

Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse



Ökobilanz und Lebenszykluskosten von lärmmatten Belägen bei Tempo 30

Ergänzender Bericht zur Studie «LCA LAB» (BAFU 2024)

25. August 2025

Im Auftrag der Stadt Zürich

Impressum

Finanziert durch

Stadt Zürich, Umwelt- und Gesundheitsschutz (UGZ)

Vertreterinnen der Auftraggeberin

Anna Hool, UGZ, Leiterin Strassenlärmschutz; Projektleiterin

Stefanie Rüttener, UGZ, Leiterin Fachbereich Lärmschutz

Autoren (Projektteam Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse):

Thomas Singer, Grolimund und Partner AG

Manuel Kunz, Grolimund und Partner AG

Arthur Braunschweig, E2 Management Consulting AG

Rolf Huwyler, HK Partners AG

Johannes Schindler, Grolimund und Partner AG

Erik Bühlmann, Grolimund und Partner AG

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

Zusammenfassung

Ziel der Studie

Die vorliegende Studie LAB T30 untersucht die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen verschiedener lärmarmen Strassenbeläge (LAB) auf einer Kantonsstrasse innerorts mit schwerer bis sehr schwerer Strassennutzung bei Tempo 30 (T30) im Vergleich zu einem konventionellen Referenzbelag. Die Studie basiert auf der vorherigen Basisstudie LCA LAB (2024), die im Auftrag des BAFU für eine Innerortssituation bei Tempo 50 (T50) durchgeführt wurde. Es ist zu beachten, dass die Studie LAB T30 keine Aussagen zur Wirkung einer Temporeduktion von T50 auf T30 macht. Stattdessen beschreiben sowohl diese Studie als auch die Basisstudie, wie sich unterschiedliche Beläge bei den jeweiligen Tempi auswirken. Für die Untersuchung wurden die gleichen vier Beläge wie in der Basisstudie verwendet, wobei ein unverändertes Szenario einer typischen innerörtlichen Kantonsstrasse mit 8'000 Fahrzeugen pro Tag und mittlerer Bevölkerungsdichte zugrunde gelegt wurde.

Der Belag ACMR 8 stellt dabei den konventionellen Referenzbelag dar und besteht aus einer klassischen Asphaltmischung. Ihm werden drei lärmarme Beläge (LAB) gegenübergestellt: SDA 4 und SDA 8 (verbreitete lärmarme Beläge) und AC 8 H LA (lärmarm). Die Ökobilanz wurde als «Lebenszyklusanalyse» (Life Cycle Assessment, LCA) durchgeführt, d.h. in dieser Studie wurde der gesamte Lebenszyklus einer Strasse betrachtet, bestehend aus Bau, Unterhalt, Nutzung – inklusive Lärm und Treibstoffverbrauch – sowie Rückbau und Entsorgung. Für das gleiche System wurden die Lebenszykluskosten berechnet.

Ergebnisse

Im Rahmen der Ökobilanz wurden die Umweltauswirkungen anhand von drei Indikatoren bewertet: In den «Umweltbelastungspunkten» (UBP'21) des BAFU, welche ein breites Spektrum von Umweltbelastungen (inklusive Lärm) berücksichtigen, sowie in den spezifischen Auswertungen von (nicht-erneuerbarem) Energieeinsatz (MJeq) und von 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 die von den Verursachern nicht getragenen Kosten bei Dritten («externe Kosten», z.B. Gesundheitskosten verursacht von Strassenlärm).

Der Belag SDA 4 verursacht im Vergleich zu den anderen untersuchten Belägen sowohl bei T50 als auch bei T30 die geringsten Umweltbelastungen und die geringsten Gesamtkosten. In UBP'21 senkt ein SDA 4 gegenüber dem Referenzbelag ACMR 8 die gesamte Umweltbelastung über den Lebenszyklus der Strasse um knapp 3 % (vgl. die folgende Abbildung). Dies ist etwas weniger als bei Tempo 50 (dort waren es

rund 4 %), aber angesichts des grossen betrachteten Systems – nahezu der gesamte Strassenverkehr – noch immer eine relevante Verbesserung.

Da bei T30 die Lärmemissionen allgemein bereits tiefer liegen, ist beim Vergleich der Beläge bei T30 der Anteil des Lärms an der Umweltbelastung (in UBP'21) geringer als bei der Basisstudie mit T50. Gleichzeitig gewinnt die Einsparung von Treibstoff durch LAB im Vergleich zum Referenzbelag bei T30 an Bedeutung durch den vergleichsweise höheren Energieverbrauch bei T30 zu T50 (unter der Annahme, dass der Verkehrsfluss bei T50 und T30 gleich und flüssig ist).

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 bei T30.

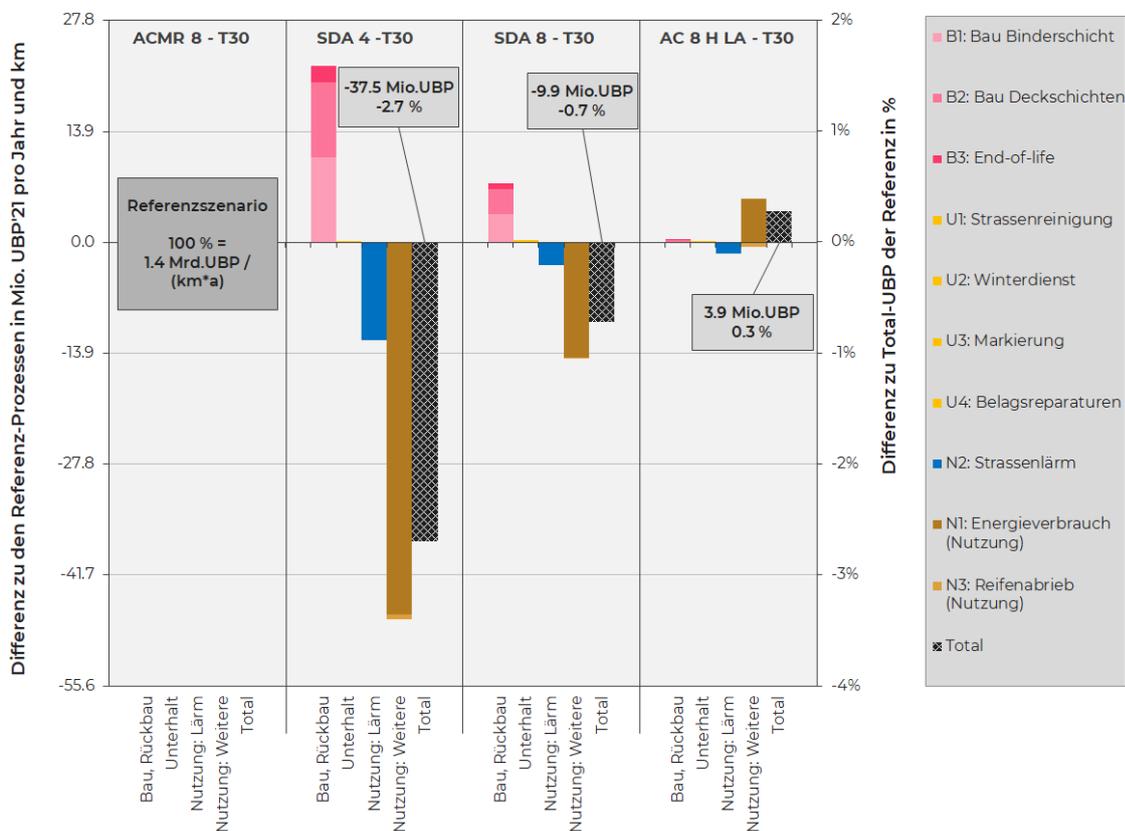


Abbildung 3 Differenzen der Umweltbelastungspunkte gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8 bei T30. Die Unterhaltsprozesse (U*) sind wenig bedeutend und alle in Gelb dargestellt.

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 knapp 3 % (schwarz-weiße Säule). Trotz häufigerer Erneuerung ist die Gesamtökobilanz besser. Hauptgrund ist die Einsparung beim Treibstoffverbrauch

aufgrund des geringen Rollwiderstands. Sowohl der Belag SDA 8 als auch der AC 8 H LA zeigen im Vergleich zum Referenzbelag in UBP'21 geringe Veränderungen, wobei die Umweltbelastung beim SDA 8 um weniger als 1 % sinkt, während diese beim AC 8 H LA ungefähr gleich bleibt.

Bei den (hier nicht abgebildeten) Auswertungen bezüglich Treibhausgasemissionen und nicht erneuerbarem Energieverbrauch, in welchen Lärm nicht berücksichtigt ist, zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei die Unterschiede zwischen den Belagsarten insgesamt kleiner sind als bei UBP'21.

Die Analyse der Lebenszykluskosten zeigt ähnliche Ergebnisse (vgl. untenstehende Abbildung): Insgesamt bleibt ein SDA 4 auch bei T30 der umweltfreundlichste und gesamtwirtschaftlich vorteilhafteste Belag. SDA 8 und AC 8 H LA zeigen gegenüber einem ACMR 8 kaum Veränderungen. Ein SDA 4 reduziert die Kosten gegenüber einem ACMR 8 um ca. 5 %, hauptsächlich durch Einsparungen von direkten Kosten für Treibstoff und durch geringere externe Kosten durch Lärm. Trotz höherer Baukosten aufgrund einer kürzeren Lebensdauer überwiegen auch bei T30 die Einsparungen durch den SDA 4 bei den Betriebs- und Lärmkosten. Die Einsparungen bei den Belägen SDA 8 und AC 8 H LA sind geringer.

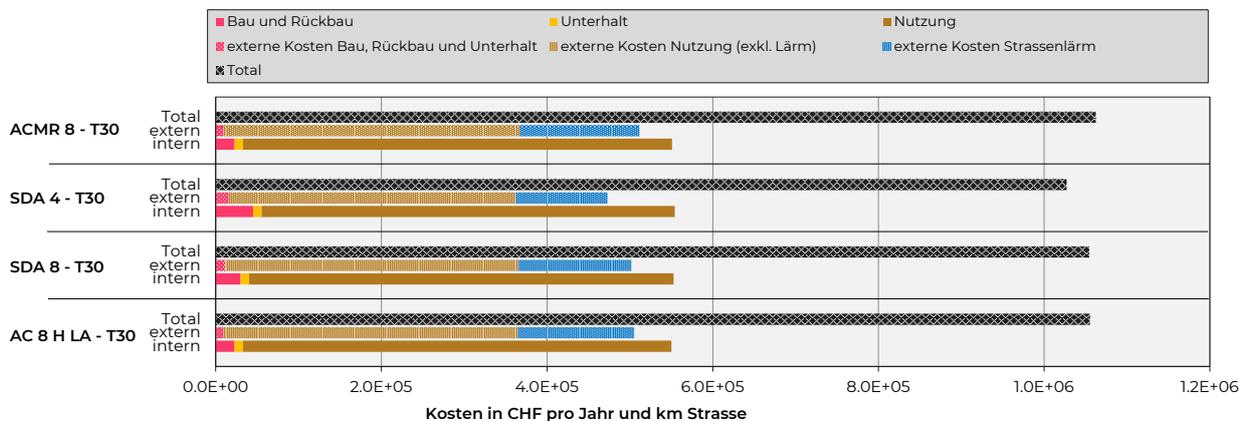


Abbildung 6: Interne, externe und totale Kosten pro Jahr und Kilometer Strasse für die vier Basisszenarien bei T30.

Ausblick

Bei der Analyse einer typischen grosstädtischen Situation mit höherer Besiedlungsdichte und grösseren Verkehrsmengen dürften die Vorteile eines lärmarmen SDA 4 gegenüber einem ACMR 8 tendenziell stärker ausfallen.

Um die Bedeutung der Belagswahl bei einem höheren Anteil von e-Fahrzeugen bei T30 zu verstehen, wäre vertieft zu betrachten, wie sich das Zusammenspiel von Motorenlärm und Abrolllärm auf den diversen Strassenbelägen auswirkt.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage, Fragestellung und Projekt.....	8
1.1.	Ausgangslage und Fragestellung.....	8
1.2.	Projektorganisation.....	9
1.3.	Studiengrundlage: Die Basisstudie «LCA LAB (2024)».....	10
2.	Systembeschreibung.....	11
2.1.	Strassensituation und Nutzung.....	12
2.2.	Betrachtete Belagstypen: Die vier Basisszenarien.....	13
2.3.	Systemgrenzen und funktionale Einheit.....	14
2.4.	Prozesse.....	15
2.4.1.	Nutzung – Energieverbrauch und dessen Emissionen: N1.....	15
2.4.2.	Nutzung - Strassenlärm: N2.....	17
2.4.3.	Nutzung - Reifenabrieb: N3.....	19
2.5.	Grundlagen der LCA-Methodik.....	19
2.6.	Grundlagen der LCC-Methodik.....	20
3.	Ergebnisse.....	21
3.1.	Die Resultatdarstellungen – was sie zeigen, und was nicht.....	21
3.2.	Gesamtschau auf die vier Basisszenarien.....	22
3.3.	Umweltbelastungspunkte.....	25
3.4.	Treibhausgaspotential und Primärenergiebedarf (nePE).....	28
3.5.	Interne und externe Kosten.....	31
4.	Würdigung der Resultate und Ausblick.....	36

Anhang

I.	Glossar	40
II.	Abbildungsverzeichnis.....	41
III.	Tabellenverzeichnis.....	43
IV.	Literaturverzeichnis.....	45
V.	Dank.....	46
VI.	Mischgut.....	46
VII.	Lärmwirkung: akustisches Alterungsmodell.....	47
VIII.	Strassenlärmkosten: Ausmass lärmbelastete Personen und Wohnungen ...	49
IX.	Energieverbrauch und Reifenabrieb.....	51
IX.a.	Energieverbrauch.....	53
IX.b.	Reifenabrieb.....	54
X.	Modellannahmen LCA Life Cycle Assessment.....	55
XI.	Modellannahmen LCC Life Cycle Costing.....	57
XII.	Datentabellen der Resultate	59
XII.a.	Wirkungskategorie Umweltbelastungspunkte.....	60
XII.b.	Wirkungskategorie Treibhausgas-Emissionen	61
XII.c.	Wirkungskategorie nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf	62
XII.d.	Interne und externe Lebenszykluskosten	63

1. Ausgangslage, Fragestellung und Projekt

1.1. Ausgangslage und Fragestellung

Strassenlärm ist die dominierende Lärmquelle in der Schweiz (siehe Catillaz und Fischer 2018). Aufgrund des erwarteten Bevölkerungswachstums wird bis 2030 mit einer Zunahme des Personenverkehrs um 25% gerechnet (Justen u.a. 2022). Als Lärmschutzmassnahme an der Quelle haben sich in der Schweiz lärmarme Strassenbeläge (LAB) etabliert, die gegenüber konventionellen Belägen eine deutliche Lärmreduzierung ergeben. Dank der Forschung von Bund und Kantonen sowie den Erfahrungen aus der Praxis konnten die Asphaltmischungen der LAB in den letzten Jahren deutlich optimiert werden. Die kürzere Lebensdauer von LAB führt jedoch nach wie vor zu potenziellen Nachteilen für die Ökobilanz und die Gesamtkosten von LAB. Nutzungseffekte wie Lärmreduzierung, Rollwiderstand und Reifenabrieb wurden in bisherigen Untersuchungen jedoch kaum berücksichtigt.

Im Jahr 2024 hat die Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse für das BAFU in der Studie «Lärmarme Strassenbeläge – Ökobilanz und Lebenszykluskosten» (LCA LAB), die im weiteren Verlauf dieses Berichts als Basisstudie bezeichnet wird, dieses Thema detailliert untersucht. Diese Basisstudie bildet die Grundlage für die vorliegende ergänzende (Nachfolge-)Studie LAB T30.

Die Basisstudie wurde für eine idealtypische Situation auf einer Kantonsstrasse innerorts mit Tempo 50 (T50) erstellt. In den letzten Jahren haben mehrere Städte auf vielen Strassen Tempo 30 (T30) eingeführt. Deshalb interessiert es die Stadt Zürich, wie sich lärmarme Strassenbeläge in den gleichen Szenarien der Basisstudie mit T30 anstelle von T50 auf Ökobilanz und Lebenszykluskosten auswirken. Dies wird in der vorliegenden Nachfolge-Studie LAB T30 analysiert.

Wie bereits in der Basisstudie vergleicht auch diese Nachfolge-Studie LAB T30 die Wirkungen unterschiedlicher Beläge. Diese Nachfolge-Studie ist deshalb als nachgelagerte Sensitivitätsanalyse zur Basisstudie über die Auswirkungen von Belägen bei einem geringeren Tempo zu verstehen. Es handelt sich also bei dieser Nachfolge-Studie nicht um eine Analyse der Auswirkungen einer Temporeduktion; dafür müssten viele weitere Faktoren in die Auswertung einbezogen werden.¹

Dieser Bericht LAB T30 basiert zu grossen Teilen auf dem Bericht der Basisstudie. Ausführlich sind im vorliegenden Bericht die gegenüber dem Basisbericht veränderten Annahmen und Berechnungen dargestellt, sowie die Erkenntnisse im Vergleich der Resultate von Basisstudie und LAB T30-Studie. Die gegenüber dem Basisbericht unveränderten methodischen Elemente, wie z.B. Systemgrenzen oder die Bau- und

¹ Eine entsprechende Studie zu den Auswirkungen einer solchen Temporeduktion ist aktuell für das BAFU seitens ArGe LCA-Strasse in Arbeit.

