung der niedersächsischen Oberflächengewässer durch Chlorid.** – Niedersächsischer Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Gewässerüberwachungssystem Niedersachsen.

*Öberg, G.; Arvidsson, A.K.* (2012) **Injured pedestrians – the cost of pedestrian injuries compared to winter maintenance costs.** Report 735, VTI Linköping. [www.vti.se](http://www.vti.se) (schwedisch, englische Zusammenfassung)

*ökotau* (1987) **Ökotau – salzfreie Winterstreumittel. Dokumentation, Pressemeldungen, Prüfnachweise.** ÖKOTAU GmbH Eschborn

*Parton, E.* (2011) **Erste Hilfe für schwer kranke Bäume.** Neue Osnabrücker Zeitung, 18.08.2011

*Passarge, J.* (1987) **Reduzierung der Schwarzräumung in Chur: Noch 25 Prozent Salz in der (Schnee-) Suppe.** Bündner Zeitung, 09.12.1987

*(pd)* (1987) **Feuchtsalzstreuung: Noch sind nicht alle Fragen gelöst.** Bündner Zeitung, 06.01.1987

*pd/km* (2009) **Kranke Bäume Quelle für Treibhausgase.** Tec 21, Nr. 11/2009

- Pfeiffer, E.-M. (1985) **Veränderungen der Ionengehalte streusalzgeschädigter Strassenbäume durch Bodensanierung im Hamburger Stadtgebiet**. Hamburg, Verein zur Förderung der Bodenkunde in Hamburg
- Poldervaart, P. (2011). **Sole statt Salz macht Schule**. Winterdienst. Schweizer Gemeinde 11/2010, 32-33
- Poldervaart, P. (2011). **Eine gute Vorbereitung hilft, den Ernstfall zu bewältigen**. Winterdienst. Schweizer Gemeinde 6/2011, 45-47
- Poldervaart, P. (2012) **Bei konsequent weniger Salz profitiert das Stadtgrün**. Winterdienst. Schweizer Gemeinde 6/2012, 31-33
- Portmann, L. (2013) **Auch auf wintersicheren Verbindungen bleibt immer ein Restrisiko für den Strassenbenutzer**. Interview mit Reto Knuchel, Chef Strassenerhaltung und Bezirke des Tiefbauamtes Graubünden. Bündner Woche 3, 06.02.2013, 2-3
- Porwollik, J. (2012) **Erfahrungen mit einem eingeschränkten Not-Winterdienst bei einer Landesstrassenbauverwaltung**. Strassenverkehrstechnik 8/2012, 489-492
- Pruckner, O.: (2010) **Radpolitik in Wien: Hupfts in Gatsch?** Der Standard.at>Meinung>Kommentare der anderen, 26.12.2010
- Rahbar, Y. (1998) **Modellierung der Grundwasserversalzung in der Werratalaue bei Eschwege (Nordhessen)**. Berlin
- Reeb, H.P. (2012) **IT-Lösungen im Winterdienst: heute möglich – morgen nötig?** Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 10.05.2012
- Remmlinger, W. (1984): **Auswirkungen von Tausalzen auf die Vegetation von Strassen**. Neue Landschaft 29, 1, 41-49
- Richter, G. (1969) **Stoffwechselphysiologie der Pflanzen**. Eine Einführung. Stuttgart: Thieme. 437 S.
- Richter, T. (-) **Rund 500 Bäume müssen gefällt werden**. Kölner Stadt-Anzeiger
- Robin Wood (2010) **Kein Salz auf die Alleen!** Robin Wood Info, 2. Aufl.
- Rockenbach, M. (2010) **Die Salzlager sind bald leer**. Basler Zeitung, 28.01.2010
- Röhling, W. (2008) **Kosten-Nutzen-Analyse: Bewertung der Effizienz von Radverkehrsmassnahmen. Schlussbericht**. TCI Röhling Transport Consulting International, Denzlingen. 61 S. + Anhänge (89 S.)
- Röhling, W. (2008) **Kosten-Nutzen-Analyse: Bewertung der Effizienz von Radverkehrsmassnahmen. Leitfaden**. TCI Röhling Transport Consulting International, Denzlingen. 35 S.
- Rösli, A. (1977) **Versuche mit Tausalz : Temperaturmessungen in Strassenbelägen 1975/76 und 1976/77 : Temperaturverlauf während der normalen Tausalzstreuung auf**

