



Ermittlung von Grundlagen und Bewertungsmethoden einer Ökobilanz des Straßenwinterdienstes

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Verkehrstechnik Heft V 403

Ermittlung von Grundlagen und Bewertungsmethoden einer Ökobilanz des Straßenwinterdienstes

von

Dietlinde Quack, Ran Liu
Öko-Institut e.V., Freiburg/Berlin

Franz Götzfried
Salt Research + Consulting, Bad Wimpfen

Stefan Gartiser
Hydrotox GmbH, Freiburg

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 03.0617
Ermittlung von Grundlagen und Bewertungsmethoden einer Ökobilanz
des Straßenwinterdienstes

Fachbetreuung:
Horst Badelt, Karen Scharnigg

Referat:
Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331 | ISBN 978-3-95606-866-9 | <https://doi.org/10.60850/bericht-v403>

Bergisch Gladbach, Juli 2025

Kurzfassung – Abstract

Ermittlung von Grundlagen und Bewertungsmethoden einer Ökobilanz des Straßenwinterdienstes

Wesentliche Aufgabe des Winterdienstes ist die Gewährleistung von Sicherheit und Verkehrsfluss für Personen- und Güterverkehr in Perioden mit winterlichen Witterungsbedingungen. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde eine einfache Methode für die Ökobilanzierung des Straßenwinterdienstes entwickelt und in Form eines intuitiv bedienbaren Excel-Tools für interessierte Kreise anwendbar gemacht. Der im Projekt betrachtete Straßenwinterdienst umfasste dabei den Winterdienst auf Außerortsstraßen, insbesondere Autobahnen und Bundesstraßen.

Im ersten Schritt des Projekts wurden Ökobilanzstudien zum Winterdienst ausgewertet und daraus die methodischen Grundlagen des ÖkoWin-Tools abgeleitet. Ergänzend zur Literatursauswertung wurden Interviews mit Praxisakteuren geführt. Eine Auswertung aktueller Literatur zu ökotoxischen Wirkungen aus der Ausbringung von Streumitteln vervollständigt das Bild der Umweltauswirkungen. Die Entwicklung des ÖkoWin-Tools erfolgte im zweiten Schritt. Zentrale Zielgruppe des Tools sind Akteure, die für den Winterdienst verantwortlich sind, wie z.B. Autobahn- und Straßenmeistereien sowie Bauhöfen und Akteure, die Entscheidungen zur Beschaffung von Streumitteln und Winterdiensttechnik treffen. Sie können mit dem ÖkoWin-Tool die potenziellen Umweltauswirkungen ihrer Winterdienstaktivitäten bestimmen, sie können ermitteln, welche Prozesse die höchsten Beiträge zu den Umweltauswirkungen verursachen und welche Potenziale in Optimierungsmaßnahmen stecken. Das ÖkoWin-Tool ermöglicht die Erstellung individueller Ökobilanzen in sechs Schritten. Die Ökobilanzierung erfolgt in Bezug auf eine entsprechend der Fragestellung festzulegende funktionelle Einheit, das ist eine Bezugsgröße mit räumlicher und zeitlicher Komponente, beispielsweise die Winterdienstaktivitäten für die gesamte betreute Streufläche über eine bestimmte Winterperiode. Anwender*innen müssen die Primärdaten zu den Kernprozessen ihrer Winterdienstaktivitäten in das Tool eingeben (z.B. Verbrauch an Streumitteln und Kraftstoffen). Im ÖkoWin-Tool sind die Emissionsfaktoren zu den Vor- und Nachketten (z.B. die Herstellung von Streumitteln und Kraftstoffen, Emissionen der Ausbringung) für die Berechnung der potenziellen Umweltauswirkungen hinterlegt.

Insgesamt eignet sich die Methode der Ökobilanz sehr gut, um Optimierungspotenziale für die Durchführung des Winterdienstes innerhalb einer Meisterei oder eines Bauhofes zu identifizieren. Dagegen ist ein direkter Vergleich des Winterdienstes unterschiedlicher Meistereien bzw. generell von unterschiedlichen Organisationen, die den Winterdienst durchführen, auf Basis einer Ökobilanz nur sehr eingeschränkt oder gar nicht möglich. Ebenso gibt es verschiedene Auswirkungen des Winterdienstes, die mit der Methode der Ökobilanz aufgrund offener methodischer Fragen und fehlender Daten zumindest derzeit nicht abgebildet werden können. Darunter fallen potenzielle ökotoxische Wirkungen insbesondere aus der Ausbringung der Streumittel. Ebenso können potenzielle negative Wirkungen auf Bauwerke und Fahrzeuge, die Reparaturen und Ersatzmaßnahmen notwendig machen und darüber Umweltauswirkungen verursachen, nicht berücksichtigt werden. Auch die Effekte des Winterdienstes auf den Verkehrsfluss können mit der Methode Ökobilanz derzeit nicht abgebildet werden.

Determination of basic principles and assessment methods for a life cycle assessment of winter road maintenance services

The main task of winter road maintenance is to ensure the safety and flow of passenger and goods traffic during periods of wintry weather conditions. In the present research project, a simple method for the life cycle assessment of winter road maintenance was developed and made applicable for interested parties in the form of an intuitively usable Excel tool. The winter road maintenance service considered in the project comprised winter road maintenance on roads outside built-up areas, in particular freeways and federal trunk roads.

In the first step of the project, life cycle assessment studies on winter road maintenance were evaluated and the methodological basis of the ÖkoWin tool was derived from them. In addition to the literature review, interviews with practitioners were conducted. An evaluation of current literature on ecotoxic effects from the application of gritting materials completes the picture of environmental impacts. The development of the ÖkoWin tool took place in the second step. The central target group of the tool are actors responsible for winter road maintenance, such as highway and road maintenance depots as well as building yards and actors who make decisions on the procurement of gritting materials and winter road maintenance equipment. They can use the ÖkoWin tool to determine the potential environmental impacts of their winter maintenance activities, identify which processes cause the highest contributions to environmental impacts, and identify the potential for optimization measures. The ÖkoWin tool enables the creation of individual life cycle assessments in six steps. The life cycle assessment is carried out in relation to a functional unit to be defined according to the question, i.e. a reference value with spatial and temporal components, e.g. the winter road maintenance activities for the entire managed gritting area over a specific winter period. Users must enter primary data on the core processes of their winter maintenance activities into the tool (e.g. consumption of gritting materials and fuels). The ÖkoWin tool stores the emission factors for the upstream and downstream chains (e.g. the production of gritting materials and fuels, emissions from spreading) for calculating the potential environmental impact.

Overall, the LCA method is very well suited to identify optimization potential for the implementation of winter maintenance within a master workshop or a building yard. In contrast, a direct comparison of the winter maintenance of different master workshops or, in general, of different organizations that carry out winter maintenance, on the basis of an LCA is only possible to a very limited extent or not at all. Similarly, there are various impacts of winter road maintenance that cannot be mapped using the LCA method due to open methodological questions and a lack of data, at least at present. These include potential ecotoxic effects, particularly from the application of gritting materials. Likewise, potential negative effects on structures and vehicles, which necessitate repairs and replacement measures and cause environmental impacts as a result, cannot be taken into account. The effects of winter road maintenance on traffic flow can also not be mapped with the LCA method at present.

Summary

Determination of basic principles and assessment methods for a life cycle assessment of winter road maintenance services

1 Background

The main task of winter road maintenance is to ensure the safety and flow of passenger and goods traffic during periods of wintry weather conditions (e.g. snowfall, freezing rain, black ice, slush). Wherever possible, winter road maintenance should prevent the formation of slippery conditions, remove slippery conditions or minimise their impact on traffic. Overall, various techniques and methods are available for winter road maintenance, which are continuously being developed further. The evaluation of the different approaches is currently prioritised under the aspects of safety and cost-effectiveness. The life cycle assessment tool can also be used to provide a sound basis for making decisions on the selection of de-icing materials from an ecological perspective. This involves analysing all the effects of the de-icing materials on the environment throughout their entire life cycle, from production to disposal.

Against this background, the research project FE 03.0617/2021/MGB "Determination of basic principles and assessment methods for a life cycle assessment of winter road maintenance services" (ÖkoWin), commissioned by the Federal Highway Research Institute (BAST), investigated how the life cycle assessment method can be applied to winter road maintenance services.

2 Objectives and approach chosen

The overall aim of the project was to help ensure that planning and investment decisions are made in future that guarantee the best possible environmental protection while taking traffic aspects into account. The specific aim of the project was to develop a simple method for the life cycle assessment of winter road maintenance and to make it available to interested parties in the form of an intuitive Excel tool. The winter road services considered in the project included winter road services on non-urban roads, in particular motorways and federal trunk roads.

The method should take into account the effects of winter road maintenance services as comprehensively as possible and be based on the international standards for life cycle assessments (in particular DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044). The method should also be operationalised in the form of an Excel tool for planning, scheduling and investment decisions in the context of winter road maintenance services. This tool should be designed in such a way that it can be applied to different contexts, e.g. individual operations, entire

districts or road networks. In principle, the BAST plans to make the ÖkoWin tool available to interested parties on its website.

The project was divided into two work packages:

In work step 1, “identification of the key points of a life cycle assessment for winter road maintenance services”, the basis for the development of the tool in work step 2 was created. To this end, a literature analysis was carried out focussing on life cycle assessments in the context of winter road maintenance services and toxicity after the application of gritting agents. Research was also carried out on the topics of corrosion in structures and vehicles and the effects of winter road maintenance measures on traffic. In addition, interviews were conducted with practitioners. Finally, conclusions were drawn for a life cycle assessment of winter road maintenance based on the results of the previous work.

The ÖkoWin tool was then developed in work step 2 “Development tool”. First, a prototype was developed, which was tested in a test phase with practitioners and then finalised.

3 Results

A total of 10 relevant LCA studies on winter road maintenance services were identified and analysed.

The following functional units, which represent the quantified benefit of a product system for use as a comparative unit, were used in the analysed studies:

- Cleared kilometres
- Treated road area as length x gritting width
- All municipal winter road maintenance activities on the territory of a city
- Provision of one tonne of de-icing salt from the manufacturer or to interim storage

The system boundaries, i.e. the definition of which processes are part of a product system and which are not, were defined differently depending on the objective of the studies:

- In studies that consider the entire winter road maintenance services, the processes of raw material extraction, provision of the gritting material, transport of the gritting material from the production site to the warehouse and spreading were included along the life cycle.
- In studies in which only gritting agents were analysed, the processes of production and transport to interim storage were included in the system boundaries.

Vehicle cleaning was only mentioned or analysed in some studies. At the end-of-life stage, i.e. after application, road salt does not have to be swept in again, unlike slippage-preventing gritting agents such as chippings. Road salt is carried into soils and bodies of water by rain and meltwater, among other things (run-off). In the studies analysed, this end-of-life phase

was either excluded from the system boundaries because there is no LCA impact assessment model for the ecotoxic effects relevant here, or dealt with at inventory level (e.g. as chlorine emissions).

The provision of infrastructure, i.e. the manufacture, distribution and disposal of machines and vehicles, as well as the construction and disposal of buildings for winter road maintenance, plays a negligible role in the results of life cycle assessments due to the comparatively long lifetimes. Against this background, it is outside the system boundaries. This corresponds to common practice in life cycle assessments.

With regard to the environmental impact categories considered, the studies analysed either use the assessment methods commonly used in LCA practice, which cover a specific selection of impact categories, or selectively choose certain impact categories. Global warming potential is the most frequently analysed impact category. Water consumption was only analysed in some of the studies.

Even if toxicity-related impact categories, i.e. human toxicity and ecotoxicity, were considered in some of the LCA studies, the toxicity effects from the grit remaining in the environment after application are not taken into account due to a lack of data. Individual studies calculate the total chloride emissions into the environment. However, this is not an impact category and therefore no direct statement on potential environmental impacts (e.g. toxicity in fresh water) of chloride emissions is possible.

In principle, the calculations in the analysed studies are based on both primary data and secondary data. Primary data are specific data that are usually determined for the core processes (e.g. the application of gritting agents) of the system being analysed. Secondary data are data sets from the literature, some of which are compiled in LCA databases. These are used for processes that are not at the centre of the respective analysis (core processes), but are upstream or downstream, such as the production of fuels or vehicle emissions. When using secondary data, the analysed studies often refer to the Ecoinvent life cycle assessment database.

Two data gaps were identified in the literature review: Firstly, no suitable data basis for the production of MgCl_2 could be identified. Secondly, no statements on the environmental impact of additives, anti-caking agents, corrosion inhibitors and dust binders as well as technical additives were found in the studies analysed.

The results of the evaluated studies can be summarised as follows: The largest contribution to the environmental impact of winter road maintenance services is made by the gritting materials and fuels used for spreading. The quantities of gritting agents and fuels consumed depend on the specific framework conditions of the respective winter service, e.g. weather conditions, road conditions, vehicle and gritting technology, gritting agents and specific operations (Vignisdottir et al. 2020). Another important factor has also proven to be the transport of the gritting agents from the place of production to the place of use and any intermediate storage facilities, both the respective distances and the means of transport influencing the level of environmental impact. During spreading, direct emissions from the

combustion of fuels are very relevant for the global warming potential. In contrast, the upstream chain, i.e. the production of fuels, plays a major role for the ozone depletion potential and the photo-oxidant formation potential. The different ways of producing sodium chloride – as rock salt, evaporated salt or sea salt – are associated with different levels of environmental impact. The production of evaporated salt requires significantly more energy and therefore has a much higher environmental impact than the production of rock salt and sea salt. Sea salt has the lowest environmental impact. The use of gritting agents in the form of brine instead of in dry form leads to a considerable reduction in all environmental impacts during the entire life cycle.

One of the issues to be investigated in the project was the extent to which the ecotoxicity after application of the gritting agents can be methodically modelled in a life cycle assessment. To this end, the relevant impact assessment models of life cycle assessments were examined. It was found that there are currently no scientifically based characterisation factors for chloride, NaCl, CaCl₂ and MgCl₂ due to a lack of information and data on the complex ecotoxicological interactions of inorganic substances. Against this background, it is not possible to depict the ecotoxicity impact category within the framework of a life cycle assessment, especially not for the fate of the gritting agents after application, which is particularly relevant in this context. The environmental impact category of ecotoxicity is therefore not taken into account in the ÖkoWin tool, but a detailed literature research and evaluation was carried out for this purpose (see next section).

Ecotoxicological effects: The available data on the aquatic and terrestrial ecotoxicity of the most important de-icing salts (NaCl, KCl, MgCl₂ and CaCl₂) were updated and supplemented by test results according to OECD guidelines on chronic aquatic toxicity to fish and daphnia and on acute and chronic terrestrial ecotoxicity to plants and earthworms. Acute aquatic ecotoxicity is generally at an EC₅₀ or LC₅₀ > 1 g/L, chronic aquatic ecotoxicity at a NOEC > 100 mg/L. Terrestrial ecotoxicity to plants and earthworms is usually an EC₅₀ or LC₅₀ > 5 g/kg. These values are only exceeded by winter service measures at particularly contaminated sites, but not over large areas. However, direct plant damage does occur in the area of roadside vegetation and salt-resistant halophytes may also colonise this area.

Two further aspects should also be considered:

Firstly, damage to structures and vehicles: Even if susceptibility has been significantly reduced in recent decades due to improved materials and technologies as well as corresponding technical specifications, it is undisputed and widely documented that road salts can cause damage to structures and vehicles due to their corrosive effects. There are only a few studies that analyse the effects of winter road maintenance under real - not laboratory - conditions, e.g. on buildings. In addition, winter road maintenance is only one of various effects that can lead to damage to structures and vehicles, and there may also be interactions between other damage possibilities and the effect of road salt. For the life cycle assessment tool developed in the project, which can be used in different regions in Germany, there is no data, e.g. statistical data, on average damaging effects on structures and vehicles

that could be used as a basis. Against this background, corrosive effects on buildings and vehicles cannot be considered as part of the life cycle assessment.

Secondly, the environmental impact of traffic: fuel consumption and emissions are higher in congestion situations with frequent starting and braking than in situations with flowing traffic. The effects of winter road maintenance on the environmental impact of traffic are complex: On the one hand, it can be assumed that effective winter road maintenance – compared to the same situation without winter road maintenance or with less effective winter road maintenance – reduces or completely avoids traffic jams in terms of their temporal and spatial extent. This helps to reduce the proportion of increased traffic emissions caused by congestion. At the same time, avoiding congestion can lead to an increase in average speed, which in turn is associated with an increase in emissions. Rebound effects due to an increase in mileage, for example when people who would have refrained from travelling in winter weather conditions but nevertheless use their vehicle due to the safe road conditions made possible by the winter road clearance service, cannot be ruled out. In view of these complex relationships and the lack of data, the ÖkoWin tool cannot take into account the impact of winter road maintenance on traffic.

Based on the literature review and interviews with practitioners, the prototype of the ÖkoWin tool was then developed and finalised after a test phase.

The aim of the ÖkoWin tool is to enable users to easily estimate the life cycle assessment of winter road maintenance services for individual operations, entire districts or road networks and to be used for planning, scheduling and investment decisions in the context of winter road maintenance. This should make it possible to determine the environmental impact of winter road maintenance along the life cycle and to identify the relevant processes within the system boundaries.

When using the ÖkoWin tool, the following processes should always be included:

Core processes:

- Brine production (if brine is produced in-house)
- Loading of the gritting vehicles
- Spreading the gritting agents (incl. any empty runs)
- Check runs
- Vehicle and equipment cleaning (e.g. water consumption)

Upstream and downstream processes:

- Production of gritting agents including raw material extraction
- Delivery of the grit from the respective production site to the place of use (e.g. the road maintenance depot), taking into account any central and/or interim storage facilities
- Provision of electricity, heat and fuels including the respective upstream chains.

Five environmental impact categories are taken into account in the ÖkoWin tool:

- Cumulative energy expenditure (CED) in MJ equivalent
- Global warming potential (GWP) in kg CO₂ equivalent
- Acidification potential (AP) in mol H⁺ equivalent
- Ozone Depletion Potential (ODP) in kg trichlorofluoromethane equivalent (CFC-11 eq.)
- Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) in kg NMVOC equivalent¹

The calculations in the ÖkoWin tool are based on the primary data entered by users and the emission factors stored in the tool for the various processes (e.g. production of gritting agents, provision of fuels and energy).

Practical aspects of the ÖkoWin tool

Technical requirements for the tool: The prerequisite for using the ÖkoWin tool is Microsoft® Excel® under Microsoft 365. The ÖkoWin tool contains macros programmed in Visual Basics (VBA macros). The macros must be activated for the tool to work. If necessary, the macro execution must be authorised by the system administrator. To be able to calculate with the ÖkoWin tool, it must be saved on your own computer / in your own network.

The ÖkoWin tool is used in six steps:

Step 1: Download and save the ÖkoWin tool under a separate name. It is advisable to create a separate file for each balance sheet that is to be created, i.e. to save the ÖkoWin tool separately in each case.

Step 2: A look at the methodological basis of the ÖkoWin tool. It is useful to get an overview of the methodological basis of the ÖkoWin tool on the "introduction" worksheet.

Step 3: Enter the general key data for the winter maintenance activities to be analysed. General information (e.g. description of the organisation), the reference value (i.e. the spatial and temporal dimension of the functional unit) and information on winter road maintenance (e.g. proportion of pre-wetted salt, number of icing events) must be entered on the "Input of study framework" worksheet.

Step 4: Enter the specific (consumption) data for the winter maintenance activities (core processes). On the "Input of specific data" worksheet, input is provided in three categories: 1) processes in the maintenance depot / construction yard, 2) spreading, 3) transport of the spreading material from the production site to the maintenance depot / construction yard.

¹ NMVOC: Non Methane Volatile Organic Compounds

The specific data must always be entered in relation to the functional unit defined in the previous step.

Step 5: Output of the results. The key points of the LCA, i.e. the scope of the analysis and the LCA results, are presented in tabular form and as a graphic on the "results" worksheet. From row 225 onwards, this worksheet also offers the option of outputting the calculated LCA in pdf format. The tables and the graphic can also be copied from the spreadsheet for use in other documents.

Step 6: Interpretation of the results. The results are interpreted against the background of the specifications and assumptions made for the respective life cycle assessment and taking into account the available data basis.

4 Conclusion

The life cycle assessment method can be used to analyse and estimate the environmental impact of winter road maintenance services and options for reducing it. In relation to the different environmental impact categories, this method can be used to calculate the greenhouse potential, the acidification potential, the ozone depletion potential, the photo-oxidant potential and the cumulative energy input. For the impact category of ecotoxicity, which addresses issues on potential ecotoxic effects from the fate of the spreading agents in the environment after application on plants, in soils and in water bodies, there is currently no suitable indicator available for life cycle assessments that could depict the impact. Likewise, potential negative effects on structures and vehicles that necessitate repairs and replacement measures and thus cause environmental impacts cannot be taken into account. The effects of winter road maintenance services on traffic flow cannot be mapped using the life cycle assessment method at present either.

Overall, the life cycle assessment method is very well suited to identifying optimisation potential for the implementation of winter road maintenance services within a maintenance depot. A direct comparison of the winter maintenance services of different maintenance depots is only possible to a very limited extent or not at all on the basis of a life cycle assessment. The reason for this is the differences in climate and weather conditions and/or road and traffic situations between different maintenance depots, which are therefore not comparable.

Inhalt

Abkürzungen	15
1 Einleitung und Zielsetzung	18
1.1 Hintergrund	18
1.2 Zielsetzung des Projektes	18
1.3 Überblick über die Arbeitsschritte und den Aufbau des Berichtes	19
2 Methodisches Vorgehen	19
2.1 Identifikation der Eckpunkte einer Ökobilanz Straßenwinterdienst (AP 1)	19
2.1.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanz-Methode	19
2.1.2 Recherche relevanter Ökobilanz-Studien und deren Auswertung (AP 1.1)	20
2.1.3 Ökotoxizität	22
2.1.4 Korrosion an Bauwerken und Fahrzeugen	23
2.1.5 Winterdienst und Verkehrsfluss	23
2.1.6 Einbezug von Akteuren des Straßenwinterdienstes (AP 1.2)	23
2.2 Entwicklung des ÖkoWin-Tools (AP 2)	24
2.2.1 Eckpunkte bei der Toolentwicklung	24
2.2.2 Testphase und Finalisierung	25
3 Ergebnisse der Literaturanalyse	25
3.1 Auswertung von Ökobilanzen des Winterdienstes	25
3.1.1 Berücksichtigte Ökobilanzstudien	25
3.1.2 Ergebnisse der Auswertung	26
3.1.3 Sonderfall Umweltwirkungskategorie Ökotoxizität	30
3.2 Potenzielle Ökotoxizitätswirkung nach der Ausbringung – Ergebnisse der Auswertung spezifischer Studien jenseits von Ökobilanzen	31
3.2.1 Datengrundlage	31
3.2.2 Aquatische Ökotoxizität	32
3.2.3 Terrestrische Ökotoxizität	32
3.2.4 Auswirkungen auf Böden und das Straßenbegleitgrün	47
3.2.5 Überschlägige Bewertung alternativer Streumittel	48
3.2.6 Expositionsbetrachtungen	49

3.2.7	Fazit	50
3.2.8	Schutzziele und Umweltqualitätsnormen	51
3.3	Ergebnisse zum Bereich Korrosion bei Bauwerken und Fahrzeugen	52
3.4	Ergebnis zum Bereich Winterdienst und Verkehrsfluss	54
4	Ergebnisse der Interviews mit Praxisakteuren	55
5	Das ÖkoWin-Tool: Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen	60
5.1	Festlegung des Ziels	60
5.2	Funktionelle Einheiten	61
5.3	Festlegung der Systemgrenzen	62
5.4	Datenerhebung und Anforderungen an die Datenqualität	63
5.5	Allokation	64
5.6	Abschneidekriterien	64
5.7	Betrachtete Umweltauswirkungen	65
6	Grundlage für die Ermittlung der im ÖkoWin-Tool hinterlegten Emissionsfaktoren	67
6.1	Vorkette: Herstellung der Streumittel und Solen	67
6.1.1	NaCl	67
6.1.2	CaCl ₂	70
6.1.3	MgCl ₂ konzentrierte Sole	74
6.1.4	NaCl, CaCl ₂ , MgCl ₂ : Anwendungsfertige Fremdsole	74
6.2	Vorkette: Antransport von Streumitteln und Sole vom Hersteller zum Einsatzort	74
6.3	Kernprozesse	75
6.3.1	Strom, Bezug aus dem deutschen Stromnetz	75
6.3.2	Eigene Stromerzeugung mit einer Photovoltaik-Anlage	75
6.3.3	Bezug von Wärme aus dem deutschem Fernwärme-Mix	76
6.3.4	Bezug von Wärme aus eigener Wärmebereitstellung	76
6.3.5	Diesel	77
6.3.6	Hydrauliköl / Motoröl	77
6.3.7	Wasser für die eigene Soleherstellung sowie die Reinigung von Fahrzeugen und Geräten	78
6.3.8	Eigene Soleherstellung	78
6.3.9	Ausbringung	78

7	Beschreibung des ÖkoWin-Tools	79
7.1	Hintergrund	79
7.2	Zielgruppe und Anwendungsbereich des ÖkoWin-Tools	79
7.3	Kurzanleitung für die Nutzung des ÖkoWin-Tools	80
7.3.1	Technische Voraussetzungen	80
7.3.2	Vorgehen Schritt für Schritt	80
7.3.3	FAQ – Fragen & Antworten bei der Nutzung des ÖkoWin-Tools	84
7.4	Beispielrechnung mit dem ÖkoWin-Tool	86
7.5	Überblick über die im ÖkoWin-Tool hinterlegten Emissionsfaktoren	88
8	Zusammenfassung	91
	Literatur	94
	Zitierte Normen und Gesetze	104
	Bilder	105
	Tabellen	106
	Anhang	108
	Übersicht über die im Rahmen der Recherche identifizierten Ökobilanz- und Carbon Footprint-Studien zum Bereich Winterdienst	108
	Tabellarische Auswertung der berücksichtigten ökobilanzrelevanten Studien	109

Die Anlagen zum Bericht (ÖkoWin-Tool und Kurzanleitung) sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

Abkürzungen

ACE	Automobil Club Europa
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
AM	Autobahnmeisterei
AP	Versauerungspotenzial
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
bSF	Bewertete Streufläche
CaCl ₂	Calciumchlorid
CAS	Chemical Abstracts Service
CDF	Capillary Suction of De-icing chemicals and Freeze-Thaw Test
Cl	Chlorid
CMA	Calciummagnesiumacetat
CML	Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalente
DIN EN ISO	Deutsche Industrie-Norm und Europäische Norm für Internationale Organisation für Standardisierung
DIN/TS	Deutsche Industrinorm / Technische Spezifikation
EC10	Effektive Konzentration, bei der eine 10% Wirkung zu erwarten ist
EC100	Effektive Konzentration, bei der eine 100% Wirkung zu erwarten ist
EC50	Effektive Konzentration, bei der eine 50% Wirkung zu erwarten ist
ECHA	European Chemicals Agency
EF	Emissionsfaktor
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ELCD	European Platform on Life Cycle Assessment Database
FAQ	Frequently Asked Questions
FCD	Floating Car Data
FELS	Fish Early-Life Stage
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FS 100	Feuchtsalz 100 (100% Sole, bestehend aus 22%iger Kochsalzlösung)
FS 30	Feuchtsalz-30 (30% Sole, 70% Auftausalz)
FU	Funktionelle Einheit
g	Gramm
GEMIS	Gesamtemissionsmodell
ggf.	gegebenenfalls
GHG	Greenhouse Gas
GLP	Gute Laborpraxis
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
H BeStreu	Hinweise für die Beschaffung von tauenden und abstumpfenden Streustoffen für den Winterdienst
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport

HC5	Das 5. Perzentil einer SSD der Effektkonzentrationen der chronischen und akuten Toxizität zu verschiedenen Spezies
k.A.	Keine Angabe
$K_4[Fe(CN)_6]$	Kaliumferrocyanid
KAc	Kalium-Acetat
KCl	Kaliumchlorid
KEA	Kumulierter Energie Aufwand
Kfo	Kaliumformiat
kg	Kilogramm
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
L	Liter
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LC20	Lethal Concentration 20
LC50	Letale Konzentration, bei der eine 50% Mortalität zu erwarten ist
LC50	Lethal Concentration 50
LOEC	Lowest-Observed-Effect Concentration
LOEC	Lowest Observed Effect Concentration
LPG	Liquified Petroleum Gas
MEV	Mehrfacheffekt-Verdampfung
mg	Milligramm
$MgCl_2$	Magnesiumchlorid
$MgSO_4$	Magnesiumsulfat
mM	milli Mol
$Na_4[Fe(CN)_6]$	Natriumferrocyanid
NaCl	Natriumchlorid
NMVOC	Non-methane volatile organic carbon
NOEC	No-Observed-Effect Concentration
NOEC	No effect concentration
ODP	Ozonabbaupotenzial
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OECD SIDS	Organisation for Economic Cooperation and Development Screening Information Dataset
OGewV	Oberflächengewässerverordnung
PEC	Predicted Environmental Concentration
PEF	Product Environmental Footprint
Pkm	Personenkilometer
PM	Feinstaub-Potenzial
PNEC	Predicted No Effect Concentration
POCP	Photooxidantienpotenzial
ppm	parts per million
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
SBR	Sequencing-Batch-Reactor
SCR	Selective Catalytic Reduction
SF	Streufläche
SSD	Species sensitivity distribution
t	Tonne
THG	Treibhausgasemissionen

Tkm	Tonnenkilometer
TKV	Thermokompressionsverfahren
TrinkWV	Trinkwasser Verordnung
UBA	Umweltbundesamt
UQN	Umweltqualitätsnorm
US EPA	United States Environmental Protection Agency
WHO	World Health Organisation
Wp	Watt piek
XFCD	Extended Floating Car Data

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Hintergrund

Um die Mobilität von Menschen und Gütern zu ermöglichen, gehört zu einer modernen Gesellschaft eine funktionierende Verkehrsinfrastruktur dazu. Allerdings kann diese durch winterliche Witterungsverhältnisse erheblich beeinträchtigt werden, was zum einen zu Nutzungseinschränkungen und Verkehrsbehinderungen aber auch zu konkreten Schäden z.B. durch Unfälle führen kann. Vor diesem Hintergrund ist es die Aufgabe des Winterdienstes die Sicherheit und den Verkehrsfluss für Personen- und Güterverkehr in Perioden mit winterlichen Witterungsbedingungen sicherzustellen (z.B. Schneefall, überfrierende Nässe, Glatteis, Schneematsch). Der Winterdienst soll nach Möglichkeit die Glättebildung vermeiden, entstandene Glätte beseitigen oder ihre Auswirkungen auf den Verkehr minimieren. Um die Glätte effizient bekämpfen zu können, sind neben den technischen Voraussetzungen und einer sachgerechten Ausstattung insbesondere eine wirkungsvolle Organisation und eine gute Einsatzplanung erforderlich. Die Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen sind umso positiver, je schneller der Winterdienst auf die Glättebildung reagiert. Bei hinreichend sicherer Glättevorhersage ist eine vorbeugende Ausbringung von Taustoffen hinsichtlich der Wirkung auf den Verkehr besonders effektiv. Insgesamt stehen für den Winterdienst unterschiedliche Techniken und Methoden zur Verfügung, die kontinuierlich weiterentwickelt werden. Die Bewertung der unterschiedlichen Ansätze erfolgt derzeit prioritär unter den Gesichtspunkten Sicherheit und Wirtschaftlichkeit.

Mit dem Instrument der Ökobilanz können darüber hinaus fundierte Entscheidungsgrundlagen für die Auswahl von Taustoffen aus ökologischer Sicht gewonnen werden. Hierbei werden alle Auswirkungen der Taustoffe auf die Umwelt im gesamten Lebenszyklus von der Gewinnung bis zur Entsorgung bilanziert. Bisherige Bilanzierungen haben gezeigt, dass bei den Umweltauswirkungen des Winterdienstes der Energieverbrauch und die Emissionen bei der Herstellung und dem Antransport der Taustoffe sowie beim Betrieb der Winterdienstfahrzeuge ins Gewicht fallen. Beim Antransport der Streustoffe sind die Transportentfernungen und die genutzten Transportmittel für die Belastung maßgebend. Darüber hinaus hat die Ausbringung von Streumitteln auch Auswirkungen auf das Umfeld, insbesondere auf Bäume, Sträucher, Böden und Gewässer aber auch auf Bauwerke und Fahrzeuge. Hinzukommen die Auswirkungen der Winterdienstmaßnahmen auf den Verkehr und dessen Energieverbrauch sowie Emissionen (z.B. Vermeidung von Staus).

Bisher in Deutschland durchgeführte Ökobilanzierungen betrafen den Winterdienst der Städte München und Nürnberg Quack et al. (2004), den Vergleich verschiedener Tausalze (Steinsalz, Siedesalz, Meersalz) (Stratmann und Quack (2009a), Stratmann und Quack (2009b)) sowie den Vergleich des alternativen Streumittels Formiat mit anderen Streustoffen (Gartiser (2020a), Gartiser (2020b)). Die Ergebnisse zeigten u.a., dass in München ein Drittel des gesamten Umwelteinflusses des Winterdienstes durch die Produktion und den Transport der Streumittel (Salz, Calciumchlorid, Splitt) verursacht wurde. Die anderen Umwelteinflüsse resultierten aus dem Betrieb der Winterdienstfahrzeuge.

1.2 Zielsetzung des Projektes

Übergreifendes Ziel des Projektes war es dazu beizutragen, dass zukünftig Planungs- und Investitionsentscheidungen getroffen werden, mit denen der bestmögliche Umweltschutz unter Berücksichtigung verkehrlicher Aspekte gewährleistet werden kann. Konkretes Ziel des Projektes war es, eine einfache Methode für die Ökobilanzierung des Straßenwinterdienstes zu erarbeiten und diese in Form eines intuitiv bedienbaren Excel-Tools für interessierte Kreise anwendbar zu machen. Der im Projekt betrachtete Straßenwinterdienst umfasste dabei den Winterdienst auf Außerortsstraßen, insbesondere Autobahnen und Bundesstraßen.

Die Methode sollte die Auswirkungen des Straßenwinterdienstes möglichst umfassend berücksichtigen und sich an den internationalen Standards zu Ökobilanzen orientieren (insbesondere

DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044¹). Die Methode sollten darüber hinaus durch eine Operationalisierung in Form eines Excel-Tools für Planung, Disposition und Investitionsentscheidungen im Rahmen des Winterdienstes einsetzbar sein. Dieses Tool sollte so gestaltet werden, dass es auf verschiedene Kontexte, z.B. einzelne Einsätze, ganze Bezirke oder Straßennetze anwendbar ist. Grundsätzlich ist geplant, dass das BAST das ÖkoWin-Tool auf ihrer Homepage interessierten Kreisen zur Verfügung stellt.

1.3 Überblick über die Arbeitsschritte und den Aufbau des Berichtes

Das Projekt umfasste zwei Arbeitsschritte:

In Arbeitsschritt 1 Identifikation der Eckpunkte einer Ökobilanz Straßenwinterdienst wurde die Grundlage für die Entwicklung des Tools in Arbeitsschritt 2 erstellt. Dazu erfolgte in AP 1.1 eine Literaturanalyse mit den Schwerpunkten Ökobilanzen im Kontext Winterdienst sowie Toxizität nach der Ausbringung von Streumitteln. Außerdem erfolgte eine Recherche zu den Themen Korrosion bei Bauwerken und Fahrzeugen sowie Auswirkungen der Winterdienstmaßnahmen auf den Verkehr. Die Ergebnisse sind in den Kapiteln 3.1 und 3.2 sowie 3.3 und 3.4 dargestellt. Ergänzend wurden Interviews mit Praxisakteuren durchgeführt. Die Ergebnisse der Interviewauswertungen finden sich in Kapitel 4. Abschließend werden in Kapitel 5 auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeiten in AP 1.3 Schlussfolgerungen für eine Ökobilanz Straßenwinterdienst gezogen.

In Arbeitsschritt 2 erfolgte dann die Entwicklung des ÖkoWin-Tools. Zunächst wurde in AP 2.1 ein Prototyp entwickelt, der in AP 2.2 Testphase mit Praxisakteuren erprobt und in AP 2.3 dann finalisiert wurde. In Kapitel 5 wird erläutert, welche Festlegungen für Ziel und Untersuchungsrahmen für das ÖkoWin-Tool getroffen wurden. Die Grundlagen für die Ermittlung der im ÖkoWin-Tool hinterlegten Emissionsfaktoren werden in Kapitel 6 dargestellt. Kapitel 7 enthält eine Kurzbeschreibung des ÖkoWin-Tools einschließlich einer Anleitung für die Nutzung des Tools, einer FAQ bzw. Frage-Antworten-Liste sowie die hinterlegten Emissionsfaktoren. Die Zusammenfassung erfolgt in Kapitel 8.

2 Methodisches Vorgehen

Insgesamt wurden im Projekt folgende methodischen Ansätze genutzt:

- Ökobilanz: Die Entwicklung der methodischen Grundlagen (AP 1) sowie des Tools (AP 2) erfolgen auf der methodischen Grundlage einer produktbezogenen Ökobilanz² in Anlehnung an die Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 in den aktuellen Fassungen.
- Recherche und Auswertung aktueller Literatur: In AP 1.1 sowie ggf. ergänzend in AP 2 erfolgte eine Desktop-Research und Auswertung der relevanten Literaturquellen und Datenbanken.
- Expert*inneninterviews: Eine Integration von Praxiswissen erfolgt darüber hinaus durch den Einbezug von Akteur*innen in Form von Experteninterviews (AP 1.2) sowie in der Testphase des Tools als Tester*innen (AP 2.2)

2.1 Identifikation der Eckpunkte einer Ökobilanz Straßenwinterdienst (AP 1)

2.1.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanz-Methode

Die Ökobilanz ist eine Methode zur Abschätzung der mit der Her- oder Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung verbundenen Umweltaspekte. Im Zuge einer Ökobilanzstudie werden die potenziellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes oder

¹ Anfang 2021 wurden Neufassungen dieser Normen veröffentlicht, wobei DIN EN ISO 14040:2009-11 durch DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2018-05 durch DIN EN ISO 14044:2021-02 ersetzt wurden.

² In der Internationalen Norm DIN EN ISO 14040 umfasst der Begriff „Produkt“ auch Dienstleistungen.

einer Dienstleistung untersucht. Da die vorliegende Studie auf den Winterdienst und damit eine Dienstleistung fokussiert, wird im Folgenden nur noch der Begriff „Dienstleistungen“ verwendet.

Die grundlegende Methodik der Ökobilanz ist in den internationalen Normen (DIN EN ISO 14040) und (DIN EN ISO 14044) festgelegt. Durch die Einhaltung der in den Normen festgelegten Anforderungen und Empfehlungen ist gewährleistet, dass die in einer Studie getroffenen Annahmen und die inhaltliche Zielstellung der Studie transparent dokumentiert werden.

Bild 2-1 zeigt das grundlegende Konzept und die generelle Vorgehensweise bei der Erstellung einer Ökobilanz. Mit diesem Vorgehen wird sichergestellt, dass die zu untersuchenden Systeme über die betrachteten Lebenszyklusphasen hinweg vollständig erfasst und alle ergebnisrelevanten Umweltwirkungen in der Bilanz berücksichtigt werden.

Die Erstellung einer Ökobilanz ist ein iterativer Prozess. Das bedeutet, dass auf Basis der Ergebnisse in einer bestimmten Phase der Ökobilanz noch einmal Veränderungen oder Ergänzungen in der vorangegangenen Phase vorgenommen werden können. Der iterative Ansatz innerhalb und zwischen den Phasen trägt zur Ganzheitlichkeit und Konsistenz der Studie bei.

Grundsätzlich folgt die Erstellung der hier vorgelegten Ökobilanz den Vorgaben der Normen zur Durchführung von Ökobilanzen. Entsprechend folgt auch der hier vorgelegte Bericht den Vorgaben zur Berichterstattung über Ökobilanzstudien.

Eine kritische Prüfung der Ergebnisse der Ökobilanz und des hier vorgelegten Studienberichts war im Forschungsvorhaben jedoch in Abweichung von der Norm nicht vorgesehen. Allerdings ist das Forschungsvorhaben von einem Begleitkreis unterstützt worden, der sowohl das angewendete methodische Vorgehen als auch die Ergebnisse kritisch kommentiert und diskutiert hat.

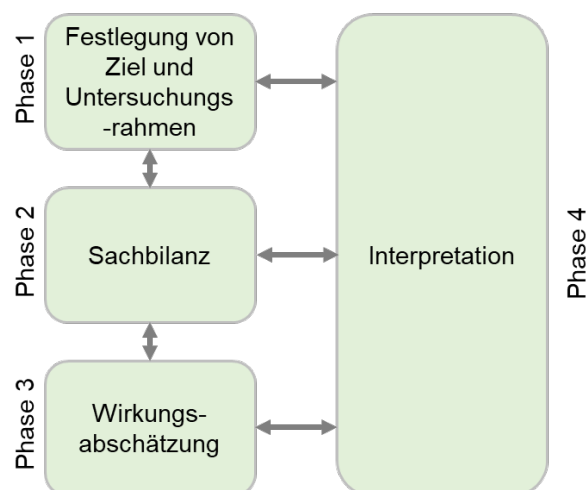


Bild 2-1: Phasen einer Ökobilanz, eigene Darstellung nach (DIN EN ISO 14040:2009-11; DIN EN ISO 14040)

2.1.2 Recherche relevanter Ökobilanz-Studien und deren Auswertung (AP 1.1)

Die Zielsetzung der Literatursuche war die Ermittlung der methodischen Grundlagen für das zu entwickelnde Tool. Die ausgewerteten Literaturquellen sollten als Basis für die Ableitung der geeigneten Rahmenbedingungen und der Erarbeitung einer einfachen Methode für eine Ökobilanz des Straßenwinterdienstes dienen, die dann in Form eines intuitiv bedienbaren Excel-Tools umgesetzt und für interessierte Kreise anwendbar gemacht werden sollten.

Es wurde eine intensive Desktop-Literaturrecherche zu vorhandenen Ökobilanzstudien sowie Carbon Footprint-Studien zum Bereich Straßenwinterdienst durchgeführt. Dabei wurden sowohl deutsch- als auch englischsprachige Quellen berücksichtigt. Da im Winterdienst der im Rahmen des Projektes im Fokus stehenden Außerortsstraßen (insbesondere Autobahnen und

Bundesstraßen) als Streumittel nur NaCl, CaCl₂ und MgCl₂ als Trockensalz, Feuchtsalz oder Sole zum Einsatz kommen, wurde die Recherche auf diese Streumittel begrenzt.

Das Vorgehen im Rahmen der Recherche und Auswertung ist in Bild 2-2 schematisch dargestellt: Die im ersten Schritt identifizierten Studien wurden im Anschluss auf ihre grundsätzliche Eignung z.B. im Hinblick auf Nachvollziehbarkeit, Systemgrenzen etc. hin analysiert. Eine der identifizierten Studien wurde nicht weiter berücksichtigt: In der Ökobilanz-Studie Warner (2016) erfolgt der Winterdienst mit Hilfe der vier Streumittel NaCl, CaCl₂, Calciummagnesiumacetat (CMA) sowie einem Nebenprodukt von Zuckerrüben. Es handelt sich um eine Studie nach DIN EN ISO 14040/44. In der Studie basiert die Sachbilanz für die bergmännischen Salzgewinnung unter Tage auf den Datensätzen "Uranium Underground Mine", "Underground Mine, Hard Coal" und "Phosphate Rock Mine". Begründet wird dies mit der Ähnlichkeit der Abbauverfahren. Da in anderen Studien spezifische Daten zur Salzgewinnung verfügbar sind, wurde auf diese zurückgegriffen und Warner (2016) nicht weiter ausgewertet.

