

Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse



Lärmarme Strassenbeläge – Ökobilanz und Lebenszykluskosten

Schlussbericht Forschungsprojekt

08. März 2024

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Finanzierung

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Tiefbauamt Kanton Zürich

Tiefbauamt Kanton Aargau

Tiefbauamt Kanton St. Gallen

Begleitgruppe

Sophie Hoehn, BAFU, Sektion Strassenlärm; Vorsitz

Simon Steiner, BAFU, Sektion Strassenlärm

Alexia Roschi, BAFU, Sektion Strassenlärm

Pierryves Padey, BAFU, Sektion Konsum und Produkte

Harald Jenk, BAFU, Sektion Luftqualität

Clara-Marine Pellet, BAFU, Sektion Abfall

Pedro Lopez, Service des Ponts et Chaussées, Canton de Fribourg

Peter Angst / Andrin Widmer, Fachstelle Lärmschutz, Tiefbauamt Kanton Zürich

Dejan Milo, Fachstellenleiter Strassenlärm, Abt. Tiefbau Kanton Aargau

Sam Lanners, Tiefbauamt, Strassenlärm Kanton St. Gallen

Patrick Schärer, Strasseninspektor Seeland Kanton Bern

Fabian Traber, ASTRA, Fachunterstützung

Auftragnehmer

Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse

Autoren (Projektteam Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse)

Johannes Schindler, Grolimund und Partner AG

Arthur Braunschweig, E2 Management Consulting AG

Rolf Huwyler, HK Partners AG

Erik Bühlmann, Grolimund und Partner AG

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

In dieser Arbeit wird zur besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und andere Geschlechteridentitäten sind ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

Zusammenfassung

Résumé en français ci-dessous

Summary in English below

Fragestellung

Diese Studie beantwortet die Frage, inwieweit lärmarme Strassenbeläge (LAB) über den gesamten Lebenszyklus und inklusive der Nutzungsphase betrachtet, gegenüber konventionellen Belagstechnologien aus ökologischer und aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhafter sind.

Diese Frage stellt sich, da lärmarme Beläge eine wichtige Massnahme sind, um Menschen gemäss dem gesetzlichen Auftrag vor übermässigem Strassenlärm zu schützen. Zugleich sind diese Beläge für die für Strassenbau und -unterhalt zuständigen Stellen oft teurer als konventionelle Beläge, da LAB schneller erneuert werden müssen.

Gemeinsam mit dem BAFU und einer breit abgestützten Begleitkommission wurden zunächst die Fragestellung spezifiziert, die zu betrachtenden Belagstypen ausgewählt und eine repräsentative Strassensituation definiert. In vier Szenarien werden die Beläge ACMR 8 (Referenz), SDA 4 und SDA 8 (verbreitete lärmarme Beläge) und AC 8-lärmarm wie im Kanton Zürich eingesetzt, verglichen. Beurteilt wird eine im Lärmschutzkontext relevante Situation einer Kantonsstrasse im Innerortsbereich, mit Tempo 50 und einer Nutzung von täglich 8000 Fahrzeugen.

Die Ökobilanz wurde als «Lebenszyklusanalyse» aufgesetzt, d.h. in dieser Studie wurde der gesamte Lebenszyklus einer Strasse betrachtet, bestehend aus Bau, Unterhalt, Nutzung – inklusive Lärm und Treibstoffverbrauch - sowie dem Rückbau und der Entsorgung.

Die Studie basiert auf dem Stand des Wissens 2022. Die Datenlage ist für die meisten Prozesse gut, insbesondere für die Prozesse, welche auf das Ergebnis grossen Einfluss haben. Für den neueren Belagstyp AC 8 H LA sind erst vergleichsweise wenig Messdaten vorhanden.

Ergebnisse

Resultate wurden in vier Wirkungskategorien berechnet. Die Umweltauswirkungen wurden mit drei Indikatoren berechnet: In den sogenannten «Umweltbelastungspunkten» (UBP'21) des BAFU, welche ein breites Spektrum von Umweltbelastungen (inklusive Lärm) berücksichtigt, sowie in den spezifischen Auswertungen von Energieeinsatz (MJ) und Treibhausgasemissionen (CO₂eq). Die gesamten wirtschaftlichen Auswirkungen wurden als Lebenszyklus-Kosten-Analyse errechnet. Diese umfasst einerseits die von den Beteiligten direkt getragenen Kosten («interne Kosten», z.B. Bau- oder Treibstoffkosten) sowie andererseits auch die von den Verursachern

nicht getragenen Kosten bei Dritten («externe Kosten», z.B. Gesundheitskosten verursacht von Strassenlärm).

Damit die Resultate unabhängig von der Lebensdauer der Beläge vergleichbar sind, sind sie jeweils «pro km Strasse und Jahr» ausgedrückt.

Die folgende Abbildung zeigt die Resultate aus gesamtökologischer Sicht (UBP'21) für die vier Hauptszenarien, ausgewiesen als Abweichung der drei lärmarmen Beläge gegenüber dem Referenzbelag ACMR 8.

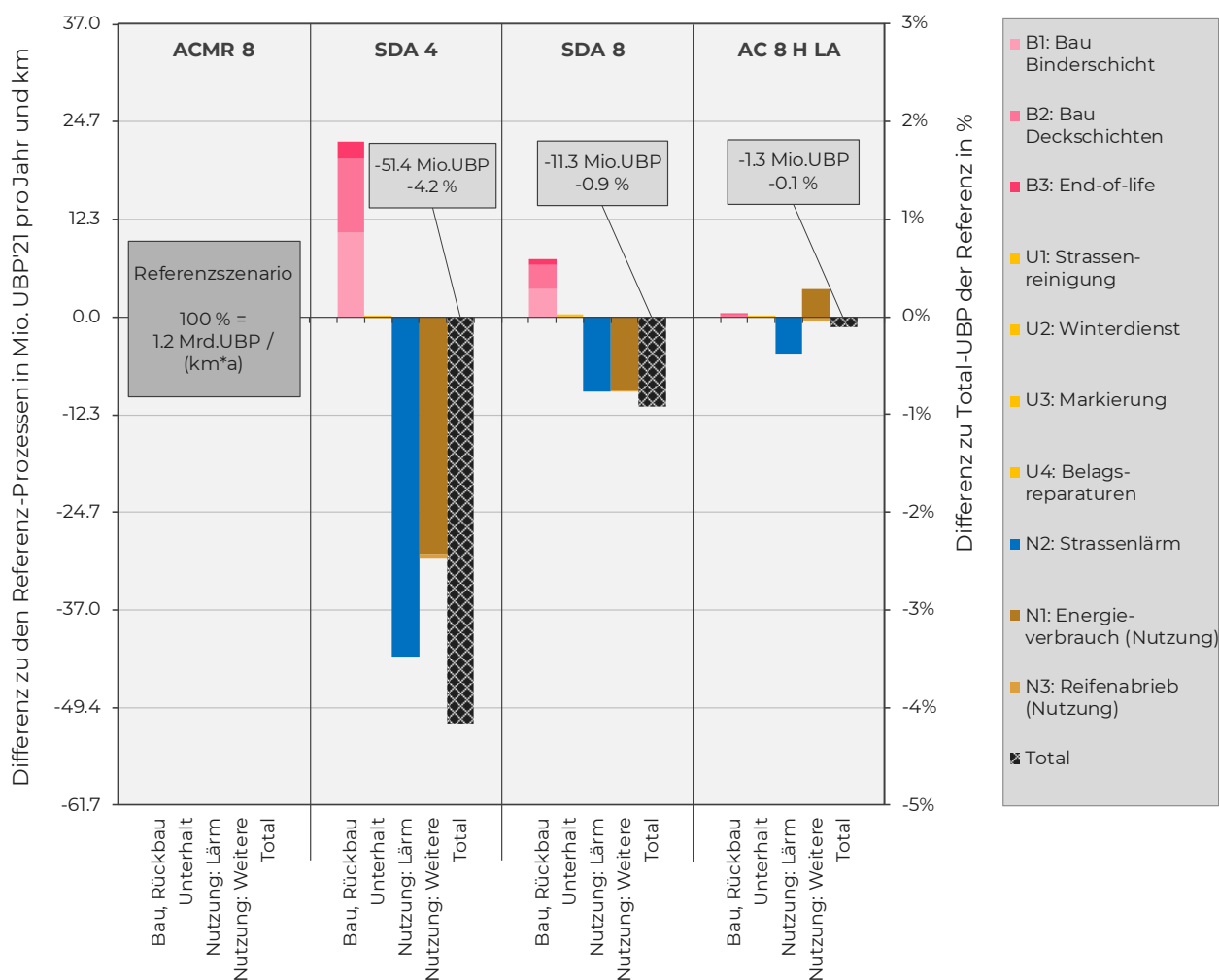


Abbildung 4: Differenzen der Umweltbelastungspunkte gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8. Die Unterhaltsprozesse (U*) sind nur schwach sichtbar und deshalb in derselben Farbe gehalten.

Der Belag SDA 4 führt zur geringsten Umweltbelastung (in UBP'21) der vier betrachteten Beläge. Gegenüber dem Referenzbelag ACMR 8 sinkt die Umweltbelastung insgesamt um ca. 4 % (schwarz-weiße Säule).

Der Belag SDA 8 hat ebenfalls eine, wenn auch weniger stark, sinkende Umweltbelastung (um knapp 1 %). Ein AC 8 H LA schneidet insgesamt ähnlich ab wie der Referenzbelag (- 0.1 %, wobei für diesen Belag die Datenbasis kleiner ist).

In den (hier nicht abgebildeten) Auswertungen zum Energieverbrauch und zur Treibhauswirkung (CO₂eq) ergeben alle vier Beläge sehr ähnliche Werte.

Der entscheidende Unterschied entsteht somit durch die Lärmwirkung.

Bezüglich der Lebenszykluskosten (vgl. untenstehende Abbildung) ist ein SDA 4 im Bau am teuersten, doch sinken auf ihm die Kosten der Strassenbenutzenden (Treibstoff, Pneu) und auch die externen Kosten aus Lärm und Treibstoffemissionen.

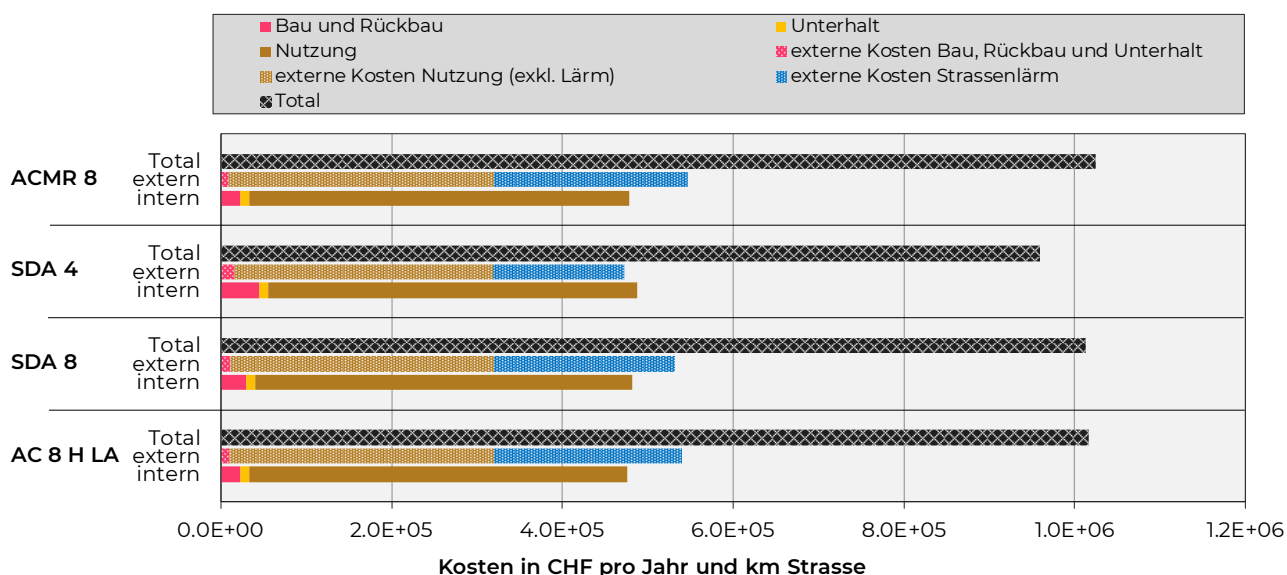


Abbildung 7: Interne, externe und totale Kosten pro Jahr und Kilometer Strasse für die vier Basisszenarien.

In der Summe ist deshalb ein SDA 4 volkswirtschaftlich günstiger als der Referenzbelag ACMR 8. Auch hier sind die Werte für SDA 8 und AC 8 H LA strukturell ähnlich, aber weniger ausgeprägt.

Ergänzend zur Auswertung dieser vier Belagstypen wurden einzelne Annahmen mit Sensitivitätsanalysen variiert: Eine verlängerte Lebensdauer des Referenzbelags, der Einsatz von akustischem Unterhalt auf den SDA-Belägen, ein erhöhter Anteil von Rezyklat im Mischgut, Rollwiderstandsoptimierung bei SDA 4 Belägen und ein auf 50 % angestiegener Bestand elektrischer Fahrzeuge. Die meisten

Sensitivitätsanalysen verändern die Kernaussagen nicht oder nur unwesentlich und deuten auf stabile Ergebnisse hin. Besonders die Rollwiderstandsoptimierung der SDA 4 Beläge verspricht jedoch, gegenüber obigen Werten noch deutlich stärkere ökologische und volkswirtschaftliche Vorteile dank reduziertem Energieverbrauch in der Nutzung zu erlauben.

Verallgemeinernd kann festgehalten werden, dass die lärmarmen SDA-Beläge, und insbesondere SDA 4, lärmbezogen vorteilhaft sind und trotz der kürzeren Lebensdauer gesamtökologisch mindestens gleich gut abschneiden wie ein konventioneller Belag. Auch gesamtwirtschaftlich betrachtet sind diese lärmarmen SDA-Beläge vorteilhaft gegenüber traditionellen Belägen, wobei eine Verschiebung von Kosten stattfindet, mit Mehrkosten bei Bauherren und Minderkosten bei Nutzenden, sowie geringeren externen Kosten zulasten der Gesellschaft als Ganzem.

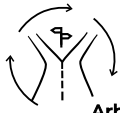
Wenn auch die prozentualen Verbesserungen mit bis zu - 6 resp. - 8 % (Umweltbelastung resp. Lebenszyklus-Kosten gemäss Sensitivitätsanalyse 4) nicht übermässig gross erscheinen mögen, so ist doch zu beachten, dass hier ein sehr grosses System – quasi der gesamte Strassenverkehr – analysiert wurde, und der ausgewiesene Vorteil absolut betrachtet entsprechend gross ist. Weiter sind die Veränderungen in den einzelnen Lebenszyklus-Phasen auch prozentual so gross, dass von substantiellen Wirkungen gesprochen werden kann.

Ausblick

Die Resultate für eine mittel bis stark befahrene Kantonsstrasse innerorts legen nahe, bei der Belagswahl die ökologischen Auswirkungen und auch die Kosten-Wirkungen während des gesamten Lebenszyklus', d.h. inkl. der Befahrung der Strasse, zu berücksichtigen. Bei einer stärker befahrenen Strasse innerorts dürften die Resultate noch klarer ausfallen, und umgekehrt bei spürbar weniger starker Befahrung. Die Resultate zeigen darüber hinaus, dass diese Empfehlung auch bei steigendem Bestand elektrisch angetriebener Fahrzeuge gilt; grosse Veränderungen im Strommix müssten jedoch genauer betrachtet werden.

Ergänzende Fragestellungen, welche diese Studie noch nicht beantwortet, sind die ökologische Wirkung von verschiedenen Belagstypen in Kombination mit weiteren Lärmschutzmassnahmen, wie z.B. die Belagswahl in Kombination mit Temporeduktionen, oder auch die Bedeutung der Variabilität innerhalb der untersuchten und zu weiteren heute eingebauten Belagstypen, oder die Wirkung von Belägen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Zu berücksichtigen wären dabei auch weitere beeinflusste Effekte, wie z.B. Unfälle.

Über den Strassenbau hinaus gibt diese Studie auch Hinweise auf die Rolle des Strassenbaus im Rahmen der nationalen Klima- und Umweltdiskussion: In UBP'21 gerechnet ermöglicht die Wahl eines optimierten Strassenbelags (SDA 4, Sensitivitätsanalyse 4) bis 3 % Einsparpotenzial an Klimagasen, bei einer



gesamtökologischen Verbesserung (in UBP) um 6 % mit weiterem Potential nach oben, und dies bei gleichzeitig ebenfalls sinkenden volkswirtschaftlichen Gesamtkosten.

Die Resultate der Studie werfen weitere interessante Fragestellungen auf, welche den Rahmen der Studie überstiegen - zum Beispiel wie sich Nutzungsintensität, Bevölkerungsdichte und Lärmbetroffenheit auf die Resultate auswirken. Hierzu wären zukünftige Sensitivitätsanalysen aufschlussreich.

Résumé

Zusammenfassung in Deutsch oben

Summary in English below

Problématique

Cette étude répond à la question de savoir dans quelle mesure les revêtements routiers phonoabsorbants, considérés sur l'ensemble du cycle de vie y compris la phase d'utilisation, sont plus avantageux que les technologies de revêtement conventionnelles, tant d'un point de vue écologique qu'économique.

Cette question se pose, car les revêtements phonoabsorbants constituent une mesure importante pour protéger les personnes contre le bruit routier excessif, conformément au mandat légal correspondant. En même temps, ces revêtements sont souvent plus coûteux que les revêtements conventionnels pour les services responsables de la construction et de l'entretien des routes, parce qu'ils doivent être renouvelés plus rapidement.

À travers une collaboration entre l'OFEV et une commission d'accompagnement largement représentative, le cadre de la problématique a d'abord été déterminée, les types de revêtements à considérer ont été choisis et une situation routière représentative a été définie. Quatre scénarios comparent les revêtements ACMR 8 (référence), SDA 4 et SDA 8 (revêtements phonoabsorbants répandus) et AC8-silencieux tels qu'utilisés dans le canton de Zurich. L'analyse s'est faite dans le cadre d'une situation pertinente du point de vue de la protection contre le bruit d'une route cantonale située à l'intérieur d'une localité, dans une zone à 50 km/h et avec une circulation de 8000 véhicules par jour.

L'écobilan a été établi sous la forme d'une « analyse du cycle de vie », c'est-à-dire que cette étude a pris en compte l'ensemble du cycle de vie d'une route, comprenant la construction, l'entretien, l'utilisation - y compris le bruit et la consommation de carburant - ainsi que la destruction et l'élimination.

L'étude se base sur l'état des connaissances en 2022. Les données sont bonnes pour la plupart des processus, en particulier pour ceux qui ont une grande influence sur les résultats. Pour le type de revêtement plus récent AC 8 H LA, il n'existe que relativement peu de données de mesure.

Résultats

Les résultats ont été calculés selon quatre catégories d'effets. Les impacts environnementaux ont été calculés à l'aide de trois indicateurs : les « unités de charge écologique » (UCE'21) de l'OFEV, qui prennent en compte un large éventail de nuisances environnementales (y compris le bruit), ainsi que les évaluations spécifiques de l'utilisation d'énergie (MJ) et des émissions de gaz à effet de serre (CO₂eq). L'impact

économique total a été calculé sous la forme d'une analyse des coûts du cycle de vie, qui comprend d'une part les coûts directement assumés par les parties prenantes (« coûts internes », p. ex. coûts de construction ou de carburant) et d'autre part les coûts supportés non par les pollueurs mais par des tiers (« coûts externes », p. ex. coûts de santé causés par le bruit routier).

Pour que les résultats soient comparables indépendamment de la durée de vie des revêtements, ils sont tous exprimés « par km de route et par an ».

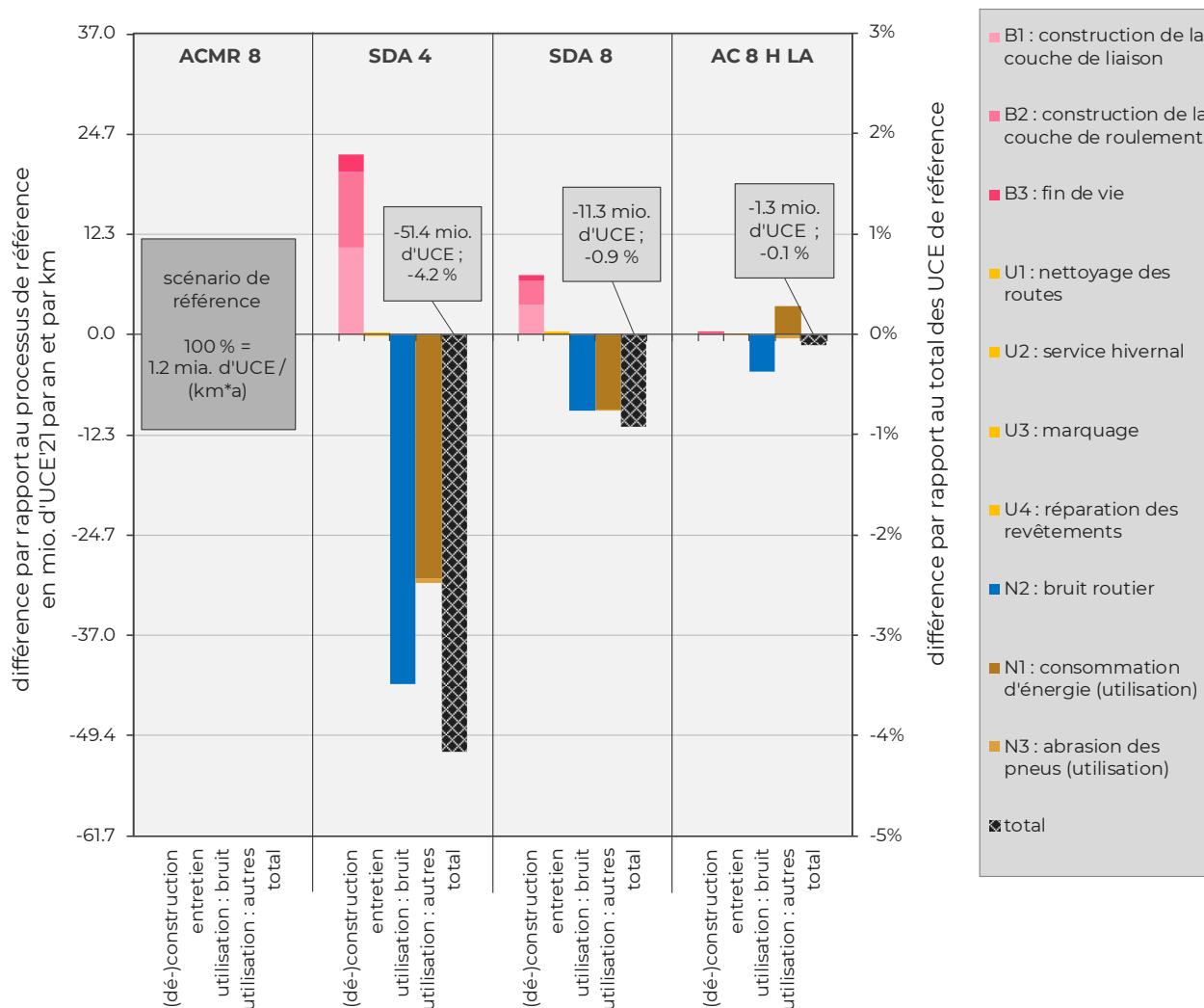


Figure 4 : Différences des points d'impact environnemental par rapport au scénario de référence ACMR 8. Les parts des processus d'entretien (U*) sont à peine visibles et donc toutes représentées dans la même couleur.

La figure en haut montre les résultats du point de vue écologique global (UCE'21) pour les quatre scénarios principaux, indiqués en tant qu'écart des trois revêtements phonoabsorbants par rapport au revêtement de référence ACMR 8.

Le revêtement SDA 4 entraîne la charge environnementale la plus faible (en UCE'21) des quatre revêtements considérés. Par rapport au revêtement de référence ACMR 8, l'impact environnemental global diminue d'environ 4 % (colonne noire et blanche). Le revêtement SDA 8 affiche également une charge environnementale en baisse, bien que dans une moindre mesure (près de - 1 %). Un AC 8 H LA donne globalement des résultats similaires à ceux du revêtement de référence (- 0,1 %).

Dans les évaluations (non illustrées ici) de la consommation d'énergie et de l'effet de serre (CO₂eq), les quatre revêtements présentent des valeurs très similaires entre elles. La différence décisive se situe donc au niveau de l'impact sonore.

En ce qui concerne les coûts du cycle de vie (cf. illustration ci-dessous), un SDA 4 est le plus cher à construire, mais il fait diminuer les coûts pour les usagers de la route (carburant, pneus) ainsi que les coûts externes liés au bruit et aux émissions de carburant.

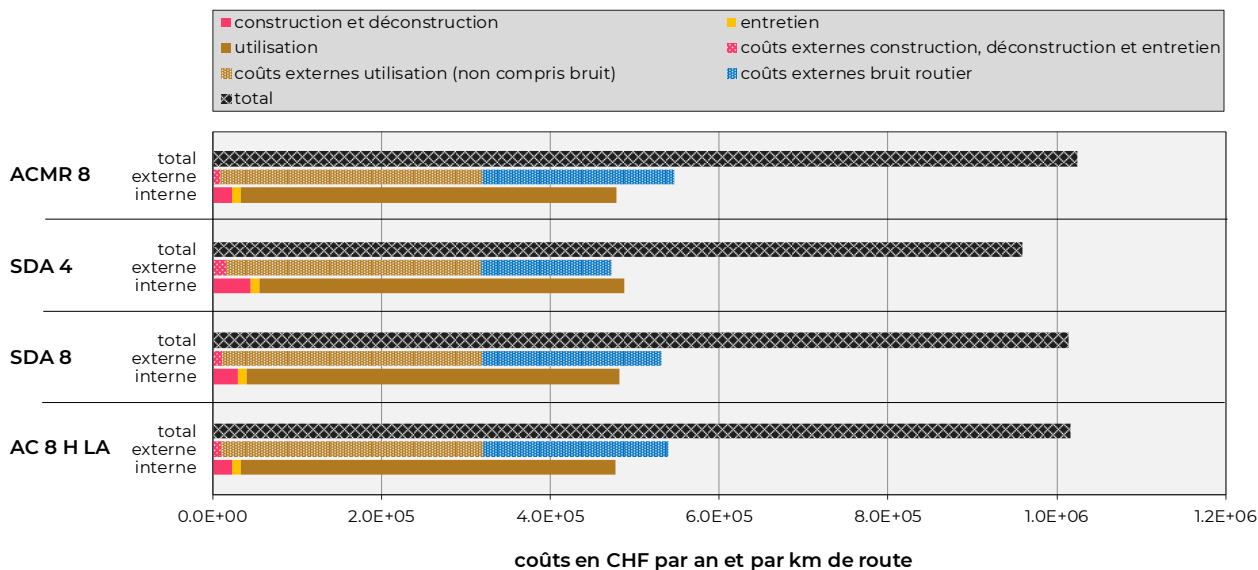


Figure 7 : Coûts internes, externes et totaux par an et par kilomètre de route pour les quatre scénarios de base.

En somme, un SDA 4 est économiquement plus avantageux que le revêtement de référence ACMR 8. Ici aussi, les valeurs pour le SDA 8 et l'AC 8 H LA sont moins marquées.

En complément de l'évaluation de ces quatre types de revêtements, certaines hypothèses ont été testées par une analyse de sensibilité sur : une durée de vie prolongée du revêtement de référence, l'utilisation d'un entretien acoustique sur les revêtements SDA, une part accrue de matériaux recyclés dans l'enrobé, une optimisation de la résistance au roulement pour les revêtements SDA 4 et une augmentation du parc de véhicules électriques à 50 %. La plupart des analyses de sensibilité ne modifient pas ou peu les conclusions principales et donnent des résultats stables. Toutefois, l'optimisation de la résistance au roulement des revêtements SDA 4, en particulier, promet des avantages écologiques et économiques encore plus importants en comparaison avec les valeurs ci-dessus, grâce à une consommation d'énergie réduite lors de l'utilisation.

Au vu de tous ces résultats, on peut constater que les revêtements SDA phonoabsorbants, en particulier le SDA 4, sont avantageux en matière de protection contre le bruit et que, malgré leur durée de vie plus courte, ils sont du point de vue écologique au moins aussi performants que les revêtements traditionnels. D'un point de vue économique global, ces revêtements SDA phonoabsorbants sont également plus avantageux que les revêtements traditionnels, à travers un transfert de coûts résultant certes en des coûts supplémentaires pour les maîtres d'ouvrage mais surtout en des coûts moindres pour les utilisateurs et en des coûts externes moindres pour la société dans son ensemble.

Même si les améliorations en pourcentage jusqu'à - 6 % ou resp. - 8 % (impact sur l'environnement ou coûts du cycle de vie selon l'analyse de sensibilité 4) ne semblent pas excessives, il convient de noter que c'est le système entier – soit quasiment l'ensemble du trafic routier – qui a été analysé ici et que l'avantage démontré est donc important en valeur absolue. En outre, les changements dans les différentes phases du cycle de vie sont suffisamment importants en pourcentage pour que l'on puisse parler d'effets substantiels.

Perspectives

Les résultats obtenus pour une route cantonale moyennement ou fortement fréquentée à l'intérieur des localités suggèrent de tenir compte, lors du choix du revêtement, de l'impact écologique et des effets liés aux coûts pendant tout le cycle de vie, c'est-à-dire en incluant la circulation des véhicules sur la route. Les résultats devraient être encore plus marqués pour une route plus fréquentée en localité et, inversement, moins marqués pour une route sensiblement moins fréquentée. Les résultats montrent en outre que cette recommandation est également valable en cas d'augmentation du nombre de véhicules à propulsion électrique ; il faudrait toutefois examiner de plus près les grandes modifications du mix électrique.

Cette étude n'aborde pas la problématique complémentaire que sont l'effet écologique des différents types de revêtement en combinaison avec d'autres mesures de protection contre le bruit, comme le choix du revêtement combiné à des réductions

de vitesse. Il faudrait également tenir compte d'autres effets présents, tels que les accidents.

Au-delà de la construction routière, cette étude donne également des indications sur le rôle de la construction routière dans le cadre du débat national sur le climat et l'environnement : calculé en UCE'21, le choix d'un revêtement routier optimisé (SDA 4, analyse de sensibilité 4) permet d'économiser jusqu'à 3 % de CO₂eq, pour une amélioration écologique globale (en UCE) de 6 %, avec un potentiel supplémentaire d'amélioration, et ce en même temps que l'effet économique, par les coûts globaux diminuent également.

Les résultats de l'étude soulèvent d'autres questions intéressantes qui dépassent le cadre de celle-ci - par exemple comment l'intensité d'utilisation, la densité d'habitation et l'exposition au bruit se répercutent sur les résultats. De futures analyses de sensibilité seraient instructives à ce sujet.

Executive Summary

Zusammenfassung in Deutsch oben

Résumé en français en haut

Research question

This study answers the question to what extent, from an ecological and economic point of view, low-noise road surfaces are more advantageous than conventional road surface technologies, considering their entire life cycle, including the use phase.

This question arises because low-noise road surfaces are an important measure to protect people from excessive road noise, in accordance with legal provisions. At the same time, these surfaces are often more expensive than conventional surfaces for the authorities responsible for road construction and maintenance, as low-noise surfaces must be renewed in shorter time intervals.

Together with the FOEN and a broad-based advisory committee, first the research question was specified, the pavement types to be considered were selected, and a representative road situation was defined. In four scenarios, the pavements ACMR 8 (reference), SDA 4 and SDA 8 (widespread low-noise pavements) and AC 8 low-noise as used in the canton of Zurich, were compared. The study analyses a situation relevant in the context of noise abatement on a cantonal road in an urban area, with a speed limit of 50 km/h and a daily traffic volume of 8'000 vehicles.

The analysis was set up as a life cycle assessment (LCA), i.e. the entire life cycle of a road was considered in this study, consisting of construction, maintenance, use - including noise and fuel consumption - as well as dismantling and disposal.

The study is based on the state of knowledge in 2022. The data situation is good for most processes, especially for those strongly influencing the result. Comparatively little measurement data is available for the newer AC 8 H LA pavement type.

Results

Results were calculated in four impact categories:

The environmental impact was calculated using three indicators: the so-called «environmental impact points», version 2021, (UBP, from «Umweltbelastungspunkte») of the FOEN, which assesses a broad spectrum of environmental impacts, including noise, as well as in the specific evaluations of energy use (MJ) and greenhouse gas emissions (CO₂eq).

The overall economic impact was calculated as a life cycle cost analysis. This includes the costs borne directly by the parties involved («internal costs», e.g. construction or fuel costs) as well as costs of third parties, not borne by the polluting parties («external costs», e.g. health costs caused by road noise).

To ensure that the results are comparable regardless of the various road cover service lives, all assessments are expressed «per km road and year».

The following figure shows the results from an overall ecological perspective (UBP'21) for the four main scenarios, displayed as differences of the three low-noise surfaces to the reference surface ACMR 8.

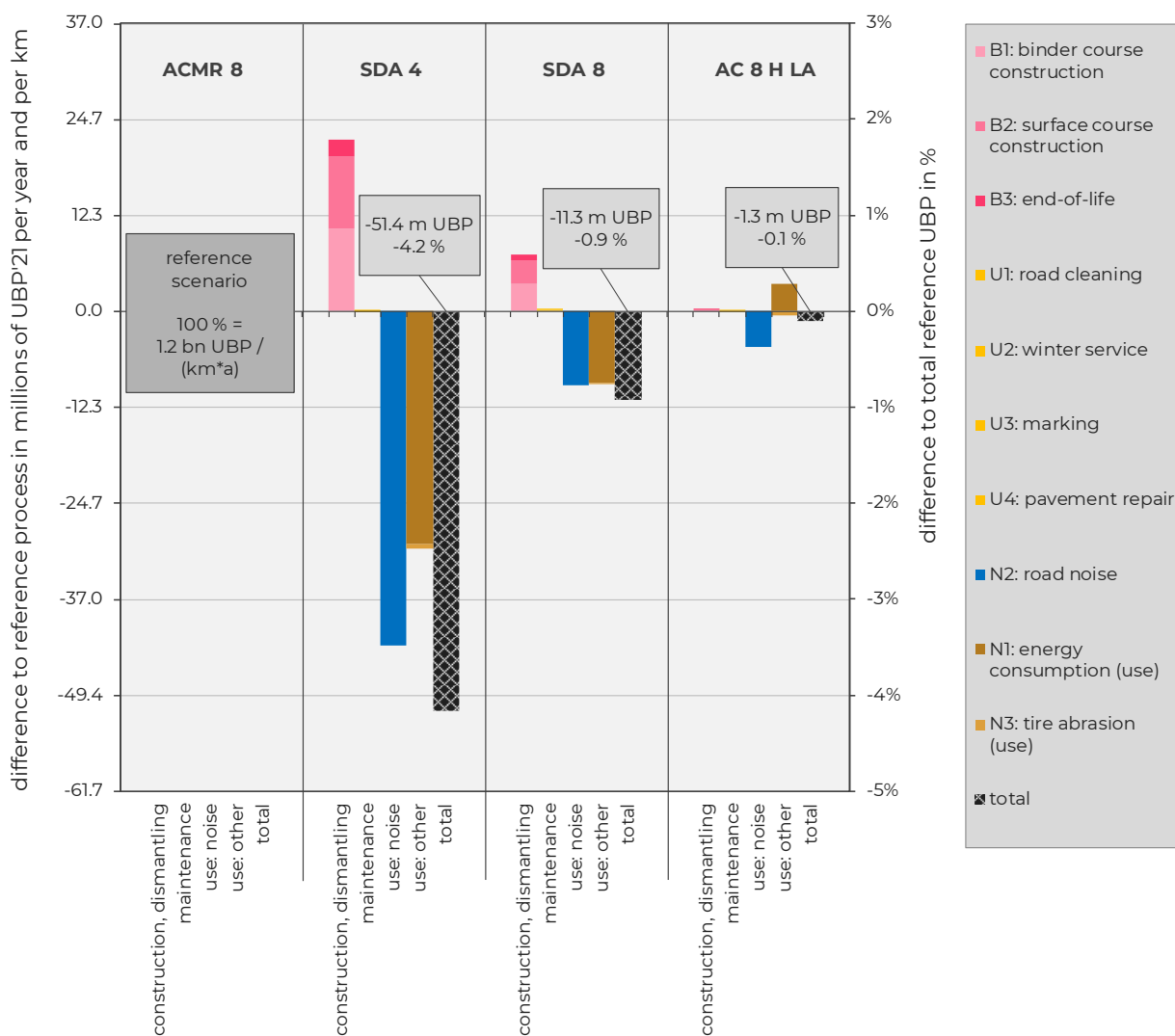


Figure 4: Differences in environmental impact points (UBP'21), in comparison to the reference scenario ACMR 8. Maintenance processes (U*) are only slightly visible and therefore shown in the same color.

The SDA 4 surface has the lowest environmental impact (in UBP'21) of the four surfaces considered. Compared to the reference surface ACMR 8, the total environmental impact decreases by approx. 4 % (column in black and white).

The SDA 8 surface also has a lower environmental impact, albeit to a lesser extent (by just under - 1 %). An AC 8 H LA performs similarly to the reference surface (- 0.1 %, whereby the database for this surface is smaller).

In the evaluations of energy consumption and greenhouse effect (not shown here), all four surfaces produce very similar values. The decisive difference therefore arises from the noise effect.

In terms of life cycle costs (see figure below), an SDA 4 is the most expensive to build, but costs for road users (fuel, tires) as well as external costs from noise and fuel emissions are lower.

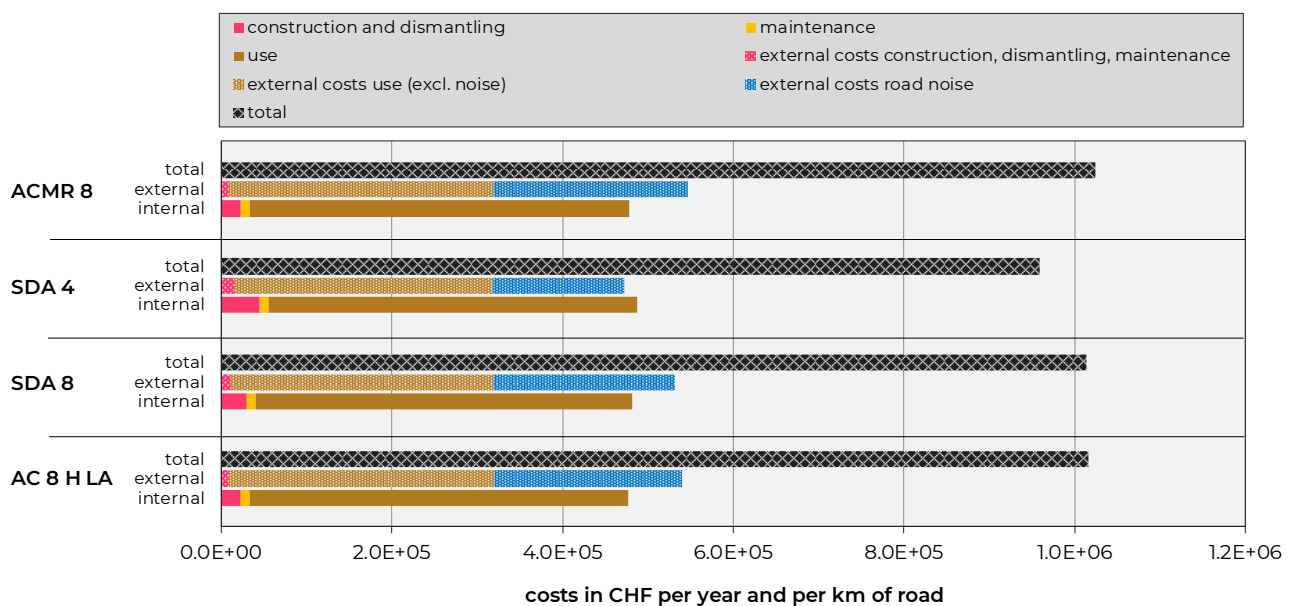


Figure 7: Internal, external and total costs for the four base scenarios, expressed per year and kilometer of road.

Overall, an SDA 4 is therefore economically more favorable than the reference surface ACMR 8. Here too, the values for SDA 8 and AC 8 H LA are structurally similar, but less pronounced.

In addition to the evaluation of these four pavement types, individual assumptions were varied using sensitivity analyses: An extended service life of the reference pavement, the use of acoustic maintenance on the SDA pavements, an increased proportion of recycled material in the mixture, the optimization of rolling resistance of

SDA 4 pavements, and an increased share of 50 % electric vehicles. Most of these sensitivity analyses do not or only insignificantly change the core statements and indicate stable results. However, optimized rolling resistance of SDA 4 surfaces promise even greater ecological and economic benefits compared to the above values, thanks to reduced energy consumption in the use phase.

Overall, low-noise SDA surfaces, and in particular SDA 4, are advantageous in terms of noise and, despite their shorter service life, show at least an equal environmental performance compared to a traditional surface. From a macroeconomic perspective, these low-noise SDA coverings are advantageous compared to traditional coverings, whereby a cost shift takes place, with additional costs for building owners and reduced costs for users, as well as lower external costs for the overall society.

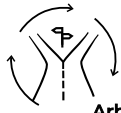
Even if the percentage improvements of up to - 6 or - 8 % (environmental impact or life cycle costs according to sensitivity analysis 4) may not appear excessively large, it should be noted that a very large system - virtually the entire road traffic system - was analyzed here, and in absolute terms, the reported benefit is correspondingly large. Furthermore, in the individual life cycle phases the changes between road cover types are also large in percentage terms, so that we can see substantial effects.

Outlook

The results for a cantonal road in urban areas with medium to heavy traffic suggest that both ecological and cost effects over the entire life cycle, i.e. including road use, should be considered when selecting a pavement. The results are likely to be even clearer for a road with heavier traffic in urban areas, and vice versa for a road with noticeably less traffic. The results show that this recommendation also applies with an increasing number of electrically powered vehicles; however, major changes in the electricity mix would warrant a detailed analysis.

Additional questions that this study does not yet answer are the ecological effect of different pavement types in combination with other noise protection measures, such as pavement choice combined with speed reductions, or the significance of variabilities among the investigated and other pavement types, or the pavements' effects at different speeds. Other influenced effects, such as accidents, should also be considered.

