

Diss. ETH No. 20113

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF ROAD CONSTRUCTIONS

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SWISS ROAD PAVEMENTS AND AN
ACCOMPANYING ANALYSIS OF CONSTRUCTION AND MAINTENANCE COSTS

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

FLORIAN GSCHÖSSER

Dipl.-Ing., Leopold-Franzens University of Innsbruck
born 28 January 1981, citizen of Austria

accepted on the recommendation of

Prof. Dr.-Ing. Holger Wallbaum, examiner

Prof. Dr. Bryan T. Adey, co-examiner

Prof. Dr. Stefanie Hellweg, co-examiner

Dr. Markus Tschudin, co-examiner

2011

SUMMARY

The importance of overall sustainable development in guaranteeing an appropriate quality of life for upcoming generations was underlined in recent years by the fact that several nations, societies and economic sectors agreed in various international protocols and contracts to reduce their environmental pollution and to enhance social living or working conditions.

To integrate road infrastructure into the concept of sustainable development, infrastructure owners should take environmental and social aspects into account in addition to their economic based construction and maintenance concepts.

This dissertation assesses representative Swiss asphalt, concrete and composite road pavements over chosen analysis periods with the goal of determining environmental potentials, i.e. reduction potentials regarding chosen environmental indicators, given by the processes of the life cycle phases of the pavements, and the influence of these potentials on costs occurring over the periods analyzed.

This dissertation was directed by an advisory board containing 14 experts from all parts of the Swiss road infrastructure sector (governmental and cantonal departments, contractor associations, engineering consultants and experts, construction companies, road material producers, and research).

The road pavements analyzed are pavements for national and cantonal roads. It was specified that processes of the use phase, i.e. use related processes such as vehicle operation, lighting, road cleaning, etc., would be excluded from the study. Hence, this study focuses on the environmental potentials and the economic influence of new construction and maintenance processes occurring over the life cycles of the evaluated pavements.

Due to the fact that road infrastructure is maintained frequently to ensure an adequate level of service, average life times, i.e. the life cycle of different road constructions, are difficult to define. Therefore, the road pavements are analyzed over three chosen analysis periods (25, 50 and 75 years) applying three different maintenance intervention strategies for each pavement type (asphalt, concrete, and composite).

The methodologies used to evaluate the road pavements chosen to be representative for the Swiss national and cantonal road network are the Life Cycle Assessment (LCA) according to ISO 14040 and Life Cycle Cost Analysis (LCCA) according to ISO 15686-5, which observe a product over its entire life cycle to determine its environmental (LCA) and economic (LCCA) impacts. The LCA results are expressed by several environmental indicators (Global Warming Potential (GWP) indicator, Cumulative Energy Demand (CED), Ecological Scarcity 2006 indicator, ReCiPe Midpoint (MP) and Endpoint (EP) indicators and the Cumulative Exergy Demand (CExD)). In order to determine the reliability of the results of the Life Cycle Assessments, Monte Carlo simulations were performed.

This thesis is a cumulative dissertation and is divided into seven main chapters. Chapter 1 gives a brief introduction of the *problem statement, the goal, the state of research, the research questions, the research approach*, as well as the *relevance and feasibility of the study*. Chapter 2 includes descriptions of *road infrastructure in Switzerland, the concept of sustainability, the state of the art for the field of sustainable (road) infrastructure, the quantitative research approach*, as well as all applied *methodologies and environmental indicators* including a *critical view* on all methodologies and indicators.

The four following main chapters of the thesis are formed by five research papers (Papers I to IV or rather Chapters 3 to 6). The first two papers were published in peer-reviewed scientific journals (*Paper I: Journal of Materials in Civil Engineering - Life Cycle Assessment of the Production of Swiss Road Materials, Paper II: Journal of Management in Engineering - Hidden Ecological Potentials in the Production of Materials for Swiss Road Pavements*). Paper III was submitted to a peer-reviewed scientific journal (*Paper III: Structure and Infrastructure Engineering - Environmental Analysis of New Construction and Maintenance Processes of Road Pavements in Switzerland*) and Paper IV is about to be submitted to a peer-reviewed scientific journal (*Paper IV: Environmental Science & Technology - Environmental and Economic Analysis of Representative Swiss Road Pavements*).