Unterhaltsprozesse der Beläge, werden meist nur in knapper Form erwähnt, und für Details wird auf die Basisstudie verwiesen.

Fragestellung und Ziel

Die Fragestellung der vorliegenden Nachfolge-Studie lautet: Wie verhalten sich lärmreduzierende Strassenbeläge (LAB) im Vergleich zu konventionellen Belägen in Bezug auf ökologische Auswirkungen und Kosten über den gesamten Lebenszyklus unter Berücksichtigung der Nutzung bei T30?

Ziel der Studie LAB T30 ist die vergleichende Analyse der ökologischen und wirtschaftlichen Aspekte von LAB und konventionellen Belägen, analog zur Basisstudie, aber bei einem Tempo-30-Regime.

Wie die Basisstudie ist auch die Studie LAB T30 eine umfassenden Lebenszyklus-betrachtung über alle relevanten Prozesse. Dazu werden die wesentlichen Umwelt- und Kostenaspekte mittels Life Cycle Assessment (LCA) und Life Cycle Costing (LCC) berechnet. Gegenüber der Basisstudie werden die veränderten Auswirkungen bei T30 in der Nutzungsphase berücksichtigt.

Nutzen des Projekts

In Ergänzung der Basisstudie LCA LAB erlaubt die vorliegende Analyse zu beurteilen, ob und in welchem Masse sich die Umwelt- und Kostenaspekte von verschiedenen Belägen bei T30 unterscheiden. Dies unterstützt die Entscheidungsfindung bei der Planung von Strassenbelägen auf Innerortsstrassen, auf denen aktuell oder möglicherweise in der Zukunft T30 gilt oder gelten soll.

1.2. Projektorganisation

Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse

Die vorliegende Studie wurde durch die gleiche Arbeitsgemeinschaft wie die Basisstudie erarbeitet (siehe Impressum, S.2).

Interesse seitens der Stadt Zürich

Die Lärmfachstelle der Stadt Zürich setzt für den Lärmschutz sowohl auf Temporeduktionen wie auch auf lärmarme Beläge. Es stellt sich für die Stadt Zürich daher die wichtige Frage, ob resp. inwiefern lärmarme Beläge auch bei einem

Geschwindigkeitsregime von T30 ökologisch und wirtschaftlich gegenüber konventionellen Belägen vorteilhaft abschneiden.

Critical Review

Die Basisstudie LCA LAB wurde einem Critical Review unterzogen. Für die vorliegende Übertragung auf T30 wurde auf ein Critical Review verzichtet.

1.3. Studiengrundlage: Die Basisstudie «LCA LAB (2024)»

Die Grundlage dieser Studie T30 bildet die Basisstudie «Lärmarme Strassenbeläge - Ökobilanz und Lebenszykluskosten» des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) bei T50.

Alle Berechnungen, Prozesse und Annahmen der Studie LAB T30 orientieren sich, sofern nicht ausdrücklich anders angegeben, an den Szenarien, Methoden und Vorgehensweisen in der Basisstudie.

2. Systembeschreibung

Eine Ökobilanz-Studie benötigt zur Berechnung konkrete Szenarien. Hierzu wurden drei lärmarme Belagstypen mit einem konventionellen Referenzbelagsszenario verglichen. Die vier Szenarien wurden so aufgesetzt, dass sie für die ganze Schweiz relevante Resultate liefern und diese möglichst für die nächsten 10 bis 20 Jahre bedeutsam sind. Die Baupraxen von LAB in der Schweiz sind unterschiedlich. In der Basisstudie LCA LAB wurden repräsentative Annahmen entwickelt. Diese wurden in der vorliegenden Studie zu grossen Teilen unverändert übernommen. Dabei ist zu beachten, dass die zugrunde gelegten Baukosten in den Szenarien keine Anpassung an die stark gestiegene Kostenentwicklung der letzten Jahre erfahren haben. Ein Ende dieser Teuerungsdynamik ist derzeit nicht absehbar und wurde bei der wirtschaftlichen Aussagekraft der Szenarien nicht berücksichtigt.

In diesem Kapitel werden zunächst die angenommene Ausgangslage und die vier Basisszenarien erläutert. Danach werden die betrachteten Prozesse kurz beschrieben und darauf eingegangen, ob und ggf. wie Festlegungen, Quellen und Berechnungen gegenüber der Basisstudie verändert wurden. Am Anfang jedes Unterkapitels findet sich ein Abschnitt, der den jeweiligen Ansatz beschreibt, was eine klare Abgrenzung zur Basisstudie ermöglicht und die jeweiligen Informationen einfach auffindbar machen soll. Einzelne Elemente werden für eine gute Lesbarkeit zum Wohle des Verständnisses auch in dieser Studie in verkürzter Form wiedergegeben.

Die Annahmen und Festlegungen sind für die Studie, ihre Resultate und die Schlussfolgerungen bestimmend. Die Systemgrenzen sind in Kapitel 2.3, die detaillierte Beschreibung der berücksichtigten Prozesse in Kapitel 2.4 zu finden. Beide sind in Abbildung 1 als Übersicht dargestellt.

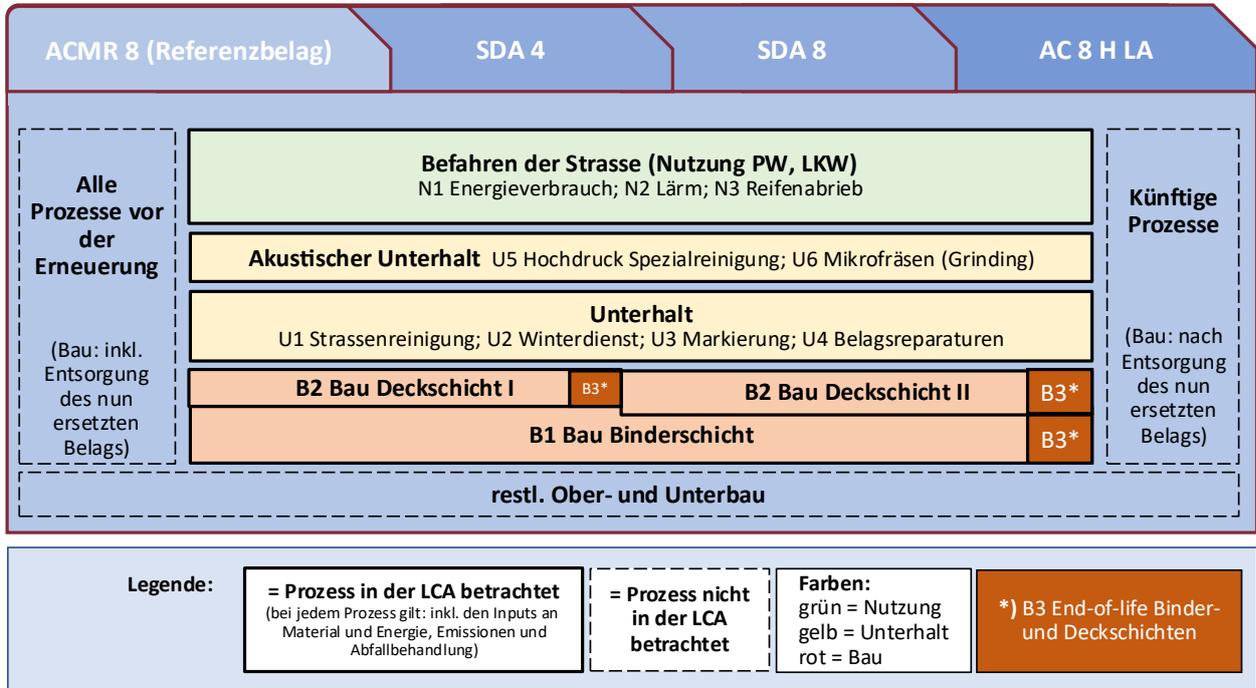


Abbildung 1: Modell der betrachteten Prozessgruppen und Abläufe, inkl. Systemabgrenzung. Gestrichelte Bereiche werden in der Analyse nicht betrachtet. Als «Karteikarten» dargestellt sind die vier betrachteten Szenarien mit jeweils abweichendem Deckbelag.

Die methodischen Grundlagen für die LCA (Ökobilanz) und LCC (Lebenszykluskosten) sind in den Kapiteln 2.5 und 2.6 kurz erläutert. Eine detaillierte Beschreibung der methodischen Grundlagen ist in der Basisstudie zu finden.

2.1. Strassensituation und Nutzung

Die Strassensituation und Nutzung sind in der vorliegenden Studie gegenüber der Basisstudie mit Ausnahme der angenommenen Geschwindigkeit unverändert.

Auch hier wird eine durchschnittliche, unspezifische Strassensituation einer Kantonsstrasse innerorts betrachtet, hier jedoch mit einer signalisierten Geschwindigkeit von 30 km/h. 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 T5² ausgelegt.

Die Nutzung liege bei 8'000 Fahrzeugen pro Tag bei einem Schwerverkehrsanteil von 6 %. Auch die Anteile der von mit Diesel, Benzin und elektrisch angetriebenen

² Verkehrslastklassen nach VSS, T4 bis T5 entspricht dabei schwerer bis sehr schwerer Strassennutzung.

Fahrzeuge ist gegenüber der Basisstudie unverändert. Die Besiedlung im Umfeld der Strasse entspricht dem Schweizer Durchschnitt entlang von Kantonsstrassen im Gebiet von Kerngemeinden.

Die Überlegungen und Ergebnisse gelten auch bei dieser Studie unabhängig vom Strasseneigentümer ebenso für eine Gemeindestrasse mit vergleichbarer Charakteristik.

2.2. Betrachtete Belagstypen: Die vier Basisszenarien

Die betrachteten Belagstypen sind gegenüber der Basisstudie unverändert übernommen. Die folgende Beschreibung ist gegenüber dem Basisbericht textlich gekürzt.

Die Studie vergleicht vier verschiedene Belagsarten als Deckschichten. Das Referenzszenario ist der weit verbreitete Rauhasphalt ACMR 8, der eine hohe mechanische Stabilität und eine Lebensdauer von 20 Jahren aufweist. Im Gegensatz dazu werden die Typen SDA 4 und SDA 8 als lärmarme Beläge (LAB) betrachtet. Diese halbstarren Asphalte haben erhöhte Hohlraumgehalte und bieten in den ersten Jahren nach dem Einbau eine deutliche Lärminderung. SDA 4 zeichnet sich durch besonders hohe Lärminderungseigenschaften aus, wobei die akustische Lebensdauer auf ca. 10 Jahre geschätzt wird, während SDA 8 eine Lebensdauer von 15 Jahren aufweist. Als weiterer LAB wird AC 8 H LA untersucht, ein Betonasphalt mit feiner Oberflächentextur, jedoch ohne akustisch wirksame Hohlräume, dessen Lebensdauer ebenfalls auf 20 Jahre geschätzt wird.

Die Untersuchung konzentriert sich auf den typischen Einsatz dieser Beläge auf Kantonsstrassen innerorts. Hier kann die tatsächliche Lebensdauer eines Belages kürzer sein als die technische Lebensdauer, da häufige Bauarbeiten, z.B. für die Verlegung von Leitungen, eine vorzeitige Erneuerung erforderlich machen. Dieser Aspekt wurde in der Studie nicht weiter berücksichtigt. Ebenso wurden besondere bautechnische Anforderungen, wie sie z.B. im Gebirge erforderlich sind, nicht untersucht. Weitere detaillierte Angaben zu Materialeigenschaften, akustischen Wirkungen und bautechnischen Aspekten sind der Basisstudie zu entnehmen.

Die jedem Basisszenario zugeordneten, spezifischen Prozesseigenschaften sind in Kapitel 2.4 erläutert. Die in den Szenarien verwendeten Mischgutrezepturen sowie Alterungsmodelle zur akustischen Wirkung über die Zeit sind in den Anhängen VI und Anhang VII dargestellt. Die Anhänge VIII und IX enthalten eine Abschätzung der Strassenlärnkosten und des Energieverbrauchs einschliesslich des Reifenabriebs in Abhängigkeit vom jeweiligen Belagstyp. Die Modellannahmen für die LCA- und LCC-Berechnungen sind in den Anhängen X und XI zusammengefasst.

2.3. Systemgrenzen und funktionale Einheit

Die Systemgrenzen sowie die funktionale Einheit sind gegenüber der Basisstudie unverändert. Die folgende Darstellung ist eine gekürzte Fassung der Ausführungen im Basisbericht. Eine detaillierte Beschreibung kann dem Basisbericht entnommen werden.

Abbildung 1 zeigt die Übersicht aller betrachteten Prozesse («Prozessmodell») für die vier Basisszenarien (Kapitel 2.2) und die darin betrachteten Prozesse (Kapitel 2.4), 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). Tragschicht und Unterbau der Strasse liegen ausserhalb des betrachteten Systems.
- Unterhalt: Die Prozesse U1 bis U4 beschreiben den Strassenunterhalt über die gesamte Lebensdauer der Strasse, für Strassenreinigung, Winterdienst, Markierungen und Belagsreparaturen.
- 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 wurde beispielsweise für jeden Bauprozess auch die Bereitstellung der eingesetzten Materialien und Maschinen sowie deren Unterhalt und Entsorgung berücksichtigt. Für die Nutzung der Strasse durch PW und LKW wurde nebst den direkten Emissionen der Fahrzeuge durch ihren Treibstoffverbrauch auch die Bereitstellung der Treibstoffe und des Stroms (für elektrische Fahrzeuge inkl. ihrer Batterieherstellung) einbezogen. Nicht berücksichtigt wurde hingegen Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der PW und LKW, da diese nicht von den Belägen beeinflusst werden und in allen Szenarien identisch sind.

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, deren Bau (anteilmässig), den Unterhalt während eines Jahres, und die Nutzung durch jährlich ($8000 * 365 =$) 2.92 Millionen Fahrzeug-Kilometer, sowie den Rückbau (anteilmässig).

2.4. 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) – unverändert, analog Basisstudie.
- Unterhalt der Strasse durch den Strasseneigentümer (Kürzel «U», Prozesse U1 bis U4) während der gesamten Lebensdauer – unverändert, analog Basisstudie.
- Nutzung der Strasse durch die Strassennutzer (Kürzel «N», Prozesse N1 bis N3) während der gesamten Lebensdauer - für LAB T30 neu betrachtet.

Nachfolgend wird somit einzig auf die Nutzungs-Prozesse eingegangen; für die Prozesse Bau und Rückbau sowie Unterhalt wird auf die Basisstudie verwiesen.

2.4.1. Nutzung – Energieverbrauch und dessen Emissionen: N1

Für die Berechnung der Belagswirkung auf den Energieverbrauch wurden grundsätzlich die methodischen Ansätze der Basisstudie übernommen. Darüber hinaus wurde ein zusätzlicher Berechnungsschritt integriert, für den Treibstoffverbrauch bei T30.

Über die gesamte Lebensdauer hinweg wird die Strasse genutzt, d.h. mit Fahrzeugen befahren. Die daraus 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».

Der Prozess umfasst beim Treibstoffverbrauch (Benzin und Diesel) die Emissionen bei der Verbrennung im Fahrzeug sowie die Bereitstellung der Treibstoffe vom Bohrloch über die Raffinerie bis zum Fahrzeug. Bei Elektrofahrzeugen ist der Stromverbrauch inkl. Strombereitstellung gemäss schweizerischem Stromnetz sowie die Herstellung und Entsorgung der Batterie (da deren Lebensdauer durch die Ladezyklen begrenzt ist) berücksichtigt.

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.

Die Verbrauchs- und Emissionswerte von Fahrzeugen sind stark abhängig vom Verkehrsfluss und zusätzlich bei Tempo 50 (T50) und Tempo (T30) unterschiedlich. Bei der Basisstudie und unverändert bei der hier vorliegenden Nachfolge-Studie wird von vollständig flüssigem Verkehr ausgegangen. In der Basisstudie wurden die völlig generischen Daten der Transportprozesse in UVEK:2021/2023 direkt als Verbrauchswerte für T50, d.h. ohne (aufwändige) Differenzierung nach Geschwindigkeiten, für die Berechnung der Belagswirkungen übernommen. Für die vorliegende LAB T30 wurde die Basisstudie geeignet angepasst, ohne aber grundlegend neue Annahmen treffen zu müssen. Dazu wurden die Verbrauchswerte aus dem in der Schweiz breit angewendeten Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA; INFRAS) verwendet. Mithilfe einer Regressionsanalyse wurden die Werte für verschiedene Geschwindigkeiten im flüssigen Verkehr – sowohl in städtischen als auch in ländlichen Gebieten – ausgewertet (siehe Abbildung 9 in Anhang IX.a). Anschliessend wurden die durchschnittlichen Verbrauchswerte bei Tempo 50 und Tempo 30 berechnet. Diese Unterschiede von T50 zu T30 bzw. deren Verhältnisse wurden danach für die Umrechnung der Werte in UVEK:2021/2023 auf T30 verwendet. Entsprechend wurden im Vergleich zur Basisstudie mit T50 in dieser Studie mit T30 für die Kraftstoffe für PWs um 10-27 % und für LKWs um 3 % höhere Verbräuche zugrunde gelegt. Da sich die verschiedenen Emissionen aus dem Treibstoffverbrauch nicht alle proportional, aber doch richtungsgleich mit dem Treibstoffverbrauch ändern, wurden die Verbrauchsänderungen von T50 zu T30 auch als Änderungsfaktor für die jeweiligen Emissionswerte aus UVEK:2021/2023 eingerechnet (Details vgl. Anhang IX).

