

Diploma Thesis

Identification of the global warming potential on asphalt road construction sites and evaluation of savings potentials

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Feststellung des Treibhauspotentials auf Asphaltstraßenbaustellen und Evaluierung von Einsparpotentialen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Victor Stabrawa, BBSc

Matr.Nr.: 01025199

unter der Anleitung von

Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald Goger**

Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Maximilian Weigert, BSc**

Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft
Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/234-1, A-1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2022



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die Herstellung von Asphaltstraßen sowie die Sanierung dieser ist aufgrund deren wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Relevanz unvermeidbar. Auch die Treibhausgasemissionen, welche im Rahmen der Materialherstellung als auch des Einbaus des Mischguts entstehen, können nach aktuellem Stand der Technik nicht vollständig verhindert werden. Jedoch hat sich aufgrund der gestiegenen Aufmerksamkeit für das Thema Nachhaltigkeit und Klimawandel in der Gesellschaft sowie des Beschlusses entsprechender rechtlicher Bestimmungen auch im Straßenbau eine Diskussion über die Eindämmung der Treibhausgase entwickelt.

Aufgrund dieses gestiegenen Interesses wurde vor allem in den letzten Jahren Forschung auf dem Gebiet der Emissionen im Asphaltstraßenbau betrieben. Lebenszyklusanalysen, die solche Straßenbauprojekte betrachten, helfen sich jedoch oftmals nur mit generalisierten Verbrauchswerten und Abschätzungen, welche Unsicherheiten in den Ergebnissen erzeugen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Einsparpotentiale für Treibhausgas-Emissionen für die Sanierung von Asphaltstraßen festzustellen. Der Fokus auf die Instandsetzung ergibt sich durch das sehr weit fortgeschrittene Straßennetz in Österreich und der damit verbundenen, geringen Notwendigkeit für Neubauten. Hierfür werden aufbauend auf einer umfangreichen Literaturrecherche und der Erhebung von Emissionsdaten einer Musterbaustelle (A09 Wald-Mautern) Analysen für die Einsparung dieser durchgeführt. Die Betrachtung beschränkt sich auf die Herstellungsphase des Mischguts und den anschließenden Einbau des Asphalts inklusive der notwendigen Transporte. Die Potentiale werden in organisatorische Maßnahmen, Anpassungen während der Mischgutproduktion sowie dem Wechsel auf alternative Antriebe und Kraftstoffe bei Transportfahrzeugen bzw. Straßenbaumaschinen unterteilt.

Die durchgeführte Analyse zeigt, dass vor allem bei der Mischgutproduktion der größte Hebel in Sachen Treibhausgasreduktion vorhanden ist. Für eine Autobahnbaustelle, wie diese in der gegenständlichen Arbeit betrachtet wurde, ergibt sich durch Optimierung der Asphaltherstellung ein Reduktionspotential von **9,50 %** bezogen auf die gesamten Emissionen aus Herstellung und Einbau. Die Verwendung alternativer Antriebe bzw. Rohstoffe für Transportfahrzeuge (vor allem Sattelzüge) sowie Straßenbaumaschinen ist nach dem aktuellen Stand der Technik nicht sinnvoll.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

The production of asphalt roads and their refurbishment is, due to their economic and social importance, unavoidable. The greenhouse gases, which are emitted during the asphalt production and the following asphalt works on the construction site are currently inevitable using the current state of the art technologies. As the awareness in society concerning the topics sustainability and climate change has risen lately and relevant legislation has passed, a discussion among professionals in road construction on how greenhouse gas reduction has started.

Caused by the growth of interest in this globally popular topic, especially in the last few years, there was more research carried out on asphalt road works and their greenhouse gas emissions. Results in form of life-cycle-analysis' oftentimes use generalised fuel-consumption values and estimations, which create relevant uncertainties regarding the results.

The aim of this thesis is to determine potentials for the reduction of greenhouse gas emissions concerning the refurbishment of asphalt roads. The focus on the restoration is caused by the mostly finished road network. Therefore, there is very little demand for new road construction in Austria. Based on an extensive literature review and the collection of emission data at a highway construction site (A9 Wald-Mautern), analysis for potential greenhouse gas reduction was carried out. Hereby, the focus was put on the production of mixed material and the following asphalt laying including all the necessary transports. The potentials are divided into organisational measures, changes within the mixing plant and the replacement of the drive systems as well as the fuel in trucks and machines.

The carried out analysis shows that especially during the processes at the mixing plant, high potential exists to reduce the emission of greenhouse gases. If all the proposed changes for the asphalt production were implemented the potential emission saving may add up to **9,50 %** at a highway construction site as shown by this study. The current usage of new drive systems or alternative fuels for trucks or road building machines are not reasonable, based on the current state of the art.

Abkürzungen

AC Asphalt Concrete

AMA Asphaltmischanlage

BTL Biomass To Liquid

CNG Compressed Natural Gas

CO₂-Eq CO₂-Äquivalente

CTL Coal To Liquid

DME Dimethylether

FAME Fatty Acid Methyl Ester

FDVK Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle

Fzkm Fahrzeugkilometer

GTL Gas To Liquid

GWP Greenhouse Warming Potential

HMA Hot Mix Asphalt

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

LCA Life-Cycle-Analysis

LCI Life-Cycle-Inventory

LCIA Life-Cycle-Impact-Assessment

LNG Liquefied Natural Gas

LPG Liquefied Petroleum Gas

Pkm Personenkilometer

PmB Polymer modifiziertes Bitumen

RAP Reclaimed Asphalt Pavement

RAS Reclaimed Asphalt Shingles

RME Rapsmethylester

SMA Splittmastixasphalt

THG Treibhausgas

Tkm Tonnenkilometer

WMA Warm Mix Asphalt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	9
1.2	Forschungsfrage und Zielsetzung	10
1.3	Methodik	11
1.4	Aufbau	11
2	Grundlagen	12
2.1	Klimawandel	12
2.1.1	Treibhauseffekt	12
2.1.2	Internationale Klimaverträge	14
2.1.3	Europäische gesetzliche Rahmenbedingungen	15
2.1.4	Normative Grundlagen	16
2.2	Straßenbau	19
2.2.1	Geschichtliche Entwicklung	19
2.2.2	Straßenaufbau	21
2.2.3	Prozesskette	25
2.3	Einsparpotentiale	38
2.3.1	Organisatorische Maßnahmen	38
2.3.2	Mischgutherstellung	39
2.3.3	Alternative Kraftstoffe/Antriebe	44
2.3.4	Organisation der Mischgutherstellung	49
3	Prozesse und Treibhausgasemissionen des Musterprojekts A09 Wald-Mautern	51
3.1	Projektbeschreibung	51
3.2	Analysegrundlagen	54
3.2.1	Systemabgrenzung der Lebenszyklusanalyse	54
3.2.2	Emissionsfaktoren	54
3.2.3	Vorberechnungen Geometrie	55
3.3	Herstellungsphase (A1-A3)	57
3.3.1	Asphalt	57
3.3.2	Bitumenemulsion	60
3.3.3	Ergebnisse	60
3.4	Errichtungsphase (A4-A5)	61
3.4.1	Transport (A4)	61
3.4.2	Errichtung/Einbau (A5)	64
3.5	Ergebnisse	67
3.5.1	Emissionsübersicht	67
3.5.2	Emissionsverhältnisse	68
3.5.3	Emissionsfaktoren	70
3.6	Einsparpotentiale	70
3.6.1	Organisatorische Maßnahmen	71
3.6.2	Mischgutherstellung	73