Beyond road construction, this study also provides indications of the role of road construction in the national climate and environmental debate: calculated in UBP'21, the choice of an optimized road surface (SDA 4, sensitivity analysis 4) enables up to 3 % of possible savings in greenhouse gases, with an overall ecological improvement (in UBP) of 6 %, with further upward potential, and with simultaneous reductions in overall economic costs.



Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse

The study results raise further interesting questions which go beyond the scope of the study, e.g., how use intensity, population density and noise exposure affect the results. In this regard, future sensitivity analyses would be insightful.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage, Fragestellung und Projekt.....	20
1.1.	Ausgangslage und Fragestellung.....	20
1.2.	Projektorganisation.....	21
1.3.	Bestehende Studien	23
2.	Systembeschreibung.....	25
2.1.	Strassensituation und Nutzung.....	26
2.2.	Betrachtete Belagstypen: Die vier Basisszenarien	26
2.3.	Variation der Szenarien (Sensitivitätsanalysen).....	28
2.4.	Systemgrenzen und funktionale Einheit.....	31
2.5.	Prozesse	32
2.5.1.	Bau Binderschicht: B1.....	33
2.5.2.	Bau Deckschicht: B2	33
2.5.3.	End-of-life: Rückbau, Recycling und Entsorgung: B3.....	34
2.5.4.	Strassenreinigung: U1.....	35
2.5.5.	Winterdienst: U2.....	35
2.5.6.	Strassenmarkierung: U3	35
2.5.7.	Belagsreparaturen: U4.....	35
2.5.8.	Hochdruckreinigung: U5 (akustischer Unterhalt)	35
2.5.9.	Grinding: U6 (akustischer Unterhalt).....	36
2.5.10.	Nutzung - Energieverbrauch: N1	36
2.5.11.	Nutzung - Strassenlärm: N2	38
2.5.12.	Nutzung - Reifenabrieb: N3.....	39
2.6.	Grundlagen der LCA-Methodik	40
2.7.	Grundlagen der LCC-Methodik	44
3.	Ergebnisse.....	45
3.1.	Gesamtschau auf die vier Basisszenarien	48
3.2.	Umweltbelastungspunkte.....	49
3.3.	Treibhausgaspotential und Primärenergiebedarf.....	52
3.4.	Interne und externe Kosten	54
3.5.	Sensitivitätsanalysen	59
3.5.1.	Sensitivitätsanalysen S1 bis S4: Belageigenschaften	59
3.5.2.	Sensitivitätsanalyse S5: Zukunftsszenario	64
4.	Würdigung der Resultate und Ausblick.....	67

Anhang

I.	Glossar	74
II.	Abbildungsverzeichnis.....	77
III.	Tabellenverzeichnis.....	79
IV.	Literaturverzeichnis.....	81
V.	Dank.....	84
VI.	Critical Review	85
VII.	Mischgut.....	93
VIII.	Lärmwirkung: akustisches Alterungsmodell	95
	VIII.a. Basisszenario ACMR 8.....	96
	VIII.b. Szenario SDA 4	97
	VIII.c. Szenario SDA 8.....	98
	VIII.d. Szenario AC 8 H LA.....	99
	VIII.e. Szenario SDA 4 -S2 (akustischer Unterhalt)	100
	VIII.f. Szenario SDA 8 -S2 (akustischer Unterhalt)	100
IX.	Strassenlärnkosten: Ausmass lärmbelastete Personen und Wohnungen ...	102
X.	Anteil Elektromobilität: Abschätzung Einfluss auf Lärmwirkung	104
XI.	Energieverbrauch und Reifenabrieb.....	105
	XI.a. Energieverbrauch.....	107
	XI.b. Reifenabrieb.....	108
XII.	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen S1 – S4 für THG und nePE.....	110
XIII.	Modellannahmen LCA Life Cycle Assessment.....	112
XIV.	Modellannahmen LCC Life Cycle Costing.....	118
XV.	Datentabellen der Resultate	123
	XV.a. Wirkungskategorie Umweltbelastungspunkte	124
	XV.b. Wirkungskategorie Treibhausgas-Emissionen.....	125
	XV.c. Wirkungskategorie nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf.....	126
	XV.d. Interne und externe Lebenszykluskosten.....	127

1. Ausgangslage, Fragestellung und Projekt

1.1. Ausgangslage und Fragestellung

Ausgangslage

Studien zeigen, dass Strassenlärm nach wie vor die dominierende Lärmquelle der Schweiz ist (Catillaz und Fischer 2018) und aufgrund des stetigen Bevölkerungszuwachses bis 2030 ein Zuwachs des Personenverkehrs um weitere 25% erwartet wird (Justen u. a. 2022). Als Lärmschutzmassnahme an der Quelle haben sich in der Schweiz lärmarme Strassenbeläge (LAB) etabliert, welche in Bezug auf Lärm einen klaren Vorteil gegenüber konventionellen Belägen aufweisen. Dank den Forschungsanstrengungen von Bund und Kantonen sowie der vielen praktischen Erfahrungen konnten die Asphaltrezepturen von LAB in den letzten Jahren deutlich verbessert werden. Nach wie vor bestehen jedoch - bedingt durch die kürzere Lebensdauer von LAB - potenziell auch Nachteile für deren Ökobilanz wie auch für deren Gesamtkosten. Jedoch wurden die Nutzungsauswirkungen wie Lärminderung, Rollwiderstand und Reifenabrieb bisher in Studien kaum berücksichtigt.

Fragestellung und Ziel

Daraus ergibt sich folgende Fragestellung: Wie verhalten sich LAB im Vergleich zu konventionellen Belägen hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen und Kosten über den gesamten Lebenszyklus, inkl. Berücksichtigung der Nutzungsphase?

Ziel der vorliegenden Studie ist eine vergleichende ökologische und wirtschaftliche Beurteilung von lärmarmen Strassenbelägen im Vergleich zu konventionellen Technologien aufgrund verfügbarer Daten zu erstellen.

Basierend auf einer umfassenden und möglichst vollständigen Abbildung aller Prozesse wurden die relevanten Kostenfaktoren und Umweltdimensionen ermittelt um anschliessend mittels einer Lebenszyklusbetrachtung Ergebnisse zu Kosten (Life Cycle Costing (LCC)) und Umweltaspekten (Ökobilanz / Life Cycle Assessment (LCA)) zu berechnen. Hierzu wurden existierende Methoden adaptiert und erweitert, um auch die Auswirkungen während der Nutzung der Strasse (z.B. Lärminderung, Auswirkungen des jeweiligen Rollwiderstands) berücksichtigen zu können.

Nutzen des Projekts

Dieses Projekt legt eine Grundlage für mehrere Aspekte der Beurteilung von Strassenbauprojekten, insbesondere für:

- die ökologische Beurteilung von Strassenbauwerken über deren gesamten Lebenszyklus und inklusive der relevanten Nutzungsaspekte Lärm, Rollwiderstand und Reifenabrieb,
- die Abwägung von Kosten und Nutzen der Lärmschutzmassnahme "LAB", unter Einbezug der damit verbundenen Umwelteinwirkungen,
- die Abschätzung der Bedeutung des Strassenbaus und -unterhaltes hinsichtlich der schweizerischen Umwelt- und Klimapolitik,
- die verbesserte gesamtheitliche Planung von Strasseninfrastrukturen, durch die erleichterte Berücksichtigung von sich gegenseitig beeinflussenden oder gar widersprechenden Faktoren (wie Lärmschutz, Investitions- und Unterhaltskosten),
- sowie eine langfristige gesamthafte Optimierung von Strassenbau und Erhaltungsmanagement, in Bezug auf sowohl wirtschaftliche wie auch ökologische Aspekte.

Fokus Zukunft

Die Studie soll, soweit heute möglich, die Situation in absehbarer Zukunft (10 bis 20 Jahre) abbilden. Dafür wurden sowohl der aktuelle Stand der Technik sowie absehbare technische Entwicklungen für die Untersuchung berücksichtigt. Die dafür nötigen Einschätzungen, Festlegungen und Parameter wurden in der Begleitkommission breit und praxisnah abgestimmt (siehe auch Kapitel 1.2).

Dieser Fokus auf die Zukunft soll sicherstellen, dass die Resultate möglichst lange für Entscheide als relevante Grundlage gelten können.

1.2. Projektorganisation

Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse

Die Erarbeitung der vorliegenden Studie benötigte Expertenwissen in den Bereichen Belagsakustik, Ökobilanzierung und Umweltprojektmanagement. Deshalb haben sich die drei Projektpartner (siehe Impressum, S.2) zur Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse zusammengeschlossen. Die Konzepte wurden gemeinsam entwickelt, und alle Projektpartner waren, wenn auch unterschiedlich intensiv, an sämtlichen Arbeitsschritten beteiligt.

Interesse seitens der Kantone

Die Lärmfachstellen der Kantone, welche verstärkt auf lärmarme Beläge zur Lärm-senkung an der Quelle setzen, erhalten vermehrt auch kritische Fragen von Amtslei-tungen und/oder Politik zu den ökologischen und finanziellen Folgen dieser Lärm-schutzmassnahme. Die Kantone als wichtigste Strassenbauer und -eigentümer sind daher an den Resultaten dieser Studie stark interessiert. Die Baupraxen von LAB un-terscheiden sich teils zwischen den Kantonen, sowohl in Belagstypus wie auch in den Rezepturen. Die Interessen und Baupraxen der Kantone wurden deshalb, soweit im Kostenrahmen der Studie möglich, möglichst repräsentativ berücksichtigt. Auch wurden bei der Erhebung von möglichst aktuellen und relevanten Daten einzelne Kantone direkt kontaktiert.

Einbezug weiterer BAFU-Stellen

Die vorliegende Studie weist Schnittstellen zu mehreren Sektionen des BAFU auf. Um deren Perspektiven und Wissen zu berücksichtigen, wurden die entsprechen- den Stellen BAFU-intern im Einzelaustausch mit der ArGe und in der Begleitkom- mission (siehe nachstehend) eingebunden.

Abstimmung über eine Begleitkommission

Um eine hohe Qualität der Studie zu gewährleisten, wurde für das Projekt eine Be- gleitkommission gebildet. Diese umfasst, nebst dem Kernteam des Projekts, reprä- sentativ die kantonale und nationale Strassenbaupraxis, und seitens BAFU die von der Studie betroffenen Sektionsvertreter. Die Mitglieder der Begleitkommission sind im Impressum, Seite 2, aufgeführt.

Die Begleitkommission war insbesondere zuständig für die:

- Abstimmung der betrachteten Szenarien und der Ausgangsparameter
- Auswahl der Sensitivitätsanalysen
- Input zur Berichterstattung

Objekt der Studie: Vier Belagstypen, ergänzt um Sensitivitätsanalysen

Eine Ökobilanz-Studie benötigt zur Berechnung konkrete Szenarien. Hierzu wurden drei lärmarme Belagstypen mit einem konventionellen Referenzbelagsszenario ver- glichen. Die vier Szenarien wurden so aufgesetzt, dass sie für die ganze Schweiz und für die nächsten 10 bis 20 Jahre relevante Resultate liefern.

Zusätzlich wurden fünf Sensitivitätsanalysen definiert, um durch Variation einzelner Parameter die Robustheit der Resultate zu prüfen und zudem Wissensgewinn über Varianten im Strassenbau oder künftige Entwicklungen zu erlangen.

Critical Review

Für öffentlich zugängliche, vergleichende Ökobilanzen verlangt die ISO-Norm 14040 einen externen "Critical Review" durch einen oder mehrere unabhängige Fachleute der Ökobilanzierung und/oder des Fachgebietes. Zur Sicherung von Qualität und Glaubwürdigkeit der Ökobilanz und im Hinblick auf die künftige Verwendung der gewonnenen Daten im LCA-Datensatz des UVEK hat das BAFU deshalb einen Critical Review über den Teil Ökobilanzierung dieser Studie durchführen lassen. Der Bericht des Critical Reviewers findet sich in Anhang VI.

1.3. Bestehende Studien

Eine wichtige Grundlage für die Bauprozesse bildeten die Resultate des Forschungsprojektes PLANET EP2 (Liechti u. a. 2016), mit der Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten. Die darin mittels Messungen erhobenen Schadstoffflüsse in der Bauphase konnten für die vorliegende Studie adaptiert und übernommen werden.

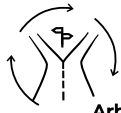
Der Einfluss der Verwendung von Rezyklat im Mischgut auf die Umweltwirkung, u.a. in UPB, wurde in (Kytzia und Pohl 2021) untersucht. Dies wurde in der vorliegenden Studie im Rahmen der Sensitivitätsanalyse S3 (siehe Kapitel 2.3) ebenfalls betrachtet, jedoch auf Basis der methodisch ähnlichen PLANET EP2 Studie (Liechti u. a. 2016).

Im Sommer 2023 publizierte (Lenk 2023) seine Masterarbeit an der BFH, welche die Ökobilanz von Gussasphalt mit derjenigen von SDA-Walzasphalt auf Nationalstrassen vergleicht. Die hier erhobenen detaillierten Daten zur SDA-Bauweise konnten aus zeitlichen Gründen nicht mehr in die vorliegende Studie einfließen.

Bei all diesen bestehenden Studien wird der Bau und Rückbau in der Lebenszyklusanalyse detailliert betrachtet, die Nutzungsphase jedoch nicht berücksichtigt.

Die Auswirkungen von Strassenlärm während der Nutzungsphase wurden erstmals in der Dissertation von Zhengyin Piao (Piao 2022) in eine Ökobilanz miteinbezogen. Einzelne Daten und Ansätze wurden aus dieser Arbeit hier verwendet. In folgenden Punkten unterscheiden sich die in (Piao, Heutschi, u. a. 2022) verfolgte Methodik und Grundlagen von dieser Studie:

- Die Quantifizierung der Lärmwirkung anhand der Wirkungskategorie «DALY» beschränkt sich auf die Gesundheitsschäden, beschreibt im Gegensatz zur hier verwendeten Wirkungskategorie «UBP» die Umwelteinwirkungen nicht vollständig.
 - Als Referenzbelag wurde von Piao et. al. ein SMA-Belag gesetzt, der im Vergleich zu dem in der vorliegenden Studie verwendeten ACMR 8 Belag höhere Lärmemissionen aufweist. Damit verbunden ist folglich dort ein höheres Potential zur Lärmreduktion mittels LAB.
- Auch unterscheidet sich die Datengrundlage für das akustische Alterungsmodell von dem hier verwendeten, messdatenbasierten Ansatz.



Umweltwirkungen der Nutzungsphase, welche über die Strassenlärmemissionen hinausgehen, und dabei vor allem der Treibstoffverbrauch, wurden bis dato noch nicht belagsspezifisch ausgewertet. Dies geschieht, zusammen mit den gesamten Auswirkungen von Strassenlärm (in UBP und Lebenszykluskosten), in dieser Arbeit erstmals.

2. Systembeschreibung

Hier werden zunächst die angenommene Ausgangslage und die vier Basisszenarien erläutert. Darauf aufbauend werden die Sensitivitätsanalysen beschrieben (in Kapitel 2.3).

Die Annahmen und Festlegungen sind für die Studie, ihre Resultate und die Schlussfolgerungen bestimmend. Sie wurden vom Projektteam entwickelt und in Absprache mit dem auftraggebenden BAFU und mit der Begleitkommission festgelegt. Detailfestlegungen wurden mit Fachleuten von Kantonen und Unternehmern getroffen. Die Systemgrenzen sind in Kapitel 2.4, die detaillierte Beschreibung der berücksichtigten Prozesse in Kapitel 2.5 zu finden. Beide sind in Abbildung 1 als Übersicht dargestellt. Die methodischen Grundlagen für die LCA (Ökobilanz) und LCC (Lebenszykluskosten) sind in Kapitel 2.6 und 2.7 beschrieben.

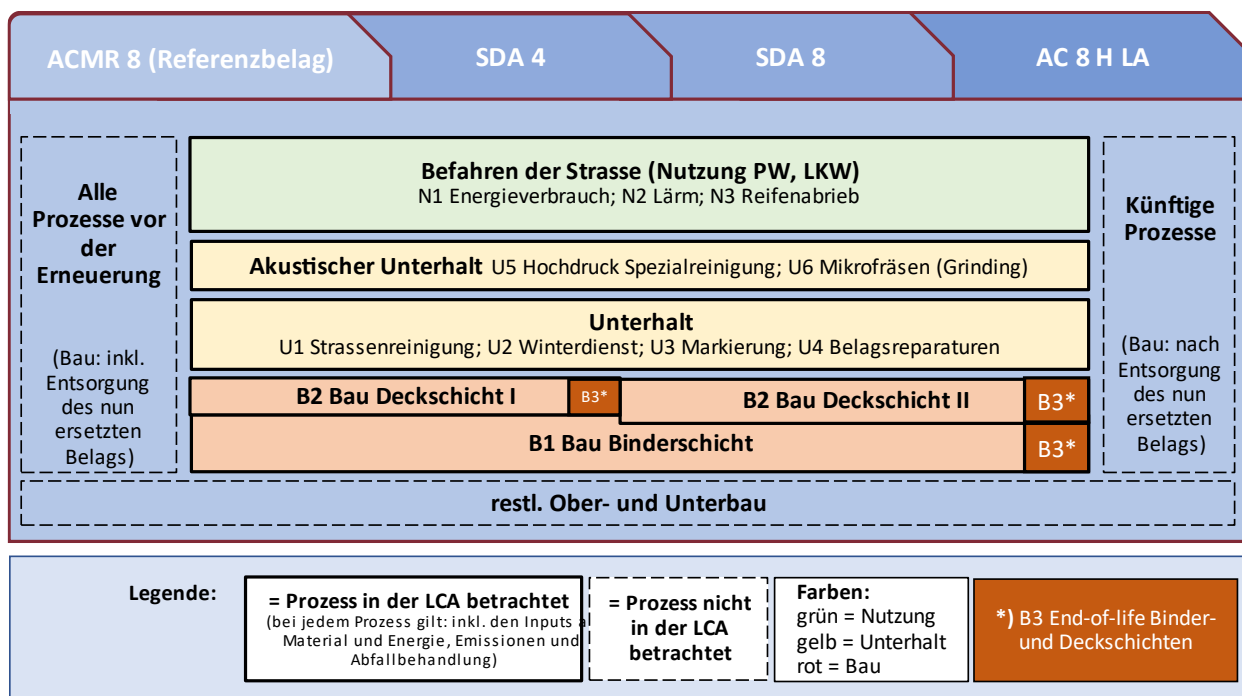


Abbildung 1: Modell der betrachteten Prozessgruppen und Abläufe, inkl. Systemabgrenzung. Gestrichelte Bereiche werden in der Analyse nicht betrachtet. Als «Karteikarten» dargestellt sind die vier betrachteten Szenarien mit jeweils abweichendem Deckbelag. (Unterhaltprozesse U5 und U6 der Sensitivitätsüberlegungen sind hier nicht dargestellt)

2.1. Strassensituation und Nutzung

In der Studie wird eine durchschnittliche, unspezifische Strassensituation einer Kantonsstrasse innerorts mit einer signalisierten Geschwindigkeit von 50 km/h betrachtet. Die Strecke ist flach, gerade und ohne Spezialsituationen wie Kreisverkehre oder Kreuzungen. Die Strasse hat eine Breite von 7 Metern, liegt in der Klimazone des Schweizer Mittellandes und ist für eine Verkehrslast von T4 bis T5¹ ausgelegt.

Die Nutzung wird mit 8'000 Fahrzeugen pro Tag bei einem Schwerverkehrsanteil von 6 % festgelegt. Die nach Antriebsart detaillierte Verkehrszusammensetzung ist in Tabelle 10 beschrieben. Die Besiedelung im Umfeld der Strasse entspricht dem Schweizer Durchschnitt entlang von Kantonsstrassen im Gebiet von Kerngemeinden (siehe auch Anhang IX).

Die Überlegungen und Ergebnisse dieser Studie gelten unabhängig vom Strasseneigentümer ebenso für eine Gemeindestrasse mit vergleichbarer Charakteristik wie oben beschrieben.

2.2. Betrachtete Belagstypen: Die vier Basisszenarien

In vier Basisszenarien werden vier verschiedene Belagstypen als mögliche Deckschichten miteinander verglichen. Diese Beläge können in der oben beschriebenen Ausgangslage zum Einsatz kommen.

Für abweichende Witterungs- und Nutzungsbedingungen, wie z.B. der Einsatz im Gebirge, wären hingegen nicht alle betrachteten Beläge gleichermassen geeignet. Solche je nach Bedingungen abweichende bautechnische Aspekte werden in der Studie nicht betrachtet.

Ein wichtiger Unterschied zwischen den betrachteten Belägen ist die erwartete Lebensdauer der Deckschichten. In allen Szenarien wird angenommen, dass bei jedem zweiten Deckschichtersatz auch die Binderschicht erneuert wird; somit variiert in den Szenarien auch die Lebensdauer der Binderschicht.

Als konventioneller, weit verbreiteter Belag wird für das Referenzszenario der Belagstyp ACMR 8 betrachtet. Dieser sogenannte Rauhasphalt (maximale Korngrösse: 8 mm) zeichnet sich durch seine hohe mechanische Stabilität aus. ACMR 8 Beläge können je nach Baujahr und angewandter Norm einen Hohlraumgehalt von 6 bis 12 % aufweisen; hier werden die ACMR 8 als Gesamtheit betrachtet. Die Lebensdauer wird mit 20 Jahren angenommen, mit einer akustischen Wirkung zu diesem Zeitpunkt von nahezu 0 Dezibel, bezogen auf das bis 2022 geltende Strassenlärmmodell StL-86+² (BUWAL 1987).

¹ Verkehrslastklassen nach VSS, T4 bis T5 entspricht dabei schwerer bis sehr schwerer Strassennutzung.

² Die akustische Wirkung bezieht sich auf das Strassenlärmmodell StL-86+, angegeben als Mischverkehrswert mit 8 % N2-Anteil. Im aktuell gültigen Strassenlärmmodell sonROAD18 sind die Beläge ACMR 8 und SDA 8-12 als Referenzbeläge angenommen.

Typische lärmarme Beläge (LAB) sind die in den beiden weiteren Basisszenarien gewählten Belagstypen SDA 4 und SDA 8. Diese semidichten Asphalte (SDA) werden seit über 10 Jahren in der Schweiz an über 1000 Standorten eingebaut und sind in der Schweiz etablierte lärmarme Strassenbeläge.

SDA 8 Beläge sind von der Bauweise her ähnlich wie ACMR 8 Beläge, weisen jedoch einen erhöhten Hohlraumgehalt von 12 bzw. 16 % auf. Sie wirken damit besonders in den ersten Jahren nach Einbau lärmmindernd. Die Lebensdauer, primär bestimmt durch die Dauer der akustischen Wirkung, wird mit 15 Jahren angenommen.

SDA 4 Beläge weisen ähnliche oder noch höhere Hohlraumgehalte (12, 16 bzw. 20 %) auf und haben zudem eine feinere Oberflächentextur als SDA 8 Beläge, da im Mischgut Kies mit Korngrössen von maximal 4 mm eingesetzt wird. SDA 4 Beläge haben besonders stark lärmmindernde Eigenschaften, von ca. - 6 Dezibel bei Neueinbau, bis ca. - 3 Dezibel am Ende der akustischen Lebensdauer, welche aktuell etwa 10 Jahre beträgt. SDA 4 Beläge werden sowohl entsprechend Norm (VSS 40 436 2022) hergestellt, in der Westschweiz aber auch nach eigener Rezepturen der Hersteller, den sogenannten «Firmenlösungen». In beiden Fällen ist die erreichte Lärminderung ein entscheidendes Qualitätskriterium.

Als viertes Basisszenario wird die im Kanton Zürich ebenfalls als LAB eingesetzte Variante eines konventionellen AC 8 Belages untersucht: AC 8 H LA. Dieser Betonasphalt (asphalt concrete, AC) weist keine akustisch wirksamen Hohlräume auf, jedoch eine feine Oberflächentextur, und es wird wie beim ACMR 8 Belag mit einer Lebensdauer von 20 Jahren gerechnet. Bei den hier als AC 8 H LA bezeichneten Belägen handelt es sich um AC-Beläge mit 8 mm Grösstkorn, welche für besondere Beanspruchung («H») ausgelegt sind und vom Kanton Zürich für den Einsatz als LAB empfohlen werden (Stand 2022: Mischgut mit Bindemitteltypen PmB 45/80-80 oder PmB 65/105-60; PmB: Polymer-modifiziertes Bitumen). Die Datengrundlage für diese Belagsuntertypen ist, Stand 2022, bzgl. Akustik und Rollwiderstand im Vergleich zu den anderen untersuchten Belagstypen kleiner.

Die mit jedem Basisszenario verbundenen, spezifischen Prozess-Eigenschaften sind in Kapitel 2.5 beschrieben. Anhang VII und Anhang VIII zeigen die für die Belagstypen angenommen Mischgut-Rezepturen und die Alterungsmodelle ihrer akustischen Wirkung über die Zeit. In Anhang XI wird der Energieverbrauch und Reifenabrieb in Abhängigkeit des Belagstyps abgeschätzt. Ein Überblick der angenommenen Lebensdauern ist in Tabelle 2 ersichtlich.

Um den starken Einfluss der festgelegten Parameter Lebensdauer und akustische Wirkung noch weiter einordnen zu können, untersuchen zudem zwei der fünf Sensitivitätsanalysen (beschrieben im unten folgenden Kapitel 2.3) die Auswirkungen einer verlängerten Lebensdauer beim ACMR 8 Belag bzw. eines akustischen Unterhalts von SDA-Belägen (Lebensdauer und/oder akustische Langzeitwirkung optimiert).

Im städtischen Umfeld besteht zudem häufig ein Unterschied zwischen technischer und faktischer Lebensdauer: da hier Strassenoberflächen öfters abgetragen und neu erstellt werden müssen, z.B. wegen Leitungsbau, kann die Lebensdauer eines Belages in der Praxis geringer sein. Dieser Aspekt wurde hier nicht weiterverfolgt.

2.3. Variation der Szenarien (Sensitivitätsanalysen)

Die vier Basisszenarien basieren auf klar definierten Prozessen und Parametern. Um mögliche Varianten im Praxiseinsatz bzw. absehbare künftige Entwicklungen abzubilden, wurden ergänzend fünf Sensitivitätsanalysen (S1 bis S5) untersucht, in denen einzelne Parameter für einen Belag oder für mehrere Beläge variiert sind. Dies führt insgesamt zu weiteren 12 Szenarien auf Grundlage der vier Basisszenarien. Die Sensitivitätsanalysen erlauben auch, den Einfluss einzelner Parameter auf die Ergebnisse der Ökobilanz zu quantifizieren.

Tabelle 1 gibt einen Überblick der fünf Sensitivitätsanalysen und der darin betrachteten Prozesse (vgl. Kapitel 2.5) und Beläge (vgl. Kapitel 2.2). Prozesse und Beläge, die in den Sensitivitätsanalysen nicht erwähnt sind, bleiben gegenüber den Basisszenarien unverändert. Nach der Tabelle werden die Sensitivitätsanalysen näher beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht der Sensitivitätsanalysen S1 bis S5 und die dadurch betroffenen Prozesse und Beläge.

Nr.	Beschreibung	Betr. Prozesse ³	Betr. Beläge
S1	Verlängerte Lebensdauer ACMR 8		
	Die Lebensdauer der ACMR 8 Deckschicht wird mit 25 Jahren (statt 20) angenommen. Entsprechend wird die Binderschicht nach 50 (statt 40) Jahren ersetzt.	B1 B2 B3	ACMR 8
S2	Akustischer Unterhalt auf SDA-Belägen		
	Akustischer Unterhalt auf SDA-Belägen: - SDA 4 Belag: viermal jährlich Hochdruckreinigung (Prozess U5). - SDA 4 und SDA 8 Beläge: einmal jährlich Grinding auf 10 % der Beläge (Prozess U6) Angenommene Wirkung: - SDA 4 Belag: verlängerte Lebensdauer von 12,5 Jahren (Binderschicht 25 Jahre), mittlere akustische Wirkung um 0,1 dB reduziert. - SDA 8 Belag: Lebensdauer unverändert, mittlere akustische Wirkung um 0,3 dB verbessert.	B1 B2 B3 U5 U6 N2	SDA 4 SDA 8

³ Bx = Bauprozesse, Nx = Nutzung, Ux = Unterhalt; vgl. für Prozesse und Abkürzungen auch Kapitel 2.5 und das Glossar in Anhang I

Nr.	Beschreibung	Betr. Prozesse ³	Betr. Beläge
S3	Erhöhter Rezyklat-Anteil im Mischgut		
	Rezyklat-Anteil: <ul style="list-style-type: none"> - Binderschichten aller Beläge: 60% (statt 40%) - Deckschichten ACMR 8, SDA 4 und SDA 8: 20% (statt 0%) - Deckschicht AC 8 H LA: 30% (statt 0%) 	B1 B2	ACMR 8 SDA 4 SDA 8 AC 8 H LA
S4	Optimierter Rollwiderstand auf SDA 4		
	Rollwiderstand auf SDA 4 Belägen entsprechend den Messergebnissen aus (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021) für den SDA 4 Belagsuntertyp mit den tiefsten Rollwiderstandswerten.	N1	SDA 4
S5	Erhöhter Bestand an Elektro-PW		
	Elektro-PW Bestand: 50 % (statt 3 %)	N1	ACMR 8 SDA 4 SDA 8 AC 8 H LA

S1: verlängerte Lebensdauer ACMR 8

Eine verlängerte Lebensdauer der Deckschicht schont die Ressourcen im Strassenbau. Im Gegensatz zum Basisszenario wird die Lebensdauer der ACMR 8 Deckschicht auf 25 Jahre (statt 20 Jahre) angenommen, die Binderschicht wird somit erst nach 50 Jahren ersetzt.

Die mittlere akustische Wirkung wird dabei als über die verlängerte Lebensdauer im Mittel gleichbleibend angenommen. Auch für die jährlichen Unterhaltskosten wird mit jährlich gleichbleibenden Kosten gerechnet.

S2: akustischer Unterhalt auf SDA-Belägen

Ein Alterungsprozess lärmarmen SDA-Beläge ist das Verstopfen der akustisch wirksamen Poren im Belag. Um dem vorzubeugen bzw. dies wieder rückgängig zu machen wird von manchen Kantonen ein sogenannter akustischer Unterhalt praktiziert, vgl. z.B.: (Schlatter u. a. 2021; Schlatter, Delaby, und Collaud 2023). In der Sensitivitätsanalyse wird angenommen, dass SDA 4 Beläge vier Mal jährlich mittels Hochdruckreinigung (Prozess U5, siehe Kap. 2.5.8) behandelt werden. Zudem werden 10 % («Problemstrecken») der SDA 4- und SDA 8 Beläge mittels Grinding bzw. sog. Mikrofräsen oder Mikroschleifen (Prozess U6, Kap. 2.5.9) behandelt.

Angenommen wird, dass dieser erhöhte Unterhalt zu einer reduzierten akustischen Alterung führt. Details hierzu sind in Anhang VIII beschrieben und in Tabelle 4 gezeigt. Mit dem Grinding von 10 % der Strecken wurde ein defensives

Reinigungsszenario modelliert. Die akustische Langzeitwirkung des Grindings wurde basierend auf dem aktuellen, in Pilotprojekten entwickelten Wissensstand abgeschätzt.

Für den SDA 4 Belag wird in diesem Szenario eine verlängerte Lebensdauer von 12.5 Jahren (Binderschicht 25 Jahre) angenommen, bei einer durchschnittlich sehr ähnlichen akustischen Wirkung (- 4.1 dB, statt - 4.0 dB im Basisszenario SDA 4).

Für den SDA 8 Belag wird angenommen, die Lebensdauer bleibe gegenüber dem Basisszenario gleich, jedoch verbessere sich die durchschnittliche akustische Wirkung um - 0.3 dB.

S3: erhöhter Rezyklat-Anteil in Mischgut

Im Sinne von Ressourcenschutz und Kreislaufwirtschaft werden auch im Strassenbau steigende Recyclingquoten angestrebt. Auch wenn dies technisch derzeit erst bedingt möglich ist und die Mischgut-Normen dies noch nicht vorsehen, werden in dieser Sensitivitätsanalyse Deck- und Binderschichten mit erhöhtem Rezyklat-Anteil modelliert. Dabei wird angenommen, die heutige Qualität bleibe gewährleistet.

Für die Binderschicht aller Beläge werden 60 % (statt 40 %) Rezyklatanteil (RAP) im Mischgut verwendet.

Für die Deckschichten ACMR 8, SDA 4 und SDA 8 mit hohen Anforderungen an die Siebkurven des Mischgutes wird ein Anteil von 20 % RAP im Mischgut angenommen. Für die Deckschicht AC 8 H LA wird ein Anteil von 30 % RAP im Mischgut angenommen (jeweils statt 0 %).

Siehe auch Anhang VII für die Mischgutrezepturen.

S4: SDA 4 mit optimiertem Rollwiderstand

Messungen zum Rollwiderstand zeigen, dass die bereits rollwiderstandsarmen SDA 4 Beläge das Potential zu noch tieferen Rollwiderstandswerten haben (Schlat-ter, Bühlmann, und Schindler 2021) und dabei mindestens ebenso lärmmindernd wirken. In dieser Sensitivitätsanalyse wurden anhand der Rollwiderstandswerte solcher optimierter Rezepturen die möglichen Einsparungen im Treibstoffverbrauch dargestellt. Dabei werden keine Änderungen in der Lärmwirkung und dem Reifenabrieb gegenüber dem Basisszenario SDA 4 berücksichtigt.

Siehe auch Anhang XI für die Rollwiderstandswerte und Verbrauchsschätzung.

S5: Zukunftsszenario erhöhter Anteil Elektro-PW

Der Bestand an elektrisch betriebenen Fahrzeugen liegt im Jahr 2023 noch unter 3%, steigt aber stetig an. Um ein entsprechendes Zukunftsszenario abzubilden, wurde mit einem Elektro-PW Anteil von 50 % gerechnet. Die Sensitivitätsanalyse

rechnet mit dem daraus entstehenden Treibstoff- und Energieverbrauch, bei ansonsten unveränderten Prozessen und Annahmen. Die Verkehrszusammensetzung zeigt Tabelle 10.

Bei Tempo 50 muss aus dem Szenario kein Einfluss auf die Lärmemissionen berücksichtigt werden, da der Lärm hauptsächlich von der Interaktion Pneu/Strasse kommt (vgl. Kapitel 2.5.11 und Anhang X).

2.4. Systemgrenzen und funktionale Einheit

Abbildung 1 zeigt die Übersicht aller betrachteten Prozesse («Prozessmodell») für die vier Basisszenarien (Kapitel 2.2) und die darin betrachteten Prozesse (Kapitel 2.5), eingebettet in die folgenden Systemgrenzen:

- Bau und Rückbau: Teil des betrachteten Systems sind der Bau und der Rückbau von einer Binderschicht und zwei Deckschichten (Prozesse B1 bis B3). Die Studie geht davon aus, dass jeder Belag auf einer bestehenden Strasse gebaut wird. Der Rückbau der vorherigen Beläge wird nicht betrachtet, sondern gehört methodisch zum vorher verbauten Belagssystem (und ist zudem in jedem Szenario identisch), während entsprechend der Rückbau der hier betrachteten Beläge (B3) vollständig mitbetrachtet wird, was sowohl Entsorgung wie Recycling des ausgebauten Belages beinhaltet.

Material, welches vom Prozess B3 ins Recycling geht, wird «ökologisch abgeschrieben» in den Recyclingprozess übergeben. Rezyklat trägt so einzig die Belastungen, welche bei Aufbereitung und Transporten entstehen. (In Ökobilanz-Terminologie wird für Recycling «Cut-off» angewandt.)

Der restliche Oberbau (Tragschicht) und Unterbau der Strasse liegt ausserhalb des betrachteten Systems, da dieser einerseits weitgehend unabhängig vom Belagsszenario ist, und da andererseits kaum mehr komplett neue Kantonsstrassen erstellt werden.

- Unterhalt: Die Prozesse U1 bis U4 beschreiben den Strassenunterhalt über die gesamte Lebensdauer der Strasse, für Strassenreinigung, Winterdienst, Markierungen und Belagsreparaturen.

Für die Szenarien SDA 4 und SDA 8 wird in Sensitivitätsanalyse S2 zudem der akustische Unterhalt durch Hochdruckreinigung und Grinding mit den Prozessen U5 und U6 berücksichtigt.

- Nutzung: Betrachtet werden das Befahren der Strasse über deren Lebensdauer und die damit verbundenen Auswirkungen, welche vom Belag über den Rollwiderstand ausgelöst resp. beeinflusst werden. Dies umfasst den Strom- und den Treibstoffverbrauch (Bereitstellung sowie die Emissionen beim Fahren), den Reifenabrieb sowie den Lärm (Prozesse N1 bis N3).
- In der Studie mit enthalten sind zu all diesen Prozessen deren vor- und nachgelagerte Prozesse. So, als Beispiel, für jeden Bauprozess über den

eigentlichen Bauprozess hinaus auch die Bereitstellung der eingesetzten Materialien und Maschinen, inklusive deren Unterhalt und Entsorgung. Für die Nutzung der Strasse durch PW und LKW wurde nebst den direkten Emissionen der Fahrzeuge bei ihrem Treibstoffverbrauch auch die Bereitstellung der Treibstoffe und des Stroms (für elektrische Fahrzeuge, inkl. ihrer Batterieherstellung) berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wurden hingegen Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der PW und LKW, da dies von den Belägen nicht beeinflusst wird, und in allen Szenarien auch identisch ist.

Alle Betrachtungen, Berechnungen und Ergebnisse werden in dieser Studie auf die funktionale Einheit von «1 km Strasse innerorts mit 7 m Breite, betrachtet über ein Jahr» (in der Folge kurz «1 km*Jahr»), mit der Strassensituation und Nutzung wie in Kapitel 2.1 beschrieben, bezogen.

Alle Prozessdaten werden auf diese Einheit umgerechnet, so dass die Resultate der Szenarien jeweils «pro Jahr und Strassenkilometer» entstehen. Auch die Interpretation bezieht sich auf diese Grösse. Die zeitliche Normierung auf ein Jahr erlaubt, die Resultate unabhängig von den unterschiedlichen Lebensdauern der Beläge zu vergleichen.

Die funktionale Einheit umfasst also eine Strassenfläche von 7000 Quadratmetern (1 km * 7 m), deren Bau (anteilmässig pro Jahr), die ein Jahr unterhalten wird, die von jährlich (8000 * 365 =) 2.92 Millionen Fahrzeug-Kilometern befahren wird, sowie deren Rückbau (anteilmässig pro Jahr).

2.5. Prozesse

Die im LCA- und LCC-Modell betrachteten Prozesse werden nachfolgend beschrieben und lassen sich, wie in Abbildung 1 dargestellt, in drei Gruppen gliedern:

- Bau und Rückbau der Strasse durch den Strasseneigentümer (Kürzel «B», Prozesse B1 bis B3)
- Unterhalt der Strasse durch den Strasseneigentümer (Kürzel «U», Prozesse U1 bis U6) während der gesamten Lebensdauer
- Nutzung der Strasse durch die Strassennutzer (Kürzel «N», Prozesse N1 bis N3) während der gesamten Lebensdauer

In den Anhängen XIII und XIV finden sich ergänzend zu den folgenden Prozessbeschreibungen die detaillierten Annahmen für die Modellierungen. Die spezifischen Eigenschaften der Prozesse, wie z.B. Lebensdauer der Beläge, oder die Anzahl von Reinigungseinsätzen, wurden auf Vorschlag des Projektteams in der Begleitkommission festgelegt. Technische Details, wie z.B. der Treibstoffverbrauch und der Zeitaufwand zur Strassenreinigung, wurden mittels Literaturrecherchen und Experten-Befragungen festgelegt.

2.5.1. Bau Binderschicht: B1

Die Binderschicht ist eine Zwischenschicht über der Tragschicht und unter der Deckschicht, der Fahrbahnoberfläche. Der Bau der Binderschicht wird berücksichtigt, da die Binderschicht in der Regel bei jedem zweiten Deckschicht-Ersatz mit erneuert werden muss und ihre Lebensdauer daher von derjenigen der Deckschicht abhängt.

Der Prozess B1 berücksichtigt die Herstellung des Mischguts für die Binderschicht im Mischwerk (inkl. Anlieferung und Rohstoffe), den Transport zur Baustelle und den Einbau auf der Baustelle. Während die Mischgut-, Transport- und Einbaumengen je Szenario variieren, ist die Rezeptur und Bauweise für das Mischgut für alle Szenarien gleich. Hierfür wurde der Typ «AC B 22 S» mit einem Recyclinganteil von 40 %⁴ und einer Schichtdicke von 8 cm angenommen. Details zur Rezeptur finden sich in Anhang V.

Die Schadstoff-Emissionen aus der Produktion im Mischwerk, dem Transport und dem Einbau wurden gemäss den Messwerten aus (Liechti u. a. 2016), skaliert auf den effektiven Bitumenanteil, berücksichtigt.

2.5.2. Bau Deckschicht: B2

Die Deckschicht ist der oberste Teil des Belags. Er steht im Kontakt mit den Fahrzeugen und beeinflusst damit die Lärmemissionen und weiteren Nutzungsparameter.

Der Bau der Deckschicht wird im Prozessmodell zweimal berücksichtigt – ein Neueinbau inkl. Binderschicht (B1), und jeweils nach der Lebenszeit der ersten Deckschicht ein Deckschichtersatz. Beim Neueinbau wird eine Deckschichtdicke von 3 cm festgelegt, beim Deckschichtersatz eine solche von 3.5 cm, da beim Rückbau der ersten Deckschicht (B3) auch ein kleiner Teil Binderschicht mit abgetragen wird.

Der Prozess B2 berücksichtigt die Herstellung des Mischguts für die Deckschichten im Mischwerk (inkl. Anlieferung und Rohstoffe), den Transport zur Baustelle und den Einbau auf der Baustelle. Für jeden Belag variieren (bezogen auf ein Belagsjahr) die Mischgut-, Transport- und Einbaumengen entsprechend der jeweiligen Lebensdauer und Dichte. Auch ist die Rezeptur für jeden Belag (ACMR 8, SDA 4, SDA 8, AC 8 H LA) spezifisch modelliert; dies ist in Anhang V dokumentiert. Das Mischgut wird aus Neumaterial hergestellt. Wie bei Prozess B1 sind die Schadstoffemissionen aus dem Mischgut während Herstellung, Transport und Einbau berücksichtigt.

Für beide Prozesse B1 und B2 wird in der Sensitivitätsanalyse 3 (vgl. Kapitel 2.3) untersucht, wie sich ein erhöhter Anteil an RAP im Mischgut auf die Ökobilanz und die Lebenszykluskosten auswirkt.