Tabelle 1 zeigt die so ermittelten Verbrauchsänderungen gegenüber dem Referenzwert für die vier Basisszenarien. Als Referenzwert wurden, wie bereits in der LCA LAB 2024, beim Rollwiderstand konventionelle Beläge gesetzt, bei den Verbrauchswerten die wie beschrieben auf T30 umgerechneten Werte aus UVEK:2021/2023.

Tabelle 1: Rollwiderstandsänderung bei T30 in Abhängigkeit der Deckschicht und die entsprechend modellierte Änderung des Treibstoff- bzw. Energieverbrauchs in Abhängigkeit von Fahrzeug-Gewicht und Antriebsart.

Szenario	ACMR 8 (T30)	SDA 4 (T30)	SDA 8 (T30)	AC 8 H LA (T30)
Änderung Rollwiderstand gegenüber Ref.	-0.4 %	-10.9 %	-3.6 %	0.9 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Benzin	-0.2 %	-4.4 %	-1.5 %	0.3 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Diesel	-0.1 %	-3.1 %	-1.0 %	0.2 %
Änderung Energieverbrauch gegenüber Ref.: PW Elektro	-0.1 %	-3.8 %	-1.3 %	0.3 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: LKW Diesel	-0.1 %	-1.9 %	-0.6 %	0.1 %

Es zeigt sich, dass SDA 4 Beläge im Durchschnitt um 10 % reduzierte Rollwiderstandswerte aufweisen, was für PW einen um rund 3-4 % reduzierten Energiebedarf bei T30 bedeutet (bei Vergleich der Beläge bei T50 in der Basisstudie lag die Reduktion leicht tiefer bei rund 3 %). Ein Vergleich des Kraftstoffverbrauchs mit den Verbrauchsdaten bei T50 aus der Basisstudie ist in Tabelle 6 im Anhang IX zu finden.

2.4.2. Nutzung - Strassenlärm: N2

Zur Berechnung der Belagswirkungen auf den Strassenlärm wurden die gleichen methodischen Schritte wie in der Basisstudie vorgenommen. Da jedoch für T30 keine Messdaten vorlagen, mussten die in der Basisstudie verwendeten akustischen Belagswirkungen von T50 auf T30 umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgte mithilfe des Strassenlärm-Emissionsmodells sonROAD18 (Heutschi und Locher 2018) und wird in Anhang VII näher erläutert. Um die Vergleichbarkeit der beiden Studien LCA LAB und LAB T30 zu gewährleisten, wurde am Modell StL-86+ festgehalten.

Verkehrslärm³ wird auch deutlich durch den Strassenbelag beeinflusst. 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, 118; Grolimund + Partner AG 2020). Die akustische Wirkung eines Belags verändert sich über die Zeit, und es wurden für die Basisstudie Alterungsmodelle für jeden Belagstyp berechnet (Details in Anhang VII). Die so berechneten mittleren akustischen Wirkungen sind in Tabelle 2 gezeigt: bei

³ Lärmemissionen von Strassenbaustellen werden in der Studie nicht berücksichtigt.

einem LKW-Anteil von 6 % reichen diese bei T30, jeweils im Vergleich zum Referenzwert der gesamten Lärmmessungen, von -4.8 dB bei ACMR 8 bis zu -7.0 dB bei SDA 4. Das bedeutet, dass beim Einsatz eines SDA 4 bei T30 gegenüber dem Referenzbelag ACMR 8 eine mittlere Lärmreduktion von 2.2 dB resultiert (in der Basisstudie bei T50 resultiert beim Einsatz eines SDA 4 gegenüber einem ACMR 8 eine mittlere Lärmreduktion von 3.4 dB).

Um die Lärmwirkung in der Ökobilanz abzubilden, wurde diese in eine entsprechende Quellenreduktion (vgl. Tabelle 2) umgerechnet und linear als Fahrzeugkilometer-Äquivalente berücksichtigt.

Tabelle 2: Lärmwirkung gegenüber StL-86+ für die vier Basis-Szenarien 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 – LAB T30	StL-86+(0) T30	ACMR 8 T30	SDA 4 T30	SDA 8 T30	AC 8 H LA T30
Mittlere akustische Wirkung (dB)	0.0	-4.8	-7.0	-5.2	-5.0
Quellenreduktion (für LCA)	0 %	-67 %	-80 %	-70 %	-68 %
Personen-Dezibel (für LCC)	6610	4038	3170	3861	3949
Wohnungs-Dezibel (für LCC)	3090	1788	1350	1660	1728

Um die Lärmwirkung in den Lebenszyklus-Kosten abzubilden, wurden die in Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS 41 828 2022) angegebenen Lärmkosten verwendet. Diese umfassen Gesundheitskosten aufgrund übermässigen Lärms, sowie Mietzinsverluste aufgrund lärmbelasteter Wohnungen. In der LCC wurden diese externen Kosten via «Personen-Dezibel» und «Wohnungs-Dezibel» pro Belag berechnet. Diese Grösse beschreibt jeweils die Anzahl an Personen bzw. Wohnungen über dem gesetzten Schwellwert⁴ und skaliert mit dem Ausmass der Schwellwertüberschreitung.

⁴ Schwellwert Lärmbelastung Personen: Lden grösser 48 dB(A)
Schwellwert Lärmbelastung Wohnungen: Lr(Tag) grösser als 50 dB(A), Lr(Nacht) grösser als 40 dB(A)

2.4.3. Nutzung - Reifenabrieb: N3

Die Modellierung des Reifenabriebs aus der Basisstudie wurde für die vorliegende Studie überprüft.

Dabei zeigte sich, dass die relevanten Einflussgrößen auf den Reifenabrieb (Beschleunigen, Bremsen, Kurvenfahrten) in der vereinfachten, idealtypischen Situation von flüssigem Verkehr, wie sie in der Basisstudie und auch hier definiert sind, gar nicht vorkommen. Eine detailliertere Betrachtung dieser Aspekte würde einen erheblichen Untersuchungsaufwand erfordern und auch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigen. Zudem ist der Einfluss des Pneuabriebs auf die Resultate der Basisstudie gering.

In Würdigung dieser Aspekte wurde entschieden, die Werte zum Reifenabrieb aus der Basisstudie unverändert zu übernehmen.

2.5. Grundlagen der LCA-Methodik

Hier wird die Methodik der Ökobilanz (englisch: Life Cycle Assessment, LCA) grob erläutert. Eine ausführlichere Erklärung enthält die Basisstudie.

Eine LCA dient zur ökologischen Beurteilung von Produkten oder Dienstleistungen. Eine Ökobilanz betrachtet alle relevanten Umwelteinwirkungen eines Systems über dessen gesamten Lebenszyklus – von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung oder dem Recycling. «Alle» Umwelteinwirkungen meint, dass die von einem Produkt oder einer Leistung aus der Umwelt bezogenen und an die Umwelt abgegebenen Einwirkungen möglichst vollständig und korrekt berücksichtigt werden.

Für eine sinnvolle Interpretation der Ergebnisse wird eine «funktionale Einheit» definiert, welche das betrachtete Produkt oder die Dienstleistung unter klar bestimmten Bedingungen über alle Lebensphasen hinweg beschreibt.

In dieser Studie wird die Umweltwirkung von Strassenbelägen untersucht.

Diese LCA-Studie folgt den ISO-Normen 14040 und 14044 und umfasst vier Phasen:

1. Ziel- und Systemabgrenzung: Hier werden die relevanten Prozesse, Annahmen und Eckdaten festgelegt, wie z.B. die Lebensdauer der Beläge und die Nutzungsintensität.
2. Sachbilanz (Life Cycle Inventory): In dieser Phase werden Umweltdaten aus den eingesetzten Ressourcen und Umwelteinwirkungen der definierten Prozesse zusammengetragen. Es wird zwischen Vordergrunddaten (prozessspezifische Daten, z.B. die Strassenbauprozesse) und Hintergrunddaten (meist aus Datenbanken, hier z.B. die Bereitstellung von Treibstoffen) unterschieden.
3. Umweltwirkung: Die Daten werden zur Berechnung der Umwelteinwirkungen, wie Klimaerwärmung, Energieverbrauch und Wasserverbrauch,

verwendet. Diese können gewichtet und zu einem Gesamturteil aggregiert werden; dies geschieht hier mit der Methode UBP'21.

4. Interpretation: Die Resultate werden unter Berücksichtigung der Grundlagen, der Modelle, der Datenqualität und weiterer Aspekte interpretiert.

Details zu den Modellannahmen dieser LCA finden sich in Anhang X.

2.6. Grundlagen der LCC-Methodik

Die Berechnung von Lebenszyklus-Kosten («Life Cycle Costing», LCC) greift prinzipiell auf dasselbe Prozessmodell, dieselben Szenarien, Systemgrenzen und funktionale Einheit wie die in Kapitel 2.5 beschriebene Ökobilanz zurück. Berechnet werden in der LCC jedoch Kosten.

Diese LCC umfasst einerseits direkte (oder «interne») Kosten, 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 die Verursachenden selbst tragen, sondern die durch Betroffene oder die Gesellschaft insgesamt getragen werden. Diese Kosten werden «extern» genannt, da sie nicht in den Preisen enthalten sind.

Interne Kosten werden anhand marktüblicher Kostensätze und zugehörigen Mengen berechnet. Die externen Kosten werden hier mit den Kostensätzen aus der Norm «Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr» (Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS 2022) berechnet. Die externen Kosten aus Verkehr umfassen demgemäss in dieser Studie:

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

Externe Kosten aufgrund der Bodenversiegelung wurden nicht berücksichtigt, da diese nicht primär durch die Wahl des Strassenbelages beeinflusst wird. Unbekannt sind mögliche 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 über die durchschnittliche Verteilung von lärmbelästigten Anwohnern bzw. Wohnungen berechnet (siehe Anhang VIII).

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

3. Ergebnisse

3.1. Die Resultatdarstellungen – was sie zeigen, und was nicht

Die Auswertung bei Tempo 30

Hier folgt zunächst ein Überblick über die Ergebnisse der vier Basisszenarien für die Situation bei Tempo 30, gefolgt von einer detaillierteren Analyse mit jeder der vier Beurteilungsmethoden. Im Überblick zeigen die Grafiken die jeweiligen Gesamtwerte und ihre Zusammensetzung für jeden Belag. In den darauffolgenden methodenspezifischen Grafiken werden die Ergebnisse für die Beläge SDA 4, SDA 8 und AC 8 H LA hingegen als Differenz zum Basisszenario ACMR 8 dargestellt, wobei der Belag ACMR 8 jeweils den Nullwert bildet. Diese zweite Art der Darstellung verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Belägen.

Wie in der Basisstudie liegen die Unterschiede zwischen den Szenarien auch bei T30 bei einigen Prozent der Gesamtwirkungen, da die Nutzung der Strasse – 8'000 Fahrzeuge täglich – die gesamten Wirkungen einer Strasse dominiert. Dennoch verändert auch bei T30 die Belagswahl die gesamte Umweltwirkung (inklusive Nutzung) um bis zu rund 3 Prozent. Auch bei T30 hat die Belagswahl aus Umweltsicht also spürbare Auswirkungen, handelt es sich doch beim Strassenverkehr um ein sehr grosses System.

In den Kapiteln 3.3 Umweltbelastungspunkte, 3.4 Treibhausgaspotential und Primärenergiebedarf sowie 3.5 Interne und externe Kosten werden die Resultate dieser Studie LAB T30 den Ergebnissen der Basisstudie gegenübergestellt und relative Unterschiede und Gemeinsamkeiten identifiziert und analysiert. Insbesondere wird der aus Lärmsicht vorteilhafteste Belag SDA 4 näher diskutiert.

Die Einflussfaktoren der Beläge bei Tempo 30 und Tempo 50

In jedem dieser Kapitel 3.3 bis 3.5 sind grafisch zuerst die Resultate aus LAB T30 grossflächig und gleich darunter die Resultate aus der Basisstudie bei T50 verkleinert gezeigt. Das grössere Bild mit den Resultaten zu T30 erlaubt, die vier Beläge gemäss der jeweiligen Auswertung zu vergleichen und die Beiträge der Lebenszyklusphasen zum Gesamtergebnis zu erkennen. Das kleine Bild mit den Resultaten aus der Basisstudie erlaubt, strukturelle Veränderungen durch die Anpassung für T30 zu erkennen. So ist z.B. sichtbar, dass und wie stark die Wirkung des Lärms bei LAB T30 jeweils geringer als in der Basisstudie ist, da bei T30 ganz grundsätzlich weniger Verkehrslärm entsteht und die Einflüsse der Beläge dadurch ebenfalls geringer ausfallen.

Ein Vergleich der Belagswirkungen, nicht der Verkehrsregime

Es ist nur mit grosser Vorsicht sinnvoll, die Resultate aus dieser LAB T30 und die Resultate der Basisstudie direkt zu vergleichen. Denn diese Studie LAB T30 macht keine Aussagen über die Wirkung einer Temporeduktion von 50 auf 30. Vielmehr

machen sowohl diese Studie LAB T30 wie auch die Basisstudie einzig Aussagen dazu, wie sich verschiedene Beläge bei diesen Tempi auswirken. Dabei werden wichtige Elemente einer Temporeduktion, wie z.B. das Fahrverhalten auf der Strasse, das Verkehrsverhalten der Fussgänger, oder auch die Auswirkungen von Baustellen, nicht berücksichtigt. Eine direkte Gegenüberstellung ergibt deshalb keine Aussage über die Wirkungen einer Temporeduktion, sondern einzig eine Aussage über die Bedeutung der Beläge bei T30 respektive bei T50.

3.2. Gesamtschau auf die vier Basisszenarien

Die Resultate der vier Beläge für die vier betrachteten Auswertungsmethoden zeigt nachstehende Tabelle 3 sowie die darauffolgende Abbildung 2. Danach werden die Resultate interpretiert.

Die Werte sind nach Lebenszyklusphasen dargestellt. Strassenlärm wird einzig in den Auswertungen mit UBP und mit Kosten ausgewiesen, während bezüglich Treibhausgasen (kg CO₂eq) und Energieverbrauch (Joule) der Lärm keine Wirkung hat.

In der Tabelle sind diejenigen Werte, die gegenüber der Basisstudie unverändert sind, grau hinterlegt.

Die Ergebnisse für die Situation bei T30 zeigen:

- i. Wie in der Basisstudie schneidet auch in der Studie LAB T30 der Belag SDA4 in allen Auswertungen am besten ab.
- ii. In UBP gerechnet ist ein SDA 4 gegenüber den anderen Belägen auch bei T30 vorteilhaft. Dabei ist die Lärmreduktion durch die lärmarmen Beläge allgemein bei T30 geringer als bei T50, aber insbesondere bei SDA 4 weiterhin positiv. Auch die Lebenszykluskosten sind bei SDA 4 am geringsten, und dies insbesondere durch die Lärmwirkung. Auch in den nicht-lärmsensitiven Auswirkungen zu Treibhausgasen und Energieeinsatz schneidet ein SDA 4 bei T30 von diesen vier Belägen am besten ab.
- iii. Wie bei der Basisstudie werden auch bei T30 in allen Auswertungen bei lärmarmen Belägen die erhöhten Auswirkungen in den Bauphasen durch die Veränderungen des Rollwiderstands in der Nutzungsphase ausgeglichen respektive sogar überkompensiert.

Tabelle 3: Resultatübersicht der vier Beläge für T30. Grau hinterlegte Werte sind gegenüber der Basisstudie unverändert.