Im zweiten Schritt wurden Auswertungskriterien im Hinblick auf die Entwicklung des Tools abgeleitet und die identifizierten Studien danach ausgewertet. In Tabelle 0-1 in Kapitel 0 im Anhang sind die für die Auswertung berücksichtigten Ökobilanzstudien zusammengestellt.

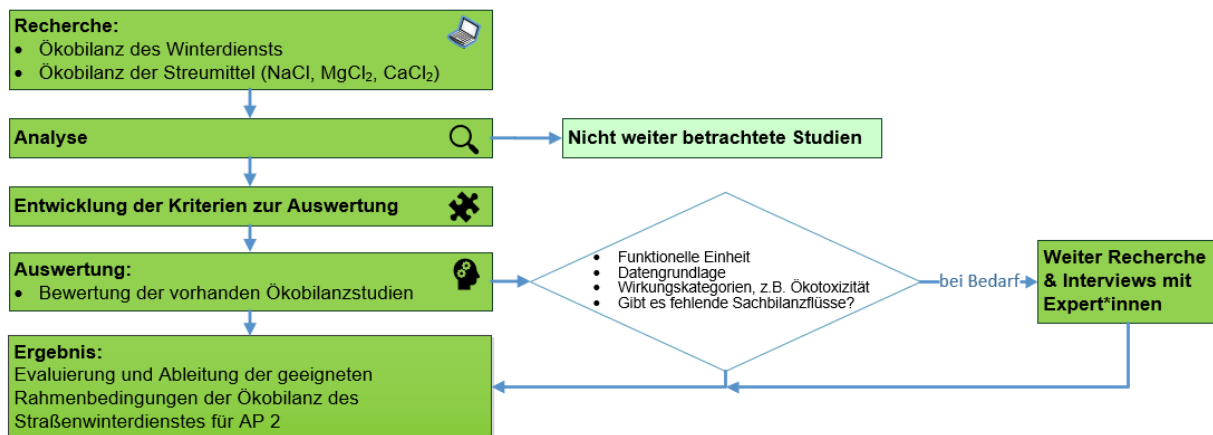


Bild 2-2: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens für die Literaturanalyse der Ökobilanzstudien. Quelle: Eigene Darstellung

Die Auswertungskriterien nehmen Bezug auf die wesentlichen Elemente einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14044 und 14044. Die Auswertungsmatrix ist in Tabelle 2-1 dargestellt. Die Ergebnisse der Auswertung sind in den Kapiteln 3.1 und 5 beschrieben. Bei der Auswertung der Studien wurden die Aspekte, die im Einklang mit dem Ziel dieses Projektes stehen, besonders geprüft, z.B. ob und wie der Ökotoxizitätsaspekt nach der Ausbringung des Streumittels berücksichtigt wurde, oder ob die für dieses Projekt benötigten Sachbilanzflüsse (z.B. Herstellung der drei betrachteten Streumittel) veröffentlicht sind.

Bezeichnung	Erläuterung
Quelle	Titel der Studie
Autor*innen, Jahr	Namen der Autor*innen und Jahr der Publikation
Methodische Grundlage der Studie	Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/44; orientierende Ökobilanz
Zielsetzung	Ziel der Ökobilanz
Funktionelle Einheit, d.h. der quantifizierte Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit	Definition der funktionellen Einheit
Scope: Betrachtete Prozesse / Nicht betrachtete Prozesse	Systemgrenzen mit berücksichtigten und nicht berücksichtigten Lebenswegabschnitten bzw. Prozessen
Geographischer Bezug	Betrachte Länder & Regionen
Zeitlicher Bezug	Betrachte Zeiträume
Technologischer Bezug	Betrachte Streumittel (Besonderheiten der Technologie des Winterdienstes insbesondere bei der Streustoffausbringung, falls vorhanden)
Primärdaten bzw. spezifische Daten	Erhobene spezifische Daten sowie Primärdaten
Sekundärdaten	Verwendete Sekundärdaten (z.B. Verweis auf Datenbank)
Betrachtete Umweltwirkungen	Festlegung der betrachteten Umweltkategorien
Ökotoxizität nach der Aufbringung	Berücksichtigung von Ökotoxizität nach der Aufbringung
Identifizierte wichtige Parameter und wichtige Ergebnisse	Relevante Ergebnisse und Parameter

Tabelle 2-1: Auswertungsmatrix für die ökobilanzrelevanten Studien zum Winterdienst

2.1.3 Ökotoxizität

Grundlage der Erfassung von Wirkungen von Stoffen auf die Umwelt ist deren ökotoxikologische Bewertung. Hierbei wird angenommen, dass die Effekte durch repräsentative Organismen aus verschiedenen trophischen Ebenen (Wirbeltiere, wirbellose Tiere, Algen, Bakterien, Pflanzen) der betrachteten Umweltkompartimente (Süßwasser, Salzwasser, Gewässersedimente, Boden) charakterisiert werden kann.

Bei der Abschätzung der Ökotoxizität wird nach europäischem Chemikalienrecht zwischen Kurzeffekten (akute Ökotoxizität) und Langzeiteffekten (chronische Ökotoxizität) unterschieden (REACH-Verordnung³). Akute Testsysteme zielen insbesondere auf Aussagen zu mortalen Effekten, wobei diese oftmals indirekt (z.B. über die Schwimmfähigkeit von Daphnien oder die Leuchthemmung lumineszierender Bakterien) bestimmt werden. Charakteristischer Endpunkt ist der LC50 bzw. der EC50, d.h. die Konzentration, bei der eine 50%tige letale Wirkung oder ein 50%tiger Effekt bestimmt wird. Chronische Testsysteme zielen hingegen auf längerfristige subletale Wirkungen wie die Beeinträchtigung früher Entwicklungsstadien nach der Befruchtung, Wachstumshemmungen oder negative Effekte auf die Reproduktionsleistung der Organismen. Als charakteristische Endpunkte zählen hier Toxizitätsschwellen wie der NOEC (no observed effect concentration), der LOEC (lowest observed effect concentration) oder der EC10 (Konzentration, bei der ein 10%iger Effekt auftritt).

In der Umweltrisikobewertung werden die aus Expositionsabschätzungen vorausgesagten Umweltkonzentrationen (Predicted Environmental Concentration, PEC) mit den Konzentrationen, bei denen keine Auswirkungen auf die Umwelt erwartet werden (Predicted No Effect Concentration, PNEC) verglichen. Bei einem Verhältnis PEC/PNEC > 1 wird ein bestehendes Umweltrisiko angenommen. Bei der Ableitung der PNEC aus akuten Toxizitätsdaten wird der LC50 bzw. EC50 der empfindlichsten Spezies herangezogen und durch einen Sicherheitsfaktor von ca. 1000 geteilt. Für chronische Toxizitätsdaten wird der PNEC anhand des NOEC der empfindlichsten Spezies bestimmt und durch einen Sicherheitsfaktor von ca. 10 bis 100 geteilt. Demnach sind

³ Siehe VERORDNUNG (EG) Nr. 1907/2006 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Dezember 2006 im Kapitel 10 Zitierte Normen und Gesetze

chronische Tests i.d.R. deutlich empfindlicher als akute Tests, was durch unterschiedliche Sicherheitsfaktoren bei der Ableitung des PNEC berücksichtigt wird.

Ein anderer Bewertungsansatz besteht in der Ermittlung der Sensitivitäts-Verteilung möglichst vieler Organismen. Hierbei werden die akuten (LC50, EC50) und/oder chronischen (NOEC, LOEC, EC10) Toxizitäten in einer aufsteigenden Reihe hinsichtlich der Schadstoffkonzentration und Wirkung geordnet und die Arten-Sensitivitäts-Verteilungen (Species Sensitivity Distributions, SSD) über eine nicht lineare Regressionsanalyse graphisch dargestellt. Dann wird ein Prozentsatz von z.B. 5 % angenommen, der als akzeptable Gesamtwirkung auf alle untersuchten Organismen gewertet wird, und die entsprechende Schadstoffkonzentration berechnet. Hieraus lassen sich die Schadstoffkonzentrationen, hinsichtlich akuter und chronischer Wirkungen ableiten, bei denen 95 % aller Organismen geschützt sind. Nach diesem Konzept berechnete (Wolfram 2014) für Chlorid die akute und chronische Toxizität als SSD und leitete hieraus Richtwerte für Chlorid im Fließgewässer ab (siehe Kapitel 3.2.7).

2.1.4 Korrosion an Bauwerken und Fahrzeugen

Streusalze können korrosiv auf Bauwerke und Fahrzeuge wirken. Im Rahmen von Arbeitspaket 1.1 wurde eine Literaturrecherche zu aktuellen Erkenntnissen hierzu durchgeführt und geprüft, inwiefern eine Berücksichtigung innerhalb der geplanten Ökobilanz und des Tools erfolgen kann.

2.1.5 Winterdienst und Verkehrsfluss

Die Durchführung des Straßenwinterdienstes erfolgt mit dem Ziel, allen Verkehrsteilnehmer*innen einen sicheren Verkehr zu ermöglichen und hierfür Gefahrensituationen, die Unfälle auslösen können, sowie Bedingungen, die Staus verursachen können, zu verhindern oder zu beseitigen. Im Rahmen von Arbeitspaket 1.1 wurde eine Literaturrecherche hierzu durchgeführt und geprüft, inwiefern eine Berücksichtigung innerhalb der geplanten Ökobilanz und des Tools erfolgen kann.

2.1.6 Einbezug von Akteuren des Straßenwinterdienstes (AP 1.2)

Der Einbezug von Praxisakteuren aus dem Bereich Winterdienst sollte die Entwicklung des Tools unterstützen. Ziel war es, die Situation in Autobahn- und Straßenmeistereien als zukünftigen Nutzer*innen des Tools zu berücksichtigen, z.B. in Bezug auf die Verfügbarkeit von Primärdaten (z.B. gefahrene Kilometer, Kraftstoffverbrauch) und typische Ausstattungen (z.B. Fahrzeuge) sowie und künftig beabsichtigte bzw. angedachte Änderungen.

Dazu wurden im Zeitraum März bis Juni 2022 insgesamt fünf Expert*innen-Interviews mit Vertreter*innen von vier unterschiedlichen Akteursgruppen durchgeführt:

Autobahnmeistereien

Seit Beginn des Jahres 2021 ist für den Betrieb der Autobahnen in Deutschland die neugegründete Autobahn GmbH zuständig. Die dazugehörigen 157 Autobahnmeistereien sind in 9 regionale Niederlassungen aufgeteilt. Mit den folgenden beiden Autobahnmeistereien wurde jeweils ein Expert*inneninterview durchgeführt:

- AM Rottweil (Niederlassung Südwest)
- AM Mendig (Niederlassung West)

Eine Befragung von Meistereien der privat betriebenen Autobahnstrecken erfolgte nicht, da davon ausgegangen wird, dass diese den Winterdienst in enger Anlehnung an die Praxis der Autobahn GmbH organisieren und durchführen.

Straßenmeistereien

Auch nach Gründung der Autobahn GmbH werden die Bundesstraßen von den Straßenverwaltungen der Bundesländer betreut. Insgesamt sind in Deutschland derzeit rund 560 Straßenmeistereien für den Betriebsdienst auf den Bundesstraßen zuständig. Es wurde mit folgenden, für den

Betriebsdienst Verantwortlichen nachstehender Länderverwaltungen jeweils ein Expert*inneninterview geführt:

- Landesbaudirektion Bayern, München/Nürnberg

Kommunen

- Stadt München

Hersteller von Winterdienstfahrzeugen

Auf dem deutschen Markt bieten derzeit 8 Hersteller Fahrzeuge für den Winterdienst auf Bundesfernstraßen an. Es wurde mit einem Hersteller ein Expert*inneninterview geführt:

- Küpper-Weisser (Deutschland)

In den Interviews mit Akteuren, die selbst Winterdienst durchführen, wurden konkret folgende Fragenkomplexe zur Datenverfügbarkeit und Durchführungspraxis angesprochen:

- Art der Dokumentation von Winterdiensteinsätzen;
- Verfügbarkeit von Nachweisdokumente. Welche Zahlen müssen geschätzt werden?
- Verfügbarkeit von Daten für die Winter 2020/21 und/oder 2021/22?
- Streustrecke (km, Fläche);
- Entfernungen für die Hin- und Rückfahrt zum Einsatzgebiet;
- Fahrzeugbestand (Emissionsklassen, EURO-Norm, Nutzlast, zulässiges Gesamtgewicht);
- Streustoffe/Taumittel: Verbrauch, Herkunft, Transportwege und -mittel (LKW, Bahn, Schiff), ggf. Zwischenlager;
- Salz- bzw. Soleverbrauch einzelner Volleinsätze (FS30, FS100) verfügbar bzw. ermittelbar;
- Winterdienstbezogener Kraftstoffverbrauch (Radlader, Räum- und Streufahrzeuge, Kontrollfahrten) und eine Abgrenzung von anderen Nutzungen
- Winterdienstbezogener Stromverbrauch (Pumpen und Heizung von Soleanlage mit den entsprechenden Lagerkapazitäten etc.)
- Winterdienstbezogener Wasserverbrauch (Soleanlage, Fahrzeugwäsche)
- Ölverbrauch (Hydraulik, etc.)
- Einflussfaktoren auf den Streumittelverbrauch
- Einflussfaktoren auf Kraftstoffverbrauch

Im Expert*inneninterview mit dem Hersteller standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Kraftstoffverbräuche der verschiedenen Fahrzeuge und Geräte
- Herstellerempfehlungen im Hinblick auf Fahrzeug- & Gerätereinigung und -konservierung sowie Motorölwechsel und Hydrauliköle
- Entwicklung und Einsatz neuer Technologien und Antriebe

2.2 Entwicklung des ÖkoWin-Tools (AP 2)

Hinweis: Das Tool wird im Folgenden nach dem Projektnamen ÖkoWin als ÖkoWin-Tool bezeichnet.

2.2.1 Eckpunkte bei der Toolentwicklung

Das ÖkoWin-Tool wurde auf Basis von Microsoft® Excel® (Microsoft 365) entwickelt.

Bei der Entwicklung wurde auf folgende Punkte besonderer Wert gelegt:

- Die Nutzung des ÖkoWin-Tools sollte möglichst einfach sein und auch ohne Schulung erfolgen können. Vor diesem Hintergrund wurden entsprechende Erläuterungen und Hintergrundinformationen im Tool selbst integriert. Außerdem wurde eine kompakte Kurzbeschreibung des Tools mit Hintergrundinformationen und einer Anleitung im pdf-Format erstellt. Diese kann dann zusammen mit dem ÖkoWin-Tool zukünftigen Nutzer*innen zur Verfügung gestellt werden.

- Die im ÖkoWin-Tool hinterlegten Emissionsfaktoren sind öffentlich frei zugänglich. Vor diesem Hintergrund wurde auf die Verwendung von Daten aus der kostenpflichtigen Datenbank Ecolnvent verzichtet. Die verwendeten Datenquellen werden in Kapitel 6 dargestellt und erläutert.

2.2.2 Testphase und Finalisierung

Im ersten Schritt wurde ein Prototyp des ÖkoWin-Tools entwickelt, der dann der BAST und Praxisakteuren für eine 3-monatige Testphase zur Verfügung gestellt wurde. Gleichzeitig mit dem Prototyp des ÖkoWin-Tools wurde den potenziellen Nutzer*innen auch ein Fragebogen zur Verfügung gestellt, mit dem die Nutzerfreundlichkeit des Tools ermittelt werden sollte.

Auf Basis der Rückmeldungen aus der Testphase wurde das ÖkoWin-Tool dann überarbeitet und finalisiert.

3 Ergebnisse der Literaturanalyse

3.1 Auswertung von Ökobilanzen des Winterdienstes

3.1.1 Berücksichtigte Ökobilanzstudien

Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die im Rahmen des Projekts ausgewerteten Ökobilanzstudien. Die meisten Studien orientieren sich an den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Eine Ausnahme ist die Review-Studie Götzfried (2018) zu Treibhausgasemissionen, in der verschiedene Literaturquellen ausgewertet wurden.

Eine detaillierte Darstellung der Auswertung der berücksichtigten Ökobilanzstudien befindet sich in Kapitel 0 im Anhang (Tabelle 0-2 und Tabelle 0-3).

Titel der Studie	Quelle	Zielsetzung der Studie	Geographischer Bezug	Zeitlicher Bezug
Life cycle assessment of winter road maintenance	(Vignisdottir et al. 2020)	Ermittlung der Umweltwirkungen von Gegenwart und Zukunft - Identifizierung der Hot-spots - Ableitung von Verbesserungspotenzialen	Mittel-Norwegen	- Winterperiode 2016/2017 - Zukunftsszenario für das Jahr 2050
Highway Deicer Use in Oregon: Life Cycle Assessments of Magnesium Chloride and Sodium Chloride	(LaLonde 2019)	Ermittlung und Vergleich der Umweltauswirkung von Winterdienst auf Basis von NaCl (Trocken) und MgCl ₂ (Sole)	USA (Oregon Department of Transportation)	2012-2017
Life Cycle assessment of Anti- and De-icing Operations in Norway	(Vignisdottir et al. 2016)	Abschätzung der Umweltauswirkungen von Maßnahmen zur Verhinderung von Eisbildung und zur Enteisung in Norwegen.	Norwegen	2010-2015
Environmental Life-Cycle Assessment of Winter Maintenance Treatments for Roadways	(Fitch et al. 2013)	Ableitung von Maßnahmen, zur Reduktion von Umweltauswirkungen für das Verkehrsministerium in den USA	Eine Berg-, eine Vorgebirgs- und eine Küstenregionen im Bundesstaat Virginia (USA)	k.A.
Ökobilanz des Winterdienstes in den Städten München und Nürnberg - Stadt Nürnberg	(Quack et al. 2004)	Darstellung und Auswertung der mit dem kommunalen Winterdienst in der Stadt Nürnberg verbundenen Umweltauswirkungen	Deutschland	Zwei Winterperioden: 2002/2003 und 2001/2002

Titel der Studie	Quelle	Zielsetzung der Studie	Geographischer Bezug	Zeitlicher Bezug
Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Entscheidungsmittel für Straßen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024	(Gartiser et al. 2003)	Abschätzung der potenziellen Umweltauswirkungen ausgewählter Streumittel, um festzustellen, ob es signifikante Unterschiede in Bezug auf die Herstellung und Ausbringung gibt, und ob für die Vergabe eines Umweltzeichens eine eingehende, normkonforme Ökobilanz angezeigt ist.	Deutschland	Kein Bezug auf eine konkrete Zeit- oder Winterperiode. „Einmalstreuung auf Landstraße“ auf Basis der im Rahmen der Studie verfügbaren Datengrundlagen
Ökobilanz Auftausalze: Vergleich der lokalen Siedesalz Produktion Riburg gegenüber unterschiedlichen Importen von Siedesalz, Steinsalz und Meersalz	(Stettler und Kägi 2019)	Analyse der Umweltauswirkungen der in der Saline Riburg (Schweiz) hergestellten Auftausalze und der Auswirkungen einer Umstellung der Strombereitstellung auf Wasserkraft sowie ein Vergleich mit den Auswirkungen von im Ausland hergestellten und nach Riburg transportierten Auftausalzen.	Schweiz	2017/2018
Global Warming Potential of Deicers	(Götzfried 2018)	Vergleich des Treibhauspotenzials von verschiedenen Streumitteln.	Global	Unterschiedlich in Abhängigkeit von den einbezogenen Einzelstudien. Ca. ab dem Jahr 2000
Vergleichende Ökobilanz drei verschiedener Auftausalze: Steinsalz, Siedesalz und Meersalz	(Stratmann und Quack 2009a), Quack et al. (2010)	Ermittlung der Umweltauswirkungen für die Herstellung von Steinsalz, Siedesalz und Meersalz als Streumittel. Ableitung von Optimierungspotenzialen.	Deutschland und Mitteleuropa	2007/2008
Salz- und Splittstreuung im Winterdienst	Ruess (1998)	Erarbeitung von objektiven und praxisbezogenen Entscheidungshilfen zur Ermittlung der Einsparungsmöglichkeiten bei der Splitt- oder Salzanwendung im Winterdienst (innerörtlicher Bereich). Im Fokus stand dabei eine integrale Betrachtung der Folgen für Sicherheit, Umwelt und Wirtschaftlichkeit.	Schweiz	Januar bis April 1996 November 1996 bis April 1997

Tabelle 3-1: Überblick über die ausgewerteten Ökobilanzstudien

3.1.2 Ergebnisse der Auswertung

Die Auswertung orientierte sich an der in Tabelle 2-1 (siehe Kapitel 2.1.2) dargestellten Auswertungsmatrix. Die Ergebnisse der Auswertung können wie folgt zusammengefasst werden.

Funktionelle Einheit

In den ausgewerteten Studien wurden die folgenden funktionellen Einheiten, die den quantifizierten Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit abbilden, verwendet:

- Geräumte Kilometer (Vignisdottir et al. 2020; LaLonde 2019; Vignisdottir et al. 2016);
- Behandelte Straßenfläche als Länge x Streubreite (Gartiser et al. 2003).
- Alle Aktivitäten des kommunalen Winterdienstes auf dem Gebiet einer Stadt, im konkreten Fall der Stadt Nürnberg, während einer Winterperiode (Quack et al. 2004)

- Bereitstellung von einer Tonne Auftausalz beim Hersteller resp. bis Zwischenlager. (Stratmann und Quack 2009a; Stettler und Kägi 2019).

Systemgrenzen

Die Systemgrenzen, d.h. die Festlegung, welche Prozesse Teil eines Produktsystems sind und welche nicht, wurden je nach Zielsetzung der Studien unterschiedlich definiert:

- Bei Studien, die den gesamten Winterdienst betrachten, wurden entlang des Lebenszyklus die Prozesse Rohstoffentnahme, Bereitstellung der Streumittel, Antransport der Streumittel vom Produktionsstandort zum Lager sowie die Ausbringung einbezogen.
- Bei Studien, in der nur Streumittel untersucht wurden, wurden die Prozesse Herstellung und Antransport bis Zwischenlager in die Systemgrenzen einbezogen.

Am Ende des Lebensweges (End-of-Life), d.h. nach der Ausbringung muss Streusalz im Gegensatz zu abstumpfenden Streumitteln, wie z.B. Splitt, nicht wieder eingekehrt werden. Streusalz wird u.a. durch Regen und Schmelzwasser in Böden und Gewässer verbracht (Run-off). Diese End-of-Life-Phase wurde in den ausgewerteten Studien entweder aus den Systemgrenzen ausgeschlossen, weil es kein ökobilanzielles Wirkungsabschätzungsmodell für die hier relevanten ökotoxischen Auswirkungen gibt (vgl. Kapitel 3.1.3), oder auf Inventarebene abgehandelt (z.B. als Chloremissionen).

Die Fahrzeugreinigung wurde nur bei einigen Studien erwähnt oder untersucht. Quack et al. (2004) berücksichtigen die mit der Fahrzeugreinigung verbundenen Wasser- und Stromverbräuche anhand der Anzahl der Winterdiensteseinsätze und den Spezifikationen der eingesetzten Reinigungsgeräte. Quack et al. (2004) haben dabei nicht nur den maschinellen Winterdienst sondern auch den manuellen Winterdienst für eine Stadt als Ganzes betrachtet. LaLonde (2019) diskutiert für die USA, dass die Fahrzeugreinigung nach dem Winterdienst nicht so häufig durchgeführt wird wie es den Empfehlungen der Hersteller entsprechen würde. In diesem Fall würde die Verwendung Gerätespezifikationen für den Wasserverbrauch der Reinigung zu einer Überschätzung des tatsächlichen Wasserverbrauchs in der Praxis führen.

Die Bereitstellung der Infrastruktur, d.h. die Herstellung, Distribution und Entsorgung von Maschinen, Fahrzeugen sowie die Errichtung und Entsorgung von Gebäuden für den Winterdienst, spielt aufgrund der vergleichsweise langen Lebensdauern für die Ergebnisse von Ökobilanzen eine vernachlässigbare Rolle. Vor diesem Hintergrund befindet sie sich außerhalb der Systemgrenzen. Dies entspricht der gängigen Praxis in Ökobilanzen.

Umweltwirkungskategorien

Im Hinblick auf die berücksichtigten Umweltwirkungskategorien werden in den ausgewerteten Studien entweder die in der Ökobilanz-Praxis gängigen Bewertungsmethoden, wie z.B. (CML 2016)⁴) verwendet, mit denen eine spezifische Auswahl an Wirkungskategorien abgedeckt wird oder es werden selektiv bestimmte Wirkungskategorien ausgewählt. Das Treibhauspotenzial ist die am häufigsten betrachtete Wirkungskategorie. Eine Übersicht, welche Umweltwirkungskategorien in den Studien jeweils betrachtet wurden, befindet sich in Tabelle 0-3 im Anhang.

Auch wenn toxizitätsbezogene Wirkungskategorien, d.h. Humantoxizität und Ökotoxizität, in einem Teil der Ökobilanzstudien betrachtet wurden, werden die Toxizitätswirkungen aus dem Verbleib der Streumittel in der Umwelt nach der Ausbringung aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt, wie z.B. in (Vignisdottir et al. 2020; Vignisdottir et al. 2016). Einzelne Studien berechnen die Gesamtchloridemissionen in die Umwelt (Fitch et al. 2013; LaLonde 2019). Allerdings handelt es sich dabei nicht um eine Wirkungskategorie und entsprechend ist damit auch keine direkte Aussage zu potenziellen Umweltwirkungen (z.B. zu Toxizität im Süßwasser) der Chlorid-Emissionen möglich.

Der Wasserverbrauch wurde nur in einem Teil der Studien betrachtet (LaLonde, 2019; Fitch et al. 2013). Die Studie (Fitch et al. 2013) mit geografischem Bezug USA zeigt, dass die für die

⁴ Das Umweltinstitut der Universität Leiden, Niederlande (Institute of Environmental Sciences, Leiden University) hat die *Centrum voor Milieukunde* (CML)-Methode entwickelt.

Soleproduktion benötigte Wassermenge im Vergleich zum Gesamtwasserverbrauch für den Salzabbau („Rock salt“) sehr gering ist.

Es gibt darüber hinaus Aspekte, die für Deutschland nicht relevant sind: Vignisdottir et al. (2020) berücksichtigen zusätzlich noch direkte Emissionen von Feinstaub, da in Norwegen auf Winterdienstfahrzeugen Spikereifen verwendet werden. In Deutschland werden keine Fahrzeuge mit Spikereifen verwendet. Vor diesem Hintergrund ist dieser Aspekt für dieses Projekt nicht von Relevanz.

Datengrundlagen – Verwendung von Primär- und Sekundärdaten

Grundsätzlich basieren die Berechnungen in den ausgewerteten Studien sowohl auf Primärdaten als auch auf Sekundärdaten. Primärdaten sind spezifische Daten, die in der Regel für die Kernprozesse (z.B. die Ausbringung der Streumittel) des jeweils untersuchten Systems ermittelt werden. Bei Sekundärdaten handelt es sich um Datensätze aus der Literatur, die z.T. in Ökobilanz-Datenbanken zusammengestellt sind. Diese werden für Prozesse verwendet, die nicht im Zentrum der jeweiligen Analyse stehen (Kernprozesse), sondern vor- oder nachgelagert sind, wie z.B. die Herstellung von Kraftstoffen oder die Emissionen der Fahrzeuge. Bei der Verwendung von Sekundärdaten wird in den analysierten Studien häufig auf die Ökobilanz-Datenbank Ecoinvent⁵ zurückgegriffen.

Die Ökobilanzstudie von Stratmann und Quack (2009a) zu den drei Auftausalzen Steinsalz, Siedesalz und Meersalz wird in Studien oft als Datengrundlage für die Modellierung der Produktion von Natriumchlorid verwendet, obwohl sie schon relativ alt ist. Dies geschah beispielsweise in Stettler und Kägi (2019) und Götzfried (2018). Es konnte im Rahmen des Projekts keine aktuellere Ökobilanzstudie identifiziert werden, in der die Sachbilanzdaten zur Herstellung von Natriumchlorid als Streumittel in ähnlicher Ausführlichkeit wie in Stratmann und Quack (2009a) veröffentlicht wurden.

Im Rahmen der Literaturlauswertung wurden verschiedene Datenlücken identifiziert:

Herstellung von MgCl_2 : Es konnte kein geeigneter Datensatz/ keine geeignete Datengrundlage für die Herstellung von MgCl_2 identifiziert werden. Die Studie (LaLonde 2019) mit geografischem Bezug USA modelliert die Gewinnung von MgCl_2 aus dem Great Salt Lake in Utah/USA. Durch Hinzufügen von CaCl_2 zur MgSO_4 -haltigen Sole wird MgCl_2 gewonnen. Die Menge des hinzugefügten CaCl_2 wird anhand des stöchiometrischen Verhältnisses berechnet⁶. Die in Deutschland für den Winterdienst verwendete MgCl_2 -Sole wird demgegenüber aus natürlichen Vorkommen durch Lösungsbergbau hergestellt. Daher muss die Datengrundlage für Produktion der MgCl_2 in Deutschland oder in europäischen Ländern weiter recherchiert und im Rahmen der Toolerstellung eine eigene Modellierung für die Produktion entwickelt werden.

Additive in Streumitteln: In den analysierten Studien wurden keine Aussagen zu den Umweltauswirkungen von Additiven, Antibackmittel, Korrosionsschutzmitteln und Staubbinder sowie technischen Hilfsstoffen gefunden. In den meisten Studien wird der Umgang mit Additiven nicht dokumentiert. Die Studien (Stettler und Kägi 2019; Stratmann und Quack 2009a; Quack et al. 2004; Gartiser et al. 2003) haben explizit beschrieben, dass die Additive wegen des sehr kleinen Anteils (Abschneidekriterium) nicht berücksichtigt werden. Die eingesetzten technischen Hilfsstoffe für die Siedesalz-Herstellung sind Flockungsmittel, Härtestabilisatoren, Entschäumer, deren Anteil ca. 3 ppm und 30 ppm liegen (Stratmann und Quack 2009a). Tabelle 3-2 bietet einen Überblick über die in Deutschland in den betrachteten Tausalzen verwendeten Additive. In NaCl ist immer ein Antibackmittel enthalten (Götzfried 2016). Als Antibackmittel wird entweder Natriumferrocyanid ($\text{Na}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) oder Kaliumferrocyanid ($\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) verwendet. Die Dosiermenge der Antibackmittel liegt bei Steinsalz in der Höhe von 0,0005 %-0,0125% und bei Siedesalz in der Höhe von 0,0005 %-0,002 %; jeweils berechnet als Ferrocyanid-Anion nach DIN EN 16811-1⁷).

⁵ <https://www.ecoinvent.org/> (zuletzt abgerufen am 19.12.2023)

⁶ $\text{MgSO}_4 + \text{CaCl}_2 = \text{CaSO}_4 + \text{MgCl}_2$

⁷ Winterdienstsausrüstung - Enteisungsmittel - Teil 1: Natriumchlorid - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 16811-1:2016

Additive	NaCl	CaCl ₂	MgCl ₂
Korrosionsschutzmittel (Verringerung der Korrosionswirkung)	Werden in Deutschland nicht verwendet	Trocken: Enthält keine Antibackmittel oder sonstigen Additive. Calciumchlorid-Sole enthält keine Additive.	Magnesiumchlorid-Sole enthält keine Additive.
Antibackmittel (Sicherstellung eines rieselfähigen Zustandes)	<u>Steinsalz</u> : Natriumferrocyanid oder Kaliumferrocyanid (5-125ppm) <u>Siedesalz</u> : Natriumferrocyanid oder Kaliumferrocyanid (5-20ppm)		
Staubbinder	0,1 % Magnesiumchlorid	Keine	Keine

Tabelle 3-2: Überblick über verwendete Additive in den Tausalzen NaCl, MgCl₂ und CaCl₂

Kürzer Überblick über die erzielten Ergebnisse der ausgewerteten Studien

Den größten Beitrag an den Umweltauswirkungen des Winterdienstes haben die verbrauchten Streumittel und die Kraftstoffe für die Ausbringung. Die Verbrauchsmengen von Streumitteln und Kraftstoffen sind dabei von den spezifischen Rahmenbedingungen des jeweiligen Winterdienstes abhängig, z.B. von den Witterungsbedingungen, den Straßenzuständen, der Fahrzeug- und Streutechnik, den Streumitteln, den konkreten Einsätzen (Vignisdottir et al. 2020). Als weiterer wichtiger Faktor hat sich außerdem der Transport der Streumittel vom Produktions- zum Einsatzort ggf. etwaiger Zwischenlager erweisen. Dabei beeinflussen sowohl die jeweiligen Entfernungen als auch die Transportmittel die Höhe der Umweltauswirkungen.

Bei der Ausbringung sind direkte Emissionen aus der Verbrennung von Kraftstoffen sehr relevant für das Treibhauspotenzial. Demgegenüber spielt für das Ozonabbaupotenzial und das Photooxidantienbildungspotenzial die Vorkette, d.h. die Herstellung der Kraftstoffe eine große Rolle (Vignisdottir et al. 2016)

Bedeutung der Streumittel

Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Herstellung von Natriumchlorid – als Steinsalz, Siedesalz oder Meersalz – sind mit unterschiedlich hohen Umweltauswirkungen verbunden. (Stratmann und Quack 2009a) haben in ihrer Untersuchung gezeigt, dass die Herstellung von Siedesalz einen deutlich höheren Energiebedarf hat und daher prozessbedingt deutlich höhere Umweltauswirkungen verursacht als die Steinsalz- und Meersalz-Herstellung. Meersalz hat die geringsten Umweltauswirkung (Stratmann und Quack 2009a).

Werden nur die Produktion und der Antransport der Salze betrachtet, nimmt bei Siedesalz die Herstellung tendenziell einen höheren Anteil an den Umweltauswirkungen im Vergleich zum Transport ein als bei Steinsalz und Meersalz (Stettler und Kägi 2019; Stratmann und Quack 2009a).

Die Anwendung der Streumittel in Form von Sole statt in trockener Form führt zu einer erheblichen Verringerung aller Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus (LaLonde 2019; Fitch et al. 2013; Quack et al. 2004)⁸.

Fitch et al. (2013) untersuchten die Umweltauswirkungen des Winterdienstes mit Trockensalz sowie Natriumchlorid- und Calciummagnesiumacetat-Sole⁹ in drei Regionen des Bundesstaats Virginia in den USA: einer Küsten-, einer Vorgebirgs- und einer Gebirgsregion. Sie konnten zeigen, dass die Umweltauswirkungen des Winterdienstes in der Küstenregion am geringsten waren. Der Grund hierfür ist, dass dort im Verhältnis mehr Sole als Trockensalz eingesetzt wurde. Dabei wird Salzsole präventiv und Trockensalz kurativ verwendet: Vor einem Sturm wird Sole eingesetzt und während eines Sturms Trockensalz. Da in der Küstenregion Stürme in der Regel kürzer sind als in den beiden anderen Regionen ist, erfolgen dort mehr präventive Einsätze mit Sole als kurative Einsätze mit Trockensalz.

3.1.3 Sonderfall Umweltwirkungskategorie Ökotoxizität

Eine der im Projekt zu untersuchenden Fragestellungen war, inwiefern sich die Ökotoxizität nach der Ausbringung der Streumittel in einer Ökobilanz methodisch abbilden lässt. Hierzu wurden die einschlägigen Wirkungsabschätzungsmodelle von Ökobilanzen geprüft. Einen Überblick der hierbei berücksichtigten Modelle bietet Tabelle 3-3. Im Fokus der Prüfung stand dabei die Frage, ob im jeweiligen Modell Charakterisierungsfaktoren¹⁰ für die betrachteten Streumittel (Chlorid, NaCl, CaCl₂ und MgCl₂) vorhanden sind und inwiefern es Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen gibt. Im Ergebnis zeigte sich, dass keine Wirkungsabschätzungsmethode Charakterisierungsfaktoren für Chlorid, NaCl, CaCl₂ und MgCl₂ enthält.

Methode	Ökotoxizitätsrelevante Wirkungskategorien	Erläuterung in Bezug auf betrachtete Streumittel	Quelle
CML Methode	Ökotoxizität - Süßwasser	Keine Charakterisierungsfaktoren für Chlorid, NaCl, CaCl ₂ und MgCl ₂ vorhanden	(CML 2016)
	Ökotoxizität - terrestrisch		
	Ökotoxizität - Meerwasser		
ReCiPe 2016 Mid-point (H)	Ökotoxizität - Süßwasser	Keine Charakterisierungsfaktoren für Chlorid, NaCl, CaCl ₂ und MgCl ₂ vorhanden	(ReCiPe - Characterisation factors 2018)
	Ökotoxizität - terrestrisch		
PEF bewertet Süßwassertoxizität auf Basis von USEtox®-Methode (s. unten)	Ökotoxizität - Süßwasser	Charakterisierungsfaktoren für NaCl, MgCl ₂ und Chlorid sind vorhanden.	(European Platform on Life Cycle Assessment 2019)

⁸ Bei der Interpretation der Ergebnisse der Studie von LaLonde 2019 ist die Unsicherheit der Annahmen für die Ableitung der Menge an MgCl₂-Sole (30%) zu berücksichtigen. Die tatsächlich ausgebrachte Menge an Magnesiumchlorid steht in der Studie von (LaLonde 2019) im Gegensatz zu Natriumchlorid nicht zur Verfügung. Es wurde daher angenommen, dass die Verbrauchsmenge von MgCl₂ 90 % der in derselben Wintersaison gekauften Menge entsprach und maximal 60 Gallonen pro Fahrbahnmeile (≈141 Liter/km) zugrunde gelegt. Die Bandbreite des Soleeinsatzes liegt laut Studie zwischen 35 Liter und 141 Liter pro km („15-60 gallons per lane mile“). Das bedeutet, dass ein maximaler Wert für die Einschätzung der MgCl₂-Verbrauchsmenge für den Vergleich zwischen MgCl₂ und NaCl verwendet wurde.

⁹ Zu beachten ist, dass CMA nicht Gegenstand der vorliegenden Studie ist. CMA steht für Kalziummagnesiumacetat.

¹⁰ Charakterisierungsfaktor: Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird (DIN EN ISO 14040)

USEtox®	Ökotoxizität - Süßwasser	Die in Ökobilanzen für die Bewertung der Toxizität verwendete Methode "USEtox" ist derzeit für die Charakterisierung der meisten organischen Stoffe und Metalle geeignet, nicht aber für anorganische Stoffe	(Fantke 2022)
---------	--------------------------	--	---------------

Tabelle 3-3: Überblick zu vorhandenen Wirkungsabschätzungsmodellen für die Bewertung von potenziellen Ökotoxizitätswirkungen in Ökobilanzen

Eine Ausnahme stellt die PEF-Methode¹¹ dar. Die PEF-Methode bewertet die Süßwassertoizität auf Basis der sogenannten USEtox®-Methode und fügt darüber hinaus zusätzliche Charakterisierungsfaktoren für weitere chemische Stoffe hinzu, u.a. auch zu Chlorid, NaCl und MgCl₂ (vgl. Tabelle 3-3), allerdings nicht für CaCl₂. Es ist allerdings unklar, wie für die PEF-Methode die Charakterisierungsfaktoren für Chlorid, NaCl und MgCl₂ abgeleitet wurden. Ein Austausch mit dem Entwickler der USEtox®-Methode im Rahmen des Projekts zeigte, dass es aufgrund fehlender Informationen und Daten über komplexe ökotoxikologische Wechselwirkung von anorganischen Stoffen derzeit keine wissenschaftlich begründeten Charakterisierungsfaktoren für Chlorid, NaCl, CaCl₂ und MgCl₂ gibt (Fantke 2022).

Vor diesem Hintergrund ist es nicht möglich, die Wirkungskategorie Ökotoxizität im Rahmen einer Ökobilanz abzubilden, insbesondere nicht für den in diesem Kontext besonders relevanten Verbleib der Streumittel nach der Ausbringung. Die Umweltwirkungskategorie Ökotoxizität wird daher im ÖkoWin-Tool nicht berücksichtigt, dafür aber im nachfolgenden Kapitel 3.2 dieses Berichts ausführlich behandelt.

3.2 Potenzielle Ökotoxizitätswirkung nach der Ausbringung – Ergebnisse der Auswertung spezifischer Studien jenseits von Ökobilanzen

3.2.1 Datengrundlage

Die Umweltwirkungen von Salzeinleitungen in Gewässer und die Folgen der Anwendung von Streusalz im Winterdienst auf Wasser- und Bodenorganismen sowie auf Pflanzen werden schon seit vielen Jahrzehnten diskutiert. Die wichtigsten Arbeiten zu Streusalzschäden auf die Umweltkompartimente Oberflächengewässer, Grundwasser, Böden und Sediment in Deutschland wurden in den 80er und 90er Jahren veröffentlicht (Augustin und Gregor 1980), (Brod 1993), (Brod 1995), (Evans und Frick (2001)). Zu unterscheiden sind hierbei allgemeine Aussagen zur Toxizität von Streusalz auf verschiedene Organismen anhand von Feldbeobachtungen und die Untersuchung der ökotoxischen Wirkung im Labor auf ausgewählte repräsentative Organismen anhand von standardisierten Verfahren. Durch die direkte Testung lässt sich auch eine vergleichende Bewertung verschiedener Streusalze durchführen und hieraus ein Ranking der Toxizität ableiten.

In einer Machbarkeitsstudie für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Straßen und Wege im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden die im Jahr 2002 verfügbaren Ökotoxizitätsdaten für die wichtigsten anorganischen und organischen Auftaumittel dokumentiert (Gartiser et al. 2003). Hierbei ergab sich eine sehr gute Datenlage für die akute aquatische Ökotoxizität, während zur chronischen aquatischen und terrestrischen Ökotoxizität erhebliche Datenlücken in standardisierten Testsystemen bestanden. Allerdings lagen zahlreiche Arbeiten vor, in denen die Auswirkungen von Streusalz auf die Biozönose anhand nicht standardisierter Tests beschrieben wurden. Durch die Europäische Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) hat sich die Datenlage in den vergangenen

¹¹ Product Environmental Footprint (PEF): eine von der Europäischen Kommission entwickelte Methode für die Berechnung des Umwelt-Fußabdruck (Product Environmental Footprint) eines Produktes oder einer Dienstleistung

Jahren deutlich verbessert.¹² Es wurde eine aktuelle Recherche zur Ökotoxizität anhand der in der ECHA-Datenbank hinterlegten Registrierungsdossiers durchgeführt. Hierbei wurde der Schwerpunkt auf die im Straßenwinterdienst gängigen Streustoffe Natriumchlorid (NaCl), Calciumchlorid (CaCl₂) und Magnesiumchlorid (MgCl₂) gelegt. Die technischen Anforderungen für diese Streumittel sind in den Hinweisen für die Beschaffung von tauenden und abstumpfenden Streustoffen für den Winterdienst beschrieben (H BeStreu 2017). Zudem wurden Recherchen zur Ökotoxizität von Kalium- bzw. Natriumhexacyanidoferrat durchgeführt, die dem Streusalz als Antibackmittel zugesetzt werden (Kamptner et al. 2017). Die gut wasserlöslichen Eisencyanidsalze gelten in ihrer stabilen Komplexform als nicht sehr toxisch, ein Teil kann allerdings unter Lichteinfluss zum toxischen Cyanwasserstoff photooxidiert werden. In der Studie von Pandolfo et al. (2012) waren die Auswirkungen der Ferrocyanidzusätze allerdings im Vergleich zur Wirkung des Natriumchlorid vernachlässigbar (zitiert nach Wolfram (2014)).