⁴ Dies entspricht dem durchschnittlichem Anteil RAP in Binderschichten der letzten 20 Jahre im Kanton Zürich

Polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Im vorliegenden Bericht ist die rechtliche Situation ab 2028 nach (SR 814.600 2015) berücksichtigt, welche die Grenzwerte für PAK in Deckschichten auf unter 250 ppm vorschreibt. In der Praxis bedeutet dies eine Reduktion der PAK-Werte von bisher teilweise über 10'000 mg/kg auf unter 250 mg/kg Mischgut. Die entsprechend (Liechti u. a. 2016) berücksichtigten Emissionen in den Prozessen B1 und B2 können daher als worst-case Szenario betrachtet werden. Liechti u. a. (2016) weisen auch PAK-Emissionen während der Nutzungsphase («Leaching») aus⁵. Diese künftig möglicherweise verbleibenden Emissionen wurden in einem ersten Schritt berechnet und zeigten nur eine marginale Bedeutung für die Ökobilanz. Daher wird das PAK-Leaching hier nicht berücksichtigt.

2.5.3. End-of-life: Rückbau, Recycling und Entsorgung: B3

Die Deckschicht, bzw. die erneuerte Deckschicht mit Binderschicht werden jeweils nach Erreichen der Lebensdauer der Deckschicht in einem Arbeitsgang ausgefräst, abtransportiert und anschliessend teilweise deponiert und teilweise für den Einsatz als RAP zwischengelagert (Annahme: je 50 %). In dieser Ökobilanz werden (im Sinne eines «Cut-off»-Ansatzes) dem RAP keine Belastungen aus den Vorphasen, sondern einzig die (kleinräumigen) Transporte zur Wiederaufbereitung angerechnet.

Tabelle 2: Angenommene Lebensdauer der Deck- und Binderschicht für die vier Basis-Szenarien, sowie die Sensitivitätsanalysen S1 und S2 mit verlängerter Lebensdauer.

Szenario	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	S1: ACMR 8	S2: SDA 4
Lebensdauer Deckschicht (Jahre)	20	10	15	20	25	12.5
Lebensdauer Binderschicht (Jahre)	40	20	30	40	50	25

Die Lebensdauer der verschiedenen Deckschichten, wie in Tabelle 2 gezeigt, ist ein wichtiger Parameter der Ökobilanz. Daher wird eine Variation der Lebensdauer in den Sensitivitätsanalysen S1 und S2 betrachtet (vgl. Kapitel 2.3). Die Lebensdauer der akustisch dichten, konventionellen Beläge ACMR 8 und AC 8 ist mit 20 Jahren (bzw. 40 Jahren für die Binderschicht) deutlich länger angenommen als für die semidichten Beläge SDA 4 (10 Jahre) und SDA 8 (15 Jahre). Für die SDA ist besonders die akustische Lebensdauer relevant, also wie lange eine Lärmwirkung von mindestens - 3 dB bzw. - 1 dB gegeben ist. Wie erwähnt wird hier nicht berücksichtigt, dass

⁵ PAK-Emissionen durch Leaching aus dem Asphalt während der Nutzungsphase wurden in (Liechti u. a. 2016) indirekt anhand von Laborversuchen und im Sinne von worst-case Szenarien abgeschätzt. Sie wurden also, im Gegensatz zu den PAK-Emissionen während Transport und Einbau des Mischgutes, nicht direkt gemessen.

im städtischen Raum wegen Infrastrukturarbeiten die effektive Lebensdauer tendenziell unabhängig vom Belagstyp kürzer sein kann.

2.5.4. Strassenreinigung: U1

Zur konventionellen Strassenreinigung wird die Strasse mit einer grossen Wischmaschine (LKW-Chassis mit entsprechenden Aufbauten) mit Bürsten, Wasser und Absaugvorrichtung zehn Mal jährlich von Staub, Dreck und Laub gereinigt und der anfallende Abfall entsorgt. Alle Belagstypen werden gleich gereinigt.

2.5.5. Winterdienst: U2

Bei Schnee und/oder Eisglätte wird die Strasse entweder kombiniert gepflügt und gesalzen oder nur gesalzen. Zum Einsatz kommen vergleichbare Fahrzeuge wie bei der Strassenreinigung (Prozess U1). Gemäss Daten aus 2021/22 für die Klimazone Berner Mittelland wurden 40 Winterdiensteinsätze auf den dichten Belägen ACMR 8 und AC 8 H LA eingerechnet. Für die Beläge SDA 4 und SDA 8 wurden 10 % mehr Einsätze (44) eingerechnet, da diese wegen der offeneren Bauweise etwas rascher überfrieren.

2.5.6. Strassenmarkierung: U3

Berechnet ist für alle Beläge eine gleichartige, herkömmliche Farb-Markierung mit Mittelstreifen und zwei Seitenstreifen, mit einem Erneuerungszyklus von vier Jahren.

2.5.7. Belagsreparaturen: U4

Mit Belagsreparaturen, bzw. dem «kleinen baulichen Unterhalt», werden Arbeiten zum Verfüllen von Rissen oder Schlaglöchern berücksichtigt. Bei den LAB muss hierbei meist sorgfältiger und grossflächiger gearbeitet werden, um die akustische Wirkung nicht zu beeinträchtigen. Andererseits sind LAB aufgrund der kürzeren Lebensdauer generell jünger und benötigen deshalb eher weniger Reparaturen. Darüber hinaus sind die finanziellen Aufwände für Belagsreparaturen hauptsächlich durch belagsunabhängige Faktoren bestimmt.

Für die Berechnung des Prozesses in der LCA werden die Kosten für Reparaturen für alle Szenarien gleich hoch angenommen. Diese Kosten werden relativ zu den Baukosten der jeweiligen Deckschicht, als entsprechender Anteil des Prozesses B2 (Bau Deckschicht) in der jeweiligen Umweltwirkung eingerechnet. Die Aufwände und Umweltauswirkungen von Prozess U4 ergeben sich somit aus den Aufwänden und Umweltauswirkungen von Prozess B2, skaliert mit dem Kostenverhältnis von U4 zu B2.

2.5.8. Hochdruckreinigung: U5 (akustischer Unterhalt)

Dieser Prozess U5 wird nur in der Sensitivitätsanalyse 2 berücksichtigt. Um die akustische Wirkung von SDA 4 Belägen zu erhalten und dadurch die akustische

Lebensdauer zu verlängern, können die akustisch wirksamen Poren des Belags mittels Hochdruckreinigung offen gehalten werden (Grolimund + Partner AG 2020; Schlatter u. a. 2021; Schlatter, Delaby, und Collaud 2023).

Zur Hochdruckreinigung wird ein Spezialgerät (leistungsmässiger Typ vergleichbar mit Prozessen U1 und U2) eingesetzt, welches Wasser mit Hochdruck auf die Fahrbahn spritzt und wieder einsaugt. Der anfallende Abfall und das Abwasser werden entsorgt. Dieser Prozess kommt präventiv viermal jährlich zur Anwendung.

2.5.9. Grinding: U6 (akustischer Unterhalt)

Wie Prozess U5 wird auch Prozess U6 nur in der Sensitivitätsanalyse 2 berücksichtigt, allerdings auf beiden SDA-Belägen. Beim Grinding (oder Mikrofräsen bzw. Mikroschleifen) werden wenige Millimeter der Deckschicht abgeschliffen, um die Oberflächentextur zu verbessern.

Beim Grinding wird mit einem Spezialgerät (Leistungstyp vergleichbar mit Prozessen U1 und U2) mit Schleifköpfen die Deckschicht abgeschliffen. Der Abfall wird aufgenommen und entsorgt. Auf die Grinding-Maschine folgt ein Fahrzeug zur Hochdruckreinigung, um die freigelegten Poren zu säubern. Hier wird angenommen, dieser Prozess finde jährlich auf 10 % der SDA-Strecken statt; Grinding werde also nicht flächendeckend, sondern situativ bzw. kurativ angewandt.

2.5.10. Nutzung - Energieverbrauch: N1

Über die gesamte Lebensdauer hinweg wird die Strasse genutzt, d.h. mit Fahrzeugen befahren. Die dabei vom Energieverbrauch entstehende Umweltbelastung wird im Prozess N1 abgebildet. Die Gesamtkilometer werden auf Basis einer Verkehrsmenge von 8'000 Fahrzeugen pro Tag mit einem Schwerverkehrsanteil von 6 % berücksichtigt. Dabei wird in vier Fahrzeugklassen nach Antriebsart unterschieden: «PW Benzin», «PW Diesel», «PW Elektro» und «LKW Diesel» (detaillierte Zusammensetzung siehe Tabelle 10).

Der Prozess umfasst für den Treibstoffverbrauch (Benzin und Diesel), die Emissionen aus dessen Verbrennung im Fahrzeug, sowie die Bereitstellung der Treibstoffe, vom Bohrloch über die Raffinerie bis zum Fahrzeug. Bei elektrischen Fahrzeugen umfasst der Prozess den Stromverbrauch und hierfür die Strombereitstellung gemäss schweizerischem Stromnetz, sowie die Herstellung und Entsorgung der Batterie, da diese technisch und ökologisch ein wichtiger Teil der Energiebereitstellung ist.

Wie in Messungen gezeigt, weisen die vier Belagstypen unterschiedliche Rollwiderstandswerte auf (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021). Neben dem Luftwiderstand, Beschleunigungskräften und Wirkungsgradverlusten wird auch zur Überwindung des Rollwiderstandes Energie aufgewendet. Reduzierter Rollwiderstand senkt somit anteilmässig den Treibstoff- bzw. Energieverbrauch. Wie in Anhang XI gezeigt wurde für die vier Fahrzeugkategorien anhand des jeweiligen Leergewichts

und des Motor-Wirkungsgrads der Energiebedarf in Abhängigkeit vom Strassenbelag berechnet.

Tabelle 3 zeigt die so ermittelten Verbrauchsänderungen gegenüber dem Referenzwert für die vier Basisszenarien und die Sensitivitätsanalyse 4. Als Referenzwert wurden beim Rollwiderstand konventionelle Beläge gesetzt, bei den Verbrauchswerten die Werte aus (UVEK:2023).

Tabelle 3: Rollwiderstandsänderung in Abhängigkeit der Deckschicht und der entsprechend modellierte Änderung des Treibstoff- bzw. Energieverbrauchs in Abhängigkeit von Fahrzeug-Gewicht und Antriebsart. S4: Sensitivitätsanalyse 4 mit optimiertem Rollwiderstand auf SDA 4. «Ref.» als Rollwiderstands-Referenz ist dabei der durchschnittliche Rollwiderstand konventioneller Beläge.

Szenario	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	S4: SDA 4
Änderung Rollwiderstand gegenüber Ref.	- 0.4 %	- 10.9 %	- 3.6 %	0.9 %	- 18.9 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Benzin	- 0.1 %	- 3.3 %	- 1.1 %	0.3 %	- 5.8 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Diesel	- 0.1 %	- 2.5 %	- 0.8 %	0.2 %	- 4.3 %
Änderung Energieverbrauch gegenüber Ref.: PW Elektro	- 0.1 %	- 3.0 %	- 1.0 %	0.2 %	- 5.2 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: LKW Diesel	- 0.1 %	- 1.6 %	- 0.5 %	0.1 %	- 2.8 %

Es zeigt sich, dass SDA 4 Beläge im Durchschnitt um 10 % reduzierte Rollwiderstandswerte aufweisen, was für PW einen um ca. 3 % reduzierten Energiebedarf bedeutet.

Aufgrund des Potentials zur Energieeinsparung wurde in Sensitivitätsanalyse 4 untersucht, welchen Einfluss ein – gegenüber einem Norm-SDA 4 Belag – speziell auf tiefen Rollwiderstand optimierter SDA 4 Belag hat. Der hier um fast 19 % reduzierte Rollwiderstand basiert auf einer Messung von zwei SDA 4 Strecken mit einer SDA 4 Firmenlösung (siehe Anhang XI und (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021)).

Die Messdatengrundlage zum Rollwiderstand ist Stand 2022 allgemein noch gering, besonders für die Beläge SDA 8 und AC 8 H LA. Für die hier als AC 8 H LA bezeichneten Beläge bestehen noch keine Messwerte zum Rollwiderstand, weshalb die vorhandenen Messwerte verschiedener AC-Beläge als bestmögliche Aussage übernommen werden.

2.5.11. Nutzung - Strassenlärm: N2

Der während der Nutzung entstehende Strassenlärm ist der auslösende Fokus dieser Studie. Der Verkehrslärm⁶ wird neben Verkehrsmenge und -zusammensetzung auch deutlich durch den Strassenbelag beeinflusst. Die sogenannte akustische Wirkung eines Strassenbelags wird hier in Dezibel gegenüber dem Referenzwert im bis 2022 gebräuchlichen Strassenlärmmodell StL-86+ angegeben. Eine akustische Wirkung von beispielsweise - 3 dB bedeutet, dass der wahrgenommene Lärm einer halbierten Verkehrsmenge entspricht.

Die akustische Wirkung von Strassenbelägen wird seit vielen Jahren schweizweit unter anderem mit dem CPX-System ermittelt, einem Messanhänger zur Ermittlung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche (ISO 11819 2017; Grolimund + Partner AG 2020). Die akustische Wirkung eines Belags verändert sich über die Zeit und kann daher als Funktion seines Alters berücksichtigt werden. Auf Basis der umfangreichen CPX-Messdatenbank von Grolimund und Partner wurden mit geeigneten Stichproben die Alterungsmodelle für jeden Belagstyp bzw. zudem die Szenarien für die Sensitivitätsanalyse 2 (akustischer Unterhalt auf SDA-Belägen) berechnet. Details hierzu finden sich in Anhang VIII. Die so berechneten mittleren akustischen Wirkungen sind in Tabelle 4 gezeigt: bei einem LKW-Anteil von 6 % reichen diese von -0.7 dB bei ACMR 8 bis zu - 4.1 dB bei SDA 4, jeweils im Vergleich zum Referenzwert. Im Gegensatz zu etablierten Belägen, sind beim AC 8 H LA Stand 2022 noch keine langjährigen Messdatenreihen verfügbar. Als bestmögliche und bis dato konsistente Aussage wurden zur Prognose der akustischen Alterung daher Messdaten von AC 8 H Belägen aus dem Kanton Zürich beigezogen (siehe Anhang VIII.d).

Um die Lärmwirkung in der Ökobilanz abzubilden, wurde diese in eine entsprechenden Quellenreduktion (vgl. Tabelle 4) umgerechnet und linear als Fahrzeugkilometer-Äquivalente berücksichtigt.

Um die Lärmwirkung in den Lebenszyklus-Kosten abzubilden, wurde auf die in (VSS 41 828 2022) beschriebenen Lärmkosten zurückgegriffen. Diese umfassen Gesundheitskosten aufgrund übermässigen Lärmes, sowie Mietzinsverluste aufgrund lärmbelasteter Wohnungen. In der LCC wurden anhand der statistischen Verteilung von lärmbelasteten Personen und Wohnungen entlang Kantonsstrassen in Kerngemeinden (im Innerortsbereich) (Catillaz und Fischer 2018), die je nach Belagstyp resultierenden «Personen-Dezibel» und «Wohnungs-Dezibel» berechnet. Diese Grösse beschreibt jeweils die Anzahl an Personen bzw. Wohnungen über dem gesetzten Schwellwert⁷, skaliert mit dem Ausmass der Schwellwertüberschreitung, und ist für alle betrachteten Szenarien in Tabelle 4 gezeigt (vgl. hierzu auch die Beschreibungen in Anhang IX.).

⁶ Lärmemissionen von Strassenbaustellen werden in der Studie nicht berücksichtigt.

⁷ Schwellwert Lärmbelastung Personen: Lden grösser 48 dB(A)

Schwellwerte Lärmbelastung Wohnungen: Lr(Tag) grösser als 50 dB(A), Lr(Nacht) grösser als 40 dB(A)

Tabelle 4: Lärmwirkung gegenüber StL-86+ für die vier Basis-Szenarien und die Sensitivitätsanalyse S2 mit akustischem Unterhalt auf SDA-Belägen (Mischverkehrswert mit 6 % LKW-Anteil). Die akustische Wirkung kann als reduzierte Anzahl von Lärmquellen ausgedrückt werden («Quellenreduktion», verwendet in der LCA), was je nach Besiedelung die Anzahl lärmbelasteter Personen und Wohnungen beeinflusst (hier ausgedrückt in «Personen-Dezibel» und «Wohnungsdezibel», verwendet in der LCC).

Szenario	StL-86+(0)	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	S2: SDA 4	S2: SDA 8
Mittlere akustische Wirkung (dB)	0.0	- 0.7	- 4.1	- 1.3	- 1.0	- 4.0	- 1.6
Quellenreduktion (für LCA)	0 %	- 14 %	- 59 %	- 24 %	- 19 %	- 58 %	- 28 %
Personen-Dezibel (für LCC)	6610	6180	4360	5827	6002	4408	5713
Wohnungs-Dezibel (für LCC)	3090	2880	1879	2679	2773	1958	2638

Strassenlärm wird bei Geschwindigkeiten über ca. 25 km/h von den Reifen-Fahrbahn-Geräuschen dominiert. Aus diesem Grund wird in Sensitivitätsanalyse 5, mit erhöhtem Anteil von Elektro-PW, kein Einfluss des veränderten Antrieb-Mixes auf die Lärmwirkung angenommen. Dies wird bestätigt durch die Untersuchung des Effektes eines erhöhtem Elektro-PW-Anteils auf die Lärmemissionen mittels Strassenlärmmodell sonROAD18 (Heutschi und Locher 2018) (vgl. Anhang X). Wohl aber erlauben aktuelle Studien den Schluss, Elektromobilität könne in städtischen Stop-and-Go- oder Tempo 30 Situationen aufgrund der hier dominierenden Motorgeräusche zu einer Lärmreduktion beitragen (Schweizer u. a. 2023). Dies ist jedoch hier (mit fliessendem Verkehr) nicht bedeutsam, und im Weiteren auch besonders von der Strassensituation und dem Fahrverhalten abhängig, jedoch kaum vom Strassenbelag.

2.5.12. Nutzung - Reifenabrieb: N3

Auch der Reifenabrieb wird vom Strassenbelag beeinflusst. Die vom Pneu abgeriebenen Partikel werden als Mikroplastik bezeichnet, geraten in die Umwelt, und werden bei einer Auswertung in UBP in der LCA beurteilt. Da die Pneu-Abnutzung dessen Lebensdauer beeinflusst macht Reifenabrieb auch interne Kosten für die Fahrzeughalter. Externe Kosten von Pneuabrieb werden hier nicht ausgewiesen, da die (VSS 41 828 2022) keine entsprechenden Faktoren enthält. Dies führt tendenziell zu einer Unterschätzung der externen Gesamtkosten.

Wie in Anhang XI beschrieben wird die Änderung der Reifenabriebs-Menge als Funktion der mittleren Profiltiefe (MPD) der unterschiedlichen Deckschichten berechnet. Die für die MPD verwendeten Werte stammen aus denselben Stichproben und Messungen wie die Rollwiderstandswerte in (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021).

Tabelle 5: Änderung der mittleren Profiltiefe (MPD) und damit dem Reifenabrieb in Abhängigkeit des Strassenbelags für die vier Basis-Szenarien. «Ref.» als MPD-Referenz ist dabei die durchschnittliche MPD konventioneller Beläge.

Szenario	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
Änderung MPD gegenüber Ref.	5.7 %	- 22.0 %	3.0 %	- 20.5 %
Änderung Reifenabrieb gegenüber Ref.	0.9 %	- 3.6 %	0.5 %	- 3.3 %

Entsprechend den Werten in Tabelle 5 werden die Mikroplastikemissionen basierend auf der Inventarmenge gemäss (Steiner 2020) berechnet und in der Ökobilanz berücksichtigt, bzw. als Einflussgrösse für die internen Kosten verrechnet.

2.6. Grundlagen der LCA-Methodik

Eine Ökobilanz (LCA) bezweckt die ökologische Beurteilung von Produkten oder Dienstleistungen. Dazu werden soweit möglich und angezeigt alle Umwelteinwirkungen betrachtet und beurteilt, welche aus dem zu betrachtenden System entstehen. «Alle» Umwelteinwirkungen meint, dass die von einem Produkt oder einer Leistung aus der Umwelt bezogenen und an die Umwelt abgegebenen Einwirkungen möglichst vollständig und so korrekt wie möglich berücksichtigt werden. Hierzu gehört die Betrachtung über den gesamten Prozess-Strang, «von der Wiege bis zur Bahre» (also z.B. von der Kupfermine bis zur Deponie oder zum Recyclingwerk), die Berücksichtigung aller Aspekte, welche von der Auswahl des Produkts oder der Leistung spürbar beeinflusst werden (also z.B. inklusive der Nutzungsphase), und eine der Fragestellung angepasste Festlegung aller technischen Grössen, also z.B. die Verwendung von Strommodellen und Entsorgungsdaten, welche zum Anwendungsraum passen.

Um Resultate einer Ökobilanz sinnvoll zu interpretieren, werden die Resultate auf eine geeignete Funktion bezogen, welche zum Ziel der LCA passt: die «funktionale Einheit». So wäre es beispielsweise sinnlos, Ziegel und Holz «pro kg» oder ein Auto und ein Velo «pro Stück» zu vergleichen. Sinnvoll kann jedoch sein, je eine Wandkonstruktion auf Basis von Ziegeln resp. von Holz zu vergleichen – was dann nebst

Ziegel und Holz auch viel mehr Materialien umfasst –, und dies unter Berücksichtigung von Lebensdauer und Isolationswert.

In vorliegender Studie ist das Ziel, Strassenbeläge bezüglich ihrer Umweltwirkung zu vergleichen, wobei die Lärmwirkung mitbetrachtet werden soll (was in Ökobilanzen aus methodischen Gründen bisher oft nicht geschah).

Um eine funktionale Einheit über verschiedene Alternativen hinweg zu vergleichen – in dieser Studie über die verschiedenen Strassenbeläge –, muss das zu betrachtende System definiert werden: Dies umfasst alle Annahmen zur Systemabgrenzung – was wird betrachtet, was wird weggelassen –, und weitere wichtige Eckdaten. In dieser Studie sind dies die oben in Kapitel beschriebenen Festlegungen über die berücksichtigten Prozesse (Bx, Ux, Nx), die Lebensdauer der Beläge, die Nutzungsintensität (8000 Fahrzeuge täglich, mit 6 % LKW-Anteil), etc..

Auf Basis der Absicht des BAFU entstand die hier gewählte funktionale Einheit und die Abgrenzung der zu betrachtenden Prozesse. Eine noch realitätsnähere Betrachtung inklusive Kurven, Kreuzungen und Fussgängerstreifen hätte den Aufwand für die Studie stark erhöht, ohne dass dies einen stark gewachsenen Informationsgehalt hätte erwarten lassen. Bei einer Vereinfachung, z.B. ohne Betrachtung der Nutzungsphase, hätte die Studie hingegen nicht einmal mehr richtungssichere Resultate zum «Gesamtsystem Strasse» ergeben. Dass man am Ende einer Studie klüger ist als zuvor ist kein Fehler. So zeigte sich z.B., dass einzelne Unterhaltsprozesse in dieser Gesamtbetrachtung äusserst geringen Einfluss haben; dies kann bei Folgestudien dazu dienen, diese Prozesse möglicherweise zu vernachlässigen.

Obige Schritte entsprechen in den ISO-Normen 14040 und 14044 zur Ökobilanzierung der ersten Phase «Ziel und Systemabgrenzen festlegen» (ISO 14040 2014; ISO 14044 2014)⁸. Vorliegende Studie wurde anhand dieser ISO-Normen erstellt und umfasst die in nachstehender Abbildung 2 dargestellten vier Phasen.

In Phase 2 «Sachbilanz» (oder Life Cycle Inventory) werden für alle definierten Prozesse deren Mengengerüste erarbeitet («Wieviel Einsatzstunden des Strassenwischers werden für «1 km Strasse reinigen» benötigt – inkl. An- und Wegfahrt –, wie oft wird eine Strasse pro Jahr im Mittel gewischt, und wieviel Diesel verbraucht das Gerät pro Stunde?», etc.) und die Daten der daraus entstehenden Umwelteinwirkungen (Ressourcenverbräuche, Emissionen, Abfälle) beschafft.

Dabei wird zwischen Vordergrunddaten und Hintergrunddaten unterschieden: Vordergrunddaten sind Daten, welche für die Studie spezifisch erhoben werden. In der Regel sind es die Daten der Prozesse, welche nahe an der funktionalen Einheit geschehen. Hintergrunddaten sind Daten von Prozessen, welche entweder standardmässig beurteilt werden oder weiter weg liegen.

⁸ Die beiden ISO-Normen 14040 und 14044 beschreiben beide die Ökobilanzierung. Die Norm ISO 14044 ist detaillierter. In der Folge verweisen wir deshalb auf ISO 14044.

Beispiele für Vordergrunddaten der vorliegenden Studie sind z.B. diese erwähnten Wischerstunden und -verbräuche, die Lärmwirkungen der Beläge, und die vom Rollwiderstand induzierten Treibstoffverbrauchs-Änderungen. Die Daten zum Unterhalt sowie einzelne Baustellendaten wurden für diese Studie im Detail mit Baufachleuten zusammengestellt. Beispiele für Hintergrunddaten sind z.B. der Energieverbrauch und die Emissionswerte von Fahrzeugen, die Umweltdaten aus der Bereitstellung der Materialien und Energieträger, oder die Emissionen aus Entsorgungswerken. Als Quelle der Hintergrunddaten wurde für diese Ökobilanz die Inventardatenbank des Bundes (UVEK:2023) verwendet.

Zur Berechnung wurden für jeden Prozess die Inputs und Outputs in der Ökobilanz-Software openLCA V2.0.0 erfasst und die Prozesse so verknüpft, dass die Resultate für die funktionale Einheit von «1 km*Jahr» entstehen.

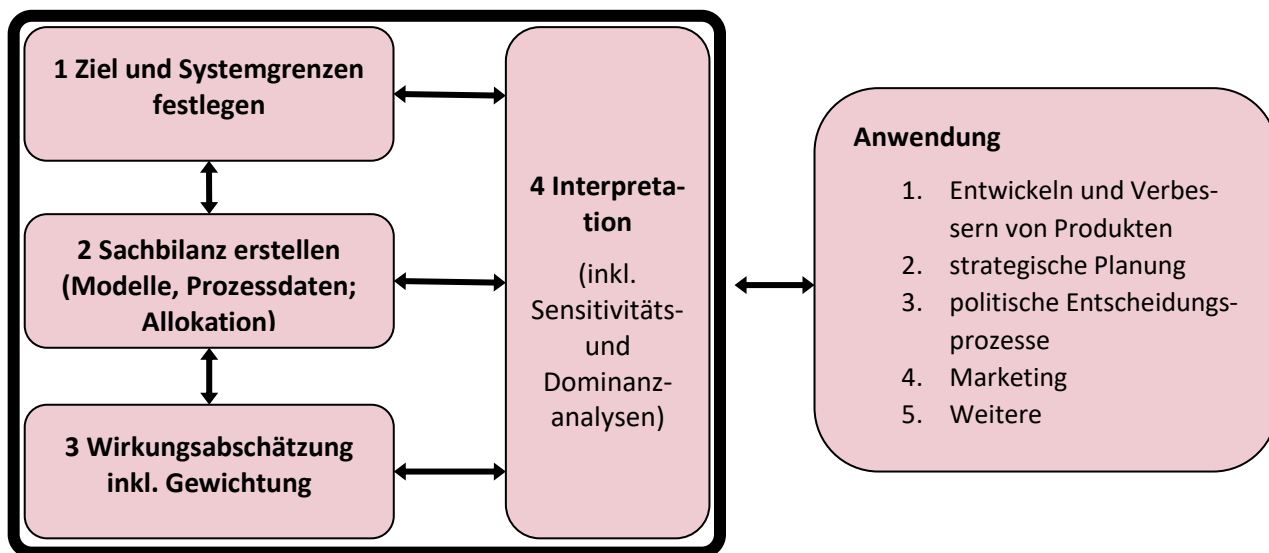


Abbildung 2: Die vier Phasen einer Ökobilanz (LCA) gemäss ISO 14040.

In Phase 3 werden aus diesen Umweltdaten die Umweltwirkungen berechnet. Auch dies geschieht in der Ökobilanz-Software. Auswertungen können für die Beiträge zu einzelnen Umweltthemen (wie Klimaerwärmung, Energieverbrauch, Wasserverbrauch, Versauerung, Humantoxizität, Ökotoxizität, etc.) und für zusammenfassende Beurteilungen berechnet werden. In dieser Studie werden die vom Bund üblicherweise verwendeten Auswertungen Energieverbrauch, Beitrag zur Klimaerwärmung sowie die übergreifenden Umweltbelastungspunkte (Frischknecht u. a. 2021) ausgewiesen.

Die letztgenannte Auswertung in UBP'21 verwendet Gewichtungsfaktoren für sehr viele Umwelteinwirkungen und erlaubt so eine ökologische Gesamtbeurteilung. Solche Gesamtbeurteilungen verbinden naturwissenschaftliche Erkenntnisse («welche

Auswirkung haben Schadstoffe in der Umwelt?») mit sozialwissenschaftlichen Erkenntnissen («welche Umweltzustände werden von der Gesellschaft und der Umweltpolitik als erstrebenswert resp. notwendig bezeichnet?»). Da solch eine Verbindung von Natur- und Sozialwissenschaft wohl beobachtbare, aber keine beweisbaren Grundlagen hat, ist die ISO-Norm diesen Methoden gegenüber skeptisch. Das BAFU hingegen vertritt die Ansicht, dass staatliche Entscheide wie z.B. der Einsatz öffentlicher Gelder auf Basis von Ökobilanzen transparenter und besser begründet sind, wenn Ökobilanz-Resultate methodisch aggregiert werden, und nicht ad-hoc und subjektiv von den Erstellern einer Studie. Hinzu kommt aus Sicht dieser Studie, dass UBP eine der wenigen Methoden ist, welche Lärmwirkungen mit allen anderen Umweltwirkungen vergleichbar macht⁹.

Der Beitrag zur Klimaerwärmung wird für den üblicherweise verwendeten Zeitraum von 100 Jahren berechnet und ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten (CO₂eq).

Der Energieverbrauch bezieht sich auf den Verbrauch von nicht erneuerbarer Primärenergie wird in MJ-Äquivalenten ausgedrückt, nachfolgend als «MJ» oder «GJ» bezeichnet.

Phase 4 der ISO-Norm betrifft die Interpretation der Resultate. Dabei zeigt Abbildung 2 den wichtigen Zusammenhang zwischen den drei vorherigen Phasen: Resultate können nur sinnvoll verstanden und angewandt werden, wenn die Festlegungen aus Phase 1, das konkrete Vorgehen in Phase 2 und die Auswertungsmethoden in Phase 3 bewusst berücksichtigt werden: Denn nur bei Berücksichtigung von Grundlagen und Modellierung lassen sich Interpretationsfehler vermeiden.

In Abbildung 2 nicht dargestellt ist der «critical review»: Zur Qualitätssicherung einer Ökobilanz beschreibt die Norm (ISO 14040 2014; ISO 14044 2014) drei Arten von Begutachtung. Häufig wird dabei eine Ökobilanz-Studie durch eine oder mehrere externe Fachperson(en) beurteilt, welche Ökobilanzierung und das konkrete Anwendungsgebiet verstehen, an der konkreten Arbeit aber nicht beteiligt waren. Ein solches Review hat zum Ziel, die Konformität einer Studie und des Berichts mit der ISO-Norm zu prüfen. Dazu gehört die Prüfung der Qualität von Daten und Berechnungen, und ob sie mit der Zielsetzung der Studie stimmig sind, und insbesondere sicherzustellen, dass die Schlussfolgerungen im Bericht mit der Arbeit und ihren Resultaten übereinstimmen. In diesem Ökobilanzbericht ist der Review-Bericht als Anhang VI «Critical Review» enthalten.

⁹ Die z.B. in (Piao, Heutschi, u. a. 2022) verwendete Methode der «DALY» erlaubt, Lärmschäden mit anderen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zu vergleichen, nicht aber mit anderen Schäden an der Natur.

2.7. Grundlagen der LCC-Methodik

Die Berechnung der Lebenszyklus-Kosten («Life Cycle Costing», LCC) greift auf das prinzipiell selbe Prozessmodell, dieselben Szenarien und Sensitivitätsanalysen, Systemgrenzen und funktionale Einheit wie die oben (Kapitel 2.6) beschriebene Ökobilanz zurück. Berechnet wurden im Unterschied zur LCA in der LCC jedoch Kosten. Dabei wurde mit gleichen oder vergleichbaren Prozess-Parametern, Mengen und Annahmen gearbeitet.

Diese LCC umfasst einerseits direkte Kosten, hier interne Kosten genannt, und andererseits externe Kosten: interne Kosten sind solche, welche von der verursachenden Stelle selbst getragen werden, z.B. Treibstoff-Kosten oder Materialkosten. Externe Kosten sind solche, welche nicht der Verursacher selbst trägt, sondern die indirekt durch die Gesellschaft oder Betroffene getragen werden. Da diese Kosten nicht in den Preisen enthalten sind, nennt man sie «externe» Kosten.

Während sich interne Kosten anhand der marktüblichen Kostensätze und zugehörigen Mengen berechnen lassen, werden die externen Kosten anhand von Kostensätzen aus der VSS Norm «Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr» (VSS 41 828 2022) berechnet. Die externen Kosten umfassen demgemäss in dieser Studie:

- Lärm: Gesundheitskosten
- Lärm: Mietzinsverluste
- Luftverschmutzung: Gesundheitsschäden (Indikator PM10)
- Luftverschmutzung: Gebäudeschäden (Indikator PM10)
- Luftverschmutzung: Ernteauffälle, Waldschäden, Biodiversitätsverluste (Indikator NOx)
- Luftverschmutzung: Bodenqualitätsschäden (Indikator Zink)
- Luftverschmutzung: Klimaschäden (Indikator CO₂eq)

Externe Kosten aufgrund der Bodenversiegelung wurden nicht berücksichtigt, da diese nicht primär durch die Wahl des Strassenbelages beeinflusst wird. Unbekannt sind wie erwähnt eventuelle externe Kosten aus Pneuabrieb (Mikroplastik).

Die externen Kosten werden für alle Prozesse berücksichtigt, gemäss den Stoffflüssen für die oben genannten Indikator-Parameter in der Ökobilanz. Die Lärmkosten wurden dabei unabhängig davon über die Verteilung von lärmbelästigten Anwohnern bzw. Wohnungen berechnet (siehe Anhang IX).

Weitere Details zu Modellannahmen in der LCC, wie Prozessdaten und Kostensätze, finden sich in Anhang XIV.

3. Ergebnisse

Zunächst zeigt dieses Kapitel die Übersicht über die Ergebnisse für die vier Basisszenarien, gefolgt von einer detaillierteren Betrachtung mit den vier Beurteilungsmethoden, wobei Treibhausgase und Energieverbrauch aufgrund ihrer strukturell sehr ähnlichen Resultate gemeinsam besprochen werden (Kapitel 3.2 UBP, 3.3 THG und nePE, 3.4 Kosten). Anschliessend folgen die Ergebnisse für die Sensitivitätsanalysen.

In der Gesamtschau werden für alle Auswertungen die gesamten Umwelteinwirkungen dargestellt, d.h. alle Grafiken zeigen für jeden Belag die jeweiligen Totalwerte. In den darauffolgenden methodisch spezifischen Grafiken werden die Resultate für die Beläge SDA 4, SDA 8 und AC 8 hingegen als Differenz zum Basisszenario ACMR 8 dargestellt, und der Belag ACMR 8 ist in diesen Auswertungen jeweils als Nullwert gesetzt. Die erste Darstellung der Totalwerte gibt den Überblick, die zweite Darstellungsform zeigt die Unterschiede zwischen den Belägen genauer.

Aufgrund der Systemabgrenzung, welche die Nutzung der Strasse mit einbezieht, liegen die Unterschiede zwischen den Szenarien und auch der Sensitivitätsanalysen bei fast allen Auswertungen im Bereich von wenigen Prozent der jeweiligen Auswertung. Dies weil die Nutzung der Strasse - also das Befahren durch 8000 Fahrzeuge jeden Tag - die gesamten Wirkungen der Strasse dominiert. Gleichwohl kann allein die Belagswahl die gesamte Umweltwirkung (inklusive Nutzung) bis zu fünf oder noch mehr Prozent verändern. Die Belagswahl ist also sogar bei dieser weit gefassten Systemdefinition aus Umweltsicht keineswegs vernachlässigbar.

Zu beachten ist jeweils auch die Qualität der Datenlage. Da für diese Ökobilanz teils neue und teils sogar zukünftig erwartete Prozesse betrachtet werden, sind insbesondere grössere Auswirkungs-Unterschiede richtungssicher, während sehr kleine Unterschiede tel-quel keine weitreichenden Entscheide begründen können. Bei dieser Abwägung, wie gross denn die Unterschiede zwischen zwei alternativen Szenarien sein sollen, sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen:

Die Unsicherheit der Daten ist ein wichtiges Element: Das Gros der hier betrachteten Prozesse ist gut bekannt, und die Daten sind als stabil einzuschätzen. Einzig für den Belag AC 8 H LA liegen teilweise weniger Messdaten vor.

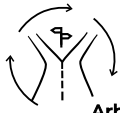
Ein anderer Aspekt von Datenunsicherheit liegt in der Variabilität von realen Situationen, wie z.B. unterschiedliche Transportdistanzen für Asphalt, unterschiedliche Anwohner-Strukturen (wie viele Personen, wie weit von der Strasse entfernt), unterschiedliche Verkehrsaufkommen oder unterschiedliche mittlere Geschwindigkeiten auf dem gewählten Strassentyp. Gerade bei den für die LCA bedeutenden Prozessen kann die Beurteilung von Variabilitäten, z.B. mittels weiterer Sensitivitätsanalysen, relevant sein.



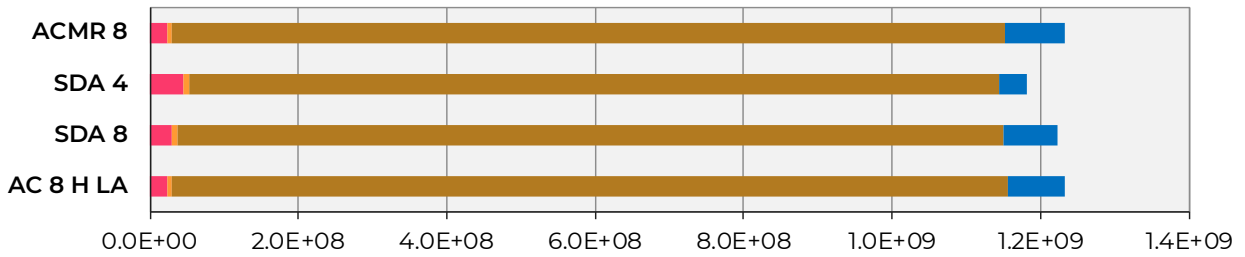
Tabelle 6: Zusammenfassung der Resultate der vier Basisszenarien je Prozessgruppe und Wirkungskategorie.

Szenario		ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
Umweltbelastungspunkte (UBP ₂₁ / km*a)	Bau und Rückbau	2.3E+07	4.5E+07	3.0E+07	2.3E+07
	Unterhalt	7.1E+06	7.1E+06	7.3E+06	7.2E+06
	Nutzung (exkl. Strassenlärm)	1.12E+09	1.09E+09	1.11E+09	1.12E+09
	Strassenlärm	8.2E+07	3.9E+07	7.2E+07	7.7E+07
	Total	1.23E+09	1.18E+09	1.22E+09	1.23E+09
Treibhausgaspotential (t CO ₂ eq / km*a)	Bau und Rückbau	1.4E+01	2.7E+01	1.8E+01	1.4E+01
	Unterhalt	4.3E+00	4.4E+00	4.4E+00	4.4E+00
	Nutzung	8.23E+02	8.00E+02	8.16E+02	8.26E+02
	Total	8.41E+02	8.32E+02	8.38E+02	8.44E+02
Primärenergie (nePE) (GJ / km*a)	Bau und Rückbau	2.9E+02	5.7E+02	3.8E+02	3.0E+02
	Unterhalt	9.2E+01	8.9E+01	9.1E+01	9.5E+01
	Nutzung	1.07E+04	1.04E+04	1.06E+04	1.07E+04
	Total	1.11E+04	1.10E+04	1.10E+04	1.11E+04
interne und externe Lebenszykluskosten (CHF / km*a)	interne Kosten Bau und Rückbau	2.3E+04	4.5E+04	3.0E+04	2.3E+04
	interne Kosten Unterhalt	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04	1.0E+04
	interne Kosten Nutzung	4.4E+05	4.3E+05	4.4E+05	4.4E+05
	externe Kosten Bau, Rückbau und Unterhalt	9.2E+03	1.6E+04	1.1E+04	9.3E+03
	externe Kosten Nutzung (exkl. Strassenlärm)	3.1E+05	3.0E+05	3.1E+05	3.1E+05
	externe Kosten Strassenlärm	2.3E+05	1.5E+05	2.1E+05	2.2E+05
	Total	1.02E+06	9.59E+05	1.01E+06	1.02E+06

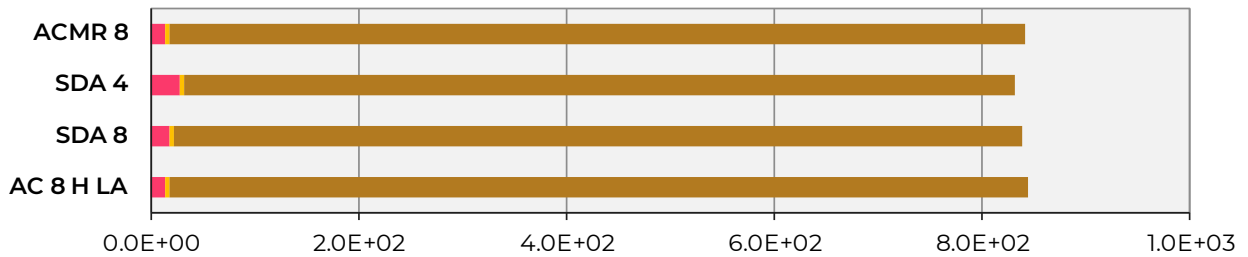
Abbildung 3 (nächste Seite): Ergebnisse für die vier Basisszenarien in den vier Wirkungskategorien Umweltbelastungspunkte, Treibhausgaspotential, nicht erneuerbare Primärenergie, sowie interne und externe Kosten, je pro Jahr und Kilometer Strasse.