Szenario		ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
Umweltbelastungspunkte (UBP21 / 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)	1.33E+09	1.28E+09	1.31E+09	1.33E+09
	Strassenlärm	3.17 E+07	1.93E+07	2.88E+07	3.03E+07
	Total	1.39E+09	1.35E+09	1.38E+09	1.39E+09
Treibhausgaspotential (t CO2e / 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	9.80E+02	9.45E+02	9.69E+02	9.84E+02
	Total	9.98E+02	9.76E+02	9.92E+02	1.00E+03
Primärenergie (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	1.27E+04	1.22E+04	1.26E+04	1.27E+04
	Total	1.31E+04	1.29E+04	1.30E+04	1.31E+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	5.18E+05	4.99E+05	5.12E+05	5.17E+05
	externe Kosten Bau, Rückbau und Unterhalt	9.2E+03	1.6E+04	1.1E+04	9.3E+03
	externe Kosten Nutzung (exkl. Strassenlärm)	3.58E+05	3.46E+05	3.54E+05	3.55E+05
	externe Kosten Strassenlärm	1.45E+05	1.11E+05	1.36E+05	1.40E+05
	Total	1.06E+06	1.03E+05	1.05E+06	1.06E+06

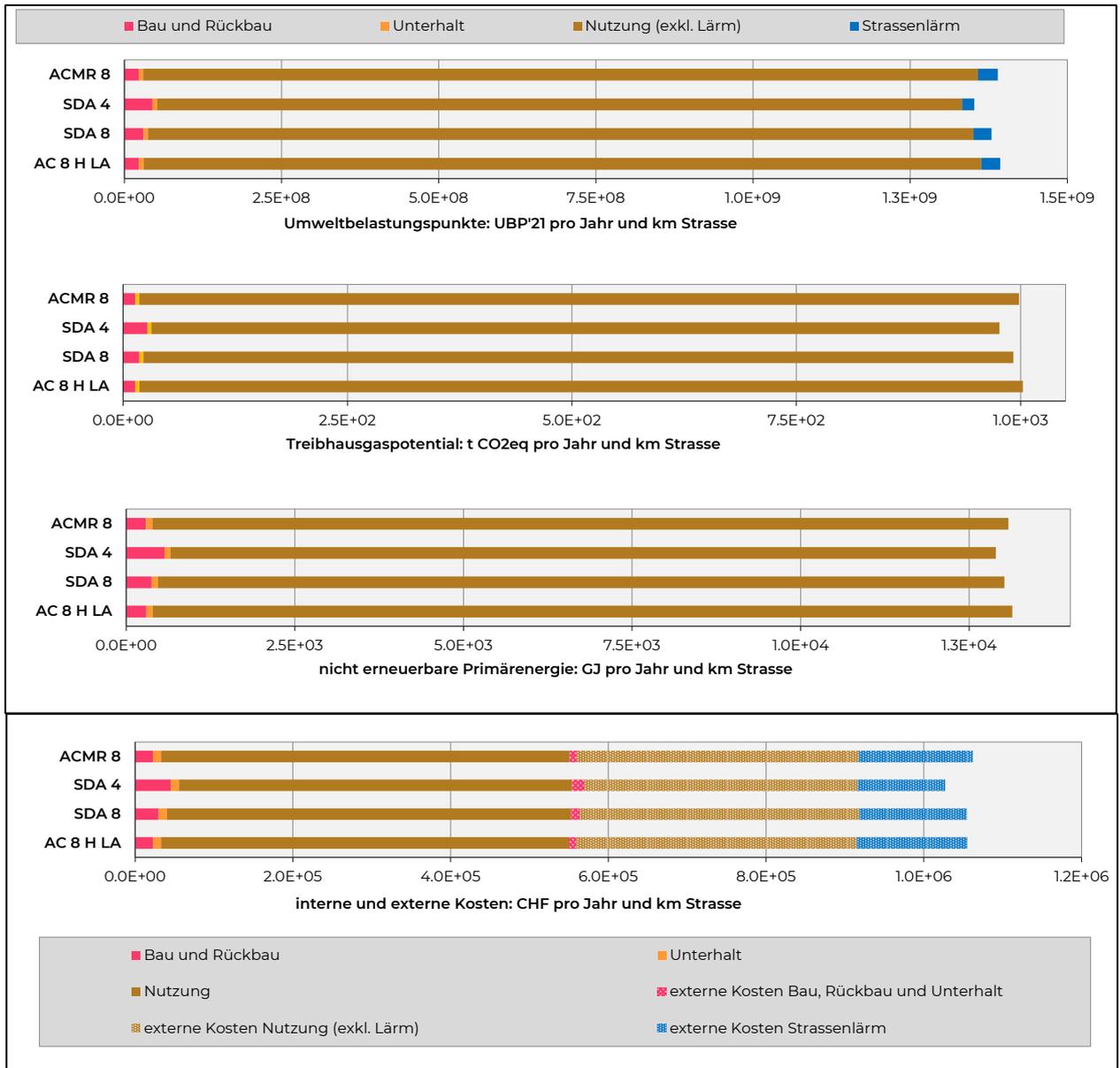


Abbildung 2: Ergebnisse für die vier Basisszenarien in den vier Wirkungskategorien Umweltbelastungspunkte, Treibhausgaspotential, nicht erneuerbare Primärenergie (Abb. 2A), sowie interne und externe Kosten (Abb. 2B), je pro Jahr und Kilometer Strasse.

3.3. Umweltbelastungspunkte

Hier sind die Unterschiede der Beläge bei T30 mit UBP'21 dargestellt. Der Belag ACMR 8 ist, wie bereits in der Basisstudie, als Referenzszenario mit «Null» dargestellt, für die anderen drei Beläge sind die Unterschiede zum Belag ACMR 8 dargestellt. Dabei sind die einzelnen Elemente der Auswertung separat gezeigt, und als letzte Säule jeweils das Total für den jeweiligen Belag.

Im Vergleich zur Basisstudie zeigt die Studie LAB T30 ähnliche Ergebnisse: Wie in der Basisstudie verursacht ein SDA 4 die geringsten UBP, gefolgt von SDA 8. AC 8 H LA liegt in etwa auf dem Niveau des Referenzszenarios (ACMR 8). Die Vorteile von LAB sind bei T30 kleiner, aber sie bestehen weiter: Während in der Basisstudie bei T50 ein SDA 4 die Umweltbelastung des Gesamtsystems gegenüber ACMR 8 um -4.2 % verringert, beträgt die Reduktion in der Studie LAB T30 noch -2.7 %.

Die Bauphasen (jeweils erste, rötliche Säule) wurden aus der Basisstudie unverändert übernommen. Entsprechend gilt auch hier die dortige Erkenntnis, dass die Umweltbelastung beim SDA 4 wegen der kürzeren Lebensdauer und der damit höheren Bautätigkeit erkennbar am höchsten ist. Die Unterhaltstätigkeiten (orange) bzw. deren Unterschiede sind im Vergleich der Beläge, wie bereits in der Basisstudie, so gering, dass sie nicht sichtbar werden.

Andererseits senkt ein SDA 4 auch bei T30 die Umweltwirkung in der Nutzungsphase spürbar, teils durch weniger Strassenlärm (blau), aber insbesondere durch den sinkenden Treibstoffverbrauch.

Wie in der Basisstudie ist auch bei der Studie LAB T30 das Bild für den SDA 8 ähnlich, aber weniger ausgeprägt. Und wie in der Basisstudie sind beim AC 8 H LA die Veränderungen aus Nutzung (Rollwiderstand) und Lärmveränderung gegenüber dem ACMR 8 gering und zeigen nicht alle in die gleiche Richtung. Dass bei T30 die Gesamtwertung in UBP'21 nun sogar geringfügig schlechter ausfällt als beim ACMR 8, ist aufgrund der minimalen Unterschiede nicht aussagekräftig.

In der Summe (schwarz karierte Säulen) reduziert ein SDA 4 Belag damit über seine Lebensdauer gegenüber einem ACMR 8 die Umweltbelastung des Gesamtsystems (- 2.7 %). Die anderen Beläge SDA 8 (reduzierend) und AC 8 H LA (erhöhend) weichen im Ergebnis mit -0.7 % resp. +0.3 % nur minimal von einem ACMR 8 ab.

Um diesen Vorteil von SDA 4 gegenüber ACMR 8 in UBP zu quantifizieren: Auf dem betrachteten Strassenstück fahren PW und LKW jährlich knapp 3 Mio. km (vgl. Kapitel 2.1). Der Wechsel von ACMR 8 auf SDA 4 führt zu einer Reduktion von -37.5 Mio. UBP, was einer Verringerung des Verkehrsvolumens um knapp 80'000 Fahrzeug-km pro Jahr entspricht.

Obwohl die Ergebnisse der LAB T30-Studie denen der Basisstudie ähnlich sind, gibt es Unterschiede in der Verteilung der Prozessanteile. Während die Bauphasen und Unterhaltsphasen in beiden Studien identisch sind (sie wurden unverändert aus der

Basisstudie übernommen) verändern sich die Anteile von Strassenlärm und Energieverbrauch. Im vorteilhaftesten Szenario, dem SDA 4, ist in der Basisstudie der Strassenverkehrslärm der grösste Treiber der UBP und führt damit auch zum grössten Einsparpotential, gefolgt von der Einsparwirkung im Treibstoffverbrauch. In der Studie T30 hingegen ist diese Rangfolge umgekehrt: Da bei T30 einerseits der Lärm bei allen Belägen bereits weniger stark ist und gleichzeitig der Belag stärker auf den Energieverbrauch wirkt – da ein höherer Anteil der Energie zur Überwindung des Rollwiderstandes aufgewendet wird und bei T30 auch insgesamt der Energieverbrauch leicht höher ist – wird der Energieverbrauch bei T30 zum grössten Treiber von UBP, und die Lärmwirkung der Beläge spielt bei T30 eine weiterhin sichtbare, aber geringere Rolle.

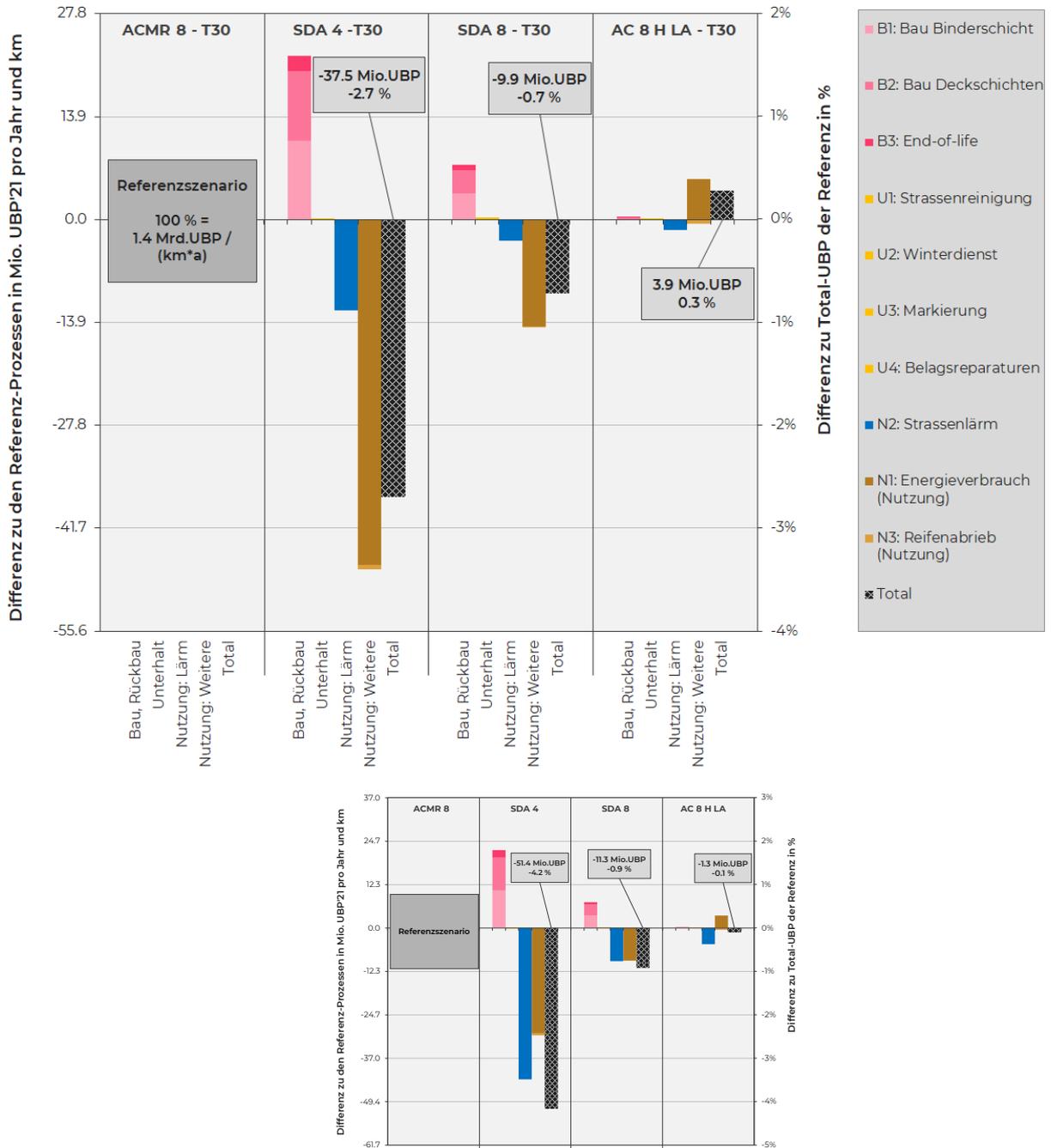
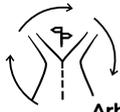


Abbildung 3: Differenzen in UBP'21 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8, bei T30 (oben) und T50 (unten, Basisstudie). Die Unterhaltsprozesse (U*) sind kaum sichtbar und gemeinsam gelb dargestellt. Hinweis: Die Skalen der Abbildungen beziehen sich auf das jeweilige Referenzszenario. Zur Vergleichbarkeit der zwei Grafiken vgl. Abschnitt 3.1.

3.4. Treibhausgaspotential und Primärenergiebedarf

Die zwei Auswertungen nach Treibhausgaspotential (kg CO₂eq) sowie nach nicht-erneuerbarem Primärenergiebedarf (in Joule resp. GJ) dargestellt, zeigen in Abbildung 4 und Abbildung 5 ein ähnliches Bild wie bei den UBP.

Dabei sind die Resultate für LAB T30 strukturell fast gleich wie die Resultate der Basisstudie: Die Rangfolge der Szenarien ist identisch, und auch die Änderungen im Treibstoffverbrauch (N1) aus T30 verändern das Resultatbild im grossen Ganzen nicht. Und wie in der Basisstudie sind die Unterschiede aus den Belagsarten bezüglich Treibhausgasen und Energieverbrauch auch bei der Studie LAB T30 insgesamt kleiner als bei UBP:

Die stärkere Wirkung der Beläge auf den Energieverbrauch in der Studie LAB T30 (höherer Verbrauch bei T30, sowie höherer Anteil des Rollwiderstands am Energieverbrauch) verstärkt jedoch die Bedeutung der Beläge für die Nutzungsphase: einfach formuliert lautet dies «bei einem höheren Energieaufwand resultiert auch eine höhere Einsparung». Während SDA 4 bei T50 gegenüber ACMR 8 die Treibhausgaswirkung um -1.1 % senkt, steigt diese Einsparung bei T30 sogar auf -2.2 % CO₂eq (Abbildung 4).

Die Veränderungen der beiden anderen Beläge gegenüber ACMR 8 bezüglich Treibhausgasen sind gering und nicht relevant.

Hinsichtlich des Energieverbrauchs (nicht-erneuerbare Primärenergie) sind die Nettowirkungen in der Studie LAB T30 gegenüber der Basisstudie etwas ausgeprägter. Bei T30 führen die genannten Verschiebungen ebenfalls zu einer Verstärkung des Einflusses des Belags: Durch den bei einem SDA 4 etwas sinkenden Verbrauch in der Nutzung sinkt der Gesamtenergieverbrauch bei T30 bei einem SDA 4 um -1.4 % gegenüber einem ACMR 8. Auch bei einem SDA 8 verbessert sich das Bild bei T30, denn mit SDA 8 kompensiert die höhere Verbrauchseinsparung in der Nutzung zumindest den höheren Bau-Aufwand vollständig (was bei T50 nicht der Fall war). Der AC 8 H LA verhält sich gegenüber dem Referenzbelag bei T30 praktisch gleich wie bei T50 und zeigt kaum Unterschiede gegenüber einem ACMR 8. (vgl. Abbildung 5).

Somit hat ein SDA 4-Belag wie in der Basisstudie auch bei T30 bezüglich Klimawirkung und Energieverbrauch leichte Vorteile gegenüber einem ACMR 8. Die Beläge SDA 8 und AC 8 H LA sind für diese zwei Umweltwirkungen gleichwertig zum ACMR 8.