**in den Strassenbelag eingebaute Probekörper aus Zementbeton und Asphaltbeton.**  
Tiefbauamt Zürich

*Rösti, M.* (2011) **Melasse als Zusatz zu Salz. Erfahrungen im Winterdienst auf Nationalstrassen, Autobahnwerkhof Spiez, 2007-2010.** Vortrag am 1. Nationalen Winterdienstkongress Bern, 12.05.2011

*Rösti, M.* (2010) **Glättebekämpfung mit Safecote im Winterdienst auf Nationalstrassen. Pilotversuch 2008-2010 im Einsatzgebiet des Autobahnwerkhofes Spiez.** Tiefbauamt des Kantons Bern. 15 S.

*Roloff, A.* (2004) **Bäume: Phänomene der Anpassung und Optimierung.** Landsberg am Lech, Ecomed

*Roloff, A.* (Hrsg.) (2007). **Urbane Gehölzverwendung im Klimawandel und aktuelle Fragen der Baumpflege:** Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage Dresden/Tharandt 15./16.03.2007

*Roloff, A.; Rust, S.* (2007) **Reaktionen von Bäumen auf die Klimaänderung und Konsequenzen für die Verwendung.** In: Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage Dresden/Tharandt 15./16.03.2007. 16-28

*Roloff, A.* (Hrsg.) (2008) **Aktuelle Fragen der Baumpflege und Stadtböden als Substrat für ein Baumleben.** Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage / Forstwissenschaftliche Kolloquien Tharandt und Dresden 12./13.3.2008

*Roloff, A.* (Hrsg.) (2010) **Aktuelle Fragen der Baumpflege und Bedeutung, Schutz und Risiken von Stadtbäumen.** Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage Dresden/Tharandt 11./12.03.2010

*Roloff, A.* (2010) **Urbane Baumartenwahl im Klimawandel.** 17.Kasseler Gartenbautage **07.01.2010. 16 S.**

*Roloff, A.; Thiel, D.; Weiss, H.* (Hrsg.) (2011) **Aktuelle Fragen der Baumpflege, Baumverwendung und Jungbaumpflege.** Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage Dresden/Tharandt 10./11.03.2011

*Roloff, A.; Bonn, S.; Gillner, S.* (-) **Klimawandel und Baumartenwahl in der Stadt - Entscheidungsfindung mit der Klima-Arten-Matrix (KLAM).** Inst. f. Forstbotanik u. Forstzoologie TU Dresden, Tharandt. 9 S.

*Rose, D.; Webber, J.* (2011) **De-icing salt damage to trees.** Pathology Advisory Note 11. Forest Research, 8 p.

*Rotat, M.* (2012) **Expériences en France – l'exemple de la ville de Chambéry.** Vortrag am 2. Nationalen Winterdienstkongress Basel, 09.05.2012

*Ruess, B.* (1998-1) **Salz- oder Splittstreuung im Winterdienst.** Optimierung der Kosten/Nutzen-Verhältnisse unter Berücksichtigung von umwelt- und sicherheitsrelevanten Faktoren. Forschungsauftrag 4/95 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

Ruess, B. (1998-2) **Salz- und Splittstreuung im Winterdienst. Neue Forschungsergebnisse.** strasse und verkehr 6, Juni 1998

Ruge, U. (1972) **Ursache des Strassenbaumsterbens und mögliche Gegenmassnahmen.** Garten und Landschaft 82, Heft 10, S. 456-458

Ruge, U. (1974) **Ursachen der Schädigung des Strassenbegleitgrüns in Städten und an Autobahnen.** European Journal of Forest Pathology 4/1974, S. 48-50

Scheffer, F. (1984) **Lehrbuch der Bodenkunde. Scheffer / Schachtschabel.** 11. Aufl. Stuttgart: Enke. 442 S.