3.6.3	Alternative Antriebe/Kraftstoffe	80
4	Diskussion der Ergebnisse	82
4.1	Datengrundlage	82
4.1.1	Herstellungsphase	82
4.1.2	Errichtungsphase	82
4.2	Emissionsverhältnisse	84
4.3	Emissionsfaktoren	84
4.4	Einsparpotentiale	84
4.4.1	Organisatorische Maßnahmen	85
4.4.2	Mischgutherstellung	85
4.4.3	Alternative Antriebe/Kraftstoffe	86
4.4.4	Übersicht der Einsparpotentiale	87
5	Conclusio und Ausblick	88
5.1	Beantwortung der Forschungsfragen	88
5.2	Ausblick	91

Kapitel 1

Einleitung

Im Rahmen des Asphaltstraßenbaus entstehen, wie dies im ausführenden Bauwesen meistens der Fall ist, Treibhausgasemissionen, welche einen negativen Beitrag zum Klimawandel leisten. Dieser und dessen Folgen (Waldbrände, Wetterextremereignisse, Schmelzen der Gletscher, etc.) sind allgegenwärtig und sollen bestmöglich verhindert werden. Um den Folgen einer weiteren Erderwärmung vorzubeugen, sind Gesetzgeber auf nationaler und internationaler Ebene, Unternehmen als auch Einzelpersonen gefragt Schritte zu setzen. Es gilt in allen Bereichen des Lebens eine Reduktion des Energieverbrauches, und folglich, eine Reduktion von Treibhausgasemissionen zu erreichen. Jedoch muss für die Beurteilung von Maßnahmen zur Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen zuerst der Status-Quo festgestellt werden. Die vorliegende Arbeit betrachtet hierfür eine Musterbaustelle. Es werden Emissionen und Emittenten im Rahmen des Rohstoffabbaus, der Mischgutproduktion und der Herstellung der Asphaltstraße bestimmt. Diese Datenbasis dient der Feststellung der Hauptverursacher und der Entwicklung von entsprechenden Potentialen zur Einsparung von Treibhausgasemissionen.

1.1 Motivation

Bei dem Asphaltstraßenbau handelt es sich um eine Bauweise, welche ihren Ursprung im römischen Reich hat. Ein großer Teil der modernen Infrastruktur beruht auf Asphaltstraßen und ermöglicht eine beinahe uneingeschränkte Mobilität. In weniger entwickelten Ländern müssen solche Fahrbahnen erst neu gebaut werden; in Industriestaaten, wie Österreich einer ist, steht vor allem die Sanierung der bereits existierenden Asphaltstraßen im Vordergrund. Da jedoch der Neubau sowie die Instandhaltung einen bedeutenden Anteil an Treibhausgasemissionen hervorruft, ergibt sich für beide eine nicht zu vernachlässigende Relevanz im Kampf gegen den Klimawandel.

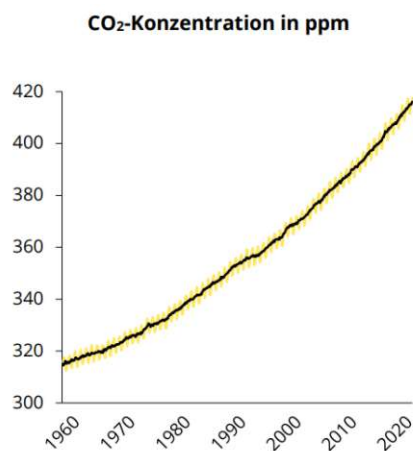


Abb. 1.1: Entwicklung der CO₂ Konzentration in der Erdatmosphäre [1, S. 20]

Es ist eindeutig erwiesen, dass menschlicher Einfluss im Rahmen des Klimawandels zu einer Erwärmung der Atmosphäre, der Ozeane und des Festlandes geführt hat. Dabei ist es sehr wahrscheinlich, dass vor allem Treibhausgase hauptverantwortlich für die Erwärmung der Troposphäre seit 1979 sind [2, S. 4]. Diese, vor allem anthropogen ausgestoßenen Emissionen, zeigen sich in der seit dem Beginn der Industrialisierung stark gestiegenen CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre. Dies wird als Folge der Verbrennung sehr großer fossiler Energieträger in einem erdgeschichtlich sehr kurzen Zeitraum gesehen. Grafisch ersichtlich ist dies in Abb. 1.1, wobei die CO₂-Konzentration hier auf Jahre bezogen in parts-per-million (ppm) dargestellt ist [1, S. 20-21].

Für Unternehmen wie PORR Bau Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH), einem Partner in der Entwicklung dieser Diplomarbeit, muss sowohl der gesellschaftliche, als auch der monetäre Faktor von Bedeutung sein. Die Relevanz in der Gesellschaft ergibt sich aus der Vorbildwirkung sowie der medialen Präsenz des Themas Klimawandel und des damit verbundenen positiven Images bei Handlungen um zur Eindämmung dieses beizutragen. Monetär sind hierbei die stets steigenden Energiepreise zu erwähnen. Vor allem die aktuellen Krisen, wobei vor allem der Covid-19-Virus und die damit verbundene Pandemie sowie bewaffnete Konflikte in Osteuropa mitverantwortlich sind, haben die Rohstoffpreise in ungeahnte Höhen schießen lassen. Mit dem Entschluss zur Reduktion von Treibhausgasemissionen können hiermit im besten Fall zwei Fliegen mit einer Klappe geschlagen werden. Natürlich wäre dies der Optimalfall, denn THG-Einsparungsmaßnahmen sind nicht immer auch wirtschaftlich sinnvoll.