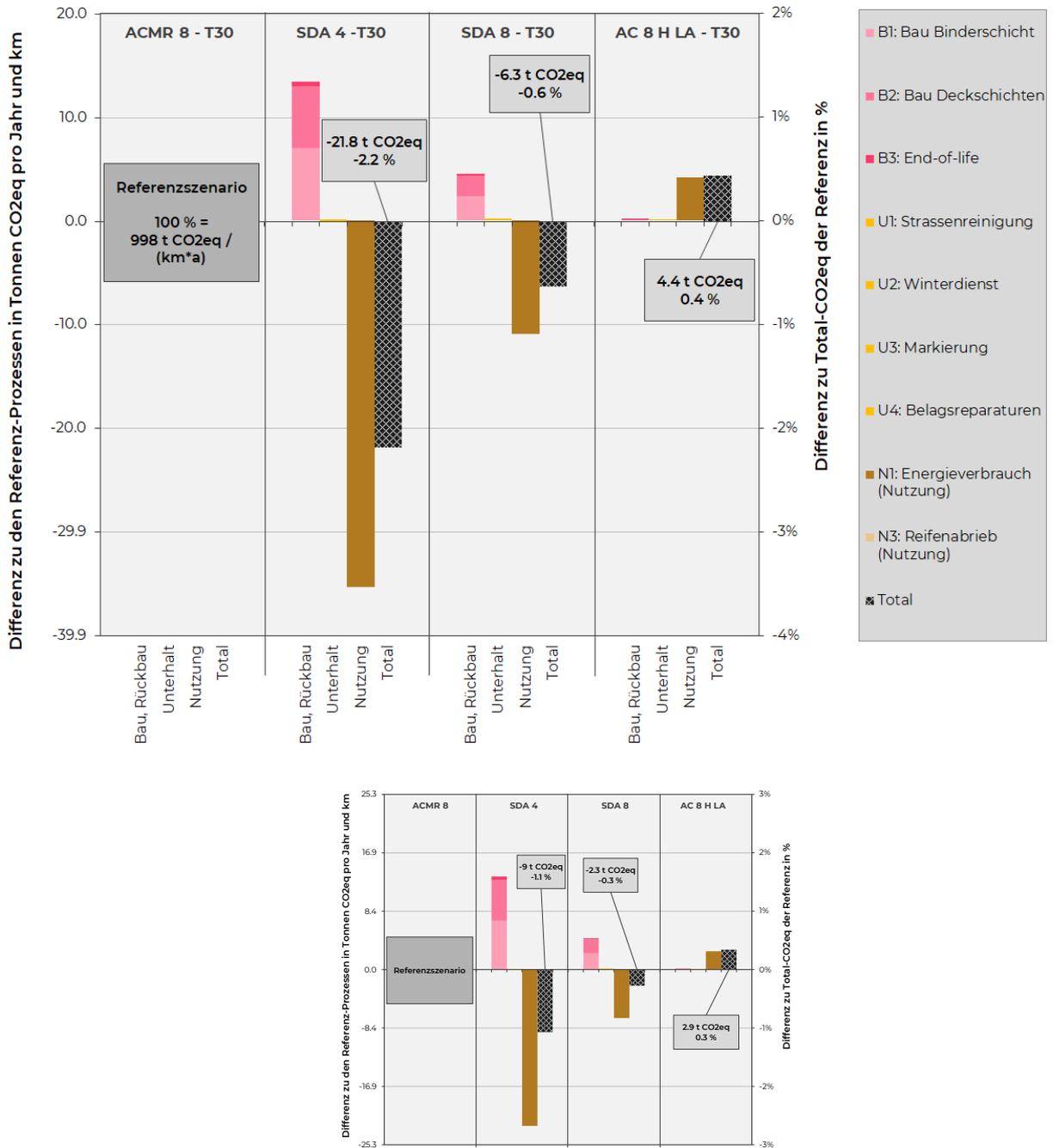


Abbildung 4: Differenzen der Treibhausgas-Emissionen gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8 bei T30 (oben, LAB T30) und T50 (unten, Basisstudie). Hinweis: Die Skalen beziehen sich auf das jeweilige Referenzszenario. Zur Vergleichbarkeit der Grafiken vgl. Abschnitt 3.1.

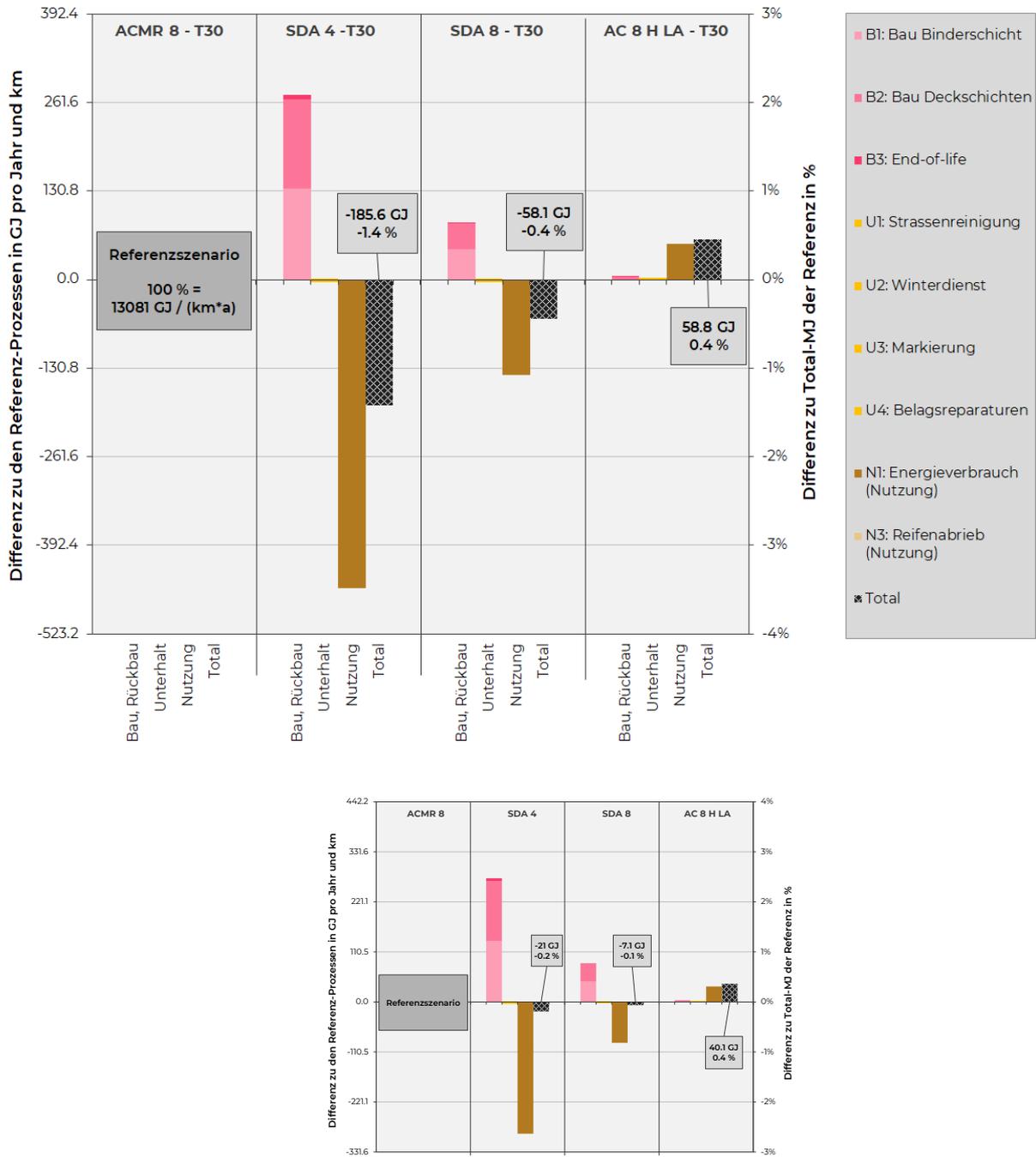


Abbildung 5: Differenzen des Verbrauchs nicht erneuerbarer Primärenergie gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8 bei T30 (oben, LAB T30) und T50 (unten, Basisstudie). Hinweis: Die Skalen der Abbildungen beziehen sich auf das jeweilige Referenzszenario. Zur Vergleichbarkeit der Grafiken vgl. Abschnitt 3.1.

3.5. Interne und externe Kosten

Hier werden die gesamten Kosten des betrachteten Strassensystems dargestellt. Dabei werden die direkten, «internen» Kosten der Akteure sowie auch die «externen» Kosten, die von der Allgemeinheit getragen werden, nach dem gleichen System wie bei der Ökobilanz berücksichtigt.

Interne Kosten entstehen bei den Verantwortlichen eines Prozesses, z.B. die Kosten für Baumaschinen und Bauarbeiter im Baubudget eines Tiefbauamts. Externe Kosten entstehen über die Auswirkungen auf Menschen und Umwelt, z.B. Kosten aus Krankheit oder Umweltschäden durch Emissionen aus der Verbrennung von Treibstoff oder aus Strassenlärm.

Sowohl interne als auch externe Kosten sind mit Unsicherheiten behaftet. Interne Kosten sind mit Modellunsicherheiten verbunden, während externe Kosten zusätzlich die Unsicherheiten der zugrunde liegenden Modelle beinhalten.

Gesamtkosten

Abbildung 6 und Tabelle 4 zeigen die Gesamtkosten für die vier Basisszenarien. In den folgenden Darstellungen 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.

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

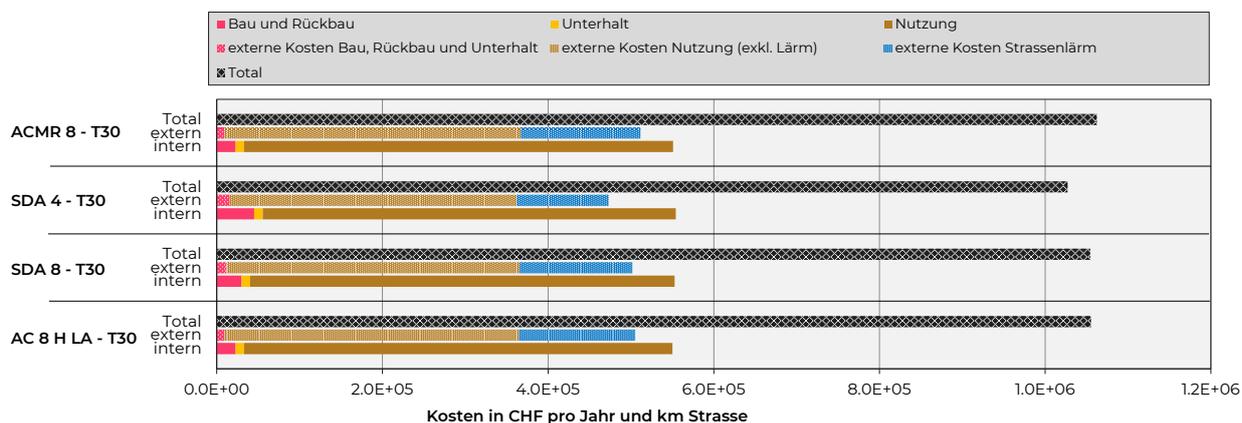


Abbildung 6: Interne, externe und totale Kosten pro Jahr und Kilometer Strasse für die vier Basisszenarien bei T30.

Diese Gesamtkosten sinken mit den alternativen Belägen: insbesondere ein SDA 4 senkt diese Kosten um 35'000 CHF pro km und Jahr bzw. um 3.3 % der Gesamtkosten. Auch SDA 8 und AC 8 H LA senken diese Kosten, wenn auch nur leicht, um ca. 1 %.

Wie in der Basisstudie kompensieren die Einsparungen insbesondere beim Treibstoffverbrauch (braun) die höheren Kosten der Bauphasen (rot) bei SDA 4 und SDA 8. Aufgrund der bei SDA 4 spürbar tieferen externen Kosten aus Strassenlärm sind die Gesamtkosten hier deutlich reduziert.

Durch die bei T30 im Vergleich zu T50 allgemein bereits tieferen Lärmemissionen bei allen Belägen und der bei T30 noch etwas stärker wirkenden Treibstoffeinsparung ist der Anteil der externen Kosten an den Gesamtkosten gegenüber der Basisstudie bei der Studie LAB T30 (SDA 4 ausgenommen) 4-8 Prozentpunkte geringer. Die Gesamtkosten sind jedoch nach wie vor am niedrigsten, wenn ein SDA 4 verwendet wird. Spürbare Unterschiede entstehen dabei insbesondere bei den externen Kosten, und die Unterschiede zwischen den Belägen entsprechen ziemlich genau der Reduktion der Lärmkosten.

Tabelle 4: Interne und externe Kosten (pro Jahr und Kilometer Strasse) für die vier Basisszenarien bei T30, aufgeschlüsselt nach Kostenträger der internen Kosten sowie nach Kostenquelle der externen Kosten. Abweichungen sind auf Rundungen zurückzuführen.

Träger (intern) bzw. Quelle (extern)		ACMR 8 T30		SDA 4 T30		SDA 8 T30		AC 8 H LA T30	
intern	öffentliche Hand	CHF	33'000	CHF	56'000	CHF	40'000	CHF	33'000
	Strassennutzer	CHF	518'000	CHF	499'000	CHF	512'000	CHF	517'000
	Total intern	CHF	551'000	CHF	554'000	CHF	553'000	CHF	550'000
extern	Bau und Rückbau	CHF	9'000	CHF	16'000	CHF	11'000	CHF	9'000
	Nutzung	CHF	502'000	CHF	457'000	CHF	490'000	CHF	496'000
	Total extern	CHF	511'000	CHF	473'000	CHF	501'000	CHF	505'000
Total (intern + extern)		CHF	1'062'000	CHF	1'027'000	CHF	1'054'000	CHF	1'055'000

Die internen Kosten

Interne Kosten entstehen sowohl bei der öffentlichen Hand als auch bei den Nutzenden. Bau und Unterhalt kosten bei T30 zwischen 33'000 (ACMR 8 und AC 8 H LA) und 56'000 CHF (SDA 4) pro km und Jahr, was 6 bis 10 % der gesamten internen Kosten ausmacht (ähnlicher Anteil wie in der Basisstudie). Aus Sicht der öffentlichen Hand bleibt der Unterschied zwischen den Belägen relativ gross.

Die grössten internen Kosten entstehen jedoch durch die Nutzung: Treibstoff und Reifenabrieb kosten im Szenario ACMR 8 über 445'000 CHF pro km und Jahr. Der

SDA 4 senkt diese Kosten bei T30 – wegen des insgesamt etwas höheren Treibstoffverbrauchs – mit -23'000 CHF pro km*Jahr etwas stärker als in der Basisstudie.

Insgesamt variieren die internen Kosten bei allen Szenarien kaum (nur um 4'000 CHF pro km und Jahr) und liegen zwischen 550'000 und 554'000 CHF.

Die externen Kosten

Die externen Kosten im Referenzszenario ACMR 8 betragen bei T30 ca. 511'000 CHF pro km und Jahr. Die drei alternativen Beläge verursachen ähnlich wie in der Basisstudie auch bei T30 zwischen 38'000 (SDA 4) und 6'000 (AC 8 H LA) CHF geringere externe Kosten (vgl. Tabelle 4).

Bau und Unterhalt verursachen nur einen kleinen Anteil an den externen Kosten (9'000 bis 16'000 CHF oder rund 3 %). Die grössten Veränderungen der externen Kosten durch die Belagwahl entstehen in der Nutzungsphase, insbesondere durch Abgase, Emissionen und Lärm. Im Vergleich zu 511'000 CHF bei ACMR 8 sinken diese besonders stark mit einem SDA 4: dieser senkt die externen Kosten aus der Nutzung um rund 38'000 CHF pro km*Jahr, davon ca. 29'000 CHF durch Lärminderung und 9'000 CHF durch Treibstoffeinsparung inklusive Emissionen (siehe Tabelle 3).

Gesamte Kostendifferenzen

Gemäss Abbildung 7 sinken die Gesamtkosten bei SDA 4 um 35'000 CHF (-3,3 %), aufgrund von höheren Baukosten, gesenktem Energieverbrauch und weniger Lärmfolgekosten. Beim SDA 8 steigen die Baukosten weniger, und die Energie- und Lärmkosten sinken weniger, was insgesamt zu einer leichten Reduktion der Gesamtkosten (-0,7 %) führt. Auch bei AC 8 H LA sinken die Gesamtkosten um einen ähnlichen Betrag, jedoch mit leicht unterschiedlichen Faktoren: Die Baukosten bleiben nahezu unverändert, während sich die internen und externen Kosten der Nutzung (ausser Lärm) ausgleichen, so dass die geringe Lärminderung zum ebenfalls leicht reduzierten Gesamtergebnis führt.