Schiechtl, H.M. (1983) **Gehölze an Autobahnen. Welche sind auf Dauer salzresistent?** Garten und Landschaft 93, Heft 11, S. 876-882

Schmich, S. (2008) **Einsatz von Streusalz im Winterdienst.** Naturtipps – Naturschutz und Artenschutz in der Praxis. UMG Umweltbüro Grabher Bregenz. [www.naturtipps.com](http://www.naturtipps.com) 2 S.

Schmidt, P.A. (2007) **Verwendung einheimischer Gehölze im urbanen Raum.** In: Tagungsband Dresdner Stadtbaumtage Dresden/Tharandt 15./16.03.2007. 42-57

Schrage, C. (1983) **Bäume in der Stadt. Worunter leidet das städtische Grün?** In: Das Waldsterben. Ursachen – Folgen – Gegenmassnahmen. Arbeitskreis Chemische Industrie, Köln/Katalyse-Umweltgruppe Köln e.V. (Hrsg.). Köln: Kölner VolksBlatt, 366 S.

Schulze, E.-D. (2002) **Pflanzenökologie.** Ernst-Detlef Schulze; Erwin Beck; Klaus Müller-Hohenstein. Heidelberg/Berlin: Spektrum Akademischer Verlag

Schweizer Rheinsalinen (2012) **Optimale Salz-Lagerung in den Gemeinden. Merkblatt zum Winterdienst.** Schweizer Rheinsalinen Pratteln, 4 S.

Schwendener, P. (2009) **Winterdienst auf dem Holzweg.** Der Bund, 18.02.2009

sda/km (2009) **Stadtbaum: Künftig Föhre statt Linde?** Tec21 49-50/2009, Magazin, S.18

Shortle, W.C.; Rich, A.E. (1970) **Relative sodium chloride tolerance of common roadside trees in southeastern New Hampshire.**

Sonderegger, M.; Braun, S.; Thomas, V.; Flückiger, W. (2008). **Das Leben und Überleben von Bäumen. Baumbonitierungen in der Stadt Basel.** Stadt + Grün 10/2008, 62-64

St. (1989) **Der Winterdienst auf Kantons- und Nationalstrassen.** Wasser-Boden-Luft. Umweltschutz 8/1989

Stadtgärtnerei Basel (2010) **Bäumige Stadt Basel.** Bau- und Verkehrsdepartement des Kantons Basel-Stadt, Stadtgärtnerei. 44 S.

Stadt Basel (2013) **Nachhaltiger Winterdienst.** Schlussbericht. Mobilität, Stadtgärtnerei, Tiefbauamt der Stadt Basel. 26 S. (unveröffentlichter Vorabzug)

*Stadtrat Luzern* (2009) **Stellungnahme zum Postulat K.Bärtsch betreffend Rutschfest mit Stop Gliss Bio**, 4 S.

*Sutter, D.* (2011) **Zürich soll neue Methode für Schneeräumung testen**. 20 Minuten, 01.12.2011

*suva pro* (2012) **Ohne Sturzunfälle durch den Winter. Tipps für Hausdienst-Verantwortliche**. SUVA-Merkblatt, 2.Auflage, 8 S.

*Swisscom* (2012) **Déneigement: l'arrivée d'un produit miracle**

*Tambour, A.; Nischer, P.* (1989) **Richtlinie Frost- Tausalz-beständiger Beton**. Österreichischer Betonverein

*Technische Dreiländerkommission* (1974): **Einwirkung der Auftaumittel auf Gehölze**. ATR-FG-VSS. Straße und Verkehr 60, 9 u. 10, S. 439-449 u. S. 485-497

*Thiemann-Linden, J.; Mettenberger, T.* (2011) **Ökonomische Effekte des Radverkehrs**. Forschung Radverkehr international. Deutsches Institut für Urbanistik Difu gGmbH Berlin. 4 S.