The contents of the papers correspond to the temporal occurrence of the pavements life cycle phases, i.e. starting with the material production, the life cycle phases are analyzed step by step until the overall analysis of the road pavements over the chosen analysis periods has been completed. Papers I-III focus on the environmental analysis, i.e. the LCAs, of the road pavements life cycle phases (material production, new construction, maintenance and different LCA-models) with regard to the Global Warming Potential indicator, the non-renewable Cumulative Energy Demand and the Ecological Scarcity indicator. In Paper IV, the step-by-step analysis of the road pavements is finalized by a combined LCA and LCCA study, which investigates the road constructions over the three analysis periods taking the three maintenance strategies into account (Figure S-1).

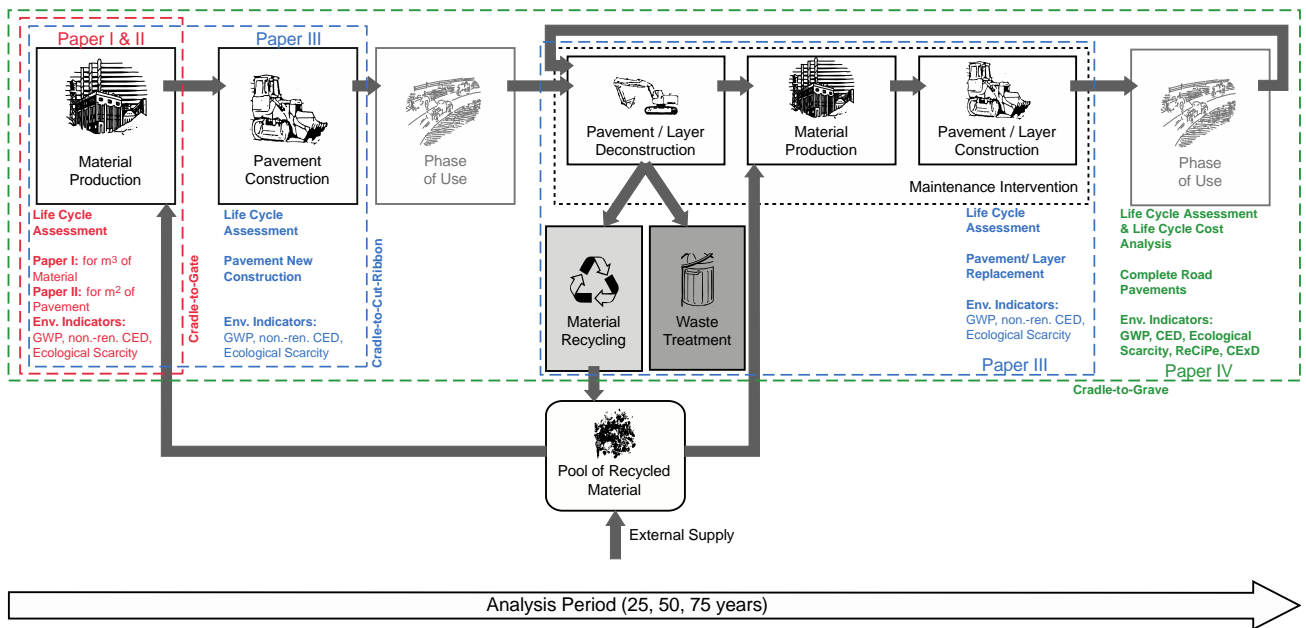


Figure S-1: Stepwise analysis of road pavements life cycle phases

Chapter 3 (Paper I) is the first part of the stepwise analysis of the life cycles of the different road pavements and the detailed analyses of the production of all materials applied within the road pavements chosen to be representative for the Swiss national and cantonal network. Accordingly, the environmental reduction potentials within the analyzed material production processes regarding the Global Warming Potential indicator, the non-renewable Cumulative Energy Demand and the Ecological Scarcity indicator are demonstrated for each material by applying the cradle-to-gate LCA approach, which analyses all production process of a road material, from raw material acquisition until the moment the finished product leaves the production plant.

The results of Chapter 3 show that material production processes for one cubic meter of road material offer reduction potentials regarding the applied environmental indicators of up to 81 % for asphalt mixtures (in comparison to the Non-renewable CED results of standard and best case production of AC F 32), 38 % for concrete mixtures (in comparison to the Ecological Scarcity results of standard and best case production of bottom concrete), and 69 % for subbase mixtures (in comparison to Ecological Scarcity results of standard and best case production of hydraulically bound subbase mixtures).