Die in den Registrierungsdossiers der wichtigsten Streustoffe dokumentierten Daten stellen die wichtigste Datengrundlage dar. Es sei darauf hingewiesen, dass die auf der ECHA-Website dokumentierten Daten, insbesondere solche zu neueren GLP-Studien, urheberrechtlich geschützt sein können. Auf publizierte Arbeiten kann verwiesen werden. Im vorliegenden Fall werden die Originalquellen oftmals nicht vollständig in der ECHA-Datenbank zitiert, konnten aber meist über weitergehende Internet- und Literaturrecherchen identifiziert werden. Weitere konsultierte Stoffdatenbanken umfassten die „OECD Existing Chemicals Database“¹³ sowie die „ECOTOX-Database“ der US EPA.¹⁴ Alle drei Datenbanken werden in der Metadatenbank eChemPortal referiert.¹⁵ Für Calciumchlorid, Magnesiumchlorid und Kaliumchlorid liegen auch Initial Assessment Reports der OECD vor (OECD SIDS), in denen ältere Studien zur Ökotoxizität zusammengefasst sind und die ebenfalls über die OECD Datenbank verfügbar sind.

Zudem wurde eine aktuelle Literatur- (Scopus, Pubmed) und Internetrecherchen (u.a. Google scholar) zu den anorganischen Streumitteln durchgeführt.

Auch durch Berücksichtigung neuerer Übersichtsarbeiten konnten die Datenlücken weiter geschlossen werden (Wolfram 2014; SEWRPC 2016; Honarvar Nazari et al. 2021) (Szklares et al. 2022).

3.2.2 Aquatische Ökotoxizität

Akute aquatische Toxizität

In der Chemikalienbewertung werden üblicherweise akute aquatische Ökotoxizitätstests gegenüber Algen (OECD 201), Daphnien (OECD 202) und Fischen (OECD 203) gefordert. Die Toxizität gegenüber Bakterien wird standardmäßig anhand des Belebtschlammatmungshemmtests (OECD 209) bestimmt. Darüber hinaus existieren aber viele weitere standardisierte und nicht standardisierte Tests gegen weitere Organismengruppen wie Wasserlinsen (Pflanzen), Leuchtbakterien *Aliivibrio fischeri* (früher als *Vibrio fischeri* bezeichnet) und anderen Bakterienarten wie *Pseudomonas putida*, Amphipoden (z.B. *Hyalella azteca*) etc.

Bereits aus vorangegangenen Arbeiten ist bekannt, dass die akute Ökotoxizität der chloridhaltigen Auftausalze Natriumchlorid, Calciumchlorid und Magnesiumchlorid in Kurzzeittests in der Größenordnung vergleichbar ist. Die Konzentrationen, die einen 50%igen Effekt (EC50 bzw. LC50) auslösen, liegen weit über 1 g/L (Gartiser et al. (2003). Diese Ergebnisse wurden bei der Aktualisierung der Recherchen bestätigt (vgl. Tabelle 3-4).

Als Additiv wird dem Streusalzgranulat ggf. ein Antibackmittel zugesetzt, um die Rieselfähigkeit zu gewährleisten. In der Regel wird hierzu Kaliumhexacyanoferrat (CAS 13943-58-3) oder dessen Natrium- oder Calciumsalz eingesetzt. Kaliumhexacyanoferrat ist auch als

¹² <https://echa.europa.eu/de/> (Auswertung März bis April 2022)

¹³ <https://hvpchemicals.oecd.org/ui/Default.aspx> (Abgerufen am 02.05.2022)

¹⁴ <https://cfpub.epa.gov/ecotox/search.cfm> (Abgerufen am 02.05.2022)

¹⁵ <https://www.echemportal.org/echemportal/> (Auswertung März bis Mai 2022)

Lebensmittelzusatzstoff (E536) zur Verwendung in Speisesalz zugelassen. Im Registrierungsdossier der ECHA sind folgende akute Ökotoxizitätsdaten für Kaliumhexacyanoferrat aus GLP-Studien angegeben:

Algen *Raphidocelis subcapitata*, OECD 201: EC50 (72 h) = 3,1 mg/L

Daphnien *Daphnia magna*, OECD 202: EC50 (48 h) > 100 mg/L

Fische *Cyprinus carpio*, OECD 203: LC50 (96 h) > 100 mg/L

Belebtschlamm, OECD 209: EC50 (3 h) > 1000 mg/L

Mit Ausnahme des Algentests ist von einer sehr geringen akuten aquatischen Ökotoxizität des Kaliumhexacyanoferrats auszugehen. Gemäß der H BeStreu darf die Zugabemenge der $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ -Ionen (Ferro cyanid-Ionen) 125 mg/kg nicht überschreiten. In einer Studie im Auftrag der BAST wurden in realen Streusalzproben Konzentrationen im Bereich von 15,9 bis 173 mg/kg gefunden (Kamptner et al. 2017). In diesen Konzentrationen dürfte der Beitrag des Kaliumhexacyanoferrats an der akuten aquatischen Ökotoxizität zu vernachlässigen sein. Eine tiefergehende Recherche wurde daher nicht durchgeführt. Zur Verwendung weiterer Additive ist nichts bekannt, diese wären nach H BeStreu auch nicht zulässig. Die H BeStreu regelt andere Güteparameter wie den Sulfatgehalt, der wegen der Betonaggressivität in rieselfähigem NaCl $\leq 1,5$ Massenanteile betragen muss, oder den Gehalt an Schwermetallen.

			Natrium-chlorid	Vítězová et al. (2016)	Kalium-chlorid		Magnesium-chlorid	Vítězov á et al. (2016)	Calcium-chlorid	Vítězov á et al. (2016)
	Belebtschlamm	Atmungs-hemmung BOD nach 5 d	36% Hem-mung bei 1 M = 58 g/L				48% Hem-mung bei 1 M = 95 g/L		19% Hem-mung bei 1 M = 110 g/L (nicht signifi-kant)	
	Belebtschlamm	OECD 209	EC50 (3 h) > 1000 mg/L	GLP 2010						

Tokuz und Eckenfelder (1978) untersuchten die Hemmwirkung von Auftausalzen auf die Abwasserreinigungsleistung mittels des Belebtschlammverfahrens (kein Normverfahren). Die Hemmwirkung wurde über den Abbau von synthetischem Abwasser (bestehend aus Glukose, Peptone, Phosphatpuffer und Ammoniumsulfat) in Laborkläranlagen (Durchflusssystem) erfasst. Der EC10 von NaCl wurde zu 35 g/L bestimmt, so dass Belebtschlamm als sehr robust gegenüber Salzeinflüssen angesehen werden kann. Auch die spezifische Hemmung der als besonders empfindlich geltenden Nitrifikanten des Belebtschlammes in einem Sequencing-Batch-Reactor (SBR) erwiesen sich als relativ unempfindlich. Eine vollständige Hemmung (EC100) wurde hier erst ab Konzentrationen von 15 g/L erreicht (Ji et al. 2018)

Chronische aquatische Toxizität

Daten zur chronischen aquatischen Toxizität beschreiben langfristige Wirkungen auf Organismen und werden mit Schwellenwerten charakterisiert, d. h. den Konzentrationen, bis zu der bzw. ab der keine oder eine beginnende Toxizität bestimmt wird (LOEC, NOEC, EC10). Die wichtigsten Tests sind:

- Der Algenwachstumshemmtest nach OECD 201 über 72 h. Der EC50 wird hierbei als Maß für die akute ökotoxische Wirkung, der NOEC bzw. EC10 als Maß für die chronische ökotoxische Wirkung herangezogen.
- Der Daphnien.-Reproduktionstoxizitätstests nach OECD 211 über 21 Tage. Der Versuch startet mit frisch geschlüpften Daphnien (< 24 h), in der Regel wird hierfür die Spezies *Daphnia magna* eingesetzt. Es werden verschiedene Endpunkte erfasst. Neben der Anzahl von Nachkommen pro Muttertier als wichtigstem Endpunkt wird auch die Mortalität bei den Muttertieren sowie optional die Länge der Muttertiere miterfasst. Tests mit der Spezies *Ceriodaphnia dubia* dauern wegen des schnelleren Generationszyklus nur 7 Tage.
- Der Fish Early-Life Stage (FELS) Toxicity Test nach OECD 210 mit Zebraquarienfischen (*Danio rerio*) erfasst letale und subletale Effekte in den Lebensphasen vom Embryo bis zum juvenilen Fisch (30 d nach Schlupf). Es werden befruchtete Eier eingesetzt und nachdem diese geschlüpft sind, umgesetzt und mit einer definierten Nahrungsmenge entsprechend der jeweiligen Entwicklungsstufe gefüttert. Als Endpunkte werden Beobachtungen zu Schlupf und Überleben, Missbildungen und abnormes Verhalten sowie nach Ende die Körperlänge bzw. das Körpergewicht erfasst.

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3-5 zusammengefasst.

			Natriumchlorid	Kaliumchlorid		Magnesiumchlorid	Calciumchlorid	
	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	ASTM 715	EC50 (7 d) = 797 mg/L, NOEC (7d) = 354 mg/L	Aragão und Pereira (2003)	LOEC (12 d) ≤ 600 mg/L	Utz und Bohrer (2001)		
Amphipoden	<i>Hyalella azteca</i>	ASTM E7290-96	EC20 (42 d) = 183 mg/L Cl ⁻ bzw. 302 mg/L NaCl (Bio-masse) und 735 mg/L Cl ⁻ bzw. 1211 mg/L NaCl (Reproduktion)	Soucek und Dickinson (2016)				
Fische	<i>Onchorhynchus mykiss</i>	OECD 210				waived	ECHA	GLP 2017 NOEC (25 d) = 230 mg/L, LOEC (25 d) = 860 mg/L
	<i>Pimephales promelas</i>	OECD 210	NOEC (33 d) = 2652 mg/L, LOEC (33 d) = 352 mg/L	N-GLP 1985				
	<i>Onchorhynchus mykiss</i>	EPA-821-R-02-013			NOEC (7 d) = 500 - 2000 mg/L (growth)	La-zorchak und Smith (2007)		
	<i>Pimephales promelas</i>	EPA 600/4-89-001 larval survival and growth	NOEC (7 d) = 4000 mg/L, LOEC (7 d) = 8000 mg/L	Pickering et al. (1996)				

Es zeigt sich, dass die chronischen aquatischen Ökotoxizitäten in der Regel deutlich über 200 mg/L der jeweiligen Salze liegen. Bezieht man die Ökotoxizität auf das Chloridanion (Chloridanteil im Bereich von 48 % für KCL bis 75 % für MgCl_2), kommt man teilweise schon in den Bereich, bei dem das für Österreich vorgeschlagene Umweltqualitätsziel für chronische Ökotoxizität von 150 mg/L für Chlorid unterschritten wird. Natriumchlorid selbst scheint im Vergleich zu den anderen Salzen eine geringe chronische Fischtoxizität aufzuweisen ($\text{NOEC} > 2 \text{ g/L}$), Kaliumchlorid nimmt aufgrund der ausgeprägten Toxizität im chronischen Daphnientest eine Sonderstellung ein, der Datensatz ist jedoch nicht vollständig, da Daten zur chronischen Fischtoxizität fehlen.

3.2.3 Terrestrische Ökotoxizität

Allgemeine Angaben zur Ökotoxizität der üblichen Streusalze gegenüber Landpflanzen finden sich in den verschiedenen OECD SIDS zu den Auftausalzen. Demnach ist Kalium einer der drei Hauptnährstoffe und Chlorid ist ein essenzieller Mikronährstoff für Pflanzen. Der Kalium-Bedarf für ein optimales Pflanzenwachstum liegt im Bereich von 2 - 5 % des Pflanzentrockengewichts, der Chlorid-Bedarf bei den meisten Pflanzenarten im Bereich von 0,2 – 0,4 mg/g des Pflanzentrockengewichts (OECD SIDS 2001). Der Calciumgehalt von Pflanzen variiert zwischen 0,1 und > 0,5 % des Trockengewichts in Abhängigkeit von den Wachstumsbedingungen, der Pflanzenart und dem Pflanzenorgan (OECD SIDS 2002).

Es liegen verschiedene Testergebnisse zur akuten Pflanzentoxizität (OECD 208) sowie zur akuten (OECD 207) und chronischen (OECD 222) Regenwurmtoxizität vor (vgl. Tabelle 3-6),

			Natriumchlorid		Kaliumchlorid		Magnesiumchlorid		Calciumchlorid	
	<i>Lepidium sativum</i>	Ähnlich OECD 208	EC50 (7 d) = 6200 mg/L; EC10 (7 d) = 3100 mg/L (Keimtest)	Robidoux und Delisle (2001)						
	<i>Hordeum vulgare</i>	Ähnlich OECD 208	EC50 (7 d) = 22700 mg/L; EC10 (7 d) = 9900 mg/L (Keimtest)	Robidoux und Delisle (2001)						
	<i>Festuca rubra</i>	Ähnlich OECD 208	EC50 (7 d) = 8000 mg/L; EC10 (7 d) = 6000 mg/L (Keimtests)	Robidoux und Delisle (2001)						
	<i>Poa pratensis</i>	Ähnlich OECD 208	EC50 (7 d) = 3700 mg/L; EC10 (7 d) = 2500 mg/L (Keimtest)	Robidoux und Delisle (2001)						
	<i>Allium cepa</i>		EC50 (4 d) 6000 mg/L (Wurzellänge)	Joutti et al. (2003)			EC50 (4 d) 8600 mg/L (Wurzellänge)	Joutti et al. (2003)	EC50 (4 d) 7500 mg/L (Wurzellänge)	Joutti et al. (2003)
Amphibien	<i>Rana sylvatica</i>		LC50 (96 h) = 7560 mg/L	Harless et al. (2011)			LC50 (96 h)+ = 7110 mg/L	Harless et al. (2011)	LC50 (96 h) = 3980 mg/L	Harless et al. (2011)
	<i>Rana sylvatica</i>		LC50 (96 h) = 2640 mg/L	Harless et al. (2011)			LC50 (96 h) = 230 mg/L	Harless et al. (2011)		

		Natriumchlorid		Kaliumchlorid		Magnesiumchlorid		Calciumchlorid	
	<i>Ambystoma maculatum</i>	LC50 (96 h) = 1840 mg/L	Harless et al. (2011)				Harless et al. (2011)		
	<i>Bufo americanus</i>	LC50 (96 h) = 6140 mg/L	Harless et al. (2011)			LC50 (96 h) = 105 mg/L	Harless et al. (2011)		
	<i>Rana clamitans</i>	LC50 (96 h) = 406 mg/L	Harless et al. (2011)			LC50 (96 h) = 116 mg/L	Harless et al. (2011)		
	<i>Microhyla ornata</i>	LC50 (96 h) = 2711 mg/L	Padhye und Ghate (1992)	LC50 (96 h) = 1414 mg/L	Padhye und Ghate (1992)				

Tabelle 3-6: Terrestrische Toxizität von Auftausalzen

Deutsche Pflanzennamen: Silber Ahorn (*Acer saccharinum* L.), Japanische Eibe (*Taxus cuspidata*), Bergkiefer (*Pinus mugo*), Amur-Weide (*Salix sachalinensis*), Hänge-Birke (*Betula pendula*), Gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*), Pappel (*Populus* sp.), Sachalin-Tanne (*Abies sachalinensis*), Weißklee (*Trifolium repens* L.), Weißklee (*Trifolium repens* L.), Gartenkresse (*Lepidium sativum*), Gerste (*Hordeum vulgare*), Gewöhnlicher Rot-Schwingel (*Festuca rubra*), Wiesen-Rispengras (*Poa pratensis*), Zwiebel (*Allium cepa*)

Deutsche Tiernamen: Kompostwurm (*Eisenia fetida*), Waldfrosch (*Rana sylvatica*), Flecken-Querzahnmolch (*Ambystoma maculatum*), Amerikanische Kröte (*Bufo americanus*), Schreifrosch (*Rana clamitans*), Verzierter Schmalmaulfrosch (*Microhyla ornata*)

Die terrestrische Ökotoxizität der betrachteten Streusalze gegenüber Pflanzen und Regenwürmer liegt in der Regel über 5 g/kg. Für Amphibien wurde eine akute Ökotoxizität ab ca. 1 g/L beobachtet, wobei die Organismen relativ unempfindlich gegenüber NaCl reagierten.

3.2.4 Auswirkungen auf Böden und das Straßenbegleitgrün

Der Eintrag von Streusalz auf angrenzende Böden führt zu einer Verschlammung und Verdichtung des Bodens, verbunden mit einer verringerten Bodendurchlüftung und Wasserspeicherung. Durch den vermehrten Eintrag von Na^+ finden Ionenaustauschprozesse statt, die zu einer erhöhten Auswaschung von Calcium- und Magnesium-Ionen und damit zu einer Alkalisierung des Bodens führen. Hierbei wird Chlorid wesentlich stärker ausgewaschen als Natrium, Calcium oder Magnesium (Gartiser et al. 2003).

Die meisten dokumentierten Streusalzschäden betreffen das Straßenbegleitgrün in Kommunen (Jäckel 2013), (Dickhaut und Eschenbach 2018; Däumling 2012). Zu den Auswirkungen auf das Straßenbegleitgrün entlang von Bundes- oder Landesstraßen liegen wenige Studien vor. (Ruge 1974) weist darauf hin, dass die negativen Einflüsse von Streusalz auf die Gesundheit von Bäumen kaum von der Situation in Städten auf die von Autobahnen übertragbar sind, da in Städten weitere negative Einflüsse wie die mechanische Bodenverdichtung, zu klein gewordene Baumscheiben, der Wassermangel aufgrund des trockenen Stadtklimas und der Entwässerung hinzukommen, die an Autobahnen größtenteils wegfallen. Bei Stadtbäumen geht der Autor von Streusalzschäden aus, wenn der Chloridgehalt in den Blättern im Mai/Juni $>1\%$ des Trockengewichtes beträgt. Er weist zudem daraufhin, dass die Chloridaufnahme der Bäume in Städten überwiegend über die Wurzeln erfolgt, während an Fernverkehrsstraßen oftmals eine direkte Chlorid-Exposition insbesondere der höher gelegenen Zweige von Bäumen und Sträuchern durch Spritzwasser aufgrund der höheren Fahrgeschwindigkeit beobachtet wird. Oftmals sind diese Zweige mehr geschädigt als die basalen Triebe, die z.B. durch Schnee oder die Leitplanke relativ geschützt sind. Auf die Bedeutung einer direkten Schädigung oberirdischen Pflanzenteile durch verspritztes oder verwehtes Salzwasser an Fernstraßen- und Autobahnen wird auch von (Wentzel 1974) hingewiesen.

Es ist bekannt, dass sich salztolerante Pflanzen (Halophyten bzw. von halotoleranten Arten) entlang der Autobahnen und Bundesstraßen ausbreiten (Brandes 2009). Zu den sogenannten Straßenrandhalophyten gehören z.B. Dänisches Löffelkraut (*Cochlearia danica*), Gerste (*Hordeum*), Pfefferkraut (*Lepidium latifolium*), Schutt-Kresse (*Lepidium ruderales*), der Salzschwaden (*Puccinellia distans*) und die Salz-Schuppenmiere (*Spergularia salina*). Der Autor verweist auf mehrere Studien, in denen die Herkunft dieser salztoleranten Arten untersucht wurde. Demnach erfolgte die Ausbreitung der Salz-Schuppenmiere (*Spergularia salina*) entlang der hessischen Straßen und Autobahnen, ausgehend vom Kali-Abbaug Gebiet im hessisch-thüringischen Grenzraum. Seit den 1980er Jahren breitet sich der Küstenhalophyt *Cochlearia danica*, von der Küste entlang der Autobahnen in das Binnenland aus (Brandes 2009).

Nach (Keil et al. 2010) zählen Autobahnrande und Mittelstreifen u.a. auch wegen der Salzbelastung zu den Sonderbiotopen in Deutschland, die aufgrund ihrer linearen Biotopstruktur als Einwanderungs- und Ausbreitungskorridore für heimische und gebietsfremde Arten dienen. In einer umfangreichen Aktion mit über 70 ehrenamtlichen Botanikern wurde der 60 Kilometer lange Abschnitt der Autobahn A40 von Duisburg bis Dortmund, der am 18. Juli 2010 für einen ganzen Tag für den Kraftfahrzeugverkehr gesperrt wurde, kartiert. Ein besonderes Augenmerk galt hierbei den Salzpflanzen (Halophyten). Die Autoren unterschieden je nach deren Verträglichkeit gegenüber Salz, zwischen „obligate Salzpflanzen“, die ausschließlich an Salzstandorten vorkommen, „fakultative Salzpflanzen“, die eine gewisse Toleranz gegen Salz besitzen und gegenüber Salz eher „indifferenten Pflanzen“, die als halotolerant gelten und schwerpunktmäßig auf salzfreien Böden, aber auch auf Böden mit – zeitweilig – erhöhtem Salzgehalt vorkommen. Insgesamt konnten 63 aus der Literatur bekannte Halophyten nachgewiesen werden, darunter war allerdings keine den obligaten Halophyten zuzurechnen. Sechs Pflanzenarten, die Salz-Schuppenmiere (*Spergularia salina*), der Salzschwaden (*Puccinellia distans*), der Krähenfuß-Wegerich (*Plantago coronopus*), das Dänische Löffelkraut (*Cochlearia danica*), das Bläuliche Wiesen-Rispengras (*Poa humilis*) und die Verschiedensamige Melde (*Atriplex micrantha*) zählen zu den fakultativen Halophyten, alle übrigen zu den indifferenten Halophyten.

Nach (MEYER, F.H. (Hrsg.) (1982): Bäume in der Stadt. 2. Aufl. Ulmer: Stuttgart 1982) ertragen die folgenden Gehölze ein gewisses Maß an Bodenversalzung: Götterbaum (*Ailanthus altissima*), Herzblättrige Erle (*Alnus cordata*), Sandbirke (*Betula pendula*), Schmalblättrige Ölweide (*Eleagnus angustifolia*), Dornenlose Gleditschie (*Gleditsia triacanthos Inermis*), Ahornblättrige Platane (*Platanus x acerifolia*), Steileiche (*Quercus robur*), Gewöhnliche Robinie (*Robinia pseudoacacia*), japanischer Schnurbaum (*Sophora japonica*), Kaiser-Linde (*Tilia x euchlora Pallida*), Sibirische Ulme (*Ulmus pumila var. arborea*) (zitiert nach (Brandes 2022)).

3.2.5 Überschlägige Bewertung alternativer Streumittel

Als Alternative zum Einsatz von Streusalz auf Basis von Natriumchlorid werden verschiedene organische Auftausalze vereinzelt im kommunalen Winterdienst im Bereich von Gehwegen und Fahrradwegen eingesetzt. Dies betrifft Produkte auf Basis der Natrium- oder Kaliumsalze, der Ameisensäure oder Produkte auf Basis von Calcium/Magnesium-Azetat. Haupteinsatzbereich für diese Mittel ist jedoch die Enteisung von Bewegungsflächen auf Flugplätzen, wie Start- und Landebahnen, wo organischen Auftausalzen aus Korrosionsschutzgründen der Vorzug gegenüber Natriumchlorid gegeben wird. Für diese Produktgruppe wird seit 1999 das Blaue Engel Umweltzeichen DE-UZ 99 vergeben, das Produkte auszeichnet, die leicht biologisch abbaubar sind und zur geringstmöglichen Schadstofffracht im Abwasser führen (Gartiser 2020b). Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde geprüft, ob Enteisungsmittel auf Basis von Kaliumformiat im kommunalen Winterdienst aus ökologischen Gründen sinnvoll sei (Gartiser et al. 2003). Nach damaligem Kenntnisstand wurde dies nicht empfohlen, da die sehr geringe aquatische Ökotoxizität mit der von Natriumchlorid und Calcium/Magnesiumchlorid vergleichbar sei, Untersuchungen zur terrestrischen Ökotoxizität jedoch weitgehend fehlten. Zudem würde für die Herstellung von Formiaten wesentlich mehr Primärenergie verbraucht als für die Gewinnung von Steinsalz.

Da der Einsatz alternativer Streumittel im Straßenwinterdienst auch kostenmäßig nicht zielführend ist, stand die Bewertung dieser Streustoffe nicht im Fokus der vorliegenden Studie (vgl. auch sachdienliche Auskünfte vom 08.09.2021 zu einer entsprechenden Bieterfrage). Gleichwohl lässt sich aus einigen zwischenzeitlich veröffentlichten Arbeiten ableiten, dass die alternativen Streustoffe auch hinsichtlich ihrer chronischen aquatischen Ökotoxizität sowie ihrer terrestrischen Ökotoxizität nicht prinzipiell besser zu bewerten sind als Natriumchlorid.

In einer vergleichenden ökotoxikologischen Studie mit Natriumformiat, Calcium-Magnesium-Azetat und Natriumacetat auf verschiedene Bodenorganismen waren Auswirkungen der organischen Auftausalze mit denen von Natriumchlorid vergleichbar, insbesondere wenn die höhere benötigte Einsatzmenge bei Verwendung organischer Auftaumittel berücksichtigt wird. In die Studie einbezogen wurde die Pflanze Kresse (*Lepidium sativum*), Gerste (*Ordeum vulgare*), Rotschwingelgras (*Festuca rubra*) und Kentucky Rispengras (*Poa pratensis*) sowie Regenwürmer (*Eisenia fetida*) unter Bezugnahme auf standardisierte Methoden (Robidoux und Delisle 2001).

In einer weiteren Studie wurden die Enteisungsmittel Natriumchlorid (NaCl), Calciumchlorid (CaCl₂), Kaliumformiat (KFo), Kaliumacetat (KAc) und Calciummagnesiumacetat (CMA) mit verschiedenen Bioassays untersucht. Eingesetzt wurden Pflanzentests mit Zwiebeln (*Allium-cepa* Wurzelwachstum), eine lokale Wasserlinsenart (Lemna-Wachstumshemmung) und Leuchtbakterien (*Vibrio fischeri*). Die organischen Enteisungsmittel erwiesen sich als toxischer als die anorganischen Salze. Das Toxizitätsranking ergab eine Reihenfolge von KFo > KAc > CMA > CaCl₂ > NaCl > MgCl₂. Die getesteten Enteiser hatten signifikante Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum, die mikrobielle Lumineszenz und die enzymatische Aktivität (Joutti et al. 2003).

Eine vergleichende Studie zur Toxizität von CMA, KFo und NaCl auf den Pflanzenerfolg von Baumsetzlingen mit fünf Arten und drei Substraten ergab deutliche Hemmungen bei steigenden Konzentrationen der untersuchten Enteisungsmittel im Boden auf das Wurzelwachstum und/oder die Blattbiomasse unabhängig vom verwendeten Substrat (sandiger Boden mit Zugabe von 5 Vol. % Kompost bzw. 15 Vol. % Kompost + 10 Vol. % Torf oder 5 Vol. % Kompost + 10 Vol. % landwirtschaftlicher Oberboden + 20 Vol. % Gestein). Die negativen Auswirkungen waren bei allen drei Enteisern ähnlich, wenn sie auf die Anionenkonzentration bezogen wurden. Die beiden organischen Enteiser CMA und KFo hatten daher keinen geringeren negativen Einfluss auf das Wachstum der Setzlinge als NaCl (Hanslin 2011).

Die Auswirkungen verschiedener Enteisungsmittel auf Amphibien, die als besonders sensitiv gegenüber Salzen gelten, wurde anhand von 96-stündigen akuten Toxizitätstests mit Larven des Waldfrosches (*Rana sylvatica*) untersucht. Die Larven waren relativ unempfindlich gegenüber Harnstoff, NaCl und MgCl₂ und am empfindlichsten gegenüber Acetaten (Kaliumacetat, CMA) sowie CaCl₂ (Harless et al. 2011).

(Pilgrim 2013) untersuchten verschiedene organische und anorganische Enteisungsmittel (auf Produktbasis, mit und ohne Korrosionsinhibitoren) und stellten folgende Toxizitätsreihe von der höchsten zur niedrigsten Toxizität auf: KAc > MgCl₂ > CaCl₂ > NaCl. Die Autoren verweisen auch auf die Arbeit von (Mount et al. 1997), die eine Abhängigkeit der Toxizität von der Art der Kationen postuliert haben. Demnach nimmt das toxische Potenzial der Kationen in folgender Reihenfolge ab: K⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ = Ca²⁺.

3.2.6 Expositionsbetrachtungen

In der Umweltrisikobewertung wird neben der Ökotoxizität (PNEC) auch die zu erwartende Umweltexposition (PEC) betrachtet (vgl. 2.1.1).

(Braun et al. 2019) unterscheiden zwischen der diffusen Versickerung über Spritzwasser und Verwehungen, der gezielten örtlich konzentrierten Versickerung über Versickerungsbecken oder Straßengräben sowie der gefassten Straßenentwässerung über die jeweilige Entwässerungsanlage (Mischsystem über Kläranlage oder Trennsystem über Regenrückhaltebecken direkt in Gewässer). Der Anteil der diffusen Verfrachtung auf die angrenzenden Flächen schwankt erheblich und wird mit 2,5 bis 63 % angegeben. Dabei setzt sich die Hauptmenge des Streusalzes innerhalb von 10 m neben der Straße ab und wird dann durch Regenereignisse in das Grundwasser verfrachtet und gelangt später wieder in Oberflächengewässer. Der Anteil des ausgebrachten Streusalzes, der über die Straßengischt und Windverwehung in das Straßenbegleitgrün verfrachtet wird, hängt von mehreren Faktoren ab: Von (Braun et al. 2019) genannt werden u.a. die Art und Menge der Tausalzausbringung, der Ausbau der Straße (z. B. Standstreifen, Bordstein, Lärmschutzwand), die Oberflächenbeschaffenheit der Straße, das Verkehrsaufkommen und die Fahrgeschwindigkeit, die Lage der Straße zum Gelände (Einschnitt, plangleich oder Dammlage), der Bewuchs längs der Straße, die Windstärke und Windrichtung sowie der Niederschlag.

Nach (Atanasoff-Kardjalieff et al. 2019) wird der verfrachtete Sprühnebel in Abhängigkeit von der Tröpfchengröße, der Luftströmung und den Verkehrsverhältnissen einige Meter bis an die 100 m weit transportiert. Hierbei werden 90 % des mit dem Sprühnebel verfrachteten Streusalzes innerhalb von 10 m deponiert. Die Menge und räumliche Verteilung des Sprühnebeleintrags hängen von lokalen Faktoren ab, darunter die Straßeneigenschaften (Belag, Querschnitt, Verkehrsverhältnisse: Fahrzeugart, Geschwindigkeit, Intensität), dem Entwässerungssystem, der Art des Streusalzeinsatzes (Menge, Methode), dem Klima (Niederschlag, Temperatur, Wind) und der Topographie. Der Anteil des Sprühnebeleintrages schwankt in einem weiten Bereich von 2-25%. Die Autoren gehen von einem Anteil von ca. 10 % der gesamten Streumenge aus, die durch diffuse Verluste wie die Verschleppung durch Kfz, dem Anhaften an das Straßenbegleitgrün und an Straßensicherungseinrichtungen (z.B. Schutzeinrichtungen, Leitpfosten, Wegweiser) verloren gehen. Die Hauptmenge wird durch das Entwässerungssystem (Straßenentwässerung, Versickerung) direkt oder indirekt über das Grundwasser in die Vorfluter geleitet.

Einer effektiven Straßenentwässerung kommt hier eine wichtige Rolle zu.

Zur Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen liegt eine im Auftrag der BAST durchgeführte Studie vor (Schulz et al. 2016). Demnach hängt die Liegedauer insbesondere von der Verkehrsdichte ab. Wenn nach einem Streusalzeinsatz von 20 g/m² eine für ausreichenden Schutz erforderliche Restmenge von 2 g/m² definiert wird, kann die Anzahl der Fahrzeugüberrollungen bis zum Erreichen dieser Restmenge abgeschätzt werden. Diese hängt vom Straßenzustand (trocken > feucht > feuchtnass > nass), der verwendeten Applikationstechnik (FS30 > Sole >> Trockensalz) und weiteren Faktoren, wie der Straßenneigung ab. Die zeitlichen Emissionen in das Straßenbankett bzw. in das Entwässerungsnetz verhalten sich somit umgekehrt proportional zur Liegedauer des Streusalzes und damit zur Witterung und dem Verkehrsaufkommen. Allerdings ist davon auszugehen, dass Chlorid sich als konservatives Anion nicht anreichert und lediglich mit Verzögerung in die Umwelt gelang, weshalb es auch als Tracer verwendet wird.

In jüngerer Zeit wurden die Vorteile des Einsatzes von Tausalzlösungen (FS100) beschrieben. Hintergrund war die im Jahr 2009 abgeschlossene Untersuchung im Auftrag der BAST, wonach auch bei Anwendung der Feuchtsalzstreuung (FS30) erhebliche Anteile des Streustoffes (bis zu 85 %) durch den Fahrverkehr von der Fahrbahn verfrachtet werden, bevor sie zur Wirkung kommen. Neuere Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass bei der präventiven Streuung mit der FS100-Technologie etwa 60 % NaCl eingespart und die Umweltbelastungen durch den Winterdienst deutlich reduziert werden können (Hausmann 2015).

Im Rahmen der Straßenverkehrsplanung wurden verschiedene Gutachten zur Erhöhung der Chloridkonzentration durch Maßnahmen des Winterdienstes erstellt. (Lange 2017) untersuchte den zu erwartenden Einfluss des Winterdienstes auf die Chloridkonzentration in Oberflächengewässern durch den Neubau der A 26-Ost AK (Hamburg Süderelbe bis Stillhorn). Der Gutachter verwendete Angaben des Bundesverkehrsministeriums zum durchschnittlichen jährlichen Tausalzverbrauch von 20 t/km Autobahn ($\pm 1.000 \text{ g/m}^2$ bei 10 m Streubreite je Richtungsfahrbahn). Der Verbleib der Tausalze wurde mit 20 % Verlust (Abtransport durch Fahrzeuge und Aufnahme durch Pflanzen), 40 % Abfluss über Entwässerungseinrichtung und 40 % Versickerung im Seitenraum angenommen. Nach Eintritt eines Fließgleichgewichtes wird der größte Teil der eingesetzten Streustoffe über die Gewässer abtransportiert. Die mittlere Chloridkonzentration der Elbe (Hafen Hamburg) beträgt 280 mg Cl/L. Der Winterdienst auf dem geplanten Autobahnabschnitt führt praktisch zu keiner Erhöhung des Mittelwertes, durch extremen Taumitteinsatz wird eine kurzzeitige Erhöhung um 0,7 mg Cl/L prognostiziert. Diese Erhöhung ist vernachlässigbar gering und Folge des hohen Mittelwasserabflusses der Elbe von 709 m³/s. Für das Gewässer Moorwettern, das einen mittleren Abfluss von 807 L/s aufweist, wird die mittlere Chlorid-Konzentration von 45 mg Cl/L um ca. 1 mg Cl/L erhöht, wobei nach extremem Taumitteinsatz kurzzeitig eine Spitzenbelastung von 179 mg Cl/s entstehen kann. Der Gutachter folgert daraus, dass die ermittelten Erhöhungen der Chloridkonzentration dem Verschlechterungsverbot der Wasserrahmenrichtlinie nicht entgegenstehen.

3.2.7 Fazit

Wenn ausschließlich auf Tests, die den gängigen OECD Guidelines für die Chemikalienbewertung entsprechen, zurückgegriffen wird, lassen sich die Ökotoxizitätsdaten wie folgt zusammenfassen:

Akute aquatische Toxizität			
	Algen	Daphnien	Fische
	OECD 201	OECD 202	OECD 203
	72 h	48 h	96 h
	EC50 [g/L]	EC50 [g/L]	LC50 [g/L]
NaCl	4,8	0,8 - 4,1	5,8 - 11,6
KCl	> 0,1 – 2,5	0,6 – 0,7	0,8 – 6,3
MgCl ₂	0,56	0,5 - 1,3	2,1 - 16,5
CaCl ₂	> 4,0	1,8 - 2,8	4,6 - 13,4
Chronische aquatische Toxizität			
	Algen	Daphnien	Fische
	OECD 201	OECD 211	OECD 210
	72 h	21 d	25 - 33 d
	NOEC/EC20 [g/L]	NOEC [g/L]	NOEC [g/L]
NaCl	*	0,31 - 0,35	2,65
KCl	≥ 0,1	≤ 0,05 - ≤ 0,6	*
MgCl ₂	0,1	0,32 (LOEC)	*
CaCl ₂	1,0 -2,7 (EC20)	0,24 (LOEC)	0,23

Terrestrische Toxizität

	Pflanzen	Regenwürmer <i>Eisenia fetida</i>		Amphibien <i>Rana sylvatica</i>
	akut	akut	Chronisch	akut
	OECD 208	OECD 207	OECD 222	ASTM E729-96
	7 d	14 d	28 d (- 56 d)	96 h
	EC50 [g/kg]	LC50 [g/kg]	LC50 [g/kg]	LC50 [g/L]
NaCl	3,7 - 22,7	3,3	3,5 - 6,4	2,6 - 7,6
KCl	*	5,6	*	1,4
MgCl ₂	8,6 (4 d)	*	5,3 - 7,4	0,23 - 7,1
CaCl ₂	7,5 (4 d)	12,7	6,5 - 9,1	4,0

* Keine Daten

Tabelle 3-7: Zusammenfassung aquatische und terrestrische Toxizität von Auftausalzen

Zusammenfassend hat sich Datenlage zur aquatischen und terrestrischen Ökotoxizität gegenüber dem Stand von 2002 (Gartiser et al. 2003) deutlich verbessert, es sind aber vereinzelt immer noch Datenlücken vorhanden. Die akute aquatische Ökotoxizität liegt in der Regel bei einem EC50 bzw. LC50 > 1 g/L, die chronische aquatische Ökotoxizität bei einem NOEC > 100 mg/L, die terrestrische Ökotoxizität gegenüber Pflanzen und Regenwürmern bei einem EC50 bzw. LC50 > 5 g/kg. Diese Werte werden nur punktuell, aber nicht großräumig überschritten, wobei direkte Pflanzenschäden durch im Bereich des Straßenbegleitgrüns auftreten können und sich in diesem Bereich ggf. auch salzresistente Halophyten ansiedeln.

3.2.8 Schutzziele und Umweltqualitätsnormen

Grenz- und Richtwerte

In Deutschland gelten folgende Grenz- und Richtwerte für Streusalze:

In der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) ist für Chlorid ein Grenzwert von 250 mg/L und für Natrium von 200 mg/L festgelegt. Zudem wird angemerkt, dass das Trinkwasser nicht korrosiv wirken darf. Die Grenzwerte entsprechen der Europäischen Trinkwasser-Richtlinie (EU) 2020/2184.

Die Oberflächengewässerverordnung (OGewV) definiert einen Anforderungsrichtwert von ≤ 50 mg/L Chlorid als Indikator für einen „sehr guten ökologischen Zustand und das höchste ökologische Potenzial“ und einen Richtwert von ≤ 200 mg/L Chlorid als Indikator für einen „guten ökologischen Zustand und ein gutes ökologisches Potenzial“. Natrium wird in der OGewV nicht berücksichtigt.

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat für Grundwasser einen Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS) von 250 mg/L Chlorid aufgestellt (LAWA 2017).

Zudem definiert die LAWA Güteklassifikationen für Fließgewässer und ordnet u.a. auch den Chloridkonzentrationen folgenden Güteklassen zu (LAWA 1998):

Güte- klasse	I	I-II	II	II-III	III	III-IV	IV
Belas- tung	unbelastet	sehr ge- ring	Mäßig	deutlich	erhöht	hoch	sehr hoch
Chlorid [mg/L]	≤ 25	≤ 50	≤ 100	≤ 200	≤ 400	≤ 600	< 600

Tabelle 3-8: Zuordnung der Chloridkonzentrationen zu den Güteklassen für Fließgewässer (LAWA 1998)

In einer Bestandsaufnahme der Gewässerqualität von Mosel und Saar im Zuge der Wasserrahmenrichtlinie wurden die LAWA Güteklassen etwas angepasst und folgende Bewertungsstufen für Chlorid in Gewässern definiert: sehr gut ≤ 50 mg/L, gut ≤ 100 mg/L, mäßig ≤ 200 mg/L, schlecht ≤ 400 mg/L, sehr schlecht > 400 mg/L (IKSMS 2005; Braun et al. 2019).

Die Kanadischen Umweltbehörden erstellten auf Basis einer umfangreichen Ökotoxizitätsstudie die Arten-Sensitivitäts-Verteilungen für Chlorid (CCME 2011b) und leiteten hieraus Wasserqualitätsstandards von 640 mg/L Chlorid für die akute und von 120 mg/L Chlorid für die chronische Ökotoxizität ab (CCME 2011a).

(Wolfram 2014) erweiterte die Datenbasis nochmals und errechneten daraus nach demselben Konzept Chlorid-Richtwertet in Fließgewässern von 99 mg/L Chlorid für die chronische Toxizität und von 593 mg/L Chlorid für die akute Toxizität ab. Hieraus wurde dann für Österreich unabhängig vom saprobiellen Grundzustand des jeweiligen Fließgewässers für Chlorid ein Qualitätsziel von 150 mg/l als Jahresmittelwert (chronische Wirkung) und von 600 mg/l als zulässige Höchstkonzentration (akute Wirkung) abgeleitet (Atanasoff-Kardjaleff et al. 2019).

Zur Salzbelastung der Werra, in deren Einzugsgebiet bei Vacha seit mehr als 100 Jahren Kalibergbau betrieben wird, haben (Braukmann und Böhme 2011) umfangreiche Untersuchungen zur Besiedelung durch Makroinvertebraten nach den Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie durchgeführt und dabei belastete aus dem Unterlauf (bis 2200 mg/L Chlorid) mit unbelasteten Abschnitten aus dem Oberlauf (25 mg/L Chlorid) miteinander verglichen. Die Verarmung von Artenzusammensetzung und Anzahl der Makro-Invertebraten stromabwärts der Salzeinleitungen waren eindeutig durch die Salzbelastung verursacht. Andere Einflüsse, die die allgemeine Verschlechterung bedingen könnten, wie die Flussmorphologie, Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft oder Abwassereinleitungen treten demgegenüber zurück.

3.3 Ergebnisse zum Bereich Korrosion bei Bauwerken und Fahrzeugen

Durch den Einsatz von Tausalzen kann es zur Korrosion an Bauwerken (z.B. Fahrbahnen, Brücken, Gebäuden) und Fahrzeugen kommen. Dies ist vielfach belegt. In Deutschland werden Streusalzen derzeit keine Korrosionsinhibitoren zugesetzt. Im Projekt Winterlife wurde anhand von Labortests untersucht, welche Wirkung der Zusatz von Korrosionsinhibitoren zu verschiedenen Streumitteln, u.a. NaCl, CaCl₂ und MgCl₂ im Hinblick auf die Korrosion von Stahl, verzinktem Stahlblech sowie Kupfer hat (Hoffmann et al. 2021). Hoffmann et al. (2021) kamen für NaCl zum Ergebnis, dass der Zusatz von Zucker (z.B. Glucose), Natriummetasilikat bzw. Calciumnitrit (4-8 m%) zu NaCl die Korrosivität auf 10 % bis 60 % senken könnten.

Nachfolgend wird auf die Korrosion bei Beton und bei Fahrzeugen eingegangen.