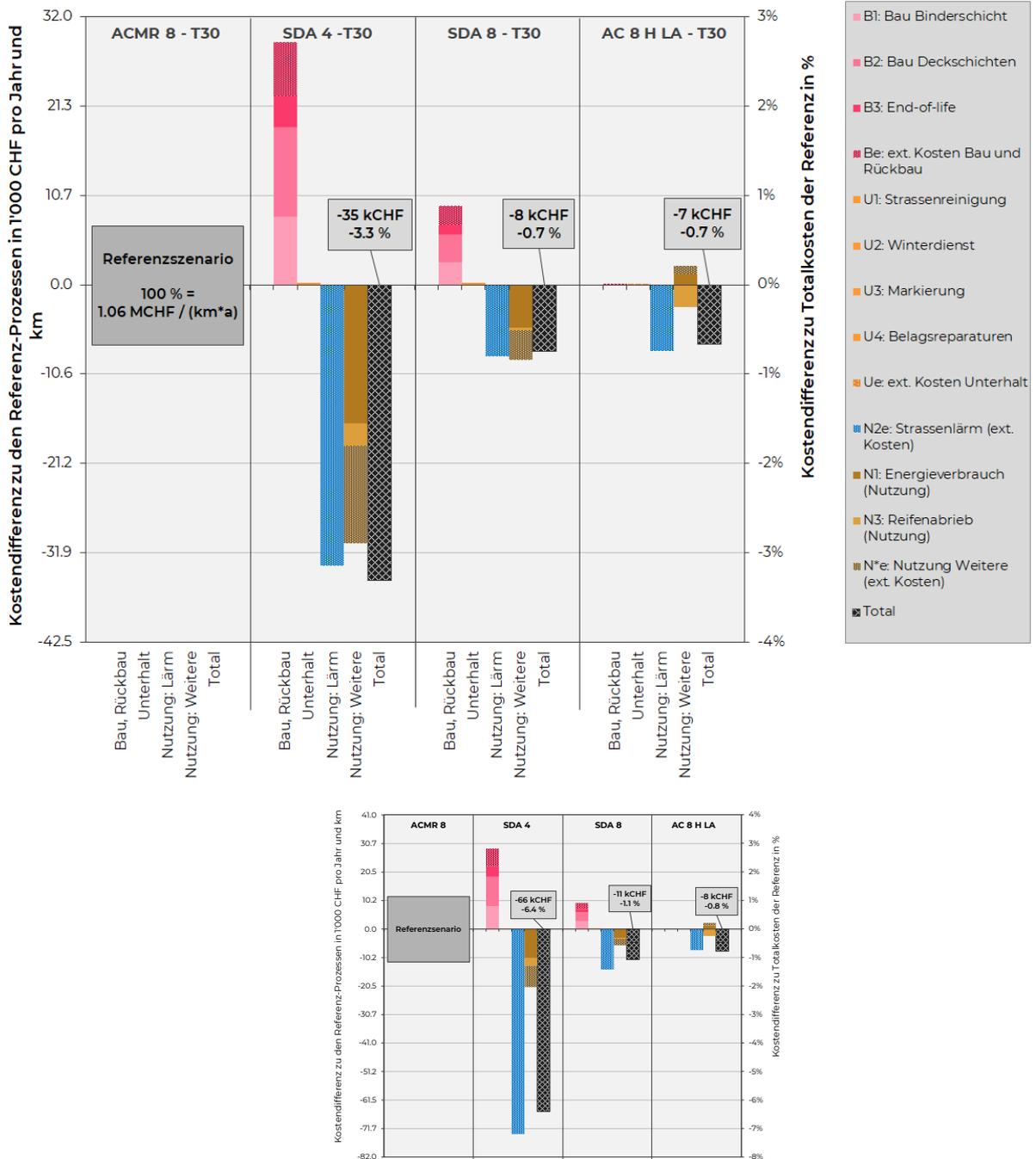


Abbildung 7: Kostendifferenzen gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8 bei T30 (oben, LAB T30) und T50 (unten, Basisstudie). Hinweis: Die Skalen der Abbildungen beziehen sich auf das jeweilige Referenzszenario. Zur Vergleichbarkeit der zwei Grafiken vgl. Abschnitt 3.1.

Wer die Kostenveränderungen trägt

Sowohl in der Basisstudie wie auch in der Studie LAB T30 senken alle Szenarien die Gesamtkosten. Der SDA 4 bleibt der kostengünstigste Belag, bei T30 insbesondere wegen der geringen internen (direkten) Kosten. Eine interessante Änderung gegenüber der Basisstudie ist, dass – anders als in der Basisstudie - die externen Kosten in der Studie T30 niedriger sind als die internen Kosten. Dies rührt daher, dass die externen Kosten aus Lärm bei T30 allgemein bereits tiefer liegen als die externen und direkten Kosten durch den höheren Energieverbrauch.

Das vorteilhafteste Szenario, der SDA 4 Belag, reduziert die Netto-Gesamtkosten gegenüber ACMR 8 bei T30 um -3.3 % (gegenüber -6.4 % in der Basisstudie). In der Studie LAB T30 tragen sowohl die Kraftstoffeinsparung als auch die Lärmreduktion gleichermaßen zur Reduzierung der Gesamtkosten bei. Höhere Geschwindigkeiten ergeben in der Regel einen höheren Lärmpegel. Daher ist auch das Einsparpotenzial eines lärmarmen Belags bei T30 kleiner als im Szenario SDA 4 der Basisstudie mit einer Reduktion der Lärmkosten um 7 %. Die Kraftstoffeinsparung durch einen SDA 4 Belag ist in der Basisstudie mit -2 % jedoch geringer als bei T30 (-3 %).

4. Würdigung der Resultate und Ausblick

In dieser Studie LAB T30 wurde wie in der Basisstudie LCA LAB (2024) für vier Strassenbeläge eine vollständige Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus (einschliesslich der Nutzung der Strasse) sowie eine analoge Life Cycle Costing-Analyse erstellt, aber unter Annahme eines Tempo-30-Regimes. Für dieselbe typische Kantonsstrasse innerorts mit schwerer bis sehr schwerer Strassennutzung wie in der Basisstudie wurden ein konventioneller Belag (ACMR 8) sowie drei lärmreduzierende Beläge (SDA 4, SDA 8 und AC 8 H LA) untersucht. Dieses «Gesamtsystem Strassenbelag» umfasst alle relevanten Prozesse – vom Bau über den Unterhalt, die Nutzung (einschliesslich Kraftstoffverbrauch, Reifenabrieb und Strassenlärm) bis hin zur Entsorgung und zum Recycling der Beläge.

Die Resultate basieren auf den Analysen und Daten der Basisstudie, in der die zentralen Untersuchungen durchgeführt wurden. Die vorliegende Nachfolgestudie LAB T30 dient als nachgelagerte Sensitivitätsanalyse und untersucht, wie sich eine Temporeduktion auf die Umwelt- und Kostenauswirkungen der verschiedenen Beläge auswirkt. Wie in der Basisstudie wurden die ökologischen Auswirkungen anhand von Umweltbelastungspunkten UBP'21, Klimawirkung und nicht erneuerbarem Energiebedarf bewertet. Die ökonomische Analyse berücksichtigte direkte Kosten und indirekte (externe) Kosten.

Vergleich der Belagstypen und Umweltwirkungen bei T30

In der Bewertung nach UBP'21 fallen die Umweltvorteile der LAB gegenüber dem Referenzbelag bei T30 etwas geringer aus als bei T50. SDA 4 weist auch bei T30 die niedrigsten Umweltbelastungen auf. Im Vergleich zum Referenzbelag ACMR 8 reduziert SDA 4 bei T30 die Umweltbelastung über den Lebenszyklus der Strasse um knapp 3 % – bei T50 waren es rund 4 %. Trotz der leicht geringeren Wirkung bleibt der Effekt angesichts des grossen betrachteten Systems – nahezu der gesamte Strassenverkehr – noch immer von Relevanz.

Die Ergebnisse zur Klimawirkung (gemessen in CO₂-Äquivalenten) und zum Energieverbrauch (Verbrauch nicht-erneuerbarer Energie) bei T30 folgen ähnlichen Trends wie in der Basisstudie. LAB, insbesondere SDA 4, weisen bei T30 sogar leicht höhere Vorteile bei der CO₂-Reduktion und Energieverbrauch auf, da der Rollwiderstand bei T30 einen grösseren Anteil an der Nutzenergie hat als bei T50 und der Treibstoffverbrauch von PWs bei T30 unter Annahme von vollständig flüssigem Verkehr um 10–20 % höher ist als bei T50.

Hinsichtlich des Lärms zeigt die Auswertung für LAB T30 zwei Haupttendenzen: Einerseits liegt der Lärmpegel einer Strasse bei T30 unabhängig vom Belag bereits spürbar tiefer als bei T50, weshalb die Belagswahl bei T30 die Lärmsituation weniger

beeinflusst als bei T50. Gleichzeitig zeigt die Auswertung, dass auch bei T30 die Belagswahl einen spürbaren Effekt auf die Lärmsituation hat.

In der Summe schneidet ein SDA 4-Belag auch bei T30 in allen betrachteten Auswertungen besser ab als ein ACMR 8.

Ökologische Auswirkungen und Kostenstruktur

Obwohl bei T30 die Lärmemissionen grundsätzlich tiefer liegen, bleibt auch bei T30 der Strassenlärm (und dessen Senkung insbesondere durch einen SDA 4) ein wichtiger Faktor der externen Kosten. Umgekehrt nimmt die Bedeutung des Treibstoffverbrauchs, der sowohl die direkten als auch die externen Kosten dominiert, bei T30 wegen des höheren Verbrauchs der PWs zu.

Bemerkenswert ist, dass bei T30 die externen Kosten gegenüber T50 sinken, während die direkten Kosten der Strassennutzenden bei T30 durch den Treibstoffverbrauch gegenüber T50 leicht ansteigen.

Insgesamt bleibt auch bei T30 der SDA 4-Belag den anderen drei Belägen überlegen. Die Gesamtkosten pro km*Jahr sinken durch einen SDA 4 gegenüber einem ACMR 8 bei T30 um -3.3 % (gegenüber -6.4 % in der Basisstudie).

Durchschnittliche versus grosstädtische Verhältnisse

Sowohl die Basisstudie LCA LAB 2024 als auch die vorliegende LAB T30 gehen von durchschnittlichen schweizerischen Verhältnissen aus. Diese Auswertung für LAB T30 im Auftrag der Stadt Zürich berücksichtigt somit nicht, dass die externen Kosten des Lärms in grosstädtischen Situationen, wie z.B. in der Stadt Zürich im Durchschnitt höher sind. Dies liegt daran, dass die Verkehrsstärken und Bevölkerungsdichten höher sind und somit mehr Personen und Wohnungen vom Strassenlärm betroffen sind.

Eine spezifische Berechnung würde daher für eine grosstädtische Situation höhere externe Kosten durch Strassenlärm ergeben, und zwar sowohl für die Basisstudie als auch für diese LAB T30. Im Ergebnis würden alle lärmbedingten Auswirkungen der Belagswahl in einer grosstädtischen Situation – sei es bei T30 oder bei T50 - grösser ausfallen und die Unterschiede insbesondere zwischen ACMR 8 und SDA 4 hinsichtlich des Lärms stärker ins Gewicht fallen.

Bedeutung der Strassenbautechnologie

Bei der Interpretation der Resultate wurde nicht auf mögliche Fortschritte in der Belagstechnologie eingegangen, welche in der Basisstudie in einer eigenen Sensitivitätsanalyse betrachtet wurden. Die dort aufgezeigten weiteren Verbesserungen dürften insbesondere für einen SDA 4 auch bei T30 zusätzliches Verbesserungspotenzial beinhalten.

Bedeutung des Motorenlärms

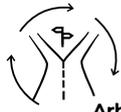
In dieser LAB T30 wurde die Bedeutung des Zusammenspiels von Motor- und Rolllärm, das sich je nach Geschwindigkeitsregime unterscheidet und zusätzlich durch den Anteil der Elektromobilität an der Fahrzeugflotte beeinflusst wird, nicht näher untersucht. Erste Überlegungen ergaben keine eindeutigen Hinweise darauf, ob eine solche Differenzierung bei niedrigen Geschwindigkeiten zu einer relevanten Änderung der Auswirkungen der Strassenbeläge führen würde.

Zusammenfassend

Die Ergebnisse der LAB T30 zeigen, dass ein SDA 4-Belag trotz den höheren Aufwendungen in den Bauphasen auch bei einem Temporegime von 30 km/h insgesamt besser abschneidet als die anderen betrachteten Beläge – sowohl hinsichtlich gesamter Umweltbelastung und auch hinsichtlich Lebenszykluskosten. Obwohl bei Tempo 30 die Lärminderung durch LAB geringer ausfällt als bei T50, weist der SDA 4-Belag auch bei T30 klare Vorteile auf.

Da der Treibstoffverbrauch bei geringeren Tempi leicht ansteigt, gewinnt die Wahl des Belags hinsichtlich der CO₂-Emissionen und des Energieverbrauchs zusätzlich an Bedeutung. Auch hier erweist sich der SDA 4 bei T30 als vorteilhafte Lösung.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse für Tempo 30 sind auch die weiteren Grenzen der Aussagekraft, welche in der Basisstudie in Kap. 4 genannt wurden, ebenfalls gültig. Dies betrifft die Nicht-Berücksichtigung der Auswirkungen von häufigeren Baustellen aus der kürzeren Lebensdauer von LAB, die geringen Messdaten für den Belag AC 8 H LA, und die zu verbessernde Datenlage zum Zusammenhang von Belagsoberflächen und Treibstoffverbrauch.



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	lärmarmen Strassenbelag
LCA	Life Cycle Assessment (Deutsch: Ökobilanz)
LCC	Life Cycle Costing
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (methodische Beurteilung von Umwelteinwirkungen in einer LCA)
Lden	Tag-Abend-Nacht-Lärmindex über 24 Stunden zur Bewertung der allgemeinen Lärmbelästigung
LKW	Lastkraftwagen
Lr	Beurteilungspegel für Lärmimmissionen zur Kennzeichnung der auf einen Ort wirkenden Schallimmission während jeder Beurteilungszeit
MJ	Mega-Joule, Einheit zur Angabe des Energieverbrauchs, bzw. MJeq für Mega-Joule-Äquivalente
MPD	mittlere Profiltiefe («Mean Profile Depth»), Mass zur Oberflächentextur einer Strasse
N2-Anteil	Schwerverkehrsanteil, angegeben in Prozent vom Gesamtverkehrsaufkommen
nePE	nicht erneuerbare Primärenergie
NO _x	Stickoxide
PE	Primärenergie
PM ₁₀	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 UB P'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
N1	Nutzung: Treibstoffverbrauch
N2	Nutzung: Lärm
N3	Nutzung: Reifenabrieb

II. Abbildungsverzeichnis

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..... 12

Abbildung 2: Ergebnisse für die vier Basisszenarien in den vier Wirkungskategorien UB P'21, CO2eq, nicht erneuerbare Primärenergie (nePE; Abb. 2A), sowie interne und externe Kosten, je pro Jahr und Kilometer Strasse (Abb. 2B). 24

Abbildung 3: Differenzen in UBP'21 gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8, bei T30 (oben) und T50 (unten, Basisstudie). Die Unterhaltsprozesse (U*) sind kaum sichtbar und gemeinsam gelb dargestellt. Hinweis: Die Skalen der Abbildungen beziehen sich auf das jeweilige Referenzszenario. Zur Vergleichbarkeit der zwei Grafiken vgl. Abschnitt 3.1. 27

Abbildung 4: Differenzen der Treibhausgas-Emissionen gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8 bei T30 (oben, LAB T30) und T50 (unten, Basisstudie). Hinweis: Die Skalen beziehen sich auf das jeweilige Referenzszenario. Zur Vergleichbarkeit der Grafiken vgl. Abschnitt 3.1. 29

Abbildung 5: Differenzen des Verbrauchs nicht erneuerbarer Primärenergie gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8 bei T30 (oben, LAB T30) und T50 (unten, Basisstudie). Hinweis: Die Skalen der Abbildungen beziehen sich auf das jeweilige Referenzszenario. Zur Vergleichbarkeit der Grafiken vgl. Abschnitt 3.1. 30

Abbildung 6: Interne, externe und totale Kosten pro Jahr und Kilometer Strasse für die vier Basisszenarien bei T30. 31

Abbildung 7: Kostendifferenzen gegenüber dem Referenzszenario ACMR 8 bei T30 (oben, LAB T30) und T50 (unten, Basisstudie). Hinweis: Die Skalen der Abbildungen beziehen sich auf das jeweilige Referenzszenario. Zur Vergleichbarkeit der zwei Grafiken vgl. Abschnitt 3.1. 34

Abbildung 8: Oben: Verteilung der Anwohner von einem Kilometer Kantonsstrasse innerorts in Abhängigkeit der Lden-Klasse bei T50 (links, Basisstudie) und bei T30 (rechts, LAB T30). Unten: Verteilung der Wohnungen an einem Kilometer Kantonsstrasse innerorts in Abhängigkeit der Lr-Nacht-Klasse bei T50 (links) und T30 (rechts). Beide Verteilungen sind hier für die Referenz sonBASE15 (schwarz) und die vier Basisszenarien gezeigt. 50

Abbildung 9: Kraftstoffverbrauch (in Megajoule [MJ] pro km) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit in urbanen und ruralen Gebieten. Die Tempi in der Abbildung beziehen sich auf die (geschilderten) Höchstgeschwindigkeiten. Für die Fahrzeug-Kraftstoffgruppen Benzin (blau), Diesel (grün) und Elektrik (braun) wurde eine Regression durchgeführt und die Werte bei den Geschwindigkeiten 30 km/h und 50 km/h ermittelt (Kreuze). 54

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rollwiderstandsänderung bei T30 in Abhängigkeit der Deckschicht und der entsprechend modellierte Änderung des Treibstoff- bzw. Energieverbrauchs in Abhängigkeit von Fahrzeug-Gewicht und Antriebsart..... 17

Tabelle 2: Lärmwirkung gegenüber StL-86+ für die vier Basis-Szenarien 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)..... 18

Tabelle 3: Resultatübersicht der vier Beläge für T30. Grau hinterlegte Werte sind gegenüber der Basisstudie unverändert.23

Tabelle 4: Interne und externe Kosten (pro Jahr und Kilometer Strasse) für die vier Basisszenarien bei T30, aufgeschlüsselt nach Kostenträger der internen Kosten sowie nach Kostenquelle der externen Kosten. Abweichungen sind auf Rundungen zurückzuführen.32

Tabelle 5: Lärmwirkung gegenüber StL-86+ für die vier Basis-Szenarien auf SDA-Belägen (Mischverkehrswert mit 6 % LKW-Anteil) bei T30 (LAB T30) und T50 (Basisstudie). 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).
..... 48