Chapter 4 (Paper II) combines the results and potentials of the material production processes analyzed in Chapter 1 according to the superstructures of the representative cantonal and national road pavements.

The results of Chapter 4 show reduction potentials with regard to the utilized environmental indicators of up to 59 % for asphalt pavements (in comparison to Non-renewable CED results of standard and best case production of T4 S4 asphalt pavements), 54 % for concrete pavements (in comparison to Non-renewable CED results of standard and best case production

of T4 S4 concrete pavements) and 38 % for composite pavements (in comparison to Non-renewable CED results of standard and best case production of T6 S3 composite pavements).

In Chapter 5 (Paper III) the environmental analysis of all processes needed to construct and maintain the representative road pavements is described with a focus on a detailed evaluation of material transport, pavement construction and deconstruction processes, as well as upgrading processes of reclaimed material to reusable recycled material. Results are expressed in terms of Climate Change, non-renewable CED and Ecological Scarcity for a full new construction and a full replacement of the analyzed pavement types.

The results in Chapter 5 show the great influence of the material production processes on the LCA results for the complete new construction (on average 90 % of the total impact of all new construction processes of the three pavement types) and the total replacement (on average 75 % of the total impact of all processes needed to fully replace the three pavement types) of all pavement types. The influence of the material transport to the building site with an average transportation distance of 25 km was determined to be 9 % of the total impact of all new construction processes (on average for all three indicators) and 8 % of all processes needed for a full replacement of all pavement types (on average for all three indicators). The impact of construction and deconstruction processes can be described as insignificant with an average influence of 1 % of the impact of the complete new construction and the full replacement of the three pavement types. The "upgrading" process of reclaimed hydraulically bound materials (concrete and hydraulically bound foundation layers) has an average impact of 10 % of the impact of the full replacement of concrete or composite pavements, but also of asphalt pavements containing a hydraulically bound subbase (with regard to all three indicators). Bituminous bound materials are already upgraded to reusable asphalt granulate by the mill cutter applied for the deconstruction process.

In Chapter 6 (Paper IV) the stepwise evaluation of the road pavements is finalized by a combined Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis study investigating the representative pavements over the chosen analysis periods applying the different maintenance strategies. This overall analysis assesses the pavements regarding the whole variety of environmental indicators mentioned before. Results demonstrate the influence of all analyzed processes and maintenance strategies on the overall environmental and economic results of the assessed pavements.

The results in Chapter 6 show reduction potentials given by the material production processes (comparison of standard and best case production) occurring over the different analysis periods of up to 42 % (Non-renewable CED) for asphalt, 39 % (Non-renewable CED) for concrete and 29 % (GWP) for composite pavements.

Regarding the application of different maintenance strategies (variant 1, 2 and 3) reduction potentials of up to 21 % (Non-renewable CED – comparison of variant 1 and variant 3) for asphalt pavements, of up to 31 % for concrete pavements (GWP – comparison of variant 1 and variant 3) and of up to 30 % for composite pavements (GWP – comparison of variant 1 and variant 3) were determined.

Over 75 years, overall reduction potentials (a combination of optimized production processes and longer service life) of up to 51 % (Non-renewable CED) for asphalt, 52 % (GWP) for concrete and 48 % (GWP) for composite pavements were identified.

The influence of environmental potentials offered by material production processes is not reflected in the economic results, because typically applied positions of construction tenders in Switzerland do not specify recycling and production characteristics for the different materials.

The reduction potentials for the economic results given by longer service lives, i.e. the optimized (variant 2) and the aspired maintenance strategies (variant 3), were determined to be up to 22 % for concrete pavements, up to 23 % for composite pavements and up to 15 % for asphalt pavements.

The thesis is brought to a close in Chapter 7, which summarizes and discusses the results and the findings of the Chapters 3 to 6.

The material production processes and the applied maintenance strategy turned out to be the most influential factors on the results of the overall LCAs (from-cradle-to-grave). Furthermore, it was demonstrated that none of the analyzed pavement types (asphalt, concrete, and composite) offers the best results regarding all analyzed environmental indicators.

It was also stated that the positive influence of longer service lives on the environmental and economic results does not signify that road owners should wait as long as possible to perform maintenance interventions. The results of this dissertation should encourage road owners to utilize materials with reduced environmental impacts and technical advantages, which under given conditions (traffic load, budget, geographic and climatic influences, etc.) guarantee optimum service life for the different layers of the road pavements.