1.2 Forschungsfrage und Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist, neben der Vermittlung eines historischen Überblicks und der Betrachtung des aktuellen Standes der Technik im Asphaltstraßenbau, die Beantwortung von der zukunftssträchtigen Forschungsfrage:

„Welche Einsparpotentiale zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ergeben sich in der Sanierung von Asphaltstraßen und wie sind diese zu bewerten?“

Um diese Frage umfassend zu beantworten wurden folgende Unterfragen definiert:

1. Welche rechtlichen und politischen Implikationen existieren auf nationaler und internationaler Ebene im Zusammenhang mit dem Ausstoß von Treibhausgasen?
2. Wie ist der Ablauf des Sanierungsprozesses einer Asphaltstraße nach dem aktuellen Stand der Technik definiert?
3. Wie verteilen sich die Treibhausgasemissionen im Asphaltstraßenbau und welche Tätigkeiten sind vor allem für diese verantwortlich? Ist eine Abschätzung möglich?
4. Wie kann der Ausstoß von Treibhausgasen maßgebend reduziert werden?

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich vor allem auf die Erfassung der entstandenen Treibhausgasemissionen auf einer Asphaltstraßenbaustelle. Die Systemgrenzen der Betrachtung beschränken sich auf die Produktion des Asphalttes unter Berücksichtigung der vorgelagerten Prozesse, wie Rohstoffabbau und -transport, sowie der Herstellungsphase der Fahrbahn. Letztere beinhaltet Transporte von Mischgut und Fräsgut sowie den Asphalteinbau auf der Baustelle. Aus der Bestimmung der einzelnen Emittenten sowie deren Gewicht auf den Gesamtausstoß sollen Einsparpotentiale abgeleitet werden.

1.3 Methodik

Zur umfassenden Beantwortung der Forschungsfrage bedarf es vorab der Durchführung einer ausführlichen Literaturrecherche. Es wird unter anderem der Klimawandel sowie der dafür verantwortliche Ablauf des Treibhauseffektes und der darauf bezogenen aktuellen gesetzlichen und normativen Rahmenbedingungen behandelt. Um den Ablauf des Asphaltstraßenbaus zu verstehen, wird die gesamte Prozesskette samt der dazugehörigen Maschinenteknik durchleuchtet. Dadurch ist die Basis zur anschließenden Feststellung der Einsparpotentiale von Treibhausgasen gegeben.

Zur Bewertung des Reduktionspotentials wird ein Musterprojekt in Kooperation mit PORR Bau Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH) betrachtet. Es handelt sich hierbei um das Autobahnprojekt „A9 Wald-Mautern“. Zur Feststellung von etwaigen Potentialen auf dieser Baustelle bedarf es zuallererst einer entsprechenden Datenbasis. Die Erhebung der Daten erfolgt hierfür teilweise durch den Autor und teilweise durch Unterlagen der beteiligten Unternehmen. Auf Basis dieser wird eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Hierfür werden die Daten entsprechend aufbereitet und in einer Sachbilanz dargestellt. In der darauffolgend durchgeführten Wirkungsbilanz werden die Treibhausgasemissionen als CO₂-Äquivalente bestimmt. Schlussendlich wird eine Bilanzbewertung durchgeführt, welche insbesondere Reduktionspotentiale feststellt. Abschließend erfolgt eine Bewertung der Ergebnisse.

1.4 Aufbau

Dem einleitenden **Kapitel 1** folgt das **Kapitel 2**, welches das Basiswissen rund um den Klimawandel, den Asphaltstraßeneinbau und die damit verbundenen Treibhausgas-Einsparpotentiale ausführlich aufbereitet. Zuerst werden klimatische Grundlagen, wie der Treibhauseffekt und den damit verbundenen gesetzlichen und normativen Rahmenbedingungen behandelt. Letzteres berücksichtigt ebenfalls die Feststellung und einheitliche Darstellung des Treibhauspotentials mittels Lebenszyklusanalyse. Die Grundlagen des Straßenbaus werden mit einem geschichtlichen Abriss eingeleitet. Weiterführend wird die Prozesskette nach dem aktuellen Stand der Technik erläutert. Sämtliche Geräte und Zusammenhänge werden umfassend erklärt und der Schichtaufbau einer modernen Asphaltstraße wird beschrieben. Im letzten Teilabschnitt werden die möglichen Einsparpotentiale erläutert.

Das anschließende **Kapitel 3** enthält die gesamte Lebenszyklusanalyse des Bauvorhabens zur Sanierung der A9 für den Abschnitt Wald-Mautern. Hierfür wird anfänglich eine Projektbeschreibung gegeben und Analysegrundlagen definiert. Danach wird für die relevanten Kategorien der ÖNORM EN 15978:2011 die Vorgehensweise zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen erläutert und entsprechende Ergebnisse präsentiert. Auf Grundlage dieser Daten werden Einsparpotentiale festgestellt und so weit sinnvoll bzw. möglich quantitativ bewertet.

In **Kapitel 4** wird zuerst die Datengrundlage zusammengefasst und dessen Ungenauigkeiten bzw. die Schwächen der verwendeten Tools, als auch der Annahmen aufgezeigt. Weiterführend werden die Ergebnisse diskutiert.

Schlussendlich wird in **Kapitel 5** die Forschungsfrage mittels der Erarbeitung der Unterfragen beantwortet. Zusätzlich werden ein Ausblick und Hinweise für zukünftige Forschungstätigkeiten gegeben.

Kapitel 2

Grundlagen

Das folgende Kapitel soll ein Grundverständnis für die Materie bieten, und gliedert sich demzufolge in die drei relevanten Bestandteile: Klimawandel, Straßenbau und Einsparpotentiale. Der letzte Abschnitt führt die ersten zwei Kapitel zusammen, indem mögliche Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen auf Asphaltstraßenbaustellen vorgeschlagen werden.

2.1 Klimawandel

Bereits seit Jahrzehnten wird von der Wissenschaft darauf hingewiesen, dass die Emission von Treibhausgasen zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre führt, und diesbezüglich vor den immensen Folgen gewarnt. Der Weltklimarat IPCC¹, eine Institution der Vereinten Nationen, verfasst seit dessen Gründung regelmäßig Berichte für die politischen Entscheidungsträger. Die Warnungen, welche im Rahmen dieses Berichtes ausgesprochen wurden, blieben zwar nicht folgenlos, jedoch waren die Maßnahmen und Reaktionen der Regierungen bis hierher nicht verhältnismäßig gegenüber der realen Gefahrenlage [3].