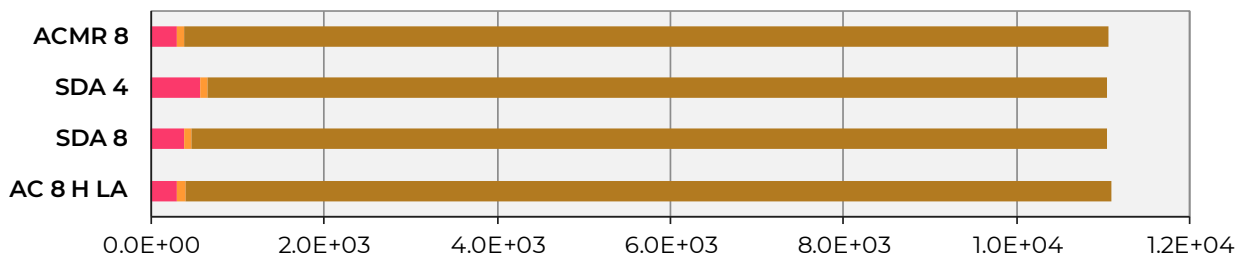
Legende zu UBP, THG und nePE:



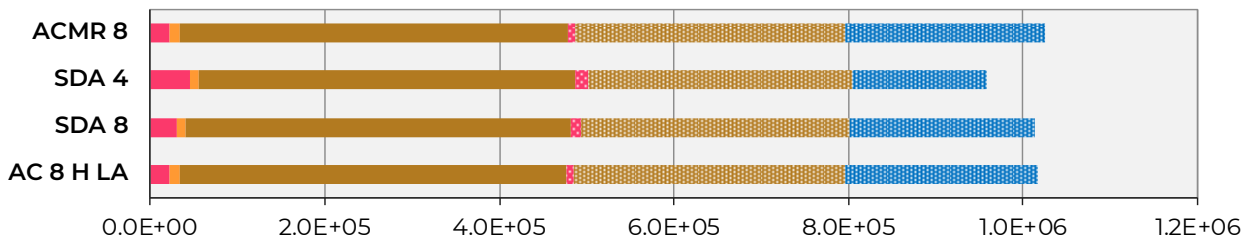
Umweltbelastungspunkte: UBP'21 pro Jahr und km Strasse



Treibhausgaspotential: t CO₂eq pro Jahr und km Strasse



nicht erneuerbare Primärenergie: GJ pro Jahr und km Strasse



interne und externe Kosten: CHF pro Jahr und km Strasse

Legende zu Kosten:



3.1. Gesamtschau auf die vier Basisszenarien

Die Resultate der vier Basisszenarien für die vier betrachteten Auswertungsmethoden zeigt Tabelle 6 sowie Abbildung 3. Die Interpretation folgt der Abbildung.

Die Werte sind jeweils aufgeteilt nach Nutzungsphasen und nach Einflussfaktoren. Diese sind für alle Methoden ähnlich, aber doch nicht ganz identisch: so ist Strassenlärm in den Auswertungen nach Treibhausgasen (kg CO₂eq) und Energie (Joule) nicht enthalten, da Lärm in diesen Kategorien keine Wirkung zeigt; in den Auswertungen mit UBP und mit Kosten wird Strassenlärm hingegen abgebildet.

Diese Ergebnisse erlauben drei zentrale Schlussfolgerungen:

1. In allen Auswertungen für die vier Basisszenarien werden die Unterschiede in den Bauphasen durch die Veränderung des Rollwiderstands in der Nutzungsphase fast gänzlich kompensiert. Ohne Lärmwirkung sind die Unterschiede entweder fast nicht sichtbar (Kosten, Energie) oder nur marginal (bei UBP und bei den gesamten Kosten). Beläge mit höherem Rollwiderstand erzielen deshalb auch mit längerer Lebensdauer insgesamt keinen spürbaren Vorteil.
2. Ein relevanter Unterschied entsteht durch die unterschiedliche Lärmwirkung: Strassenlärm führt bei UBP und bei (externen) Kosten insbesondere für den Belag SDA 4 zu einem erkennbaren Vorteil für das Gesamtsystem. In diesen beiden Wirkungskategorien ist die Lärmwirkung bedeutender als die Bauphasen (Erstellung, Unterhalt, Rückbau). Mehraufwände durch verkürzte Lebensdauer werden auch allein durch die Lärmreduktion überkompensiert und ergeben einen Netto-Nutzen.
3. Über alle vier Auswertungs-Methoden hinweg erweist sich der Belag SDA 4 als der vorteilhafteste der vier betrachteten Beläge. Bei UBP und Kosten ist der Vorteil von SDA 4 wesentlich, bei Treibhausgasen und Energie ist der Vorteil marginal. Da alle vier Auswertungen in dieselbe Richtung zeigen, folgern wir, dass der SDA 4 Belag aufgrund der lärm mindernden Wirkung überlegen ist, und dies ohne Nachteile bezüglich Treibhausgasen oder Energiebedarf. SDA 8 erweist sich als zweitbestes Belag, wenn auch mit nur marginalen Vorteilen gegenüber AC 8 H LA und dem Basisszenario ACMR 8.

Weitere Interpretationen und Kommentare anhand dieser Gesamtschau:

- Der aus Umweltsicht wichtigste Bereich des «Systems Strasse» sind die aus der Nutzung entstehenden stofflichen Emissionen, der Energieeinsatz und die externen Kosten. Der nächstwichtigste Bereich ist der Strassenlärm, gefolgt von Bau und Rückbau der Strasse. Den kleinsten Beitrag liefert der Strassen-Unterhalt.
- Bisherige Ökobilanzen von Strassenbelägen hatten die Nutzungsphase nicht oder nur teilweise¹⁰ berücksichtigt. Entsprechend liegen die berechneten

¹⁰ (Piao, Heutschi, u. a. 2022) berücksichtigt Strassenlärm in Bezug auf menschliche Gesundheit.

Gesamtwerte in der vorliegenden Studie um etwa eine Grössenordnung höher. Dennoch ist auch diese Studie keine vollständige Ökobilanz von «Strasse befahren», da z.B. die Fahrzeuge (Herstellung, Unterhalt, Entsorgung) und die Kofferung der Strasse hier nicht betrachtet sind, da sie für die Beurteilung von Belägen vernachlässigbar sind.

- Die getrennte Auswertung nach internen und externen Kosten zeigt, dass für eine solche Innerortsstrasse die internen (direkten) Kosten und die externen (von der Allgemeinheit getragenen) Kosten insgesamt ähnlich hoch sind und je etwa 0.5 Mio. CHF pro km und Jahr betragen (vgl. Kapitel 3.4). Auffallend ist beim Vergleich der beiden Methoden, welche Strassenlärm berücksichtigen - UBP'21 und externe Kosten – Strassenlärm bei den externen Kosten relativ stärker zu Buche schlägt als in UBP. (Dies ist nicht richtig oder falsch, sondern Ausdruck verschiedener Auswertungsmethoden.)
- Die Verhältnisse der Gesamtwerte und das Ranking der Szenarien zeigen nach UBP'21 und nach Gesamtkosten ein ähnliches Bild.
- Die Infrastruktur (Bauphasen inkl. Unterhalt) macht in dieser Gesamtbetrachtung je nach Auswertung 2 bis 5 % der entstehenden Gesamtwirkungen aus. Die Unterschiede des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase liegen in einer ähnlichen Grössenordnung.
- Die Auswertung des AC 8 H LA wurde auf Basis der 2022 verfügbaren Daten errechnet. Das akustische Alterungsmodell für den Belag AC 8 H LA basiert so auf den Messdaten von Zürcher AC 8 H Belägen, die Rollwiderstandsdaten umfassen gesamtschweizerische Messwerte von AC 8 und AC 11 Belägen, wobei dies einzig die statistische Basis vergrössert, da die Messwerte von AC 8 und AC 11 denselben Mittelwert und fast dieselbe Variabilität aufweisen. Daher ist die Auswertung für AC 8 H LA bezüglich der Lärmwirkung nur prognostisch und bezüglich des Rollwiderstandes statistisch noch unbefriedigend gestützt. Mit weiteren Messwerten, auch auf dannzumal älteren Belägen, wird im Laufe der Zeit eine zunehmend genauere Beurteilung von Rollwiderstand und akustischer Alterung möglich sein¹¹.

3.2. Umweltbelastungspunkte

Diese Auswertung zeigt die Resultate aus den in der Studie modellierten Prozessen, welche mit den Hintergrunddaten aus (UVEK:2023) verknüpft und mit der Methode UBP'21 gewichtet wurden.

In Abbildung 4 sind die Unterschiede der Auswertung mit UBP'21 dargestellt. Der Belag ACMR 8 ist als Referenzszenario mit «Null» dargestellt, während für die anderen drei Basisszenarien die Unterschiede zum Belag ACMR 8 dargestellt sind. Dabei

¹¹ Kurz vor Drucklegung wurde die Auswertung zur akustischen Wirkung für AC 8 H LA unter Einbezug der Messdaten aus 2023 erneut gerechnet. Die Resultate legen keine veränderte Schlussfolgerung nahe.

sind die einzelnen Elemente der Auswertung getrennt gezeigt, und als letzte Säule jeweils das Total für den jeweiligen Belag gezeigt.

So ist z.B. erkennbar, dass die Unterschiede zwischen dem ACMR 8 und dem SDA 4 allgemein viel grösser sind als zwischen ACMR 8 und AC 8 H LA.

Die Bauphasen (jeweils erste, rötliche Säule) erhöhen die gesamte Umweltbelastung für den SDA 4 sichtbar. Dies gilt auch für den SDA 8, wenn auch weniger, während für den AC 8 H LA fast kein Unterschied zum ACMR 8 sichtbar ist.

Andererseits sinkt durch die Nutzung (Treibstoffverbrauch und Reifenabrieb; braun) und noch etwas stärker durch die Minderung des Strassenlärms (blau) die Umweltwirkung des SDA 4 spürbar. Auch hier ist das Bild für den SDA 8 ähnlich, aber weniger stark ausgeprägt. Beim AC 8 H LA sind die Veränderungen aus Nutzung (Rollwiderstand) und Lärmveränderung gegenüber dem ACMR 8 noch geringer, und sie zeigen (wenn auch vernachlässigbar) nicht alle in die gleiche Richtung.

In der Summe (schwarze Säulen) reduziert ein SDA 4 Belag damit über seine Lebensdauer die Umweltbelastung des Gesamtsystems sichtbar (- 4.2 %). Auch ein SDA 8 Belag senkt die gesamte Umweltbelastung gegenüber dem ACMR 8, wenn auch nur um knapp 1 %, während der AC 8 H LA insgesamt keine relevante Veränderung gegenüber dem ACMR 8 ergibt.

Betrachten wir die einzelnen Phasen so können wir die Resultate wie folgt lesen:

Die Bauphasen sind für SDA 8 und insbesondere für SDA 4 aufgrund der kürzeren Lebensdauer der Beläge aufwändiger als für einen ACMR 8 oder einen AC 8 H LA. Die Unterhalts-Tätigkeiten (orange) resp. deren Unterschiede sind im Vergleich der Beläge so gering, dass sie hier nicht sichtbar werden. In der Nutzungsphase haben SDA 4 und - in geringerer Masse - SDA 8 ausgeprägte Vorteile, sowohl bzgl. Strassenlärm als auch bzgl. Energieverbrauch. Die Unterschiede im Reifenabrieb sind in UBP'21 sehr gering und in der Darstellung kaum sichtbar (N1 und N3 sind gestapelt dargestellt).

Eine vertiefte (und hier nicht dargestellte) Analyse der Bauprozesse zeigt, dass die Veränderung bei den SDA-Belägen in der Bauphase nur zu einem kleinen Teil von den eigentlichen Bauprozessen herrührt, sondern grossmehrheitlich (ca. 95 %) aus der Herstellung des Mischgutes stammt. (Dies gilt auch bei den Auswertungen nach CO₂eq und Primärenergie.)

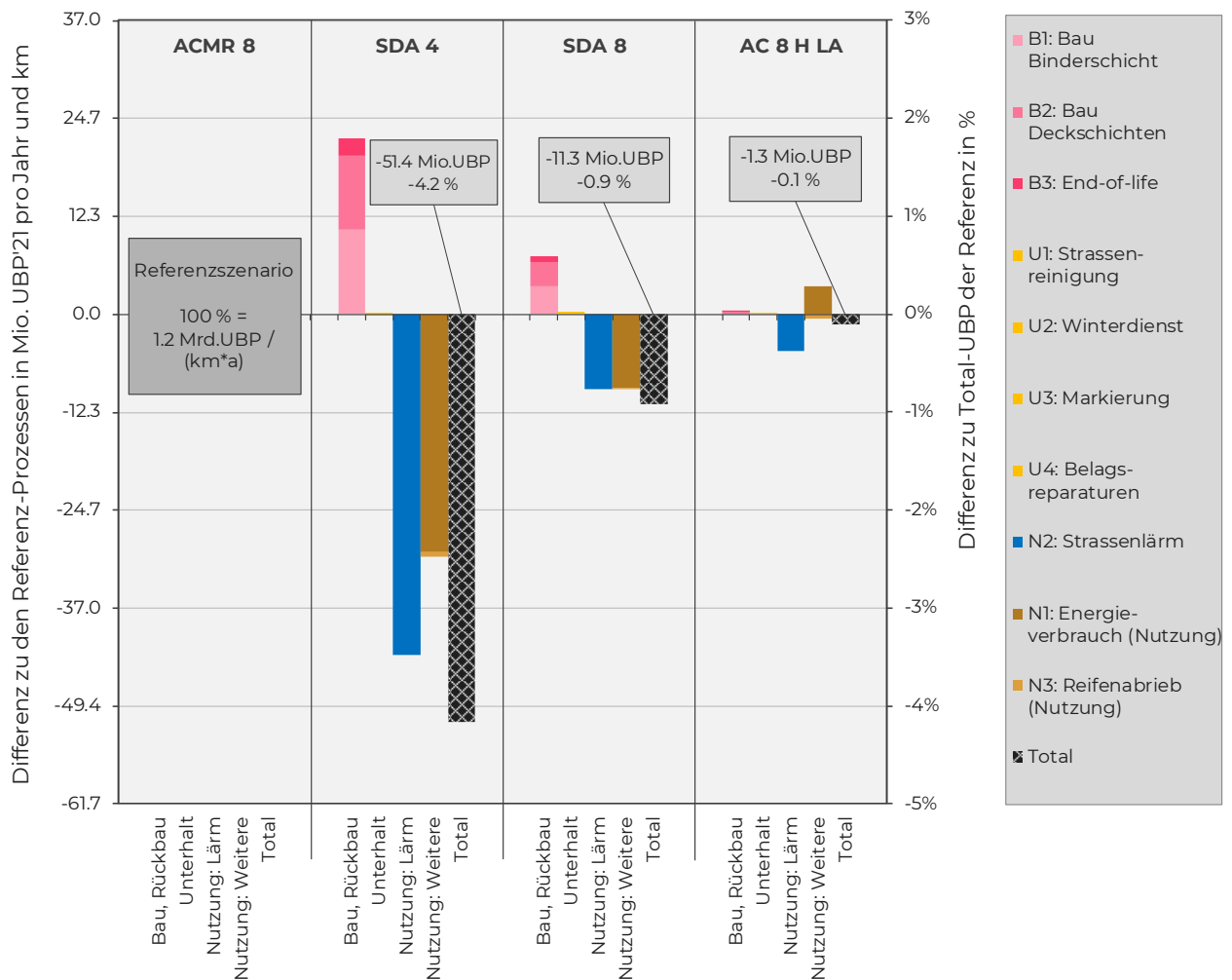


Abbildung 4: Differenzen der Umweltbelastungspunkte gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8. Die Anteile der Unterhaltsprozesse (U*) sind kaum sichtbar und daher alle in der gleichen Farbe dargestellt.

AC 8 H LA ist bezüglich Bau und Unterhalt vergleichbar mit ACMR 8, schafft einen leichten Vorteil bezüglich Strassenlärm, der jedoch wieder verschwindet durch den leicht erhöhten Energieverbrauch bei der Befahrung. Allerdings sind die Veränderungen von AC 8 H LA gegenüber ACMR 8 sehr klein und deshalb, angesichts der diversen Annahmen und der begrenzten Datenmenge und -qualität, mit Vorsicht zu interpretieren. Vielmehr erscheinen die Ergebnisse für ACMR 8 und AC 8 H LA als etwa gleichwertig. SDA 8 hat gegenüber ACMR 8 und AC 8 H LA leichte Vorteile, und SDA 4 schneidet gegenüber den anderen drei Belägen vorteilhaft ab - und dies trotz des erhöhten Aufwands für Bau und Rückbau.

Um diesem Vorteil von SDA 4 gegenüber ACMR 8 in UBP eine Grössenordnung zu geben: Auf dem betrachteten Strassenstück werden von PW und LKW während eines Jahres knapp 3 Mio. km gefahren (vgl. Kapitel 2.1). Der Wechsel von ACMR 8 auf SDA 4 führt zu einer Reduktion von - 51 Mio. UBP, was einer Senkung des Verkehrsvolumens um 135'000 Fahrzeug-km entspricht.

3.3. Treibhausgaspotential und Primärenergiebedarf

In diesem Abschnitt sind die zwei Auswertungen nach Treibhausgaspotential (kg CO₂eq) sowie nach nicht erneuerbarem Primärenergiebedarf (nePE, in Joule resp. GJ) dargestellt. Die Resultate dieser zwei Auswertungen zeigen in Abbildung 5 und Abbildung 6 ein sehr ähnliches Bild.

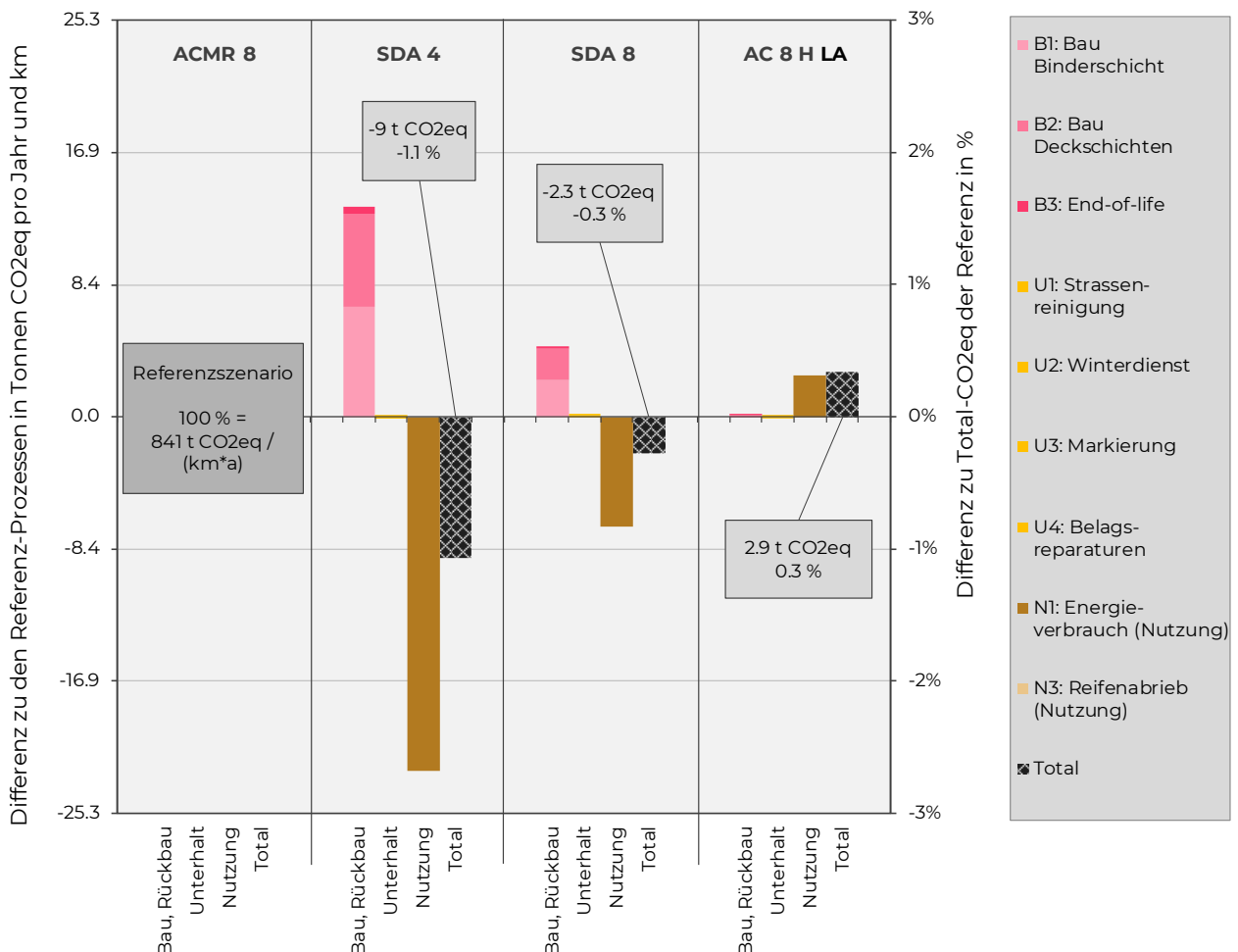


Abbildung 5: Differenzen der Treibhausgas-Emissionen gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.

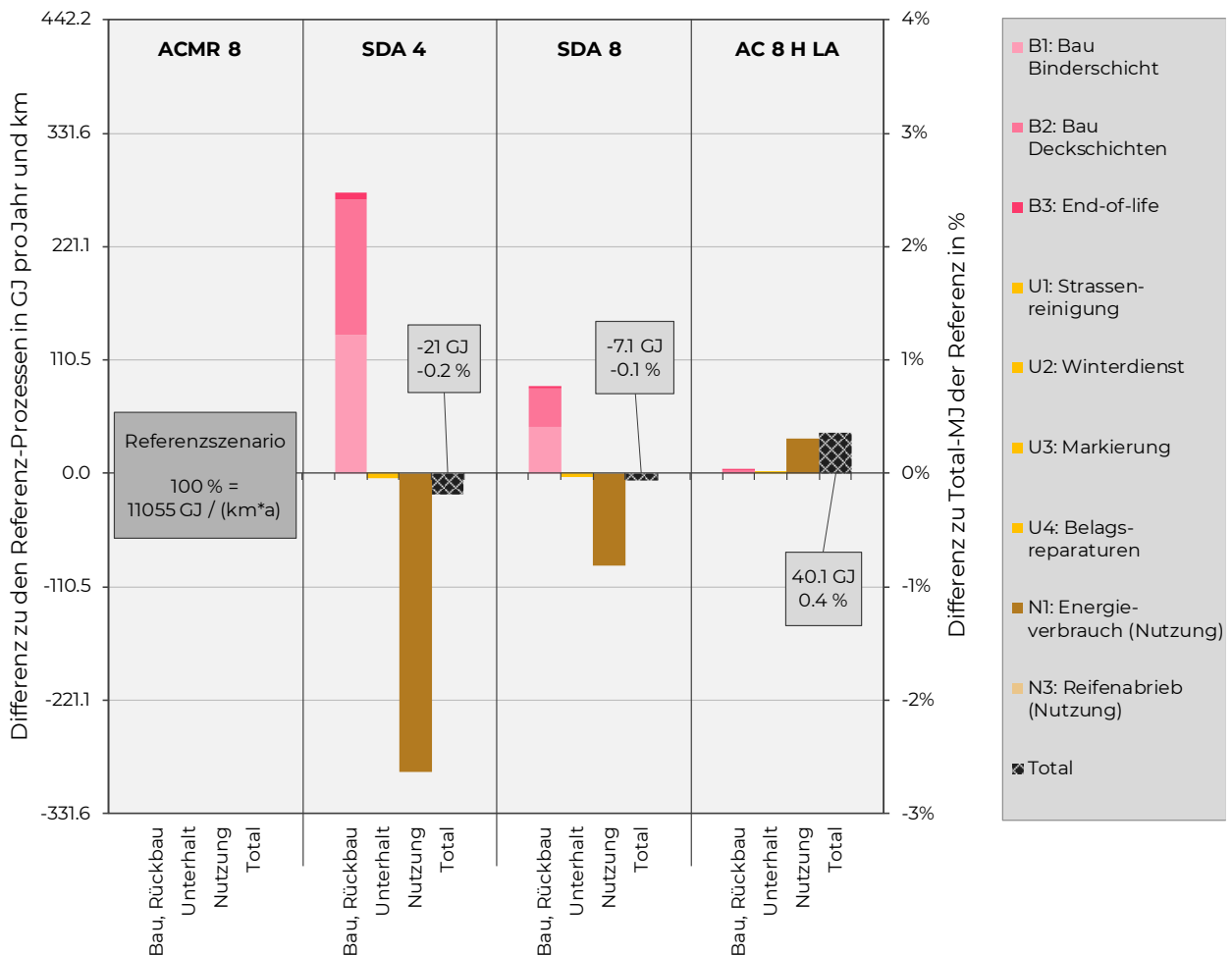


Abbildung 6: Differenzen des Verbrauchs nicht erneuerbarer Primärenergie gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.

Zum einen zeigen diese zwei Auswertungen ein ähnliches Ergebnis wie die Auswertung mit UBP'21 (in Kapitel 3.2): SDA 4 führt zu höheren Belastungen im Bau (rot), aber zu sinkenden Belastungen durch den Energieverbrauch der Nutzung (braun), so dass insgesamt die Umweltbelastung sinkt. SDA 8 wirkt ähnlich, aber weniger stark ausgeprägt. Da hier die Lärmwirkung keinen Einfluss hat führt der Belag AC 8 H LA, anders als mit UBP, insgesamt zu etwas höherer Belastung, durch den - gemäss Messwerten - leicht erhöhten Energieverbrauch in der Nutzung.

Die Unterschiede der hier betrachteten Auswirkungen im Vergleich zur Auswertung mit UBP'21 ergeben sich insbesondere aus der Tatsache, dass Lärm für Klimaveränderung und Energieverbrauch keine Wirkung hat.

Die hier gezeigten Veränderungen für die Belagsarten sind insgesamt sehr klein:

- Gemessen in CO₂eq beträgt die grösste Nettowirkung eines Belages gegenüber ACMR 8 nur gerade - 1 % der Gesamtwirkungen (vgl. Abbildung 5), und zwar für SDA 4. Die Veränderungen der anderen zwei Beläge gegenüber ACMR 8 sind noch kleiner.
- Bezüglich Energieverbrauch bleiben die Nettowirkungen sogar unterhalb von 0.4 % (vgl. Abbildung 6).

Somit kann aus diesen zwei Auswertungen festgestellt werden, dass die SDA-Beläge zu ACMR 8 bezüglich Klimawirkung leichte Vorteile aufweisen und bezüglich Primärenergieverbrauch kaum vom ACMR 8 abweichen, und der AC 8 H LA Belag leicht höhere Belastungen gegenüber einem ACMR 8 aufweist.

3.4. Interne und externe Kosten

Diese Auswertung hat zum Ziel, alle Kosten abzubilden, welche vom betrachteten Strassen-System ausgelöst respektive beeinflusst werden.

Dies umfasst sowohl die bei den Akteuren anfallenden direkten, «internen», Kosten, als auch die von der Allgemeinheit getragenen «externen» Kosten. Betrachtet wird dasselbe System wie bei der Ökobilanzierung. Üblicherweise wird von «Kosten» sowie von «externen Kosten» gesprochen. Zur Klarheit verwenden wir hier «interne Kosten» sowie «externe Kosten».

Interne Kosten fallen irgendwo in einer Kostenstelle an, z.B. im Baubudget eines Tiefbauamts, beim Tanken oder in der Spesenrechnung von Aussendienstmitarbeitenden.

Externe Kosten entstehen durch die Auswirkungen auf Menschen und Umwelt, im Bereich dieser Studie z.B. aus den Emissionen der Treibstoffverbrennung und aus dem Strassenlärm, aber auch aus den Emissionen aus den Vorstufen (Raffinerie, Asphalt Herstellung, etc.). Diese Auswirkungen führen zu Kosten bei Dritten, z.B. aus Krankheit und medizinischer Behandlung, oder die Verschlechterung der Wohnungsqualität und tieferen Mieterträgen (beides als Lärmfolgekosten). «Extern» sind Kosten, welche nicht vom Verursacher, sondern von den Betroffenen oder der Allgemeinheit getragen werden.

Insgesamt sind auch die hier ausgewiesenen Kosten, wie bereits oben die Umwelteinwirkungen, mit Unsicherheiten behaftet: Die internen Kosten mit den Daten-Unsicherheiten der Modellberechnungen, die externen Kosten darüber hinaus auch mit den Unsicherheiten der verwendeten Modelle. Es liegen uns keine statistischen Angaben über diese Unsicherheiten vor.

Gesamtkosten

Abbildung 7 und Tabelle 7 zeigen die Gesamtkosten für die vier Basisszenarien. In den folgenden Abbildungen sind interne Kosten jeweils vollflächig eingefärbt; externe Kosten sind in der jeweils gleichen Farbe gehalten, aber weiss gepunktet. Die schwarz-weissen Total-Balken umfassen die Summe beider Kosten.

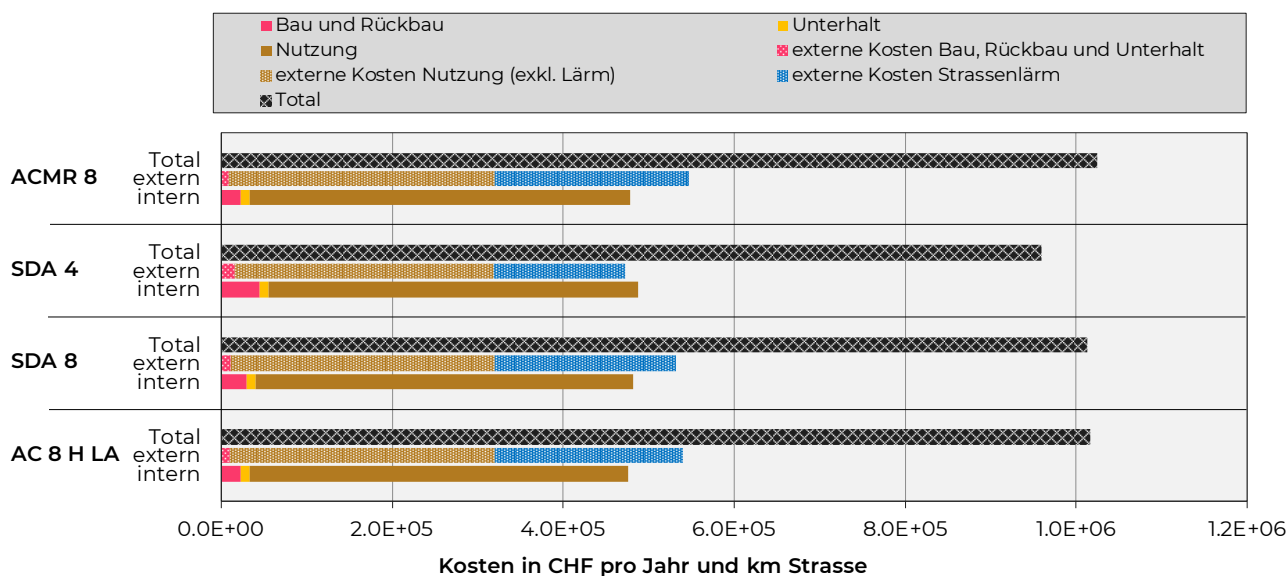


Abbildung 7: Interne, externe und totale Kosten pro Jahr und Kilometer Strasse für die vier Basisszenarien.

Ein Kilometer dieser Innerortsstrasse verursacht demnach insgesamt - für alle Beteiligten und Betroffenen - Kosten von etwa 1 Mio. CHF pro km*Jahr.

Diese Gesamtkosten sinken mit den alternativen Belägen: insbesondere ein SDA 4 senkt diese Kosten um 66'000 CHF pro km und Jahr bzw. um 6 % der Gesamtkosten. Auch SDA 8 und AC 8 H LA senken diese Kosten, wenn auch nur leicht, um ca. 1 %.

Dabei sind die Bauphasen (rot) bei ACMR 8 und AC 8 H LA günstiger als bei SDA 4 und SDA 8. Gleichzeitig sind jedoch die internen und externen Kosten der Nutzung (exkl. Lärm; braun) bei SDA 4 und SDA 8 tiefer, was die höheren Baukosten praktisch ausgleicht. Aufgrund der bei SDA 4 spürbar tieferen externen Kosten aus Strassenlärm sind die Gesamtkosten hier deutlich reduziert.

Von den Gesamtkosten von etwa 1 Mio. CHF pro Kilometer und Jahr entfallen gemäss Tabelle 7 je etwa 0.5 Mio CHF einerseits auf die direkt bezahlten internen Kosten und andererseits auf die nicht von den Verursachern getragenen externen Kosten.

Tabelle 7: Interne und externe Kosten (pro Jahr und Kilometer Strasse) für die vier Basisszenarien, aufgeschlüsselt nach Kostenträger der internen Kosten sowie nach Kostenquelle der externen Kosten.

Träger (intern) bzw. Quelle (extern)		ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
intern	öffentliche Hand	CHF 33'000	CHF 56'000	CHF 40'000	CHF 33'000
	Strassennutzer	CHF 445'000	CHF 432'000	CHF 441'000	CHF 443'000
	Total intern	CHF 478'000	CHF 487'000	CHF 482'000	CHF 476'000
extern	Bau und Rückbau	CHF 9'000	CHF 16'000	CHF 11'000	CHF 9'000
	Nutzung	CHF 538'000	CHF 456'000	CHF 521'000	CHF 531'000
	Total extern	CHF 547'000	CHF 472'000	CHF 532'000	CHF 540'000
Total (intern + extern)		CHF 1'025'000	CHF 959'000	CHF 1'014'000	CHF 1'017'000

Die internen Kosten

Interne Kosten fallen bei der öffentlichen Hand und bei den Nutzenden an: Bau und Unterhalt machen 33'000 bis 56'000 CHF pro km und Jahr oder 7 bis 11 % der gesamten internen Kosten aus. Dies ist ein kleiner Anteil der Gesamtkosten, doch ist der Unterschied zwischen den Belägen aus Sicht der öffentlichen Hand vergleichsweise gross. Insbesondere der SDA 4 ist mit 56'000 CHF pro km und Jahr für die zuständigen Amtsstellen spürbar teurer als ein ACMR 8 oder ein AC 8 H LA (33'000 CHF pro km und Jahr).

Den grössten Teil der internen Kosten tragen jedoch die Strassenbenutzer durch die Nutzung selbst: Der hierzu nötige Treibstoff und auch der resultierende Reifenabrieb (Pneu-Verbrauch) kostet pro Kilometer und Jahr im Szenario ACMR 8 über 445'000 CHF. Der SDA 4 senkt diese Kosten um 13'000 CHF pro Jahr, vornehmlich dank dem reduzierten Rollwiderstand.

In der Summe variieren die internen Kosten noch leicht um etwa 11'000 CHF pro km und Jahr und liegen zwischen 476'000 und 487'000 CHF. Die Beläge ACMR 8 und AC 8 H LA liegen am unteren Rand, SDA 4 am oberen Rand, und SDA 8 dazwischen.

Die externen Kosten

Die externen Kosten belaufen sich beim Referenzszenario ACMR 8 auf ca. 547'000 CHF pro Kilometer und Jahr. Die drei alternativen Beläge ergeben tiefere externe Kosten, zwischen 472'000 CHF (SDA 4) und 540'000 CHF (AC 8 H LA) pro km*Jahr. Die alternativen Beläge senken die externen Kosten somit zwischen 7'000 (AC 8 H LA) und 75'000 CHF (SDA 4) pro km*Jahr.

Bau und Unterhalt verursachen auch bei den externen Kosten nur einen kleinen Anteil (9'000 bis 16'000 CHF oder 2 bis 3 %).

Die insgesamt grössten Beiträge, und auch die grössten Veränderungen, entstehen bei den externen Kosten der Nutzungsphase durch Abgase, weitere stoffliche Emissionen und Lärm. Gegenüber 538'000 CHF auf einem ACMR 8 sinken diese externen Kosten aus der Nutzung je nach Belag unterschiedlich stark, wobei insbesondere ein SDA 4 die externen Kosten aus der Nutzung um gut 81'000 CHF pro km*Jahr senkt (wovon ca. 74'000 CHF durch Lärminderung und ca. 8'000 CHF durch die restlichen sinkenden Emissionen; vgl. auch die Detailbetrachtung in Tabelle 6 und Tabelle 16 in Anhang XV.d).

Dabei ist zu beachten, dass hier eine Strasse im innerstädtischen Bereich betrachtet wird. Da die externen Kosten aus dem Strassenlärm stark von der Anzahl betroffener Personen beeinflusst wird, sind die externen Kosten pro Kilometer Strasse in der vorliegenden Auswertung höher als z.B. bei einer Auswertung über das gesamte Strassennetz oder für einen Kilometer Autobahn, jedoch tiefer als an einem noch stärker lärmbelasteten oder einem sehr dicht bewohnten Standort.

Gesamte Kostendifferenzen

Wie eingangs im Überblick beschrieben und in Abbildung 8 gezeigt sinken die gesamten Kosten von ca. 1 Mio. CHF im Szenario SDA 4 um 66'000 CHF (6 %), als Summe aus erhöhten Baukosten, sinkenden Kosten aus dem Energieverbrauch sowie sinkenden Lärmfolgekosten. Bei SDA 8 steigen Baukosten weniger, sinken die Kosten aus dem Energieverbrauch und der Lärmwirkung weniger, woraus eine geringe Senkung (- 1 %) der Gesamtkosten resultiert. Auch bei AC 8 H LA sinken die Gesamtkosten um knapp 1 %, aber mit leicht anders liegenden Einzelfaktoren: Die Baukosten sind gegenüber dem Referenzszenario praktisch unverändert, die internen und externen Nutzungskosten (exkl. Strassenlärm) heben sich auf, und die geringe Senkung der Lärmwirkung führt zum ebenfalls gering reduzierten Gesamtergebnis.

Wer die Kostenveränderungen trägt

Betrachten wir, welche Akteure diese Veränderungen der internen und externen Kosten tragen, so zeigt sich am Beispiel von SDA 4, dem Belag mit den stärksten Veränderungen gegenüber ACMR 8:

- Die Bautätigkeit wird für die öffentliche Hand teurer, da wegen der kürzeren Lebensdauer eines SDA 4 die Baukosten um 2 % der Gesamtsystemkosten steigen, bzw. fast 70 % höher sind als im Referenzszenario ACMR 8.

Diese Betrachtung ist jedoch unvollständig, da im Falle eines lärmbelasteten Standortes im Referenzszenario andere Lärmschutzmassnahmen gesetzlich verpflichtend wären und zusätzliche Kosten verursachen.

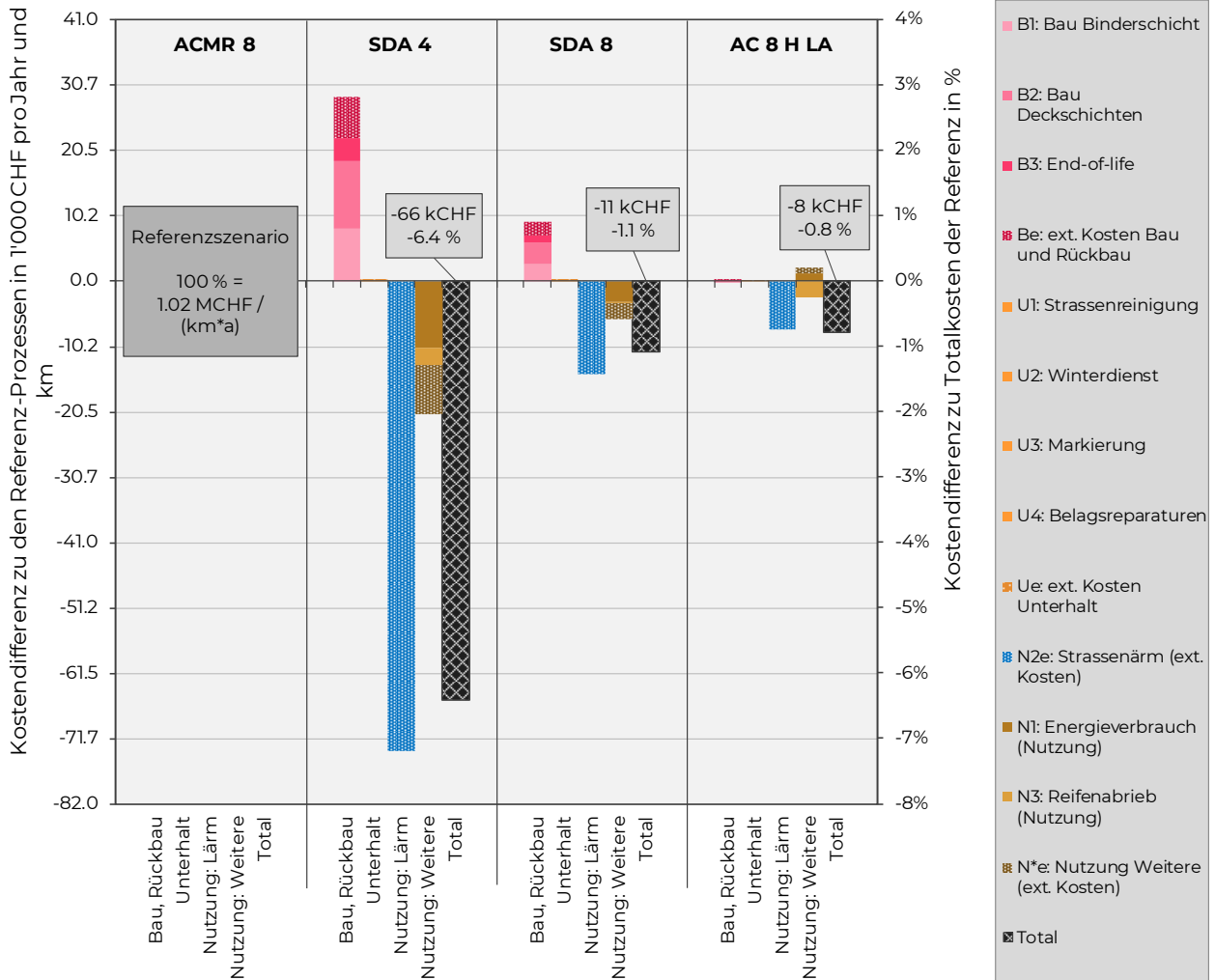
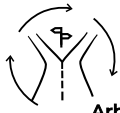


Abbildung 8: Kostendifferenzen gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.