Korrosion bei Beton: Tausalze haben gegenüber Beton grundsätzlich eine kalklösende und rostfördernde Wirkung (Maultzsch et al. 1992). Der Eintrag von Alkalien aus Tausalz (NaCl) in den Beton verschärft die Schädigungen infolge der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) (Dressler 2013). Dies kann dazu führen, dass Bauwerke vorzeitig schadhaft werden und instandgesetzt werden müssen, oder ihre technische Lebensdauer gar nicht erreichen und sie vorzeitig ersetzt werden müssen. Die Anfälligkeit des Betons für Tausalze ist u.a. von dessen Qualität abhängig (Thiel et al. 2013). Allerdings ermöglichen schadhafte Stellen, z.B. Mikrorisse, auch bei der Verwendung von hochwertigen Betonen ein Eindringen von Salzlaugen und eine Schädigung (Maultzsch et al. 1992). Entsprechend der zu erwartenden Beanspruchung der jeweiligen Bauteile sollte ein Beton, der den Belastungen entsprechenden Expositionsklasse verwendet werden. Für

Betonbauteile, die einer Belastung mit Tausalzen ausgesetzt sind, gelten die nachfolgenden Expositionsklassen (Oesterheld und Weisner 2021):

Bewehrter Beton: Expositionsklassen XD1 bis XD4 (D für Deicing, Beanspruchung durch Chlorideinwirkung aus Taumittel): Bewehrungskorrosion durch Chloride ausgenommen Meerwasser. Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält und chloridhaltigem Wasser, einschließlich Taumitteln, ausgenommen Meerwasser, ausgesetzt ist.

- XD1 mäßige Feuchte, z.B. Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen. Einzelgaragen. befahrene Verkehrsflächen mit vollflächigem Oberflächenschutz.
- XD3 wechselnd nass und trocken, z.B. Teile von Brücken mit häufiger Spritzwasserbeanspruchung, Fahrbahndecken, befahrene Verkehrsflächen mit rissvermeidenden Bauweisen ohne Oberflächenschutz oder ohne Abdichtung, befahrene Verkehrsflächen mit dauerhaftem lokalem Schutz vor Rissen.

Unbewehrter Beton: Expositionsklassen XF1 bis XF4 (F für Freezing, Beanspruchung durch Frost mit/ohne Taumittelinwirkung): Betonangriff durch Frost mit und ohne Taumittel. Durchfeuchteter Beton, der einem erheblichen Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist.

- XF2 mäßige Wassersättigung, mit Taumitteln: z.B. Bauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, soweit nicht XF4
- XF4 hohe Wassersättigung, mit Taumitteln: z.B. mit Taumitteln behandelte Verkehrsflächen überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, Betonschutzwände

Andere präventive Maßnahmen bestehen in der Verwendung von nichtrostendem Stahl sowie einem entsprechendem Oberflächenschutz (z.B. Schießl-Pecka et al. (2019) für Brücken).

Darüber hinaus wurde 1996 ein Prüfverfahren veröffentlicht, mit dem der Frost-Tau-Widerstand von Beton unter Einwirkung von Taumittel-Lösungen ermittelt werden kann. Es handelt sich um den CDF-Test (Setzer et al. 1997). CDF steht dabei für Capillary Suction of De-icing chemicals and Freeze-Thaw Test. In einer umfangreichen Studie wurde geprüft, inwiefern das CDF-Prüfverfahren die realen Praxisbedingungen abbilden kann (Müller und Guse 2010). Die Studie kam zum Ergebnis, dass der CDF-Test ausgereift ist und in Deutschland eine breite Anwendung findet. Für eine adäquate Abbildung der Beanspruchungssituation für Betone der Expositionsklasse XF4 seien Prüfungen über 28 Frost-Tauzyklen unverzichtbar. Für Betone der Expositionsklasse XF2 seien Modifikationen möglich, beispielsweise indem die Minimaltemperatur gegenüber dem Basisverfahren von -20 °C auf -10 °C angehoben und die Versuchsdauer auf 14 Frost-Tauzyklen verkürzt würde, oder einer Reduzierung des ansonsten unveränderten Tests auf 10 Zyklen.

Korrosion an Fahrzeugen: Die Gefahr der Korrosion durch Streusalze bei Automobilen hat infolge verbesserter Lacke, werkseitiger Hohlraumversiegelungen, einem verbesserten Unterbodenschutz und dem Einsatz verzinkter Bleche deutlich abgenommen (ADAC 2022). Es handelt sich laut Aussage des ADAC (2022) eher um ein Problem der Vergangenheit. Allerdings können schadhafte Stellen am Fahrzeug, z.B. aufgrund von Steinschlag, durch Salzlauge und Streusalzreste angegriffen werden, weshalb zur Vermeidung von Schäden eine Reinigung des Fahrzeugs nach der Winterperiode empfohlen wird (ADAC (2022), ACE Automobil Club Europa (2022)).

Schlussfolgerungen für die Berücksichtigung im Rahmen der Ökobilanz

Auch wenn sich die Anfälligkeit in den letzten Jahrzehnten aufgrund verbesserter Materialien und Technologien sowie entsprechender technischer Vorgaben deutlich verringert hat, ist unbestritten und vielfach belegt, dass Streusalze aufgrund ihrer korrosiven Wirkungen Schäden an Bauwerken und Fahrzeugen verursachen können. Diese Schäden könnten grundsätzlich im Rahmen einer Ökobilanz abgebildet werden. Beispielsweise indem die Umweltauswirkungen der Aufwendungen für eine Reparatur der Schäden berechnet und berücksichtigt würden. Um dies tun zu können, wäre es aber notwendig, einer bestimmten Winterdienst-Dienstleistung, z.B. einer einzelnen Ausbringung oder der Ausbringung in einer Winterperiode, eine spezifische (Schad-)Wirkung zuzuordnen und diese zu quantifizieren. Hierfür konnten im Rahmen des Projektes keine Datengrundlagen ermittelt werden. Grundsätzlich gibt es nur wenige Untersuchungen, die die Auswirkungen des Winterdienstes unter realen – nicht Laborbedingungen - z.B. auf Bauwerke überhaupt untersuchen (vgl. z.B. Maultzsch et al. (1992), Müller und Guse (2010)). Zum anderen ist der Winterdienst nur eine von verschiedenen Einwirkungen, die zu Schädigungen an

Bauwerken und Fahrzeugen führen können und es darüber hinaus Wechselwirkung zwischen anderen Schädigungsmöglichkeiten und der Streusalzwirkung geben kann. Andere relevante Möglichkeiten sind z.B. Bau- und Materialfehler (Voß 2013), Beanspruchungen durch Verkehrslasten und Witterungsbedingungen oder Steinschlag bei Fahrzeugen. Welche konkrete Schädigung einer einzelnen Winterdienst-Dienstleistung zugeschrieben werden kann, ist auch aufgrund von den in der Regel bestehenden Vorschädigungen an Bauwerken und Fahrzeugen im Einzelfall nur schwer ermittelbar. Für das im Projekt entwickelte Ökobilanz-Tools, das in unterschiedlichen Regionen in Deutschland eingesetzt werden kann, liegen keine, z.B. statistischen, Daten zu durchschnittlichen Schädigungen an Bauwerken und Fahrzeugen vor, die als Grundlage verwendet werden könnten. Vor diesem Hintergrund können korrosive Wirkungen auf Bauwerke und Fahrzeuge im Rahmen der Ökobilanz nicht betrachtet werden.

3.4 Ergebnis zum Bereich Winterdienst und Verkehrsfluss

Der Winterdienst soll nach Möglichkeit die Glättebildung vermeiden, entstandene Glätte ganz beseitigen oder zumindest ihre Auswirkungen auf den Verkehr minimieren. Die Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen sind umso positiver, je schneller der Winterdienst auf die Glättebildung reagiert. Bei hinreichend sicherer Glättetvorhersage ist eine vorbeugende Ausbringung von Taustoffen hinsichtlich der Wirkung auf den Verkehr besonders effektiv. In Stausituationen kommt es regelmäßig vor, dass Winterdienstfahrzeuge nicht durchkommen können, und aufgrund dessen erst verzögert ihren Einsatzort erreichen. Die Studie von Cypra et al. (2006) hat gezeigt, dass der Einsatz von Blaulicht auf Winterdienstfahrzeugen die Bildung von Räumgassen befördert, durch die die Winterdienstfahrzeuge an den Einsatzort fahren können, und so eine Beschleunigung des Winterdienstes unterstützt.

Die genaue Kenntnis zu Witterungsbedingungen und Straßenzustand sind eine notwendige Voraussetzung dafür, dass Winterdienstesätze optimal gesteuert, die Streumittel und Dosierungen der Situation angemessen gewählt und damit auch Staus nach Möglichkeit vermieden werden können. Je nach konkreten Bedingungen sind unterschiedliche Maßnahmen geboten (FGSV 2015). Bei Reifglätte und Eisglätte bei überfrierender Feuchte oder überfrierender Nässe beispielsweise sollten idealerweise vorbeugende Maßnahmen in Form von Sole- oder Feuchtsalzstreuung ergriffen werden. Falls dies nicht möglich ist, sollten kurative Maßnahmen zur Glättebeseitigung erfolgen. Insgesamt hat es sich als zentral erwiesen, dass der Winterdienst auf Änderungen der Witterungs- und Straßenzustandsbedingungen zeitnah reagieren kann. In der Regel haben Winterdienst-Verantwortliche über entsprechende Dienste ein Zugang zu Wetterdaten und -prognosen, während es für den Straßenzustand im jeweiligen Einsatzgebiet in der Regel weniger Informationen gibt. Neue Möglichkeiten, Zugang zu Informationen zum Straßenzustand in Echtzeit zu erhalten, bieten Floating Car Data (FCD). Dabei werden GPS¹⁶-Daten insbesondere zu Position, Geschwindigkeit und Fahrtrichtung aus im Verkehr befindlichen Fahrzeugen genutzt, um die Fahrzeugbewegungen zu bestimmen. Um dies tun zu können, müssen Fahrzeuge mit einem GPS-System (bzw. mit einem entsprechenden Mobiltelefon) ausgestattet sein und die Möglichkeit zur GSM¹⁷-Kommunikation besitzen. So können die Fahrzeugdaten erfasst und an eine zentrale Stelle zur Datenverarbeitung verschickt werden. Aus den aufbereiteten Daten lassen sich aktuelle Verkehrsmeldungen, Verkehrsprognosen und Umfahrungsempfehlungen ableiten (BMDV 2017). Erheblich umfangreichere Daten können Extended Floating Car Data (XFCD) liefern. Dabei werden zusätzlich zu den Daten zum Verkehrsfluss auch Daten der Autoelektronik übermittelt. In Abhängigkeit von den im jeweiligen PKW vorhandenen Sensoren können damit Daten zu Temperatur, Niederschlägen oder auch Glättebildung mit Zeit- und Ortsstempel verfügbar gemacht werden. Breitenberger et al. (2004) diskutieren die Durchdringungsraten mit der erforderlichen Ausstattung in Fahrzeugen, die notwendig sind, um aus XFCD zuverlässige Aussagen zu Verkehrsfluss und Straßenzustand treffen und zeitnahe Meldungen / Warnungen geben zu können. Breitenberger et al. (2004) gehen davon aus, dass mit Durchdringungsraten von ca. 4 % für 80 % des Autobahnnetzes aktuelle Verkehrs- und Straßenzustandsinformationen erstellt

¹⁶ GPS: Global Positioning System

¹⁷ GSM: Global System for Mobile Communication

werden können. Für entsprechende Aussagen in Ballungsräumen und auf Bundesstraßen würde eine Durchdringungsrate von bundesweit 10 % benötigt.

Mittlerweile gibt es Verkehrsmodelle, die Floating Car Data zumindest für Modellierungen auf Basis von historischen Daten integrieren können (z.B. PTV (2022)). In Zukunft wird es möglicherweise auch Verkehrsmodelle geben, die die Integration von Echtzeitdaten ermöglichen und diese für die Koordinierung von Winterdienstseinsätzen zugänglich machen.

Die Einsatzmöglichkeiten von FCD und XFCD zur Unterstützung eines effektiveren Winterdienstes wurden in verschiedenen Veröffentlichungen im Rahmen des XVI World Winter Service and Road Resilience Congress im Februar 2022 in Calgary diskutiert (Zachrisson et al. (2022), Wallin. M. (2022), Sollén und Casselgren (2022), Karim (2022)).

Umweltauswirkungen von Stausituationen

Die Emissionen des Verkehrs hängen unter anderem von der Verkehrsmenge, der Geschwindigkeit und der Flüssigkeit des Verkehrs ab. In Stausituationen mit häufigen Anfahr- und Bremsvorgängen sind die Kraftstoffverbräuche und die Emissionen höher als in Situationen mit flüssigem Verkehr. Die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2019) weist darauf hin, dass die Abschätzung der maximalen Reduktionspotenziale der verkehrsbedingten Emissionen durch eine Verkehrsverflüssigung sehr unterschiedlich ausfallen können. Bezogen auf Modelle zur Abbildung von Autobahnen konnte gezeigt werden, dass eine Kapazitätserweiterung durch Ausbau helfen kann, Staus abzubauen und so Emissionen zu senken. Gleichzeitig kommt es durch die Erhöhung der Fahrleistung aufgrund von Umwegfahrten und durch die Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit zu Rebound-Effekten, die die positive Wirkung der Verkehrsverflüssigung kompensieren oder überkompensieren können (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2019), Benz und Kesenheimer (2009)). Die Wirkungen infolge des Ausbaus einer Autobahn lassen sich sicherlich nicht direkt mit den verkehrsverflüssigenden Wirkungen des Winterdienstes vergleichen. Allerdings ist auch für Situationen des Winterdienstes zu erwarten, dass sie in Bezug auf Effekte auf die Umweltauswirkungen des Verkehrs komplex sind: Einerseits ist davon auszugehen, dass durch einen effektiven Winterdienst – im Vergleich zu der gleichen Situation ohne Winterdienst oder mit einem weniger effektiven Winterdienst - Staus in ihrer zeitlichen und räumlichen Ausdehnung verringert oder ganz vermieden werden. Dies trägt dazu bei, den Anteil staubedingt erhöhter Emissionen des Verkehrs zu reduzieren. Gleichzeitig kann die Vermeidung von Staus zu einer Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit führen, die wiederum mit einer Erhöhung von Emissionen verbunden ist. Auch Rebound-Effekte durch eine Erhöhung der Fahrleistung, beispielsweise wenn Personen, die bei winterlichen Witterungsbedingungen auf eine Fahrt verzichtet hätten, angesichts eines durch den Winterdienst ermöglichten sicheren Straßenzustandes aber doch ihr Fahrzeug nutzen, können nicht ausgeschlossen werden.

Abschließend verweist die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2019) darauf hin, dass derzeit keine detaillierten Untersuchungen zur Wirkung von deutschlandweit eingesetzten Instrumenten zur Verkehrsverflüssigung vorliegen.

4 Ergebnisse der Interviews mit Praxisakteuren

Im Rahmen der fünf mit Praxisakteuren geführten Interviews konnten verschiedene Erkenntnisse für das zu entwickelnde Tool gezogen werden. Sie beziehen sich zum einen auf die Verfügbarkeit von Primärdaten bei den Praxisakteuren und zum anderen auf die jeweiligen Durchführungspraktiken des Winterdienstes (z.B. eingesetzte Fahrzeuge und Streumittel). Auf dieser Basis konnten dann im Tool abzudeckende Parameter (z.B. Fahrzeugkategorien) abgeleitet werden. Im Folgenden wird ein Überblick über die Ergebnisse der Interviews gegeben:

Streustrecken und Einsatzgebiet

Den Winterdienstbetrieben sind die betreuten Räum- und Streukilometer bekannt. Dabei ist zu beachten, dass Streckenkilometer nicht gleichzusetzen sind mit Einsatzkilometer. Aufgrund von erforderlichen Leerwegen sind es wesentlich mehr Einsatzkilometer als Streckenkilometer.

Beispiel: Die Autobahnmeisterei Mendig in Rheinland-Pfalz betreut 110 km Strecke auf der A61 winterdienstlich, darin sind 8 km Anschlussstellen enthalten. Die komplette Räum- und

Streufläche beträgt 1.302.264 m². Bei einem Volleinsatz müssen bis zu 6 Streuschleifen gefahren werden. Es sind dann 7 Fahrzeuge (6 LKW, 1 Unimog) im Einsatz: 4 LKW auf der Autobahnstrecke (2 x Nordstrecke und 2 x Südstrecke), 2 LKW für die Anschlussstellen (1 x Nord und 1 x Süd) und 1 Unimog für die Parkplätze (Streubreite 3 m). Bei einem Volleinsatz sind 180 km Leerwege notwendig (davon 40 – 50 km für die Anschlussstellen).

Die betreute Räum- und Streufläche ist von den Winterdienstbetrieben bislang nur teilweise ermittelt worden. Bei der Landesbaudirektion Bayern werden für die gesamte Bemessung des Winterdienstes die Fahrbahnlängen etc. aus dem BAST-Projekt Tausala verwendet (BMVI 2019).

Die Höhenlage der betreuten Strecken ist von Meisterei zu Meisterei unterschiedlich, auch bei den einzelnen Meistereien können erhebliche Höhenunterschiede bei ihren Betreuungsstrecken bestehen. Dies hat Einfluss auf die Intensität der Winterdiensteinsätze, die angewandte Streutechnologie und das Räumfordernis.

Auch in Stadtgebieten kann es erhebliche Unterschiede der Winterverhältnisse geben. Beispielsweise gibt es im Stadtgebiet von München einen Höhenunterschied von 100 m und unterschiedliche Winterverhältnisse (Innenstadt, Außenbezirke, Industrieschnee beim Heizkraftwerk). Je nach Gebiet wird entsprechend den Fahrbahnverhältnissen und dem Wetter maßgeschneidert geräumt und gestreut. Alle Maßnahmen und Einsatzstärken werden flexibel festgelegt. Der Winterdienst auf kommunalen Straßen, die mit Salz behandelt werden („Salzstrecken“), unterscheidet sich nicht wesentlich vom außerörtlichen Winterdienst.

Erfassung der Einsatzdaten

Die Art der Datenerfassung von Winterdiensteinsätzen erfolgt unterschiedlich. Es gibt manuelle, teils handschriftliche, Aufschreibungen bis zu automatisierten Einsatzdatenerfassungen. Das gesamte Spektrum der Datenaufzeichnungen der interviewten Winterdienstbetriebe erfasst nachstehende Informationen:

- Eingesetztes Streufahrzeug
- Einsatzzeit
- Streutechnologie (z.B. FS100)
- Fahrstrecke
- Streukilometer
- Räumkilometer
- Sonstige Winterdienstkilometer (Kontrollfahrten)
- Summe der gefahrenen Kilometer
- Verbrauch an Streustoffen (Salz, Sole)
- Ladestellen für die Streustoffe

Der tatsächliche Umfang der erfassten Daten in den Einsatzberichten wird spezifisch für die einzelnen Meistereien und Bauhöfe festgelegt.

Eingesetzte Winterdienstfahrzeuge und-geräte

Die Ausstattung der Meistereien und Bauhöfe mit Fahrzeugen ist sehr unterschiedlich. Bei Autobahnmeistereien wird pro Streuroute/schleife mit 1 bis 2 LKWs gerechnet. Dazu kommen 1 bis 3 Unimogs für den Winterdienst auf Parkplätzen. Die Fahrzeuge haben unterschiedliche Schadstoffklassen, Nutzlasten und zulässige Gesamtgewichte.

Beispiel: Die Autobahnmeisterei Rottweil verfügt über 8 LKWs und 3 Unimogs:

- LKWs mit Nutzlasten von 11,1 – 20,4 t, Gesamtlasten von 23 – 34 t, Euro 3, 4, 5, 6
- Unimogs mit Nutzlasten von 7,6 – 9,24 t, Gesamtlasten von 15 – 16,5 t, Euro 3, 4, 6

Beispiel: Die Fahrzeugausstattung der bayrischen Straßenmeistereien ist in der nachfolgenden Tabelle 4-1 dargestellt.

LKW-Typ (Regelbeschaffung ist 3-Achs-LKW)	Schadstoffklasse	Anzahl
26 t Gesamtlast	Euro 4	2
	Euro 5	42
	Euro 6	110
18 t Gesamtlast	Euro 3	3
	Euro 4	8
	Euro 5	42

Tabelle 4-1: Fahrzeugausstattung der bayrischen Straßenmeistereien

Beispiel: Der Straßenunterhaltungsbezirk West der Stadt München mit 6 Streustrecken und 2 Kontrolltouren (Gefahrstellen) verfügt über 6 Fahrzeuge und 1 Ersatzfahrzeug:

- 3 x MAN und 2 x Mercedes jeweils mit Nutzlast 7,2 t/Gesamtlast 18 t + 2 t (Winter),
- 1 x Unimog mit Gesamtlast 14 t,
- 1 x Scania mit Gesamtlast 30 t.

Alle Fahrzeuge besitzen Schadstoffklasse Euro 6. Die Ladekapazitäten dieser Fahrzeuge sind:

- 3 x MAN und 1 x Mercedes: jeweils 2.240 Liter Sole und 4 m³ Steinsalz
- 1 x Mercedes: 3.280 Liter Sole und 3,3 m³ Steinsalz
- 1 x Unimog: 1.200 Liter Sole und 3 m³ Steinsalz
- 1 x Scania: 6.600 Liter Sole und 5 m³ Steinsalz

Basisinformationen zu den Fahrzeugen und Geräten befinden sich in den Fahrzeug- und Gerätedateien der Winterdienstbetriebe.

Reinigung und Pflege der Fahrzeuge und Geräte

Hersteller empfehlen, Streumaschinen und Pflüge nach jedem Einsatz mit einem Hochdruckreiniger mit kaltem Wasser, ohne Reinigungsmittel, zu reinigen (Abstand mind. 1 m, Dauer ca. 20 min.). In der Praxis wird anstatt eines Hochdruckreinigers oftmals nur ein Wasserschlauch verwendet und die Reinigung erfolgt auch nicht nach jedem Einsatz.

Am Ende der Wintersaison sollten die Streumaschinen und Pflüge mit Konservierungsmittel (z.B. Carlofon 80 – Kriechwachs) behandelt und anschließend getrocknet werden, sowie schadhafte Stellen mit Grundierung und Lack ausgebessert werden, und anschließend erneut mit Carlofon-Wachs eingesprüht werden.

Neue Fahrzeugtechnologien

Alternative Antriebe (Brennstoffzelle, Batterie) für Winterdienstfahrzeuge und Streumaschinen werden bislang wenig angeboten. Erfahrungen mit alternativen Antrieben liegen bei den Befragten keine vor.

Eingesetzte Streustoffe

Die befragten Meistereien/Bauhöfe verwenden nachstehende tauende Streustoffe:

- Steinsalz
- Siedesalz
- NaCl-Sole (gekauft, konzentriert oder mit gebrauchsfertiger Konzentration)
- NaCl-Sole (aus Steinsalz oder Siedesalz selbst hergestellt)
- CaCl₂-Schuppen (in Sonderfällen zur Beimischung beim Salz)
- CaCl₂-Sole (gekauft)
- CaCl₂-Sole (aus CaCl₂-Schuppen oder CaCl₂-Prills selbst hergestellt)
- MgCl₂-Sole (gekauft, konzentriert oder mit gebrauchsfertiger Konzentration)

Steinsalz ist der weit überwiegende Streustoff. Die Solen werden für die Feuchtsalztechnologie FS30 benötigt. Für die FS100-Technologie wird fast ausschließlich NaCl-Sole verwendet.

Die Streustoffe stammen überwiegend von Produzenten bzw. Händlern in Deutschland. Als Transportmittel werden vor allem LKWs eingesetzt, in untergeordnetem Maße auch Bahn und Binnenschiff. Bei Salzimporten aus weiter entfernten Ländern (Marokko, Iran, Chile etc.) sind auch größere Schiffstypen im Einsatz, die das Salz zu Überseehäfen (z.B. Rotterdam) bringen, wo es auf Binnenschiffe umgeschlagen wird. Es gibt Direktlieferungen von der Produktionsstätte zu den Meistereien/Bauhöfen, aber auch Lieferungen über Zwischenlager von Händlern oder Zentralläger der Straßenverwaltungen (z.B. bei der Landesbaudirektion Bayern) zu den Meistereien/Bauhöfen.

Der Streustoffverbrauch wird vor allem von der Klimazone, dem Winterwetter (Niederschläge, Temperaturen) und den angewandten Streutechnologien (Trockenstreuung, Feuchtsalz FS30, Solestreuung FS100) beeinflusst.

Bei Schneefall kommen in der Regel alle Winterdienstfahrzeuge der Meisterei zum Einsatz. Bei vorbeugender Streuung werden wesentlich weniger Fahrzeuge benötigt (z.B. nur 1 – 2 Fahrzeuge).

Die Salz- und Soleverbräuche einzelner Winterdienst-Einsätze werden dokumentiert und in monatlichen Statistiken bzw. Saisonstatistiken ausgewertet.

Kraftstoffverbrauch

Winterdienstbezogener Kraftstoffverbrauch entsteht durch den Betrieb der Radlader in der Salzlagerhalle und vor allem beim Einsatz der Räum- und Streufahrzeuge und bei Kontrollfahrten. Der Kraftstoffverbrauch wird stark beeinflusst von der Anzahl der Winterdiensteinsätze, den eingesetzten Fahrzeugen (Achsen, Gewicht) und der Art des Winterdienstes (mit/ohne Pflüge).

Die Kraftstoffverbräuche können beispielsweise über installierte Tankdatenprogramme ermittelt werden (z.B., wenn für jedes Fahrzeug ein Tank-Stick vorhanden ist). In anderen Fällen müssen die spezifischen Kraftstoffverbräuche spezifisch ermittelt werden: Streufahrzeuge (Volltanken – Einsatz fahren – Volltanken, aus Differenz l/Einsatz oder l/km berechnen), Radlader (Volltanken – Einsatzstunden festhalten – Volltanken, aus Differenz l/h berechnen).

Beispiel: Von der Landesbaudirektion Bayern wurden für die LKWs der bayrischen Straßenmeistereien durchschnittliche Dieserverbräuche ermittelt, die in der nachstehenden Tabelle 4-2 dargestellt sind.

Tätigkeit	Abschlussbericht fka GmbH 2020 (gemessene Werte)	MKK-Tool aus fka GmbH 2020 mit neueren Verbrauchswerten (Motorkennzahlen aus Angaben von Herstellern bei Fahrzeug-Ausschreibungen der Landesbaudirektion Bayern)
Winterdienst LKW: Fahren		31,2 l/100 km
Winterdienst-LKW: Streuen	36,9 l/100km	33,7 l/100km
Winterdienst-LKW: Räumen + Streuen	38,6 l/100km	35,2 l/100km
Frachtleistung Salz (Salztransport vom Zentrallager zur Straßenmeisterei)	35 l/100km	

Tabelle 4-2: Durch die Landesbaudirektion ermittelte durchschnittliche Dieserverbräuche der LKWs der bayerischen Straßenmeistereien. Quelle: Ifka GmbH (2020), MKK steht für Messdatenbasierte Kostenbewertung für Kraftfahrzeuge

Falls die Fahrzeuge während des Winters auch für die Gehölzpflege an den Straßen eingesetzt werden, ist eine entsprechende Korrektur der Kraftstoffverbräuche vorzunehmen, z.B. durch Schätzung.

Umweltwirkungen in der Nutzungsphase von Streumaschinen sind im Wesentlichen bestimmt vom Energieverbrauch der Trägerfahrzeuge, aus dem sich die entsprechende CO₂-Emission ergibt. Der Leistungsverbrauch der Streumaschine ist im Verhältnis zum Leistungsverbrauch des Trägerfahrzeugs von untergeordneter Bedeutung. Zusätzlich gibt es gravierende Unterschiede der jährlichen Laufzeit je nach klimatischer Lage, in dem die Streumaschine eingesetzt wird.

Die Technische Spezifikation DIN/TS 30752-5 befasst sich mit der theoretischen Ermittlung der Energieverbräuche von Streumaschinen. Allerdings werden dabei insbesondere Winterdienstsätze mit Pflug und der Einfluss der Salzlagerung auf den Energieverbrauch nicht berücksichtigt. Deshalb sind diese Werte für die Verwendung im Ökobilanz-Tool nicht geeignet.

Energieverbrauch

In Meistereien können neben Strom auch Erdgas, Heizöl und Holzhackschnitzel benötigt werden.

Strom wird für unterschiedliche Zwecke im Winterdienst benötigt:

- Soleanlage (Pumpen, Begleitheizung, Beleuchtung),
- Salzlagerhalle (Beleuchtung, Salzladeband, Dachrinnenheizung),
- Winterdienstbüro.

Erdgas, Heizöl und Holzhackschnitzel werden für die Wärmeherzeugung (Gebäudeheizung, Warmwasserbereitung) benötigt. Für Autobahnmeistereien wurden bereits Konzepte zur Deckung des (Wärme)-Energiebedarfs durch erneuerbare Energien betrachtet (siehe Wolf und Hübner (2018)).

Die Energieverbräuche der Winterperiode können den monatlichen Rechnungen bzw. anteilig aus den Rechnungen der Lieferanten entnommen werden.

Beispiel: Zur Orientierung hat die Autobahnmeisterei Mendig einen gesamten Jahresstromverbrauch von 80.000 kWh angegeben.

Wasserverbrauch

Wasser wird für die Erzeugung von gebrauchsfertiger Sole in Soleerzeugern oder Mixstationen und für die Reinigung von Fahrzeugen und Winterdienstgeräten benötigt.

In den Meistereien gibt es einen Zähler für den gesamten Wasserverbrauch. Durch Ablesung während der Wintermonate kann der winterdienstbezogene Wasserverbrauch ermittelt werden.

Der Wasserverbrauch für die Soleeigenherstellung (Soleerzeuger, Mixstation) kann bei Bedarf von separaten Zählern abgelesen oder aus der produzierten Solemenge errechnet werden. Der Wasserverbrauch für die Fahrzeug- und Gerätewäsche kann anhand der Winterdienstsätze und dem geschätzten spezifischen Wasserverbrauch (z.B. 100 Liter pro Wäsche) ermittelt werden.

Ölverbrauch

Der Ölwechsel bei den Motoren der Streufahrzeuge erfolgt entsprechend den Empfehlungen der Fahrzeughersteller. Üblich ist, dass bei jedem Fahrzeug jährlich ein Motorölwechsel erfolgt. Der Ölbedarf bei einem Ölwechsel ist unterschiedlich: Mercedes-LKW 28 Liter, MAN-LKW 40 Liter (gilt jeweils für 2- und 3-Achser), Unimog 12 Liter. Zu beachten ist, dass die Fahrzeuge zwar hauptsächlich im Winterdienst eingesetzt werden, teilweise aber auch für Arbeiten außerhalb des Winterdienstes.

Bei der Hydraulik erfolgt kein kompletter Ölwechsel, sondern nur der Ausgleich von Verlusten oder in Ausnahmefällen wird durchgespült, um Fremdpartikel zu entfernen.

Empfehlung des Herstellers Küpper-Weisser für die Streumaschinen:

Bei den auf Streufahrzeuge aufgebauten Streumaschinen mit Dieselmotor erfolgt ein jährlicher Ölwechsel mit 2 Liter Motorenöl SAE 10W40. Bei neuen Streumaschinen erfolgt der Hydraulikölwechsel nach 100 Betriebsstunden (40 Liter HLP 46), danach erneut alle 500 Betriebsstunden.

Den für die Wartung der Winterdienstfahrzeuge und -geräte zuständigen Werkstätten sind die Ölverbräuche bekannt.

Nachweisdokumente

Es gibt folgende Nachweisdokumente:

- Einsatzberichte
- Statistiken Streustoffverbräuche (Tag, Monat, Saison)
- Fahrtenbücher bzw. Datenerfassung für jedes Fahrzeug (inkl. AdBlue-Verbrauch)
- Tankdatenprogramme
- Rechnungen für Energielieferungen
- Wasserrechnungen
- Ölrechnungen/Werkstattaufschreibungen

Falls auch Fremdunternehmer für den Winterdienst eingesetzt werden, sind deren Verbräuche (Kraftstoff, etc.) entsprechend dem tatsächlichen Leistungsumfang zu bewerten und bei der Ökobilanzierung zu berücksichtigen.

Verfügbarkeit von Daten für die Winter 2020/21 und/oder 2021/22

Es kann konstatiert werden, dass die befragten Meistereien und Bauhöfe bzw. die übergeordneten Verwaltungseinheiten über die erforderlichen Primärdaten für die Anwendung eines Ökobilanz-Tools verfügen.

5 Das ÖkoWin-Tool: Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Das folgende Kapitel nimmt Bezug auf die erste Phase der Ökobilanz, in der das Ziel und der Untersuchungsrahmen einer orientierenden Ökobilanz abgesteckt werden soll. Konkret geht es darum die Schlussfolgerungen aus der vorangegangenen Literaturanalyse (vgl. Kapitel 3) und den Interviews mit den Praxisbetrieben (vgl. Kapitel 4) zu nutzen, um das Ziel und den Untersuchungsrahmen (z.B. funktionelle Einheit, Systemgrenzen, berücksichtigte Wirkungskategorien) für das ÖkoWin-Tool bzw. die mit dem ÖkoWin-Tool zukünftig zu erstellenden orientierenden Ökobilanzen zu definieren.

5.1 Festlegung des Ziels

Ziel des ÖkoWin-Tools ist es, Anwender*innen eine einfache Abschätzung der Ökobilanz des Winterdienstes für einzelne Einsätze, ganze Bezirke oder Straßennetze zu ermöglichen und für Planung, Disposition sowie Investitionsentscheidungen im Rahmen des Winterdienstes einsetzbar zu sein. Es soll die Ermittlung der Umweltauswirkungen des Winterdienstes entlang des Lebensweges sowie die Identifikation der relevanten Prozesse innerhalb der Systemgrenzen ermöglichen. Außerdem soll es die Basis für die Ermittlung der Auswirkungen der verschiedenen Aktivitäten des Winterdienstes hinsichtlich der Umweltaspekte bilden.

Das ÖkoWin-Tool adressiert zwei unterschiedliche Zielgruppen:

- Zum einen ist das Tool für Straßen- und Autobahnmeistereien sowie andere Winterdienstverantwortliche gedacht, d.h. Organisationen oder Organisationseinheiten, die den Winterdienst durchführen.
- Zum anderen kann das Tool auch im Rahmen von Beschaffungsprozessen genutzt werden. Verantwortliche im Rahmen der öffentlichen Beschaffung können mit dem Tool bei Entscheidungen zu Streumitteln, Fahrzeugen oder der Streutechnik unterstützt werden.

Die Methode der Ökobilanz eignet sich sehr gut, um Optimierungspotenziale für die Durchführung des Winterdienstes innerhalb einer Meisterei zu identifizieren. Dagegen ist ein direkter Vergleich

des Winterdienstes verschiedener Meistereien bzw. generell von Organisationen, die den Winterdienst durchführen, auf Basis einer Ökobilanz nur sehr eingeschränkt oder gar nicht möglich. Grund dafür ist, dass in der Regel Klima- und Wetterbedingungen und/oder der Straßen- und Verkehrssituationen von verschiedenen Meistereien nicht vergleichbar sind. Beispielsweise ist die Höhenlage der betreuten Strecken von Meisterei zu Meisterei unterschiedlich, auch innerhalb einer Meisterei können erhebliche Höhenunterschiede bei ihren Betreuungstrecken bestehen. Dies hat Einfluss auf die Intensität der Winterdiensteinsätze, die angewandte Streutechnologie und die Räumfordernis. Entsprechend fallen auch die Umweltauswirkungen des Winterdienstes unterschiedlich hoch aus.

Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen ist es nach DIN EN ISO 14040/44 wichtig, dass der Nutzen zu vergleichender Systeme im gleichen Bereich liegt. Grundsätzlich könnten für den Winterdienst quantifizierbare Qualitätsparameter, wie Tauwirksamkeit als getaute Eismenge pro Zeiteinheit oder die Griffbarkeit von Fahrbahnen auf Basis von Reibungskoeffizienten zur Messung des Glättezustands sein. Schnee und Eis reduzieren den Reibungskoeffizienten zwischen Fahrbahn und Fahrzeugreifen. Die Verwendung von Streumitteln erhöht den Reibungskoeffizienten und damit die Straßensicherheit. Die dafür erforderliche Menge an Streumitteln ist abhängig von einer ganzen Reihe von Faktoren, darunter der Fahrbahntemperatur, den Streuverlusten, der Verkehrssituation, der Oberflächentextur der Straße, dem Niederschlag etc. (Hoffmann et al. 2012). Götzfried und Gaudé (2021) berichten, dass die Messungen des Reibungskoeffizienten mit dem SRT-Pendel¹⁸ höhere Werte für NaCl-Sole ergaben als für andere Chloridlösungen (Calciumchlorid, Magnesiumchlorid). Flüssige Streumittel sind zwar schneller wirksam als Trockensalz. Aber ihre Dosierung muss doppelt so hoch sein (Beispiel: 20 g Sole/m² haben die gleiche Wirkung wie 10 g Festsalz/m², die Salzeinsparung mit Sole beträgt gleichzeitig 6 g/m²) Dieser Aspekt muss z.B. im Hinblick auf Lagerkapazitäten, die Kapazität der Streufahrzeuge etc. beachtet werden (Götzfried und Gaudé 2021). Daher ist es unerlässlich, die verschiedenen Qualitäten der Alternativen ganzheitlich in Betrachtung zu ziehen, wenn ein Vergleich vorgesehen sein würde. In Deutschland werden für die Bewertung der Qualität des Winterdienstes keine quantifizierten Kriterien, wie beispielsweise die Griffbarkeit der Fahrbahn genutzt, die ein Vergleichbarkeit im Sinne eines erreichten gleichen Nutzens verschiedener Winterdienst-Alternativen ermöglichen würden.

Vor diesem Hintergrund ist das ÖkoWin-Tool daher explizit nicht für den Vergleich der Winterdienst-Ökobilanzergebnisse verschiedener Straßenmeistereien, Bauhöfe etc. vorgesehen.

Vor der Veröffentlichung vergleichender Ergebnisse müsste bei einer normgerechten Ökobilanz außerdem eine kritische Prüfung durchgeführt werden.

5.2 Funktionelle Einheiten

Die funktionelle Einheit legt die Quantifizierung der angegebenen Funktionen der Dienstleistung (oder des Produktes) fest (DIN EN ISO 14040) und stellt damit die Bezugsgröße für die berechneten potenziellen Umweltwirkungen dar. Die Auswahl der funktionellen Einheit muss in Abstimmung mit der Fragestellung sowie der Datenverfügbarkeit erfolgen und die ermittelten Daten (Primär- und Sekundärdaten) müssen auf die funktionelle Einheit referenzieren.

Die Funktion des Winterdienstes ist es, in der Winterperiode ein den Wetterbedingungen angepasstes, angemessenes Niveau der Verkehrssicherheit sicherzustellen. Die funktionelle Einheit hat dabei zwei Dimensionen: eine räumliche und eine zeitliche. Die räumliche Dimension kann sich grundsätzlich auf die Strecke, z.B. auf die Gesamtstrecke oder (umgerechnet) auf einen Kilometer, oder auf die Fläche, z.B. auf die Gesamtfläche oder (umgerechnet) auf einen Quadratkilometer, beziehen, die eine Meisterei für den Winterdienst verantwortet. Die zeitliche Dimension kann einen einzelnen Einsatz, den Teil einer Winterperiode oder eine gesamte Winterperiode umfassen. Mit Blick auf das Ziel der Ökobilanz (vgl. Kapitel 5.1) und vor dem Hintergrund der Literaturrecherche in Kapitel 3 wird für das ÖkoWin-Tool Nutzer*innen die funktionelle Einheit auf Basis der betreuten Streufläche berücksichtigt.

¹⁸ SRT (Skid Resistance Tester) ist ein stationäres Messgerät zur Ermittlung der Griffbarkeit von Straßenoberflächen und Markierungen (<https://de.wikipedia.org/wiki/SRT-Pendel>; zuletzt abgerufen am 19.12.2023).

Für die Festlegung der betreuten Streufläche sind die Betreuungsfaktoren differenziert nach Straßentyp aus dem TAUSALA-Leitfaden (BMVI 2019) hinterlegt: Bundesautobahnen (Betreuungsfaktor 1,0), Bundesstraßen (0,8), Landes-, Staatsstraßen sowie Kreisstraßen (0,67). Eine individuelle Anpassung durch Anwender*innen ist aber möglich.

In Tabelle 5-1 ist die räumliche Komponente der funktionellen Einheit dargestellt.

Nr.	Räumliche Dimension	Zeitliche Dimension	Darstellung im ÖkoWin-Tool
2.	geräumte Fläche	Ein Einsatz, oder eine Winterperiode	- die Behandlung von jeweils xx km² Straßenfläche (xx km Länge bei x m Streubreite) während einer Winterperiode oder eines Einsatzes - Umgerechnet auf 1 km²

Tabelle 5-1: Räumliche Komponente der funktionellen Einheit

5.3 Festlegung der Systemgrenzen

Mit der Festlegung der Systemgrenzen wird bestimmt, welche Prozesse des betrachteten Systems in die ökobilanzielle Betrachtung aufgenommen werden und welche nicht. Grundsätzlich ist angestrebt, den gesamten Lebensweg – von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung – einzu-beziehen und mit entsprechenden Prozessmodulen abzubilden. Zentral ist aber, dass die ergebnisrelevanten Prozesse berücksichtigt werden sowie etwaige Lücken transparent dargestellt und bei der Interpretation der Ergebnisse angemessen berücksichtigt werden.

Für das ÖkoWin-Tool sollten grundsätzlich folgende Prozesse einbezogen werden (vgl. Bild 5-1):

Kernprozesse:

- Soleherstellung (sofern Sole selbst hergestellt wird)
- Beladung der Streufahrzeuge
- Ausbringung der Streumittel (inkl. etwaiger Leerfahrten)
- Kontrollfahrten
- Fahrzeug- und Gerätereinigung (z.B. Wasserverbrauch)

Vor- und nachgelagerte Prozesse:

- Herstellung der Streumittel einschließlich Rohstoffabbau
- Anlieferung der Streumittel vom jeweiligen Produktionsstandort zum Einsatzort (z.B. der Straßenmeisterei) unter Berücksichtigung etwaiger Zentral- und/oder Zwischenlager
- Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffe inkl. der jeweiligen Vorketten.

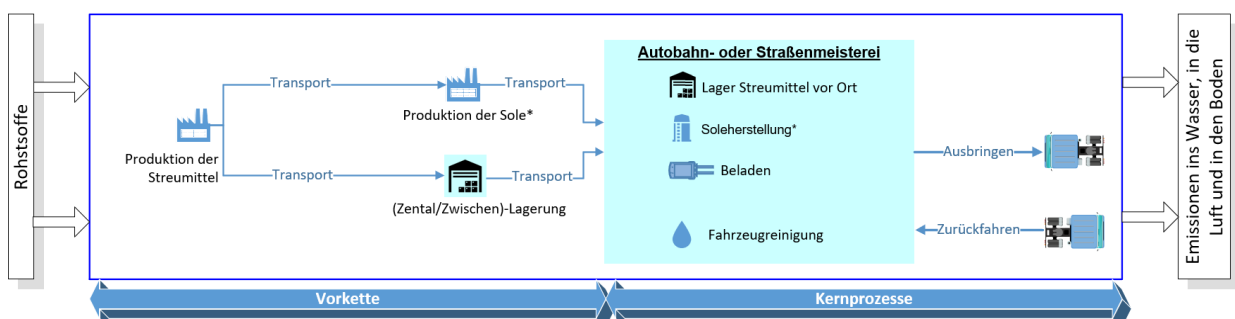


Bild 5-1: Festlegung der Systemgrenzen (*Alternative: entweder eigenen Soleherstellung oder angelieferte fertige Sole). Quelle: Eigene Darstellung

Nicht berücksichtigt werden:

- Die Herstellung und die Entsorgung der Investitionsgüter (sogenanntes Capital Equipment), wie z.B. Energie- und Stoffaufwand bei der Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge, der Gebäude und der Anlagen werden generell nicht erfasst.
- Der manuelle Winterdienst. Es wird angenommen, dass dieser für den Anwendungsbereich Außerortsstraßen keine Rolle spielt.
- Der Verbleib der Streumittel in der Umwelt wird nicht betrachtet (vgl. Kapitel 3.1.3).