2.1.1 Treibhauseffekt

Ohne Treibhausgase und Wasserdampf wäre die Temperatur der Erdatmosphäre mit minus 18 °C beziffert. Diese kann sich somit als Isolierschicht, beziehungsweise als schützende Decke, vorgestellt werden. Trifft die kurzwellige Sonnenstrahlung auf die Erde, wird diese als langwellige Wärmestrahlung reflektiert. Die Gase in der Atmosphäre halten diese davon ab in den Weltraum zu entweichen, indem sie diese reflektieren und somit für eine stetige Aufheizung der Atmosphäre sorgen. Deshalb wirken die Gase wie die Scheiben eines Treibhauses, woraus auch der Name Treibhausgas resultiert. Zusätzlich zum Abfangen der langwelligen Wärmestrahlung, wird auch die kurzwellige Solarstrahlung eingefangen und die entsprechende Energie als langwellige Strahlung in alle Richtungen emittiert.

Seit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert werden verstärkt anthropogene Treibhausgase (THG) emittiert. Die relevantesten im Hinblick auf den Treibhauseffekt sind Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Zusätzlich zu erwähnen sind fluorierte Gase (HFKW, FKW, SF₆, NF₃). Hierbei zählt CO₂, aufgrund der emittierten Menge sowie seiner langen Verweildauer in der Atmosphäre, als Wichtigstes. Um die Treibhausgase vergleichbar zu machen, werden diese deshalb in CO₂-Äquivalenten (CO₂-Eq) angegeben.

Die erste Messstation, welche exakte, direkte Messungen der CO₂ Konzentration in der Erdatmosphäre bereits im Jahr 1958 vornahm, ist das Mauna Loa Observatory und befindet sich in Hawaii. Die entsprechenden Aufnahmen sind in einem Diagramm aufgetragen und in Abb. 2.1 ersichtlich. Es sind in dieser Kurve die jahreszeitlichen Schwankungen aufgrund der Vegetation erkennbar, wobei der Trend klar nach oben geht. Seit den 70er Jahren verläuft sie annähernd parallel zur Entwicklung der globalen Mitteltemperatur.

¹Intergovernmental Panel on Climate Change

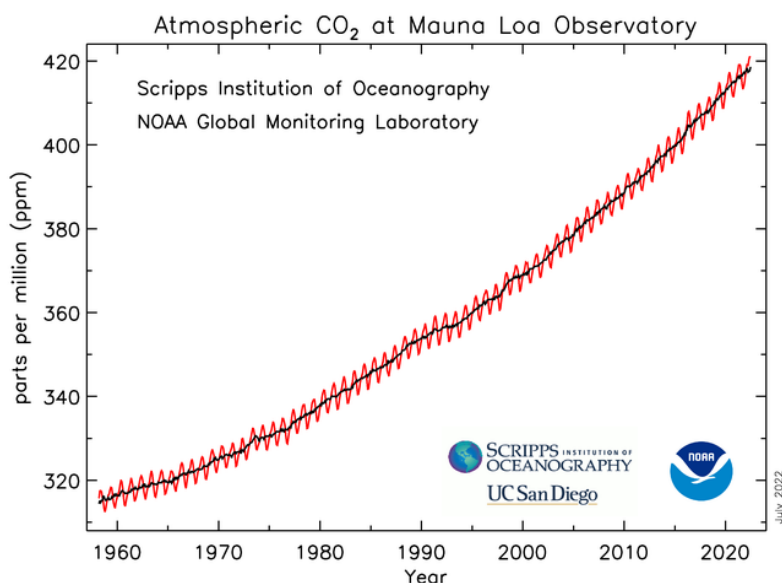


Abb. 2.1: Messungen des atmosphärischen CO₂ an dem Mauna Loa Observatory [4]

Von Interesse ist der Treibhauseffekt und dessen Ursachen für die Weltgemeinschaft aufgrund der globalen und regionalen Folgen. Diese werden in den regelmäßigen Berichten der IPCC behandelt und erläutert. Die Folgen lassen sich in drei Kategorien teilen [5, S. 12-19]:

- **Temperatur:** Als Datengrundlage werden hierbei verschiedene Datenbanken verwendet, welche unterschiedliche Daten, wie Oberflächentemperatur beziehungsweise Temperatur der Meeresoberfläche, bereitstellen. Unabhängig von der Datenquelle ergeben sich jedoch ähnliche Ergebnisse bezüglich des Temperaturtrends. Im globalen Mittel ist von 1901 bis 2012 die Lufttemperatur in ungefähr 1,5 m Höhe um 0,89 K gestiegen. Die regionalen Erwärmungstrends können sich hierbei aufgrund diverser Faktoren stark unterscheiden.
- **Wasserkreislauf:** Aufgrund der steigenden Temperatur erhöht sich ebenfalls die Aufnahmefähigkeit von Wasser in der Luft, wodurch der Wasserdampfgehalt steigt. Im globalen Mittel ist dieser in den Jahren 1973 bis 2012 um 3,5 % gestiegen. Nimmt die Luft eine größere Menge an Wasserdampf auf, kann im Anschluss auch mehr Wasser in Form von Niederschlag abgegeben werden. Deshalb haben Starkregenereignisse, und in dessen Folge auch Überschwemmungen, seit 1950 weltweit zugenommen.

Der Schneefall ist in vielen Gebieten der Nordhalbkugel als Folge von steigenden Wintertemperaturen zurückgegangen. Weitere, durch den Klimawandel herbeigeführte Veränderungen, ergeben sich in der Reduktion der Dauer der Schneebedeckung, der Erhöhung der Evapotranspiration, der Steigerung der Intensität von Trockenperioden, der räumliche Ausdehnung von Dürreereignissen und des Anstiegs des Meeresspiegels im globalen Mittel von 1901 bis 2010 um 19 cm.

- **Permafrost:** Bei einem Viertel der Böden auf der Erde handelt es sich um Permafrostböden. Dieser dauerhafte Frost beschränkt zwar die Durchwurzelheit des Bodens, hat jedoch eine hohe Bedeutung für die Wasserversorgung der Vegetation. Denn die Auftauschicht, welche durch das oberflächliche Schmelzen des Permafrosts im Sommer entsteht, stellt eine wichtige Wasserquelle der Pflanzen dar. Durch die Klimaerwärmung wird dadurch zwar kurzfristig

die Versorgung der Vegetation verbessert, langfristig kommt es jedoch üblicherweise zu einer Verschlechterung der Wasserversorgung. Eine weitere Folge des verstärkten Abtauens des Permafrostes aufgrund der erhöhten Lufttemperatur ist die Freilassung von organischem Kohlenstoff, welcher dort teilweise bereits seit dem Pleistozän gebunden war. Dadurch kommt es wiederum zu einer Verstärkung der THG-Effekts.

2.1.2 Internationale Klimaverträge

Um Nachhaltigkeit und Umweltschutz im Bezug auf den Klimawandel rechtlich zu verankern, wurden in den letzten Jahrzehnten unterschiedliche Verträge beschlossen und Normen erarbeitet, welche in diesem Abschnitt erläutert werden.