- Die Nutzer der Strasse sparen Treibstoff und Pneukosten im Wert von gut 1 % der Gesamtkosten bzw. 3 % der Nutzungskosten (braun und hellbraune Balken in Abbildung 8).
- die Allgemeinheit wird durch die geringeren Folgekosten des Strassenlärms sowie sinkende Verbrennungsemissionen (blau bzw. braun gepunktete Balken in Abbildung 8) spürbar um - 7 % bzw. - 0.7 % der Gesamtkosten entlastet. Andererseits steigen durch die verstärkte Bautätigkeit auch die externen Kosten um 0.6 %.

So senkt ein Belag SDA 4 die gesamten Kosten netto um 6.4 %. Dahinter verbergen sich aber erheblich grössere Veränderungen, wenn die verschiedenen Wirkungen separat betrachtet werden. Und weil diese «Brutto»-Veränderung der Kosten die

Beteiligten unterschiedlich beeinflussen, ist es interessant, auch die gesamten Veränderungen zu betrachten: Über alle Beteiligten beeinflusst ein Belag SDA 4 etwa 12 % der Kosten des Gesamtsystems. Vermieden werden durch einen SDA 4 Belag zum einen externe Kosten, welche von der Öffentlichkeit oder von den Vermietern getragen werden. Auch interne (direkte) Kosten sinken durch einen SDA 4 Belag: Diese Kostensenkung kommt den Strassenbenutzern zugute. Die steigenden internen Kosten eines SDA 4 Belags trägt hingegen die öffentliche Hand.

Bei den Belägen SDA 8 und AC 8 H LA sind die Auswirkungen in der Kostenverteilung gegenüber einem ACMR 8 geringer. Die Verschiebungen betreffen etwa 2.5 % der Kosten bei SDA 8 sowie 1.5 % bei AC 8 H LA.

Diese gesamthafte Betrachtung aller Kostenelemente – am Markt bezahlte Kosten und externe Kosten – ermöglicht nebst den umweltpolitischen Schlussfolgerungen auch solche zur wirtschaftlichen Optimierung im Strassenbau.

3.5. Sensitivitätsanalysen

Die fünf Sensitivitätsanalysen zu Parametern und Annahmen beantworten folgende Fragen (vgl. auch Kapitel 2.3): Wie wirkt es sich auf die Beurteilung der Szenarien aus, wenn ...

- ... die Lebensdauer des ACMR 8 Belags um 5 Jahre länger wäre und er entsprechend seltener ersetzt würde? (S1)
- ... mit «akustischem Unterhalt» die akustische Langzeitwirkung der SDA 4- und SDA 8 Beläge optimiert wird, und damit zudem die Lebensdauer des SDA 4 Belags verlängert werden kann? (S2)
- ... im Mischgut mehr Rezyklat eingesetzt wird? (S3)
- ... SDA 4 mit einem noch stärker reduzierten Rollwiderstand gebaut wird, wie es einzelne Unternehmen bereits machen? (S4)
- ... in einigen Jahren der Anteil elektrisch betriebener Personenwagen 50 % beträgt (gegenüber 3 % heute), und in der Nutzungsphase entsprechend mehr Strom, aber weniger Diesel und Benzin eingesetzt wird? (S5)

3.5.1. Sensitivitätsanalysen S1 bis S4: Belageigenschaften

Die Resultate der Sensitivitätsanalysen S1 bis S4, welche direkt die Beläge betreffen, werden nachfolgend für die Wirkungskategorien UBP und Kosten grafisch dargestellt. Jede Grafik zeigt die Resultate für eine Auswertungsmethode, beginnend links mit den Resultaten der Basisszenarien und rechts davon den Resultaten der vier Sensitivitätsanalysen S1 bis S4.

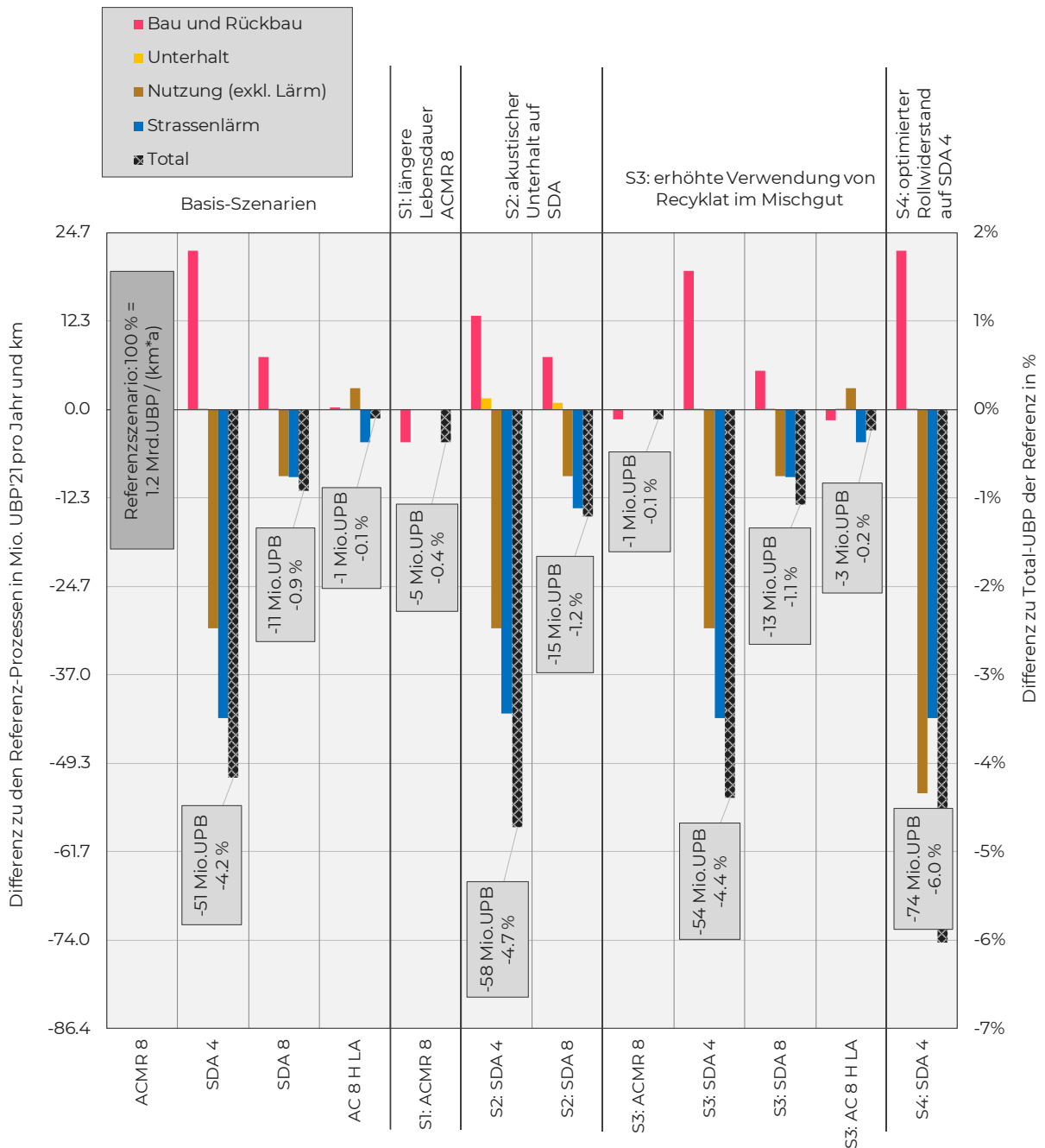
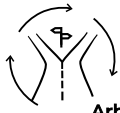


Abbildung 9: Differenzen in Umweltbelastungspunkten für die Basis-Szenarien (links) und die Sensitivitätsanalysen S1 bis S4 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8 (ganz links).

Bei der Betrachtung beider Grafiken ist zu beachten, dass jedes Resultat einer Sensitivitätsanalyse mit «ihrem» Basisszenario zu vergleichen ist:

- So ist z.B. das Resultat von S1 (zur Lebensdauer von ACMR 8) mit dem Basisszenario ACMR 8 zu vergleichen, das ganz links ohne Säulen steht, da es die «Null-Linie» bildet; es resultiert eine Verbesserung um - 0.4 % UBP (versus 0 im Basisszenario).
- Das Resultat von S4 (optimierter SDA 4, ganz rechts, - 6.0 % UBP) ist mit dem Basisszenario SDA 4 (zweiter Eintrag von links, - 4.2 %) zu vergleichen, was eine Verbesserung in S4 von - 1.8 % ausdrückt.

Die Ergebnisse in den Wirkungskategorien Treibhausgaspotential (THG) und Bedarf nicht erneuerbarer Primärenergie (nePE) zeigen darüber hinaus keine besonderen weiteren Ergebnisse und sind nur kurz diskutiert und in Anhang XII dargestellt. Die vollständigen Resultate der Sensitivitätsanalysen finden sich auch im Anhang in Tabelle 13 bis Tabelle 16.

Umweltbelastungspunkte (UBP'21)

In der Auswertung in UBP zeigen sich in Abbildung 9 folgende Erkenntnisse:

- S1: Bei einer Lebensdauer von 25 (statt 20) Jahren des Belags ACMR 8 resultiert eine leicht geringere Belastung in UBP'21 (rote Säule, - 0.4 % gegenüber Basis-ACMR 8). Dadurch schneidet ACMR 8 etwas besser ab als AC 8 H LA, ohne aber die Umwelleistung der Beläge SDA 4 und SDA 8 zu erreichen.
- S2: Ein «akustischer Unterhalt» für die Beläge SDA 4 und SDA 8 im hier angenommenen Umfang verbessert beide Beläge leicht: Bei SDA 4 führt die verlängerte Lebensdauer zu einem geringeren Bauaufwand pro Kilometer und Jahr, was den Belag ökologisch leicht weiter verbessert (insgesamt - 4.7 statt - 4.2 % in UBP'21 gegenüber ACMR 8). Auch beim SDA 8 überwiegt der Nutzen der verbesserten Lärmwirkung den Aufwand für den akustischen Unterhalt (orange Säulen) und führt zu einer noch etwas geringeren Gesamtbelastung (- 1.2 statt - 0.9 % in UBP'21 gegenüber ACMR 8).
- Ergänzende Anmerkung zur Interpretation von S1 und S2: im städtischen Raum hängt aufgrund von generellen Infrastrukturarbeiten die effektive Lebensdauer eines Strassenbelags häufig nicht rein vom Belagstyp ab.
- S3: Ein höherer Anteil Rezyklat im Mischgut wirkt, bei sonst unveränderten technischen Eigenschaften (z.B. Lebensdauer, Lärmwirkung, Rollwiderstand) auf alle Beläge leicht positiv, indem der Aufwand in der Bauphase sinkt. Die Verbesserung in UBP beträgt - 0.1 bis - 0.2 % gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8. Auf die Bauprozesse bezogen beträgt die Verbesserung - 6 bis - 7 %.
- S4: Der Einsatz eines auf Rollwiderstand weiter optimierten SDA 4 Belags zeigt in UBP'21 den stärksten Effekt aller Sensitivitätsanalysen: Sollte es

gelingen, solcherart optimierte Beläge breit einzusetzen, wäre der Effekt spürbar, mit - 6.0 statt - 4.2 % gegenüber ACMR 8. Hinzu könnte darüber hinaus noch eine zusätzlich verbesserte akustische Leistung dieser Beläge kommen.

Wirkungskategorien «Treibhausgas-Emissionen» sowie «Verbrauch nicht erneuerbarer Primärenergie»

Die Auswertungen dieser beiden Umweltaspekte ergeben keine besonderen weiteren Erkenntnisse. So zeigen Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch über alle Sensitivitätsanalysen ein sehr ähnliches oder sogar fast gleiches Bild wie die oben dargestellte Auswertung in UBP'21. Die grafische Auswertung der Sensitivitätsanalysen in CO₂eq und in MJ nicht-erneuerbarer Primärenergie zeigt Anhang XII.

Sensitivitätsanalysen der internen und externen Kosten

Die Resultate der Sensitivitätsanalysen S1 bis S4 bzgl. interner und externer Kosten zeigt Abbildung 10. Sie erlauben folgende Schlüsse:

- S1: Kostenmässig wirkt sich eine längere Lebensdauer von ACMR 8 gleichartig aus wie in UBP: ACMR 8 wird dank reduzierter interner und externer Kosten in der Bauphase günstiger und damit fast vergleichbar mit einem AC 8 H LA.
- S2: Ein zusätzlicher akustischer Unterhalt von SDA 4 und SDA 8 erweist sich aus Kostensicht als nicht lohnend:

Im Szenario SDA 4 - S2 übersteigen die Kosten für den Unterhalt (gelb) die Kosteneinsparungen aufgrund der verlängerten Lebensdauer. Zudem sinkt die mittlere Lärmwirkung leicht. Dies führt in Summe zu 0.6 % erhöhten Gesamtkosten gegenüber dem Basisszenario SDA 4.

Im Szenario SDA 8 - S2 steigen die Gesamtkosten im Vergleich zum Basisszenario SDA 8 minim: die Erhöhung der (direkten) Unterhaltskosten der öffentlichen Hand ist knapp doppelt so hoch wie Einsparung an (externen) Lärmkosten. In der Summe resultieren 0.1 % höhere Gesamtkosten gegenüber dem Basisszenario SDA 8.

In beiden Fällen steigt also der Aufwand stärker als der Nutzen.

- S3: Ein erhöhter Anteil an Rezyklat im Mischgut senkt die internen Baukosten minim, und gleichzeitig auch die aus den Bauprozessen entstehenden externen Kosten. Diese Änderung ist bei allen vier Belägen ähnlich, wenn auch schwach, sichtbar.

Zu beachten ist, dass eine unveränderte Lebensdauer der Beläge angenommen wurde.

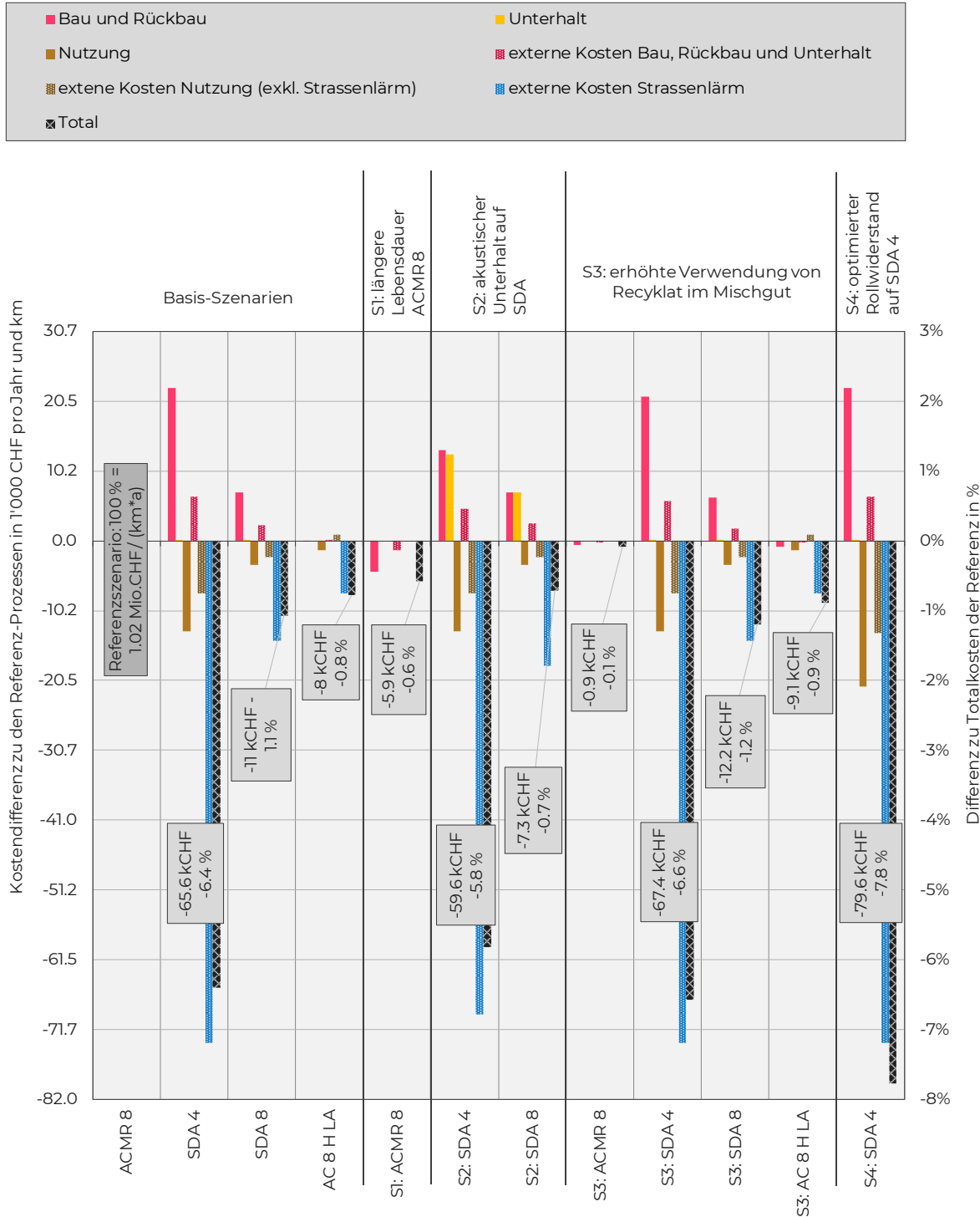
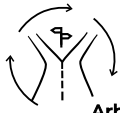


Abbildung 10: Kostendifferenzen für die Basis-Szenarien und Sensitivitätsanalysen S1 bis S4 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.

- S4: Ein weiter optimierter Rollwiderstand bei SDA 4 wirkt sich gegenüber dem Basisszenario SDA 4 auch kostenmässig rundum positiv aus: bei gleichen Baukosten sinken die verschiedenen Kosten in der Nutzung – Treibstoffverbrauch, externe Kosten von Emissionen und von Lärm. Insgesamt reduziert ein optimierter SDA 4 die Gesamtkosten um insgesamt 7.8 % gegenüber einem ACMR 8. Dies ist kostenmässig die höchste Verbesserung aller Szenarien.

3.5.2. Sensitivitätsanalyse S5: Zukunftsszenario

Die Sensitivitätsanalyse 5 berechnet die Auswirkungen gegenüber den vier Basisszenarien durch eine veränderte Fahrzeugflotte. Hier wird also geprüft, wie sich Belagsunterschiede auswirken, wenn die Fahrzeuge nicht mehr grossmehrheitlich fossil, sondern zu 50 % vollelektrisch angetrieben werden. Angenommen wird ein gegenüber heute unveränderter Strommix.

Da der Verkehrslärm bei Tempo 50 von den Pneus dominiert wird und der Wechsel von fossilem zu elektrischem Motor im hier modellierten fliessenden Verkehr annähernd keine Veränderung der akustischen Belagswirkung bewirkt (siehe Anhang X), wurde in S5 dieselbe Lärmwirkung wie in den Basisanalysen verwendet.

Zunächst ist festzuhalten, dass insgesamt die Veränderungen durch 50 % e-PW sehr gross sind. So sinken z.B. die Treibhausgasemissionen des Gesamtsystems gegenüber heute, pro km*Jahr, insgesamt um etwa ein Viertel¹². Diese Veränderung ist jedoch unabhängig von den Belagstypen. Zur Beurteilung der Strassenbeläge (und nicht des Verkehrssystems) verwenden wir in dieser S5 als Vergleichsbasis deshalb nicht einen ACMR 8 mit heutiger Fahrzeugflotte, sondern einen ACMR 8, der ebenfalls bereits mit 50 % e-PW gerechnet ist. Die Veränderung aus dem Wechsel von 3 % zu 50 % e-PW wird also hier nicht betrachtet; vielmehr wird nachstehend gezeigt, wie sich die Belagswahl bei erhöhtem Anteil e-PW auswirkt.

Bei 50 % vollelektrisch betriebenen PW (gegenüber heute 3 %) ergeben sich, gegenüber einem ACMR 8 mit ebenfalls 50 % e-PW, die in nachstehender Abbildung 11 gezeigten Veränderungen (in UBP'21, THG, nePE, Kosten):

- In Umweltbelastungspunkten UBP'21 bleibt die grobe Aussage bestehen, wonach SDA 4, SDA 8 und AC 8 H LA (in dieser Reihenfolge) die Umweltbelastung spürbar (SDA 4) respektive tendenziell (SDA 8, AC 8 H LA) senken. Prozentual sind die Verbesserungen gegenüber ACMR 8 ähnlich hoch wie im heutigen Fahrzeugmix. Durch den geringeren fossilen Energieeinsatz ist die absolute Verbesserung dementsprechend geringer.

¹² So zeigt z.B. der Vergleich der absoluten Werte in Abbildung 5 und Abbildung 11 einen Rückgang der gesamten Emissionen von gut 800 auf gut 600 t CO₂eq pro km*Jahr.

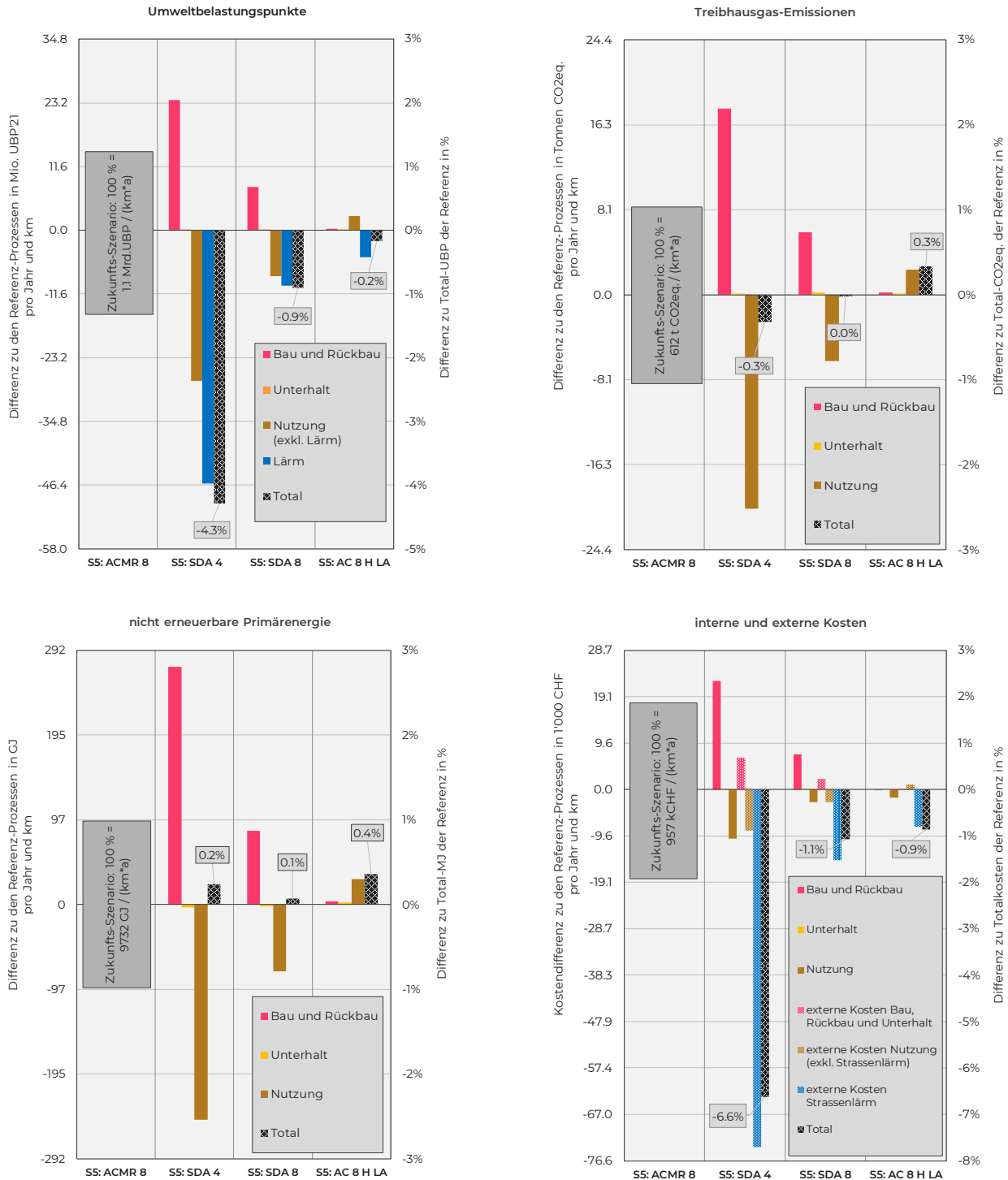
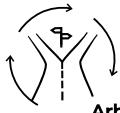
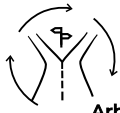


Abbildung 11: Sensitivitätsanalyse S5: erhöhter Anteil an Elektro-PW (alle Werte bezogen auf ACMR 8 - S5 mit 50 % e-PW).



- Bezüglich Treibhausgasen fallen die Veränderungen mit 50 % e-PW zwischen den Belagstypen ähnlich, aber noch geringer aus, verglichen mit dem heutigen Fahrzeugbestand. Dies weil die Verbesserung in der Nutzung – wegen des geringeren fossilen Verbrauchs – im Vergleich zu den unveränderten Bauphasen weniger stark ins Gewicht fällt.
- Auch der Verbrauch nichterneuerbarer Energie verändert sich mit 50 % e-PW etwas anders: da e-PW mit schweizerischem Strommix effizienter sind als fossil betriebene PW, sinkt der Energieverbrauch in der Nutzung mit steigendem Anteil e-PW. Durch diesen Basiseffekt sinken die Einsparpotenziale durch Beläge mit geringerem Rollwiderstand. Dies führt dazu, dass in S5 der höhere Aufwand für Bau und Unterhalt in der Nutzungsphase auch bezüglich Energieverbrauch weniger sinkt und die Einsparungen die Aufwände nicht mehr ausgleichen können und die Alternativbeläge (ohne Lärmeffekte) sogar kleine Nachteile ausweisen. Am offensichtlichsten sichtbar ist dies bei SDA 4.
- Bezüglich Kosten verändert sich in S5 wenig gegenüber den Basisszenarien. SDA 4 senkt die Gesamtkosten in S5 um über 6 %, mit den bereits bekannten Verschiebungen zwischen den Kostenträgern. SDA 4 und AC 8 H LA senken die Gesamtkosten auch in S5 ganz leicht (ca. 1 %).

4. Würdigung der Resultate und Ausblick

In dieser Studie wurde für die Auswirkungen von lärmarmen Strassenbelägen (LAB) im Vergleich zu einem konventionellen Belag erstmals eine vollständige Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus (inkl. Nutzung der Strasse) sowie eine analoge Life Cycle Costing Analyse erstellt. Betrachtet wurden vier Belagstypen, in der Situation einer typischen innerstädtischen Hauptstrasse: ein konventioneller Belag (ACMR 8), sowie drei als lärmarm eingestufte Beläge (SDA 4, SDA 8, und AC 8 H LA).

Betrachtet wurden als «Gesamtsystem Strassenbelag» alle im Zusammenhang mit dem Strassenbelag relevanten Prozesse, vom Bau über den Unterhalt, die Nutzung (in Form von Treibstoff- bzw. Energieverbrauch, Reifenabrieb und Strassenlärm), bis hin zur Entsorgung resp. Recycling der Strassenbeläge. Die Studie verwendet Messdaten zur Strassenlärmemission und zum Rollwiderstand (als Grundlage für die Beeinflussung des Energieverbrauchs bei der Befahrung der Strasse), Literaturdaten zum Bau und zur Entsorgung, spezifisch neu erhobene Daten für die Unterhaltprozesse der Strasse, und als Hintergrunddaten die LCA-Datenbank des Bundes (UVEK:2023). In der Studie werden die ökologische Dimension in Form von Umweltbelastungspunkten UBP'21, Klimawirkung und nicht erneuerbarem Energiebedarf ausgewiesen. Die ökonomische Dimension wurde mittels direkt und indirekt anfallender Kosten (interne und externe Kosten) ausgewertet.

Für die vier Belagstypen ergeben sich bezüglich Klimawirkung (gemessen in CO₂-Äquivalenten) und bezüglich Energieverbrauch (nicht-erneuerbarer Primärenergie) insgesamt nur geringe Unterschiede:

In CO₂eq resultieren geringe Vorteile zu Gunsten von SDA 4 und marginale Vorteile für SDA 8. Bezüglich Energieverbrauch ergeben sich marginale Vorteile für SDA 4 und SDA 8. Der Belag AC 8 H LA weist rechnerisch marginal höhere Werte für CO₂eq und Energie aus, doch ist dieses Resultat angesichts der noch geringen Anzahl Messwerte mit mehr Unsicherheit behaftet. Diese letztlich kleinen Unterschiede bei CO₂eq und Energie entstehen, weil die erhöhten Bau-Aufwände für LAB (aufgrund ihrer kürzeren Lebensdauer) durch Treibstoffeinsparungen in der Nutzungsphase in der Summe mehr als kompensiert werden. In den zwei Umweltkategorien Klima und Energie, in denen Lärm nicht berücksichtigt wird, sind LAB also vergleichbar mit einem ACMR 8 Belag: LAB sind hier nicht besser, aber auch nicht schlechter.

Anders sieht das Resultat der ökologisch umfassenden Auswertung in Umweltbelastungspunkten (UBP'21) aus: auch hier heben sich Mehraufwand bei Bau und Unterhalt und Minderbelastung im Treibstoffverbrauch der Nutzung ungefähr auf, doch führt die Lärminderung zu einer klaren Verbesserung der Umweltleistung der LAB, insbesondere des SDA 4. So weist ein SDA 4 über den ganzen Lebenszyklus eine um 4 % geringere Umweltbelastung (in UBP'21) auf. Eine Sensitivitätsanalyse zu

SDA 4 zeigte weiteres Verbesserungspotential, durch Rollwiderstandsoptimierungen, wie sie bei gewissen SDA 4 Belagstypen bereits gemessen wurden.

Beim SDA 8 und beim noch relativ neuen AC 8 H LA sind die Unterschiede zum ACMR 8 in UBP'21 strukturell ähnlich, aber weniger ausgeprägt. Die akustische Alterung wurde hier, wie auch der Rollwiderstand, auf Basis der Datenlage 2022 bestmöglich hergeleitet. Für AC 8 H LA werden erst künftige, längere Messreihen zeigen, ob und in welchem Masse eine erhoffte bessere akustische Alterung eintritt.

Die Reduktionen des Strassenlärms ergeben insgesamt die relevantesten Unterschiede zwischen den Belagstypen. Dies gilt sowohl bei der Berechnung in Umweltbelastungspunkten UBP'21 und auch in der Gesamtkostenbetrachtung, in welcher die Kostenunterschiede von den externen (Umwelt-)Kosten dominiert werden.

In dieser Studie hat sich der Rollwiderstand in der Nutzungsphase - respektive seine Veränderung je nach Belag - als wichtiger Parameter erwiesen: Diese Rollwiderstandsänderungen wirken sich in der Ökobilanz in ähnlichen Grössenordnungen aus, wie die kürzere Lebenszeit und der damit einhergehenden häufigeren Bautätigkeit bei den LAB.

Ein ähnliches Bild zeigen auch die Lebenszyklus-Kosten: Die kürzere Lebensdauer der LAB bedeutet für die Bauherren höhere Baukosten, während durch den geringeren Rollwiderstand für die Strassennutzer tiefere Kosten aus reduziertem Treibstoffverbrauch und weniger Reifenabrieb entstehen. Darüber hinaus entstehen für die Gesellschaft als Ganzes ebenfalls tiefere externe Kosten aus der reduzierten Lärm- und Schadstoffbelastung. Bei der Gesamtbetrachtung von internen und externen Kosten entstehen so Vorteile zu Gunsten der LAB.

In der Kostensicht ist die grösste gemessene Veränderung durch LAB eine Senkung der externen Kosten von insgesamt fast 80'000 CHF pro Kilometer und Jahr durch SDA 4 (Sensitivitätsanalyse S4).

Externe Kosten aus der Nutzung einer Strasse sind stark von der Anzahl betroffener Personen sowie von der gefahrenen Fahrzeugkilometer beeinflusst. Deshalb sind die externen Kosten pro Kilometer Strasse, respektive deren Veränderung durch LAB, in der vorliegenden Auswertung einer mittelmässig stark befahrenen Strasse innerorts höher als z.B. bei einer Auswertung über das gesamte Strassennetz. Umgekehrt wären bei einer noch stärker befahrenen Strasse die externen Kosten und deren Veränderung durch LAB noch höher.

Diese gesamthafte Betrachtung aller Kostenelemente – am Markt bezahlte Kosten und externe Kosten – ergibt nebst den umweltpolitischen Resultaten auch wichtige Hinweise zur gesamtwirtschaftlichen, nationalen Optimierung im Strassenbau. Denn die Studie zeigt, dass bei solchen Strassentypen eine Optimierung der Belagwahl bezüglich Lärmwirkung (v.a. bei SDA 4) zum einen ökologisch positiv wirkt (durch sinkende UBP'21), und zum andern auf der Kostenebene bei insgesamt sinkenden Kosten zu einer Verschiebung von Kosten führt: hier zulasten der

öffentlichen Bauämter, und zugunsten von Strassenbenutzern, Strassenanwohnern (ökologisch), Vermietern (ökonomisch) und allgemeiner Öffentlichkeit.

Diese umfassende Analyse kann deshalb sowohl eine umweltpolitische als auch eine finanzpolitische Bedeutung haben. Denn die Studie zeigt, dass bei umweltrelevanten (Strassen-)Bauten nebst den direkten Kosten für die Bauherrschaft (Kanton, Gemeinde) auch die Umweltwirkung und die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten aus direkten und externen Kosten beachtet werden können, und dass diese erweiterte Betrachtung die Beurteilung von Alternativen verändern kann.

Auf die Gesamtschweiz übertragen zeigen die Resultate der Studie weiter, dass die Belagswahl über den Rollwiderstand und den resultierenden Energieverbrauch in der Nutzung der Strasse einen Beitrag zu CO₂-Reduktion und Energieeinsparung und damit zur Erreichung der Klimaziele liefern kann resp. eventuell auch liefern muss. Diese Senkung beträgt netto bis 3 % CO₂-Reduktion (im optimalen Szenario SDA 4 - S4). Sofern auch der Strassenbau klimaschonend gestaltet wird, so vergrössert sich die Nettoerduktion in SDA 4 - S4 auf über 4.5 %. Sowohl für die Nutzungsphase als auch den Bau erscheint weitere Forschung deshalb lohnend.

Gegen Abschluss der Projektarbeit tauchte die Frage auf, ob resp. wie aus der gleichzeitigen Analyse von Umweltwirkungen und Kosten die einzelnen Massnahmen auch bezüglich Ökoeffizienz beurteilt werden könnten, also bezüglich des Verhältnisses von Kosten und Umweltwirkung (resp. deren Veränderung), und welche Entscheidungshilfe dies böte - ohne dass dies im Projekt aber bereits bearbeitet werden konnte¹³.

Fünf Sensitivitätsanalysen wichtiger Parameter zeigen, dass die Beurteilung der vier Beläge im grossen Ganzen stabil sind und nicht von einzelnen Parametern übermässig beeinflusst werden:

- Die Lebensdauer des Referenzbelages hat im Rahmen der zu erwartenden Variationen überraschenderweise nur geringe Auswirkungen auf das Gesamtsystem.
- Der in der Praxis aktuell punktuell getestete akustische Unterhalt macht im Gesamtsystem nur wenig Unterschied aus, bei den Gesamtkosten zeigt sich dieser mit den getroffenen Annahmen sogar leicht unvorteilhaft.
- Der Einsatz von Rezyklat-Asphalt (RAP) - im momentan aus der Normendiskussion maximal absehbaren Rahmen - macht ebenfalls kaum einen Unterschied für das Gesamtsystem. Zur Beurteilung von Asphalt mit RAP-Anteil

¹³ Zuerst müsste geklärt werden, welche Art(en) von Ökoeffizienz beurteilt werden sollten, und zu welchem Zweck. Auch ist z.B. hier zwischen den Szenarien ACMR 8 und SDA 4 auf den ersten Blick zwischen Umweltwirkung und Gesamtkosten kein Trade-off («das eine wird besser, das andere schlechter») festzustellen. Andererseits besteht ein Trade-off, wenn nebst der Umweltwirkung (in UBP) einzig die internen (direkten) Kosten betrachtet werden, oder wenn die Beläge einzig aus Sicht der Budgets der öffentlichen Hand berechnet werden.

wären resp. sind weitere Messreihen zum Rollwiderstand und erreichten Lärmwirkung erforderlich, um die Ergebnisse zu schärfen.

- Praktische Erfahrungen mit SDA 4 Belägen zeigen, dass optimierte Belagsmischungen eine noch stärkere Reduktion des Rollwiderstands erlauben, was sich spürbar positiv auswirkt: Gleich hohen Umweltwirkungen und Kosten bei Bau und Unterhalt stehen tiefere Umweltbelastungen und Kosten aus der Befahrung (aus Treibstoffverbrauch, Pneuabrieb und Lärm) gegenüber. Solcherart optimierte SDA 4 Beläge ergeben die besten Resultate dieser Studie.
- Ein Zukunftsszenario für steigende E-Mobilität (mit 50 % e-PW) senkt zwar insgesamt den Treibstoffverbrauch und seine Auswirkungen. Da aber bei Tempo 50 die Rollgeräusche den Lärm dominieren, bleibt die Lärmthematik und damit die Aussagen der Basisszenarien auch bei steigender E-Mobilität relevant.

Wie präsentieren sich die vorliegenden Resultate im Vergleich mit Ergebnissen früherer Arbeiten zur (Lärm-)Beurteilung von Strassenbelägen? Der folgende kurze Blick beschreibt entsprechende Übereinstimmungen und Abweichungen, wobei zu beachten ist, dass diesen Studien auch unterschiedliche Systemdefinitionen, Betrachtungsumfänge und Referenzbeläge zugrunde liegen:

- In (Lenk 2023) wird für den Bau eines SDA 8 Belages auf einer Nationalstrasse für Herstellung, Bau und Entsorgung eine Umweltwirkung von 1.1 Mio UBP pro m Strasse und pro 24 Jahre errechnet. Dies sind gut 140 % des hier für Bau und Rückbau ausgewiesenen Wertes für den SDA 8 Belag. Angesichts der komplett unabhängigen Herleitung und im Detail abweichenden Berechnungsgrundlagen ist dies als gute Übereinstimmung zu werten.
- In (Piao, Heutschi, u. a. 2022) wird ein SMA-Belag mit einem SDA 4 Belag verglichen. Dabei werden auch Gesundheitsschäden von Strassenlärm aus der Nutzungsphase, ausgedrückt in DALY, berücksichtigt. In jener Betrachtung dominieren die von Lärm in der Nutzung verursachten DALY mit über 99 % das Gesamtergebnis, gegenüber den durch Bau- und Rückbau verursachten DALY mit <1%. In der vorliegenden Studie ist die Bedeutung von Lärm aus Nutzung (ausgedrückt in UBP'21) ebenfalls hoch, aber geringer¹⁴. Ähnlich sind in (Piao, Heutschi, u. a. 2022) gegenüber hier die Verhältnisse von DALY resp. UBP'21 des SDA 4 Belags zur jeweiligen Referenz¹⁵. Da DALY einzig die Wirkungen auf die menschliche Gesundheit abbilden, die UBP hingegen die Unerwünschtheit von Einwirkungen auf Menschen und auch auf die

¹⁴ Der UBP-Anteil aus Lärm beträgt in dieser Studie in den auch von Piao et. al. betrachten Prozessen bei ACMR 8 78 %, und bei SDA 4 46 %.

¹⁵ Das Verhältnis von Referenzbelag zu SDA 4 in DALY bzw. UBP liegt bei 176 % (Piao, DALY) bzw. 197 % (diese Studie, UBP) beim Bau, und bei 59 % bzw. 48 % beim Lärm.

nichtmenschliche Natur beurteilen, scheinen uns diese Resultate von Piao et al. und die vorliegenden Resultate klar richtungsähnlich.

- In (Piao, Waldner, u. a. 2022) werden zudem die Kosten (Bau, Unterhalt, Entsorgung, sowie die Gesundheitskosten und die Kosten aufgrund von THG-Emissionen) eines SMA- und eines SDA 4 Belags berechnet. Dabei erzielt der SDA 4 Belag um 10 % tiefere Kosten als der SMA-(Referenz-)Belag. In der vorliegenden Arbeit liegt der finanzielle Vorteil eines SDA 4 Belags, bei Betrachtung der vergleichbaren Prozesse, gegenüber der Referenz ACMR 8 bei 17 %. Auch hier kann die Übereinstimmung als hinreichend ähnlich gelten.
- Ein Vergleich mit der «PLANET»-Studie (Liechti u. a. 2016) ist wenig sinnvoll, da die Resultate aus PLANET in der vorliegenden Studie als Datengrundlage für die Bauprozesse verwendet wurden.

Bei der Interpretation der hier vorliegenden Ergebnisse ist wichtig, folgende Limitierungen zu beachten, resp. wären für genauere Beurteilungen vertiefte Abklärungen nötig:

- Die Folgen von häufigeren Baustellen (Stau, Umweg-Verkehr) resultierend aus der kürzeren Lebensdauer von LAB sind nicht berücksichtigt.
- Beim Belag AC 8 H LA liegen erst akustische Messdaten über wenige Jahre und eine vergleichsweise begrenzte Anzahl von Strecken vor. Umfangreichere Messreihen werden künftig zu geschärften Erkenntnissen führen.
- Die Messdaten zum Rollwiderstand sollten aufgrund von dessen hoher Relevanz für den Treibstoffverbrauch weiter verbessert werden. Mit mehr Messdaten kann der Zusammenhang zwischen Belagswahl und Treibstoffverbrauch sowie der Einfluss der Belagsalterung fundierter abgebildet werden.
- Die Resultate gelten für eine mittelstark befahrene Hauptverkehrsstrasse. Für eine Strasse mit erheblich weniger Verkehr sind die Auswirkungen in der Nutzungsphase geringer, und für eine Strasse mit mehr Verkehr werden die Resultate noch ausgeprägter sein. Beides wird das Gesamtbild beeinflussen.
- Alternative Lärmschutzmassnahmen, wie Temporeduktionen und Lärmschutzwände oder -fenster, wurden nicht berücksichtigt. Solche alternativen Massnahmen dienen wohl dem Lärmschutz, sie sind aber nicht fix mit der Auswahl eines Strassenbelags verbunden. Zur Einhaltung von gesetzlichen Vorgaben kann eine Kombination von Belagswahl und weiteren Massnahmen aber sinnvoll sein, und die Umwelt- und Kostenwirksamkeit anderer Lärmschutzmassnahmen kann in derselben Art wie hier angewandt analysiert werden.

