

## Ermittlung von Grundlagen und Bewertungsmethoden einer Ökobilanz des Straßenwinterdiensts

FE 3.617

Forschungsstellen: Öko-Institut, Freiburg  
 Salt Research + Consulting, Bad Wimpfen  
 Hydrotex GmbH, Freiburg

Bearbeiter: Götzfried, F. / Quack, D. / Gartscher, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Bonn

Abschluss: Dezember 2023

### 1 Hintergrund

Wesentliche Aufgabe des Winterdiensts ist die Gewährleistung von Sicherheit und Verkehrsfluss für Personen- und Güterverkehr in Perioden mit winterlichen Witterungsbedingungen (zum Beispiel Schneefall, überfrierende Nässe, Glatteis, Schneematsch). Der Winterdienst soll nach Möglichkeit die Glättebildung vermeiden, entstandene Glätte beseitigen oder ihre Auswirkungen auf den Verkehr minimieren. Insgesamt stehen für den Winterdienst unterschiedliche Techniken und Methoden zur Verfügung, die kontinuierlich weiterentwickelt werden. Die Bewertung der unterschiedlichen Ansätze erfolgt derzeit priorität 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.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Forschungsprojekts untersucht, wie die Ökobilanzmethode auf den Straßenwinterdienst angewendet werden kann.

### 2 Zielsetzung und Vorgehen

Übergreifendes Ziel des Projekts 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 Projekts war es, eine einfache Methode für die Ökobilanzierung des Straßenwinterdiensts 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 Bundesfernstraßen.

Die Methode sollte die Auswirkungen des Straßenwinterdiensts möglichst umfassend berücksichtigen und sich an den internationalen Standards zu Ökobilanzen orientieren (insbesondere DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044). Die Methode sollte 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, zum Beispiel einzelne Einsätze, ganze Bezirke oder Straßennetze anwendbar ist. Grundsätzlich ist geplant, dass die BAST das ÖkoWin-Tool auf ihrer Homepage interessierten Kreisen zur Verfügung stellt.

Das Projekt gliederte sich in zwei Arbeitspakete:

In Arbeitsschritt 1 "Identifikation der Eckpunkte einer Ökobilanz Straßenwinterdienst" wurde die Grundlage für die Entwicklung des Tools in Arbeitsschritt 2 erstellt. Dazu erfolgte 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. Ergänzend wurden Interviews mit Praxisakteuren durchgeführt. Abschließend werden auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeiten Schlussfolgerungen für eine Ökobilanz Straßenwinterdienst gezogen.

In Arbeitsschritt 2 "Entwicklung Tool" erfolgte dann die Entwicklung des ÖkoWin-Tools. Zunächst wurde ein Prototyp entwickelt, der in einer Testphase mit Praxisakteuren erprobt und dann finalisiert wurde.

### 3 Ergebnisse

Insgesamt wurden zehn relevante Ökobilanzstudien zum Winterdienst identifiziert und ausgewertet.

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

- Geräumte Kilometer
- Behandelte Straßenfläche als Länge x Streubreite
- Alle Aktivitäten des kommunalen Winterdiensts auf dem Gebiet einer Stadt
- Bereitstellung von einer Tonne Auftausalz beim Hersteller respektive bis Zwischenlager

Die Systemgrenzen, das heißt 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.

Die Fahrzeugreinigung wurde nur bei einigen Studien erwähnt oder untersucht. Am Ende des Lebenswegs (End-of-Life), das heißt nach der Ausbringung, muss Streusalz im Gegensatz zu abstumpfenden Streumitteln, wie zum Beispiel Splitt, nicht wieder eingekehrt werden. Streusalz wird unter anderem 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, oder auf Inventarebene abgehandelt (zum Beispiel als Chloremissionen).

Die Bereitstellung der Infrastruktur, das heißt die Herstellung, Distribution und Entsorgung von Maschinen und 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.