2.1.2.1 Das Rahmenübereinkommen über Klimaänderungen

In dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, kurz auch Klimakonvention genannt, sind praktisch alle Länder weltweit als Vertragsparteien vermerkt. Es dient als Grundlage für die Zusammenarbeit der Staaten in Sachen Klimaschutz, und hierbei insbesondere der Sammlung und dem Vergleich von Emissionsdaten. Dabei werden international anerkannte Methoden der Messung von Treibhausgasemissionen, welche durch das IPCC aufgestellt wurden, verwendet. Dies hat eine erhöhte Transparenz und Vergleichbarkeit der Daten zur Folge [6, S. 107].

2.1.2.2 Das Kyoto-Protokoll

Das Rahmenübereinkommen selbst definiert keine Reduktionsziele. Diese befinden sich in einem Zusatz, dem sogenannten Protokoll, welches 1997 in Kyoto abgeschlossen wurde und 2005 in Kraft trat. Daher stammt die Bezeichnung Kyoto-Protokoll. Hierbei verpflichteten sich gewisse Parteien des Rahmenvertrags zu einer Begrenzung der Emissionen. Länder ohne einem Reduktionsziel konnten in Form von Kooperationen am Prozess teilnehmen. Weiterhin wurden Mechanismen etabliert, um einen Handel mit Emissionsrechten und die Anrechnung von emissionsreduzierenden Projekten im Ausland zu gewährleisten. Dadurch wurde das Erreichen der Zielwerte, aufgrund der höheren Flexibilität erleichtert [6, S. 107-124].

Das Kyoto-Protokoll setzte Emissionswerte fest, welche jedes Jahr während eines bestimmten Zeitraums durchschnittlich erreicht werden mussten. Es wurden Emissionen von Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid und die industriellen Gase der Fluorkohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid, auch F-Gase, begrenzt. Hinzu kam im zweiten Verpflichtungszeitraum Stickstofftrifluorid. Jedes Land war rechtlich bindend dazu verpflichtet eine Treibhausgas-Obergrenze einzuhalten und diesbezüglich ein nationales Treibhausgasinventar zu führen. Die Zielwerte wurden in Tonnen Kohlenstoff-Äquivalent angegeben [6, S. 107-124].

Für die Umsetzung des Kyoto-Protokolls gab es zwei Verpflichtungszeiträume; zuerst 2008-2012 und anschließend 2013-2020 [6, S. 107-124].

Eine Erweiterung des Kyoto Protokolls, das Doha-Amendment, hat die Grundlage für die zweite Verpflichtungsperiode geschaffen. Mittels dieser wurden nationale Emissionshöchstmengen vorgeschrieben [1, S. 220].

Ein Kritikpunkt an dem Kyoto-Protokoll sind die Geschehnisse in der Causa Kanada. Denn das Land hätte hohe Strafzahlungen aufgrund verfehlter Klimaziele zahlen müssen. Um sich diesen zu entziehen, trat Kanada aus dem Protokoll aus. Dieser Austritt blieb bis heute folgenlos [7].

2.1.2.3 Das Klimaabkommen von Paris

Im Jahr 2015 haben sich die Mitgliedstaaten des Rahmenabkommens auf der internationalen Klimakonferenz in Paris auf einen Klimavertrag geeinigt, welcher an das Kyoto-Protokoll angeschlossen hat und im Jahr 2016 in Kraft trat. Wie bei dem Kyoto-Protokoll war hierbei das Ziel, den Rahmenvertrag zu ergänzen und konkrete Regeln festzusetzen, um Treibhausgasemissionen zu begrenzen. Im Gegensatz zum Kyoto-Protokoll verpflichteten sich hierbei jedoch alle Mitglieder, also praktisch jegliche Länder der Welt, ihren Ausstoß von Treibhausgasen zu reduzieren. Um eine hohe Beteiligung zu gewährleisten, musste auf das Festsetzen einheitlicher Regeln, wie dies im Kyoto-Protokoll der Fall war, verzichtet werden. Es war von größter Notwendigkeit auf die Verschiedenheiten der einzelnen Staaten Rücksicht zu nehmen.

Im Rahmen dieses Abkommens wurde das gemeinschaftliche Ziel der Begrenzung der globalen Erderwärmung auf 2 °C festgesetzt, wobei darauf verwiesen wurde, dass die Eindämmung auf 1,5 °C wünschenswert sei. Diese Temperaturwerte beziehen sich auf das Niveau im vorindustriellen Zeitalter. Die Vorgehensweise ist hierbei, dass zuerst jedes Land ein ambitioniertes Ziel der Begrenzung des Treibhausgasausstoßes präsentiert und dem UNFCCC-Sekretariat meldet. Diese werden als national festgelegte Beträge bezeichnet². Wie auch bei dem Kyoto-Protokoll wird ein Inventar der nationalen Treibhausgasemissionen geführt. Zusätzlich wird periodisch über den Stand des Erreichens der Ziele berichtet und alle fünf Jahre der gemeinsame Fortschritt der Mitglieder überprüft³. Dies ist der Zeitpunkt zu welchem das neue, ambitionierte Ziel der einzelnen Mitgliedstaaten festgesetzt werden soll. Es wurden hierbei ebenfalls Marktmechanismen geschaffen, welche die Anrechnung von finanziellen Investitionen zur Reduktion von Treibhausgasen im Ausland erlauben [6, S. 125-128].

2.1.3 Europäische gesetzliche Rahmenbedingungen

Die europäische Union bekennt sich klar zu den Zielen des UN-Klimaschutzübereinkommens von Paris (siehe voriges Kapitel). Zusätzlich hat sie sich das Ziel gesetzt, bis zu dem Jahr 2050 die Reduktion des Emissionsausstoßes voranzutreiben und danach keine Treibhausgasemissionen mehr freizusetzen (netto). In diesem Sinne wurden bereits Etappenziele für 2020 (Klima- und Energiepaket 2020) und 2030 (Rahmen für EU Klima- und Energiepolitik bis 2030) beschlossen.

Langfristig setzt die europäische Union auf eine Strategie ohne konkreten, längerfristigen Zielen, sondern auf eine, welche auf sieben Entwicklungsbildern basiert. Auf diesen beruhen Szenarien zur Emissionssenkung, die aus der Modellierung unterschiedlicher technischer Lösungen folgt. Bausteine dieser Strategie sind:

- Energieeffizienz und Gebäude mit Null-Emissionen
- Einsatz erneuerbarer Energien und Nutzung von Strom statt fossiler Energieträger
- Saubere, sichere und vernetzte Mobilität
- Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz
- Smarte Infrastruktur
- Grenzüberschreitende und regionale Zusammenarbeit, Bioökonomie und Kohlenstoffsenken
- CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS)

²Nationally determined contributions (NDCs)

³Global stocktaking

Das **Governance-System** basiert auf einer Verordnung, die im Dezember 2018 in Kraft getreten ist (EU VO 2018/1999). Das Ziel dieser ist vor allem die Sicherstellung der Vereinbarkeit der Klimaziele der EU für das Jahr 2030 sowie der langfristigen Treibhausgas-Reduktionsverpflichtungen der EU mit dem Pariser Übereinkommen.