Tabelle 6: 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).....52

Tabelle 7: Übersicht der in LAB T30 für die LCA-Berechnung je Prozess verwendeten Modellannahmen und Parameter mit der jeweiligen Datenquelle. (Alle hier nicht dargestellten Prozesse wurden unverändert aus der Basisstudie übernommen.)55

Tabelle 8: In der LCC-Berechnung berücksichtigte Prozesse sowie die jeweiligen Modellannahmen und Parameter mit Angabe der Datenquelle. Prozessdaten zur Ermittlung interner Kosten der Basisszenarien sind hell, jene zur Berechnung externer Kosten dunkel hinterlegt. (Ein «e» in Prozesskürzeln, wie «Ne», «N2e», bezeichnet externe Kosten.) 57

Tabelle 9: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien der Basisstudie sowie dieser LCA LAB T30 Studie werden in der Wirkungskategorie

Umweltbelastungspunkte dargestellt – berechnet nach der Methode der ökologischen Knappheit, Einheit: UBP'21 pro Kilometer und Jahr (Umweltbelastungspunkte auf Basis der Ökofaktoren Schweiz, Stand 2021)..... 60

Tabelle 10: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien in der Wirkungskategorie Treibhausgas-Emissionen, Einheit: kg CO₂eq. pro Kilometer und Jahr (Kilogramm CO₂-Äquivalente) 61

Tabelle 11: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien in der Wirkungskategorie nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf, Einheit: MJ pro Kilometer und Jahr (Mega Joule)..... 62

Tabelle 12: Absolutwerte der internen und externen Lebenszykluskosten, Einheit: CHF pro Kilometer und Jahr 63

IV. Literaturverzeichnis

- BFE, Bundesamt für Energie. 2022. Energieverbrauch und Energieeffizienz der neuen Personenwagen und leichten Nutzfahrzeuge 2021
<https://www.newsd.admin.ch/newsd/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>.
- Catillaz, Andreas, und Fredy Fischer. 2018. Lärmbelastung in der Schweiz BAFU, Bundesamt für Umwelt.
- EnergieSchweiz. Energieeffizienz E-Autos EnergieSchweiz. <https://www.energieschweiz.ch/energieeffizienz/>.
- Grolimund + Partner AG. 2020. *Akustik der Strassenbeläge - Grundlagen, Erfahrungen und Praxis des Kantons Aargau*.
- INFRAS. HBEFA 4.2 (Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs).
<https://www.hbefa.net/de/software#online-version>.
- ISO 11819. 2017. EN ISO 11819-2:2017 (E), Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method (ISO 11819-2:2017)
- 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.
- 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.
- Pischinger, Stefan, und Ulrich Seifert. 2021. Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik
- Sandberg, Ulf, und Jerzy A. Ejsmont. 2002. Tyre/road noise: reference book
- Schlatter, Felix, Erik Bühlmann, und Johannes Schindler. 2021. Rollwiderstand auf lärmarmen Belägen in der Schweiz Grolimund + Partner AG.
- Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. 2022. VSS 41 828: Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Externe Effekte im Bereich Umwelt und Gesundheit
- Steiner, Michele. 2020. Mikroplastik: Eintrag von Reifenabrieb in Oberflächengewässer wst21.
- UVEK:2021/2023 BAFU (Hrsg). UVEK Ökobilanzdatenbestand 2021 und 2023 (weiterentwickelt aus dem Ökobilanzdatenbestand UVEK:2018, DQRv2:2018).

Arbeitsversionen vom BAFU, für die BAFU-LCA-LAB-Studie sowie die vorliegende ergänzende Sensitivitätsanalyse, mit Zwischenversionen zur Verfügung gestellt von pierryves.padey@bafu.admin.ch, via Greendelta (Berlin) für Software openLCA, Juli 2022 - März 2025.

Verein Mobitool. 2023. mobitool-Faktoren v3.0

<https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v3-0-25.html>.

wdk. 2020. Mikroplastik in der Umwelt Reifen- und Straßenabrieb wdk, Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e. V.

Das Literaturverzeichnis umfasst auch die Literatur der Basisstudie.

V. Dank

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

- Peter Hofmann, UGZ, Projektleiter Luftreinhaltung
- Harald Jenk, BAFU
- Martin Horat, Tiefbauamt Stadt Zürich, Experte Strassenoberbau

VI. Mischgut

Unter Mischgut versteht man die Zusammensetzung des Asphalts. Die vier betrachteten Beläge unterscheiden sich teils spürbar. Während der Bitumenanteil nur leicht variiert (5,8 – 6 %) betragen der Kiesanteil zwischen 48 und 70 % und der Sandanteil 47 bis 25 %.

Die Rezepturen sind in der Basisstudie als Anhang VI dargestellt und kommentiert.

VII. Lärmwirkung: akustisches Alterungsmodell

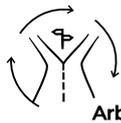
Die akustische Wirkung eines Belags verändert sich über die Zeit. Diese Veränderungen der Lärmwirkung werden gemessen und gestützt auf solche Messwerte hat Grolimund+Partner AG in der Basisstudie ein Alterungsmodell für die betrachteten Beläge im Vergleich zum Referenzbelag «StL-86+» bei T50 berechnet. Um dieses Alterungsmodell der Beläge von T50 auf T30 umzurechnen, wurde das Strassenlärm-Emissionsmodell sonROAD18 (Heutschi und Locher 2018) verwendet. Konkret wurden zunächst die Veränderungen der Lärmemissionen beim Wechsel von T50 auf T30 für verschiedene Belagskorrekturen ermittelt. Daraus konnte eine quadratische Funktion abgeleitet werden, welche die Veränderung der Lärmemission von T50 zu T30 in Abhängigkeit von der Belagswirkung beschreibt. Mit Hilfe dieser Funktion wurde ein Alterungsmodell bei T30 auf Grundlage des Alterungsmodell bei T50 aus der Basisstudie berechnet. Aus beiden Alterungsmodellen wurden schliesslich die mittleren akustischen Wirkungen berechnet (Tabelle 5): Bei einem LKW-Anteil von 6 % reichen diese von -0.7 dB für ACMR 8 bis zu - 4.1 dB für SDA 4 bei T50 und von - 4.8 dB für ACMR 8 bis zu - 7.0 dB für SDA 4 bei T30, jeweils gegenüber der Referenz in StL-86+ (BUWAL 1987).

Die Alterungsmodelle der vier hier betrachteten Beläge sind in der Basisstudie als Anhang VII im Detail erklärt.

Die folgende Tabelle zeigt die mittleren akustischen Wirkungen in dieser Studie LAB T30 (oben). Zum Vergleich sind diese Wirkungen der Basisstudie darunter nochmals gezeigt:

Tabelle 5: Lärmwirkung gegenüber StL-86+ für die vier Basis-Szenarien auf SDA-Belägen (Mischverkehrswert mit 6 % LKW-Anteil) bei T30 (LAB T30) und T50 (Basisstudie). 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 – LAB T30	StL-86+(0) T30	ACMR 8 T30	SDA 4 T30	SDA 8 T30	AC 8 H LA T30
Mittlere akustische Wirkung (dB)	0.0	-4.8	-7.0	-5.2	-5.0
Quellenreduktion (für LCA)	0 %	-67 %	-80 %	-70 %	-68 %
Personen-Dezibel (für LCC)	6610	4038	3170	3861	3949
Wohnungs-Dezibel (für LCC)	3090	1788	1350	1660	1728
Szenario – Basisstudie	StL-86+(0)	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
Mittlere akustische Wirkung (dB)	0.0	-0.7	-4.1	-1.3	-1.0
Quellenreduktion (für LCA)	0 %	-14 %	-59 %	-24 %	-19 %
Personen-Dezibel (für LCC)	6610	6180	4360	5827	6002
Wohnungs-Dezibel (für LCC)	3090	2880	1879	2679	2773



VIII. Strassenlärmkosten: Ausmass lärmbelastete Personen und Wohnungen

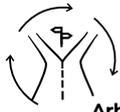
Die Ausgangsdaten zur Berechnung der Strassenlärmkosten sind die in der Lärmdatenbank sonBASE15 enthaltenen, für die gesamte Schweiz berechneten Strassenlärm-Immissionsdaten (basierend auf StL-86+) (Catillaz und Fischer 2018). Für die Studie wurde vom BAFU eine Auswertung dieser Daten entlang der Kantonsstrassen im städtischen Kernraum erstellt. Die resultierenden Histogramme sind in Abbildung 8 als graue Kurven («sonBASE15») bei T50 (links, aus Basisstudie) und T30 (rechts) 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.

Entsprechend den in Anhang VII berechneten Lärmwirkungen der verschiedenen Strassenbeläge verschieben sich die Histogramme dank der Lärminderung zu tieferen Dezibel-Klassen, wie mit den farbigen Linien in Abbildung 8 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 Lden multipliziert mit der Anzahl Dezibel über dem Lden-Schwellenwert von 48 dB(A).
- «Wohnungs-Dezibel»: Anzahl Wohnungen je Dezibelklasse Lr-Nacht multipliziert mit der Anzahl Dezibel über dem Lr-Nacht-Schwellenwert von 40 dB(A), bzw. Anzahl Wohnungen je Dezibelklasse Lr-Tag multipliziert mit der Anzahl Dezibel über dem Lr-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 generischen 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 2 gezeigt und ergeben, multipliziert mit den auf 2021 preisangepassten Kostenansätzen aus (VSS 41 828 2022) (siehe Tabelle 8), die externen Lärmkosten aus Gesundheitskosten und Mietzinsverlusten.



VIII. Strassenlärmkosten: Ausmass lärmbelastete Personen und Wohnungen

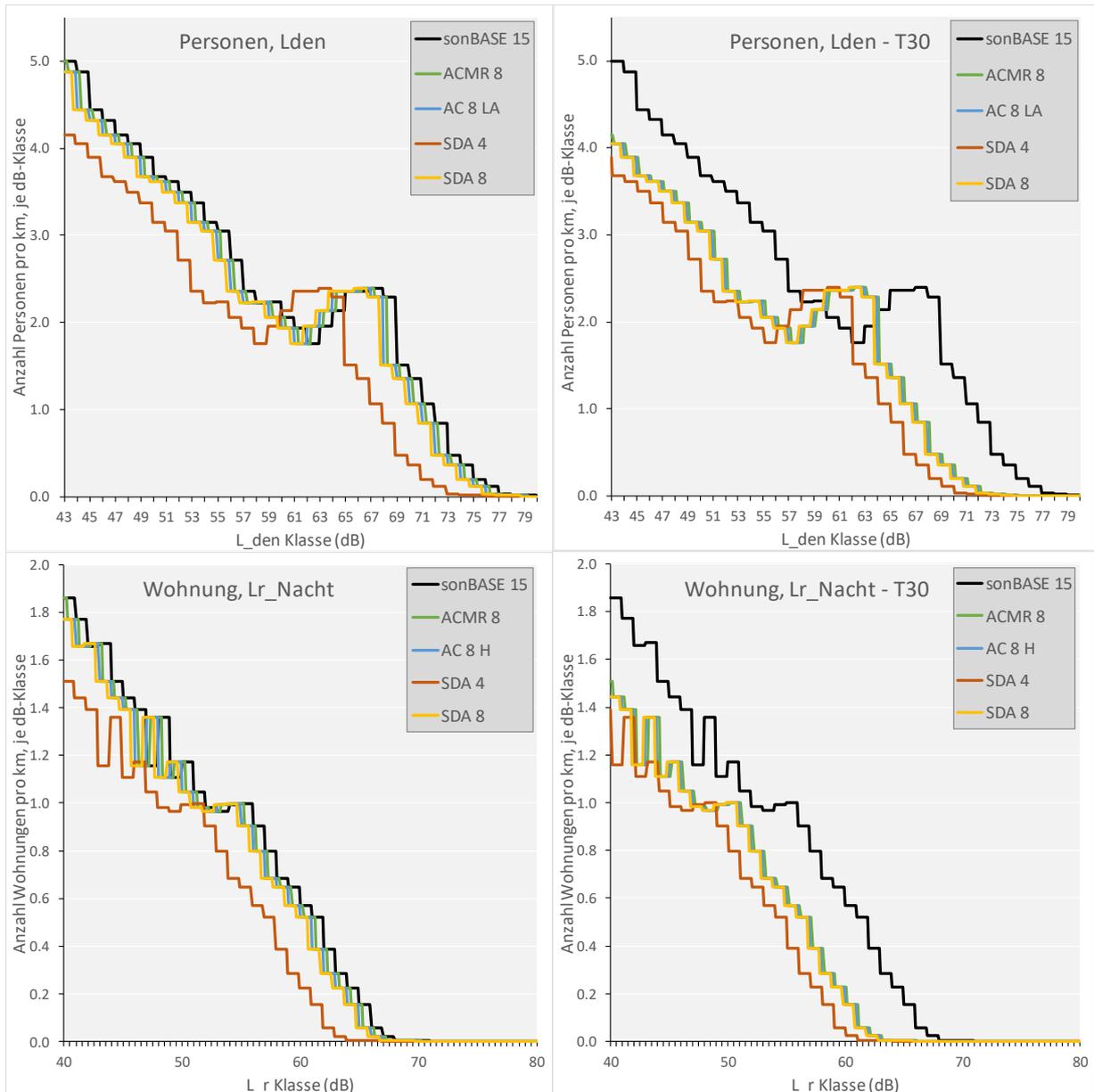


Abbildung 8: Oben: Verteilung der Anwohner von einem Kilometer Kantonsstrasse innerorts in Abhängigkeit der Lden-Klasse bei T50 (links, Basisstudie) und bei T30 (rechts, LAB T30). Unten: Verteilung der Wohnungen an einem Kilometer Kantonsstrasse innerorts in Abhängigkeit der Lr-Nacht-Klasse bei T50 (links) und T30 (rechts). Beide Verteilungen sind hier für die Referenz sonBASE15 (schwarz) und die vier Basisszenarien gezeigt.

IX. Energieverbrauch und Reifenabrieb

Um den Einfluss des Strassenbelags auf den Energie- bzw. Treibstoffverbrauch und auf 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 in dieser Quelle detailliert beschrieben wurden die Messungen mit einem nach (ISO 28580 2018, 285) 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 Basisstudie LCA LAB (2024) aufbereitet und sind in Tabelle 6 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 (für detailliertere Angaben vgl. LCA LAB (2024)):

- «Ref.» (Referenz) = Mittelwert verbreiteter konventioneller Belagstypen.

«ACMR 8», «SDA 4», «SDA 8» und «AC 8» = Werte für die vier betrachteten Beläge

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

Tabelle 6: 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).

Belag	Ref.	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8
Stichprobenlänge total (km)	24.4	16.0	27.6	1.3	1.4
Anzahl Strecken in Stichprobe	73	16	23	4	10
Belagsalter in Stichprobe (Jahre): Mittelwert (Min ... Max)	13 (1 ... 20)	9 (6 ... 12)	3 (1 ... 9)	3 (1 ... 4)	12 (8 ... 19)
Mittlerer Rollwiderstandswert Cr (-)	0.0094	0.0094	0.0084	0.0090	0.0095
Änderung Rollwiderstand gegenüber Ref.	0.0%	-0.4%	-10.9%	-3.6%	0.9%
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Benzin	0.0%	-0.1%	-3.3%	-1.1%	0.3%
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Diesel	0.0%	-0.1%	-2.5%	-0.8%	0.2%
Änderung Energieverbrauch gegenüber Ref.: PW Elektro	0.0%	-0.1%	-3.0%	-1.0%	0.2%
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: LKW Diesel	0.0%	-0.1%	-1.6%	-0.5%	0.1%
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Benzin – LAB T30	0.0%	-0.2 %	-4.4 %	-1.5 %	0.3 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: PW Diesel – LAB T30	0.0%	-0.1 %	-3.1 %	-1.0 %	0.2 %
Änderung Energieverbrauch gegenüber Ref.: PW Elektro – LAB T30	0.0%	-0.1 %	-3.8 %	-1.3 %	0.3 %
Änderung Treibstoffverbrauch gegenüber Ref.: LKW Diesel – LAB T30	0.0%	-0.1 %	-1.9 %	-0.6 %	0.1 %
Mittlere Mean-Profile-Depth MPD (mm)	0.88	0.93	0.69	0.91	0.70
Änderung MPD gegenüber Ref.	0.0%	5.7%	-22.0%	3.0%	-20.5%
Änderung Reifenabrieb gegenüber Ref.	0.0%	0.9%	-3.6%	0.5%	-3.3%

IX.a. Energieverbrauch

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

- Rollwiderstandswert (C_r) in Abhängigkeit des Strassenbelags entsprechend Tabelle 6
- Treibstoff- bzw. Energieverbrauch im Referenzfall (konventioneller Belag) gemäss Antriebsart und Fahrzeugtyp (vgl. Tabelle 7, Zeile «N1»)
- Fahrzeuggewicht gemäss Antriebsart und Fahrzeugtyp (vgl. Tabelle 7, Zeile «N1»)
- Wirkungsgrad Motor gemäss Antriebsart und Fahrzeugtyp (vgl. Tabelle 7, Zeile «N1»)

Für die Berechnung des Energieaufwandes zur Überwindung des Rollwiderstandes sei auf das gleichlautende Kapitel in LCA LAB (2024) verwiesen. Die Verbrauchswerte der Fahrzeuge aus der Basisstudie stammen aus der UVEK-Datenbank (UVEK:2021/2023) und beziehen sich auf den Kraftstoffverbrauch eines Mischverkehrs bei verschiedenen Geschwindigkeiten. In der Basisstudie wurde dieser Verbrauch für T50 gewählt.