Im Hinblick auf die berücksichtigten Umweltwirkungskategorien werden in den ausgewerteten Studien entweder die in der Ökobilanz-Praxis gängigen Bewertungsmethoden 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. Der Wasserverbrauch wurde nur in einem Teil der Studien betrachtet.

Auch wenn toxizitätsbezogene Wirkungskategorien, das heißt 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. Einzelne Studien berechnen die Gesamtchloridemissionen in die Umwelt. Allerdings handelt es sich dabei nicht um eine Wirkungskategorie und entsprechend ist damit auch keine direkte Aussage zu potenziellen Umweltwirkungen (zum Beispiel zu Toxizität im Süßwasser) der Chlorid-Emissionen möglich.

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 (zum Beispiel die Ausbringung der Streumittel) des jeweils untersuchten Systems ermittelt werden. Bei Sekundärdaten handelt es sich um Datensätze aus der Literatur, die zum Teil 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 zum Beispiel die Herstellung von Kraftstoffen oder die Emissionen der Fahrzeuge. Bei der Verwen-

dung von Sekundärdaten wird in den analysierten Studien häufig auf die Ökobilanz-Datenbank Ecoinvent zurückgegriffen.

Im Rahmen der Literaturlauswertung wurden zwei Datenlücken identifiziert: Zum einen konnte keine geeignete Datengrundlage für die Herstellung von  $MgCl_2$  identifiziert werden. Zum anderen wurden in den analysierten Studien keine Aussagen zu den Umweltauswirkungen von Additiven, Antibackmitteln, Korrosionsschutzmitteln und Staubbindern sowie technischen Hilfsstoffen gefunden.

Die erzielten Ergebnisse der ausgewerteten Studien können folgendermaßen zusammengefasst werden: Den größten Beitrag an den Umweltauswirkungen des Winterdiensts haben die verbrauchten Streumittel und die Kraftstoffe für die Ausbringung. Die Verbrauchsmengen von Streumitteln und Kraftstoffen sind dabei von den spezifischen Rahmenbedingungen des jeweiligen Winterdiensts abhängig, zum Beispiel von den Witterungsbedingungen, den Straßenzuständen, der Fahrzeug- und Streutechnik, den Streumitteln oder den konkreten Einsätzen (Vignisdottir et al. 2020). Als weiterer wichtiger Faktor hat sich außerdem der Transport der Streumittel vom Produktions- zum Einsatzort gegebenenfalls etwaiger Zwischenlager erwiesen. 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 Ozonabbau- und das Photooxidantienbildungspotenzial die Vorkette, das heißt die Herstellung der Kraftstoffe, eine große Rolle. Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Herstellung von Natriumchlorid – als Steinsalz, Siedesalz oder Meersalz – sind mit unterschiedlich hohen Umweltauswirkungen verbunden. Die Herstellung von Siedesalz hat einen deutlich höheren Energiebedarf und verursacht daher prozessbedingt deutlich höhere Umweltauswirkungen als die Steinsalz- und Meersalz-Herstellung. Meersalz hat die geringste Umweltauswirkung. Die Anwendung der Streumittel in Form von Sole statt in trockener Form führt zu einer erheblichen Verringerung aller Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus.

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. Dabei zeigte sich, dass es aufgrund fehlender Informationen und Daten über komplexe ökotoxikologische Wechselwirkung von anorganischen Stoffen derzeit keine wissenschaftlich begründeten Charakterisierungsfaktoren für Chlorid,  $NaCl$ ,  $CaCl_2$  und  $MgCl_2$  gibt. 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

wurde aber eine ausführliche Literaturrecherche und -auswertung durchgeführt (siehe nächster Abschnitt).