Based on the discussions and conclusions, recommendations for future research and investigation were expressed, such as a focus on the environmental performance of road materials and their production processes, as well as the implementation of the Life Cycle Assessment methodology into pavement management systems.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Bedeutung einer nachhaltigen Entwicklung mit dem Ziel, eine angemessene Lebensqualität für die kommenden Generationen zu garantieren, wurde in den letzten Jahren durch die Tatsache unterstrichen, dass mehrere Nationen, Gesellschaften aber auch Wirtschaftssektoren in verschiedenen internationalen Vereinbarungen und Verträgen zugestanden, ihre negativen Umweltwirkungen zu reduzieren und Lebens- und Arbeitsbedingungen zu verbessern.

Um die Strasseninfrastruktur in das Konzept einer nachhaltigen Entwicklung zu integrieren, sollten Infrastruktureigentümer zusätzlich zu ihren wirtschaftlich basierten Bau- und Unterhaltskonzepten auch ökologische und soziale Aspekte berücksichtigen.

In dieser Dissertation werden für die Schweiz repräsentative Asphalt-, Beton- und Kompositstrassenoberbauten über ausgewählte Zeiträume hinsichtlich der Umweltwirkungen ihrer verschiedenen Lebenszyklusphasen und den Auswirkungen reduzierter Umweltwirkungen auf die Lebenszykluskosten analysiert.

Die Dissertation wurde von einer Begleitgruppe bestehend aus 14 Experten aus allen Sparten des Schweizer Strasseninfrastrukturbereichs (Bundesämter, kantonale Tiefbauämter, Auftragnehmervverbände, Ingenieurbüros, Bauunternehmen, Materialproduzenten und Forschungsinstitutionen) unterstützt. In Zusammenarbeit mit dieser Expertengruppe wurden die detaillierten Ziele und der Untersuchungsrahmen dieser Studie festgelegt.

Es wurde beschlossen, sich auf Strassenaufbauten für National- und Kantonsstrassen zu konzentrieren und Prozesse der Nutzungsphase der Strassenaufbauten (Fahrzeugbetrieb, Beleuchtung, Reinigung etc.) nicht in die Studie zu involvieren, d.h. diese Prozesse liegen ausserhalb der Systemgrenzen dieser Studie. Damit wurde der Fokus auf die Ermittlung der ökologischen Potentiale und deren ökonomische Auswirkungen von Strassenneubau- und die über den Analysezeitraum auftretenden Strassenerhaltungsprozesse gelegt.

Aufgrund der Tatsache, dass Strassen regelmässig erhalten werden, um einen angemessenen „Level of Service“ für den Strassenbenutzer zu gewährleisten, ist eine mittlere Lebensdauer der verschiedenen Straßenkonstruktionen schwierig zu definieren. Deshalb wurden die Strassenoberbauten über drei hypothetische Analysezeiträume (25, 50 und 75 Jahre), welche nicht mit der realen Lebensdauer gleichzusetzen sind, untersucht. Für jeden der drei Strassenoberbautypen (Asphalt, Beton, Komposit) wurden drei verschiedene Erhaltungsstrategien definiert und die Auswirkungen dieser über die drei Analysezeiträume analysiert.

Zur Analyse der Strassenoberbauten wurden die Methodik der Ökobilanz nach ISO 14040 und die Methodik der Lebenszykluskostenrechnung nach ISO 15686-5, welche ein Produkt hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen und Kosten über ihren ganzen Lebenszyklus hinweg analysieren, verwendet. Die Ergebnisse der Ökobilanz werden durch mehrere ökologische Wirkungsindikatoren ausgedrückt. Diese sind der Klimawandel-Indikator (Global Warming

Potential – GWP), der Kumulierte Energieaufwand (KEA), der Indikator der ökologischen Knappheit, die ReCiPe Midpoint (MP) und Endpoint (EP) Indikatoren und der Kumulierte Exergieaufwand (KExA). Um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse der Ökobilanz zu bestimmen, wurden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt.

Diese Doktorarbeit ist als kumulative Dissertation angelegt und gliedert sich in sieben Hauptkapitel. Kapitel 1 gibt eine kurze Einleitung hinsichtlich der *Problemstellung*, des *Ziels*, des *Standes der Forschung*, der *Forschungsfrage*, der *Forschungsmethodik* sowie der *Relevanz* und der *Durchführbarkeit der Studie*. Kapitel 2 beinhaltet eine Beschreibung der *Strasseninfrastruktur in der Schweiz*, des *Konzepts der Nachhaltigkeit*, des *Standes der Dinge* hinsichtlich *nachhaltiger (Strassen-)Infrastruktur*, der *quantitativen Forschungsmethodik* sowie aller angewandten *Methoden* und *ökologischen Indikatoren* inklusive einer *kritischen Betrachtung* dieser Methoden und Indikatoren.