5.4 Datenerhebung und Anforderungen an die Datenqualität

Welche Datengrundlage für eine Ökobilanz festgelegt wird, hängt vom Ziel und vom Untersuchungsrahmen der Studie ab. Die Festlegung von eindeutigen und einheitlichen Datenqualitätsanforderungen ist notwendig, um die Übereinstimmung mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz zu gewährleisten. Bei den Anforderungen an die Datenqualität sollte nach DIN EN ISO-Norm 14040/44 folgendes berücksichtigt werden:

Wie in Kapitel 5.3 dargestellt, sind die Prozesse, die innerhalb einer Autobahn- oder Straßenmeisterei stattfinden, die Kernprozesse der Ökobilanz, da die Meistereien eine der Haupt-Zielgruppen für das ÖkoWin-Tool sind. Für diese Prozesse sollten Primärdaten verwendet werden. Es ist vorzusehen, dass mindestens die folgenden Primärdaten jeweils mit Bezug zur funktionellen Einheit erhoben werden sollten:

- Menge und Typ der verbrauchten Streumittel
- Ausbringungstechnik
- Strom- und Heizungsenergieverbräuche, die einen Bezug zum Winterdienst haben
- Kraftstoffverbrauch, Fahrzeugtypen und Emissionsklassen
- Wasserverbrauch für Soleherstellung und Reinigung
- Geräumte Strecke bzw. Fläche
- Optional: Fahrten differenziert in Einsatzkilometer, Leerfahrten und Kontrollfahrten

Zeitbezogener Erfassungsbereich:

Ziel ist es, dass die Nutzer*innen des Tools, wie z.B. Straßenmeistereien, für Kernprozesse der untersuchten Systeme möglichst repräsentative Primärdaten erheben. Diese Primärdaten sollten nicht älter als 5 Jahre sein. Darüber hinaus ist es vorgesehen, dass im Tool Hintergrunddaten, z.B. für die den Kernprozessen vor- und nachgelagerte Prozesse, auf der Basis von Sekundärdaten hinterlegt werden. Auch die hinterlegten Sekundärdaten sollten möglichst aktuell sein. Die im ÖkoWin-Tool hinterlegten Emissionsfaktoren sollen einsehbar sein. Vor diesem Hintergrund wird für die hinterlegten Sekundärdaten auf öffentliche und ohne Lizenz nutzbare Datenbanken zurückgegriffen. Dazu zählen ÖKOBAUDAT¹⁹, GEMIS²⁰ und ELCD²¹. Für transportspezifische Daten wird das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) Version 4.2²² verwendet. Im Fall von Datenlücken wird auf die am besten passenden verfügbaren Näherungsdaten zurückgegriffen.

Im ÖkoWin-Tool sind die Anforderungen an die Primärdatenerhebung für Nutzer*innen präzisiert und die hinterlegten Sekundärdaten mit z.B. Datenquelle und Bezugsjahr dokumentiert. Ebenso wird vorgegeben in welcher Form die erhobenen Primärdaten durch die Nutzer*innen dokumentiert und ihre Datenqualität eingeschätzt werden soll.

Geografischer Erfassungsbereich:

Der geographische Bezugsraum für die mit dem ÖkoWin-Tool erstellbaren Winterdienst-Ökobilanz ist Deutschland. Entsprechend werden einschlägige Sekundärdaten mit geografischem Bezug für die Hintergrundprozesse, wie z.B. Strommix Deutschland, herangezogen. In Fällen, in

¹⁹ Link: <https://www.oekobaudat.de/> (zuletzt abgerufen am 19.12.2023)

²⁰ Link: <https://iinas.org/arbeitsgemis/> (zuletzt abgerufen am 19.12.2023)

²¹ ELCD: Europäische Referenz-Lebenszyklusdatenbank, die vom Joint Research Centre (JRC) entwickelt wurde. Obwohl die Datenbank in 2018 eingestellt wurde, können die ELCD-Datensätze als Näherung verwendet werden. Link: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/> (zuletzt abgerufen am 19.12.2023)

²² Link: <https://www.hbefa.net/d/> (zuletzt abgerufen am 19.12.2023)

denen spezifische Daten für Deutschland nicht vorhanden sind, werden europäischen Datensätze verwendet, dies betrifft die z.B. die Wasserbereitstellung.

Technologischer Erfassungsbereich:

Die zugrunde gelegten Daten zu den Kernprozessen sowie deren Vor- und Nachketten sollen den aktuellen Stand der Technik und die derzeitigen Rahmenbedingungen widerspiegeln. Dies trifft sowohl auf die Streumittel- bzw. Sole-Produktion als auch auf die Ausbringungstechnik zu. Die Sekundärdaten entsprechen in der Regel einem mittleren Stand der Technik.

Datenlücken zum Umschlag der Streumittel

Um die Streumittel vom Hersteller zum Einsatzort zu bringen, erfolgen neben den eigentlichen Transporten mit LKW, Bahn, Binnen- oder Seeschiff auch Umschlagsvorgänge. Diese umfassen Be- und Entladevorgänge sowie ggf. Zwischenlagerungen. Streumittel sind Massengüter, die je nach ihren Eigenschaften unterschiedliche Einrichtungen für den Umschlag und die Zwischenlagerung benötigen. So werden für die Be- und Entladung von Trockensalz u.a. geschlossene Rohrsysteme mit integrierten Förderbändern oder (geschlossene) Greiferkräne eingesetzt (Louis Hagel o. J.). Flüssige Massengüter, wie z.B. Sole werden mittels Pumpen sowie Schläuchen und Rohren umgeschlagen (Brinkmann 2005). Die Umschlagsvorgänge können dabei je nach konkreter Transportkette unterschiedlich sein und auch eine Zwischenlagerung z.B. im Hafen beinhalten. Im Rahmen des Projekts konnten keine Datenquellen identifiziert werden, die eine Abbildung von Umschlagsvorgängen mittels Ökobilanzdaten ermöglichen würden. Beispielsweise untersuchte (Heine 2023) umweltfreundliche Umschlagstechniken für Düngemittel, das ebenfalls ein trockenes Massengut ist, in deutschen Häfen. Der Fokus lag allerdings auf der Vermeidung der Verbringung von Düngemitteln in Gewässer, andere Umweltaspekte wie beispielsweise der Energieverbrauch von Umschlagsvorgängen wurden nicht betrachtet.

Erkenntnisse zur Datenverfügbarkeit aus den Interviews:

Wie die Ergebnisse der Interviews gezeigt haben (vgl. Kapitel 4), haben nicht alle Praxisakteure Zugriff auf Primärdaten, die die Kernprozesse des Winterdienstes umfassend quantitativ und differenziert abbilden. Bei zukünftigen Nutzer*innen des Tools, wie z.B. Straßenmeistereien, ist daher zu erwarten, dass ebenfalls Unterschiede hinsichtlich der Verfügbarkeit von Primärdaten auftreten werden. Teilweise werden gemessene Primärdaten vollständig verfügbar sein, teilweise wird es Datenlücken geben, so dass Nutzer*innen auf qualifizierte Abschätzungen zurückgreifen müssen. Es ist z.B. davon auszugehen, dass der Anteil des Winterdienstes am Strom- und Wasserverbrauch einer Meisterei oftmals nicht getrennt erfasst wird, sondern abgeschätzt werden muss. Vgl. hierzu auch das nachfolgende Kapitel 5.5 zum Thema Allokation.

Das ÖkoWin-Tool enthält vor diesem Hintergrund Hinweise, wie Nutzer*innen beim Fehlen entsprechender Primärdaten vorgehen können, z.B. wie Abschätzungen vorgenommen werden können, um die Kernprozesse des Winterdienstes auch beim Fehlen von differenzierten Messdaten möglichst genau abzubilden.

5.5 Allokation

Wenn bei einem Prozess neben der im Fokus der Untersuchung stehenden Dienstleistung (bzw. des im Fokus stehenden Produktes), weitere Produkte oder Dienstleistungen bereitgestellt werden, dann spricht man von Koppelprodukten. In diesen Fällen muss eine Zuordnung der potenziellen Umweltwirkungen aus dem betreffenden Prozess zu den verschiedenen Koppelprodukten erfolgen. Hierfür muss eine entsprechende Allokationsregel oder ein Allokationsverfahren definiert werden, nachdem der Bereitstellungsaufwand bzw. die Umweltlast aufgeteilt wird. In Kapitel 6 ist dargestellt, inwiefern für die Ableitung einzelner Emissionsfaktoren alloziert wurde.

5.6 Abschneidekriterien

Sind Stoff- und Energieflüsse in betrachteten Systemen hinreichend klein, dann werden sie aus den Systemgrenzen einer Ökobilanz ausgeschlossen und die mit ihnen verbundenen potenziellen Umweltwirkungen werden nicht in die Bilanz einbezogen. Nach DIN EN ISO 14040:2021, Artikel

3.18 werden hierfür spezifische Abschneidekriterien festgelegt, die sich auf die Stoffmenge, den Energiefluss oder den Grad der Umweltrelevanz beziehen, die/der mit Prozessmodulen oder Produktsystemen verbunden sind. Meist wird die 1-Prozentregel verwendet, d.h. es werden Stoffflüsse ausgeschlossen, die geringer als 1 Prozent am jeweiligen Gesamteinsatz haben. Im vorliegenden Fall betrifft dies beispielsweise die Additive in Streumitteln.

5.7 Betrachtete Umweltauswirkungen

Im Rahmen der ersten Phase der Ökobilanz wird auch festgelegt, wie die Berechnung der potentiellen Umweltwirkungen, d.h. die Wirkungsabschätzung erfolgen wird: welche Wirkungskategorien, welche Wirkungsindikatoren und welche Charakterisierungsmodelle werden verwendet.

Die Wirkungsabschätzung folgt den verbindlichen Bestandteilen nach DIN EN ISO 14044 und umfasst:

- Die Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen;
- Die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungsindikatoren (sogenannte Klassifizierung);
- Die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte (sogenannte Charakterisierung).

Die Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle erfolgt unter Berücksichtigung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Grundsätzlich sollten die relevanten Umweltthemen für das zu untersuchende System durch das gewählte Vorgehen im Rahmen der Wirkungsabschätzung adäquat abgedeckt werden.

Tabelle 5-2 gibt ein Überblick über die Form der Wirkungsabschätzung, die im ÖkoWin-Tool verwendet wird. Insgesamt sollen die fünf Wirkungskategorien kumulierter Energie-Aufwand, Treibhausgaspotenzial, Versauerungspotenzial, Ozonabbau-potenzial und Photooxidantienpotenzial, berücksichtigt werden:

Kumulierten Energie-Aufwand (KEA) in MJ-Äquivalent

KEA ist ein Maß für den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen, die für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden. Im KEA enthalten ist auch der Energiegehalt, der im Produkt selbst enthalten ist. Der KEA weist generell alle nicht erneuerbaren und erneuerbaren energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte aus.

Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential, GWP) in kg CO₂-Äquivalent

Unter dem Treibhauseffekt wird die klimarelevante Veränderung der Atmosphäre durch den anthropogenen Beitrag von Treibhausgasemissionen verstanden, die zu einer Erwärmung der Erde führt. Zur Erfassung des Treibhauspotenzials werden die in der Sachbilanz erfassten Treibhausgase mit sogenannten Charakterisierungsfaktoren²³ multipliziert, die ihre Klimarelevanz in Relation zu CO₂ mit dem Charakterisierungsfaktor abbilden und die einzelnen Beiträge addiert. Auf diese Weise wird das Treibhauspotenzial in Form von CO₂-Äquivalenten errechnet. Die Charakterisierungsfaktoren (GWP-100) stammen aus der aktuellsten Veröffentlichung des Assessment Reports (AR6) von IPCC im Jahr 2021 (IPCC 2021).

Versauerungspotenzial (Acidification Potential, AP) in mol H⁺-Äquivalent

Die wichtigsten Substanzen, die zu einer Erniedrigung des PH-Wertes von Niederschlagswasser führen und damit ein Versauerungspotenzial besitzen, sind Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH₃), die zur Freisetzung von Wasserstoffionen (H⁺) führen (Zampori und Pant 2019). Das mol H⁺-Äquivalent dient als Leitindikator für die Quantifizierung des Versauerungspotenzial. Die verwendeten Charakterisierungsfaktoren entstammen dem Accumulated Exceedance (AE)-Model nach der PEF-Methode (Zampori und Pant 2019).

²³ Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird (DIN EN ISO 14040).

Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential, ODP) in kg Trichlorfluormethan-Äquivalent (FCKW-11-Äq.)

Die Emissionen ozonabbauender Stoffe, z.B. langlebige Chlor und Brom enthaltende Gase wie FCKW (Fluorchlorkohlenwasserstoffen), Halone-FCKW tragen dazu bei, die stratosphärische Ozonschicht zu zerstören. Als Leitindikator wird FCKW-11 verwendet. Die Charakterisierungsfaktoren entstammen dem Accumulated Exceedance (AE) Model nach der PEF-Methode (Zampori und Pant 2019).

Photooxidantienpotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP) in kg NMVOC-Äquivalent²⁴

Die photochemische Bildung von Ozon in bodennahen Luftschichten ist das Resultat der Reaktion von Stickoxiden (NO_x) mit flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen (VOC) unter dem Einfluss von UV-Licht. Dieser Vorgang wird auch als Sommersmog bezeichnet. Dabei wirkt NO_x als Katalysator. Die Ozonbildung ist nicht linear mit der NO_x-Konzentration korreliert. Zur quantitativen Erfassung des Sommersmogs wird das photochemische Ozonbildungspotenzial (POCP) definiert. Als Leitindikator wird NMVOC verwendet. Die Charakterisierungsfaktoren entstammen dem LOTOS-EUROS Model nach der PEF-Methode (Zampori und Pant 2019).

Wirkungskategorien	Abkürzung	Wirkungsindikatoren	Charakterisierungsmodelle	Begründung
Kumulierten Energie-Aufwand	KEA	MJ	(Frischknecht und Jungbluth 2007)	Verbrauch an energetischen Ressourcen, vor allem Produktion von Streumitteln und Kraftstoffen
Treibhausgaspotenzial	GWP (EN: Global Warming Potential)	kg CO ₂ -Äquivalent	Weltklimarat (IPCC 2021)	Wichtiges globales Umweltthema
Versauerung	AP (Acidification Potential)	Mol H ⁺ -Äquivalent	Accumulated Exceedance (AE) Model nach PEF-Methode (Zampori und Pant 2019).	Relevant für Verkehr / Transporte
Ozonabbaupotenzial	ODP (Ozone Depletion Potential)	kg FCKW-11-Äquivalent	WMO 2014 nach PEF-Methode (Zampori und Pant 2019)	Potenziell relevant für Kraftstoffproduktion
Photooxidantienpotenzial (Photochemische Bildung von Ozon)	POCP (Photochemical Ozone Creation Potential)	kg NMVOC-Äquivalent	LOTOS-EUROS model nach PEF-Methode (Zampori und Pant 2019)	Relevant für Verkehr / Transporte

Tabelle 5-2: Überblick der ausgewerteten Wirkungskategorien und -indikatoren sowie Charakterisierungsmodelle

Von der Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ökotoxizität in der Ökobilanz wurde abgesehen, da es derzeit keine wissenschaftlich abgesicherte Methode für die Berücksichtigung potenzieller Wirkungen der Streumittel nach der Ausbringung – dem potenziell für die Toxizitäts-Wirkung relevantesten Prozess – gibt (vgl. Kapitel 3.1.3). In Kapitel 3.2 wurde dieser Aspekt daher separat diskutiert.

²⁴ NMVOC: Non Methane Volatile Organic Compounds

6 Grundlage für die Ermittlung der im ÖkoWin-Tool hinterlegten Emissionsfaktoren

6.1 Vorkette: Herstellung der Streumittel und Solen

Im Folgenden wird die Datengrundlage für die Modellierung der Herstellung der Streumittel und Solen dokumentiert. Bei den Solen handelt es sich um Fremdsolen, d.h. von Dritten bezogene Sole. Erfolgt die Soleherstellung selbst, z.B. in der Meisterei, so gehört sie zu den Kernprozessen und wird in Kapitel 6.3.8 beschrieben.

6.1.1 NaCl

NaCl, konzentrierte Sole (Fremdsole)

Die Modellierung der NaCl-Sole basiert auf Steinsalz und auf Siedesalz. Meersalz wird in der Regel nicht als Sole eingekauft.

Die Modellierung der NaCl-Sole-Herstellung aus Steinsalz basiert auf folgenden Annahmen:

- Die erforderliche Menge des Trockensalzes wird auf Basis der von den Anwender*innen im ÖkoWin-Tool angegebenen Konzentration und Menge an eingesetzter Fremdsole berechnet. Ebenso die Menge an benötigtem Wasser. Das für die Fremdsole benötigte Trockensalz und Wasser wird mit den jeweiligen Emissionsfaktoren für deren Bereitstellung bzw. Produktion hinterlegt.

Die Modellierung der NaCl-Sole-Herstellung aus Siedesalz basiert auf folgende Annahmen:

- Sole auf Basis von Siedesalz wird mittels Solution Mining im Zuge der Herstellung von trockenem Siedesalz bereitgestellt. Daher enthält die Modellierung der Sole-Herstellung aus Siedesalz nur den Schritt „Solegewinnung“ aus der Siedesalz-Herstellung (s. Abschnitt Siedesalz, trocken, Thermokompressionsverfahren (TKV) – Deutschland (DE)).

Steinsalz, trocken – Deutschland (DE)

Die Datengrundlage für die Herstellung des Steinsalzes stammt aus Stratmann und Quack (2009a). In der Studie wurden die spezifischen Primärdaten zur Herstellung von Auftausalz aus Steinsalz aus dem Bergwerk Heilbronn der Südsalz GmbH erhoben. Die Daten sind relativ alt, allerdings repräsentieren sie nach Einschätzung der Autor*innen immer noch den Stand der Technik.

Tabelle 6-1 stellt die für die Modellierung verwendeten Inventardaten für die Herstellung des Steinsalzes und die entsprechenden Datensätze dar. Die Rohdaten wurden auf Basis der Jahresproduktion erfasst und in der Tabelle auf 1 Tonne umgerechnet. Antibackmittel und Staubbinder wurden wegen ihres sehr kleinen Anteiles (0,01 %-Massen) nicht berücksichtigt.

Inputs	Menge	Einheit / Tonne Steinsalz	Verwendete Datensätze
Strom	13,65	kWh / Tonne Steinsalz	ÖKOBAUDAT: Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)
Diesel	0,49	Liter / Tonne Steinsalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Öl Niedertemperatur und Brennwert (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Heizwert mit 9,94kWh/Liter ((Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020) und Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021)

Hydrauliköl	0,02	Liter / Tonne Steinsalz	ELCD: Light fuel oil at refinery; from crude oil, fuel supply; production mix, at refinery; 0.1 wt.% sulphur (Location: EU-27)
ANFO-Sprengstoff (Ammonium Nitrate Fuel Oil)	0,33	Kg / Tonne Steinsalz	GEMIS 5.1: Sprengen (ANFO)-DE-2000
Prozesswasser	0,003	m ³ / Tonne Steinsalz	ELCD: Drinking water; water purification treatment; production mix, at plant; from groundwater (Location: RER)

Tabelle 6-1: Die spezifischen Primärdaten zur Herstellung von Auftausalz aus Steinsalz (Stratmann und Quack 2009a); RER: geographischer Bezug Europa

Siedesalz, trocken, Thermokompressionsverfahren (TKV) – Deutschland (DE)

Es gibt zwei gängige Verfahren zur Gewinnung von Auftausalz aus Siedesalz: die Mehrfacheffekt-Verdampfung (MEV) und das Thermokompressionsverfahren (TKV). In der vorliegenden Studie wird nur das Thermokompressionsverfahren berücksichtigt, da das MEV-Verfahren in Deutschland für Auftausalz eine untergeordnete Rolle spielt. Die Datengrundlage für die Herstellung des Steinsalzes stammt aus Stratmann und Quack (2009a).

Tabelle 6-2 stellt die für die Modellierung verwendeten Inventardaten für die Herstellung von Siedesalz und die entsprechenden Datensätzen dar. Die Rohdaten wurden auf Basis der Jahresproduktion erfasst und in der Tabelle auf 1 Tonne umgerechnet.

Prozess-schritte	Inputs	Menge	Einheit / Tonne Siedesalz	Verwendete Datensätze
Solegewinnung	Strom	16,30	kWh / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)
	Öl	0,47	Liter / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Öl Niedertemperatur und Brennwert (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Heizwert mit 9,94kWh/Liter ((Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020) und Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021)
Chemische Solereinigung	Strom	8,00	kWh / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)
	CaO	16,40	Kg / Tonne Siedesalz	–ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Kalk (CaO; Feinkalk) (de)
	Na ₂ CO ₃	4,60	Kg / Tonne Siedesalz	– Eigene Modellierung aus Solvay-Prozess, s. CaCl ₂ -Modellierung
Eindampfung	Strom	151,97	kWh / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)
	Öl	0,03	MJ / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Öl Niedertemperatur und Brennwert (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021)

	Erdgas	1,90	MJ / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Gas Niedertemperatur (entspr. Gebäudeenergiegesetz (GEG)); umrechnen auf Basis von Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021)
Zentrifuge	Strom	2,08	kWh / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)
Trocknung	Strom	2,22	kWh / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)
	Öl	1,03	MJ / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Öl Niedertemperatur und Brennwert (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021)
	Erdgas	75,94	MJ / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Gas Niedertemperatur (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021)
Sonstiges Energieverbrauch	Strom	22,06	kWh / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)
	Öl	0,60	MJ / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Öl Niedertemperatur und Brennwert (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021)
	Erdgas	43,97	MJ / Tonne Siedesalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Gas Niedertemperatur (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021)

Tabelle 6-2: Die spezifischen Primärdaten zur Herstellung von Auftausalz aus Siedesalz (Stratmann und Quack 2009a); RER: geographischer Bezug Europa

Meersalz, trocken

In der (Stratmann und Quack 2009a) Studie wurde angenommen, dass das Meersalz in Ägypten hergestellt wird. Ein öffentlich verfügbarer Datensatz für die Strombereitstellung in Ägypten konnte nicht identifiziert werden. Als Näherung wurde daher der europäische Strommix aus der ELCD-Datenbank verwendet.

Tabelle 6-2 stellt die für die Modellierung verwendeten Inventardaten für die Herstellung des Meersalzes und die entsprechenden Datensätzen dar. Die Rohdaten wurden auf Basis der Jahresproduktion erfasst und in der Tabelle auf 1 Tonne umgerechnet.

Prozess-schritte	Inputs	Menge	Einheit / Tonne Siede-salz	Verwendete Datensätze
Pump Stationen	Strom	1,19	kWh / Tonne Meersalz	ELCD: Electricity grid mix 1kV-60kV; AC; consumption mix, at consumer; 1kV - 60kV (Location: EU-27).
	Meerwasser für Salzproduktion	28,57	m³ / Tonne Meersalz	-

Salzlagerung und Schiffsbeladung	Strom	3,23	kWh / Tonne Meersalz	ELCD: Electricity grid mix 1kV-60kV; AC; consumption mix, at consumer; 1kV - 60kV (Location: EU-27).
Ernte	Diesel	0,1	kg / Tonne Meersalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Öl Niedertemperatur und Brennwert (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Heizwert mit 9,94kWh/Liter ((Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020) und Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021) sowie 0,832kg/Liter
Salztransport von Harvester zum Waschen	Diesel	0,05	kg / Tonne Meersalz	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Öl Niedertemperatur und Brennwert (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Heizwert mit 9,94kWh/Liter (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020) und Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021) sowie 0,832kg/Liter
Verdünnung	Strom zur Verdünnung der „Bittern“ (Pumpenergie)	0,09	kWh / Tonne Meersalz	ELCD: Electricity grid mix 1kV-60kV; AC; consumption mix, at consumer; 1kV - 60kV (Location: EU-27).
	Meerwasser für Verdünnung der Bittern (1:5)	5,71	m³ / Tonne Meersalz	-

Tabelle 6-3: Die spezifischen Primärdaten zur Herstellung von Auftausalz aus Meersalz (Stratmann und Quack 2009a); EG: geographischer Bezug Ägypten

6.1.2 CaCl₂

Calciumchlorid wird in Deutschland im Winterdienst sowohl als Trockensalz als auch als Calciumchlorid-Sole verwendet.

Für Calciumchlorid gibt es in Europa drei Herstellungsverfahren: den Solvay-Prozess, den Nedmag-Prozess und den Tetra-Prozess (Reaktion von Kalkstein mit Salzsäure). Aufgrund seiner hohen Relevanz und in Ermangelung von Daten zu den anderen beiden Verfahren wird für die Modellierung nur der Solvay-Prozess berücksichtigt.

CaCl₂, konzentrierte Sole (Fremdsole)

Das Hauptprodukt des Solvay-Prozesses ist Soda (Natriumkarbonat). Während des Solvay-Prozesses entsteht eine Ammonium Chloridlösung aus der in einer Reaktion mit Calciumhydroxid das Ammonium wieder zurückzugewonnen wird. Die daraus verbleibende Calciumchloridlösung wird als „Liquid raw CaCl₂ feed“ bezeichnet und ist das Ausgangsmaterial für die weitere Produktion von konzentrierter Calciumchlorid-Sole und festes Calciumchlorid. Bild 6-1 gibt einen Überblick über die Calciumchlorid-Herstellung mit dem Solvay-Verfahren.

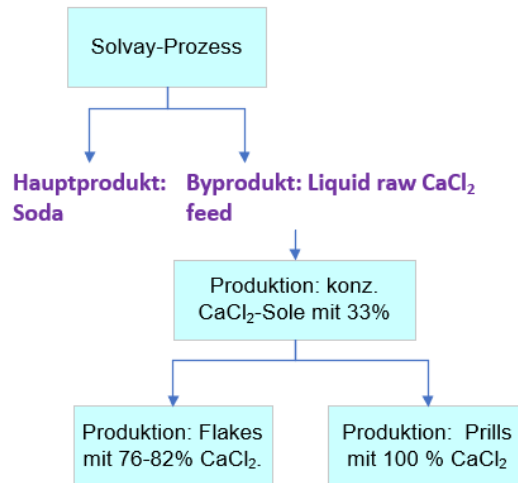


Bild 6-1: Überblick über die Calciumchlorid-Herstellung im Rahmen des Solvay-Prozesses Quelle: Eigene Darstellung

Die Europäische Kommission veröffentlichte 2007 ein Referenzdokument über die besten verfügbaren Techniken für die Herstellung anorganischer Chemikalien in großen Mengen, einschließlich Calciumchlorid, differenziert nach Prills und Flakes sowie konzentrierter Sole (European Commission 2007). Tabelle 6-4 stellt die zugrunde gelegten Inventardaten aus (European Commission 2007) dar. Die Mittelwerte basieren auf (European Commission 2007).

Mit dem Solvay-Prozess werden das Hauptprodukt (Soda) und das Nebenprodukt „liquid raw CaCl_2 Feed“ produziert. Bei einer Tonne Soda (wasserfrei) fallen 1,05 Tonnen CaCl_2 (wasserfrei) an. Liquid raw CaCl_2 feed hat eine Konzentration von 10 – 12 %. Dies entspricht ca. 9,55 Tonnen liquid raw CaCl_2 Feed. Soda wird derzeit zwischen 300 und 400 Euro/t gehandelt. Für Liquid raw CaCl_2 feed konnte kein Preis ermittelt werden, Die daraus abgeleitete Berechnung der Allokationsparameter ist in Tabelle 6-5 dokumentiert.

Inputs / Outputs	Name	Menge	Einheit	Verwendete Datensätze
Inputs	NaCl in crude brine	1,66	t / t Soda ash	Solegewinnung wie bei Siedesalz
	Limestone	1,4	t / t Soda ash	ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Kalk (CaO ; Feinkalk) (de)
	NH_3	1,45	kg / t Soda ash	ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Ammoniak (R717) (de)
	Steam	1850	kg / t Soda ash	ELCD: Process steam from natural gas, consumption mix, at plant, heat plant,
	Prozesswasser	3050	kg / t Soda ash	ELCD: Drinking water; water purification treatment; production mix, at plant; from groundwater (Location: RER)
	Strom	90	kWh / t Soda ash	ÖKOBAUDAT: Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)

Outputs	Abfall	230	kg / t Soda ash	ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Verbrennung Hausmüll (de)
	CO ₂	312	kg / t Soda ash	Abgasemissionen
	NH ₃	1,5	kg / t Soda ash	Abgasemissionen
	Staub	0,2	kg / t Soda ash	Abgasemissionen
	Cl, ion	1475	kg / t Soda ash	Emissionen in Wasser
	Ca, ion	370	kg / t Soda ash	Emissionen in Wasser
	Na, ion	190	kg / t Soda ash	Emissionen in Wasser
	SO ₄ , ion	6	kg / t Soda ash	Emissionen in Wasser
	NH ₄ , ion	1,15	kg / t Soda ash	Emissionen in Wasser

Tabelle 6-4: Datengrundlage für die Modellierung der Produktion von „Liquid raw CaCl₂ feed“ aus dem Solvay-Prozess. Es wurde der Mittelwert aus (European Commission 2007) zugrunde gelegt.

Produkte	Menge	Preise	Allokationsparameter
Hauptprodukt (Soda)	1 Tonne Soda	350 Euro/t	49%
Nebenprodukt „liquid raw CaCl ₂ Feed“	9,55 Tonnen liquid raw CaCl ₂ Feed	38,5 Euro/t raw liquid abgeschätzt basiert auf 350Euro*11% (Konzentration)	51%

Tabelle 6-5: Allokationsparameter zwischen Soda und liquid raw CaCl₂ Feed

Aus „Liquid raw CaCl₂ feed“ wird konzentrierte CaCl₂-Sole produziert. Die Inventardaten stammen aus (European Commission 2007) und in Tabelle 6-6 dokumentiert.

Inputs / Outputs	Name	Menge	Einheit	Verwendete Datensätze
Inputs	Liquid raw CaCl ₂ feed	0,372	Kg / kg konz. CaCl ₂	Tabelle 6-4
	Wärme	2,114	MJ/ kg konz. CaCl ₂	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Gas Niedertemperatur (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Wirkungsgrade (Lauf et al. 2021)
	Strom	0,011	kWh/ kg konz. CaCl ₂	ÖKOBAUDAT: Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)
	HCl	0,010	Kg / kg konz. CaCl ₂	–ELCD: Hydrogen chloride gas (HCl), production mix for PVC production, at plant
Outputs	konz. CaCl ₂	1	kg	-

	Abfall	0,0033	Kg / kg konz. CaCl ₂	ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Verbrennung Hausmüll (de)
	CO ₂	0,000825	Kg / kg konz. CaCl ₂	Abgasemissionen

Tabelle 6-6: Datengrundlage für die Modellierung der Produktion von CaCl₂ Sole mit einer Konzentration von 33%. Die Daten sind für die Konzentration von 33% umgerechnet aus Table 7.70 und Table 7.72 von (European Commission 2007)

CaCl₂, Trockensalz

Es gibt zwei Formen von festem Calciumchlorid, die im Winterdienst eingesetzt werden: 1) Prills mit 100 % CaCl₂; 2) Flakes oder Schuppen mit 76 – 82 % CaCl₂. In der Praxis könnten beide Formen gekauft und für den Winterdienst verwendet werden, entweder als Trockensalz oder als Ausgangsstoffe für die eigene Soleherstellung. Beispielweise stellt die Berliner Stadtreinigung Calciumchlorid-Sole aus Calciumchlorid-Prills her.

Die Modellierung für die Herstellung des festen Calciumchlorid beruht auf den Daten von (European Commission 2007). Folgende Tabellen zeigen die umgerechneten Inventardaten auf Basis von (European Commission 2007).

Verbrauchsdaten	Calciumchlorid (Prills, 100%)	Einheit	Calciumchlorid (Flakes 76-82%)	Einheit	Quelle
Menge der konz.CaCl ₂ mit 33% als Ausgangsmaterial	3,030	kg 33 % Calciumchlorid /kg Prills	2,394	kg 33 % Calciumchlorid /kg 79 % Calciumchlorid	Tabelle 6-6
Wärme aus Erdgas	6.407	MJ/kg Prills	3.290	MJ /kg 79 % Calciumchlorid	(European Commission 2007); Table 7.71; Eigene Umrechnung von Primärenergie auf Endenergie
Strom	0,015	kWh/kg Prills	0.059	kWh /kg 79 % Calciumchlorid	(European Commission 2007); Table 7.71; Eigene Umrechnung von Primärenergie auf Endenergie
CO ₂ als Emission aus dem Prozess	0,04	kg CO ₂ e/kg Prills	0.032	Kg /kg 79 % Calciumchlorid	(European Commission 2007); Table 7.73

Tabelle 6-7: Datengrundlage für die Modellierung von Calciumchlorid-Trockensalz, Flakes und Prills (European Commission 2007)

6.1.3 MgCl₂ konzentrierte Sole

Magnesiumchlorid wird in Deutschland im Winterdienst nur als Magnesiumchlorid-Sole verwendet. In der Regel wird eine 30%ige oder 33%ige Lösung beschafft und in der Meisterei vor Ort mit Wasser auf die Anwendungskonzentration von 17,5 bis 20 % verdünnt.

Die in Deutschland für den Winterdienst verkaufte Magnesiumchlorid-Sole wird entweder aus Solution Mining oder als Nebenprodukt der bergmännischen Gewinnung von Kaliumchlorid-Dünger (K+S) hergestellt. Die in Deutschland aus Solution Mining für den Winterdienst verkaufte Magnesiumchlorid-Sole stammt:

- entweder aus einer Solung von Carnallit aus einem untertägigen Vorkommen in Deutschland und anschließender Aufbereitung (Firma DEUSA)
- oder aus einer Solung von Magnesiumchlorid aus einem untertägigen Vorkommen in den Niederlanden (Firma Nedmag). Es wird gesättigte Magnesiumchlorid-Sole aus 1.400 – 1.800 m Tiefe gefördert. Der Energieverbrauch hierfür wird mit Daten aus der Solung von Natriumchlorid angenähert.

In der vorliegenden Studie wird aufgrund fehlender Daten nur Solution Mining betrachtet. Für die Modellierung wird angenommen, dass der Energieverbrauch aus Solution Mining ähnlich wie bei der Solung von Natriumchlorid-Siedesalz (s. Abschnitt 6.1.1) sein wird. Daher werden die Inventardaten bei der Solung von Natriumchlorid-Siedesalz als Näherung angenommen.

Inputs	Menge	Einheit / Tonne MgCl ₂ konz. Sole	Verwendete Datensätze
Strom	4,462	kWh / Tonne MgCl ₂ konz. Sole	ELCD: Electricity grid mix 1kV-60kV; AC; consumption mix, at consumer; 1kV - 60kV (Location: EU-27).
Öl	0,127	Liter / Tonne MgCl ₂ konz. Sole	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Öl Niedertemperatur und Brennwert (entspr. GEG); umrechnen auf Basis von Heizwert mit 9,94kWh/Liter

Tabelle 6-8: Die Energieverbrauchsdaten zur Modellierung der Herstellung der konzentrierten MgCl₂-Sole auf Basis der Solegewinnung von Siedesalz

6.1.4 NaCl, CaCl₂, MgCl₂: Anwendungsfertige Fremdsole

Für den Fall, dass die anwendungsfertige Fremdsole eingekauft wird, werden noch der Strom- und Wasserverbrauch für die Herstellung der anwendungsfertigen Fremdsole aus konzentrierter Sole berücksichtigt. Folgende Annahmen wurden dafür getroffen:

- Zusätzlicher Stromverbrauch 1,5 kWh / t anwendungsfertige Sole
- Der zusätzliche Wasserverbrauch variiert je nach Konzentration der anwendungsfertigen Sole. Die konzentrierten Fremdsolen sind wie folgendes spezifiziert:
 - Sole_NaCl, konzentrierte Fremdsole: 26%
 - Sole_CaCl₂, konzentrierte Fremdsole: 33%
 - Sole_MgCl₂, konzentrierte Fremdsole: 33%
- Beispielrechnung: verwendet eine Meisterei die NaCl-Sole mit einer Anwendungskonzentration von 22 %, dann ergibt sich durch die Verdünnung von 26 auf 22 % eine zusätzlichen Wasserverbrauchsmenge von 4 %.

6.2 Vorkette: Antransport von Streumitteln und Sole vom Hersteller zum Einsatzort

Die spezifischen Transportdistanzen und Transportmittel für die Lieferung von Streumittel und Sole zum Einsatzort müssen vom Anwender in das ÖkoWin-Tool angegeben werden.

Im ÖkoWin-Tool sind die Emissionsfaktoren für den Transport für verschiedene Transportmittel hinterlegt (jeweils pro Tonnenkilometer):

- Bahn
- Binnentankschiff
- Binnenfrachter
- Überseeschiff
- Lkw, Unimog 16-32t, differenziert nach Euro 3, Euro 4, Euro 5, Euro 6
- Lkw, Unimog 7,5-16t, differenziert nach Euro 3, Euro 4, Euro 5, Euro 6

Die verwendeten Hintergrunddatensätzen sind in Tabelle 6-9 dokumentiert.

Ver- kehrs- mittel	Datensätze
Bahn	Mittelwert der ELCD-Datensätze: • Rail transport; technology mix, electricity driven, cargo (Location: RER) • Rail transport; technology mix, diesel driven, cargo (Location: RER)
Binnen- schiff	ELCD: Barge; technology mix; 1.228 t pay load capacity (Location: RER)
Massen- gutfrach- ter	ELCD: Bulk carrier ocean; technology mix; 100.000-200.000 dwt (Location: RER)
Contai- nerschiff	ELCD: Container ship ocean; technology mix; 27.500 dwt pay load capacity (Location: RER).
Lkw	Die gleiche Datenquelle wie bei Abschnitt 6.3.9 Ausbringung. Allerdings mit anderer Bezugsgröße. Für die Antransporte der Streumittel/Sole können die Entfernungen zwischen Standorten abgeschätzt werden. Für die Ausbringung (als Kernprozess in Meisterei sind die Kraftstoffverbrauch bekannt. Umrechnen basiert auf durchschnittlichen Verbrauchmenge je nach Lkw-Typen.

Tabelle 6-9: Die Datensätze für die Modellierung des Antransports

6.3 Kernprozesse

6.3.1 Strom, Bezug aus dem deutschen Stromnetz

Die Strombereitstellung aus dem Stromnetz wurde mit dem ÖKOBAUDAT-Datensatz „Strom für Gebäudebetrieb 2021 (de)“ modelliert.

6.3.2 Eigene Stromerzeugung mit einer Photovoltaik-Anlage

Ein Teil der Meistereien verfügt über eine eigene Stromerzeugung auf Basis einer Photovoltaik-Anlage. Um dies im ÖkoWin-Tool abzubilden wurde, der Aufwand der Herstellung eines Photovoltaikmoduls in Relation zu der potenziell von dieser erzeugten Strommenge gesetzt, so dass Emissionsfaktoren pro erzeugte Kilowattstunde abgeleitet werden können.

Die Modellierung der Herstellung beruht auf der Umweltproduktdeklaration für ein Photovoltaikmodul des Herstellers Viridian Solar (Viridian Solar 2023). Dieses Photovoltaikmodul PV16-405-M10 wiegt 25 kg, hat eine Gesamtmodulfläche von 1,95 m² mit einer effektiven Fläche von 1,88 m² und eine installierte Peak Leistung (Wp) von 405 Watt. Der Wirkungsgrad des Modules beträgt 21,5 %. Als funktionelle Einheit verwendet die Umweltproduktdeklaration 1 Wp des hergestellten Photovoltaikmoduls für eine Lebensdauer von 25 Jahren. Für die Umrechnung auf die

erforderliche Einheit erzeugte Kilowattstunde wird die potenzielle Gesamtleistung über die Lebensdauer des Photovoltaikmoduls berechnet. Es wird angenommen, dass die Solarstrahlungsenergie 1.100 kWh/m²*a beträgt. Dieser Wert ist der Mittelwert zwischen einem durchschnittlichen Wert von 1000 kWh/m²*a für ein ungünstigen Standort und 1.200 kWh/m²*a für ein günstigen Standort in Deutschland (ÖKOBAUDAT 2023). Der Wirkungsgrad wird konservativ mit 10 % angenommen. Insgesamt berechnen sich für 1,88 m² Fläche Photovoltaikanlage über die Lebensdauer von 20 Jahren (konservative Annahme nach ÖKOBAUDAT) eine produzierte Strommenge von 4.136 kWh. Die abgeleiteten Emissionsfaktoren sind in Tabelle 6-10 dargestellt.

Wirkungskategorie	Einheit	Werte bezogen auf 1Wp*	Werte bezogen auf 405Wp des gesamten Modules	Werte bezogen auf 1kWh produzierte Strommenge
KEA	MJ	7.98E+00	3.23E+03	7.82E-01
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ äq	7.43E-01	3.01E+02	7.27E-02
Versauerungspotenzial	mol H ⁺ äq	5.05E-03	2.05E+00	4.94E-04
Ozonabbaupotenzial	kg CFC11 äq	6.67E-08	2.70E-05	6.53E-09
Photooxidantienpotenzial	kg NMVOC äq	2.94E-03	1.19E+00	2.88E-04

Tabelle 6-10: Emissionsfaktoren für die Herstellung einer Photovoltaikanlage PV und die Umrechnung auf 1kWh

*Die Summe basiert auf den Teilergebnissen der in (Viridian Solar 2023) dokumentierten Prozesse A1-A5, die die Rohstoffentnahme, den Transport zum Hersteller, die Herstellung, den Transport zum Installationsort und die Installation umfassen.

6.3.3 Bezug von Wärme aus dem deutschem Fernwärme-Mix

Die Wärmebereitstellung aus dem deutschen Fernwärmenetz wurde mit dem ÖKOBAUDAT-Datensatz „Fernwärme Mix Deutschland“ modelliert.

6.3.4 Bezug von Wärme aus eigener Wärmebereitstellung

Für die eigene Wärmebereitstellung sind die eingesetzten Energieträger entscheidend für Umweltauswirkungen. Die Modellierung umfasst sowohl die direkten Emissionen, die bei dem Verbrennungsprozess verursacht werden, also auch die indirekten Emissionen, die bei der Bereitstellung von Energieträgern entstehen. Die Datensätze aus der ÖKOBAUDAT beziehen sich auf die Endenergie. Um auf die Menge der Energieträger umzurechnen, wurden die mittleren Heizwerte der Energieträger und Brutto-Nutzungsgrade benötigt. Für die Energieträger Biogas und Solarthermie beinhalten die ÖKOBAUDAT-Datensätze nur die Vorketten. Die direkten Emissionen für Biogas wurden aus (Lauf et al. 2021) ergänzt. Tabelle 6-11 gibt einen Überblick über die für die eigene Wärmebereitstellung verwendeten Datensätze und Datenquellen.