**Ökotoxikologische Wirkung:** Die verfügbaren Daten zur aquatischen und terrestrischen Ökotoxizität der wichtigsten Auftausalze (NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub> und CaCl<sub>2</sub>) 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 EC<sub>50</sub> beziehungsweise LC<sub>50</sub> > 1 g/L, die chronische aquatische Ökotoxizität bei einem NOEC > 100 mg/L. Die terrestrische Ökotoxizität gegenüber Pflanzen und Regenwürmern liegt üblicherweise bei einem EC<sub>50</sub> beziehungsweise LC<sub>50</sub> > 5 g/kg. Diese Werte werden durch Maßnahmen des Winterdiensts 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 gegebenenfalls auch salzresistente Halophyten ansiedeln.

Außerdem sollte noch auf zwei weitere Aspekte eingegangen werden:

**Zum einen 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 Winterdiensts unter realen – nicht Laborbedingungen – zum Beispiel 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 Wechselwirkungen zwischen anderen Schädigungsmöglichkeiten und der Streusalzwirkung geben. Für das im Projekt entwickelte Ökobilanz-Tool, das in unterschiedlichen Regionen in Deutschland eingesetzt werden kann, liegen keine, zum Beispiel 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.

**Zum anderen 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 Winterdiensts 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 Straßenzustands 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 Literaturauswertung 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 Winterdiensts für einzelne Einsätze, ganze Bezirke oder Straßennetze zu ermöglichen und für Planung, Disposition sowie Investitionsentscheidungen im Rahmen des Winterdiensts einsetzbar zu sein. Es soll die Ermittlung der Umweltauswirkungen des Winterdiensts entlang des Lebenswegs 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 (inklusive etwaiger Leerfahrten)
- Kontrollfahrten
- Fahrzeug- und Gerätereinigung (zum Beispiel Wasserverbrauch)

Vor- und nachgelagerte Prozesse:

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

Im ÖkoWin-Tool werden fünf Umweltwirkungskategorien berücksichtigt:

- Kumulierten Energie-Aufwand (KEA) in MJ-Äquivalent

- Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential, GWP) in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent
- Versauerungspotenzial (Acidification Potential, AP) in mol H<sup>+</sup>-Äquivalent
- Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential, ODP) in kg Trichlorfluormethan-Äquivalent (FCKW-11-Äq.)
- Photooxidantienpotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP) in kg NMVOC-Äquivalent<sup>2</sup>

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

#### Praktische Aspekte des ÖkoWin-Tools

Technische Voraussetzungen für das Tool: 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. Gegebenenfalls 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.

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, das heißt das ÖkoWin-Tool jeweils separat abzuspeichern.

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.

Schritt 3: Eingabe der allgemeinen Eckdaten der zu bilanzierenden Winterdienstaktivitäten. Auf dem Tabellenblatt "Eingabe Untersuchungsrahmen" sind allgemeine Informationen (zum Beispiel Bezeichnung der Organisation), die Bezugsgröße (das heißt die räumliche und zeitliche Dimension der funktionellen Einheit) sowie Angaben zum Winterdienst (zum Beispiel Anteil Feuchtsalz, Anzahl Glätteereignisse) einzugeben.

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

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

Schritt 5: Ausgabe der Ergebnisse. Auf dem Tabellenblatt "Ergebnisse" werden die Eckpunkte der Ökobilanz, das heißt 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.

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.

## 4 Fazit

Mit Hilfe der Methode der Ökobilanz können die Umweltauswirkungen des Winterdiensts 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. 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 Winterdiensts auf den Verkehrsfluss können mit der Methode Ökobilanz derzeit nicht abgebildet werden.

Die Methode der Ökobilanz eignet sich insgesamt sehr gut, um Optimierungspotenziale für die Durchführung des Winterdiensts innerhalb einer Meisterei zu identifizieren. Ein direkter Vergleich des Winterdiensts verschiedener Meistereien ist auf Basis einer Ökobilanz nur sehr eingeschränkt oder gar nicht möglich. Grund dafür sind die Unterschiede von Klima- und Wetterbedingungen und/oder Straßen- und Verkehrssituationen zwischen verschiedenen Meistereien, die dann entsprechend nicht vergleichbar sind.

<sup>2</sup> NMVOC: Non Methane Volatile Organic Compounds