*Thompson, J.R.; Mueller, P.W.; Flückiger, W.; Rutter, A.J.* (1984) **The Effect of Dust on Photosynthesis and its Significance for Roadside Plants**. Environmental Pollution (Series A), 34, S.171-190

*TRB* (-). **Road Salt Impacts on the Environment**. TRB Transportation Research Board, Washington, D.C. [www.onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/.../069-082](http://www.onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/.../069-082)

*Tremp, R.* (2005) **Salz auf Churer Strassen**. Antwortschreiben des Vorstehers des Departementes 3 auf die Anfrage von R.Walder, 23.12.2005

*Turtschy, J.-C.; Mucaria, J.* (2009) **Stop Gliss Bio: Ökologische Neuheit für den Winterdienst**. Tiefbauamt La Chaux-de-Fonds. 4 S.

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

*VERAS* (1987) **Brückenschäden: Folgen einer verfehlten Billigstofferten-Politik**. Schweizer Ingenieur und Architekt 46/1987

*Verein Deutsche Salzindustrie* (2003) **Winterdienst. Verkehrssicherheit und Umweltschutz**. 2. überarbeitete Auflage, 2003, 72 S.

*Viskari, E. L. ; Kärenlampi, L.* (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.

*Vögeli, F.* (2011) **Normen im Winterdienst – was müssen Gemeinden wissen?** Vortrag am 1. Nationalen Winterdienstkongress Bern, 12.05.2011

von Sury, R.; Flückiger, W. (1983) **The effect of different mixtures of NaCl and CaCl<sub>2</sub> on the silver fir (Abies alba Miller)**. European Journal of Forest Pathology 13/1983, Heft 1, S. 24-30

Waldmeier, J. (2009) **Wann haftet die Gemeinde bei Schnee und Eis?** Schweizer Gemeinde 7/2009, 20-21

Waldmeier, J. (2011) **Winterdienst im Strassenunterhalt – haftpflichtrechtliche Erkenntnisse aus der Rechtsprechung**. Vortrag am 1. Nationalen Winterdienstkongress Bern, 12.05.2011

Walthert, L.; Zimmermann, S.; Blaser, P.; Luster, J.; Lüscher, P. (2004) **Waldböden der Schweiz**. Band 1. Grundlagen und Region Jura. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. Bern: Hep. 768 S.

Wat. (1987) **Ein wesentlicher Beitrag zum Umweltschutz. Es muss nicht immer Streusalz sein**. Bündner Zeitung, 19.11.1987

wbt. 2008. **Wädenswiler Kettensägen-Aktion kostet 5 Millionen Franken**. Neue Zürcher Zeitung, 24.01.2008

Wentzel, K.F. (1974) **Salz-Spritzwasserschäden von den Autobahnen in die Tiefe der Waldbestände**. European Journal of Forest Pathology 4, S. 45-46

Wilde Frauen (1987) **Winter-Initiative** Stadt Chur. Bündner Zeitung, 21.01.1987; Bündner Tagblatt, 21.01.1987; Bündner Tagblatt, 24.11.1987; Bündner Woche, 02.12.1987

Wohlens, A. (2005) **"Neuartige" Schäden an Stadtbäumen. Schäden durch Auftausalze und Rindennekrosen bzw. Sonnennekrosen**. Der Gartenbau 51-52, S. 6-7

Wolf, Chr.; Giuliani, G. et al. (2009) **Auftaumittel im Porengrundwasser – Ermittlung von Auftafrachten und Evaluierung bestehender Rechenansätze im Nahbereich übergeordneter Strassennetze am Beispiel des Grundwasserfeldes im Abstrom der A3 bei Guntramsdorf**. Endbericht Geologie und Grundwasser GmbH – Ingenieurbüro für Technische Geologie. Fachstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie bmvit, Wien. 74 S.

Wresowar, M.; Sieghart, M. (2000) **Studie über die Auswirkung stickstoffhaltiger Auftaumittel. Auswirkungen auf Boden und Bewuchs. Vergleich mit herkömmlichen Auftaumitteln**. UNI BOKU Wien, Waldökologie. 101 S.  
[www.wien.gv.at/umweltschutz/pool/pdf/auftau.pdf](http://www.wien.gv.at/umweltschutz/pool/pdf/auftau.pdf)

Chur, 11.November 2013

Dr. Rudolf Zuber  
dipl. Forsting. ETH/SIA