Die Studie zeigt, wie bedeutend die Nutzungsphase einer Strasse in der Ökobilanz und in der Gesamtkostenanalyse im Strassenverkehr ist, und dass es sinnvoll ist, bei

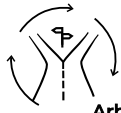
der Wahl des Strassenbelags dessen Auswirkung auf die Nutzungsphase mitzubetrachten.

Die Studie zeigt weiter, dass Lärmschutz via Belagwahl für stark befahrene Strassen grundsätzlich sinnvoll ist. Da diese Aussage auch in der (wenn auch grob gehaltenen) Sensitivitätsanalyse mit 50 % elektrisch betriebenen PKW erhalten bleibt, gilt diese Empfehlung auch für die mittlere Zukunft.

Denkbar wäre, LAB und andere Lärmschutzmassnahmen in Bezug auf ihre ökologischen Wirkungen zu vergleichen. Da andere Massnahmen einzeln angewendet und auch mit LAB kombiniert werden können, wäre angezeigt, hierbei konkrete Szenarien zu definieren, wie beispielsweise die Belagwahl in Kombination mit und ohne Temporeduktion, respektive mit einem definierten Lärmziel.

Aufgrund der erhaltenen Resultate stellen sich noch weitere Fragen, zum Beispiel wie sich eine Variierung der Nutzungsintensität, Bevölkerungsdichte oder Lärmbetroffenheit auf die Resultate auswirken würden. Hierzu wären weitere Sensitivitätsanalysen interessant und aufschlussreich.

Darüber hinaus können die Resultate dieser Studie auch in die nationale Klima- und Umweltpolitik einfliessen. Zwar sind 3 % sinkende Klimagas-Emissionen (mit den heute besten SDA 4 Varianten) nur ein kleiner Beitrag zu einer «Netto-Null-Schweiz», doch zeigen die Resultate der «50 %-e-PW»-Sensitivitätsanalyse, dass die Belagwahl in der Netto-Null-Diskussion auch künftig Einfluss haben kann. Dies insbesondere, da die besten Beläge gesamtökologisch eine Verbesserung von 6 % oder noch mehr ergeben können.



Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse

Anhänge

I. Glossar

Abkürzungen

CO ₂ eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente, Einheit zur Angabe des Treibhausgaspotentials, bzw. von Treibhausgas-Emissionen
DALY	Disability-Adjusted Life Years, Mass zur vergleichenden Beurteilung von Schäden an menschlicher Gesundheit
DTV	daily traffic volume, Anzahl der Fahrzeuge, welche pro Tag eine Strasse befahren
e-PW	Personenwagen, vollelektrisch angetrieben
LAB	lärmarmer Strassenbelag; Definition BAFU: «Ein Belag gilt als «lärmmarm», wenn die Lärmreduktion im Vergleich zu einem neutralen Referenzbelag, am Ende der Nutzungsdauer mindestens 1 Dezibel beträgt. Lärmarme Beläge innerorts können den Lärm im Neuzustand um etwa 8 Dezibel, am Ende der Nutzungsdauer um rund 3 Dezibel mindern.» (Bezogen auf N ₂ -Anteil von 8 %)
LCA	Life Cycle Assessment (Deutsch: Ökobilanz)
LCC	Life Cycle Costing
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (methodische Beurteilung von Umwelteinwirkungen in einer LCA)
L _{den}	Tag-Abend-Nacht-Lärmindex über 24 Stunden zur Bewertung der allgemeinen Lärmbelästigung
LKW	Lastkraftwagen
L _r	Beurteilungspegel für Lärmimmissionen zur Kennzeichnung der auf einen Ort wirkenden Schallimmission während jeder Beurteilungszeit
MJ	Mega-Joule, Einheit zur Angabe des Energieverbrauchs, bzw. MJe _q für Mega-Joule-Äquivalente (MJ wird in dieser Studie gleichbedeutend mit MJe _q verwendet) entsprechend auch GJ für Giga-Joule, 1 GJ = 1000 MJ

MPD	mittlere Profiltiefe («Mean Profile Depth»), Mass zur Oberflächentextur einer Strasse
MV	Mischverkehr, z.B. MV6: Mischverkehr mit 6 % N2-Anteil
N2-Anteil	Schwerverkehrsanteil, angegeben in Prozent vom Gesamtverkehrsaufkommen
nePE	nicht erneuerbare Primärenergie
NOx	Stickoxide
PE	Primärenergie
PM10	Feinstaub, «particulate matter» mit Durchmesser < 10 Mikrometer
PmB	Polymer-modifiziertes Bitumen
PW	Personenwagen
RAP	Ausbau-Asphaltgranulat für die Wiederverwertung in Mischgut mit Rezyklat («reclaimed asphalt pavement»)
SDA	semidichter Asphalt, verbreiteter Typ lärmarmen Strassenbeläge
sonROAD18	aktuell gültiges Schweizer Strassenlärm Berechnungsmodell
StL-86+	bis 2022 gültiges Schweizer Strassenlärm Berechnungsmodell
THG	Treibhausgaspotential
UBP	Umweltbelastungspunkte (Mass zur Gewichtung von Umwelteinwirkungen; die aktuelle Methode UBP'21 stammt aus 2021)

Prozesse

B1	Bau Binderschicht
B2	Bau Deckschicht
B3	End-of-Life (Rückbau, Recycling und Entsorgung)

U1	Strassenreinigung
U2	Winterdienst
U3	Markierung
U4	Belagsreparaturen
U5	Hochdruckreinigung (akustischer Unterhalt)
U6	Grinding (akustischer Unterhalt)
N1	Nutzung: Treibstoffverbrauch
N2	Nutzung: Lärm
N3	Nutzung: Reifenabrieb

Sensitivitätsanalysen

S1	Verlängerte Lebensdauer für Belag ACMR 8
S2	Akustischer Unterhalt für Beläge SDA 4 und SDA 8
S3	Erhöhter Anteil von Recyclingasphalt in allen Mischgütern
S4	Optimierter Rollwiderstand auf Belag SDA 4
S5	Zukunftsszenario erhöhter Anteil von Elektro-PW

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modell der betrachteten Prozessgruppen und Abläufe, inkl. Systemabgrenzung.....	25
Abbildung 2: Die vier Phasen einer Ökobilanz (LCA) gemäss ISO 14040.....	42
Abbildung 3: Ergebnisse für die vier Basisszenarien in den vier Wirkungskategorien Umweltbelastungspunkte, Treibhausgaspotential, nicht erneuerbare Primärenergie, sowie interne und externe Kosten, je pro Jahr und Kilometer Strasse.....	46
Abbildung 4: Differenzen der Umweltbelastungspunkte gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.....	51
Abbildung 5: Differenzen der Treibhausgas-Emissionen gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.....	52
Abbildung 6: Differenzen des Verbrauchs nicht erneuerbarer Primärenergie gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.....	53
Abbildung 7: Interne, externe und totale Kosten pro Jahr und Kilometer Strasse für die vier Basisszenarien.	55
Abbildung 8: Kostendifferenzen gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.....	58
Abbildung 9: Differenzen in Umweltbelastungspunkten für die Basis-Szenarien (links) und die Sensitivitätsanalysen S1 bis S4 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8 (ganz links).....	60
Abbildung 10: Kostendifferenzen für die Basis-Szenarien und Sensitivitätsanalysen S1 bis S4 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.....	63
Abbildung 11: Sensitivitätsanalyse S5: erhöhter Anteil an Elektro-PW (alle Werte bezogen auf ACMR 8 - S5 mit 50 % e-PW).....	65
Abbildung 12: Akustisches Alterungsmodell für das Basisszenario ACMR 8.....	96
Abbildung 13: Akustisches Alterungsmodell für das Basisszenario SDA 4.	97
Abbildung 14: Akustisches Alterungsmodell für das Basisszenario SDA 8.	98
Abbildung 15: Akustisches Alterungsmodell für das Basisszenario AC 8 H LA.	99
Abbildung 16: Links: Verteilung der Anwohner von einem Kilometer Kantonsstrasse innerorts in Abhängigkeit der Lden-Klasse. Rechts: Verteilung der Wohnungen an einem Kilometer Kantonsstrasse innerorts in Abhängigkeit der Lr-Nacht-Klasse.....	102

Abbildung 17: Differenzen der Treibhausgas-Emissionen für die Basis-Szenarien und Sensitivitätsanalysen S1 bis S4 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8. 110

Abbildung 18: Differenzen des Verbrauchs an nicht erneuerbarer Primärenergie für die Basis-Szenarien und Sensitivitätsanalysen S1 bis S4 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8. 111

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der Sensitivitätsanalysen S1 bis S5 und die dadurch betroffenen Prozesse und Beläge.....	28
Tabelle 2:	Angenommene Lebensdauer der Deck- und Binderschicht für die vier Basis-Szenarien, sowie die Sensitivitätsanalysen S1 und S2 mit verlängerter Lebensdauer.....	34
Tabelle 3:	Rollwiderstandsänderung in Abhängigkeit der Deckschicht und der entsprechend modellierte Änderung des Treibstoff- bzw. Energieverbrauchs in Abhängigkeit von Fahrzeug-Gewicht und Antriebsart.....	37
Tabelle 4:	Lärmwirkung gegenüber StL-86+ für die vier Basis-Szenarien und die Sensitivitätsanalyse S2 mit akustischem Unterhalt auf SDA-Belägen.....	39
Tabelle 5:	Änderung der mittleren Profiltiefe (MPD) und damit dem Reifenabrieb in Abhängigkeit des Strassenbelags für die vier Basis-Szenarien... ..	40
Tabelle 6:	Zusammenfassung der Resultate der vier Basisszenarien je Prozessgruppe und Wirkungskategorie.	46
Tabelle 7:	Interne und externe Kosten (pro Jahr und Kilometer Strasse) für die vier Basisszenarien, aufgeschlüsselt nach Kostenträger der internen Kosten sowie nach Kostenquelle der externen Kosten.....	56
Tabelle 8:	Detailinformationen und Rezepturen der verschiedenen Beläge und Mischgüter für die vier verschiedenen Deckschichten und die darunterliegende Binderschicht.	93
Tabelle 9:	Stichprobenbeschreibung und Datengrundlage zum Rollwiderstand und zur MPD. Daraus abgeleitet sind die Änderungen von Treibstoff- bzw. Energieverbrauch sowie des Reifenabriebs.	106
Tabelle 10:	Verkehrszusammensetzung nach Antriebsart als prozentualer Anteil des totalen Verkehrsaufkommens (bzw. im Klammern an Gesamt-PW und Gesamt-LKW Menge) für die Basisszenarien und Sensitivitätsanalyse S5.	108
Tabelle 11:	Übersicht der für die LCA-Berechnung je Prozess verwendeten Modellannahmen und Parameter mit der jeweiligen Datenquelle.	112
Tabelle 12:	Übersicht der für die LCC-Berechnung je Prozess enthaltenen Modellannahmen und Parameter mit der jeweiligen Datenquelle.	118
Tabelle 13:	Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien und Sensitivitätsanalysen in der Wirkungskategorie Umweltbelastungspunkte nach der Methode der ökologischen Knappheit.	124

Tabelle 14: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien und Sensitivitätsanalysen in der Wirkungskategorie Treibhausgas-Emissionen. ..125

Tabelle 15: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien und Sensitivitätsanalysen in der Wirkungskategorie nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf.....126

Tabelle 16: Absolutwerte der internen und externen Lebenszykluskosten.127

IV. Literaturverzeichnis

- BFE, Bundesamt für Energie. 2022. "Energieverbrauch und Energieeffizienz der neuen Personenwagen und leichten Nutzfahrzeuge 2021".
<https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/72166.pdf>.
- BFS, Bundesamt für Statistik. 2022. "Strassenfahrzeugbestand (MFZ)". 2022.
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/erhebungen/mfz.html>.
- Bundesamt für Strassen (ASTRA) und Bundesamt für Umwelt (BAFU), und Grolimund & Partner AG, Bern. 2006. "Leitfaden Strassenlärm Anhang 1a: Bestimmung von akustischen Belagskennwerten als Grundlage für den Leitfaden BUWAL / ASTRA".
- BUWAL. 1987. "Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm, Teil 1 Bedienungsanleitung zum Computerprogramm StL-86", Nr. 60.
- Catillaz, Andreas, und Fredy Fischer. 2018. "Lärmbelastung in der Schweiz". BAFU, Bundesamt für Umwelt.
- EMPA. Version 1.7. "sonROAD18 Webtool". Version 1.7. <https://son-road18.empa.ch/Default.aspx>.
- EnergieSchweiz. "Energieeffizienz E-Autos". EnergieSchweiz. <https://www.energieschweiz.ch/energieeffizienz/>.
- Frischknecht, Rolf, Luana Krebs, Fredy Dinkel, Thomas Kägi, Cornelia Stettler, Mischa Zschokke, Arthur Braunschweig, Markus Ahmadi, René Itten, und Matthias Stucki. 2021. "Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit". 2121. Umwelt-Wissen. BAFU, Bundesamt für Umwelt.
- Grolimund + Partner AG. 2020. "Akustik der Strassenbeläge - Grundlagen, Erfahrungen und Praxis des Kantons Aargau", Nr. 1.0.
- Heutschi, Kurt, und Barbara Locher. 2018. "sonROAD18, Berechnungsmodell für Strassenlärm". Empa. www.bafu.admin.ch/sonroad18.
- IMP. 2021. "Handbuch Bituminöser Strassenbau und Brückenabdichtungen".
- INFRAS. "HBEFA 4.2 (Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs)".
<https://www.hbefa.net/de/software#online-version>.
- ISO 11819. 2017. "ISO 11819-2, Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method (ISO 11819-2:2017)".
- ISO 14040. 2014. "ISO 14040:2006, Umweltmanagement, Ökobilanz, Grundsätze Und Rahmenbedingungen".

- ISO 14044. 2014. "ISO 14044:2006, Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines".
- ISO 28580. 2018. "ISO 28580:2018 Passenger car, truck and bus tyre rolling resistance measurement method — Single point test and correlation of measurement results".
- Justen, Andreas, Raphael Ancel, Nicole Mathys, und Christian Schiller. 2022. "Schweizerische Verkehrsperspektiven 2050". ARE, Bundesamt für Raumentwicklung.
- Kanton Solothurn, Amt für Verkehr und Tiefbau. 2022. "Richtangaben Belagsaufbau (Asphaltbelag)".
- Kytzia, Susanne, und Thomas Pohl. 2021. "Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen". *Strasse und Autobahn*, 641–52.
- Lenk, Joël. 2023. "Ökobilanz (LCA) von Gussasphalt als Deckschicht auf Schweizer Nationalstrassen". BFH.
- Liechti, Jürg, Annina Gaschen, Mathias Breimesser, Christian Angst, Fabrizio Gorla, Lukas Boesiger, und Andreas Bieder. 2016. "Forschungspaket PLANET EP2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten". Schweizer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
- Müri Leupp, Ruth, Rappl Ingrid, Andreas Bröhl, Urs Walker, Fredy Fischer, und Ingold Kirk. 2021. "Ruhe bitte!" Zürcher Kantonalbank.
- Piao, Zhengyin. 2022. "Urban Mining for Low-Noise Urban Roads". ETH Zürich.
- Piao, Zhengyin, Kurt Heutschi, Reto Pieren, Peter Mikhailenko, Lily D. Poulidakos, und Stefanie Hellweg. 2022. "Environmental trade-offs for using low-noise pavements: Life cycle assessment with noise considerations". *Science of The Total Environment*, Nr. 842.
- Piao, Zhengyin, Urs Waldner, Kurt Heutschi, Lily D. Poulidakos, und Stefanie Hellweg. 2022. "Modified life cycle assessment for Low-Noise urban roads including acoustics and monetarization". *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 112: 103475.
- Pischinger, Stefan, und Ulrich Seifert. 2021. "Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik".
- Sandberg, Ulf, und Jerzy A. Ejsmont. 2002. "Tyre/road noise: reference book".
- Schlatter, Felix, Bühlmann, Erik, Angst, Christian, Huber, Liliane, und Balmer, Tobias. 2021. "Belagsunterhaltmassnahmen Kanton Aargau, Ergebnisbericht Fräsmassnahmen SDA 4-12/SDA 4-16". Grolimund + Partner AG.
- Schlatter, Felix, Erik Bühlmann, und Johannes Schindler. 2021. "Rollwiderstand auf lärmarmen Belägen in der Schweiz". Grolimund + Partner AG.

- Schlatter, Felix, Marc Delaby, und Fabrice Collaud. 2023. "Präventive Reinigung von lärm mindernden Belägen – Erfahrungsbericht nach sechs Jahren im Kanton Freiburg". *Strasse & Verkehr*.
- Schweizer, Daniel, Erik Bühlmann, Tina Saurer, Juhani Mercuriali, Dejan Milo, Michael Strickler, und Andreas Stöcklin. 2023. "Noise emissions: What to expect from electric vehicles compared to combustion vehicles?" In *ICSV29, Prague*.
- SR 814.600. 2015. "Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) SR 814.600".
- Staubli, Richard, Jennifer Dreyer, und Marion Rutsche. 2013. "Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärm armer Beläge". ASTRA, Bundesamt für Strassen.
- Steiner, Michele. 2020. "Mikroplastik: Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer". wst21.
- Steiner, Rolf, und Tobias Frick. 2020. "Bau Praxis Band 2, Der Tief- und Strassenbau".
- TCS, Touring Club Schweiz. "TCS-Sommerreifentest 2023".
- UVEK:2023. BAFU (Hrsg). UVEK Ökobilanzdatenbestand 2023 (weiterentwickelt aus dem Ökobilanzdatenbestand UVEK:2018, DQRv2:2018). Arbeitsversion vom BAFU im zur Verfügung gestellt für diese BAFU-Studie von pierryves.padey@bafu.admin.ch, via Greendelta (Berlin) für Software openLCA, Juli 2023.
- Verein Mobitool. 2023. "mobitool-Faktoren v3.0". <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v3-0-25.html>.
- VSS 40 430. 2022. "Walzasphalt; Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten".
- VSS 40 436. 2022. "Semidichtes Mischgut; Festlegungen und Anforderungen".
- VSS 41 828. 2022. "Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Externe Effekte im Bereich Umwelt und Gesundheit".
- wdk. 2020. "Mikroplastik in der Umwelt Reifen- und Straßenabrieb". wdk, Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e. V.

V. Dank

Nebst den im Impressum genannten Projektpartnern danken wir folgenden Personen, welche für diese Studie wertvolle Informationen beigesteuert haben:

Interviewpartner:

- Tobias Balmer, Weibel AG
- Lukas Rohrbach, Tiefbauamt Kanton Bern
- Stefano Bradanini, Tiefbauamt Kanton Aargau
- Olga Paperna, Tiefbauamt Kanton Aargau
- Urs Schellenberg, Baudirektion Kanton Zürich
- Manuel Wyss, System-Alpenluft AG, Münchenbuchsee
- R. Bärtschi, Pneu Fahrni AG, Niederwangen

Autoren von wichtigen Datenquellen:

- Datenauszug sonBASE: Andreas Catillaz, BAFU
- Grundlagedaten Bauphase: Studie PLANET EP 2 (Liechti u. a. 2016)
- Grundlagedaten Bauphase, Methodik Lärmbelastung: Dissertation Zhengyin Piao (Piao 2022)

Für die Mitarbeit bei Datenabfragen und -aufbereitung:

- Daniel Schweizer, Grolimund+Partner AG
- Björn Probst, Grolimund+Partner AG
- Manuel Kunz, Grolimund+Partner AG

VI. Critical Review



Externer Review

Lärmarme Strassenbeläge - Ökobilanz und Lebenszykluskosten

Im Auftrag des Bundesamtes für
Umwelt BAFU





Inhalt:	Externer Review der Studie "Lärmarme Strassenbeläge – Ökobilanz und Lebenszykluskosten", durchgeführt von der Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU
Datum:	26.01.2024
Auftraggeber:	Pierryses Padey Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern
Studienautoren:	Johannes Schindler Grolimund und Partner AG, Zürich Arthur Braunschweig E2 Management Consulting AG, Zürich Rolf Huwyler HK Partners AG, Bern Erik Bühlmann Grolimund und Partner AG, Zürich
Reviewer:	Andy Eigenmann Stiftung myclimate, Zürich

Stiftung myclimate
Pfungstweidstrasse 10
8005 Zürich
T +41 44 500 43 50
info@myclimate.org
www.myclimate.org



Inhalt

1 Hintergrund	2
2 Überprüfte Inhalte	2
3 Richtlinien	2
4 Review	3
4.1 Vollständigkeit der Dokumentation	3
4.2 Konsistenz mit den Qualitätsrichtlinien	4
4.3 Plausibilitätsprüfung der Sachbilanzdaten	4
4.4 Vollständigkeit der Inputs und Outputs	5
4.5 Mathematische Korrektheit der Berechnungen	5
5 Fazit des Reviewer	6



1 Hintergrund

Das Bundesamt für Umwelt BAFU und die Tiefbauämter der Kantone Zürich, Aargau und St. Gallen haben die Arbeitsgemeinschaft Lärmarme Strassenbeläge beauftragt, eine Ökobilanz und Lebenskostenanalyse für lärmarme Strassenbeläge (LAB) durchzuführen.

Diese Studie dient zur Klärung der Fragestellung, ob LAB aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht vorteilhafter sind als konventionelle Belagstechnologien. Zudem werden die daraus entstehenden Inventardaten nachfolgend in den UVEK-Ökobilanzdatenbestand aufgenommen.

Betrachtet wurden alle Phasen im Lebenszyklus der Beläge, vom Bau, über die Nutzung, bis hin zur Entsorgung. In der Nutzungsphase wurden auch die Auswirkungen des Belages auf die Fahrzeuge mit einbezogen. Zusätzlich zur Basisanalyse sind mehrere Sensitivitätsanalysen durchgeführt worden, um den Einfluss verschiedener Parameter zu beurteilen.

2 Überprüfte Inhalte

Der durchgeführte Review basiert auf den folgenden Dokumenten und Daten, welche durch Arthur Braunschweig von E2 Management Consulting AG zur Verfügung gestellt wurden:

- Bericht «Lärmarme Strassenbeläge – Ökobilanz und Lebenszykluskosten, Schlussbericht Forschungsprojekt» vom 22. Dezember 2023
- Alle mit Hilfe der Ökobilanz-Software OpenLCA neu erstellten Inventare, basierend auf der Hintergrunddatenbank UVEK 2023¹.

3 Richtlinien

Der Review der vorliegenden Studie orientiert sich am ecoinvent Bericht "Overview and Methodology. Data v2.0"², insbesondere den in Kapitel 9.4 aufgeführten Überprüfungsgrundsätzen:

Vollständigkeit der Dokumentation: Die modellierten Inventare sollten im Bericht beschrieben werden, und alle notwendigen Metainformationen und Elementarflüsse sollten für jeden Datensatz verfügbar sein.

Konsistenz mit den Qualitätsrichtlinien: Es wird geprüft, ob die Prozesse gemäss den Qualitätsrichtlinien modelliert wurden. Die Qualitätsrichtlinien umfassen z.B. die Art der Berechnungen, Abschätzungen und Annäherungen.

Plausibilitätsprüfung der Sachbilanzdaten: Ausgewählte Input- und Outputs werden auf Plausibilität geprüft.

¹ UVEK Ökobilanzdatenbestand 2023, Bundesamt für Umwelt BAFU (2023). Arbeitsversion vom BAFU im zur Verfügung gestellt für die Studie.

² Frischknecht, R., & Jungbluth, N. (2007). Overview and Methodology. Data v2.0. ecoinvent report no. 1. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.



Vollständigkeit der Inputs und Outputs: Die Vollständigkeit der Flüsse basiert auf dem Umwelt- und Fachwissen der überprüfenden Person. Die Reviewer sind nicht notwendigerweise technische Experten für die geprüften Prozesse. Falls erforderlich, werden sie von der für den Bericht verantwortlichen Person unterstützt.

Mathematische Korrektheit der Berechnungen: Ausgewählte Inputs und Outputs werden auf ihre mathematische Korrektheit hin überprüft, z.B. die Inputs der Transportleistungen, die Abwärme oder die CO₂-Emissionen.

Darüber hinaus wurde auch überprüft, ob die Studie dem ISO-Standard 14044³ für Ökobilanzierung entspricht. Als Grundlage diente dabei das in Kapitel 6 aufgeführten Vorgehen für eine kritische Prüfung.

4 Review

4.1 Vollständigkeit der Dokumentation

Der vorliegende Studienbericht ist sehr detailliert und gut dokumentiert. Der Hintergrund der Studie sowie das Ziel und der Umfang sind klar beschrieben. Alle betrachteten Strassenbeläge, deren Materialzusammensetzung und Eigenschaften (z.B. Lärmwirkung und Rollwiderstand), sowie die Auswirkungen auf davon abhängige Parameter (z.B. Energieverbrauch der Fahrzeuge) werden ausführlich beschrieben. Auch die unterschiedlichen Sensitivitätsanalysen sind klar definiert und dokumentiert.

Die verwendete funktionale Einheit und die Systemgrenzen der Studie werden verständlich beschrieben.

Die für die Studie neu erstellten Inventare werden beschrieben. Die Beschreibung ist ausführlich und listet alle verwendeten Daten, deren Quellen, sowie die getroffenen Annahmen auf. Darüber hinaus werden weitere Datenquellen, die zur Plausibilitätsprüfung herangezogen wurden, aufgeführt und die Unterschiede zu den in der Studie verwendeten Daten erläutert. Dies erlaubt einerseits einen sehr guten Überblick, und ermöglicht zum anderen, die Hintergrunddaten der Studie in einen Kontext zu stellen. Darüber hinaus sind auch die Annahmen, die getroffen werden mussten um Datenlücken in den Inventaren zu füllen, gut dokumentiert.

Die Ergebnisse der Studie sind alle tabellarisch aufgelistet sowie in grafischer Form dargestellt, was einen Vergleich der verschiedenen Produktvarianten erleichtert. Die Diskussion geht auf die Ergebnisse ein, analysiert die verschiedenen Lebensphasen und stellt sie in einen Kontext.

Zusammenfassung

Die Dokumentation sehr detailliert. Sie ist nachvollziehbar, transparent und deckt alle Bereiche der Studie ab. Sie erfüllt daher das Kriterium der Vollständigkeit.

³ DIN EN ISO 14044:2021. Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.



4.2 Konsistenz mit den Qualitätsrichtlinien

Die Qualitätsrichtlinien umfassen die Überprüfung der zugrunde liegenden Systemgrenzen und der Modellierungsprinzipien, die Dokumentation der Elementarflüsse, der Umgang mit Multi-Output- und Allokationsregeln sowie die Berücksichtigung von Unsicherheiten.

Der zugrundeliegenden Systemgrenzen wurden für diese Studie angemessen gewählt. Der geografische Fokus liegt auf der Schweiz, da die relevanten Prozesse im Inland stattfinden. Bei den verwendeten Basisdaten wurde darauf geachtet, dass die aktuellsten verfügbaren Quellen verwendet wurden, bei der UVEK-Datenbank konnte sogar auf die aktuellste, noch nicht veröffentlichte Version zugegriffen werden. Bei der Modellierung von Datenlücken und Unsicherheiten wurden, falls vorhanden, Vergleichswerte verwendet oder es wurde ein Ansatz gewählt, der auf realen Gegebenheiten oder begründeten Annahmen der Fachexpert/Innen in der Begleitgruppe beruht.

Alle Elementarflüsse, die neu modelliert wurden, sind im Studienbericht vermerkt. Auch die Einteilung in die verschiedenen Kategorien und Unterkategorien wurde korrekt vorgenommen. Wurden Änderungen an Elementarflüssen in bestehenden Datenbankinventaren vorgenommen, ist dies in den Inventaren dokumentiert und somit nachvollziehbar.

Multi-Output-Prozesse sind in dieser Studie nicht vorhanden und es mussten keine Zuordnungen vorgenommen werden. Bei der Modellierung des Recyclingmaterials wurde das Cut-Off-Prinzip angewandt.

In der Studie wurde keine Unsicherheitsberechnung durchgeführt. Da in den meisten Fällen nur eine Quelle für die Datengrundlage der neu erstellten Inventare zur Verfügung stand, konnte die Unsicherheit nicht quantifiziert werden. Die verwendeten Quellen weisen jedoch einen hohen Detailgrad aus, und liefern passende Grundlagen. Es kann somit von geringen Abweichungen ausgegangen werden.

Zusammenfassung

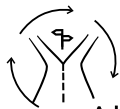
Die Studie wurde in Übereinstimmung mit den vier Bereichen des Qualitätsrichtlinien durchgeführt und erfüllt somit diese Kriterien.

4.3 Plausibilitätsprüfung der Sachbilanzdaten

Zum einen wurde die Plausibilität der Daten in einer gemeinsamen Sitzung mit den Autoren überprüft. Die verwendeten Daten wurden überprüft, und zusätzliche Hintergrundinformationen wurden von den Autoren zur Verfügung gestellt. Eine erste Verifizierung der Inventare und Ergebnisse konnte bereits vorgenommen werden.

Zum anderen wurde eine eingehende Überprüfung des Berichtes und der neu erstellten Inventare durchgeführt. Dabei wurden die Inputs und Outputs stichprobenartig überprüft und mit anderen Quellen verglichen.

Zusammenfassung



Bei der Überprüfung wurden keine Unstimmigkeiten oder schwerwiegenden Abweichungen festgestellt. Die vorliegenden Daten sind plausibel und gut begründet. Das Kriterium der Plausibilität ist daher erfüllt.

4.4 Vollständigkeit der Inputs und Outputs

Die Inputs und Outputs resp. Elementarflüsse in der vorliegenden Studie weisen einen hohen Grad an Vollständigkeit auf. Dabei wurden die besonders relevante Phase der Nutzung umfassend betrachtet. Alle Parameter, welche durch die Nutzung der Beläge beeinflusst werden, sind in die Analyse mit einbezogen worden.

Auch die Elementarflüsse in den weiteren, weniger relevanten Lebensphasen wurden ebenfalls gut modelliert. Alle relevanten Bericht konnten abgedeckt werden.

Zusammenfassung

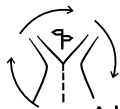
Alle relevanten Inputs und Outputs wurden vollständig erfasst und in die Studie aufgenommen. Die Analyse verfügt über einen sehr hohen Detailgrad, auch weniger relevante Bereiche wurden detailliert abgebildet. Das Validierungskriterium der Vollständigkeit der Inputs und Outputs ist somit erfüllt.

4.5 Mathematische Korrektheit der Berechnungen

Während der Plausibilitätsprüfung der Elementarflüsse in den Inventaren wurde auch eine Überprüfung der Korrektheit der Berechnungen durchgeführt. Aufgrund der hohen Anzahl an Inventaren konnten jedoch nur die wichtigsten Inventare (v.a. Hauptinventare mit allen Lebensphasen) vollständig überprüft werden. Bei den restlichen Hilfsinventaren wurde stichprobenweise überprüft.

Zusammenfassung

Bei allen Überprüfungen konnten keine Fehler festgestellt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die mathematische Grundlage der vorliegenden Studie korrekt, und somit das Kriterium erfüllt ist.



5 Fazit des Reviewer

Die vorliegende Studie erfüllt die Kriterien des ecoinvent-Leitfadens sowie der ISO-Norm und weist einen hohen Detaillierungsgrad und grosse Vollständigkeit auf. Zudem wurde sie sorgfältig durchgeführt und ist gut dokumentiert.

Während der Überprüfung wurden dem Reviewer alle notwendigen Daten und Dokumente zur Verfügung gestellt, sowie alle Fragen und Unklarheiten sofort berücksichtigt und diskutiert.

Der Reviewer geht daher davon aus, dass die erstellten Inventare in die UVEK-Datenbank aufgenommen werden können.

Zürich, 26.01.2024

Andy Eigenmann

VII. Mischgut

Tabelle 8 zeigt die gewählten Parameter und Rezepturen der fünf Belagstypen (vier Basisszenarien mit verschiedenen Deckschichten, eine Binderschicht).

Tabelle 8: Detailinformationen und Rezepturen der verschiedenen Beläge und Mischgüter für die vier verschiedenen Deckschichten und die darunterliegende Binderschicht.

Belag	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	Binderschicht
Belagstyp	ACMR 8	SDA 4-16	SDA 8-12	AC 8 H	AC B 22 S
Bindemitteltyp	PmB 45/80-65	PmB 45/80-65	PmB 45/80-65	PmB 45/80-80 oder PmB 65/105-60	PmB 45/80-50
Einbaudichte	2280 kg/m ³	2090 kg/m ³	2130 kg/m ³	2340 kg/m ³	2440 kg/m ³
Bitumenanteil	5.8 %	6.0 %	5.8 %	5.8 %	4.0 %
Kiesanteil	69.7 %	63.5 %	71.5 %	47.6 %	66.7 %
Sandanteil (inkl. Füller)	24.5 %	28.5 %	20.7 %	46.6 %	29.3 %
Anteil Kalkhydrat	0 %	2 %	2 %	0 %	0 %
Anteil RAP (Basisszenarien)	0 %	0 %	0 %	0 %	40 %
Sensitivitäts- analyse S3: Anteil RAP	20 %	20 %	20 %	30 %	60 %

Folgende Hintergrundinformationen und Quellen wurden berücksichtigt:

- Belagstyp: Festlegung der Begleitkommission
- Bindemitteltyp: entsprechend (IMP 2021) bzw. für AC 8 H LA gemäss Definition Kanton Zürich. Alle Bindemittel wurden in der LCA identisch modelliert und ein Anteil von 3 % Polymeren im Polymer-modifizierten-Bitumen angenommen.

- Einbaudichte: Mittelwerte der Raumdichte im Tauchwägeverfahren von 22 (ACMR 8 mit Hohlraum Gehalt von 6.6 % bis 8.5 %), 50 (AC 8 H), 86 (AC 22), 74 (SDA 4) bzw. 51 (SDA 8) Bohrkernen von Schweizer Strassen (Grolimund + Partner AG, eigene Analyse).
- Bitumenanteil: Hergeleitet aus den Siebkurven, siehe (IMP 2021) bzw. (VSS 40 436 2022) und (VSS 40 430 2022).
- Kiesanteil (Kornfraktion grösser 2 mm): Hergeleitet aus den Siebkurven, siehe (IMP 2021) bzw. (VSS 40 436 2022) und (VSS 40 430 2022).
- Sandanteil (inkl. Füller): Hergeleitet aus den Siebkurven, siehe (IMP 2021) bzw. (VSS 40 436 2022) und (VSS 40 430 2022).
- Anteil Kalkhydrat: Richtangaben Belagsaufbau Kanton Solothurn (Kanton Solothurn, Amt für Verkehr und Tiefbau 2022).
- Anteil RAP: Festlegung der Begleitkommission. Der Anteil von RAP in den Bauszenarien entspricht der geltenden Norm und Praxis. In Sensitivitätsanalyse S3 wurde dieser Anteil mit aktuell diskutierten, hypothetischen künftigen Werten angenommen.

VIII. Lärmwirkung: akustisches Alterungsmodell

Grolimund + Partner AG verfügt über eine langjährige und umfangreiche Datenbank von Messwerten der akustischen Belagswirkung verschiedener Strassenbeläge. Diese wurden gemäss (ISO 11819 2017) durch Messung der Reifen-Fahrbahn Geräusche mit einem speziellen Messanhänger ermittelt. Die akustische Wirkung eines Strassenbelags unterliegt einer Alterung aufgrund von z.B. Texturveränderungen oder dem Verstopfen akustisch wirksamer Hohlräume (Grolimund + Partner AG 2020).

Das der Studie zugrunde liegende akustische Alterungsmodell wurde aufgrund von Datenabfragen und Modellierungen spezifisch erstellt. Hierzu wurden die Daten je Szenario entsprechend gefiltert und mit folgender Funktion gefittet (Bundesamt für Strassen (ASTRA) und Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Grolimund & Partner AG, Bern 2006):

$$\text{Belagswirkung} = a * \exp(b * t) + c$$

Dabei bedeuten

- *Belagswirkung*: akustische Wirkung des Belages gegenüber der Referenz in StL-86+ (BUWAL 1987), ausgedrückt in Dezibel (dB). Für die Auswertungen wurde gemäss den Verkehrsparametern dieser Studie eine Auswertung im Mischverkehr mit 6 % N2-Anteil gewählt (MV6).
- *t*: Zeitvariable
- *a*, *b* und *c*: freie Fitparameter

Auf Basis dieser Fits wird die mittlere akustische Wirkung über die gewählte Lebensdauer hinweg berechnet und daraus die Quellenreduktion (relevant für Wirkungskategorie UPB'21) und die externen Kosten berechnet (Herleitung siehe auch Anhang IX), wie in Tabelle 4 zusammengefasst.

Im Folgenden werden die für das jeweilige Szenario gewählten Stichproben und resultierenden Alterungsmodelle beschrieben.



VIII.a. Basisszenario ACMR 8

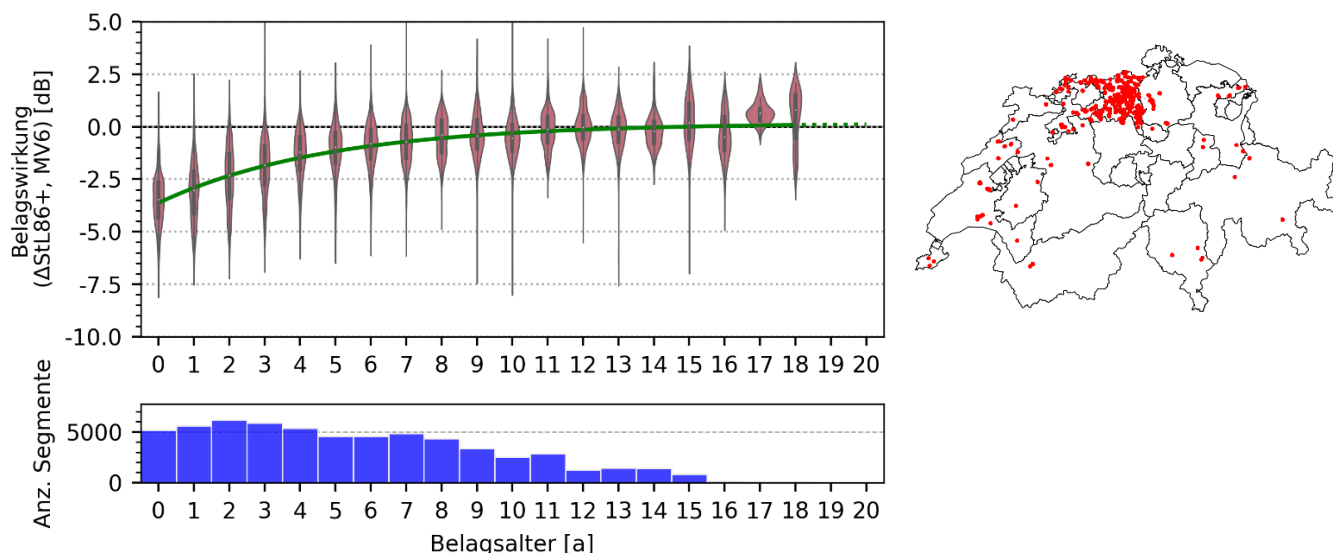
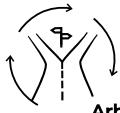


Abbildung 12: Akustisches Alterungsmodell für das Basisszenario ACMR 8. Die jährliche Belagswirkung, ausgerückt in MV6 gegenüber StL-86+, ist oben links als Violin-Plot dargestellt, der entsprechende Fit als grüne Linie, gestrichelt extrapoliert bis zum Belagsalter 20 Jahre. Unten links ist in blau der jährliche Stichprobenumfang gezeigt, als Anzahl der gemessenen 20 m-Segmente. Die Karte rechts zeigt die örtliche Verteilung der Messpunkte in der Schweiz.

- *Datenumfang*: alle für ACMR 8 verwendbare Messdaten. Diese umfassen vor allem hohlraumreiche Beläge, und auch einige hohlraumarme Beläge (Einbaujahr 2015 und jünger).
- *Anzahl enthaltene Messstandorte*: 178
- *Anzahl enthaltene Segmente*: über 60'000
- *Altersbereich der enthaltenen Messwerte*: 0 bis 18 Jahre
- *Umgang mit Datenlücken*: Für die Belagsalter 19 und 20 Jahre bestehen keine verwendbaren Messdaten, dieser Bereich wurde durch Extrapolation der Fitfunktion abgeschätzt.
- *Mittlere akustische Wirkung über die angenommene Lebensdauer von 20 Jahren (MV6 gegenüber StL-86+)*: - 0.7 dB



VIII.b. Szenario SDA 4

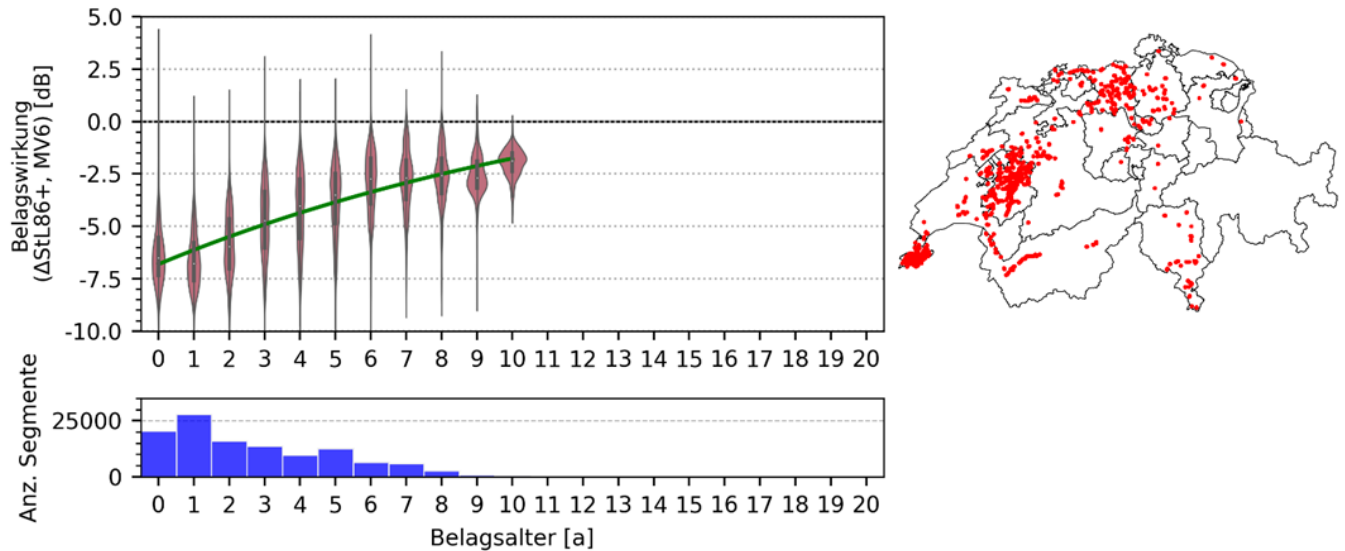
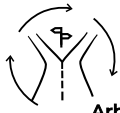


Abbildung 13: Akustisches Alterungsmodell für das Basisszenario SDA 4. (Für Details der Grafik vergleiche die Erklärung in Abbildung 12.)