Der Steuerungsmechanismus basiert auf nationalen Energie- und Klimaplänen (NEKP) für einen Zeitraum von jeweils 10 Jahren, beginnend 2021, langfristigen Strategien der EU und der Mitgliedstaaten sowie integrierten Berichten, Monitoring und Datenveröffentlichungen.

Aufgrund der Verordnung sind alle Mitgliedstaaten dazu verpflichtet, ihre nationalen Energie- und Klimapläne (NEKP) und nationalen Langfriststrategien (LTS) zu übermitteln. Diese müssen zukünftig aktualisiert werden. Weiters wird die Erstellung regelmäßiger Fortschrittsberichte gefordert.

Ende des Jahres 2019 wurde der umfassende **europäische Green Deal** mit dem übergreifenden Ziel, bis 2050 Netto-Null-Treibhausgasemissionen zu erreichen („Klimaneutralität“), präsentiert. Er beinhaltet eine Reihe von politischen Initiativen, die unterschiedlichste Themen aufgreifen und darauf abzielen, die Wirtschaft der EU für eine nachhaltige Zukunft umzugestalten. Unter anderem wurde eine Erhöhung der Ambition auf 55 % bezüglich dem Ausstoß von Treibhausgasemissionen bis 2030 festgesetzt.

Mit dem **europäische Klimagesetz** wurde 2021 das Ziel einer klimaneutralen EU bis 2050 und die Zielvorgabe, die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 um netto mindestens 55 % zu senken, rechtlich verankert.

Die EU-Institutionen und die Mitgliedstaaten sind verpflichtet, die notwendigen Maßnahmen auf EU- und nationaler Ebene zu ergreifen, um diese Ziele zu erreichen. Hierbei werden die Fortschritte regelmäßig überprüft und die Maßnahmen gegebenenfalls angepasst. Dabei basieren jegliche Entscheidungen auf den nationalen Energie- und Klimaplänen der Mitgliedstaaten, regelmäßigen Berichten der Europäischen Umweltagentur und den neuesten, wissenschaftlichen Erkenntnissen über den Klimawandel und seine Auswirkungen.

Zusätzlich ist die Einrichtung eines europäischen, wissenschaftlichen Beirats für Klimaschutz geplant. Dieser soll vor allem wissenschaftliche Beratung und Berichte zu EU-Maßnahmen und Klimazielen bereitstellen.

Neben dem EU-Klimagesetz wurde im Rahmen des Green Deal auch der **europäische Klimapakt** erstellt, um die Bevölkerung sowie alle Bereiche der Gesellschaft in den Klimaschutz mit einzubinden.

2.1.4 Normative Grundlagen

Um eine genormte und somit vergleichbare Feststellung und folgend Analyse der Treibhausgasemissionen zu gewährleisten, wurden innerhalb der Europäischen Union Normen geschaffen, welche teilweise wiederum auf internationalen Regelungen basieren. Diese werden folgend beschrieben, wobei ein besonderer Fokus auf der Lebenszyklusanalyse liegt.

2.1.4.1 Normenübersicht

Der Zweck und die Verwendung der wichtigsten, für den Klimawandel relevanten, Normen wird anschließend erläutert.

- **ÖNORM EN ISO 14040:2006: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen** - In dieser Norm werden die Grundsätze und Rahmenbedingungen der Ökobilanz behandelt. Bestandteile dabei sind die Festlegung des Zieles und des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz, der Sachbilanz-Phase, der Phase der Wirkungsabschätzung, der Auswertungsphase und weiterer.

- **ÖNORM EN ISO 14044:2006: Umweltmanagement - Ökobilanz —Anforderungen und Anleitungen, Ausgabe: 2018-06-15** - Dieses Dokument definiert Anforderungen an eine Ökobilanz und stellt Anleitungen für deren Erstellung zur Verfügung. Es werden Ökobilanz-Studien sowie Sachbilanz-Studien bereit gestellt.
- **ÖNORM EN ISO 14067:2018: Greenhouse gases - Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification** - In diesem Dokument werden Anforderungen an sowie Grundsätze und Leitlinien für die Quantifizierung und die Berichterstattung des Carbon Footprint eines Produkts (CFP) in Übereinstimmung mit Internationalen Normen zur Ökobilanz (ISO 14040 und ISO 14044) festgelegt.
- **ÖNORM EN 15978:2011: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden—Berechnungsmethode** - Im Rahmen dieser Norm wird eine auf der Ökobilanz basierende Berechnungsmethode zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität eines Gebäudes beziehungsweise eines Infrastruktur-Bauwerks, sowie Hilfsmittel für das Berichtswesen und die Kommunikation des Ergebnisses dieser Bewertung zur Verfügung gestellt.
- **ÖNORM EN 15804:2012: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte** - In diesem Dokument werden grundlegende Produktkategorieregeln (PCR) für Bauprodukte und Bauleistungen aller Art bereitgestellt. Sie ist anwendbar für Bauprodukte, Prozesse und Dienstleistungen.

2.1.4.2 Lebenszyklusanalyse (LCA)

Die Umweltanalysetechnik Lebenszyklusanalyse, beziehungsweise Life-Cycle-Analysis (LCA), oder auch Ökobilanz, ermöglicht die Quantifizierung der Umweltbelastung eines Produktes, eines Verfahrens oder einer Dienstleistung entlang ihres gesamten Lebensweges. Bei Produkten beginnt dieser mit der Beschaffung der Rohmaterialien. Die weiteren Schritte gliedern sich in Produktion, dem anschließenden Transport, des Gebrauchs und schlussendlich der Entsorgung. Im englischen werden diese 'cradle-to-grave'-Analyse bezeichnet, also von der Wiege bis zum Grab.