Die vier darauf folgenden Kapitel werden von fünf Fachpublikationen gebildet (Paper I bis IV bzw. Kapitel 3 bis 6). Die beiden ersten Publikationen wurden bereits in ISI-geführten Fachzeitschriften veröffentlicht (*Paper I: Journal of Materials in Civil Engineering – Life Cycle Assessment of the Production of Swiss Road Materials*, *Paper II: Journal of Management in Engineering – Hidden Ecological Potentials in the Production of Materials for Swiss Road Pavements*). Die beiden letzten Publikationen wurden entweder bei ISI-geführten Fachzeitschriften eingereicht (*Paper III: Structure and Infrastructure Engineering – Environmental Analysis of New Construction and Maintenance Processes of Road Pavements in Switzerland*) bzw. stehen unmittelbar vor der Einreichung bei einer ISI-geführten Fachzeitschrift (*Paper IV: Environmental Science & Technology – Environmental and Economic Analysis of Representative Swiss Road Pavements*).

Der Inhalt der Publikationen (Paper I bis IV) richtet sich nach dem zeitlichen Auftreten der verschiedenen Lebenszyklusphasen, d.h. beginnend mit der Materialproduktion werden die Lebenszyklusphasen Schritt für Schritt bis hin zur Gesamtanalyse über die verschiedenen Analysezeiträume analysiert (Abb. 1). Dabei wird in den ersten drei Publikationen (Paper I bis III) der Fokus auf die Ökobilanz der Lebenszyklusphasen (Materialproduktion, Strassenneubau, Strassenerhaltung bzw. verschiedene Ökobilanz-Modelle) gelegt, mit Bezug auf den Klimawandel-Indikator, den nicht-erneuerbaren Kumulierten Energieaufwand und den Indikator der Ökologischen Knappheit. In Paper IV wird die „step-by-step“ Analyse der Strassenoberbauten durch eine kombinierte Ökobilanz- und Lebenszykluskostenrechnung abgeschlossen, welche die Strassenkonstruktionen über die drei Analysezeiträume hinweg unter Berücksichtigung der drei Erhaltungsstrategien untersucht. Die Ergebnisse der Ökobilanz werden dabei für den Klimawandel-Indikator (Global Warming Potential – GWP), den Kumulierten Energieaufwand (KEA), den Indikator der ökologischen Knappheit, die ReCiPe Midpoint (MP) und Endpoint (EP) Indikatoren und den Kumulierten Exergieaufwand (KExA) ermittelt.