- *Datenumfang:* alle für SDA 4 verwendbaren Messdaten, inklusive aller Belagsuntertypen (SDA 4-12, SDA 4-16 und verschiedene Firmenlösungen)
- *Anzahl enthaltene Messstandorte:* 876
- *Anzahl enthaltene Segmente:* 116'000
- *Altersbereich der enthaltenen Messwerte:* 0 bis 10 Jahre
- *Umgang mit Datenlücken:* keine zeitlichen Datenlücken
- *Mittlere akustische Wirkung über die angenommene Lebensdauer von 10 Jahren (MV6 gegenüber StL-86+):* - 4.1 dB



VIII.c. Szenario SDA 8

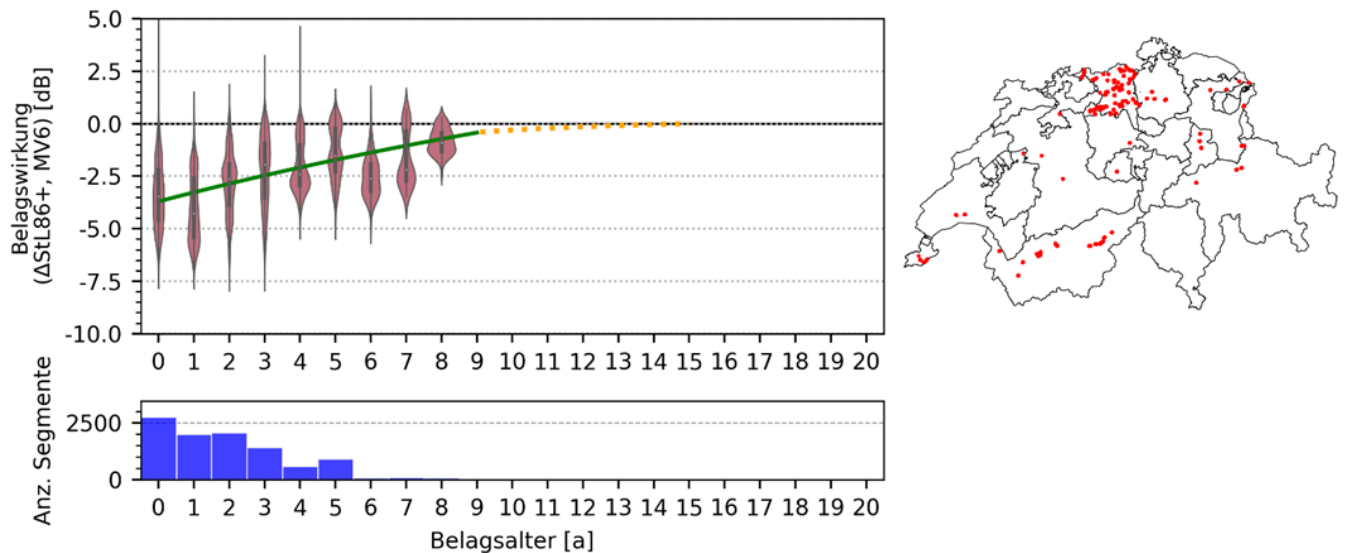
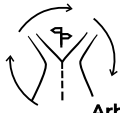


Abbildung 14: Akustisches Alterungsmodell für das Basisszenario SDA 8. Die jährliche Belagswirkung, ausgerückt in MV6 gegenüber StL-86+, ist als Violin-Plot oben links dargestellt, der entsprechende Fit als grüne Linie. Ab dem Belagsalter 9 Jahre bis 15 Jahre wird mangels verfügbarer Messdaten der Alterungsverlauf des bautechnisch vergleichbaren Belags ACMR 8 angenommen und ist als orange strichlierte Linie gezeigt. (Für weitere Details der Grafik vergleiche die Erklärung in Abbildung 12.)

- *Datenumfang:* alle für SDA 8 verwendbaren Messdaten, inklusive aller Belagsuntertypen (SDA 8-12, SDA 8-16)
- *Anzahl enthaltene Messstandorte:* 65
- *Anzahl enthaltene Segmente:* ca. 10'000
- *Altersbereich der enthaltenen Messwerte:* 0 bis 8 Jahre
- *Umgang mit Datenlücken:* Aufgrund mangelnder Daten und Erfahrung für höhere Belagsalter, wurde angenommen, dass SDA 8 Beläge sich vergleichbar entwickeln wie die bautechnisch ähnlichen ACMR 8 Beläge (orange strichlierte Kurve). Das limitiert die erwartete Endwirkung auf ca. 0 dB, hat im Vergleich zum freien Fit der Daten bis 5 Jahren eine leichte Verbesserung (0.2 dB) der mittleren Wirkung über 15 Jahre zur Folge, entspricht aber mehr den Erwartungen an das Alterungsverhalten von SDA 8 Belägen.
- *Mittlere akustische Wirkung über die angenommene Lebensdauer von 15 Jahren (MV6 gegenüber StL-86+):* - 1.3 dB



VIII.d. Szenario AC 8 H LA

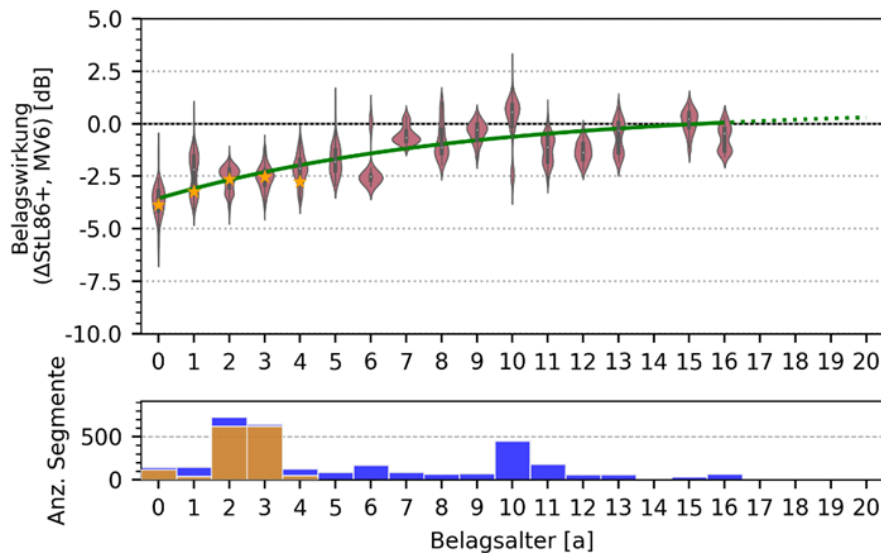


Abbildung 15: Akustisches Alterungsmodell für das Basisszenario AC 8 H LA. Die jährliche Belagswirkung, ausgerückt in MV6 gegenüber StL-86+, ist als Violin-Plot oben links dargestellt, der Fit als grüne Linie, gestrichelt extrapoliert bis Belagsalter 20 Jahre. Als orange Sterne dargestellt sind die Mittelwerte der vom Kanton Zürich als lärmarm definierten Beläge. Im unten links gezeigten jährlichen Stichprobenumfang sind die als lärmarm definierten Messpunkte in orange dargestellt, die blauen Messungen zeigen andere AC 8 H Segmente (gruppiert, nicht gestapelt); man erkennt die erst seit vier Jahren bestehenden Messungen. (Für weitere Details der Grafik vergleiche die Erklärung in Abbildung 12.)

- *Datenumfang:* alle verwendbaren Messdaten von AC 8 Belägen im Kanton Zürich der Mischgutsorte «AC 8 H». Die vom Kanton Zürich als lärmarm definierten Beläge der Mischgutsorten AC 8 H PmB 45/80-80 und AC 8 H PmB 65/105-60 sind als orange Datenpunkte dargestellt.
- *Anzahl enthaltene Messstandorte:* 38
- *Anzahl enthaltene Segmente:* 3'000
- *Altersbereich der enthaltenen Messwerte:* 0 bis 16 Jahre
- *Umgang mit Datenlücken:* Für die vom Kanton Zürich als lärmarm definierten Rezepturen bestehen noch keine Daten zur akustischen Wirkung von Belägen älter als 4 Jahre und damit zu wenig Daten zur Modellierung nur dieser Beläge (Datenstand 2022). Daher werden hier alle verfügbaren Daten von AC 8 H Belägen im Kanton Zürich verwendet, um die Langzeitwirkung abzuschätzen. Diese Beläge sind bautechnisch vergleichbar und unterscheiden sich nur im spezifisch gewählten Bindemitteluntertyp. Wie in Abbildung 15 dargestellt repräsentieren die bestehenden Messdaten der «lärmarmen»

AC 8 H Rezepturen (orange Sterne: Mittelwerte) gut die langjährigen Messdaten der gesamten AC 8 H Beläge im Kanton Zürich (Modellierung in grün). Die trotzdem fehlenden Werte für Belagsalter von 17 bis 20 Jahren wurden durch Extrapolation der Fitfunktion abgeschätzt.

Bemerkung: Kurz vor Drucklegung wurde diese Auswertung ergänzt mit neuen Messdaten aus 2023 erneut gerechnet. Diese aktualisierten Resultate legen keine veränderte Schlussfolgerung nahe.

- *Mittlere akustische Wirkung über die angenommene Lebensdauer von 20 Jahren (MV6 gegenüber StL-86+): - 1.0 dB*

VIII.e. Szenario SDA 4 -S2 (akustischer Unterhalt)

Um die Wirkung des akustischen Unterhalts durch “Grinding” (Abschleifen der Oberfläche) auf die akustische Alterung von SDA 4 Belägen abzuschätzen, bestehen noch keine ausreichenden Messdaten. Diese Unterhaltspraxis und ihr Einfluss auf die akustische Alterung ist aktuell Gegenstand von Pilotprojekten (Grolimund + Partner AG 2020; Schlatter u. a. 2021; Schlatter, Delaby, und Collaud 2023). Für die Sensitivitätsanalyse wurde daher ein akustisches Alterungsmodell mit folgenden Annahmen modelliert:

- Grundlage ist das messwertbasierte Alterungsmodell des Basisszenarios SDA 4 (Anhang VIII.b)
- Annahme 1: der akustische Unterhalt verlängert die akustische Lebensdauer um 2.5 Jahre auf gesamthaft 12.5 Jahre
- Annahme 2: die akustische Leistung mit akustischem Unterhalt entspricht bei 12.5 Jahren der akustischen Leistung ohne Unterhalt bei 10 Jahren.

Mit den beiden Annahmen als Randbedingungen wurde die bestehende Fit-Gerade neu modelliert. Damit ergibt sich eine akustische Wirkung über die angenommene Lebensdauer von 12.5 Jahren (MV6 gegenüber StL-86+) von - 4.0 dB. Diese Wirkung ist leicht reduziert gegenüber dem Basisszenario SDA 4 (0.1 dB weniger), gilt aber über eine längere Lebensdauer hinweg.

VIII.f. Szenario SDA 8 -S2 (akustischer Unterhalt)

Auch für die Abschätzung der Wirkung des akustischen Unterhalts auf die akustische Alterung von SDA 8 Belägen bestehen noch keine ausreichenden Messdaten, denn auch für SDA 8 ist diese Unterhaltspraxis und ihr Einfluss auf die akustische Alterung noch Gegenstand von Pilotprojekten (Grolimund + Partner AG 2020;

Schlatter u. a. 2021; Schlatter, Delaby, und Collaud 2023). Daher wurde ein akustisches Alterungsmodell wie folgt modelliert:

- Grundlage ist das messwertbasierte Alterungsmodell des Basisszenarios SDA 8 (Anhang VIII.c)
- Annahme: Der akustische Unterhalt auf SDA 8 verbessert die akustische Leistung bei 15 Jahren in gleichem Masse wie bei SDA 4 nach 10 Jahren (-0.7 dB). Zugleich bleibt die Annahme bestehen, dass der SDA 8 Belag mindestens gleich gute akustische Werte aufweist wie der ACMR 8 Belag (vgl Anhang VIII.c).

Mit dieser Annahme als Randbedingungen wurde die bestehende Fitgerade neu modelliert. Damit ergibt sich die akustische Wirkung über die angenommene Lebensdauer von 15 Jahren (MV6 gegenüber StL-86+) zu - 1.6 dB. Diese Wirkung ist um 0.3 dB grösser als im Basisszenario SDA 8.

IX. Strassenlärmkosten: Ausmass lärmbelastete Personen und Wohnungen

Die Ausgangsdaten zur Berechnung der Strassenlärmkosten sind die in der Lärmdatenbank sonBASE15 enthaltenen, für die gesamte Schweiz berechneten Strassenlärm-Immissionsdaten (basierend auf StL-86+) (Catillaz und Fischer 2018). Für die Studie wurde vom BAFU eine Auswertung dieser Daten entlang der Kantonsstrassen im städtischen Kernraum erstellt. Die resultierenden Histogramme sind in Abbildung 16 als graue Kurven («sonBASE15») dargestellt: links gemessen anhand der Anzahl betroffener Personen in Lden (Energie-äquivalenter Tag-Abend-Nacht Dauerschallpegel), rechts gemessen anhand der Anzahl betroffener Wohnungen in Lr (Beurteilungspegel). Beide Grössen sind abhängig von der Bebauung, Verkehrs- und Wohnstatistik und je Dezibel-Klasse als Mittelwerte des gewählten Szenarios angegeben.

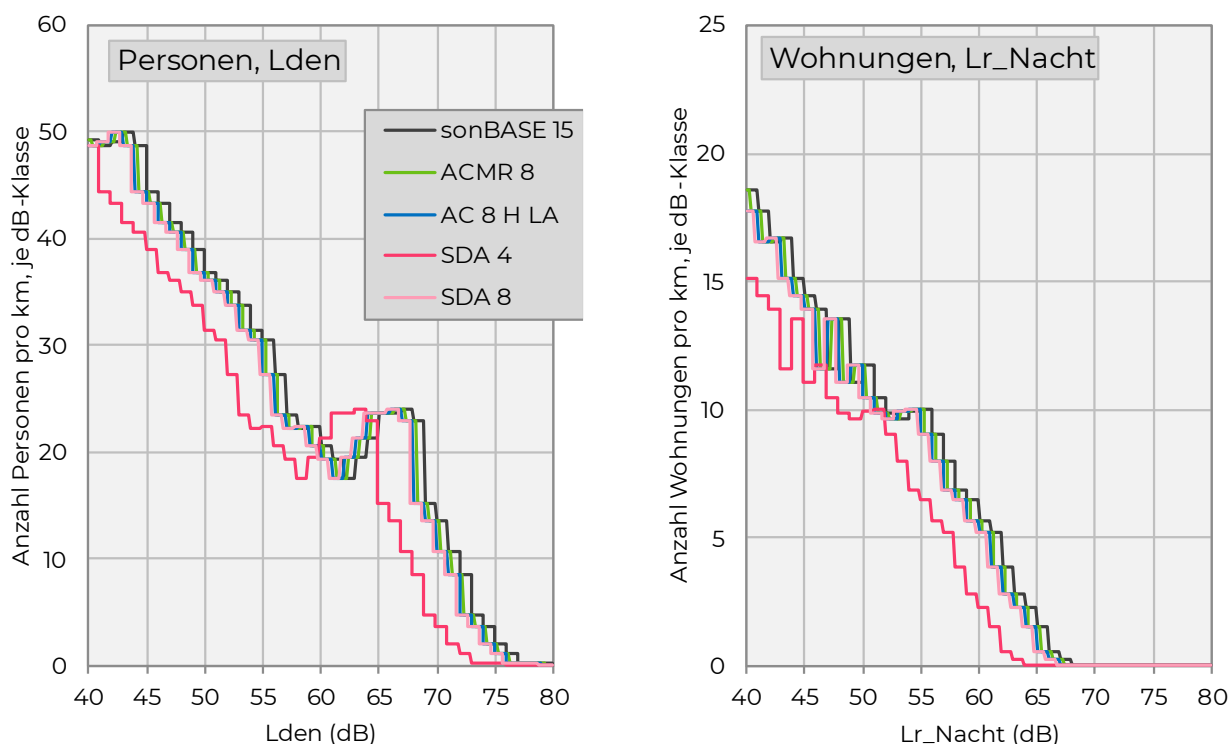
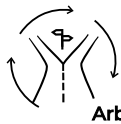


Abbildung 16: Links: Verteilung der Anwohner von einem Kilometer Kantonsstrasse innerorts in Abhängigkeit der Lden-Klasse. Rechts: Verteilung der Wohnungen an einem Kilometer Kantonsstrasse innerorts in Abhängigkeit der Lr-Nacht-Klasse. Beide Verteilungen sind hier für die Referenz sonBASE15 (schwarz) und die vier Basisszenarien gezeigt.

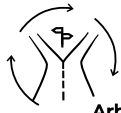


Entsprechend den in Anhang VIII berechneten Lärmwirkungen der verschiedenen Strassenbeläge verschieben sich die Histogramme dank der Lärminderung zu tieferen Dezibel-Klassen, wie mit den farbigen Linien in Abbildung 16 gezeigt.

Aus diesen belagsspezifischen Histogrammen werden für diese Studie die Inputdaten zur Berechnung der Lärmkosten nach (VSS 41 828 2022) wie folgt hergeleitet:

- «Personen-Dezibel»: Anzahl Personen je Dezibelklasse L_{den} multipliziert mit der Anzahl Dezibel über dem L_{den} -Schwellenwert von 48 dB(A).
- «Wohnungs-Dezibel»: Anzahl Wohnungen je Dezibelklasse L_r -Nacht multipliziert mit der Anzahl Dezibel über dem L_r -Nacht-Schwellenwert von 40 dB(A), bzw. Anzahl Wohnungen je Dezibelklasse L_r -Tag multipliziert mit der Anzahl Dezibel über dem L_r -Tag-Schwellenwert von 50 dB(A) falls Nachtlärm unter 40 dB(A). Da keine Einzelobjekt-Identifizierung im Datensatz möglich ist, wurde der Taglärm-Zuschlag mittels einem generischem schweizweiten Korrekturfaktor von 1.25 (abgeleitet aus (Müri, Leupp u. a. 2021)) berücksichtigt, um Doppelzählungen zu vermeiden.

Die so ermittelten Personen-Dezibel und Wohnungs-Dezibel sind in Tabelle 4 gezeigt und ergeben, multipliziert mit den auf 2021 preisangepassten Kostenansätzen aus (VSS 41 828 2022) (siehe Tabelle 12), die externen Lärmkosten aus Gesundheitskosten und Mietzinsverlusten.



X. Anteil Elektromobilität: Abschätzung Einfluss auf Lärmwirkung

Um in Sensitivitätsanalyse S5 den Einfluss eines deutlich erhöhten Anteils voll-elektrisch angetriebener PW auf die Lärmemissionen abzuschätzen wurden Strassenlärmprognosen des sonROAD18 Webtools (EMPA Version 1.7) verglichen.

Hierzu wurden die Parameter zur Strassen-, Verkehrs- und Umweltsituation entsprechend der Ausgangslage dieser Studie gewählt (Geschwindigkeiten entsprechend Verteilschlüssel «HVS 50 km/h, 2 Spuren») und je ein Szenario mit 3 % e-PW Anteil und mit 50 % e-PW Anteil (jeweils bezogen auf den Gesamt-PW Anteil) gerechnet. Beide Szenarien wurden mit verschiedenen Belägen über den Bereich der untersuchten Belagswirkungen hinweg (KB50_0dB bis KB50_-4dB) berechnet.

Vergleicht man die resultierenden Lärmemissionen (Leq 7.5m) zeigen sich folgende Ergebnisse:

- Die gesamten Lärmemissionen sinken mit 50 % e-PW um maximal 0.2 dB gegenüber 3 % e-PW.
- Die Lärmwirkung der Beläge verändert sich um maximal 0.1 dB zwischen den beiden Szenarien 3 vs. 50 % e-PW Anteil.

Dies liegt besonders daran, dass bei den hier betrachteten Geschwindigkeiten die Reifen-Fahrbahn-Geräusche das Antriebsgeräusch deutlich dominieren.

Die beiden gezeigten Veränderungen sind sehr klein und werden deshalb in der Sensitivitätsanalyse S5 nicht berücksichtigt.

XI. Energieverbrauch und Reifenabrieb

Um den Einfluss des Strassenbelags auf den Energie- bzw. Treibstoffverbrauch und den Reifenabrieb der die Strasse überrollenden Fahrzeuge abzuschätzen, wurde auf die Messdaten zu Rollwiderstand und Mean Profile Depth (MPD) in (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021) zurückgegriffen. Wie dort detailliert beschrieben wurden die Messungen mit einem nach (ISO 28580 2018) genormten Messanhänger auf zwei Messstrecken von über 140 km Länge mit einer Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h erhoben. Dabei wird der Rollwiderstand aus dem Versatzwinkel eines beweglich gelagerten Armes abgeleitet, die MPD aus einem Laserprofil-Scan berechnet.

Die Rollwiderstandsdaten werden zur Abschätzung des Energieverbrauchs herangezogen, während die MPD-Daten zur Abschätzung des Reifenabriebs verwendet werden. Diese Daten wurden spezifisch für die vorliegende Studie aufbereitet und sind in Tabelle 9 gezeigt. Dabei wurden nur Beläge mit einem Belagsalter von weniger als 21 Jahren berücksichtigt. Während der Messungen wurden sowohl der Rollwiderstand als auch die MPD parallel erfasst, wodurch beide Daten den gleichen Stichproben entsprechen. Dabei gelten:

- «Ref.» (Referenz) wurde als Mittelwert verbreiteter konventioneller Belagstypen gewählt und enthält alle gemessenen Beläge der Typen AC, ACMR und SMA mit vergleichsweise grossem Stichprobenumfang und Belagsalter bis zu 20 Jahren.
- «ACMR 8» wird für das Basisszenario ACMR 8 verwendet und enthält alle gemessenen Beläge vom Typ ACMR 8. Sie haben ein Alter von bis zu 12 Jahren.
- «SDA 4» wird für das Basisszenario SDA 4 verwendet und enthält alle semi-dichten Beläge mit einem Grösstkorn von 4 mm, also sowohl genormte Lösungen als auch Firmenlösungen. Die vergleichsweise grosse Stichprobe enthält Beläge bis 9 Jahre Belagsalter.
- «SDA 8» wird für das Basisszenario SDA 8 verwendet und enthält alle gemessenen Beläge vom Typ SDA 8. Die Stichprobe enthält 4 Strecken, mit einem Alter von bis zu 4 Jahren.
- «AC 8» wird für das Basisszenario AC 8 H LA verwendet und enthält sowohl die verfügbaren Messdaten von AC 8 als auch die von AC 11 Belägen: beide Gruppen haben identische Mittelwerte, jedoch erlaubt die kombinierte Auswertung eine Vergrösserung der Stichprobenlänge von 0.4 km (nur AC 8) auf 1.4 km (10 Strecken AC 8 und AC 11 mit einem Alter von 8 bis 19 Jahren).
- «SDA 4 Firmenlsg.» entspricht den in Sensitivitätsanalyse S4 (optimierter Rollwiderstand auf SDA 4) verwendeten Daten und basiert auf den Daten der «Firmenlösung 1 (Famsiphonogrip4)» in (Schlatter, Bühlmann, und Schindler

2021). Für S4 wurden lediglich die Rollwiderstandswerte neu verarbeitet, während die MPD-Werte vom Basisszenario SDA 4 übernommen wurden.

Tabelle 9: Stichprobenbeschreibung und Datengrundlage zum Rollwiderstand und zur MPD. Daraus abgeleitet sind die Änderungen von Treibstoff- bzw. Energieverbrauch sowie des Reifenabriebs. «Ref.» gibt den Referenzwert als Mittelwert verbreiteter konventioneller Belagstypen (AC, ACMR, SMA). «SDA 4 Firmenlsg.» entspricht der Belagwahl in der Sensitivitätsanalyse S4 (optimierter Rollwiderstand auf SDA 4). In S4 wurden keine gesonderten MPD-Werte berücksichtigt (n.a.).

Belag	Ref.	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8	SDA 4 Firmenlsg.
Stichprobenlänge total (km)	24.4	16.0	27.6	1.3	1.4	4.6
Anzahl Strecken in Stichprobe	73	16	23	4	10	2
Belagsalter in Stichprobe (Jahre): Mittelwert (Min ... Max)	13 (1 ... 20)	9 (6 ... 12)	3 (1 ... 9)	3 (1 ... 4)	12 (8 ... 19)	5 (2 ... 9)
Mittlerer Rollwiderstandswert Cr (-)	0.0094	0.0094	0.0084	0.0090	0.0095	0.0076
Änderung Rollwiderstand gegenüber Ref.	0.0 %	- 0.4 %	- 10.9 %	- 3.6 %	0.9 %	- 18.9 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Benzin	0.0 %	- 0.1 %	- 3.3 %	- 1.1 %	0.3 %	- 5.8 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Diesel	0.0 %	- 0.1 %	- 2.5 %	- 0.8 %	0.2 %	- 4.3 %
Änderung Energieverbrauch gegenüber Ref.: PW Elektro	0.0 %	- 0.1 %	- 3.0 %	- 1.0 %	0.2 %	- 5.2 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: LKW Diesel	0.0 %	- 0.1 %	- 1.6 %	- 0.5 %	0.1 %	- 2.8 %
Mittlere Mean-Profile-Depth MPD (mm)	0.88	0.93	0.69	0.91	0.70	n.a.
Änderung MPD gegenüber Ref.	0.0 %	5.7 %	- 22.0 %	3.0 %	- 20.5 %	n.a.
Änderung Reifenabrieb gegenüber Ref.	0.0 %	0.9 %	- 3.6 %	0.5 %	- 3.3 %	n.a.

Die vorhandenen Messwerte des Rollwiderstands weisen eine unterschiedliche Altersverteilung auf, wobei die Daten für SDA4 und SDA 8 (logischerweise) jünger sind

als die Werte für ACMR 8, während die AC 8-Daten einiges älter sind. Nur mit zusätzlichen Daten wird beurteilt werden können, ob resp. inwieweit sich dies auf die ausgewiesenen Mittelwerte für den Rollwiderstand auswirkt.

In den folgenden Unterkapiteln ist beschrieben, wie anhand dieser Basisdaten die Auswirkungen des Rollwiderstands auf Energieverbrauch und Reifenabrieb abgeleitet wurden.

XI.a. Energieverbrauch

Zur annäherungsweise Berechnung des Energieverbrauchs als Funktion von Fahrzeugtyp, Antriebsart und Strassenbelag werden die folgenden Parameter verwendet:

- Rollwiderstandswert (Cr) in Abhängigkeit des Strassenbelags entsprechend Tabelle 9
- Treibstoff- bzw. Energieverbrauch im Referenzfall (konventioneller Belag) gemäss Antriebsart und Fahrzeugtyp (vgl. Tabelle 11, Zeile «N1»)
- Fahrzeuggewicht gemäss Antriebsart und Fahrzeugtyp (vgl. Tabelle 11, Zeile «N1»)
- Wirkungsgrad Motor gemäss Antriebsart und Fahrzeugtyp (vgl. Tabelle 11, Zeile «N1»)

Der Energieaufwand zur Überwindung des Rollwiderstandes berechnet sich auf flacher Strecke als

$$E_{roll} = m * g * Cr$$

wobei g die Schwerebeschleunigung darstellt und m Masse des Fahrzeugs.

Um E_{roll} zu leisten, muss der Motor des Fahrzeugs die entsprechend seinem Wirkungsgrad η korrigierte Energie E_{roll_eff} aufbringen. Dies ist der Teil des Gesamt-Energieverbrauchs E_{tot} , welcher durch den Rollwiderstand beeinflusst ist, und kann als Anteil $\%E_{roll}$ ausgedrückt werden:

$$\%E_{roll} = E_{roll_eff} / E_{tot} = (E_{roll} / \eta) / E_{tot}$$

Der Gesamt-Energieverbrauch E_{tot} im Referenzfall wird aus dem bekannten Treibstoffverbrauch und der entsprechenden Energiedichte des Treibstoffes berechnet. Je nach Fahrzeugmasse und Motor-Wirkungsgrad liegt der Wert von $\%E_{roll}$ hier zwischen 15 % (LKW Diesel) und 31 % (PW Benzin). Diese Werte reihen sich in die entsprechenden Werte der Literaturrecherche in (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021) ein.

Mit % E_{roll} kann somit die Auswirkung einer Änderung des Rollwiderstands (ΔCr) auf den Gesamtenergieverbrauch $E_{tot}(\Delta Cr)$ berechnet werden, da die Standard-Energieverbräuche E_{tot} (je Fahrzeugtyp und Antriebsart) und die Werte für ΔCr bekannt sind:

$$E_{tot}(\Delta Cr) = E_{tot} * (1 + \Delta Cr * \%E_{roll})$$

Die so berechneten Änderungen von $E_{tot}(\Delta Cr)$ gegenüber E_{tot} sind in Tabelle 9 für die vier betrachteten Szenarien und Fahrzeugtypen / Antriebsarten gezeigt.

Anhand der Verkehrszusammensetzung in Abhängigkeit der Antriebsart und Fahrzeugtyp gemäss Tabelle 10 (Daten abgeleitet aus (BFS, Bundesamt für Statistik 2022)) und dem Gesamtverkehrsaufkommen werden mit den berechneten Änderungen des Energieverbrauchs aus Tabelle 9 die Gesamtverbräuche für jedes Szenario ermittelt und stehen für die LCA- und LCC-Analysen zur Verfügung.

Tabelle 10: Verkehrszusammensetzung nach Antriebsart als prozentualer Anteil des totalen Verkehrsaufkommens (bzw. im Klammern an Gesamt-PW und Gesamt-LKW Menge) für die Basisszenarien und Sensitivitätsanalyse S5.

DTV = 8000 Fahrzeuge pro Tag	Basisszenarien	Sensitivitätsanalyse S5
Anteil PW Benzin am Total-Verkehr (an Gesamt-PW)	65 % (69 %)	33 % (36 %)
Anteil PW Diesel am Total-Verkehr (an Gesamt-PW)	26 % (28 %)	14 % (14 %)
Anteil PW Elektro am Total-Verkehr (an Gesamt-PW)	3 % (3 %)	47 % (50 %)
Anteil LKW Diesel am Total-Verkehr (an Gesamt-LKW)	6 % (100 %)	6 % (100 %)

XI.b. Reifenabrieb

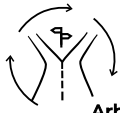
Basierend auf den Daten aus (Steiner 2020) wurde die der Eintrag von Reifenabrieb in Gewässer und Boden im Innerorts-Bereich erfasst und mit der gesamtschweizerischen Innerorts-Fahrleistung auf einen Fahrzeug-Kilometer normalisiert. Die so errechnete Reifenabriebs-Masse M wird auf 0.15 Gramm Reifenabrieb pro Fahrzeug-Kilometer geschätzt. Dieser Wert ist neben dem Fahrzeuggewicht und dem Fahrverhalten u.a. auch von der Strassenoberfläche respektive dem Strassenbelag abhängig. Der Anteil der Reifenabriebs-Menge, welche durch den Strassenbelag beeinflusst ist wird gemäss (wdk 2020) mit $\alpha = 16 \%$ angenommen.

Dieser Einfluss der Strassenoberfläche auf den Reifenabrieb wird in einem vereinfachten Modell als linear korreliert mit der Mean-Profile-Depth (MPD), einem Texturparameter zur Beschreibung der Makrotextur von Strassenoberflächen (Sandberg und Ejsmont 2002), angenommen um basiert auf den verfügbaren Messdaten eine grobe Einschätzung des Reifenabriebs auf den verschiedenen Strassenbelägen zu machen: höhere MPD Werte entsprechen in erster Näherung einem rauerem Oberflächenprofil und begünstigen damit erhöhten Reifenabrieb.

In Abhängigkeit einer Änderung der MPD (ΔMPD) wird der geänderte Reifenabrieb $M(\Delta MPD)$ abgeschätzt:

$$M(\Delta MPD) = M * (1 + \alpha * \Delta MPD)$$

Die entsprechenden Ergebnisse finden sich in der letzten Zeile von Tabelle 9 und stehen für die LCA- und LCC-Analysen zur Verfügung.



XII. Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen S1 – S4 für THG und nePE

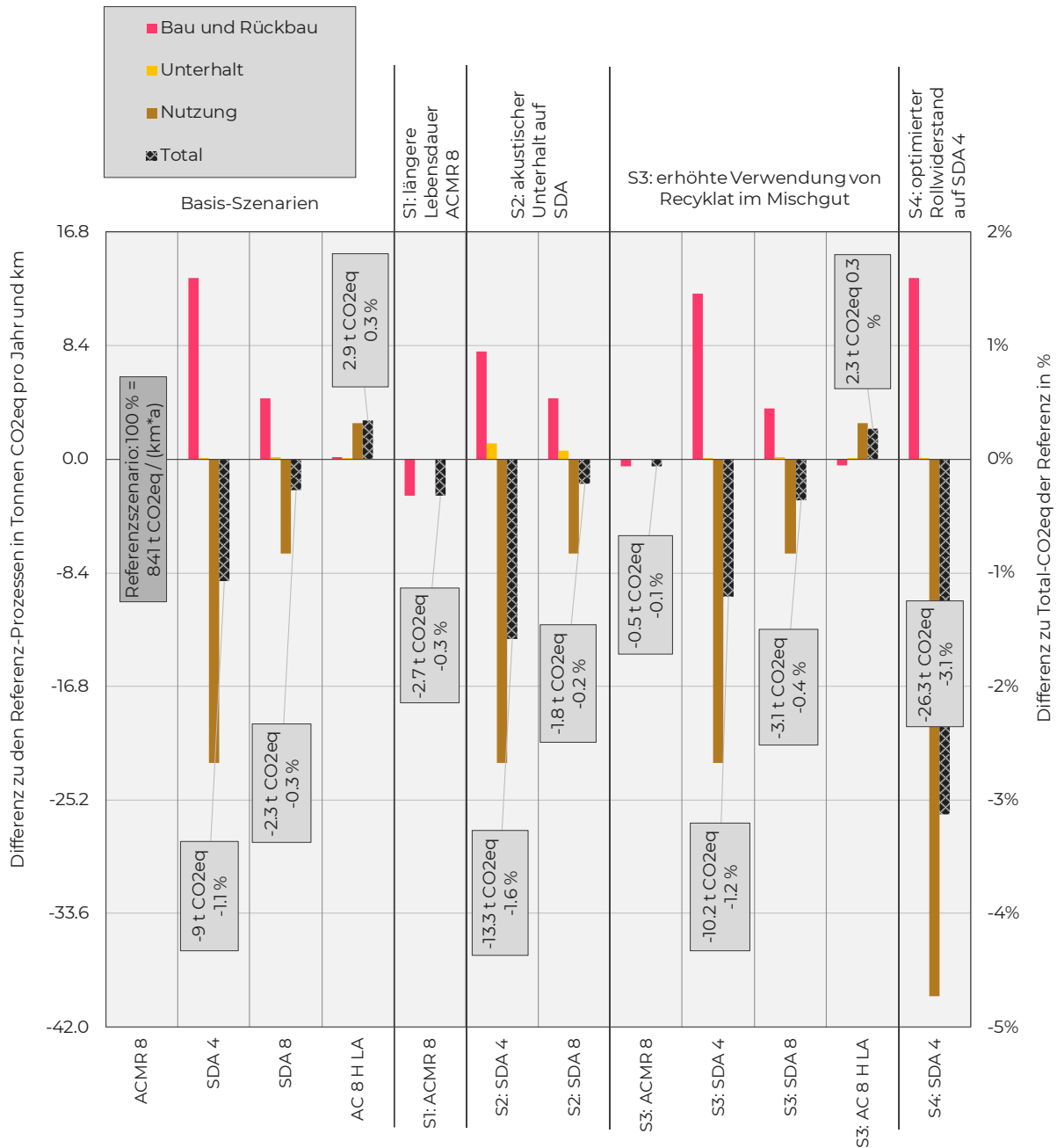


Abbildung 17: Differenzen der Treibhausgas-Emissionen für die Basis-Szenarien und Sensitivitätsanalysen S1 bis S4 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.

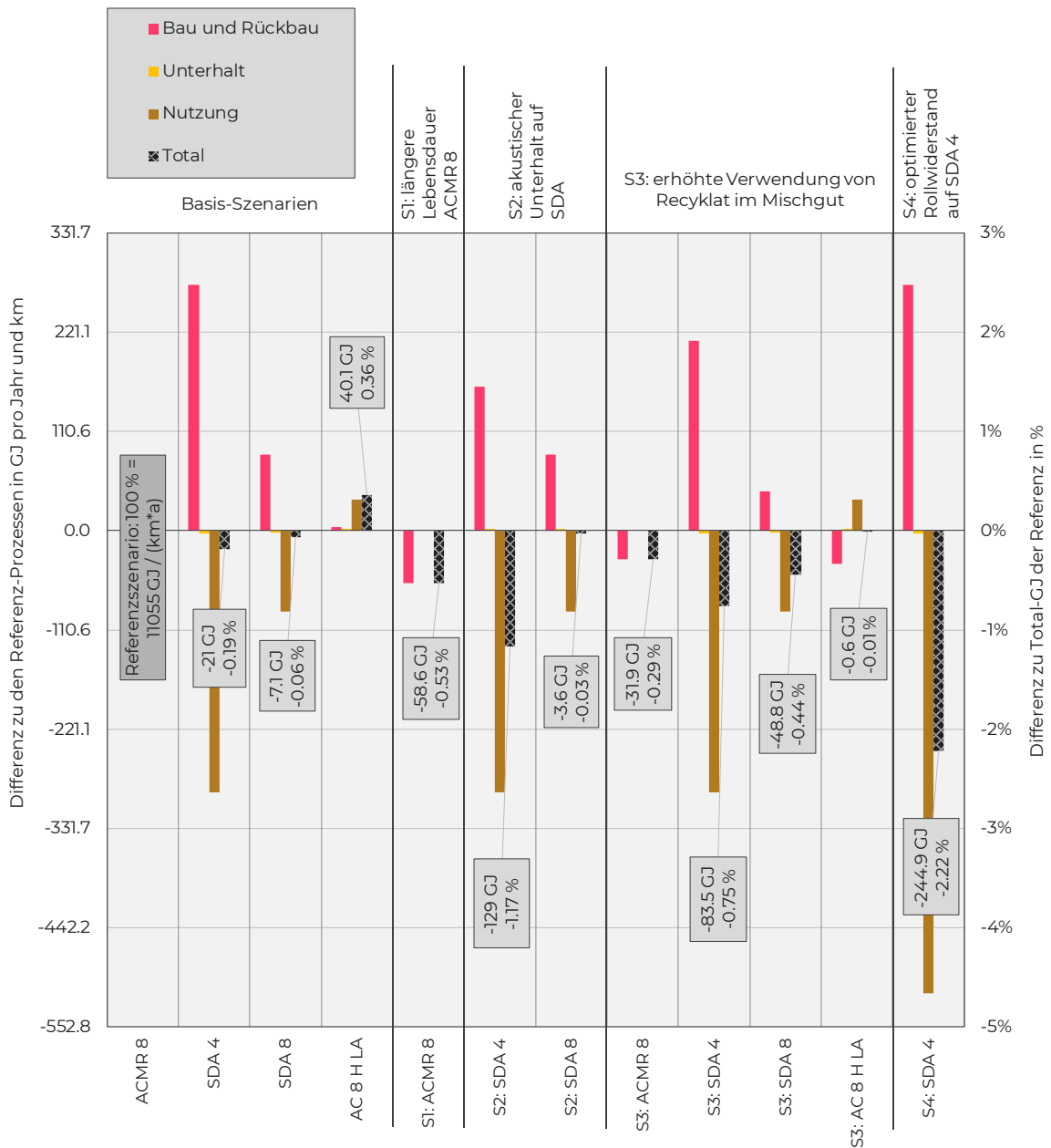
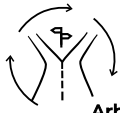


Abbildung 18: Differenzen des Verbrauchs an nicht erneuerbarer Primärenergie für die Basis-Szenarien und Sensitivitätsanalysen S1 bis S4 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8.

XIII. Modellannahmen LCA Life Cycle Assessment

Nachstehend wird tabellarisch für alle Prozesse der LCA beschrieben, mit welchen Annahmen und Parametern in dieser Studie gerechnet wurde. Als «Provider» sind die in der Analyse verwendeten wichtigen Standardprozesse aus dem LCI-Datenbestand des Bundes (UVEK:2023) aufgeführt.

Tabelle 11: Übersicht der für die LCA-Berechnung je Prozess verwendeten Modellannahmen und Parameter mit der jeweiligen Datenquelle. Prozessdaten zur Berechnung der Basisszenarien sind hellviolett hinterlegt, zugehörige Sensitivitätsanalysen sind weiss hinterlegt.

Prozess	Annahmen	Quelle
B1: Bau Binderschicht	1. Mischwerk a) Mischgutmengen entsprechend Lebensdauer und Dichte der Binderschicht. b) Mischgut-Rezeptur gemäss Tabelle 8 c) Provider «mastic asphalt, at plant», angepasst auf Prozessspezifikation, bezüglich Anteil Rezyklat und Emissionen aus dem Mischwerk d) Schadstoffemissionen aus Mischgut im Mischwerk 2. Transport a) Distanz zu Baustelle: 34 km b) Schadstoffemissionen aus Mischgut während Transport und Einbau c) Provider «transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 6» für totale Transportleistung 3. Einbau a) Schadstoffemissionen aus Mischgut während Transport und Einbau b) Energiebedarf für Einbau: 34 MJ pro Tonne Mischgut c) Provider «diesel, burned in building machine, with particle filter» für totalen Energiebedarf für Einbau	1. a) Eigene Berechnung b) (IMP 2021) und eigene Berechnung c) (UVEK:2023) und (Liechti u. a. 2016) d) (Liechti u. a. 2016), skaliert auf 4% Bitumengehalt 2. a) (Liechti u. a. 2016) b) (Liechti u. a. 2016), skaliert auf 4 % Bitumengehalt c) (UVEK:2023) 3. a) (Liechti u. a. 2016), skaliert auf 4 % Bitumengehalt b) (Piao, Heutschi, u. a. 2022) c) (UVEK:2023)
B1 -S1 und -S2	Annahmen entsprechend B1 Basisszenario, jedoch mit an die Lebensdauer angepassten Mischgut-, Transport- und Einbaumengen.	
B1 -S3	Annahmen entsprechend B1 Basisszenario, jedoch mit erhöhtem Rezyklanteil und entsprechend angepasster Mischgutrezeptur.	