Energieträger	Einheit der zu erfassenden Verbrauchsdaten	In der Modellierung angenommen Wirkungsgrade	Annahme für die Umrechnung	Datensätze für die Bereitstellung des Energieträgers
Erdgas	m ³	88% (Lauf et al. 2021) Tabelle 60	Heizwert: 9,77 kWh / m ³ (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020)	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Gas Niedertemperatur (entspr. GEG)

Heizöl	Liter	83% (Lauf et al. 2021) Tabelle 60	Heizwert: 9,94 kWh / Liter (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020)	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Öl Niedertemperatur und Brennwert (entspr. GEG)	
Holzpellets	Tonne	85% (Lauf et al. 2021) Tabelle 64	Heizwert: 5 kWh/ kg (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020)	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Holzpellets (entspr. GEG)	
Holzhack-schnitzel	Tonne	70% (Lauf et al. 2021) Tabelle 64	Heizwert: 4,07 kWh/ kg (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020)	ÖKOBAUDAT: Nutzung - 1 kWh Endenergie aus Hackschnitzeln (entspr. GEG)	
Biogas	m ³	42% (Rensberg et al. 2019)	Heizwert: 5 kWh / m ³ (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2020)	Direkte Emissionen: (Lauf et al. 2021) Tabelle 90	Vorkette: ÖKOBAUDAT: Biogas (1 kg)
Solarthermie (eigene Kollektoren)	Endenergie in MJ	8,33*10 ⁻⁶ Stück pro produzierte kWh basiert auf folgende Annahmen: • Lebensdauer: 25 Jahre • Kollektorertrag pro Jahr: 400 kWh/(m²a) (Greenhouse Media GmbH 2022) • Fläche: 12 m² (eigene Annahme)		Keine direkte Emissionen (Lauf et al. 2021) Tabelle 103	ÖKOBAUDAT: Solaranlage Flachkollektor

Tabelle 6-11: Die zugrunde gelegten Annahmen und Hintergrund-Datensätze für die eigene Wärmebereitstellung

6.3.5 Diesel

Die Bereitstellung von Diesel wird mit dem ELCD-Datensatz " Diesel mix at refinery, production mix, at refinery, from crude oil and bio components, fuel supply, 10 ppm sulphur, 5.75 wt.% bio components" abgebildet (Fazio und Pennington 2008a).

6.3.6 Hydrauliköl / Motoröl

Für die Herstellung von Hydraulik- und Motoröl wird als Näherung der ELCD-Datensatz "Light fuel oil at refinery, production mix, at refinery, from crude oil, fuel supply, 0.1 wt.% sulphur" verwendet. (Fazio und Pennington 2008b) Es muss angemerkt werden, dass in öffentlichen Datenbanken keine spezifische Datensätze für Motoröl und Hydrauliköl identifiziert werden konnten.

6.3.7 Wasser für die eigene Soleherstellung sowie die Reinigung von Fahrzeugen und Geräten

Die Bereitstellung von Leitungswasser wird mit dem ELCD-Datensatz "Drinking water, production mix, at plant, water purification treatment, from surface water" abgebildet. (Fazio und Pennington 2005)

6.3.8 Eigene Soleherstellung

Die für die eigene Herstellung der Sole benötigte Mengen an Strom und Wasser müssen von den Anwender*innen in das ÖkoWin-Tool eingegeben werden. Die entsprechenden Vorketten zur Bereitstellung von Strom und Wasser werden je nach Angabe der Anwender*innen im Tool automatisch mit den entsprechenden Inventardaten verknüpft (z.B. Strom aus dem deutschen Strommix, vgl. Kapitel 6.3.1 oder aus der eigenen Stromerzeugung, vgl. Kapitel 6.3.2). An dieser Stelle ist daher keine weitere Modellierung erforderlich.

Für den Fall, dass Winterdienstakteure Trockensalze und/oder Fremdsole (konzentriert oder anwendungsfertig) beschaffen, werden für diese bei der Berechnung die im ÖkoWin-Tool hinterlegten Emissionsfaktoren berücksichtigt. Die Grundlagen der Modellierung für die Emissionsfaktoren sind in Kapitel 6.1 dokumentiert.

6.3.9 Ausbringung

Die Emissionsfaktoren für die Ausbringung werden auf Basis der Kraftstoffverbräuche und der Spezifikation (z.B. zulässiges Gesamtgewicht, Abgasnorm) der jeweiligen Fahrzeuge berechnet. Die Anwender*innen des ÖkoWin-Tools müssen die auf die funktionelle Einheit bezogenen Kraftstoffverbräuche erfassen und in das Tool eingeben. Die Angaben werden dann im Tool mit den entsprechenden Emissionsfaktoren für die Berechnung der Umweltauswirkungen verknüpft.

Im ÖkoWin-Tool wurden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Die Gewichtsklassen der Lkw wurden wie folgendes differenziert:
 - Unimog $\leq 7,5t$, Diesel
 - Lkw/ Unimog $>7,5-14t$, Diesel (Mittelwert von 7,5-12t und 12-14t)
 - Lkw $>14-26t$, Diesel (Mittelwert von 14-20t und 20-26t)
- Die Interviewergebnisse zeigten, dass Winterdienstfahrzeuge eingesetzt werden, die den Abgasnormen Euro 3 bis Euro 6 genügen. Entsprechend wird im ÖkoWin-Tool eine Auswahlmöglichkeit von EURO 3, EURO 4, EURO 5 und EURO 6 angeboten.
- Erfolgt innerhalb einer Abgasnorm eine weitere Differenzierung, werden die Mittelwerte der verschiedenen Varianten zugrunde gelegt. Beispielsweise gibt es innerhalb von Euro 4 zwei Varianten: Euro 4 EGR (Exhaust Gas Recirculation) und Euro 4 SCR (Selective Catalytic Reduction). Aus den beiden Varianten wird ein Mittelwert berechnet und als Emissionsfaktor hinterlegt. Die Emissionsfaktoren im ÖkoWin-Tool werden nicht nach Euro 4 EGR bzw. SCR unterschieden.
- Für LKW, die mit Biodiesel betrieben werden, konnten keine spezifischen Emissionsfaktoren identifiziert werden. Als Näherung werden Pkw-Daten verwendet. Die Bezugsgröße der Emissionsfaktoren ist der Kraftstoffverbrauch in Liter.
- Für Pkw wird differenziert nach Diesel, Benzin und Erdgas CNG (Compressed Natural Gas) und Erdgas LPG (Liquified Petroleum Gas / Autogas)) sowie Biodiesel

Für die direkten Emissionen des Fahrzeugbetriebs wird auf das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA 4.2)²⁵ Bezug genommen. Die Daten für die Herstellung des Kraftstoffes Diesel stammen aus der Datenbank ELCD; Daten für Biodiesel und Erdgas CNG aus GEMIS; Daten für Erdgas LPG aus der ÖKOBAUDAT. Da in HBEFA 4.2 keine Daten zu den

²⁵ <https://www.hbefa.net/d/> (zuletzt abgerufen am 19.12.2023)

direkten Emissionen für Biodiesel verfügbar sind, werden hierfür Daten aus (Lauf et al. 2021) verwendet.

7 Beschreibung des ÖkoWin-Tools

Die Inhalte dieses Abschnittes sind so formuliert, dass sie als separater Textdatei genutzt werden können

7.1 Hintergrund

Das ÖkoWin-Tool wurde im Rahmen des Forschungsprojektes "ÖkoWin: Ermittlung von Grundlagen und Bewertungsmethoden einer Ökobilanz des Straßenwinterdienstes" entwickelt. Das Projekt wurde im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) von Öko-Institut (Projektleitung) in Kooperation mit Salt Research + Consulting und Hydrotex durchgeführt (ÖkoWin - FE 03.0617/2021/MGB). Die konzeptionelle und technische Realisierung des Tools erfolgte durch Öko-Institut und Salt Research + Consulting.

7.2 Zielgruppe und Anwendungsbereich des ÖkoWin-Tools

Das ÖkoWin-Tool ermöglicht es Winterdienstakteuren, wie z.B. Straßen- und Autobahnmeistereien oder Bauhöfen, selbst orientierende Ökobilanzen ihrer Winterdienstaktivitäten zu erstellen. Sie können damit einzelne Einsätze aber auch Teile von oder ganze Winterperioden sowie Teilstrecken oder ihr gesamtes Gebiet, in denen der Winterdienst erfolgt ist, abbilden. Das Tool kann darüber hinaus auch für Investitionsentscheidungen im Rahmen des Winterdienstes genutzt werden. In diesen Fällen könnten die für die Beschaffung verantwortlichen Personen das ÖkoWin-Tool für die Abwägung unterschiedlicher Alternativen nutzen. Das ÖkoWin-Tool steht aber auch anderen Interessierten offen, beispielsweise Personen, die sich im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit mit den Umweltauswirkungen des Winterdienstes beschäftigen.

Basierend auf der Methode der Ökobilanz unterstützt das ÖkoWin-Tool die Anwender*innen bei der Beantwortung verschiedener konkreter Fragestellungen zu den Umweltauswirkungen von Winterdienstaktivitäten. Als wichtigste Fragestellungen sind die folgenden zu nennen:

- Wie hoch sind die potenziellen Umweltauswirkungen der Winterdienstaktivitäten insgesamt bezogen auf die funktionelle Einheit?
- Welche Prozesse tragen am meisten zu den verschiedenen Umweltwirkungskategorien bei?
- Wie hoch sind die Einsparpotenziale durch verschiedene Optimierungsmaßnahmen? Darunter:
- Wie hoch fallen die potenziellen Umweltwirkungen bei der Anwendung verschiedener Streutechniken aus? Beispielsweise kann ein Vergleich von Trockensalz versus FS30 versus FS 100 durchgeführt werden.
- Wie wirkt sich die Anwendung unterschiedlicher Technologien auf die Umweltauswirkungen aus – beispielsweise der Einsatz von E-Fahrzeugen oder eine eigene Soleherstellung?

Die Methode der Ökobilanz eignet sich sehr gut, um Optimierungspotenziale für die Durchführung des Winterdienstes innerhalb einer Meisterei bzw. generell einer Organisation, die den Winterdienst durchführt, zu identifizieren. Dagegen ist ein direkter Vergleich des Winterdienstes verschiedener Meistereien bzw. von Organisationen, die den Winterdienst durchführen, aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit (z.B. Klima- und Wetterbedingungen und/oder der Straßen- und Verkehrssituationen) nur sehr eingeschränkt oder gar nicht möglich (vgl. Kapitel 5.1).

Das ÖkoWin-Tool deckt die Umweltwirkungskategorien Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial, Ozonabbau- und Photooxidantienpotenzial sowie den kumulierte Energieaufwand ab.

Demgegenüber gibt es verschiedene Auswirkungen des Winterdienstes, die mit der Methode der Ökobilanz aufgrund offener methodischer Fragen und fehlender Daten zumindest derzeit nicht abgebildet werden können (vgl. Kapitel 3.1.3, Kapitel 3.3, Kapitel 3.4 und Kapitel 5.7). Darunter fallen potenzielle ökotoxische Wirkungen insbesondere aus der Ausbringung der Streumittel.

Ebenso können potenzielle negative Wirkungen auf Bauwerke und Fahrzeuge, die Reparaturen und Ersatzmaßnahmen notwendig machen und darüber Umweltauswirkungen verursachen, nicht berücksichtigt werden. Auch die Effekte des Winterdienstes auf den Verkehrsfluss können mit der Methode Ökobilanz derzeit nicht abgebildet werden. Vor diesem Hintergrund werden die genannten Auswirkungen durch das ÖkoWin-Tool nicht abgebildet.

7.3 Kurzanleitung für die Nutzung des ÖkoWin-Tools

7.3.1 •Technische Voraussetzungen

Voraussetzung für die Nutzung des ÖkoWin-Tools ist Microsoft® Excel® unter Microsoft 365.

Das ÖkoWin-Tool enthält in Visual Basics programmierte Makros (VBA-Makros). Die Makros müssen aktiviert sein, damit das Tool funktioniert. Ggf. muss die Makro-Ausführung vom Systemadministrator freigegeben werden.

Damit mit dem ÖkoWin-Tool gerechnet werden kann, muss es auf dem eigenen Rechner / im eigenen Netzwerk abgespeichert sein.

7.3.2 •Vorgehen Schritt für Schritt

Die Nutzung des ÖkoWin-Tools erfolgt in sechs Schritten:

Schritt 1: Herunterladen und Abspeichern des ÖkoWin-Tools unter einem eigenen Namen.

Es ist sinnvoll, für jede Bilanz, die erstellt werden soll, eine eigene Datei anzulegen, d.h. das ÖkoWin-Tool jeweils separat abzuspeichern. Die Vergabe instruktiver Dateinamen hat sich dabei bewährt. Wichtig: Nur wenn das ÖkoWin-Tool abgespeichert ist, können mit ihm Berechnungen durchgeführt werden.

Schritt 2: Ein Blick auf die methodische Grundlage des ÖkoWin-Tools

Es ist zweckmäßig, sich auf dem Tabellenblatt „Einleitung“ einen Überblick zu den methodischen Grundlagen des ÖkoWin-Tools zu verschaffen. Dazu gehört u.a. die Erläuterung von Zielen und Zielgruppen des ÖkoWin-Tools sowie die Festlegungen von Systemgrenzen und Wirkungskategorien. Es wird außerdem erläutert, wie die potenziellen Umweltauswirkungen berechnet werden.

Schritt 3: Eingabe der allgemeinen Eckdaten der zu bilanzierenden Winterdienstaktivitäten

Auf dem Tabellenblatt „Eingabe Untersuchungsrahmen“ sind die folgenden Angaben in das ÖkoWin-Tool einzugeben:

Allgemeine Informationen:

- Bezeichnung Meisterei/Bauhof
- Adresse Meisterei/Bauhof
- Bundesland/Niederlassung
- Standort
- Bearbeiter*innen
- Datum

Die Bezugsgröße:

Die funktionelle Einheit ist die Bezugsgröße, auf die sich die Ökobilanz und damit auch alle spezifischen Daten zu Verbräuchen etc. beziehen, die im nächsten Schritt eingegeben werden. Sie hat zwei Dimensionen:

- Die räumliche Dimension der funktionellen Einheit: Angabe der Streufläche der Winterdienstaktivität, die bilanziert werden soll. Vorgesehen ist die Eingabe der bewerteten Streufläche (bSF), die durch die Multiplikation der Streufläche mit einem Betreuungsfaktor ermittelt wird. Dabei beschreiben die Betreuungsfaktoren die unterschiedlichen Winterdienstintensitäten nach Straßenklassen (Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Landes- und Staatsstraßen sowie Kreisstraßen). Im ÖkoWin-Tool sind Betreuungsfaktoren für die verschiedenen Straßenklassen voreingestellt, die auf TAUSALA (BMVI 2019) basieren. Sie können durch eine spezifische Eingabe ersetzt werden.
- Die zeitliche Dimension der funktionellen Einheit: Angabe des Anfangs - und Enddatums der Winterdienstaktivität, die bilanziert werden soll.

Angaben zum Winterdienst:

Informationen zu den Winterdienstaktivitäten mit Bezug zur respektiven funktionellen Einheit können die Interpretation der Ergebnisse der Ökobilanz unterstützen. Eingegeben werden können Angaben zum Winterdienst selbst sowie den Wetter- und Straßenbedingungen:

Winterdienst:

- Anteile Trockensalz, FS 30 und FS 100 im betrachteten Winterdienst (Einsätze in Prozent, geschätzt)
- Anteile präventiver und kurativer Maßnahmen im betrachteten Winterdienst (Einsätze in Prozent, geschätzt)
- Besonderheiten in Bezug auf die verwendeten Fahrzeuge und die eingesetzte Streutechnik
- Sonstige Besonderheiten in Bezug auf den durchgeführten Winterdienst
- Interne Salz- und Soletransporte sowie Umschlagsprozesse

Wetter- und Straßenbedingungen:

- Schneefallereignisse (z.B. Häufigkeit, Dauer/Zeitpunkt und Schwere)
- Glätteereignisse (z.B. Häufigkeit, Dauer/Zeitpunkt und Schwere):
- Reifglätte, Eisglätte
- Sonstige Besonderheiten der Wetterbedingungen
- Besonderheiten in Bezug auf den Verkehr / die Verkehrsbedingungen

Hinweis: Die Angaben zum Winterdienst fließen nicht in die Berechnungen der Ökobilanz ein, sondern sollen als Interpretationshilfe dienen, z.B. wenn man die Ökobilanzergebnisse von zwei unterschiedlichen Winterperioden vergleichen möchte. .

Schritt 4: Eingabe der spezifischen (Verbrauchs-)Daten zu den Winterdienstaktivitäten (Kernprozesse)

Wichtig: Die Eingabe der spezifischen Daten muss immer in Bezug auf die im vorangegangenen Schritt definierte funktionellen Einheit erfolgen.

Auf dem Tabellenblatt „Eingabe spezifische Daten“ ist die Eingabe in drei Kategorien vorgesehen: 1) Prozesse in der Meisterei / im Bauhof, 2) Ausbringung, 3) Transport der Streumittel vom Herstellungsort bis zur Meisterei / zum Bauhof. Das ÖkoWin-Tool sieht in diesen Kategorien eine Reihe von Auswahlmöglichkeiten vor, die es Anwender*innen ermöglichen sollen, ihre jeweils spezifische Situation abzubilden. In der Folge treffen nicht alle Auswahlmöglichkeiten auf alle Anwender*innen zu.

Zu jedem Datensatz, der eingegeben wird, ist vorgesehen, dass Angaben zur Datenqualität gemacht werden. Konkret kann aus den drei Kategorien 1) gemessen, 2) berechnet, 3) abgeschätzt ausgewählt werden. Diese Einschätzung fließt nicht in die Berechnungen ein.

Darüber hinaus können zu jedem Datensatz Anmerkungen gemacht werden. Es wird empfohlen hier einzugeben, wie die jeweiligen Daten ermittelt wurden. Beispielsweise könnte hier erläutert werden, wie bei einer Abschätzung vorgegangen wurde oder auf in welchem Dokument die Daten

zu finden sind. Im Nachhinein kann dann nachvollzogen werden, wie die Ermittlung der Daten erfolgt ist und welche Quellen genutzt wurden.

Im Folgenden wird ein Überblick gegeben, welche Daten in den drei Kategorien eingegeben werden können:

Prozesse in der Meisterei / im Bauhof

Zunächst geht es um die Frage, ob der Winterdienstakteur über eine eigene Energieerzeugung verfügt:

- Frage 1: Verfügt die Meisterei / der Bauhof über eine eigene Stromerzeugung? Hinweis: Falls es einen Generator gibt, der nur im Falle eines Stromausfalls eingesetzt wird, geben Sie bitte "nein" ein.
- Frage 2: Verfügt die Meisterei / der Bauhof über eine eigene Wärmebereitstellung?

Wird eine oder werden beide Fragen mit „ja“ beantwortet, dann klappen ab Zeile 31 im Tabellenblatt entsprechende Eingabefenster für die Eigenenergieerzeugung auf. Angegeben werden kann dann der Verbrauch von Strom aus der eigenen Photovoltaikanlage sowie der Verbrauch von Wärme aus der eigenen Wärmeerzeugung auf Basis der Energieträger Erdgas, Heizöl, Holzhackschnitzel, Holzpellets, Biogas, Solarthermie.

Hinweis: Werden zunächst Daten bei der Eigenenergieerzeugung eingetragen, später aber auf die Fragen „nein“ eingegeben, dann werden die eingegebenen Daten wieder gelöscht.

Zum Aufwand innerhalb der Meisterei/des Bauhofes können folgende Daten eingegeben werden:

- Stromverbrauch der Meisterei / des Bauhofs für den Winterdienst (Bezug aus dem Stromnetz)
- Verbrauch von Nah- oder Fernwärme (Wärmebezug)
- Verbrauch von Leitungswasser in der Meisterei / im Bauhof für den Winterdienst (z.B. für Soleherstellung, Fahrzeug- und Streumaschinenreinigung)
- Verbrauch von Niederschlagswasser in der Meisterei / im Bauhof für den Winterdienst (z.B. für Soleherstellung, Fahrzeug- und Streumaschinenreinigung)
- Verbrauch von Motoröl und Hydrauliköl, der dem Wetterdienst zugeordnet werden kann (z.B. für Streufahrzeuge)
- Verbrauch von Diesel für Prozesse in der Meisterei / auf dem Bauhof, die dem Winterdienst zugeordnet werden können (z.B. Nutzung Radlader im Streumittelager oder für Beladung Streufahrzeuge)

Ausbringung

Eingabe des Verbrauchs an Streumitteln:

Trockene Streumittel (Trockensalz). Anwender*innen haben folgende Auswahl:

- Natriumchlorid (aus Steinsalz)
- Natriumchlorid (aus Siedesalz)
- Natriumchlorid (aus Meersalz)
- Calciumchlorid (Prills, 100 %)
- Calciumchlorid (Flakes 76 – 82 %)

Konzentrierte Fremdsole und Fremdsole in Anwendungskonzentration. Anwender*innen haben folgende Auswahl:

- Natriumchlorid-Sole
- Magnesiumchlorid-Sole
- Calciumchlorid-Sole

Eingabe des Verbrauchs an Kraftstoffen für die Ausbringung:

Anwender*innen müssen dabei sowohl den Fahrzeugtyp (vgl. Kapitel 6.3.9) als auch die jeweilige Kraftstoffmenge eingeben. Zur Auswahl stehen 18 verschiedene Fahrzeugtypen, darunter LKW, Unimog und Pkw, differenziert nach zulässigem Gesamtgewicht, Abgasnorm und Kraftstoff.

Transport der Streumittel (trocken, Sole) vom Herstellungsort bis zur Meisterei / zum Bauhof

Die eingegebenen Daten sollten alle Transportprozesse abdecken. Dabei ist zu beachten, dass sich Transporte, z.B. der Transport vom Hersteller zur Meisterei aus Teilstrecken mit unterschiedlichen Transportmitteln zusammensetzen kann. Diese müssen jeweils einzeln eingegeben werden, d.h. für jede Teilstrecke eine Zeile. Insgesamt müssen folgende Daten von den Anwender*innen eingegeben werden:

- Eine kurze Beschreibung des Transportprozesses/der Teilstrecke, z.B. Produktionsstätte => Zentrallager; Produktionsstätte =>Meisterei oder Zentrallager => Meisterei
- Spezifikation der transportierten Streumittel, zur Auswahl stehen acht Typen an Streumittel (trocken, Sole)
- Transportmittel: zur Auswahl stehen acht verschiedene LKW-Typen, die Bahn sowie Binnenschiff, Massengutfrachter, Containerschiff
- Transportentfernung, einfache Entfernung (km)
- Menge des transportierten Streumittels (Tonnen)

Für die Ermittlung der Transportentfernungen werden im ÖkoWin-Tool Hinweise auf Entfernungrechner gegeben, die im Internet verfügbar sind:

- Antransport per LKW, Berechnung eines Landwegs: <https://routing.openstreetmap.de/?z=4¢er=47.724545%2C-29.707031&hl=de&alt=0&srv=0>
- Antransport per Schiff, Berechnung eines Wasserweges: <https://www.searates.com/services/distances-time/>

Antransport per Bahn: Für die Berechnung einer Bahnstrecke konnte kein vergleichbarer Rechner identifiziert werden. Die Transportentfernungen müssen ggf. beim jeweiligen Lieferanten in Erfahrung gebracht werden.

Schritt 5: Ausgabe der Ergebnisse

Auf dem Tabellenblatt „Ergebnisse“ werden die Eckpunkte der Ökobilanz, d.h. der Untersuchungsrahmen sowie die Ökobilanzergebnisse in tabellarischer Form und als Grafik dargestellt.

Außerdem gibt es auf diesem Tabellenblatt ab Zeile 225 die Möglichkeit die berechnete Ökobilanz im pdf-Format auszugeben. Die Tabellen und die Grafik können darüber hinaus aus dem Tabellenblatt für die Verwendung in anderen Dokumenten kopiert werden.

Folgende Informationen sind auf dem Datenblatt „Ergebnisse“ zusammengestellt:

- Angaben zum Anwender des Tools und zum Datum der Erstellung der Ökobilanz
- Darstellung der funktionellen Einheit
- Angaben zum Winterdienst (Winterdiensttechnik, Wetter- und Straßenbedingungen)
- Das Gesamtergebnis der Ökobilanz zu den fünf betrachteten Wirkungskategorien.
- Erläuterungen zur Datenqualität der eingegebenen Daten (prozentualer Anteil gemessene, berechnete und abgeschätzte Datensätze)
- Das Ergebnis der Ökobilanz differenziert nach Prozessen (Beitragsanalyse):
 - Absolute Ergebnisse nach Prozessen (tabellarisch)
 - Prozentuale Anteile der Prozesse (tabellarisch)
 - Detaillierte Aufschlüsselung der absoluten Ergebnisse zu den einzelnen Prozessen (tabellarisch)
 - Grafische Darstellung der Beitragsanalyse (prozentuale Anteile der Prozesse)

Die Darstellung der absoluten Ergebnisse erfolgt als Dezimalzahl mit zwei Nachkommastellen.

Eine Ausnahme stellt die Wirkungskategorie Ozonabbaupotenzial dar. Da in dieser Wirkungskategorie sehr kleine Werte zu erwarten sind, wurde die wissenschaftliche Schreibweise gewählt.

Schritt 6: Interpretation der Ergebnisse

Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt vor dem Hintergrund der für die jeweilige Ökobilanz getroffenen Festlegungen und Annahmen, sowie unter Berücksichtigung der verfügbaren Datengrundlage.

Mögliche Ansätze sind:

Stellen sich bestimmte Prozesse als besonders relevant in Bezug auf ihren Beitrag zu den Umweltauswirkungen heraus, dann lohnt sich der Blick in die detaillierten Ergebnisse zu den jeweiligen Prozessen: können einzelne Elemente identifiziert werden, die dafür verantwortlich sind? Lassen sich daraus potenzielle Optimierungsansätze abgeleitet werden, die ggf. mit dem ÖkoWin-Tool überprüft werden könnten?

Liegen Ergebnisse von mehreren Zeitperioden zur gleichen Bezugsgröße vor, z.B. zu den Winterdienstaktivitäten der gesamten betreuten Streufläche einer Autobahnmeisterei für mehrere Winterperioden, dann unterstützt die Berücksichtigung der Angaben zum Winterdienst (Winterdiensttechnik, Wetter- und Straßenbedingungen) die Interpretation: Gab es wesentliche Unterschiede oder Veränderungen zwischen den betrachteten Zeitperioden?

Hinweis zur Datenqualität: Die dargestellte Datenqualität bildet nicht ab, welche Bedeutung die jeweiligen spezifischen Daten im Rahmen der Bilanz haben, z.B. welchen Einfluss es auf das Ergebnis hätte, wenn statt eines grob abgeschätzten Wertes ein gemessener Wert eingegeben würde. Es kann daher sinnvoll sein, in der differenzierten Darstellung der Ergebnisse zu prüfen, welche Prozesse besonders relevant sind, und welche Datenqualität die entsprechenden eingegebenen spezifischen Daten haben. Ist der Beitrag eines Prozesses besonders groß, kann es sinnvoll sein Daten nachzuerheben, um die Datenqualität zu verbessern und das Ergebnis der Ökobilanz zu präzisieren.

7.3.3 •FAQ – Fragen & Antworten bei der Nutzung des ÖkoWin-Tools

Welchen Nutzen bringt die Anwendung des ÖkoWin-Tools?

Mit dem ÖkoWin-Tool können die potenziellen Umweltauswirkungen von Winterdienstaktivitäten ermittelt und Hotspots der Umweltbelastungen identifiziert werden. U.a. betrifft das auch das Treibhauspotenzial, d.h. die klimarelevanten Emissionen. Es kann außerdem geprüft werden, inwiefern verschiedene Maßnahmen resp. Änderungen des Winterdienstpraktiken Einfluss auf die potenziellen Umweltauswirkungen haben. Umweltaspekte können auf diese Weise in Entscheidungen, wie zur Anschaffung von Winterdiensttechnik (z.B. FS100-Technik) oder der Ausschreibung von Streumitteln einbezogen werden.

Wer sollte das ÖkoWin-Tool ausfüllen?

Grundsätzlich kann jeder, der eine entsprechende Fragestellung zu den Umweltauswirkungen von Winterdienstaktivitäten hat und über die notwendige Datengrundlage verfügt, das ÖkoWin-Tool nutzen. Hierzu gehören insbesondere Verantwortliche für den Winterdienst in Straßen- und Autobahnmeistereien sowie Bauhöfen, aber auch die für die Entscheidung zu und Beschaffung von Streumitteln und Winterdiensttechniken Verantwortlichen.

Wie groß ist der Aufwand für die Erstellung einer Ökobilanz mit dem ÖkoWin-Tool?

Der größte Aufwand liegt in der Beschaffung der notwendigen Primärdaten. Für die eigentliche Eingabe der Daten und Ausgabe der Ergebnisse ist mit ca. einer Stunde zu rechnen. Wenn man verschiedene Alternativen und/oder Optimierungsmaßnahmen durchrechnen möchte, dann muss man hierfür noch einmal Zeit einrechnen. Insbesondere auch für die Ermittlung der dafür notwendigen Daten.

Brauche ich eine Schulung, um das ÖkoWin-Tool nutzen zu können?

Das ÖkoWin-Tool ist so gestaltet, dass es aus sich selbst heraus verständlich und anwendbar ist. Begleitend steht Anwender*innen eine Kurzbeschreibung und Anleitung zur Verfügung.

Welche Daten muss man vorbereiten?

Für die Nutzung des ÖkoWin-Tools sind Primärdaten zu den Kernprozessen der zu bilanzierenden Winterdienstaktivitäten in Bezug auf die festgelegte funktionelle Einheit erforderlich. Zentral sind:

- Verbräuche an unterschiedlichen Streumitteln,
- Kraftstoffverbräuche für die Ausbringung, Leerfahrten sowie Kontrollfahrten,
- Transporte der Streumittel (insbesondere Transportdistanzen, Transportmittel)
- Verbrauch an Strom und Wärme sowie Kraftstoffen in den Straßen- und Autobahnmeistereien bzw. Bauhöfen und Lagern

Welche Möglichkeiten gibt es, Daten abzuschätzen?

Beispiele für Abschätzungen sind:

- Liegt nur eine Stromrechnung für das gesamte Jahr vor, so kann man pauschal den Stromverbrauch anteilig zum betrachteten Zeitraum dem Winterdienst zurechnen, z.B. eine 3-monatige Winterdienst-Periode entspricht 25 % des Jahresstromverbrauchs.
- Liegt nur eine Wasserrechnung für das gesamte Jahr vor, dann kann man den Wasserverbrauch entweder pauschal anteilig des Zeitraums der betrachteten Winterdienst-Periode zurechnen. Ggf. sind Anpassungen sinnvoll, beispielsweise, wenn im Sommer aufgrund von Bewässerungstätigkeiten ein höherer Wasserverbrauch als im Winter zu erwarten ist.

Wie geht man mit Datenlücken um?

Grundsätzlich ist es anzustreben, Datenlücken zu vermeiden, d.h. die Primärdaten, die die funktionelle Einheit abbilden, möglichst vollständig zu erheben und einzugeben. Ist dies nicht möglich, sollten qualifizierte Abschätzungen vorgenommen werden. Ist dies ebenfalls nicht möglich, dann sollten Datenlücken dokumentiert werden, damit sie bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden können.

Wie lassen sich die Ergebnisse ausgegeben?

Die Ergebnisse sind zunächst auf dem Datenblatt „Ergebnisse“ einsehbar. Sie lassen sich als pdf-Datei abspeichern (ab Zeile 225). Außerdem können die Ergebnistabellen sowie die Grafik kopiert und in ein anderes Dokument eingefügt werden.

Lassen sich individuelle Änderungen im ÖkoWin-Tool durchführen?

Das ÖkoWin-Tool verfügt über einen Schreibschutz, um versehentliche Änderungen durch Anwender*innen zu vermeiden. Dieser Schreibschutz kann von der Anwenderin / vom Anwender aufgehoben werden. Das Passwort lautet „schnee“.

An verschiedenen Stellen sind individuelle Änderungen möglich. Beispiele hierfür sind:

- Es können Tabellenblätter eingefügt werden, um auf ihnen beispielsweise Nebenrechnungen durchzuführen. ==>mit der rechten Maustaste auf die untere Menüleiste eines Tabellenblatts klicken ==>Einfügen==>Tabelleblatt
- Bei der Eingabe der funktionellen Einheit kann der voreingestellte Betreuungsfaktor durch einen eigenen Betreuungsfaktor ersetzt werden ==>Tabelleblatt „Eingabe Untersuchungsrahmen“, ab Zeile 19

- Bei den Angaben zu den Transportprozessen der Streumittel können Zeilen eingefügt werden =>Tabellenblatt „Eingabe spezifische Daten“, ab Zeile 105

7.4 Beispielrechnung mit dem ÖkoWin-Tool

Ursprünglich war geplant, das Tool im Projekt zu nutzen, um verschiedene Winterdienstpraktiken zu vergleichen, beispielsweise den Einsatz von Trockensalz dem Einsatz von Feuchtsalz gegenüberzustellen. Leider war es trotz umfänglicher Bemühungen nicht möglich, entsprechende Primärdaten zu erhalten, die ein aussagekräftiges Ergebnis ermöglicht hätten.

Im Folgenden soll zur Illustration dennoch ein Beispiel vorgestellt werden, das mit dem ÖkoWin-Tool berechnet wurde. Basis sind Daten zum Winterdienst einer fiktiven Autobahnmeisterei über eine Winterperiode. Mit dem Beispiel soll vereinfachend dargestellt werden, wie mit diesem Tool eine Ökobilanz des Winterdienstes erstellt werden kann. Die funktionelle Einheit ist definiert als die Aktivitäten des Winterdienstes vom 01.10.2022 bis zum 31.03.2023 auf einer Streufläche von 1,3 Mio. Quadratmetern (ca. 110 km Autobahn).

An Prozessen werden die Herstellung der Streumittel (inkl. Vorketten), die Transporte der Streumittel (direkte Emissionen beim Transport und Herstellung Kraftstoffe), die Ausbringung der Streumittel (direkte Emissionen bei der Ausbringung und Herstellung Kraftstoffe) sowie der Stromverbrauch in der Meisterei / im Bauhof (Bereitstellung Strom, Netzbezug) berücksichtigt. Als Streumittel wird Natriumchlorid auf Basis von Steinsalz eingesetzt und es wird von einer eigenen Soleherstellung ausgegangen. Konkret werden 20 % FS30 und 80 % FS100 eingesetzt. An spezifischen Inputdaten liegen der Streumittelverbrauch [in Tonnen], der Strom-, der Kraftstoff- sowie der Wasserverbrauch [in kWh, resp. Litern] mit Bezug zur funktionellen Einheit vor. Außerdem werden Angaben zu den Transportentfernungen und den Transportmitteln (LKW) für die Berechnung der potenziellen Umweltauswirkungen für den Antransport der Streumittel berücksichtigt.

In Bild 7-1 sind die prozentualen Anteile der vier Prozesse am Gesamtergebnis in den fünf Wirkungskategorien Kumulierter Energie Aufwand, Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial, Ozonabbaupotenzial und Photooxidantienpotenzial dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Ausbringung der Streumittel mit zwischen 43 und 55 Prozent in allen Phasen den größten Anteil ausmacht, gefolgt mit einem Anteil von 27 bis 41 Prozent vom Antransport der Streumittel vom Produktionsort in die Meisterei. Die Bereitstellung des verbrauchten Stroms folgt an dritter Stelle, wobei der kumulierte Energieaufwand und das Treibhauspotenzial mit 23 bzw. 13 Prozent deutlich stärker zu Buche schlagen als die drei anderen Kategorien mit einem Anteil von 2-4 Prozent.

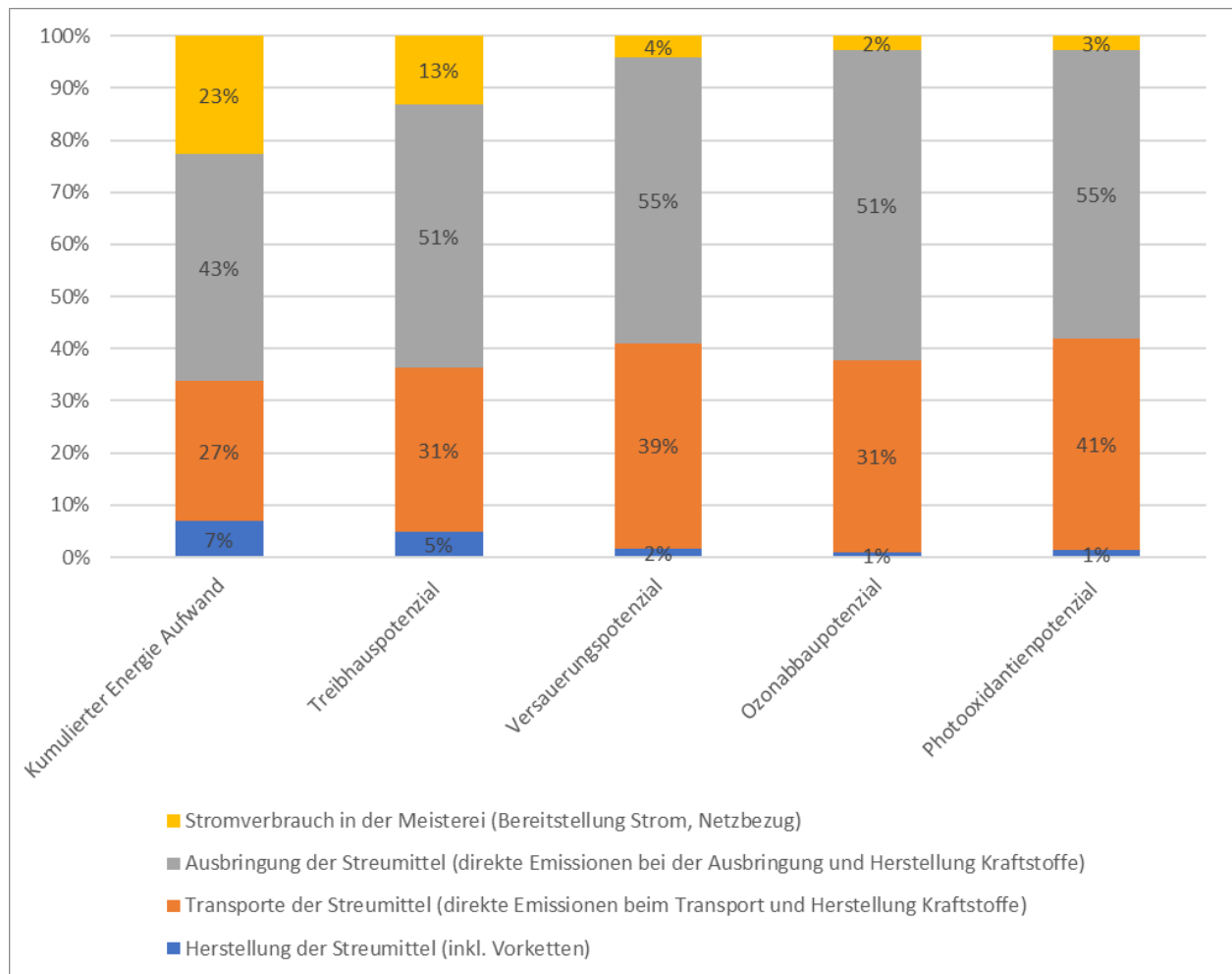


Bild 7-1: Prozentuale Anteile der verschiedenen Prozesse am Ergebnis der Ökobilanz in fünf Wirkungskategorien für das Berechnungsbeispiel einer fiktiven Autobahnmeisterei. Quelle: Eigenen Darstellung

Die Herstellung des Streumittels – Natriumchlorid aus Steinsalz – macht, wie Bild 7-1 zeigt, nur einen relativ geringen Anteil am Gesamtergebnis der verschiedenen Wirkungskategorien aus. Würde man bei ansonsten gleichen Annahmen Natriumchlorid aus Steinsalz durch Natriumchlorid aus Siedesalz ersetzen, dann verändert sich dieses Bild allerdings. Aufgrund des deutlich höheren Energieaufwandes für die Herstellung von Siedesalz würde das absolute Gesamtergebnis in allen Wirkungskategorien zwischen 11 und 89 Prozent höher ausfallen (Photooxidationspotenzial bzw. kumulierter Energieaufwand) als vorher. Gleichzeitig würde der Anteil der Herstellung der Streumittel am Gesamtergebnis auf zwischen 11 Prozent (Photooxidationspotenzial) und 51 Prozent (kumulierter Energieaufwand) ansteigen.

Dieses Beispiel zeigt, dass mit Hilfe des Tools der Einsatz verschiedener Streumittel verglichen werden kann, beispielsweise der Einsatz verschiedener Anteile von Feuchtsalz 30 (FS30) und Feuchtsalz 100 (FS100). Voraussetzung ist allerdings, dass die entsprechenden Daten zu den jeweils mit den unterschiedlichen Alternativen verbundenen Verbräuchen an Streumitteln, Strom, Kraftstoffen etc. vorliegen und in das Tool eingegeben werden können. Leider war dies im Fall des Beispiels nicht der Fall, so dass an dieser Stelle keine Alternativrechnungen eingefügt werden können.

Ebenso wie die Variation des Streumittels kann mit Hilfe des ÖkoWin-Tools berechnet werden, welchen Effekt es auf die Umweltauswirkungen hat, wenn der Antransport der Streumittel variiert wird und statt per LKW wie im Berechnungsbeispiel oben mit der Bahn oder mit einem Binnenschiff erfolgen würde. Im konkreten Beispiel würden – bei ansonsten gleichen Annahmen - durch den Antransport der Streumittel mit der Bahn beim kumulierten Energieaufwand, dem Treibhauspotenzial und dem Versauerungspotenzial gut 30 bis 50 Prozent eingespart bzw. reduziert

werden können. Der Antransport mit einem Binnenschiff hat einen ähnlichen Effekt. Hierbei sind allerdings etwaig notwendige Transporte zwischen Entladeort Bahn bzw. Schiff und der Meisterei nicht berücksichtigt. Perspektivisch könnten im Tool auch neue Fahrzeugtechnologien, wie beispielsweise E-LKWs abgebildet werden.

Die Möglichkeit verschiedene Varianten zu berechnen, besteht auch für die Ausbringung. Auch hier können z.B. verschiedene Emissionsklassen und Fahrzeugtechnologien variiert werden. Ebenso können Effekte einer Routenoptimierung für Ausbringung, Kontroll- und Leerfahrten abgebildet werden, die insbesondere bei netzartigen Streckenstrukturen Minderungspotenziale für Umweltauswirkungen bietet. Demgegenüber gibt es bei linearen Streckenstrukturen wie sie z.B. für Autobahnmeistereien typisch sind, weniger Möglichkeiten die Routen zu optimieren.

7.5 Überblick über die im ÖkoWin-Tool hinterlegten Emissionsfaktoren

Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick über die im ÖkoWin-Tool hinterlegten Emissionsfaktoren:

- Emissionsfaktoren der Streumittel (trocken und Sole) in Tabelle 7-1
- Emissionsfaktoren der Transporte, differenziert nach Transportmitteln in Tabelle 7-2
- Emissionsfaktoren der Ausbringung, pro Liter Kraftstoff bzw. Erdgas in Tabelle 7-3
- Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung Strom und Wärme, Bezug aus dem Netz sowie Eigenproduktion in Tabelle 7-4
- Emissionsfaktoren der Bereitstellung von Wasser, Hydraulik-/Motoröl und Diesel in Tabelle 7-5

Die Grundlage der Berechnungen der Emissionsfaktoren sind in Kapitel 6 erläutert.