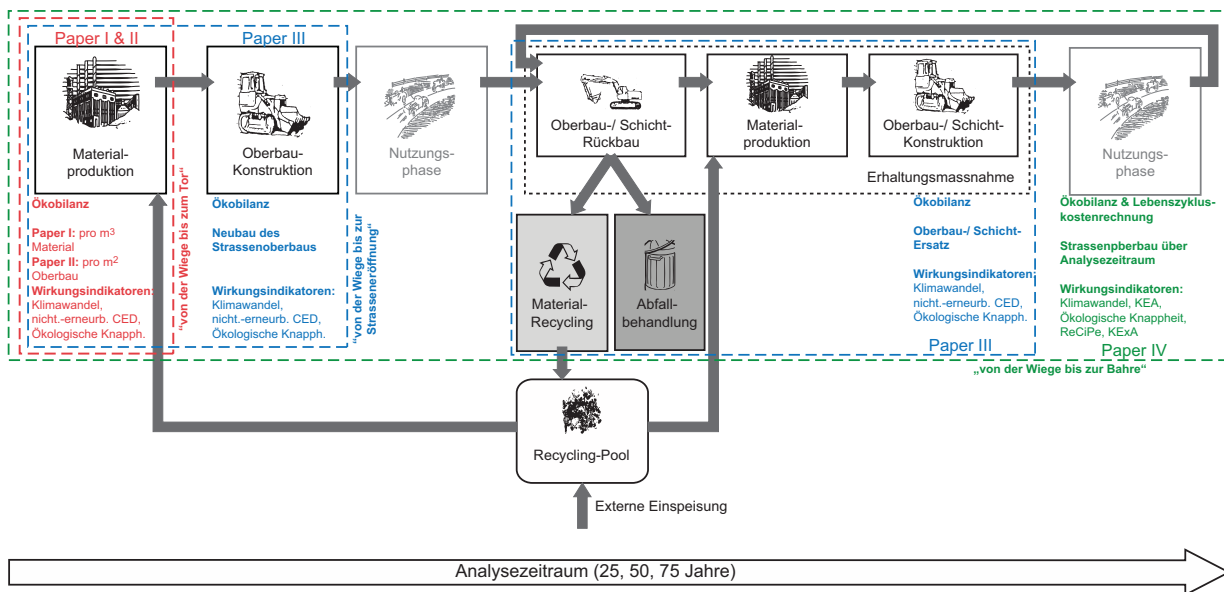


Abb. 1: Schrittweise Analyse der Lebenszyklusphasen

Kapitel 3 (Paper I) bestimmt für jedes zu analysierende Strassenbaumaterial das Optimierungspotential der Materialproduktionsprozesse hinsichtlich des Klimawandel-Indikators, des nicht-erneuerbaren Kumulierten Energieaufwands und der Ökologischen Knappheit mit Hilfe von Ökobilanzen, welche die Materialien „von der Wiege bis zum Tor“, d.h. von der Rohstoffgewinnung bis zu dem Moment an dem das fertige Material das Werk verlässt, analysieren.

Die Ergebnisse in Kapitel 3 zeigen für Materialproduktionsprozesse von einem Kubikmeter Strassenbaumaterial Reduktionspotentiale hinsichtlich der angewandten ökologischen Wirkungsindikatoren von bis zu 81 % für Asphaltmischgut, 38 % für Betonmischungen und 69 % für Foundationsschichtmaterialien.

Kapitel 4 (Paper II) kombiniert die zuvor ermittelten Resultate und Potentiale der einzelnen Materialproduktionsprozesse gemäss des Aufbaus der repräsentativen Strassenoberbauten für National- und Kantonsstrassen.

Die Ergebnisse in Kapitel 4 zeigen Reduktionspotentiale im Hinblick auf die verwendeten ökologischen Wirkungsindikatoren von bis zu 59 % für Asphaltoberbauten, 54 % für Betonoberbauten und 38 % für Kompositoberbauten.

Kapitel 5 (Paper III) beinhaltet die Ökobilanz aller Prozesse, die notwendig sind, um eine Strasse neu zu bauen („von der Wiege bis zur Strasseneröffnung“) bzw. zu erhalten mit einem Fokus auf eine detaillierte Auswertung von Materialtransporten, Konstruktions- und Rückbauprozessen sowie „Upgrading“-Prozessen von rückgebauten Materialien, damit diese als Recycling-Material in neuen Materialproduktionsprozessen wiederverwendet werden können. Die Ergebnisse beziehen sich auf den Klimawandel-Indikator, den nicht-erneuerbaren Kumulierten Energieaufwand sowie den Indikator für Ökologische Knappheit und werden für die vollständige Neukonstruktion bzw. einen Totalersatz der analysierten Strassenaufbauten ausgedrückt.

Die Ergebnisse in Kapitel 5 zeigen den hohen Einfluss der Materialproduktionsprozesse auf die Ökobilanzergebnisse von allen Oberbautypen für die vollständige Neukonstruktion (durchschnittlich 90 % für alle drei Indikatoren) und den Totalersatz (durchschnittlich 75 % für alle drei Indikatoren). Der Einfluss des Materialtransports zur Baustelle wurde für eine durchschnittliche Transportdistanz von 25 km für die Neukonstruktion mit 9 % und für den Totalersatz mit 8 % bestimmt. Der Einfluss der Konstruktions- und Rückbauprozesse kann mit durchschnittlich 1 % als unwesentlich bezeichnet werden. Der „Upgrading“-Prozess von rückgebauten hydraulisch gebundenen Materialien (Beton und hydraulisch gebundene Foundationsschichten) hat beim Totalersatz von Oberbauten einen durchschnittlichen Einfluss von 10 %. Bituminös gebundene Materialien werden schon beim Rückbauprozess durch die Asphaltfräse zu wiederverwendbarem Asphaltgranulat „upgegradet“.