Prozess	Annahmen	Quelle
	Annahme: das enthaltene Rezyklat verhält sich wie das neue Mischgut, erzeugt jedoch keine Herstellungsemissionen, lediglich kleine Transportaufwände für die Zwischenlagerung.	
B2: Bau Deckschicht	<p>1. Mischwerk</p> <p>a) Mischgutmengen entsprechend Lebensdauer und Dichte der Deckschichten.</p> <p>b) Mischgut-Rezepturen gemäss Tabelle 8</p> <p>c) Provider «mastic asphalt, at plant», angepasst auf Prozessspezifikation</p> <p>d) Schadstoffemissionen aus Mischgut im Mischwerk</p> <p>2. Transport</p> <p>a) Distanz zu Baustelle: 34 km</p> <p>b) Schadstoffemissionen aus Mischgut während Transport und Einbau</p> <p>c) Provider «transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 6» entsprechend totaler Transportleistung</p> <p>3. Einbau</p> <p>a) Schadstoffemissionen aus Mischgut während Transport und Einbau</p> <p>b) Energiebedarf für Einbau: 34 MJ pro Tonne Mischgut</p> <p>c) Provider «diesel, burned in building machine, with particle filter» entsprechend totalem Energiebedarf für Einbau</p>	<p>1. a) Eigene Berechnung</p> <p>b) (IMP 2021) und eigene Berechnung</p> <p>c) (UVEK:2023)</p> <p>d) (Liechti u. a. 2016), skaliert auf 5.8 % Bitumengehalt</p> <p>2. a) (Liechti u. a. 2016)</p> <p>b) (Liechti u. a. 2016), skaliert auf 5.8 % Bitumengehalt</p> <p>c) (UVEK:2023)</p> <p>3. a) (Liechti u. a. 2016), skaliert auf 5.8 % Bitumengehalt</p> <p>b) (Piao, Heutschi, u. a. 2022)</p> <p>c) (UVEK:2023)</p>
B1 -S1 und -S2	Annahmen entsprechend B1 Basisszenario, jedoch mit an Lebensdauer angepassten Mischgut-, Transport- und Einbaumengen.	
B1 -S3	Annahmen entsprechend B1 Basisszenario, jedoch mit erhöhtem Rezyklanteil und entsprechend angepasster Mischgutrezeptur. Annahmen: Das enthaltene Rezyklat verhält sich technisch wie neues Mischgut. Rezyklat wird gemäss «cut-off» übernommen, also ohne Umweltbelastungen der Vorstufen und einzig mit den Transportaufwänden ab Ausbau zum Mischwerk inkl. Zwischenlagerung.	
B3: End-of-life (Rückbau, Recycling und Entsorgung)	<p>1. Ausbau</p> <p>a) Ausbaumengen entsprechend eingebauter Mischgutmengen</p> <p>b) Annahmen Fräse:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Für die Maschine selbst wurde als Provider «hydraulic digger» verwendet. - Für die Arbeitsleistung wurde der Energieverbrauch abgebildet über 	<p>1. a) Eigene Berechnung</p> <p>b) Abgeleitet aus Prozess «U6 Grinding», Telefoninterview mit Tobias Balmer, Weibel AG (01.11.2022), (R. Steiner und Frick 2020) und (UVEK:2023)</p> <p>c) Eigene Annahme</p>

Prozess	Annahmen	Quelle
	<p>Fahrzeugkilometer-Äquivalent mit dem Provider «operation, lorry >32t, EURO5»</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dieserverbrauch: 47.5 Liter pro Stunde - Fräsleistung: 143 Kubikmeter Belag pro Stunde - Anfahrdistanz: 10 Kilometer - Baustellenlänge: 1 Kilometer - Zwei Ausbauschritte (zuerst einmal die Deckschicht, später die Deck-Deck- und die Binderschicht) im Betrachtungszeitraum, Ausbau jeweils in einem Arbeitsgang. - Wasserverbrauch: 450 Liter pro Tag <p>c) Annahme PM10 Emissionen bei Ausbau: 0.0005% des Ausbauvolumens</p> <p>2. Abtransport</p> <p>a) Distanz zu Deponie bzw. Lager für Rezyklat: 34 km</p> <p>b) Provider «transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 6» entsprechend totaler Transportleistung</p> <p>3. Entsorgung in Deponie und in Recycling</p> <p>Annahme 50 % der Menge via Entsorgung auf Deponie (Provider «disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill») und 50 % Wiederverwendung als Rezyklat (betrachtet als «cut-off»)</p>	<p>2. a) entsprechend B1 und B2 b) (UVEK:2023)</p> <p>3. Eigene Annahme und (UVEK:2023)</p>
B3 -S1 und -S2	Annahmen entsprechend B3 Basisszenario, jedoch mit an Lebensdauer angepassten Ausbau-, Transport- und Entsorgungsmengen	
U1: Strassenreinigung	<p>Für 10 Reinigungsvorgänge pro Kilometer und Jahr:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Frischwasserverbrauch: 2.4 Kubikmeter - Abwasseraufkommen: 1.3 Kubikmeter - Abfallmenge in KVA: 34.3 Kilogramm - Fahrzeugkilometer-Äquivalent für Provider «transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6»: 349 Tonnen-Kilometer entsprechend Verbrauchs- und Einsatzangaben aus Interview 	Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Patrick Schärer, TBA Kanton Bern (20.09.2022), (UVEK:2023)
U2: Winterdienst	<p>Für Szenario ACMR 8 und AC 8 LA: 40 Einsätze pro Kilometer und Jahr:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Natriumchlorid Verbrauch: 2.9 Tonnen - Transportleistung Salz: 230 Tonnenkilometer 	Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Lukas Rohrbach, TBA Kanton Bern (05.10.2022), (UVEK:2023)

Prozess	Annahmen	Quelle
	<ul style="list-style-type: none"> - Fahrzeugkilometer-Äquivalent für Provider «transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6»: 561 Tonnen-Kilometer entsprechend Verbrauchs- und Einsatzangaben aus Interview - Chlorid-Ionen Emission: 1.7 Tonnen - Natrium-Ionen Emission: 1.1 Tonnen <p>Für Szenarien SDA 4 und SDA 8: 10 % mehr Einsätze.</p>	
U3: Markierung	<ul style="list-style-type: none"> - Farbmengen und VOC-Emissionen entsprechend Provider «operation, maintenance, road» - Fahrzeugkilometer-Äquivalent für Provider «transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6» abgeleitet von Prozess U1 mit Annahmen: Strasse mit drei Markierungen (Mittel- und Seitenlinien) mit Lebensdauer vier Jahre: 26 Tonnen-Kilometer 	Eigene Annahmen und (R. Steiner und Frick 2020)
U4: Belagsreparaturen	Die Aufwände für Belagsreparaturen wurden aus dem Verhältnis der internen Kosten (Tabelle 12) für Deckschichtbau und Belagsreparaturen abgeschätzt. Für jedes Szenario wurde so U4 aus dem Prozess B2 und dem Kostenverhältnis berechnet.	Eigene Annahmen, (Staubli, Dreyer, und Rutsche 2013) und Telefoninterviews Stefano Bradanini, TBA Kt. Aargau (31.03.2023) und Olga Paperna, TBA Kt. Aargau (17.11.2022).
U5-S2: Hochdruckreinigung	<p>Für vier Hochdruckreinigungen pro Kilometer:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Frischwasserverbrauch: 10.3 Kubikmeter - Abwasseraufkommen: 8 Kubikmeter - Abfallmenge in KVA: 1.1 Tonnen - Abfallmenge in Deponie: 22.2 Tonnen - Abfallmenge in Recycling: 9.9 Tonnen - Abtransportleistung: 1130 Tonnen-Kilometer - Fahrzeugkilometer-Äquivalent für Provider «transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6»: 65 Fahrzeug-Kilometer entsprechend Verbrauchs- und Einsatzangaben aus Interview 	Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Patrick Schärer, TBA Kanton Bern (20.09.2022).
U6-S2: Grinding	<p>Für einen Durchgang Grinding pro Kilometer:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Frischwasserverbrauch: 1.1 Kubikmeter - PM10 Emissionen: 0.17 Kilogramm 	Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Tobias Balmer, Weibel AG (01.11.2022), Eigene Annahmen

Prozess	Annahmen	Quelle
	<ul style="list-style-type: none"> - Abfallmenge in KVA: 1.0 Tonnen - Fahrzeugkilometer-Äquivalent für Provider «transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO 6»: 1732 Fahrzeug-Kilometer-Äquivalent (u.a. aufgrund sehr langsamer Geschwindigkeit) entsprechend Verbrauchs- und Einsatzangaben aus Interview - Maschinenanteil mit Provider «lorry 40t»: 0.12 % - Hochdruckreinigung (U5) mit Arbeitsgeschwindigkeit von Grinding 	
N1: Nutzung: Energieverbrauch	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fahrleistung je Kategorie und Antriebsart (PW Benzin, PW Diesel, PW Elektro, LKW Diesel). 2. Treibstoff-/Energieverbrauchswerte je Kategorie und Antriebsart <ul style="list-style-type: none"> - PW Benzin: 0.054 kg Benzin pro Kilometer - PW Diesel: 0.053 kg Diesel pro Kilometer - PW Elektro: 0.20 kWh pro Kilometer - LKW Diesel: 0.18 kg Benzin pro Kilometer 3. Einfluss Rollwiderstand auf Energieverbrauch in Abhängigkeit von Fahrzeuggewicht und Wirkungsgrad Motor <ul style="list-style-type: none"> - PW Benzin: 1543 kg Leergewicht; 20 % Wirkungsgrad - PW Diesel: 1992 kg Leergewicht; 35 % Wirkungsgrad - PW Elektro: 1936 kg Leergewicht; 90 % Wirkungsgrad - LKW Diesel: 9300 kg Leergewicht; 45 % Wirkungsgrad 4. Fahrzeugkilometer-Äquivalent entsprechend Treibstoff- bzw. Energieverbrauch je Belagstyp, abgebildet mit folgenden Providern für <ul style="list-style-type: none"> - PW Benzin: «operation, passenger car, petrol, EURO5» - PW Diesel: provider «operation, passenger car, diesel, EURO5» - PW Elektro: provider «operation, passenger car, electric, LiMn2O4» inkl. Batterie aus «Battery, rechargeable, prismatic, LiNCM, at plant, NO» - LKW Diesel: provider «operation, lorry 3.5-20t, fleet average» <p>Zu Pt. 4: Die Datensätze wurden angepasst: Die Flüsse für Lärm und für Pneuabrieb (Mikroplastik) wurden aus den Standard-Datensätzen entfernt, da diese in den Prozessen N2 und N3 eigens abgebildet sind.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tabelle 10 2. (UVEK:2023): PW: operation, passenger car, diesel, EURO5 (petrol) CH 2010, electric 2009 LKW: UVEK:2018, operation, lorry 3.5-20t, fleet average 3. Eigene Berechnung, Herleitung Verbrauchswerte siehe Anhang XI <ol style="list-style-type: none"> a) Rollwiderstand: (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021) b) Fahrzeuggewicht PW: (BFE, Bundesamt für Energie 2022) c) Fahrzeuggewicht LKW: (Verein Mobitool 2023) mittleres Leergewicht 7.5-16to, plus durchschn. Beladung (3.3 t von 6.9 t durchschn. Kapazität) d) Wirkungsgrad Motor: (Pischinger und Seifert 2021) (EnergieSchweiz) 4. (UVEK:2023)

Prozess	Annahmen	Quelle
N1 -S4	Annahmen entsprechend N1 Basisszenario, jedoch mit an Rollwiderstand angepassten Treibstoff-/Energieverbrauchswerten.	
N1 -S5	Annahmen entsprechend N1 Basisszenario, jedoch mit je Kategorie und Antriebsart angepassten Fahrleistungswerten.	
N2: Nutzung: Strassenlärm	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fahrleistung für PW und LKW 2. Lärmwirkung je Belagstyp in Dezibel, umgerechnet auf eine entsprechend der Lärmwirkung reduzierte Anzahl von Lärmquellen 3. Fahrzeugkilometer-Äquivalent entsprechend errechneter Anzahl Lärmquellen, abgebildet mit den Flüssen «Noise, road, passenger car, average» (PW) und «Noise, road, lorry, average» (LKW) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tabelle 10 2. Eigene Berechnung basierend auf Lärmmodellen, siehe Kapitel 2.5.11 und Anhang VIII 3. (UVEK:2023)
N2 -S2	Annahmen entsprechend N2 Basisszenario, jedoch mit an akustischer Wirkung angepassten Fahrzeugkilometern.	
N3: Nutzung: Reifenabrieb	<ol style="list-style-type: none"> 1. Gesamte Fahrleistung 2. Durchschnittlicher Reifenabrieb innerorts in Boden und Gewässer: 0.15 Gramm pro Fahrzeugkilometer 3. Menge Reifenabrieb je Belag in Abhängigkeit von MPD, Annahme: 16 % des Reifenabriebs sind durch Strassenoberfläche beeinflusst, MDP hat direkt proportionalen Einfluss auf Reifenabrieb 4. Reifenabriebmenge als Eintrag von Mikroplastik mittels Stofffluss «Plastics, micro, emissions to soil» 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eigene Berechnung 2. Eigene Berechnung basierend auf (Steiner 2020) und (INFRAS) 3. Anhang XI, (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021), (wdk 2020) 4. (UVEK:2023)

XIV. Modellannahmen LCC Life Cycle Costing

Tabelle 12: Übersicht der für die LCC-Berechnung je Prozess enthaltenen Modellannahmen und Parameter mit der jeweiligen Datenquelle. Prozessdaten zur Berechnung interner Kosten der Basisszenarien sind hell hinterlegt, zugehörige Sensitivitätsanalysen sind weiss hinterlegt, Prozessdaten zur Berechnung externer Kosten sind dunkel hinterlegt. (Ein «e» in Prozesskürzeln, wie «Ne», «N2e», bezeichnet externe Kosten.)

Prozess	Annahmen	Quelle
B1: Bau Binderschicht	1. Mischwerk a) Durchschnittliche Mischgutmengen entsprechend Lebensdauer und Dichte der Binderschicht. b) Kosten je Tonne Mischgut Typ AC B 22 S PmB 45/80-50: 138 CHF 2. Transport a) Transportzeit, inkl. Abladen: 1.5 Stunden b) Nutzlast LKW für Transport: 25 Tonnen c) Kosten Transport: 220 CHF pro Stunde 3. Einbau a) Durchschnittliche Einbaumenge entsprechend Lebensdauer Binderschicht. b) Kosten Einbau: 17 CHF pro Quadratmeter	1. a) Eigene Berechnung b) Mittelwert aus den Preislisten dreier Schweizer Belagswerke (2019 bis 2021). 2. a) (Piao, Waldner, u. a. 2022) b) (Piao, Waldner, u. a. 2022) c) (Piao, Waldner, u. a. 2022) 3. a) Eigene Berechnung b) Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Tobias Balmer, Weibel AG (08.03.2023).
B1 -S1 und -S2	Annahmen entsprechend B1 Basisszenario, jedoch mit an Lebensdauer angepassten Mischgut-, Transport- und Einbaumengen.	
B1 -S3	Annahmen entsprechend B1 Basisszenario, jedoch mit an Rezyklatanteil angepassten Mischgutkosten: pro Prozent RAP-Anteil im Mischgut werden 0.5 CHF Kosten eingespart.	Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Tobias Balmer, Weibel AG (08.03.2023).
B2: Bau Deckschicht	1. Mischwerk a) Durchschnittliche Mischgutmengen entsprechend Lebensdauer und Dichte der jeweiligen Deckschicht. b) Kosten je Tonne Mischgut - Typ ACMR 8 PmB: 171 CHF - Typ SDA 4-16 PmB mit Kalkhydrat: 185 CHF	1. a) Eigene Berechnung b) Mittelwert aus den Preislisten dreier Schweizer Belagswerke (2019 bis 2021).

Prozess	Annahmen	Quelle
	<ul style="list-style-type: none"> - Typ SDA 8-12 PmB mit Kalkhydrat: 175 CHF - Typ AC 8 H PmB: 164 CHF <p>2. Transport</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Transportzeit, inkl. Abladen: 1.5 Stunden b) Nutzlast LKW für Transport: 25 Tonnen c) Kosten Transport: 220 CHF pro Stunde <p>3. Einbau</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Durchschnittliche Einbaumenge entsprechend Lebensdauer Deckschicht. b) Kosten Einbau: 17 CHF pro Quadratmeter 	<p>2. a) (Piao, Waldner, u. a. 2022)</p> <p>b) (Piao, Waldner, u. a. 2022)</p> <p>c) (Piao, Waldner, u. a. 2022)</p> <p>3. a) Eigene Berechnung</p> <p>b) Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Tobias Balmer, Weibel AG (08.03.2023).</p>
B1 -S1 und -S2	Annahmen entsprechend B2 Basisszenario, jedoch mit an Lebensdauer angepassten Mischgut-, Transport- und Einbaumengen.	
B1 -S3	Annahmen entsprechend B2 Basisszenario, jedoch mit an Rezyklatanteil angepassten Mischgutkosten: pro Prozent RAP-Anteil im Mischgut werden 0.5 CHF Kosten eingespart.	Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Tobias Balmer, Weibel AG (08.03.2023).
B3: End-of-life (Rückbau, Recycling und Entsorgung)	<p>1. Ausbau</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Durchschnittliche Ausbauflächen entsprechend Lebensdauer der jeweiligen Deckschicht. Annahme: Fräskosten sind nicht primär durch Frästiefe bestimmt, sondern durch Anzahl Fräseinsätze. b) Fräskosten: 4 CHF pro Quadratmeter <p>2. Abtransport</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Durchschnittliche Menge Ausbauasphalt entsprechend eingebauten Schichten. b) Transportzeit: 1 Stunde c) Nutzlast LKW für Transport: 25 Tonnen d) Kosten Transport: 220 CHF pro Stunde <p>3. Entsorgung in Deponie und in Recycling</p> <p>Durchschnittliche Kosten für Entsorgung und Recycling. Annahme: 50 % Anlieferung an Mischwerk, 50 % Abgabe an Deponie.</p>	<p>1. a) Eigene Berechnung</p> <p>b) Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Tobias Balmer, Weibel AG (08.03.2023).</p> <p>2. a) Eigene Berechnung</p> <p>b) (Piao, Waldner, u. a. 2022)</p> <p>c) (Piao, Waldner, u. a. 2022)</p> <p>d) (Piao, Waldner, u. a. 2022)</p> <p>3. Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Tobias Balmer, Weibel AG (08.03.2023).</p>

Prozess	Annahmen	Quelle
B3 -S1 und -S2	Annahmen entsprechend B3 Basisszenario, jedoch mit an Lebensdauer angepassten Ausbau-, Transport- und Entsorgungs- bzw. Recyclingmengen.	
U1: Strassenreinigung	<ul style="list-style-type: none"> - Effektive Arbeitsgeschwindigkeit: 1.3 km/h (2 Fahrten für Strassenbreite, 1 Stunde An- und Abfahrt). - Kosten: 134 CHF pro Stunde (inkl. Personalkosten) 	Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Patrick Schärer, TBA Kanton Bern (20.09.2022).
U2: Winterdienst	<ul style="list-style-type: none"> - Effektive Arbeitsgeschwindigkeit: 7.5 km/h (2 Fahrten für Strassenbreite) - Anzahl Einsätze <ul style="list-style-type: none"> - ACMR 8 und AC 8: 40 pro Jahr - SDA 4 und SDA 8: 44 pro Jahr (Annahme: 10 % erhöhte Einsatzzahl) - Kosten: 160 CHF pro Stunde (inkl. Personalkosten) 	Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit Lukas Rohrbach, TBA Kanton Bern (05.10.2022).
U3: Markierung	<ol style="list-style-type: none"> 1. Anzahl Markierungsstreifen: 3 2. Lebensdauer Markierung: 4 Jahre 3. Kosten Markierung: 4 CHF pro Laufmeter 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eigene Festlegung 2. (R. Steiner und Frick 2020) 3. (R. Steiner und Frick 2020)
U4: Belagsreparaturen	<ul style="list-style-type: none"> - Kosten kleiner baulicher Unterhalt: 0.77 CHF pro Quadratmeter und Jahr - Annahme, dass bei allen Belägen dieselben durchschnittlichen Kosten anfallen. Einerseits sind LAB im Durchschnitt jünger und weniger reparaturbedürftig, andererseits muss die Reparatur hier im Fall umfassender ausgeführt werden. 	(Staubli, Dreyer, und Rutsche 2013) und Telefoninterview Stefano Bradanini, TBA Kt. Aargau (31.03.2023).
U5-S2: Hochdruckreinigung	Kosten: 0.2 CHF pro Quadratmeter	Telefoninterview mit Patrick Schärer, TBA Kanton Bern (20.09.2022).
U6-S2: Grinding	<ul style="list-style-type: none"> - Kosten: 10 CHF pro Quadratmeter - Aktuell höhere Kosten, Kostenannahme, dass dies eine etablierte Praxis mit entsprechendem Markt ist. 	Telefoninterview mit Tobias Balmer, Weibel AG (08.03.2023).
N1: Nutzung: Energieverbrauch	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fahrleistung je Kategorie und Antriebsart (PW Benzin, PW Diesel, PW Elektro, LKW Diesel). 2. Treibstoff-/Energieverbrauchswerte je Kategorie und Antriebsart <ul style="list-style-type: none"> - PW Benzin: 0.054 kg Benzin pro Kilometer - PW Diesel: 0.053 kg Diesel pro Kilometer 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tabelle 10 2. (UVEK:2023): PW: Ecoinvent, operation, passenger car, diesel, EURO5 (petrol) CH 2010, electric 2009 LKW: UVEK:2018, operation, lorry 3.5-20t, fleet average

Prozess	Annahmen	Quelle
	<ul style="list-style-type: none"> - PW Elektro: 0.20 kWh pro Kilometer - LKW Diesel: 0.18 kg Benzin pro Kilometer <p>3. Einfluss Rollwiderstand auf Energieverbrauch in Abhängigkeit von Fahrzeuggewicht und Wirkungsgrad Motor</p> <ul style="list-style-type: none"> - PW Benzin: 1543 kg Leergewicht; 20 % Wirkungsgrad - PW Diesel: 1992 kg Leergewicht; 35 % Wirkungsgrad - PW Elektro: 1936 kg Leergewicht; 90 % Wirkungsgrad - LKW Diesel: 9300 kg Leergewicht; 45 % Wirkungsgrad <p>4. Treibstoff-/Energiekosten</p> <ul style="list-style-type: none"> - Benzin, 95 Oktan: 1.67 CHF pro Liter - Diesel: 1.79 CHF pro Liter - Strom: 0.20 CF pro kWh 	<p>3. Eigene Berechnung, Herleitung Verbrauchswerte siehe Anhang XI</p> <p>a) Rollwiderstand: (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021)</p> <p>b) Fahrzeuggewicht PW: (BFE, Bundesamt für Energie 2022)</p> <p>c) Fahrzeuggewicht LKW: (Verein Mobitool 2023) mittleres Leergewicht 7.5-16to, plus durchschn. Beladung (3.3 t von 6.9 t durchschn. Kapazität)</p> <p>d) Wirkungsgrad Motor: (Pischinger und Seifert 2021), (EnergieSchweiz)</p> <p>4. Benzin und Diesel: BFS, LIK, Durchschnitt 2018-2022; Strom: elCom, Durchschnitt 2018-2022</p>
N1 -S4	Annahmen entsprechend N1 Basisszenario, jedoch mit an Rollwiderstand angepassten Treibstoff-/Energieverbrauchswerten.	
N1 -S5	Annahmen entsprechend N1 Basisszenario, jedoch mit je Kategorie und Antriebsart angepassten Fahrleistungswerten.	
N3: Nutzung: Reifenabrieb	<p>1. Totale Fahrleistung</p> <p>2. Durchschnittliche Kosten Reifenabrieb: 0.021 CHF pro Kilometer (94 % PW, 6 % LKW).</p> <p>3. Mean-Profile-Depth Variation nach Belagstyp, Annahme: direkt proportionaler Einfluss auf Reifenabrieb.</p>	<p>1. Eigene Berechnung gemäss gesetztem Szenario (DTV).</p> <p>2. Eigene Abschätzung aus Telefoninterview mit R. Bärtschi, Pneu Fahrni (20.10.2022) und M. Wyss, System-Alpenluft AG (20.10.2022); (TCS, Touring Club Schweiz).</p> <p>3. Eigene Berechnung, Herleitung Reifenabrieb siehe auch Kapitel IX.</p>
N2e: Strassenlärmkosten (Nutzung)	<p>1. Anzahl Personen-Dezibel in Abhängigkeit der Lärmwirkung basierend auf der Anzahl strassenlärmexponierter Personen pro Kilometer Kantonsstrasse in Kerngemeinde.</p> <p>2. Anzahl Wohnungs-Dezibel in Abhängigkeit der Lärmwirkung basierend auf der Anzahl strassenlärmexponierter Wohnungen pro Kilometer Kantonsstrasse in Kerngemeinde.</p>	<p>1. und 2.: Eigene Berechnung basierend auf Lärmmodellen (Kapitel VIII), (VSS 41 828 2022) und (Catillaz und Fischer 2018), siehe auch Kapitel IX</p> <p>3. a) (VSS 41 828 2022), CHF Wert gemäss Norm auf 2021 angepasst, Personen-Dezibel Schwellwert: 48 dB Lden</p> <p>b) (VSS 41 828 2022), CHF Wert gemäss Norm auf</p>

Prozess	Annahmen	Quelle
	3. a) Lärmkosten Gesundheit: 16.43 CHF pro Personen-Dezibel b) Lärmkosten Wohnungspreise: 43.77 CHF pro Wohnungs-Dezibel	2021 angepasst, Wohnungs-Dezibel gemäss angepassten «ZKB-Lärmass» (berechnet mittels Lr(Nacht) plus 25 % Pauschalzuschlag für Lr(Tag)-Überschreitungen – vergleiche Anhang IX).
N2e -S2	Annahmen entsprechend N2e Basisszenario, jedoch mit an akustischer Wirkung angepassten Personen- und Wohnungsdezibel Mengen.	
Ne: Externe Kosten Energieverbrauch und Reifenabrieb (Nutzung)	1. Menge der PM10, NOx, Zink und CO2eq Emissionen. 2. Externe Kosten Luftverschmutzung - PM10: 1570 CHF pro Kilogramm - NOx: 7.17. CHF pro Kilogramm - Zink: 441 CHF pro Kilogramm 3. Externe Kosten Klimaerwärmung - CO2eq: 0.148 CHF pro Kilogramm	1. Stoffflüsse aus LCIA-Berechnung - PM10, NOx und CO2eq: Emissionen in die Luft - Zink: Emissionen in Luft, Boden und Grundwasser 2. und 3. (VSS 41 828 2022), CHF Wert gemäss Norm auf 2021 angepasst.
Ne -S4	Annahmen entsprechend Ne Basisszenario, jedoch mit an Rollwiderstand angepassten Treibstoff-/Energieverbrauchswerten.	
Ne -S5	Annahmen entsprechend Ne Basisszenario, jedoch mit je Kategorie und Antriebsart angepassten Fahrleistungswerten.	
Be: Externe Kosten Bau und Rückbau	Vorgehen und Kostenansätze gemäss Prozess Ne.	Siehe Prozess Ne.
Be -S1 und -S2	Annahmen entsprechend Be Basisszenario, jedoch mit an Lebensdauer angepassten Mischgut-, Transport- und Einbaumengen.	
Be -S3	Annahmen entsprechend Be Basisszenario, jedoch mit an Rezyklatanteil angepassten Mischgutrezepturen.	
Ue: Externe Kosten Unterhalt	Vorgehen und Kostenansätze gemäss Prozess Ne.	Siehe Prozess Ne.
Ue -S2	Annahmen entsprechend Ue Basisszenario, inklusive Stoffflüssen aus den Prozessen U5 und U6.	

XV. Datentabellen der Resultate

Die folgenden Tabelle 13 bis Tabelle 16 fassen die Ergebnisse für alle betrachteten Prozesse in den vier Basisszenarien und fünf Sensitivitätsanalysen zusammen. Dabei sind die Absolutwerte in den Wirkungskategorien Umweltbelastungspunkte (UBP'21), Treibhausgas-Emissionen (kg CO₂eq), nicht erneuerbarer Energiebedarf (MJ) und Lebenszykluskosten (CHF) dargestellt.

XV.a. Wirkungskategorie Umweltbelastungspunkte

Tabelle 13: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien und Sensitivitätsanalysen in der Wirkungskategorie Umweltbelastungspunkte nach der Methode der ökologischen Knappheit, Einheit: UBP'21 pro Kilometer und Jahr (Umweltbelastungspunkte auf Basis der Ökofaktoren Schweiz Stand 2021).

Szenario	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	S1:	S2:	S2:	S3:	S3:	S3:	S3:	S4:	S5:	S5:	S5:	S5:
	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	SDA 4	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
B1: Bau Binderschicht	1.07E+07	2.13E+07	1.42E+07	1.07E+07	8.52E+06	1.70E+07	1.42E+07	9.97E+06	1.99E+07	1.33E+07	9.97E+06	2.13E+07	1.07E+07	2.13E+07	1.42E+07	1.07E+07
B2: Bau Deckschichten	9.91E+06	1.92E+07	1.30E+07	1.01E+07	7.93E+06	1.54E+07	1.30E+07	9.24E+06	1.78E+07	1.20E+07	9.11E+06	1.92E+07	9.91E+06	1.92E+07	1.30E+07	1.01E+07
B3: End-of-life	2.30E+06	4.45E+06	2.99E+06	2.33E+06	1.84E+06	3.56E+06	2.99E+06	2.30E+06	4.45E+06	2.99E+06	2.33E+06	4.45E+06	2.30E+06	4.45E+06	2.99E+06	2.33E+06
U1: Strassenreinigung	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05	4.51E+05
U2: Winterdienst	1.66E+06	1.82E+06	1.82E+06	1.66E+06	1.66E+06	1.82E+06	1.82E+06	1.66E+06	1.82E+06	1.82E+06	1.66E+06	1.82E+06	1.66E+06	1.82E+06	1.82E+06	1.66E+06
U3: Markierung	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04
U4: Belagsreparaturen	4.98E+06	4.85E+06	4.99E+06	5.12E+06	4.98E+06	4.85E+06	4.99E+06	4.98E+06	4.85E+06	4.99E+06	5.12E+06	4.85E+06	4.98E+06	4.85E+06	4.99E+06	5.12E+06
U5: Hochdruckreinigung	-	-	-	-	-	7.94E+05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U6: Grinding	-	-	-	-	-	7.33E+05	7.33E+05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N1: Energieverbrauch (Nutzung)	1.11E+09	1.08E+09	1.10E+09	1.11E+09	1.11E+09	1.08E+09	1.10E+09	1.11E+09	1.08E+09	1.10E+09	1.11E+09	1.06E+09	9.57E+08	9.32E+08	9.49E+08	9.60E+08
N2: Strassenlärm (Nutzung)	8.18E+07	3.88E+07	7.23E+07	7.71E+07	8.18E+07	3.93E+07	6.80E+07	8.18E+07	3.88E+07	7.23E+07	7.71E+07	3.88E+07	8.18E+07	3.88E+07	7.23E+07	7.71E+07
N3: Reifenabrieb (Nutzung)	1.29E+07	1.24E+07	1.29E+07	1.24E+07	1.29E+07	1.24E+07	1.29E+07	1.29E+07	1.24E+07	1.29E+07	1.24E+07	1.24E+07	1.29E+07	1.24E+07	1.29E+07	1.24E+07
Total	1.23E+09	1.18E+09	1.22E+09	1.23E+09	1.23E+09	1.18E+09	1.22E+09	1.23E+09	1.18E+09	1.22E+09	1.23E+09	1.16E+09	1.08E+09	1.04E+09	1.07E+09	1.08E+09

XV.b. Wirkungskategorie Treibhausgas-Emissionen

Tabelle 14: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien und Sensitivitätsanalysen in der Wirkungskategorie Treibhausgas-Emissionen, Einheit: kg CO₂eq pro Kilometer und Jahr (Kilogramm CO₂-Äquivalente).

Szenario	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	S1:	S2:	S2:	S3:	S3:	S3:	S3:	S4:	S5:	S5:	S5:	S5:
	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	SDA 4	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
B1: Bau Binderschicht	7.03E+03	1.41E+04	9.37E+03	7.03E+03	5.62E+03	1.12E+04	9.37E+03	6.79E+03	1.36E+04	9.06E+03	6.79E+03	1.41E+04	7.03E+03	1.41E+04	9.37E+03	7.03E+03
B2: Bau Deckschichten	6.09E+03	1.20E+04	8.11E+03	6.24E+03	4.87E+03	9.59E+03	8.11E+03	5.83E+03	1.13E+04	7.67E+03	5.84E+03	1.20E+04	6.09E+03	1.20E+04	8.11E+03	6.24E+03
B3: End-of-life	4.88E+02	9.46E+02	6.35E+02	4.93E+02	3.90E+02	7.57E+02	6.35E+02	4.88E+02	9.46E+02	6.35E+02	4.93E+02	9.46E+02	4.88E+02	9.46E+02	6.35E+02	4.93E+02
U1: Strassenreinigung	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02	3.21E+02
U2: Winterdienst	9.09E+02	9.99E+02	9.99E+02	9.09E+02	9.09E+02	9.99E+02	9.99E+02	9.09E+02	9.99E+02	9.99E+02	9.09E+02	9.99E+02	9.09E+02	9.99E+02	9.99E+02	9.09E+02
U3: Markierung	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.07E+01
U4: Belagsreparaturen	3.06E+03	3.03E+03	3.12E+03	3.15E+03	3.06E+03	3.03E+03	3.12E+03	3.06E+03	3.03E+03	3.12E+03	3.15E+03	3.03E+03	3.06E+03	3.03E+03	3.12E+03	3.15E+03
U5: Hochdruckreinigung	-	-	-	-	-	6.30E+02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U6: Grinding	-	-	-	-	-	4.76E+02	4.76E+02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N1: Energieverbrauch (Nutzung)	8.23E+05	8.00E+05	8.16E+05	8.26E+05	8.23E+05	8.00E+05	8.16E+05	8.23E+05	8.00E+05	8.16E+05	8.26E+05	7.83E+05	5.95E+05	5.79E+05	5.90E+05	5.96E+05
Total	8.41E+05	8.32E+05	8.38E+05	8.44E+05	8.38E+05	8.27E+05	8.39E+05	8.40E+05	8.31E+05	8.38E+05	8.43E+05	8.14E+05	6.12E+05	6.10E+05	6.12E+05	6.14E+05

XV.c. Wirkungskategorie nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf

Tabelle 15: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien und Sensitivitätsanalysen in der Wirkungskategorie nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf, Einheit: MJ pro Kilometer und Jahr (Mega Joule).

Szenario	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	S1:	S2:	S2:	S3:	S3:	S3:	S3:	S4:	S5:	S5:	S5:	S5:
	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	SDA 4	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
B1: Bau Binderschicht	1.35E+05	2.70E+05	1.80E+05	1.35E+05	1.08E+05	2.16E+05	1.80E+05	1.20E+05	2.40E+05	1.60E+05	1.20E+05	2.70E+05	1.35E+05	2.70E+05	1.80E+05	1.35E+05
B2: Bau Deckschichten	1.51E+05	2.83E+05	1.89E+05	1.55E+05	1.21E+05	2.26E+05	1.89E+05	1.34E+05	2.51E+05	1.68E+05	1.29E+05	2.83E+05	1.51E+05	2.83E+05	1.89E+05	1.55E+05
B3: End-of-life	7.08E+03	1.37E+04	9.21E+03	7.15E+03	5.66E+03	1.10E+04	9.21E+03	7.08E+03	1.37E+04	9.21E+03	7.15E+03	1.37E+04	7.08E+03	1.37E+04	9.21E+03	7.15E+03
U1: Strassenreinigung	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03	2.25E+03
U2: Winterdienst	1.41E+04	1.55E+04	1.55E+04	1.41E+04	1.41E+04	1.55E+04	1.55E+04	1.41E+04	1.55E+04	1.55E+04	1.41E+04	1.55E+04	1.41E+04	1.55E+04	1.55E+04	1.41E+04
U3: Markierung	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02	1.60E+02
U4: Belagsreparaturen	7.59E+04	7.15E+04	7.27E+04	7.81E+04	7.59E+04	7.15E+04	7.27E+04	7.59E+04	7.15E+04	7.27E+04	7.81E+04	7.15E+04	7.59E+04	7.15E+04	7.27E+04	7.81E+04
U5: Hochdruckreinigung	-	-	-	-	-	1.80E+03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U6: Grinding	-	-	-	-	-	3.47E+03	3.47E+03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N1: Energieverbrauch (Nutzung)	1.07E+07	1.04E+07	1.06E+07	1.07E+07	1.07E+07	1.04E+07	1.06E+07	1.07E+07	1.04E+07	1.06E+07	1.07E+07	1.02E+07	9.35E+06	9.10E+06	9.27E+06	9.38E+06
Total	1.11E+07	1.10E+07	1.10E+07	1.11E+07	1.10E+07	1.09E+07	1.11E+07	1.10E+07	1.10E+07	1.10E+07	1.11E+07	1.08E+07	9.73E+06	9.76E+06	9.74E+06	9.77E+06

XV.d. Interne und externe Lebenszykluskosten

Tabelle 16: Absolutwerte der internen und externen Lebenszykluskosten, Einheit: CHF pro Kilometer und Jahr (Schweizer Franken, 2021).

Szenario	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	S1: ACMR 8	S2: SDA 4	S2: SDA 8	S3: ACMR 8	S3: SDA 4	S3: SDA 8	S3: AC 8 H LA	S4: SDA 4	S5: ACMR 8	S5: SDA 4	S5: SDA 8	S5: AC 8 H LA
B1: Bau Binderschicht	8.13E+03	1.63E+04	1.08E+04	8.13E+03	6.50E+03	1.30E+04	1.08E+04	7.76E+03	1.55E+04	1.03E+04	7.76E+03	1.63E+04	8.13E+03	1.63E+04	1.08E+04	8.13E+03
B2: Bau Deckschichten	1.07E+04	2.13E+04	1.40E+04	1.07E+04	8.59E+03	1.71E+04	1.40E+04	1.05E+04	2.08E+04	1.37E+04	1.02E+04	2.13E+04	1.07E+04	2.13E+04	1.40E+04	1.07E+04
B3: End-of-life	3.88E+03	7.59E+03	5.08E+03	3.91E+03	3.11E+03	6.07E+03	5.08E+03	3.88E+03	7.59E+03	5.08E+03	3.91E+03	7.59E+03	3.88E+03	7.59E+03	5.08E+03	3.91E+03
U1: Strassenreinigung	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03	1.02E+03
U2: Winterdienst	8.53E+02	9.39E+02	9.39E+02	8.53E+02	8.53E+02	9.39E+02	9.39E+02	8.53E+02	9.39E+02	9.39E+02	8.53E+02	9.39E+02	8.53E+02	9.39E+02	9.39E+02	8.53E+02
U3: Markierung	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03	3.00E+03
U4: Belagsreparaturen	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03	5.39E+03
U5: Hochdruckreinigung	-	-	-	-	-	5.60E+03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U6: Grinding	-	-	-	-	-	7.00E+03	7.00E+03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N1: Energieverbrauch (Nutzung)	3.84E+05	3.74E+05	3.81E+05	3.85E+05	3.84E+05	3.74E+05	3.81E+05	3.84E+05	3.74E+05	3.81E+05	3.85E+05	3.66E+05	2.84E+05	2.77E+05	2.82E+05	2.85E+05
N3: Reifenabrieb (Nutzung)	6.05E+04	5.78E+04	6.03E+04	5.80E+04	6.05E+04	5.78E+04	6.03E+04	6.05E+04	5.78E+04	6.03E+04	5.80E+04	5.78E+04	6.05E+04	5.78E+04	6.03E+04	5.80E+04
Total interne Kosten	4.78E+05	4.87E+05	4.82E+05	4.76E+05	4.73E+05	4.91E+05	4.89E+05	4.77E+05	4.86E+05	4.81E+05	4.76E+05	4.79E+05	3.78E+05	3.90E+05	3.82E+05	3.76E+05
Be: ext. Kosten Bau und Rückbau	6.59E+03	1.30E+04	8.72E+03	6.65E+03	5.27E+03	1.04E+04	8.72E+03	6.32E+03	1.24E+04	8.33E+03	6.31E+03	1.30E+04	6.59E+03	1.30E+04	8.72E+03	6.65E+03
Ue: ext. Kosten Unterhalt	2.57E+03	2.66E+03	2.70E+03	2.60E+03	2.57E+03	3.49E+03	3.06E+03	2.57E+03	2.66E+03	2.70E+03	2.60E+03	2.66E+03	2.57E+03	2.66E+03	2.70E+03	2.60E+03
N2e: ext Kosten Strassenlärm (Nutzung)	2.28E+05	1.54E+05	2.13E+05	2.20E+05	2.28E+05	1.58E+05	2.09E+05	2.28E+05	1.54E+05	2.13E+05	2.20E+05	1.54E+05	2.28E+05	1.54E+05	2.13E+05	2.20E+05
Ne: übrige ext. Kosten Nutzung	3.10E+05	3.02E+05	3.08E+05	3.11E+05	3.10E+05	3.02E+05	3.08E+05	3.10E+05	3.02E+05	3.08E+05	3.11E+05	2.97E+05	3.43E+05	3.34E+05	3.40E+05	3.44E+05
Total externe Kosten	5.47E+05	4.72E+05	5.32E+05	5.40E+05	5.46E+05	4.74E+05	5.29E+05	5.47E+05	4.71E+05	5.32E+05	5.40E+05	4.66E+05	5.80E+05	5.04E+05	5.65E+05	5.73E+05
Total	1.02E+06	9.59E+05	1.01E+06	1.02E+06	1.02E+06	9.65E+05	1.02E+06	1.02E+06	9.57E+05	1.01E+06	1.02E+06	9.45E+05	9.57E+05	8.94E+05	9.47E+05	9.49E+05