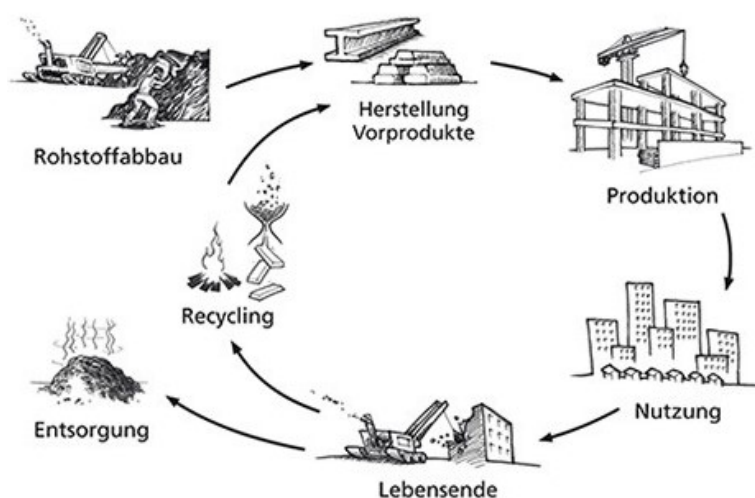


Abb. 2.2: Ablauf eines Lebenszyklus [8]

Wird anstatt der direkten Entsorgung ein Recycling-Schritt eingeführt, wodurch der Kreislauf wieder von neuem beginnt, wird dieser als 'cradle-to-cradle'-Ansatz bezeichnet. Eine andere Form wäre die 'cradle-to-gate'-Analyse, welche nur die Schritte bis zur Produktion berücksichtigt. Diese beginnt also mit dem Abbau des Rohstoffes und endet mit der Bereitstellung des fertigen Produktes am Werkstor. Der Ablauf des Lebenszyklus eines Produktes ist folgend in Abb. 2.2 dargestellt [9].

Die LCA basiert auf internationalen Standards, der ISO 14040-Serie. Aufgrund der wachsenden Popularität dieser Analysemethode wird diese bereits in unterschiedlichsten Industrien angewandt. Die Methode der Ökobilanz kann als Tool für umweltorientierte Entscheidungen herangezogen werden. Angewendet wird sie um Produkte zu entwickeln und zu verbessern. Außerdem wird die Methode im Rahmen strategischer Planung, bei politischen Entscheidungsprozessen und im Marketing genutzt [10, S.1-40].

Die Lebenszyklusanalyse teilt sich in vier Phasen. Die hierbei wichtigsten Bestandteile sind Inputs, der Lebenszyklus, Outputs und die Wirkungsabschätzung [9].

1. **Definition von Bilanzierungsziel und Scope:** In der ersten Phase der LCA geschieht die Zielsetzung sowie die Festsetzung der Systemgrenzen, des Detail-Levels und des Zeitfensters der Analyse. Außerdem wird die funktionale Einheit bestimmt.
2. **Sachbilanz:** Wird im englischen auch Life-Cycle-Inventory (LCI) genannt. In diesen Abschnitt fließt der meiste Aufwand. Es werden Daten gesammelt von Eingängen, also Inputs (Rohmaterialien, Energie), und Ausgängen, auch Outputs bezeichnet (Emissionen, Abfall), für das in Schritt 1 definierte System.
3. **Wirkungsbilanz:** Im englischen wird dieser Schritt auch Life-Cycle-Impact-Assessment (LCIA) genannt. Hierbei werden die potentiellen Umwelteinwirkungen, Einflüsse auf die menschliche Gesundheit und die Ressourcenverfügbarkeit mithilfe der Ergebnisse aus der LCI beurteilt. Grundsätzlich werden bei diesem Prozess die Daten aus der Sachbilanz den Wirkungskategorien sowie den Kategorieindikatoren zugeordnet. Damit geht der Versuch einher, diese Wirkungen zu verstehen.
4. **Bilanzbewertung:** Die Phase, in welcher die Ergebnisse aus der LCIA bzw. aus der LCI evaluiert werden, um Schlussfolgerungen zu treffen und Empfehlungen abzugeben.

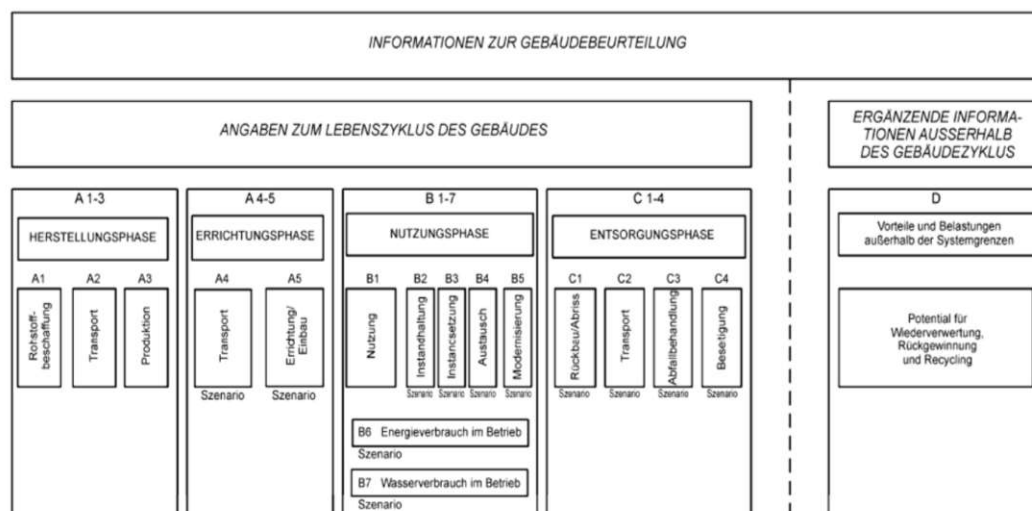


Abb. 2.3: Lebenszyklusstadien laut ÖNORM EN 15978:2011

Die ÖNORM EN 15978:2011 stellt einen möglichen Aufbau der Lebenszyklusstadien für Hochbauten zur Verfügung. Dieser lässt sich auch auf Infrastrukturbauten umlegen. Die entsprechende Tabelle ist in Abb.2.3 ersichtlich.

Direkte/Indirekte Emissionen

Die direkt an der Stelle der Energieumwandlung (z.B. im Kessel) anfallenden Emissionen werden als direkte Emissionen bezeichnet. Bei der Herstellung des Brennstoffes (z.B. Erdölgewinnung und -verarbeitung zu Heizöl) bzw. des Energieverbrauchers (z.B. Baumaschine, Mischanlage) fallen zusätzlich Emissionen an, die hierbei noch nicht berücksichtigt sind. Für eine gesamtheitliche Betrachtung des Prozesses sind diese ebenfalls relevant. Sie werden als indirekte (oder auch vorgelagerte) Emissionen bezeichnet. Die Gesamtemissionen ergeben sich aus der Summe der direkten und der indirekten Emissionen [11].