In Kapitel 6 (Publikation IV) wird die schrittweise Analyse der Strassenkonstruktionen durch eine kombinierte Ökobilanz- und Lebenszykluskostenrechnung abgeschlossen, welche die Strassenoberbauten über die drei verschiedenen Analysezeiträume hinweg unter Berücksichtigung der drei Erhaltungsstrategien analysiert („von der Wiege bis zur Bahre“). Diese Gesamtanalyse untersucht die Strassenaufbauten hinsichtlich der gesamten zuvor angeführten Wirkungsindikatoren. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss aller untersuchten Prozesse und Erhaltungsstrategien auf die ökologischen und ökonomischen Gesamtergebnisse der beurteilten Strassenkonstruktionen.

Die Ergebnisse in Kapitel 6 zeigen Reduktionspotentiale für sämtliche über den Analysezeitraum auftretenden Materialproduktionsprozesse (Vergleich von Standard- und Best-Case-Produktion) von bis zu 42 % (nicht-erneuerbarer KEA) für Asphalt-, 39 % (bei nicht-erneuerbarer KEA) für Beton- und 29 % (GWP) für Kompositoberbauten.

Hinsichtlich der Anwendung der verschiedenen Erhaltungsstrategien (Variante 1, 2 und 3) wurden Reduktionspotentiale von bis zu 21 % (nicht-erneuerbarer KEA – Vergleich der Variante 1 und Variante 3) für Asphaltoberbauten, von bis zu 31 % für Betonoberbauten (GWP – Vergleich der Variante 1 und Variante 3) und von bis zu 30 % für Kompositoberbauten (GWP – Vergleich der Variante 1 und Variante 3) ermittelt.

Insgesamt wurden über einen Analysezeitraum von 75 Jahren Reduktionspotentiale (Kombination von optimierten Produktionsprozessen und längeren Lebensdauern) von bis zu 51 % (nicht-erneuerbarer KEA) für Asphalt, 52 % (GWP) für Beton- und 48 % (GWP) für Kompositoberbauten identifiziert.

Die Anwendung der ökologischen Potenziale innerhalb der Materialproduktionsprozesse konnten nicht durch die wirtschaftlichen Ergebnisse widerspiegelt werden, weil die in der Regel angewendeten Positionen für Bauausschreibungen in der Schweiz keine Spezifizierungen hinsichtlich Recycling und Produktionsmerkmalen für die verschiedenen Materialien zulassen.

Auch für die Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung bewirken optimierte Erhaltungsstrategien (Variante 2 und 3) bzw. Lebensdauern der analysierten Oberbautypen

entsprechende Reduktionspotentiale (bis zu 15 % für Asphalt-, 22 % für Beton- und 23 % für Komposit-Oberbauten).

Die Arbeit wird mit Kapitel 7 abgeschlossen, welches die Ergebnisse aus den Kapiteln 3 bis 6 zusammenfasst und diskutiert. Hinsichtlich der Ergebnisse der Gesamt-Ökobilanz („von der Wiege bis zur Bahre“) stellten sich die Materialproduktionsprozesse und die Erhaltungsstrategien als einflussreichste Faktoren heraus. Es wurde aber auch festgestellt, dass für alle analysierten Ökobilanz-Modelle keiner der analysierten Strassenaufbautypen (Asphalt, Beton, Komposit) die besten Ergebnisse für alle verwendeten Wirkungsindikatoren aufweist.

In Kapitel 7 wird aber auch angemerkt, dass der positive Einfluss von längeren Lebensdauern der Oberbauschichten auf die ökologischen und ökonomischen Ergebnisse nicht bedeuten soll, dass Strassenbesitzer so lange wie möglich mit notwendigen Wartungsarbeiten warten sollen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollten vielmehr Besitzer von Strasseninfrastrukturen dazu bewegen, auf Materialien mit reduzierten Umweltauswirkungen und technischen Vorteilen zu setzen, welche unter den gegebenen Bedingungen (Verkehrslast, Budget, geografische und klimatische Einflüsse etc.) eine optimale Lebensdauer für die einzelnen Schichten der Strassenoberbauten gewährleisten.

Basierend auf den Erkenntnissen und den Schlussfolgerungen der Studie wurden Empfehlungen für zukünftige Forschungsvorhaben zum Ausdruck gebracht, wie z.B. ein Fokus auf die Umweltfreundlichkeit von Strassenmaterialien und deren Produktionsprozesse sowie die Implementierung der Methodik der Ökobilanz in ein Pavement Management System.