Um die Geschwindigkeitsdifferenz und die damit verbundenen veränderten Fahrbedingungen bei T30 angemessen zu berücksichtigen, wurden ergänzend Verbrauchsdaten aus der HBEFA-Datenbank herangezogen. Die HBEFA-Verbrauchswerte für verschiedene Geschwindigkeiten wurden mithilfe einer Regression für städtische und ländliche Gebiete ermittelt (Abbildung 9). Die so ermittelten mittleren Verbrauchswerte bei T50 und bei T30 wurden relativ zueinander betrachtet: Die Werte für T30 liegen dabei über den Werten für T50. (Bei T50 bis T70 sind im flüssigen Verkehr gemäss HBEFA die Verbräuche von PWs am tiefsten. Die geringsten Mehrverbräuche zeigen elektrisch betriebene PW, die höchsten Mehrverbräuche mit Benzin betriebene PW innerhalb der Fahrzeugkategorie PW.)

Zur Berechnung der Verbrauchs- und Emissionswerte für die vorliegende Studie wurden die Verbrauchswerte der Basisstudie (die Originalwerte aus den Datensätzen von UVEK:2021/2023, welche als Werte für T50 verwendet wurden) mit diesem Korrekturfaktor multipliziert, der das Verhältnis des Kraftstoffverbrauchs bei T30 zu T50 in HBEFA widerspiegelt.

Diese Mehrverbräuche bei T30 liegen bei 10-27% höheren Verbrauchswerten für PWs und zu 3% höheren Verbrauchswerten für LKW.

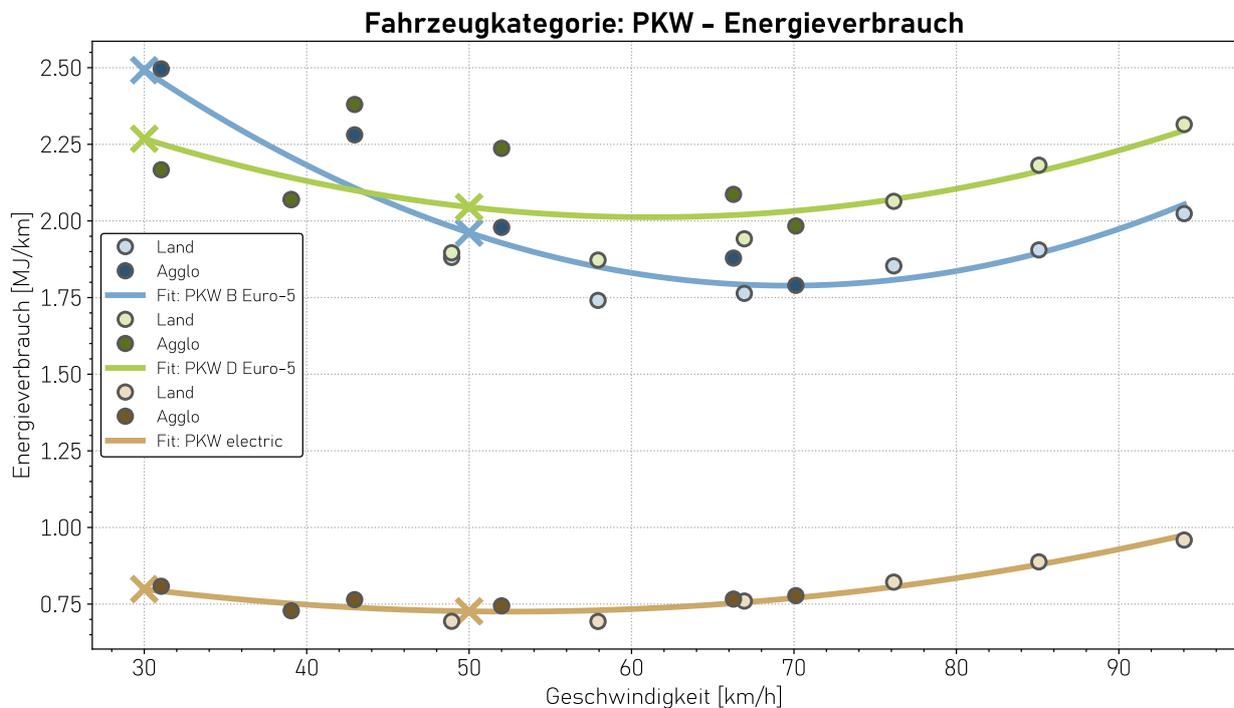


Abbildung 9: Kraftstoffverbrauch (in Megajoule [MJ] pro km) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit in urbanen und ruralen Gebieten. Die Tempi in der Abbildung beziehen sich auf die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten bei signalisierten Geschwindigkeiten T30, T50 usw.. Für die Fahrzeug-Kraftstoffgruppen Benzin (blau), Diesel (grün) und Elektrisch (braun) wurde eine Regression durchgeführt und die Werte bei den Geschwindigkeiten 30 km/h und 50 km/h ermittelt (Kreuze).

IX.b. Reifenabrieb

Der Reifenabrieb wurde auf Basis des Eintrags in Gewässer und Böden (Steiner 2020) innerorts pro Fahrzeugkilometer abgeschätzt. Eine Überprüfung zeigte, dass sich der Reifenabrieb durch den Wechsel der flüssig gefahrenen Tempi nicht relevant verändert, da der Hauptanteil des Abriebs durch Fahrmanöver wie Bremsen, Beschleunigen und Kurvenfahrten entsteht. Die Daten zum Reifenabrieb werden deshalb unverändert aus der Basisstudie übernommen.

Eine ausführlichere Darstellung der Berechnung findet sich in Anhang IX der Basisstudie.

X. Modellannahmen LCA Life Cycle Assessment

Die folgende Tabelle zeigt die im Rahmen der LCA berücksichtigten Prozesse sowie die dafür verwendeten Annahmen und Parameter. Aufgeführt sind dabei jene Prozesse, die spezifisch für LAB T30 angepasst wurden. Die unveränderten (nicht aufgeführten) Prozesse sind in der Basisstudie (Anhang XIII) dokumentiert. Als «Provider» dienen jeweils die Standardprozesse aus dem LCI-Datenbestand des Bundes (UVEK:2021/2023).

Tabelle 7: Übersicht der in LAB T30 für die LCA-Berechnung je Prozess verwendeten Modellannahmen und Parameter mit der jeweiligen Datenquelle. (Alle hier nicht dargestellten Prozesse wurden unverändert aus der Basisstudie übernommen.)

Prozess	Annahmen	Quelle
N1: Nutzung: Energieverbrauch	<ol style="list-style-type: none"> Fahrleistung je Kategorie und Antriebsart (PW Benzin, PW Diesel, PW Elektro, LKW Diesel). 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 <p>Für LAB T30 wurden diese Datensätze mit dem Faktor aus der Analyse der HBEFA-Werte auf T30 umgerechnet:</p> <ul style="list-style-type: none"> - PW Benzin: x1.27 - PW Diesel: x1.11 - PW Elektro: x1.10 - LKW Diesel: x1.03 <ol style="list-style-type: none"> 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 	<ol style="list-style-type: none"> Tabelle 6 (UVEK:2021/2023): PW: operation, passenger car, diesel, EURO5 (petrol) CH 2010, electric 2009 LKW: UVEK:2018, operation, lorry 3.5-20t, fleet average. (INFRAS): Verbrauchswerte bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten in ruralen und urbanen Verkehrsstrassen wurden für Interpolation verwendet und Werte bei Tempi 50 km/h und 30 km/h für Faktoren der verschiedenen Kraftstoffe verwendet (siehe Anhang IX). Eigene Berechnung, Herleitung Verbrauchswerte siehe Anhang IX <ol style="list-style-type: none"> Rollwiderstand: (Schlatter, Bühlmann, und Schindler 2021) Fahrzeuggewicht PW: (BFE, Bundesamt für Energie 2022) Fahrzeuggewicht LKW: (Verein Mobitool 2023) mittleres Leergewicht 7.5-16 t, plus durchschn. Beladung (3.3 t von 6.9 t durchschn. Kapazität)

Prozess	Annahmen	Quelle
	<p>4. Fahrzeugkilometer-Äquivalent entsprechend Treibstoff- bzw. Energieverbrauch je Belagstyp, abgebildet mit folgenden Providern für</p> <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>	<p>d) Wirkungsgrad Motor: (Pischinger und Seifert 2021) (EnergieSchweiz, o. J.)</p> <p>4. (UVEK:2021/2023)</p>
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 5 2. Eigene Berechnung basierend auf Lärmmodellen, siehe Kapitel 2.4.2 und Anhang VII 3. (UVEK:2021/2023)
N3: Nutzung: Reifenabrieb	Gegenüber Basisstudie unverändert übernommen	

XI. Modellannahmen LCC Life Cycle Costing

Tabelle 8: In der LCC-Berechnung berücksichtigte Prozesse sowie die jeweiligen Modellannahmen und Parameter mit Angabe der Datenquelle. Prozessdaten zur Ermittlung interner Kosten der Basisszenarien sind hell, jene zur Berechnung externer Kosten dunkel hinterlegt. (Ein «e» in Prozesskürzeln, wie «Ne», «N2e», bezeichnet externe Kosten.)

Prozess	Annahmen	Quelle
N1: Nutzung: Energieverbrauch	<ol style="list-style-type: none"> Fahrleistung je Kategorie und Antriebsart (PW Benzin, PW Diesel, PW Elektro, LKW Diesel). 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 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 Treibstoff-/Energiekosten <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 	<ol style="list-style-type: none"> Tabelle 6 (UVEK:2021/2023): PW: Ecoinvent, operation, passenger car, diesel, EURO5 (petrol) CH 2010, electric 2009 LKW: UVEK:2018, operation, lorry 3.5-20t, fleet average Eigene Berechnung, Herleitung Verbrauchswerte siehe Anhang IX <ol style="list-style-type: none"> Rollwiderstand: (Schlatte, Bühlmann, und Schindler 2021) Fahrzeuggewicht PW: (BFE, Bundesamt für Energie 2022) Fahrzeuggewicht LKW: (Verein Mobitool 2023) mittleres Leergewicht 7.5-16to, plus durchschn. Beladung (3.3 t von 6.9 t durchschn. Kapazität) Wirkungsgrad Motor: (Pischinger und Seifert 2021), (EnergieSchweiz, o. J.) Benzin und Diesel: BFS, LIK, Durchschnitt 2018-2022; Strom: elCom, Durchschnitt 2018-2022
N3: Nutzung: Reifenabrieb	Gegenüber Basisstudie unverändert übernommen	
N2e: Strassenlärmkosten (Nutzung)	1. Anzahl Personen-Dezibel in Abhängigkeit der Lärmwirkung basierend auf der Anzahl strassenlärmexponierter Personen pro Kilometer Kantonsstrasse in Kerngemeinde.	<ol style="list-style-type: none"> 1. und 2.: Eigene Berechnung basierend auf Lärmmodellen (Kapitel VII), (VSS 41 828 2022) und (Catillaz und Fischer 2018), siehe auch Kapitel VIII 3. a) (VSS 41 828 2022), CHF Wert gemäss Norm auf 2021 angepasst, Personen-Dezibel Schwellwert: 48 dB Lden

Prozess	Annahmen	Quelle
	2. Anzahl Wohnungs-Dezibel in Abhängigkeit der Lärmwirkung basierend auf der Anzahl strassenlärmexponierter Wohnungen pro Kilometer Kantonsstrasse in Kerngemeinde. 3. a) Lärmkosten Gesundheit: 16.43 CHF pro Personen-Dezibel b) Lärmkosten Wohnungspreise: 43.77 CHF pro Wohnungs-Dezibel	b) (VSS 41 828 2022), CHF Wert gemäss Norm auf 2021 angepasst, Wohnungs-Dezibel gemäss angepassten «ZKB-Lärmass» (berechnet mittels Lr(Nacht) plus 25% Pauschalzuschlag für Lr(Tag)-Überschreitungen – vergleiche Anhang VIII).
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. (Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS 2022), CHF Wert gemäss Norm auf 2021 angepasst.

XII. Datentabellen der Resultate

Die folgenden Tabelle 9 bis Tabelle 12 fassen die Ergebnisse für alle betrachteten Prozesse in den vier Basisszenarien zusammen. Dabei sind die Absolutwerte in den Wirkungskategorien Umweltbelastungspunkte (UBP'21), Treibhausgas-Emissionen (kg CO₂eq.), nicht erneuerbarer Energiebedarf (MJ) und Lebenszykluskosten (CHF) dargestellt.

XII.a. Wirkungskategorie Umweltbelastungspunkte

Tabelle 9: Absolutwerte für alle Prozesse der Basiszenarien der Basisstudie sowie dieser LCA LAB T30 Studie werden in der Wirkungskategorie Umweltbelastungspunkte dargestellt – berechnet 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	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
	T30							
B1: Bau Binderschicht	1.07E+07	2.13E+07	1.42E+07	1.07E+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	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	2.30E+06	4.45E+06	2.99E+06	2.33E+06
U1: Strassenreinigung	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
U3: Markierung	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	5.12E+06
N1: Energieverbrauch (Nutzung)	1.11E+09	1.08E+09	1.10E+09	1.11E+09	1.31E+09	1.27E+09	1.30E+09	1.32E+09
N2: Strassenlärm (Nutzung)	8.18E+07	3.88E+07	7.23E+07	7.71E+07	3.17E+07	1.93E+07	2.88E+07	3.03E+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	1.24E+07
Total	1.23E+09	1.18E+09	1.22E+09	1.23E+09	1.39E+09	1.35E+09	1.38E+09	1.39E+09

XII.b. Wirkungskategorie Treibhausgas-Emissionen

Tabelle 10: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien 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	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
					T30	T30	T30	T30
B1: Bau Binderschicht	7.03E+03	1.41E+04	9.37E+03	7.03E+03	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	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	4.88E+02	9.46E+02	6.35E+02	4.93E+02
U1: Strassenreinigung	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
U3: Markierung	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	3.15E+03
N1: Energieverbrauch (Nutzung)	8.23E+05	8.00E+05	8.16E+05	8.26E+05	9.80E+05	9.45E+05	9.69E+05	9.84E+05
Total	8.41E+05	8.32E+05	8.38E+05	8.44E+05	9.98E+05	9.76E+05	9.92E+05	1.00E+06

XII.c. Wirkungskategorie nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf

Tabelle 11: Absolutwerte für alle Prozesse der Basisszenarien 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	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
					T30	T30	T30	T30
B1: Bau Binderschicht	1.35E+05	2.70E+05	1.80E+05	1.35E+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	1.51E+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	7.08E+03	1.37E+04	9.21E+03	7.15E+03
U1: Strassenreinigung	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
U3: Markierung	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	7.81E+04
N1: Energieverbrauch (Nutzung)	1.07E+07	1.04E+07	1.06E+07	1.07E+07	1.27E+07	1.22E+07	1.26E+07	1.27E+07
Total	1.11E+07	1.10E+07	1.10E+07	1.11E+07	1.31E+07	1.29E+07	1.30E+07	1.31E+07

XII.d. Interne und externe Lebenszykluskosten

Tabelle 12: Absolutwerte der internen und externen Lebenszykluskosten, Einheit: CHF pro Kilometer und Jahr

Szenario	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA	ACMR 8	SDA 4	SDA 8	AC 8 H LA
					T30	T30	T30	T30
B1: Bau Binderschicht	8.13E+03	1.63E+04	1.08E+04	8.13E+03	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	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	3.88E+03	7.59E+03	5.08E+03	3.91E+03
U1: Strassenreinigung	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
U3: Markierung	3.00E+03							
U4: Belagsreparaturen	5.39E+03							
N1: Energieverbrauch (Nutzung)	3.84E+05	3.74E+05	3.81E+05	3.85E+05	4.57E+05	4.41E+05	4.52E+05	4.59E+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	5.80E+04
Total interne Kosten	4.78E+05	4.87E+05	4.82E+05	4.76E+05	5.51E+05	5.54E+05	5.53E+05	5.50E+05
Be: ext. Kosten Bau und Rückbau	6.59E+03	1.30E+04	8.72E+03	6.65E+03	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	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	1.45E+05	1.11E+05	1.36E+05	1.40E+05
Ne: übrige ext. Kosten Nutzung	3.10E+05	3.02E+05	3.08E+05	3.11E+05	3.58E+05	3.46E+05	3.54E+05	3.55E+05
Total externe Kosten	5.47E+05	4.72E+05	5.32E+05	5.40E+05	5.12E+05	4.73E+05	5.02E+05	5.05E+05
Total	1.02E+06	9.59E+05	1.01E+06	1.02E+06	1.06E+06	1.03E+06	1.05E+06	1.06E+06