	KEA [MJ / Tonne]	GWP [kg CO ₂ Äq. / Tonne]	AP [mol H ⁺ Äq. / Tonne]	ODP [kg FCKW-11 Äq. / Tonne]	POCP [kg NMVOC Äq. / Tonne]
Trockensalz					
Natriumchlorid (aus Steinsalz)	194,90	8,01	1,40E-02	2,33E-10	1,32E-02
Natriumchlorid (aus Siedesalz)	2764,59	123,16	1,50E-01	4,62E-09	1,14E-01
Natriumchlorid (aus Meersalz)	60,19	3,04	1,23E-02	7,15E-08	6,75E-03
Calciumchlorid (Prills, 100%)	18977,13	1250,26	1,09E+00	4,62E-08	8,14E-01
Calciumchlorid (Flakes 76-82%)	12404,68	845,01	7,81E-01	3,61E-08	5,53E-01
Sole					
Sole_NaCl_Steinsalz, konzentrierte Fremdsole	53,37	2,55	5,10E-03	7,23E-09	4,40E-03
Sole_NaCl_Siedesalz, konzentrierte Fremdsole	53,05	2,56	1,04E-02	7,08E-08	4,46E-03
Sole_NaCl, konzentrierte Fremdsole	53,21	2,55	7,72E-03	3,90E-08	4,43E-03
Sole_CaCl ₂ , konzentrierte Fremdsole	3391,45	236,38	2,77E-01	1,50E-08	1,69E-01

Sole_MgCl ₂ , konzentrierte Fremdsole	53,05	2,56	1,04E-02	7,08E-08	4,46E-03
--	-------	------	----------	----------	----------

Tabelle 7-1: Überblick über die Emissionsfaktoren der Streumittel (trocken und Sole)

Transportmit- tel	KEA [MJ / tkm]	GWP [kg CO ₂ Äq. / tkm]	AP [mol H+ Äq. / tkm]	ODP [kg FCKW-11 Äq. / tkm]	POCP [kg NMVOC Äq. / tkm]
Bahn	0,47	0,027	2,80E-04	2,47E-09	2,50E-04
Binnenschiff	0,37	0,027	3,60E-04	3,86E-11	4,60E-04
Massengut- frachter	0,03	0,002	9,91E-05	3,07E-12	6,37E-05
Containerschiff	0,17	0,01	5,30E-04	1,65E-11	3,40E-04
Lkw >14-26t, Euro 3	2,54	0,17	1,18E-03	3,30E-11	1,46E-03
Lkw >14-26t, Euro 4	2,37	0,16	9,04E-04	3,08E-11	1,06E-03
Lkw >14-26t, Euro 5	2,20	0,15	9,10E-04	2,86E-11	1,09E-03
Lkw >14-26t, Euro 6	2,00	0,14	2,84E-04	2,59E-11	2,31E-04
Lkw >7.5-14t, Euro 3	3,67	0,25	1,61E-03	4,76E-11	1,98E-03
Lkw >7.5-14t, Euro 4	3,33	0,22	1,23E-03	4,32E-11	1,44E-03
Lkw >7.5-14t, Euro 5	3,07	0,21	1,10E-03	3,98E-11	1,28E-03
Lkw >7.5-14t, Euro 6	2,79	0,19	3,59E-04	3,63E-11	2,69E-04

Tabelle 7-2: Überblick über die Emissionsfaktoren der Transporte, differenziert nach Transportmitteln

	KEA [MJ / Li- ter bzw. kg für Erdgas]	GWP [kg CO ₂ Äq. / Liter bzw. kg für Erdgas]	AP [mol H+ Äq. / Liter bzw. kg für Erdgas]	ODP [kg FCKW-11 Äq. / Liter bzw. kg für Erdgas]	POCP [kg NMVOC Äq. / Liter bzw. kg für Erdgas]
Lkw >14-26t, Euro 3, Diesel	44,89	3,00	2,08E-02	5,83E-10	2,58E-02
Lkw >14-26t, Euro 4, Diesel	44,89	3,01	1,71E-02	5,83E-10	2,02E-02
Lkw >14-26t, Euro 5, Diesel	44,89	3,04	1,86E-02	5,83E-10	2,22E-02
Lkw >14-26t, Euro 6, Diesel	44,89	3,04	6,37E-03	5,83E-10	5,19E-03

Lkw / Unimog >7.5-14t, Euro 3, Diesel	44,89	3,00	1,97E-02	5,83E-10	2,42E-02
Lkw / Unimog >7.5-14t, Euro 4, Diesel	44,89	3,01	1,66E-02	5,83E-10	1,94E-02
Lkw / Unimog >7.5-14t, Euro 5, Diesel	44,89	3,04	1,61E-02	5,83E-10	1,87E-02
Lkw / Unimog >7.5-14t, Euro 6, Diesel	44,89	3,04	5,77E-03	5,83E-10	4,33E-03
Unimog ≤7,5t, Euro 3, Diesel	44,89	3,00	2,07E-02	5,83E-10	2,57E-02
Unimog ≤7,5t, Euro 4, Diesel	44,89	3,01	1,69E-02	5,83E-10	1,97E-02
Unimog ≤7,5t, Euro 5, Diesel	44,89	3,03	1,78E-02	5,83E-10	2,09E-02
Unimog ≤7,5t, Euro 6, Diesel	44,89	3,03	5,36E-03	5,83E-10	3,78E-03
Lkw, Biodiesel	41,91	1,41	3,02E-02	k.A.	4,64E-03
Pkw, Biodiesel	41,91	1,41	3,02E-02	k.A.	4,64E-03
Pkw, Diesel	44,89	3,04	1,33E-02	5,83E-10	1,45E-02
Pkw, Benzin	42,04	2,90	5,96E-03	7,43E-10	4,43E-03
Pkw, Erdgas, CNG	51,40	3,58	5,78E-03	k.A.	6,52E-03
Pkw, Erdgas, LPG	53,81	3,91	7,37E-03	7,51E-13	7,98E-03

Tabelle 7-3: Überblick über die Emissionsfaktoren der Ausbringung (pro Liter Kraftstoff/Erdgas)

	KEA [MJ / kWh]	GWP [kg CO ₂ Äq. / kWh]	AP [mol H+ Äq. / kWh]	ODP [kg FCKW-11 Äq. / kWh]	POCP [kg NMVOC Äq. / kWh]
Bezug Strom- mix	11,96	0,40	6,2E-04	1,4E-11	4,8E-04
Eigenver- brauch Strom Photovoltaik	0,782	0,073	4,94E-04	6,53E-09	2,88E-04
	KEA [MJ / MJ]	GWP [kg CO ₂ Äq. / MJ]	AP [mol H+ Äq. / MJ]	ODP [kg FCKW-11 Äq. / MJ]	POCP [kg NMVOC Äq. / MJ]
Bezug Wärme- mix	1,22	0,07	8,3E-05	1,7E-14	7,8E-05
Eigene Wär- meproduktion: Energieträger / Einheit der Energieträger	KEA (MJ / Einheit)	GWP (kg CO ₂ Äq. / Ein- heit)	AP (mol H+ Äq. / Einheit)	ODP (kg CFC11 Äq. Einheit)	POCP (kg NMVOC Äq. / Einheit)
Erdgas / m ³	43,916	2,582	1,16E-03	1,81E-13	1,50E-03

Öl / Liter	50,810	3,659	2,81E-03	6,12E-13	3,10E-03
Holzhack-schnitzel / Tonne	22783,569	70,194	1,90E+00	1,93E-10	2,62E+00
Holzpellets / Tonne	40002,353	138,824	2,42E+00	1,17E-09	3,32E+00
Biogas / m³	149,138	1,489	2,38E-02	2,79E-12	1,35E-02
Solarthermie (eigene Kollektoren) / MJ Endenergie	0,045	0,003	1,47E-05	7,12E-15	6,18E-06

Tabelle 7-4: Überblick über die Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung Strom und Wärme, Bezug aus dem Netz und Eigenproduktion

	KEA [MJ / Liter]	GWP [kg CO ₂ Äq. / Liter]	AP [mol H+ Äq. / Liter]	ODP [kg FCKW-11 Äq. / Liter]	POCP [kg NMVOC Äq. / Liter]
Leitungswasser	0,0036	0,0006	1,97E-06	9,69E-12	1,31E-06
Hydrauliköl / Motoröl	46,3663	0,3789	2,95E-03	6,16E-10	1,59E-03
Diesel	44,89	0,3955	3,66E-03	5,80E-10	1,59E-03

Tabelle 7-5: Überblick über die Emissionsfaktoren zur Bereitstellung von Wasser, Hydrauliköl / Motoröl und Diesel

8 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Methode der Ökobilanz können die Umweltauswirkungen des Winterdienstes und Optionen für deren Reduzierung untersucht und abgeschätzt werden. Bezogen auf die unterschiedlichen Umweltwirkungskategorien können mit dieser Methode insbesondere das Treibhauspotenzial, das Versauerungspotenzial, das Ozonabbaupotenzial, das Photooxidantienpotenzial sowie der kumulierte Energieaufwand berechnet werden. Für die Wirkungskategorie Ökotoxizität, die Fragen zu potenziellen ökotoxischen Wirkungen aus dem Verbleib der Streumittel in der Umwelt nach der Ausbringung auf Pflanzen, in Böden und in Gewässern adressiert, steht für Ökobilanzen derzeit kein geeigneter Indikator zur Verfügung, der die Wirkung abbilden könnte. Vor diesem Hintergrund müsste dieser Aspekt ergänzend zur Ökobilanz mit Hilfe anderer Ansätze dargestellt werden.

Die Methode der Ökobilanz erlaubt die Beantwortung verschiedener konkreter Fragestellungen zu den Umweltauswirkungen von Winterdienstaktivitäten zu den oben genannten Wirkungskategorien. Aussagen werden jeweils in Bezug auf eine funktionelle Einheit getroffen, d.h. ein konkretes Untersuchungsgebiet und einen spezifischen Zeitraum. Als wichtigste Fragestellungen sind die folgenden zu nennen:

- Wie hoch sind die potenziellen Umweltwirkungen insgesamt bezogen auf die funktionelle Einheit?
- Welche Prozesse tragen am meisten zu den verschiedenen Umweltwirkungskategorien bei?
- Wie hoch sind die Einsparpotenziale durch verschiedene Optimierungsmaßnahmen? Darunter:
- Wie hoch fallen die potenziellen Umweltwirkungen bei der Anwendung verschiedener Streutechniken aus? Beispielsweise kann ein Vergleich von Trockensalz versus FS30 versus FS 100 durchgeführt werden.

- Wie wirkt sich die Anwendung unterschiedlicher Technologien auf die Umweltauswirkungen aus – beispielsweise der Einsatz von E-Fahrzeugen oder eine eigene Soleherstellung?

Ergänzend zur Auswertung von Ökobilanzstudien wurden im Rahmen des Projekts noch drei weitere Aspekte untersucht:

Ökotoxikologische Wirkung: Die verfügbaren Daten zur aquatischen und terrestrischen Ökotoxizität der wichtigsten Auftausalze (NaCl, KCl, MgCl₂ und CaCl₂) wurden aktualisiert und um Testergebnisse nach OECD Guidelines zur chronischen aquatischen Toxizität gegenüber Fischen und Daphnien und zur akuten und chronischen terrestrischen Ökotoxizität gegenüber Pflanzen und Regenwürmern ergänzt. Die akute aquatische Ökotoxizität liegt in der Regel bei einem EC₅₀ bzw. LC₅₀ > 1 g/L, die chronische aquatische Ökotoxizität bei einem NOEC > 100 mg/L. Die terrestrische Ökotoxizität gegenüber Pflanzen und Regenwürmern liegt üblicherweise bei einem EC₅₀ bzw. LC₅₀ > 5 g/kg. Diese Werte werden durch Maßnahmen des Winterdienstes nur punktuell an besonders belasteten Standorten, aber nicht großräumig überschritten. Allerdings treten durchaus direkte Pflanzenschäden im Bereich des Straßenbegleitgrüns auf und in diesem Bereich können sich ggf. auch salzresistente Halophyten ansiedeln.

Schäden an Bauwerken und Fahrzeugen: Auch wenn sich die Anfälligkeit in den letzten Jahrzehnten aufgrund verbesserter Materialien und Technologien sowie entsprechender technischer Vorgaben deutlich verringert hat, ist unbestritten und vielfach belegt, dass Streusalze aufgrund ihrer korrosiven Wirkungen Schäden an Bauwerken und Fahrzeugen verursachen können. Es gibt nur wenige Untersuchungen, die die Auswirkungen des Winterdienstes unter realen – nicht Laborbedingungen - z.B. auf Bauwerke überhaupt untersuchen. Zudem ist der Winterdienst nur eine von verschiedenen Einwirkungen, die zu Schädigungen an Bauwerken und Fahrzeugen führen können und es kann darüber hinaus Wechselwirkung zwischen anderen Schädigungsmöglichkeiten und der Streusalzwirkung geben. Für das im Projekt entwickelte Ökobilanz-Tools, das in unterschiedlichen Regionen in Deutschland eingesetzt werden kann, liegen keine, z.B. statistischen, Daten zu durchschnittlichen Schadwirkungen an Bauwerken und Fahrzeugen vor, die als Grundlage verwendet werden könnten. Vor diesem Hintergrund können korrosive Wirkungen auf Bauwerke und Fahrzeuge im Rahmen der Ökobilanz nicht betrachtet werden.

Umweltauswirkungen des Verkehrs: In Stausituationen mit häufigen Anfahr- und Bremsvorgängen sind die Kraftstoffverbräuche und die Emissionen höher als in Situationen mit flüssigem Verkehr. Die Auswirkungen des Winterdienstes auf die Umweltauswirkungen des Verkehrs sind komplex: Einerseits ist davon auszugehen, dass durch einen effektiven Winterdienst – im Vergleich zu der gleichen Situation ohne Winterdienst oder mit einem weniger effektiven Winterdienst - Staus in ihrer zeitlichen und räumlichen Ausdehnung verringert oder ganz vermieden werden. Dies trägt dazu bei, den Anteil staubedingt erhöhter Emissionen des Verkehrs zu reduzieren. Gleichzeitig kann die Vermeidung von Staus zu einer Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit führen, die wiederum mit einer Erhöhung von Emissionen verbunden ist. Auch Rebound-Effekte durch eine Erhöhung der Fahrleistung, beispielsweise wenn Personen, die bei winterlichen Witterungsbedingungen auf eine Fahrt verzichtet hätten, angesichts eines durch den Winterdienst ermöglichten sicheren Straßenzustandes aber doch ihr Fahrzeug nutzen, können nicht ausgeschlossen werden. Angesichts dieser komplexen Zusammenhänge und fehlender Daten kann im ÖkoWin-Tool der Aspekt Auswirkungen des Winterdienstes auf den Verkehr nicht berücksichtigt werden.

Basierend auf der Auswertung der Ökobilanzstudien und den Interviews mit Praxisakteuren wurde dann der Prototyp des ÖkoWin-Tools entwickelt und nach einer Testphase finalisiert.

Ziel des ÖkoWin-Tools ist es, Anwender*innen eine einfache Abschätzung der Ökobilanz des Winterdienstes für einzelne Einsätze, ganze Bezirke oder Straßennetze zu ermöglichen und für Planung, Disposition sowie Investitionsentscheidungen im Rahmen des Winterdienstes einsetzbar zu sein. Es soll die Ermittlung der Umweltauswirkungen des Winterdienstes entlang des Lebensweges sowie die Identifikation der relevanten Prozesse innerhalb der Systemgrenzen ermöglichen.

Bei der Anwendung des ÖkoWin-Tools sollten grundsätzlich folgende Prozesse einbezogen werden:

Kernprozesse:

- Soleherstellung (sofern Sole selbst hergestellt wird)
- Beladung der Streufahrzeuge
- Ausbringung der Streumittel (inkl. etwaiger Leerfahrten)
- Kontrollfahrten
- Fahrzeug- und Gerätereinigung (z.B. Wasserverbrauch)

Vor- und nachgelagerte Prozesse:

- Herstellung der Streumittel einschließlich Rohstoffabbau
- Anlieferung der Streumittel vom jeweiligen Produktionsstandort zum Einsatzort (z.B. der Straßenmeisterei) unter Berücksichtigung etwaiger Zentral- und/oder Zwischenlager
- Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffe inkl. der jeweiligen Vorketten.

Im ÖkoWin-Tool werden fünf Umweltwirkungskategorien berücksichtigt:

- Kumulierten Energie-Aufwand (KEA) in MJ-Äquivalent
- Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential, GWP) in kg CO₂-Äquivalent
- Versauerungspotenzial (Acidification Potential, AP) in mol H⁺-Äquivalent
- Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential, ODP) in kg Trichlorfluormethan-Äquivalent (FCKW-11-Äq.)
- Photooxidantienpotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP) in kg NMVOC-Äquivalent

Die Berechnungen im ÖkoWin-Tool basieren auf den von den Anwender*innen eingegebenen Primärdaten sowie den im Tool hinterlegten Emissionsfaktoren zu den verschiedenen Prozessen (z.B. Herstellung der Streumittel, Bereitstellung von Kraftstoffen und Energie).

Im Rahmen des Projekts wurde zur Illustration eine Beispielrechnung für den Winterdienst einer fiktiven Autobahnmeisterei durchgeführt. Primärdaten, die den Vergleich verschiedener Winterdienstpraktiken, wie z.B. dem Einsatz von Trockensalz versus Feuchtsalz ermöglicht hätten, standen leider nicht zur Verfügung.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass sich die Methode der Ökobilanz sehr gut eignet, um Optimierungspotenziale für die Durchführung des Winterdienstes innerhalb einer Meisterei zu identifizieren. Dagegen ist ein direkter Vergleich des Winterdienstes verschiedener Meistereien bzw. generell von Organisationen, die den Winterdienst durchführen, auf Basis einer Ökobilanz nur sehr eingeschränkt oder gar nicht möglich. Grund dafür ist, dass in der Regel die Unterschiede der Klima- und Wetterbedingungen und/oder der Straßen- und Verkehrssituationen zwischen den verschiedenen Meistereien so groß sind, dass man bei einem direkten Vergleich Gefahr läuft, Äpfel mit Birnen zu vergleichen. Beispielsweise ist die Höhenlage der betreuten Strecken von Meisterei zu Meisterei unterschiedlich, auch bei den einzelnen Meistereien können erhebliche Höhenunterschiede bei ihren Betreuungsstrecken bestehen. Dies hat Einfluss auf die Intensität der Winterdiensteinsätze, die angewandte Streutechnologie und das Räumerfordernis. Entsprechend fallen auch die Umweltauswirkungen des Winterdienstes unterschiedlich hoch aus.

Ebenso gibt es verschiedene Auswirkungen des Winterdienstes, die mit der Methode der Ökobilanz aufgrund offener methodischer Fragen und fehlender Daten zumindest derzeit nicht abgebildet werden können. Darunter fallen, wie oben schon erwähnt, potenzielle ökotoxische Wirkungen insbesondere aus der Ausbringung der Streumittel. Ebenso können potenzielle negative Wirkungen auf Bauwerke und Fahrzeuge, die Reparaturen und Ersatzmaßnahmen notwendig machen und darüber Umweltauswirkungen verursachen, nicht berücksichtigt werden. Auch die Effekte des Winterdienstes auf den Verkehrsfluss können mit der Methode Ökobilanz derzeit nicht abgebildet werden.

Literatur

- ACE Automobil Club Europa (Hg.) (2022): Ratgeber Winter. Online verfügbar unter <https://www.ace.de/ratgeber/verkehrssicherheit/ratgeber-winter/>, zuletzt aktualisiert am 23.08.2022, zuletzt geprüft am 23.08.2022.
- ADAC (Hg.) (2022): Auto waschen im Winter: Darauf sollten Sie achten. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/reparatur-pflege-wartung/pflege/autowaesche-winter/>, zuletzt aktualisiert am 23.08.2022, zuletzt geprüft am 23.08.2022.
- Adelman, Ira R.; Smith Jr., Lloyd L.; Siesennop, Gary D. (1976): Acute Toxicity of Sodium Chloride, Pentachlorophenol, Guthion®, and Hexavalent Chromium to Fathead Minnows (*Pimephales promelas*) and Goldfish (*Carassius auratus*). In: *J. Fish. Res. Bd. Can.* 33 (2), S. 203–208. DOI: 10.1139/f76-030.
- Aragão, M. A.; Pereira, E. V. (2003): Sensitivity of *Ceriodaphnia dubia* of different ages to sodium chloride. In: *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 70 (6), S. 1247–1250. DOI: 10.1007/s00128-003-0116-z.
- Atanasoff-Kardjalieff, K.; Lindner, B.; Stundner, W.; Wolfram, G.; Vollhofer, O. (2019): Leitfaden - Einleitung chloridbelasteter Strassenwässer in Fließgewässer. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien. Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:67a-ceefe-6471-4c73-b0f0-ff7ada6a98cc/chlorid_fliessgewaesser_leitfaden.pdf, zuletzt geprüft am 11.05.2022.
- Benz, T.; Kesenheimer, G. (2009): CO₂-Einsparung durch Verflüssigung des Verkehrsablaufs Abschätzung staubedingter CO₂-Emissionen und von Reduktionspotentialen durch Verbesserung des Verkehrsablaufs. Auftraggeber: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) Behrenstraße 35, 10117 Berlin; Auftragnehmer: PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe Stumpfstraße 1, 76131 Karlsruhe. Hg. v. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT Schriftenreihe, 225), zuletzt geprüft am 30.08.2022.
- Biesinger, K. E.; Christensen, G. M. (1972): Effects of Various Metals on Survival, Growth, Reproduction, and Metabolism of *Daphnia magna*. In: *J. fish. Res. Bd. Canada* 29, S. 1691–1700, zuletzt geprüft am 17.05.2022.
- Birge, W. J.; Black, J. A.; Westermann, A. G.; Short, T. M.; Taylor, S. B.; Bruser, D. M. (1985): Recommendations on Numerical Values for Regulating Iron and Chloride Concentrations for the Purpose of Protecting Warmwater Species of Aquatic Life in the Commonwealth of Kentucky. Memorandum of agreement No. 5429. Kentucky Natural Resources and Environmental Protection Cabinet. Lexington, Kentucky, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- BMDV (Hg.) (2017): Floating Car Data. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV). Online verfügbar unter <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/40273/>, zuletzt aktualisiert am 22.10.2017, zuletzt geprüft am 30.08.2022.
- BMVI (Hg.) (2019): Leitfaden für die Dimensionierung von Tausalzlagern Leitfaden TAUSALA. veröffentlicht auf BAST-Homepage. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, zuletzt geprüft am 26.08.2022.
- Brandes, D. (2009): Autobahnen als Wuchsorte und Ausbreitungswege von Ruderal- und Adventivpflanzen. In: *Braunschweiger Naturkundliche Schriften* 8, S. 373–394, zuletzt geprüft am 12.05.2022.
- Brandes, Dietmar (2022): Phytodiversität jüngerer Verkehrswege. Braunschweiger geobotanische Arbeiten, vol. 14, p. 135. DOI: 10.24355/DBBS.084-202202070917-0.
- Braukmann, Ulrich; Böhme, Dirk (2011): Salt pollution of the middle and lower sections of the river Werra (Germany) and its impact on benthic macroinvertebrates. In: *Limnologica* 41 (2), S. 113–124. DOI: 10.1016/j.limno.2010.09.003.
- Braun, Christopherus; Klute, Markus; Reuter, Christian; Rubbert, Sebastian (2019): Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden - Modellberechnungen.

Bremen: Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrstechnik, Heft V 313), zuletzt geprüft am 28.04.2022.

Breitenberger, Susanne; Grüber, Bernhard; Neuherz, Martina (2004): Extended Floating Car Data – Potenziale für die Verkehrsinformation und notwendige Durchdringungsraten. In: *Straßenverkehrstechnik* 48 (10), S. 522–531, zuletzt geprüft am 30.08.2022.

Brinkmann, B. (2005): Seehäfen. Planung und Entwurf. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (SpringerLink Bücher).

Brod, H.-G. (1993): Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach (Verkehrstechnik V2).

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Hg.) (2020): Merkblatt zur Ermittlung des Gesamtenergieverbrauchs. Informationen für zum Energieaudit verpflichtete Unternehmen unterhalb/oberhalb der Bagatellschwelle und für Energieauditor:innen. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_ermittlung_gesamtenergieverbrauch.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt aktualisiert am 10.07.2023.

Cairns, J.; Scheier, A. (1958): Relationship of bluegill sunfish body size to tolerance for some common chemicals (1958). In: *Proc. 13th Ind. Waste Conf., Purdue Univ. Eng. Bull.*, 1958, S. 243–252.

CCME (2011a): Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life - Chloride. Canadian Council of Ministers of the Environment (Canadian Environmental Quality Guidelines), zuletzt geprüft am 12.05.2022.

CCME (2011b): Scientific Criteria Document for the Development of the Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life - Chloride Ion. Hg. v. National Guidelines and Standards Office. Canadian Council of Ministers of the Environment. Gatineau (PN 1460), zuletzt geprüft am 11.05.2022.

CML (2016): CML-IA Characterisation Factors. Hg. v. Institute of Environmental Sciences (CML) und Leiden University. Online verfügbar unter <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>.

Cypra, Thorsten; Roos, Ralf; Zimmermann, Matthias (2006): Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen. In: *BAST: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Verkehrstechnik* 135.

Däumling, Thomas (2012): Streusalzmonitoring 2007-2011. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg. Hamburg (BSU U21 Boden/Altlasten). Online verfügbar unter <https://www.hamburg.de/contentblob/3909866/f714ee1109b3f17f6247c0b740f0f2a4/data/streusalz-monitoring-bericht.pdf>, zuletzt geprüft am 28.04.2022.

Dickhaut, Wolfgang; Eschenbach, Annette (Hg.) (2018): Entwicklungskonzept Stadtbäume. Anpassungsstrategien an sich verändernde urbane und klimatische Rahmenbedingungen. Hamburg: HafenCity Universität, zuletzt geprüft am 28.04.2022.

DIN EN ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); English version EN ISO 14040:2006 + A1:2020, English translation of DIN EN ISO 14040:2021-02.

DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020.

Dooren, de Jong (1965): Tolerance of *Chlorella vulgaris* for metallic and non-metallic ions. In: *Antonie van Leeuwenhoek* 31 (3), S. 301–313. DOI: 10.1007/BF02045910.

Dressler, Anne (2013): Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton. Dissertation an der Technischen Universität München. Online verfügbar unter <https://dnb.info/1044395826/34>, zuletzt geprüft am 25.08.2022.

Eckartz-Nolden, G.; Vietoris, F. (2007): Einführung des Fischeitestes in NRW. Ermittlung von Grundlagendaten für die Bescheidumstellung in NRW Untersuchung ausgesuchter kommunaler und industrieller Abwässer. Dezernate 53.1.11 (Herten) und 53.7.3 (Köln), Arbeitsbereiche Bioteste Bezirksregierungen Münster und Köln. Herten und Köln. Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/wasser/information/fischeitest_abschlussbericht.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2022.

European Commission (2007): Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Solids and Others industry.

European Platform on Life Cycle Assessment (Hg.) (2019): EF 3.0. Online verfügbar unter <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>.

Evans, M.; Frick, C. (2001): Effects of road salts on aquatic ecosystems. Hg. v. Environment Canada. Water Science and Technology Directorate (WSTD Contribution No. 02-308), zuletzt geprüft am 26.05.2022.

Fantke, Peter (2022): UseTox options for evaluation of winter road services, 07.04.2022. Email an Ran Liu.

Fazio, Simone; Pennington, David (2005): Drinking water; water purification treatment; production mix, at plant; from groundwater (Location: RER). European Commission, Joint Research Centre (JRC). Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/89h/jrc-eplca-db009013-338f-11dd-bd11-0800200c9a66>, zuletzt geprüft am 10.10.2023.

Fazio, Simone; Pennington, David (2008a): Diesel mix at refinery; from crude oil and bio components, fuel supply; production mix, at refinery; 10 ppm sulphur, 5.75 wt.% bio components (Location: EU-27). Commission, Joint Research Centre (JRC). Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/89h/jrc-eplca-1ea201ab-ee9-4356-93d8-3a4905ea35cd>, zuletzt geprüft am 10.10.2023.

Fazio, Simone; Pennington, David (2008b): Light fuel oil at refinery; from crude oil, fuel supply; production mix, at refinery; 0.1 wt.% sulphur (Location: EU-27). European Commission, Joint Research Centre (JRC). Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/89h/jrc-eplca-5214312b-3726-4af4-b804-2b1556b94d54>, zuletzt geprüft am 10.10.2023.

FGSV (Hg.) (2015): Praktische Empfehlungen für ein effektives Räumen und Streuen im Straßenwinterdienst – Ergänzende Hinweise und Erläuterungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsausschuss: Winterdienst. Online verfügbar unter https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/38416_T_PDF.v.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Fischer, Ernő; Molnár, László (1997): Growth and reproduction of *Eisenia fetida* (Oligochaeta, Lumbricidae) in semi-natural soil containing various metal chlorides. In: *Soil Biology and Biochemistry* 29 (3-4), S. 667–670. DOI: 10.1016/S0038-0717(96)00193-9.

Fitch, G. Michael; Smith, James A.; Clarens, Andres F. (2013): Environmental Life-Cycle Assessment of Winter Maintenance Treatments for Roadways. In: *Journal of Transportation Engineering* 139 (2), S. 138–146. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000453.

Frischknecht, Rolf; Jungbluth, Niels (2007): Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Data v2.0 (2007). Unter Mitarbeit von Hans-Jörg Althaus, Christian Bauer, Gabor Doka, Roberto Dones, Roland Hischier, Hellweg et al. Hg. v. ecoinvent centre. Dübendorf (ecoinvent report, 3). Online verfügbar unter https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2018.

Gartiser, Stefan (2020a): Umweltzeichen Blauer Engel salzfreie, abstumpfende Streumittel (DE-UZ 13, Ausgabe Januar 2021). Hintergrundbericht zur Überarbeitung der Vergabekriterien. RAL gemeinnützige GmbH; Hydrotex Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH. Freiburg.

Gartiser, Stefan (2020b): Umweltzeichen Blauer Engel Bewegungsflächenenteiser für Flugplätze (DE-UZ 99, Ausgabe Januar 2021). Hintergrundbericht zur Überarbeitung der Vergabekriterien. RAL gemeinnützige GmbH. 53229 Bonn. Online verfügbar unter <https://www.blauer->

engel.de/sites/default/files/2021-06/hintergrundbericht-zum-de-uz-99-bewegungsflächen-enteiser.pdf, zuletzt geprüft am 02.05.2022.

Gartiser, Stefan; Reuther, Rudolf; Gensch, Carl-Otto (2003): Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Straßen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024. Forschungsbericht 200 95 308/04; UBA-FB 000404. Umweltbundesamt (FKZ 200 95 308/04).

Gonçalves, A. M.M.; Castro, B. B.; Pardal, M. A.; Gonçalves, F. (2007): Salinity effects on survival and life history of two freshwater cladocerans (*Daphnia magna* and *Daphnia longispina*). In: *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.* 43 (1), S. 13–20. DOI: 10.1051/limn/2007022.

Götzfried, F. (2016): Ferrocyanides as anti-caking agents in road salt. In: *Kali & Steinsalz* (1), S. 24–30, zuletzt geprüft am 30.08.2022.

Götzfried, Franz (2018): Global Warming Potential of Deicers. Final-Proceedings TOPIC 2-1 De-icers. Gdansk; World Road Association; GDDKIA; amberexp. Poland.

Götzfried, Franz; Gaudé, Stéphanie (2021): Environmental Impact of Winter Maintenance with Salt. European Salt Producers Association (eusalt).

Greenhouse Media GmbH (Hg.) (2022): Ertrag von Solarthermie-Anlagen. Online verfügbar unter <https://www.energie-experten.org/heizung/solarthermie/wirtschaftlichkeit/ertrag>.

H BeStreu (2017): Hinweise für die Beschaffung von tauenden und abstumpfenden Streustoffen für den Winterdienst. Arbeitsausschuss Winterdienst (Leitung Horst Hanke). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Köln (FGSV-Nr., 379).

Hanslin, Hans Martin (2011): Short-term effects of alternative de-icing chemicals on tree sapling performance. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 10 (1), S. 53–59. DOI: 10.1016/j.ufug.2010.08.001.

Harless, Meagan L.; Huckins, Casey J.; Grant, Jacqueline B.; Pypker, Thomas G. (2011): Effects of six chemical deicers on larval wood frogs (*Rana sylvatica*). In: *Environmental toxicology and chemistry* 30 (7), S. 1637–1641. DOI: 10.1002/etc.544.

Haruki, M. (1999): Effects of deicing materials on plants and soil animals in north Japan. Cold Region Technol. Conf. 1999, 824–830. (in Japanese) (ECHA). Cold Region Technol. Conf. (in Japanese), S. 824–830.

Haruki, M. (2000): Effects of deicing materials on evergreen plants in north Japan. Proc. Cold Region Technol. Conf. (in Japanese), S. 601–605.

Hausmann, Günter (2015): Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Hg. v. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bundesanstalt für Straßenwesen (Verkehrstechnik, Heft V 260). Online verfügbar unter https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/1569/file/V260_Internet_PDF_barrierefrei.pdf.

Heine, N. (2023): Umweltfreundliche Umschlagtechniken von Düngemitteln in Häfen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA Texte, 130/2023). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/130_2023_texte_umweltfreundliche_umschlagtechniken.pdf, zuletzt geprüft am 18.12.2023.

Hoffmann, M.; Blab, R.; Nutz, O. (2012): Optimierung der Feuchtsalzstreuung. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien (Forschungsarbeiten des österreichischen Verkehrssicherheitsfonds, Band 015). Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:741e67f1-4b80-4511-bf0a-df7386cf6962/15_endbericht_feuchtsalzstreuung.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2022.

Hoffmann, M.; Gruber, M.; Leubolt, J.; Grothe, H.; Koyun, A. N.; Seifried, T. et al. (2021): WINTERLIFE - WINTERdienst mit effektiven, nachhaltigen und nicht aggressiven Taumitteln sowie optimalen LIFE Cycle Costs der Bahn. Forschungsprojekt WINTERLIFE. Endbericht VIF2018-Verkehrsinfrastrukturforschung. Hg. v. OEBB-Infra, FFG, BMK / Hoffmann-Consult / TU Wien. Wien. Online verfügbar unter https://projekte.ffg.at/anhang/61cb20537a9d5_WINTERLIFE%20Ergebnisbericht.pdf, zuletzt geprüft am 24.08.2022.

Honarvar Nazari, Mehdi; Mousavi, S. Zeinab; Potapova, Anna; McIntyre, Jenifer; Shi, Xianming (2021): Toxicological impacts of roadway deicers on aquatic resources and human health: A review. In: *Water environment research : a research publication of the Water Environment Federation* 93 (10), S. 1855–1881. DOI: 10.1002/wer.1581.

Ifka GmbH (Hg.) (2020): Untersuchung des Energieverbrauchs- und Emissionsverhaltens von Straßenbetriebsdienstfahr-zeugen. Projektnummer 188801. Aachen.

IKSMS (2005): Richtlinie 2000/60/EG Internationale Flussgebietseinheit Rhein. Internationales Bearbeitungsgebiet "Mosel-Saar" Bestandsaufnahme (Teil B). Hg. v. Internationale Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar. Trier. Online verfügbar unter http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/20088/Bestandsaufnahme_MS_V3_Textteil.pdf?command=downloadContent&filename=Bestandsaufnahme_MS_V3_Textteil.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. Intergovernmental Panel on Climate Change. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf, zuletzt geprüft am 10.06.2022.

Itakura, C. (1975): Experimental investigations on effects of chemical spreading to prevent road-way accidents caused by formation of ice on paved road surface in winter and influence of the chemicals to growing of several trees. *Proc. Hokkaido Inst. Technol.*, 3(7) (in Japanese), S. 1–25.

Jäckel, Barbara (2013): PowerPoint-Präsentation. Differenzierter Winterdienst und Straßen-bäume. Fachsymposium „Stadtgrün“ 10.-11. Juli 2013 in Berlin-Dahlem. Pflanzenschutzamt Berlin. Berlin, Juli 2013. Online verfügbar unter https://www.julius-kuehn.de/media/Institute/GF/_FS_Stadtgruen/1/FS-1-Stadtgruen_2.6_Jaekel_Differenzierter_Winterdienst.pdf, zuletzt geprüft am 12.05.2022.

Jegade, T. (2007): Acute-Toxicity of Sodium Chloride (NaCl) on *Oreochromis niloticus* Fingerlings. In: *Journal of Fisheries International* 2 (4), S. 292–294, zuletzt geprüft am 18.05.2022.

Ji, Jiantao; Peng, Yongzhen; Wang, Bo; Mai, Wenke; Li, Xiyao; Zhang, Qiong; Wang, Shuying (2018): Effects of salinity build-up on the performance and microbial community of partial-denitrification granular sludge with high nitrite accumulation. In: *Chemosphere* 209, S. 53–60. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.05.193.

Joutti, Anneli; Schultz, Eija; Pessala, Piia; Nystén, Taina; Hellstén, Pasi (2003): Ecotoxicity of Alternative De-icers. In: *J Soils & Sediments* 3 (4), S. 269–272. DOI: 10.1065/jss2003.07.080.

Kamptner, Andre; Thümmel, Silke; Ohmann, Wolfgang (2017): Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz. Bremen: Fachverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Verkehrstechnik, Heft 285), zuletzt geprüft am 05.05.2022.

Karim, H. (2022): Digital road winter condition information using floating car data - From research to implementation. In: PIARC (Hg.): Congress' Proceedings. XVI World Winter Service and Road Resilience Congress. Calgary, 07.-11. Februar 2022. PIARC - World Road Association. 1 Band, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Keil, P.; Buch, C.; Büscher, D.; Fuchs, R.; Gausmann, P.; Haeupler, H. et al. (2010): Artenvielfalt auf der A 40 im Ruhrgebiet. Über 70 ehrenamtliche Kartiererinnen und Kartierer beteiligten sich bei der Erfassung der Flora im Rahmen der Kulturhauptstadt 2010-Veranstaltung „Still-Leben Ruhrschnellweg“. In: *Natur in NRW*, 2010 (4/2010), S. 11–17, zuletzt geprüft am 16.05.2022.

Khargarot, B. S.; Ray, P. K. (1989): Investigation of Correlation between Physicochemical Properties of Metals and Their Toxicity to the Water Flea *Daphnia magna* Straus. In: *Ecotoxicol. Environ. Safety* 18, S. 108–120, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

Kolkmeier, Mark A.; Brooks, Bryan W. (2013): Sublethal silver and NaCl toxicity in *Daphnia magna*: a comparative study of standardized chronic endpoints and progeny phototaxis. In: *Ecotoxicology (London, England)* 22 (4), S. 693–706. DOI: 10.1007/s10646-013-1061-1.

LaLonde, Kristen M. (2019): Highway Deicer Use in Oregon: Life Cycle Assessments of Magnesium Chloride and Sodium Chloride. Master's thesis, Harvard Extension School, zuletzt geprüft am 10.06.2022.

Lam, D. C. L.; Minns, C. K.; Hodson, P. V.; Simons, T. J.; Wong, P. T. S. (1976): Computer model for toxicant spills in Lake Ontario. *Environmental Biogeochemistry*, J.O. Nriagu (ed.), Vol. 2. Metals Transfer and Ecological Mass Balances. Hg. v. Ann Arbor Science Publishers Inc.

Lange, Gerd (2017): Abschätzung der Chloridbelastung der aufnehmenden Wasserkörper durch den Winterdienst auf der A26 und der A7. DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH. 28832 Achim. Online verfügbar unter https://www.uvp-verbund.de/documents/in-grid-group_ige-iplug-hh/9CBBF9BA-F45E-4918-93B8-F04DFE9E35EE/UI-19.5_An-lage%20Chloridgutachten_20170131.pdf, zuletzt geprüft am 28.04.2022.

Lauf, Thomas; Memmler, Michael; Schneider, Sven (2021): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger-2020>, zuletzt geprüft am 10.07.2023.

LAWA (1998): Beurteilung der Wasserbeschaffenheit von Fließgewässern in der Bundesrepublik Deutschland - Chemische Gewässergüteklassifikation. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Berlin. Online verfügbar unter https://www.lawa.de/documents/beurteilung_der_wasserbeschaffenheit_von_fliessgewaessern_in_der_brd_1552305559.pdf, zuletzt geprüft am 11.05.2022.

LAWA (2017): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Stuttgart. Online verfügbar unter file:///P:/aktuelle%20Projekte/%C3%96kobilanz_Winterdienst/Recherchen/Wasserqualit%C3%A4t/geringfuegigkeits_bericht_seite_001-028_1552302313.pdf, zuletzt geprüft am 11.05.2022.

Lazorchak, James M.; Smith, Mark E. (2007): Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*) 7-day survival and growth test method. In: *Archives of environmental contamination and toxicology* 53 (3), S. 397–405. DOI: 10.1007/s00244-006-0227-8.

Leblanc, Gerald A.; Surprenant, Donald C. (1984): The influence of mineral salts on fecundity of the water flea (*Daphnia magna*) and the implications on toxicity testing of industrial wastewater. In: *Hydrobiologia* 108 (1), S. 25–31. DOI: 10.1007/BF02391629.

Lilius, H.; Hästbacka, T.; Boris, I. (1995): A comparison of the toxicity of 30 reference chemicals to *Daphnia magna* and *Daphnia pulex*. In: *Environ Toxicol Chem* 14 (12), S. 2085. DOI: 10.1897/1552-8618(1995)14[2085:ACOTTO]2.0.CO;2.

Lilius, H.; Isoma, B.; Holmström, T. (1994): A comparison of the toxicity of 50 reference chemicals to freshly isolated rainbow trout hepatocytes and *Daphnia magna*. *Aquatic Toxicology* 30 (1994) 47–60 (ECHA). In: *Aquatic Toxicology* 30 (1994) 47–60 (ECHA) 30, S. 47–60, zuletzt geprüft am 17.05.2022.

Louis Hagel (Hg.) (o. J.): Hafenumschlag im Hafen Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.hafenumschlag.de/#einleitung>, zuletzt geprüft am 18.12.2023.

Martínez-Jerónimo, F.; Martínez-Jerónimo, L. (2007): Chronic effect of NaCl salinity on a freshwater strain of *Daphnia magna* Straus (Crustacea: Cladocera): a demographic study. In: *Ecotoxicology and environmental safety* 67 (3), S. 411–416. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2006.08.009.

Maultzsch, Matthias; Stichel, Wolfgang; Vater, Ernst-Joachim (1992): Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundliches Streusalz"). Bundesanstalt für Materialprüfung und -prüfung (BAM). Berlin (Forschungsbericht, 184). Online verfügbar unter https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/deliver/index/docId/266/file/fb184_vt.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2022.

MEYER, F.H. (Hrsg.) (1982): Bäume in der Stadt. 2. Aufl. Ulmer: Stuttgart (1982): Bäume in der Stadt. Stuttgart: Ulmer.

- Mount, D. R.; Gulley, D. D.; Hockett, J. R.; Garrison, T. D.; Evans, J. M. (1997): Statistical models to predict the toxicity of major ions to *Ceriodaphnia dubia*, *Daphnia magna* and *Pimephales promelas* (fathead minnows). In: *Environmental toxicology and chemistry* 16 (10), S. 2009–2019, zuletzt geprüft am 03.05.2022.
- Müller, Harald S.; Guse, Ulf (2010): Zusammenfassender Bericht zum Verbundforschungsvorhaben „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse“. Heft 577. 1. Aufl. Hg. v. DAfStb. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. Berlin. Online verfügbar unter https://sdvd-bodnodb.slub-dresden.de/beuboo/65058_001.pdf, zuletzt geprüft am 24.08.2022.
- Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2019): Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. Arbeitsgruppe 1 Klimaschutz im Verkehr. Zwischenbericht 03/2019. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, zuletzt geprüft am 29.08.2022.
- OECD SIDS (2001): Potassium Chloride. CAS N°: 7447-40-7. UNEP PUBLICATIONS (SIDS Initial Assessment Report). Online verfügbar unter <https://hvpchemicals.oecd.org/ui/handler.axd?id=2956d0b6-b409-46f0-8e89-a769869fd00d>, zuletzt geprüft am 10.05.2022.
- OECD SIDS (2002): Calcium chloride. CAS N°:10043-52-4. SIDS Initial Assessment Report. Boston. Online verfügbar unter <https://hvpchemicals.oecd.org/ui/handler.axd?id=cb4247c6-7f28-4ca5-bf69-1f526956b6f9>, zuletzt geprüft am 10.05.2022.
- Oesterheld, René; Weisner, André (2021): Expositionsklassen für Betonbauteile im Geltungsbereich des EC2. Zement-Merkblatt Betontechnik B 9 7.2021. Hg. v. InformationsZentrum Beton GmbH. Online verfügbar unter https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/basiswissen/zement-merkblaetter/B9_2021.pdf, zuletzt geprüft am 23.08.2022.
- ÖKOBAUDAT (2023): Prozess-Datensatz: Photovoltaiksystem 1000 kWh/m²*a. Hg. v. BMWStB. das Deutsche Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWStB). Online verfügbar unter https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6619216d-9c9c-4a5e-b5fb-a624e300ff67&version=20.19.120&stock=OBD_2023_I&lang=de, zuletzt geprüft am 07.07.2023.
- Owojori, Olugbenga J.; Reinecke, Adriaan J. (2014): Differences in ionic properties of salts affect saline toxicity to the earthworm *Eisenia fetida*. In: *Applied Soil Ecology* 83, S. 247–252. DOI: 10.1016/j.apsoil.2013.05.019.
- Padhye, A. D.; Ghatge, H. V. (1992): Sodium Chloride and Potassium Chloride Tolerance of Different Stages of the Frog, *Microhyla ornata*. In: *Herpetol. J.* 2 (1), S. 18–23, zuletzt geprüft am 18.05.2022.
- Pandolfo, T. J.; Cope, W. G.; Young, G. B.; Jones, J. W.; Hua, D.; Lingenfelser, S. F. (2012): Acute effects of road salts and associated cyanide compounds on the early life stages of the unionid mussel *Villosa iris*. In: *Environ Tox Chem* 31 (8), S. 1801–1806.
- Patrick, Ruth; Scheier, Arthur; Cairns, John (1968): The Relative Sensitivity of Diatoms, Snails, and Fish to Twenty Common Constituents of Industrial Wastes. In: *The Progressive Fish-Culturist* 30 (3), S. 137–140. DOI: 10.1577/1548-8640(1968)30[137:TRSODS]2.0.CO;2.
- Pickering, Quentin H.; Lazorchak, James M.; Winks, Kelly L. (1996): Subchronic sensitivity of one-, four-, and seven-day-old fathead minnow (*Pimephales promelas*) larvae to five toxicants. In: *Environ Toxicol Chem* 15 (3), S. 353–359. DOI: 10.1002/etc.5620150320.
- Pilgrim, K. M. (2013): Determining the aquatic toxicity of deicing materials. Hg. v. Minnesota Department of Transportation. Barr Engineering Company. St. Paul (Project 99083/CR11-02). Online verfügbar unter http://clearroads.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/11-02_Determine-the-Toxicity-of-Deicing-Materials_Final-Report_12-30-2013.pdf, zuletzt geprüft am 03.05.2022.
- PTV (Hg.) (2022): Floating Car Data (FCD) GPS-Tracks für PTV Visum & Vissim. PTV Planung Transport Verkehr GmbH. Online verfügbar unter <https://ddsgeo.de/daten/produktbezogene-karten-daten/daten-fuer-mobilitaetssoftware/floating-car-data>, zuletzt aktualisiert am 29.08.2022, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Quack, D.; Stratmann, B.; Götzfried, F. (2010): Vergleichende Ökobilanz verschiedener Auftausalze: Steinsalz, Siedesalz und Meersalz. In: *Straße und Autobahn* (2), S. 80–88, zuletzt geprüft am 30.08.2022.

Quack, Dietlinde; Möller, Martin; Gartiser, Stefan (2004): Ökobilanz des Winterdienstes in den Städten München und Nürnberg - Stadt Nürnberg -. im Auftrag der Stadt Nürnberg. Öko-Institut e. V.; Hydrotex Labor für Ökotoxikologie und Gewässerschutz GmbH. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/oekobilanz-des-winterdienstes-in-den-staedten-muenchen-und-nuernberg>.

ReCiPe - Characterisation factors (2018): ReCiPe2016_CFs_v1.1_20180117. Online verfügbar unter <https://www.rivm.nl/documenten/recipe2016cfsv1120180117>.

Rensberg, Nadja; Daniel-Gromke, Jaqueline; Denysenko, Velina (2019): Wärmenutzung von Biogasanlagen. Leipzig, Dresden (DBFZ-Report). Online verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_32.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2023.

Robidoux, P. Y.; Delisle, C. E. (2001): Ecotoxicological evaluation of three deicers (NaCl, NaF, CMA)-effect on terrestrial organisms. In: *Ecotoxicology and environmental safety* 48 (2), S. 128–139. DOI: 10.1006/eesa.2000.2035.

Ruess, B. (1998): Salz- und Splittstreuung im Winterdienst. Neue Forschungserkenntnisse. In: *Straße und Verkehr* (6), zuletzt geprüft am 30.08.2022.

Ruge, U. (1974): Ursachen der Schädigung des Straßenbegleitgrüns in Städten und an Autobahnen. In: *European Journal of Plant Pathology* 4, S. 48–50, zuletzt geprüft am 12.05.2022.

Schießl-Pecka, Angelika; Rausch, Anne; Zintel, Marc; Linden, Christian (2019): Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken. In: Manfred Curbach (Hg.): Tagungsband 29. Dresdner Brückenbausymposium. 11. und 12. März 2019. Dresden: Technische Universität Dresden Institut für Massivbau, S. 161–170. Online verfügbar unter https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/ressourcen/dateien/veranstaltungen/dbbs/29_dbbs/DBBS2019_11-Schiesl-Korrekturfassung.pdf?lang=de, zuletzt geprüft am 23.08.2022.

Schulz, Susanne; Zimmermann, Matthias; Roos, Ralf (2016): Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen Verkehrstechnik, Heft V 274), zuletzt geprüft am 05.05.2022.

Setzer, M. J.; Fagerlund, G.; Janssen, D. J. (1997): CDF-Test – Prüfverfahren des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton – Prüfung mit Taumittel-Lösung (CDF). RILEM Recommendation. (Übersetzung des Originaltextes aus: Materials and Structures (1996) Vol 29 (193), pp 523–528, durch Prof. Max J. Setzer and Rainer Auberg (Chairman/Secretary of TC117). In: *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, zuletzt geprüft am 24.08.2022.

SEWRPC (2016): Acute toxicity of sodium chloride to freshwater aquatic organisms. A watershed restoration plan for the root river watershed, Appendix E. Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission, USA (SEWRPC Community Assistance Planning Report No. 316). Online verfügbar unter www.sewrpc.org/SEWRPC/Environment/Root-River-Watershed-Restoration-Plan.htm, zuletzt geprüft am 29.04.2022.

Sollén, S.; Casselgren, J. (2022): FRICTION INFORMATION FROM FLOATING CAR DATA. In: PIARC (Hg.): Congress' Proceedings. XVI World Winter Service and Road Resilience Congress. Calgary, 07.-11. Februar 2022. PIARC - World Road Association. 1 Band, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Soucek, David J.; Dickinson, Amy (2016): Influence of chloride on the chronic toxicity of sodium nitrate to *Ceriodaphnia dubia* and *Hyalella azteca*. In: *Ecotoxicology (London, England)* 25 (7), S. 1406–1416. DOI: 10.1007/s10646-016-1691-1.

Stettler, Cornelia; Kägi, Thomas (2019): Ökobilanz Auftausalze. Vergleich der lokalen Siedesalz Produktion Riburg gegenüber unterschiedlichen Importen von Siedesalz, Steinsalz und Meersalz. AdvancedLCA (vs2.2). Online verfügbar unter <https://carbotech.ch/cms/wp-content/uploads/%C3%96kobilanz-Auftausalz-Riburg-v2.2cs.pdf>, zuletzt geprüft am 09.06.2022.

Stratmann, Britta; Quack, Dietlinde (2009a): Vergleichende Ökobilanz drei verschiedener Auftausalze: Steinsalz, Siedesalz und Meersalz. Im Auftrag der Südsalz GmbH, Heilbronn. Unter Mitarbeit von Franz Götzfried, Florian Knappe, Gero Morlock und Eörs Kondorosy. Öko-Institut e. V. Freiburg.

Stratmann, Britta; Quack, Dietlinde (2009b): Auftausalze. Eine vergleichende Ökobilanz - Steinsalz, Siedesalz, Meersalz. Zusammenfassung von "Vergleichende Ökobilanz drei verschiedener Auftausalze: Steinsalz, Siedesalz und Meersalz. Freiburg, September 2009". Südsalz GmbH. Freiburg.

Thiel, C.; Götzfried, F.; GEHLEN, C. (2013): Physikalische und chemische Auswirkungen von tauenden Chloriden auf Betone von Verkehrsbauwerken / Physical and chemical effects on concrete of roads and bridges caused by de-icing chlorides. In: *Straße und Autobahn* 64 (9), S. 684–688.

Tkalec, Mirta; Vidaković-Cifrek, Željka; Regula, Ivan (1998): The effect of oil industry "high density brines" on duckweed *Lemna minor* L. In: *Chemosphere* 37 (13), S. 2703–2715. DOI: 10.1016/S0045-6535(98)00156-8.

Tokuz, R. Y.; Eckenfelder, W. (1978): The effect of inorganic salts on the activated sludge process performance. In: *Water Research* 33, S. 99–104, zuletzt geprüft am 18.05.2022.

DIN EN ISO 14040:2009-11, 11-2009: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006, zuletzt geprüft am 15.06.2021.

Utz, L. R. P.; Bohrer, M. B. C. (2001): Acute and Chronic Toxicity of Potassium Chloride (KCl) and Potassium Acetate ($\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$) to *Daphnia similis* and *Ceriodaphnia dubia* (Crustacea; Cladocera). In: *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 66 (3), S. 379–385. DOI: 10.1007/s00128-001-0016-z.

Vignisdottir, Hrefna Run; Booto, Gaylord Kabongo; Böhne, Rolf André; Ebrahimi, Babak; Brattebø, Helge; Wallbaum, Holger (2016): Life Cycle assessment of Anti- and De-icing Operations in Norway. Online verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/Life-Cycle-assessment-of-Anti-and-De-icing-in-Vignisdottir-Booto/7d40d07ba09c08edebf46be78478b011d493f02d>, zuletzt geprüft am 09.06.2022.

Vignisdottir, Hrefna Run; Ebrahimi, Babak; Booto, Gaylord Kabongo; O'Born, Reyn; Brattebø, Helge; Wallbaum, Holger; Böhne, Rolf André (2020): Life cycle assessment of winter road maintenance. In: *Int J Life Cycle Assess* 25 (3), S. 646–661. DOI: 10.1007/s11367-019-01682-y.

Viridian Solar (2023): Environmental product declaration. In accordance with ISO 14025:2006 and EN 15804:2012+A2:2019/AC: 2021 for: Clearline fusion. Hg. v. Viridian Solar. Online verfügbar unter <https://www.viridiansolar.com/assets/common/Clearline-fusion-module-EPD-Report.pdf>, zuletzt geprüft am 07.07.2023.

Vítězová, Monika; Vítěz, Tomáš; Nitayapat, Nuttakan (2016): Effects of De-icing Salts on the Respiration of the Microorganisms of Activated Sludge. In: *Water Air Soil Pollut* 227 (11). DOI: 10.1007/s11270-016-3119-1.

Voß, Karl-Uwe (2013): Frost- und Frost-Tausalz-Schäden an Betonteilen. Kurzbericht. In: *Straße und Autobahn* (11), S. 854–863. Online verfügbar unter https://www.mpva.de/media/files/2013_vo_strasse_autobahn_frost_und_frost_tausalz.pdf, zuletzt geprüft am 23.08.2022.

Wallen, I. E.; Greer, W. C.; Lasater, R. (1957): Toxicity to 'Gambusia Affinis' of Certain Pure Chemicals in Turbid Waters. In: *Sewage and Industrial Wastes* 29, 695-711. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/25033364>.

Wallin, M. (2022): Floating Car Data for Monitoring of Road Friction Collect, refine, store and visualize floating car data. In: PIARC (Hg.): Congress' Proceedings. XVI World Winter Service and Road Resilience Congress. Calgary, 07.-11. Februar 2022. PIARC - World Road Association. 1 Band, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Warner, Mary Elizabeth (2016): An environmental lifecycle comparison of road deicers using hybrid modeling techniques to capture effects during early processing stages. A Thesis Submitted

in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Sustainable Engineering. Online verfügbar unter <https://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=10423&context=theses>, zuletzt geprüft am 09.06.2022.

Wentzel, K. F. (1974): Salz-Spritzwasserschäden von den Autobahnen in die Tiefe der Waldbestände. In: *European Journal of Plant Pathology* 4, S. 45–46, zuletzt geprüft am 12.05.2022.

Wolf, T.; Hübner, C. (2018): Konzepte zur Deckung des (Wärme-) Energiebedarfs von Autobahnmeistereien durch erneuerbare Energien. Fachveröffentlichung der Bundesanstalt für Straßenwesen. FE-Nr. 89.0342/2018. Hg. v. BASt. Bundesanstalt für Straßenwesen, zuletzt geprüft am 30.08.2022.

Wolfram, Georg (2014): Chlorid. Auswirkungen auf die aquatische Flora und Fauna. Unter Mitarbeit von Judith Römer, Catherine Hörl, Wolfram Stockinger, Katharina Ruzicska und Alexander Munteanu. Ministerium für ein lebenswertes Österreich; Bundesministerium für Land- und forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien. Online verfügbar unter <https://info.bmlrt.gv.at/service/publikationen/wasser/Chlorid---Auswirkungen-auf-die-Aquatische-Flora-und-Fauna.html>.

Yeardeley, Roger B.; Lazorchak, James M.; Pence, Michael A. (1995): Evaluation of alternative reference toxicants for use in the earthworm toxicity test. In: *Environ Toxicol Chem* 14 (7), S. 1189–1194. DOI: 10.1002/etc.5620140710.

Zachrisson, B.; Hägg, J.; Jonsson, W.; Lindholm, H. (2022): FLOATING CAR DATA AS AN ENABLER FOR MORE EFFICIENT WINTER MAINTENANCE OPERATIONS. In: PIARC (Hg.): Congress' Proceedings. XVI World Winter Service and Road Resilience Congress. Calgary, 07.-11. Februar 2022. PIARC - World Road Association. 1 Band, zuletzt geprüft am 29.08.2022.

Zampori, L.; Pant, R. (2019): Vorschläge zur Aktualisierung der Methode zur Berechnung des Umweltfußabdrucks von Produkten (PEF). Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/environment/eusssd/smgrp/pdf/product-environmental-footprint-PEF-methode_de.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2022.

Zitierte Normen und Gesetze

DIN EN ISO 11348-1 bis -3 (2009-05): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der Hemmwirkung von Wasserproben auf die Lichtemission von *Vibrio fischeri* (Leuchtbakterientest) - Teil 1: Verfahren mit frisch gezüchteten Bakterien, Teil 2: Verfahren mit flüssig getrockneten Bakterien, Teil 3: Verfahren mit gefriergetrockneten Bakterien.

OECD 201 (2011): Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test

OECD 202 (2004): Activated Sludge, Respiration Inhibition Test (Carbon and Ammonium Oxidation)

OECD 203 (2019): 203: Fish, Acute Toxicity Test

OECD 207 (1984): Earthworm, Acute Toxicity Tests (04 Apr 1984)

OECD 208 (2006): Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test (17. Aug 2006).

OECD 209 (2010): Activated Sludge, Respiration Inhibition Test (Carbon and Ammonium Oxidation)

OECD 210 (2012): Fish, Early-life Stage Toxicity Test

OECD 211 (2012): Daphnia magna Reproduction Test

OECD 221 (2006): Lemna sp. Growth Inhibition Test

OECD 222 (2016): Earthworm Reproduction Test (*Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*) (29. Jul 2016).

OECD 227 (2006): Terrestrial Plant Test: Vegetative Vigour Test (17. Aug 2006).

OGewV -Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), zuletzt geändert am, 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873).

TrinkwV - Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch^{1,2} (Trinkwasserverordnung - TrinkwV) vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), zuletzt geändert am 22. September 2021 (BGBl. I S. 4343)

Richtlinie (EU) 2020/2184 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch - Trinkwasser-Richtlinie. ABl. L 435 vom 23.12.2020

VERORDNUNG (EG) Nr. 1907/2006 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission

VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

Bilder

- Bild 2-1: Phasen einer Ökobilanz, eigene Darstellung nach (DIN EN ISO 14040:2009-11; DIN EN ISO 14040)
- Bild 2-2: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens für die Literaturanalyse der Ökobilanzstudien. Quelle: Eigene Darstellung
- Bild 5-1: Festlegung der Systemgrenzen (*Alternative: entweder eigenen Soleherstellung oder angelieferte fertige Sole). Quelle: Eigene Darstellung
- Bild 6-1: Überblick über die Calciumchlorid-Herstellung im Rahmen des Solvay-Prozesses Quelle: Eigene Darstellung
- Bild 7-1: Prozentuale Anteile der verschiedenen Prozesse am Ergebnis der Ökobilanz in fünf Wirkungskategorien für das Berechnungsbeispiel einer fiktiven Autobahnmeisterei. Quelle: Eigenen Darstellung

Tabellen

Tabelle 2-1:	Auswertungsmatrix für die ökobilanzrelevanten Studien zum Winterdienst
Tabelle 3-1:	Überblick über die ausgewerteten Ökobilanzstudien
Tabelle 3-2:	Überblick über verwendete Additive in den Tausalzen NaCl, MgCl ₂ und CaCl ₂
Tabelle 3-3:	Überblick zu vorhandenen Wirkungsabschätzungsmodellen für die Bewertung von potenziellen Ökotoxizitätswirkungen in Ökobilanzen
Tabelle 3-4:	Akute aquatische Toxizität von Auftausalzen
Tabelle 3-5:	Chronische aquatische Toxizität von Auftausalzen
Tabelle 3-6:	Terrestrische Toxizität von Auftausalzen
Tabelle 3-7:	Zusammenfassung aquatische und terrestrische Toxizität von Auftausalzen
Tabelle 3-8:	Zuordnung der Chloridkonzentrationen zu den Güteklassen für Fließgewässer (LAWA 1998)
Tabelle 4-1:	Fahrzeugausstattung der bayrischen Straßenmeistereien
Tabelle 4-2:	Durch die Landesbaudirektion ermittelte durchschnittliche Dieselverbräuche der LKWs der bayerischen Straßenmeistereien. Quelle: Ifka GmbH (2020), MKK steht für Messdatenbasierte Kostenbewertung für Kraftfahrzeuge
Tabelle 5-1:	Räumliche Komponente der funktionellen Einheit
Tabelle 5-2:	Überblick der ausgewerteten Wirkungskategorien und -indikatoren sowie Charakterisierungsmodelle
Tabelle 6-1:	Die spezifischen Primärdaten zur Herstellung von Auftausalz aus Steinsalz (Stratmann und Quack 2009a); RER: geographischer Bezug Europa
Tabelle 6-2:	Die spezifischen Primärdaten zur Herstellung von Auftausalz aus Siedesalz (Stratmann und Quack 2009a); RER: geographischer Bezug Europa
Tabelle 6-3:	Die spezifischen Primärdaten zur Herstellung von Auftausalz aus Meersalz (Stratmann und Quack 2009a); EG: geographischer Bezug Ägypten
Tabelle 6-4:	Datengrundlage für die Modellierung der Produktion von „Liquid raw CaCl ₂ feed“ aus dem Solvay-Prozess. Es wurde der Mittelwert aus (European Commission 2007) zugrunde gelegt
Tabelle 6-5:	Allokationsparameter zwischen Soda und liquid raw CaCl ₂ Feed
Tabelle 6-6:	Datengrundlage für die Modellierung der Produktion von CaCl ₂ Sole mit einer Konzentration von 33%. Die Daten sind für die Konzentration von 33% umgerechnet aus Table 7.70 und Table 7.72 von (European Commission 2007)
Tabelle 6-7:	Datengrundlage für die Modellierung von Calciumchlorid-Trockensalz, Flakes und Prills (European Commission 2007)
Tabelle 6-8:	Die Energieverbrauchsdaten zur Modellierung der Herstellung der konzentrierten MgCl ₂ -Sole auf Basis der Solegewinnung von Siedesalz
Tabelle 6-9:	Die Datensätze für die Modellierung des Antransports
Tabelle 6-10:	Emissionsfaktoren für die Herstellung einer Photovoltaikanlage PV und die Umrechnung auf 1kWh
Tabelle 6-11:	Die zugrunde gelegten Annahmen und Hintergrund-Datensätze für die eigene Wärmebereitstellung
Tabelle 7-1:	Überblick über die Emissionsfaktoren der Streumittel (trocken und Sole)
Tabelle 7-2:	Überblick über die Emissionsfaktoren der Transporte, differenziert nach Transportmitteln
Tabelle 7-3:	Überblick über die Emissionsfaktoren der Ausbringung (pro Liter Kraftstoff/Erdgas)

- Tabelle 7-4: Überblick über die Emissionsfaktoren der Energiebereitstellung Strom und Wärme, Bezug aus dem Netz und Eigenproduktion
- Tabelle 7-5: Überblick über die Emissionsfaktoren zur Bereitstellung von Wasser, Hydrauliköl / Motoröl und Diesel
- Tabelle 0-1: Ökobilanz und Carbon Footprint-Studien zum Winterdienst, die im Rahmen des Projekts ausgewertet wurden
- Tabelle 0-2: Tabellarische Auswertung der berücksichtigten ökobilanzrelevanten Studien (Teil I)
- Tabelle 0-3: Tabellarische Auswertung der berücksichtigten ökobilanzrelevanten Studien (Teil II)

Anhang

Übersicht über die im Rahmen der Recherche identifizierten Ökobilanz- und Carbon Footprint-Studien zum Bereich Winterdienst

Titel der Studie	Quelle
Life cycle assessment of winter road maintenance	(Vignisdottir et al. 2020)
Ökobilanz Auftausalze: Vergleich der lokalen Siedesalz Produktion Riburg gegenüber unterschiedlichen Importen von Siedesalz, Steinsalz und Meersalz	(Stettler und Kägi 2019)
Highway Deicer Use in Oregon: Life Cycle Assessments of Magnesium Chloride and Sodium Chloride	(LaLonde 2019)
Global Warming Potential of Deicers	(Götzfried 2018)
Life Cycle assessment of Anti- and De-icing Operations in Norway	(Vignisdottir et al. 2016)
Environmental Life-Cycle Assessment of Winter Maintenance Treatments for Roadways	(Fitch et al. 2013)
Vergleichende Ökobilanz drei verschiedener Auftausalze: Steinsalz, Siedesalz und Meersalz	(Stratmann und Quack 2009a)
Ökobilanz des Winterdienstes in den Städten München und Nürnberg - Stadt Nürnberg	(Quack et al. 2004)
Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Straßen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024	(Gartiser et al. 2003)

Tabelle 0-1: Ökobilanz und Carbon Footprint-Studien zum Winterdienst, die im Rahmen des Projekts ausgewertet wurden.

Tabellarische Auswertung der berücksichtigten ökobilanzrelevanten Studien

Titel der Studie	Quelle	Methodische Grundlage	Zielsetzungen	Funktionelle Einheit	Systemgrenze	Nicht betrachtete Prozesse	Geographischer Bezug	Zeitlicher Bezug	Technologischer Bezug
Ökobilanz Winterdienst									
Life cycle assessment of winter road maintenance	(Vignisdottir et al. 2020)	ISO 14040/44	Ermittlung der Umweltwirkungen von Gegenwart und Zukunft Identifizierung der Hotspots Ableitung der Verbesserungspotential	"average winter road maintenance in Norway on national and county roads per km.lane. "	Produktion und Transport der Streumittel und Fahrzeuge; Lagerung; Ausbringung	Infrastruktur Nach der Ausbringung	Mittel-Norwegen	Referenzjahr: Winter 2016-2017; Zukunftszeitpunkt: 2050	NaCl Teilweise Verwendung von Spikereifen auf Fahrzeugen
Highway Deicer Use in Oregon: Life Cycle Assessments of Magnesium Chloride and Sodium Chloride	(Lalonde 2019)	ISO 14040/44	Ermittlung und Vergleich der Umweltauswirkung von Winterdienst mit NaCl (Trockensalz) und MgCl ₂ (Sole)	"the amount necessary to treat 100 lane miles of highway"	Produktion und Transport der Streumittel und Ausbringung	Die Energie aus der Lagerung und dem Be- und Entladen von MgCl ₂ und NaCl	USA (Oregon Department of Transportation)	2012-2017	Trockensalz (NaCl) Sole (30% MgCl ₂ +70% Wasser)
Life Cycle assessment of Anti-icing Operations in Norway	(Vignisdottir et al. 2016)	ISO 14040/44	Die Abschätzung der Umweltauswirkungen von Anti- und Enteisungsmaßnahmen in Norwegen.	"the anti-icing operations on national and state roads per km during winter an average from 2010 through 2014."	Transport der Streumittel und Ausbringung	Produktion der Streumittel Lagerung (keine Heizung erforderlich) Mechanische Schneeräumung	Norwegen	2010-2015	NaCl (35% Deutschland; 25% Spanien, 40% Tunesien)
Environmental Life-Cycle Assessment of Winter Maintenance Treatments for Roadways	(Fitch et al. 2013)	Lebenszyklusbetrachtung	Ableitung der Minderungsmaßnahmen der Umweltauswirkungen für das Verkehrsmittelministerium in den USA	"100 lane miles" (≈161 km)	Produktion der Streumittel, Transport zur Lagerung, Beladen, Ausbringung, Runoff-Effekt	Infrastruktur	Drei Regionen im Bundesstaat Virginia in den USA: eine Berg-, eine Vorgebirgs- und eine Küstenregion	k.A.	Steinsalz (tro-cken) NaCl-Lösung CMA (Calciummagnesium-macetat)-Lösung

Titel der Studie	Quelle	Methodische Grundlage	Zielsetzungen	Funktionelle Einheit	Systemgrenze	Nicht betrachtete Prozesse	Geographischer Bezug	Zeitlicher Bezug	Technologischer Bezug
Ökobilanz des Winterdienstes in den Städten München und Nürnberg - Stadt Nürnberg	(Quack et al. 2004)	ISO 14040/44	Die mit dem kommunalen Winterdienst in der Stadt Nürnberg verbundenen Umweltauswirkungen darzustellen und auszuwerten.	Alle Aktivitäten des kommunalen Winterdienstes auf den Gebieten der Stadt Nürnberg während einer Winterperiode	Herstellung der ausgetragenen Streumittel und deren Antransport nach Nürnberg; Ausbringung, Fahrzeugreinigung, Entsorgung des dem Winterdienst zuzurechnenden Straßenkehrrechts	Auswirkungen an Bauwerken oder Fahrzeugen Produkte mit einem jeweiligen Anteil von weniger als 1%. Aber die Summengrenze von 5%. Infrastruktur Lagerung und Zwischenlogistik	Deutschland	Zweit Winterperioden (2002/2003; 2001/2002)	NaCl-Steinsalz, NaCl-Sole, CaCl ₂ -Sole und Blähton
Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Straßen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024	(Gartiser et al. 2003)	orientierende Ökobilanz	eine erste Einschätzung des Umweltpotentials ausgewählter Streumittel vorgenommen werden, v. a. im Hinblick darauf, ob signifikante Unterschiede in Herstellung und Aufwendungen zur Ausbringung bestehen und ob für die Vergabe eines Umweltzeichens eine eingehende, normkonforme Ökobilanz angezeigt ist.	Ausgehend von spezifischen Ausbringungsmengen wurde die (einmalige) Behandlung von jeweils 4 km² Straßenfläche (1.000 km Länge bei 4 m Streubreite) als Vergleichseinheit zu Grunde gelegt.	die Herstellung (Rohstoffentnahme bis "Werkszaun") sowie die Ausbringung der ausgewählten Streumittel betrachtet	der Transport zu den Zwischenlagern, die Entsorgung bzw. der Verbleib der ausgebrachten Streumittel	Deutschland	Einmalstreueung auf Landstraße	Natriumchlorid Natriumformiat Harnstoff Granulat (Kalkstein und Granit) Freiflächenheizung
Ökobilanz: Streumittel									
Ökobilanz Auf-tausalze: Vergleich der lokalen Siedesalz-Produktion Riburg gegenüber unterschiedlichen Importen von	(Stettler und Kägi 2019)	ISO 14040/44	Analyse CO ₂ - und Umweltauswirkungen der Auf-tausalze der Saline Riburg (CH) Identifizierung des Einflusses der Umstellung Strom auf Wasserkraft Vergleich und Analyse der CO ₂ - und Umweltauswirkungen von Auf-tausalz im Ausland mit Anlieferung zur Saline Riburg.	Eine Tonne Auf-tausalz, ab Zwischenlager Saline Riburg	Von der Wiege bis zum Zwischenlager	Infrastruktur Antibackmittel-mengen in Steinsalz und Meersalz Taufwirkung Auswirkungen von	Schweiz	2017/2018	Siedesalz; Steinsalz; Meersalz

Titel der Studie	Quelle	Methodische Grundlage	Zielsetzungen	Funktionelle Einheit	Systemgrenze	Nicht betrachtete Prozesse	Geographischer Bezug	Zeitlicher Bezug	Technologischer Bezug
Siedesalz, Steinsalz und Meersalz						Nebenbestandteilen (Sulfate, Silikate) Zwischenlagerung in der Schweiz Ausbringung			
Global Warming Potential of Deicers	(Göttsfried 2018)	Eine Review-Studie aus vorhandenen Literaturen	Vergleich der Treibhausgase von verschiedenen Streumitteln	1 Tonne Streumittel	Produktion und Antransport	Prozesse nach der Antransport	Global	Unterschiedlich abhängig von den Literaturen. Vermutlich ab 2000	NaCl MgCl ₂ CaCl ₂ CMA Kaliumformiat Natriumformiat Harnstoff
Vergleichende Ökobilanz drei verschiedener Auftausalze: Steinsalz, Siedesalz und Meersalz	(Stratmann und Quack 2009a)	ISO 14040/44	- Ermittlung der Umweltauswirkungen für Steinsalz, Siedesalz und Meersalz - Ableitung der Optimierungspotenziale	„Bereitstellung von 1 Tonne Auftausalz beim Hersteller“	Produktion (cradle to gate).	Infrastruktur Bestandteile, die mengenmäßig 5% Anteil unterschreiten: -Antibackmittel -Technische Hilfsstoffe für die Siedesalz-Herstellung - MgCl ₂ und CaCl ₂ als Staubbinder für Steinsalz.	deutsche und mitteleuropäische Daten	2007/2008	NaCl (Siedesalz; Steinsalz; Meersalz)

Tabelle 0-2: Tabellarische Auswertung der berücksichtigten ökobilanzrelevanten Studien (Teil I)

Originale Name der Studie	Quelle	Ermittelte Primärdaten bzw. spezifische Daten	Verwendete Sekundärdaten	Betrachtete Umweltwirkungskategorien	Identifizierte wichtige Parameter und wichtige Ergebnisse	Ökotoxizität nach der Ausbringung in der Studie eingebunden?
Ökobilanz für Winterdienst						
Life cycle assessment of winter road maintenance	(Vignisdottir et al. 2020)	Menge der Streumittel Entfernung Durchschnittlicher Dieselverbrauch	Spezifische Literaturquellen Ecoinvent v3.3	17 ²⁶ Wirkungskategorien in ReCiPe 2016 midpoint (H)	Die Menge der verwendeten Streumittel Energieverbrauch Die Witterungsbedingungen beeinflussen am stärksten den Kraftstoffverbrauch	Nein, wegen des komplizierten Verhaltens der Stoffe in Umwelt
Highway Deicer Use in Oregon: Life Cycle Assessments of Magnesium Chloride and Sodium Chloride	(LaLonde 2019)	Stromdaten für die Gewinnung der NaCl und MgCl ₂ aus Jahresbericht eines Lieferanten Transportentfernung zwischen Lagerung und Meistere	Spezifische Literaturquellen Ecoinvent v3.5	Auf Wirkungskategorie Ebene: Treibhausgas Human-Toxizität kumulierter energieaufwand Frishwasserverbrauch Auf Sachbilanz-Ebene: vorgelegte und nachgelagerte Chlorid-Emissionen	Die Menge der verwendeten Streumittel Transport der Streumittel	Nein, Ermittlung der Chlorid-Emissionen nach Ausbringungen
Life Cycle assessment of Anti-icing Operations in Norway	(Vignisdottir et al. 2016)	Menge der Streumittel und des Kraftstoffes in einem durchschnittlichen Winter zwischen 2010 und 2015	Spezifische Literaturquellen Ecoinvent V3	11 ²⁷ Wirkungskategorie in CML-Methode	Ausbringung spielt wesentliche Rolle Allerdings wurde die Produktion nicht betrachtet	Nein, aufgrund mangelnder Daten
Environmental Life-Cycle Assessment of Winter Maintenance Treatments for Roadways	(Fitch et al. 2013)	Durchschnittswerte aus 10-15 Jahre erfasster Temperatur- und Niederschlagsdaten für die drei betrachteten Regionen	Spezifische Literaturquellen Ecoinvent	Auf Wirkungskategorie Ebene: kumulierter energieaufwand Treibhausgas Auf Sachbilanz-Ebene: Chloremission • BSB ²⁸	Sole schneidet besser ab als Trockensalz Salz schneidet besser als CMA, mit Ausnahme der Chloride-Werte Die Umweltauswirkungen der Produktion sind höher als die der Ausbringung (Ausnahme: BSB und Chloride). die Verbesserung der Energieeffizienz der Fahrzeuge und Optimierung der Route könnte	Nein, Ermittlung der Chlorid-Emissionen nach Ausbringungen

²⁶ Potentials for: Global warming; Stratospheric ozone depletion; Ionizing radiation; Ozone formation, Human health; Fine particulate matter formation; Ozone formation, Terrestrial ecosystems; Terrestrial acidification; Freshwater eutrophication; Terrestrial ecotoxicity; Freshwater ecotoxicity; Marine ecotoxicity; Human carcinogenic toxicity; Human noncarcinogenic toxicity; Land use; Mineral resource scarcity; Fossil resource scarcity; Water consumption

²⁷ Potentials for: Abiotic depletion - metals/minerals; Abiotic depletion - energy resources; Global warming; Ozone layer depletion (ODP); Human toxicity; Fresh water aquatic ecotox.; Marine aquatic ecotoxicity; Terrestrial ecotoxicity; Photochemical oxidation; Acidification; Eutrophication

²⁸ BSB: biochemischer Sauerstoffbedarf (EN: Biochemical oxygen demand (BOD))

Originale Name der Studie	Quelle	Ermittelte Primärdaten bzw. spezifische Daten	Verwendete Sekundärdaten	Betrachtete Umweltwirkungskategorien	Identifizierte wichtige Parameter und wichtige Ergebnisse	Ökotoxizität nach der Aufbringung in der Studie eingebunden?
Ökobilanz des Winterdienstes in den Städten München und Nürnberg - Stadt Nürnberg	(Quack et al. 2004)	Ausbringung: Streumittelmenge; Diesel- und Motorenölverbrauch	Spezifische Literaturquellen Ecoinvent	KEA, Treibhauseffekt, Versauerung, Bildung von Photooxidantien, Eutrophierung,	zur Reduzierung der Umweltauswirkungen beitragen. Eine Erhöhung des Feuchtsalzanteils führt zu einer Reduktion der eingesetzten Salzmenge und der Umweltauswirkungen Der Antransport der Auftaumittel spielt eine relevante Rolle für die Umweltauswirkungen	Nein, Ermittlung der Chlorid-Emissionen nach Ausbringungen
Machbarkeitsstudie zur Formulierung von Anforderungen für ein neues Umweltzeichen für Enteisungsmittel für Straßen und Wege, in Anlehnung an DIN EN ISO 14024	(Gartiser et al. 2003)	keine	Datenbanken oder verfügbaren Veröffentlichungen	- Ressourcenbeanspruchung - Treibhauspotential - Photooxidantienbildung, - Versauerung - Eutrophierung (terrestrisch).	NaCl scheidet am besten ab (Ausnahme: Harnstoff scheidet bei POCP besser ab). Im Vergleich mit Streusalzen oder auch abstumpfenden Streumitteln wird jedoch für die Herstellung von Formiaten wesentlich mehr Primärenergie verbraucht. Bei Natriumchlorid, Natriumformiat sowie Harnstoff ist jeweils die Herstellung des Enteisungsmittels für den Verbrauch an energetischen Ressourcen bestimmend. Bei Kalkstein und Granulat ist demgegenüber die Ausbringung ausschlaggebend.	Nein, Toxizität wurde separat beschrieben und diskutiert.
Ökobilanz: Streumittel						
Ökobilanz Auftausalze: Vergleich der lokalen Siedesalz Produktion Riburg gegenüber unterschiedlichen Importen von Siedesalz, Steinsalz und Meersalz	(Stettler und Kägi 2019)	Produktionsdaten von Saline Riburg für Siedesalz (MVR-Verfahren: mechanische Brüdenverdichtung)	Spezifische Literaturquellen Ecoinvent v3.4	Ökologische Knappheit 2013 mit Berücksichtigung der Umweltziele der Schweiz und die europäischen Merkmale (nach ILCD) Ergebnisdarstellung: -CO ₂ e - aggregierte Ergebnisse als Umweltbelastungspunkte (UBP)	Der Strommix für die Auftausalzherstellung hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Der Antransport ist ebenfalls relevant	Nein, da nicht innerhalb der Systemgrenzen
Global Warming Potential of Deicers	(Götzfried 2018)	keine	Spezifische Literaturquellen	GWP	Produktion und Antransport	Nein, da nicht innerhalb der Systemgrenzen
Vergleichende Ökobilanz drei verschiedener Auftausalze: Steinsalz, Siedesalz und Meersalz	(Stratmann und Quack 2009a)	spezifische Daten für die Herstellungsverfahren der drei Salztypen	Spezifische Literaturquellen Ecoinvent v2.0	kumulierter Energieaufwand (KEA) Treibhauspotential (GWP) Photooxidantienbildung (POCP) Eutrophierungspotential (EP) Versauerungspotential (AP)	Dominant bei der Herstellung: - Siedesalz (Mehrfacheffektverfahren): thermische Energie - Siedesalz (Thermokompression) und Steinsalz: elektrische Energie	Nein, da nicht innerhalb der Systemgrenze

Originale Name der Studie	Quelle	Ermittelte Primärdaten bzw. spezifische Daten	Verwendete Sekundärdaten	Betrachtete Umweltwirkungskategorien	Identifizierte wichtige Parameter und wichtige Ergebnisse	Ökotoxizität nach der Aufbringung in der Studie eingebunden?
				Flächennutzung der Herstellungsbetriebe in m² Salzhaltige Abwässer	- Meersalz: Kraftstoffverbrauch Der Transport und vor allem die Wahl des Transportmittels sind bei einer umweltfreundlichen Beschaffung von Aufbausalz ein wichtiger zu berücksichtigender Faktor.	

Tabelle 0-3: Tabellarische Auswertung der berücksichtigten ökobilanzrelevanten Studien (Teil II)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

2024

V 381: Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme

Lindner, Ruhnau, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 382: Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen

Ludwig, Tegeler, Schmedes, Tomhave, Hensel, Forster, Kleinhans, Heinrich, John, Schill

€ 19,50

V 383: Analyse und Entwicklung leistungsfähiger Einfahrttypen ohne Fahrstreifenaddition für Autobahnen

Geistefeldt, Brandenburg, Sauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 384: Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen – Methoden zur Untersuchung und Metaanalyse

Maier, Leonhardt, Ehm

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 385: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Landstraßen

Geistefeldt, Hohmann, Finkbeiner, Sauer, Vortisch, Buck, Weyland, Weiser, Giuliani

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2025

V 386: Pilothafte Anwendung des Bridge-WIM Verfahrens zur Ergänzung des Achslastmessstellennetzes

Firus, Petschacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 387: Akustische Wirksamkeit von Vegetation

Lindner, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 388: Hochaufgelöste multisensorielle Verkehrsdaten in der Streckenbeeinflussung

Schwietering, Löbbeling, Weinreis, Maier, Feldges

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 389: Lärmwetter in der Praxis – Erprobung und Weiterentwicklung der Methodik zur Anwendung meteorologischer Korrekturen auf die Schallausbreitung

Skowronek, Liepert, Müller, Schady, Elsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 390: Wirkung von Fahrstreifenbegrenzungen an Einfahrten von Autobahnen auf das Fahrverhalten und auf die Verkehrssicherheit

Geistefeldt, Sauer, Brandenburg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 391: Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärminderungsstrategien

Oehme, Böhm, Horn, Pourpart, Schweidler, Weinzierl, Fiebig, Schuck

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 392: Evaluierung der Wirksamkeit bestehender Überflughilfen für Fledermäuse an Straßen

Albrecht, Reers, Scharf, Grimm, Radford, Namyslo, Günther, Martin, Behr

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 393: Optimierung der Abstände von Anzeigequerschnitten und Messquerschnitten in Streckenbeeinflussungsanlagen

Schwietering, Löffbering, Abarghooie, Geistefeldt, Marnach

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 394: Optimierte Steuerungsstrategien für Lichtsignalanlagen durch die Berücksichtigung der Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation (C2X)

Schendzielorz, Schneider, Künzelmann, Sautter, Höger

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 395: Empfehlungen zur Breite von hochfrequentierten Radverkehrsanlagen unter Berücksichtigung der Verkehrsqualität

Geistefeldt, Brandenburg, Vortisch, Buck, Zeidler, Baier

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 396: Wirkung von Behandlungsanlagen der Straßenentwässerung im Hinblick auf AFS63

Rüter, Grotehusmann, Lambert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 397: Gestaltung innerörtlicher Verkehrswegenetze

Friedrich, Wohnsdorf, Gerike, Koszowski, Baier, Wothge

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 398: Verfahren für die Engpass- und Mängelanalyse im städtischen Hauptverkehrsstraßennetz

Vortisch, Buck, Fuchs, Grau, Friedrich, Hoffmann, Lelke, Baier

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 399: Detektion von Radfahrern im signalgeregelten Bereich von Knotenpunkten in Verbindung mit Absetzung einer Warnmeldung für Kraftfahrzeuge

Kaiser, Schade, Czogalla, Abboud, Mischke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 400: Aktualisierung der Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität an Knotenpunkten mit LSA

Geistefeldt, Wu, Schmitz, Vieten, Stephan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 401: Verflechtungsstrecken zwischen Knotenpunkten an Autobahnen

Geistefeldt, Brandenburg, Sauer, Vortisch, Buck, Baumann, Grau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 402: Qualitätsgerechte Bewertung der LSA-Steuerung für den ÖPNV

Schmidt, Sommer, Briegel, Lambrecht

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 403: Ermittlung von Grundlagen und Bewertungsmethoden einer Ökobilanz des Straßenwinterdienstes

Quack, Liu, Götzfried, Gartiser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-866-9
<https://doi.org/10.60850/bericht-v403>

www.bast.de