2.2 Straßenbau

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Asphaltstraßenbaus erläutert. Der Inhalt gliedert sich in geschichtliche Entwicklung, Straßenaufbau und Prozesskette. Ersteres gibt einen kurzen Einblick in den historischen Wandel des Straßenbaus. Zweiteres beleuchtet das Material Asphalt und dessen Bestandteile sowie den Schichtaufbau einer Asphaltstraße. Bei letzterem wird der Prozess und somit der Ablauf einer Asphaltbaustelle behandelt.

Abhängig davon, ob die betrachtete Straße in Asphalt-, Beton- oder Pflasterbauweise errichtet wurde, unterscheidet sich auch ihr Aufbau. Hierbei ist der maßgebende Unterschied die Decke, also die oberste Schicht, auf welche sich die Bezeichnung der Bauweise bezieht [12, S. 1]. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Asphaltstraßenbau liegt, wird folgend ausschließlich dieser beleuchtet.

2.2.1 Geschichtliche Entwicklung

Der **Straßenbau** in Europa geht bis in das römische Reich zurück. Damals wurden in Europa Straßen vor allem aus militärischen Gründen errichtet. Nach dem Zerfall des römischen Reiches verfielen die Straßen aufgrund mangelnder Wartung, wobei die Wegführung teilweise bis heute überdauert. Im Mittelalter, auch als Folge des in viele Länder zerteilten Europas, verlor das überregionale Straßennetz an Bedeutung und das Wissen des Straßenbaus ging verloren. Da die Landesherren keine Vorteile durch gut befestigte Straßen hatten, wurde auch keine Mühe betrieben diese zu verbessern.

Als sich die politische Lage Mitte des 18. Jahrhunderts stabilisierte, gewann auch wieder der Straßenbau an Bedeutung. Es wurden entsprechende Gesetze erlassen, wobei sich zunächst Holz als Baustoff durchsetzte, da dieser in großer Menge verfügbar war. Nachdem er jedoch teilweise für den Nutzen im Straßenbau verboten wurde, gewann die Ausführung der Packlage an Bedeutung. Vor allem im deutschen Raum setzte sich diese relativ schnell durch. Hierbei werden seitlich Tiefbordsteine als Einfassung positioniert und dazwischen Steine als Packlage gesetzt. Darüber wurde eine Schicht kleinerer Steine eingebaut und schließlich mit einer Kiesschicht abgedeckt. Eine solche Packlage ist in Abb. 2.4 ersichtlich [13, S. 1 ff].

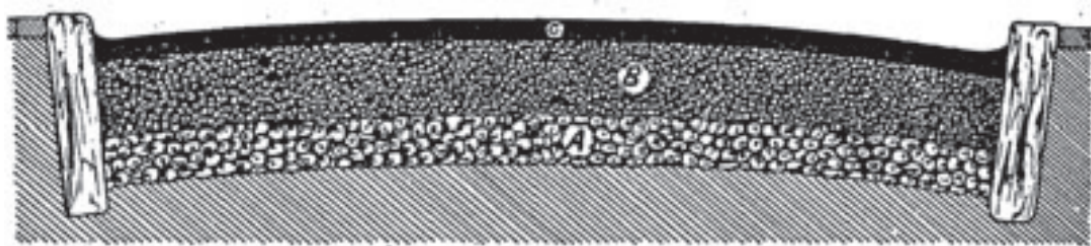


Abb. 2.4: Aufbau einer Straße mittels Packlage [13, S. 9]

Mit dem Ausbau des Eisenbahnnetzes und der Erfindung des Automobils verloren bis Anfang des 20. Jahrhunderts Straßen vorübergehend an Bedeutung. In dieser Zeit wurde in Großbritannien sowohl die Packlage, als auch ein dreischichtiger Schotteraufbau praktiziert.

Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts wurden in den Vereinigten Staaten die ersten Straßenbaumaschinen entwickelt, deren Nachfolger wir noch heute für die Herstellung von Asphaltstraßen verwenden. Das Prinzip des Einbaus hat sich bis heute nicht verändert. Es werden mehrere Schichten von Steinen, welche mit einem Bindemittel zusammengehalten werden, eingebaut. Als Bindemittel wurde vor allem Teer verwendet, woraus sich auch der Ausdruck „Teerstraße“ im Volksmund etabliert hat. Teer wurde jedoch in Deutschland und Österreich Ende des 20. Jahrhunderts aufgrund seiner toxischen Wirkung verboten und durch Bitumen ersetzt.

Die ersten Konzepte eines Straßenfertigers, wie dieser heutzutage im Straßenbau üblich ist, wurden Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt. Dieser Fertiger wird mit Lkws beschickt und baut den Asphalt über eine Glättbohle, welche hinterhergezogen wird, ein. Die Entwicklung dieser Bohle, dessen Aufgabe das Glätten sowie das Verdichten des Asphalts ist, war die wichtigste Entwicklung für den Straßenfertiger im 20. Jahrhundert. Weitere Fortschritte des Fertigers im 20. Jahrhundert waren sowohl die beheizte, als auch die voll ausziehbare Bohle, welche hydraulisch die Verdoppelung der Grundarbeitsbreite ermöglichte. 1981 wurde für eine zusätzliche Verdichtung die Pressleiste entwickelt, da bis dahin Bohlen nur mit Stampfern und Vibrationseinheiten ausgestattet waren. Ende des 19. Jahrhunderts wurden vor allem Fortschritte in der Digitalisierung und in dem Bereich der elektrischen Steuerung erreicht, unter anderem die Entwicklung des voll elektronischen Steuerpults.

Es wurde bereits früh erkannt, dass die Verdichtung für die Haltbarkeit der späteren Straße eine entscheidende Rolle inne hat. Dennoch wurden zu Beginn des Straßenbaus vor allem Stampfen und Schlagen als Methoden der Verdichtung angewendet. Die ersten Walzen wurden Mitte des 19. Jahrhunderts im Straßenbau verwendet, wobei es Granit- oder beschwerte Holz-Einradwalzen waren, welche durch Pferdekraft gezogen wurden. Schnell haben sich jedoch gußeiserne Walzkörper durchgesetzt. Um die Ausnutzung deren Ziehkraft zu maximieren, richtete sich die Dimension des Durchmesser nach der Größe der Pferde. Somit betrug dieser üblicherweise ungefähr 1,6 m. Ein Problem der pferdebetriebenen Walzen waren die Schwierigkeiten beim Wenden, welches auf den engen Landstraßen oft nur schwer möglich war. Das Pferd musste jedes Mal umgespannt werden.

Mit dem zunehmenden Voranschreiten des Asphaltstraßenbaus wurden auch neue Konzepte des Walzens entwickelt. Ballaisson kreierte eine Dampfwalze, welche die Feuerung des Kessels zwischen zwei gleich großen Walzen verbarg. Diese Tandemform erlaubte neben dem Walzen auf stark befahrenen Straßen ebenfalls Kurvenfahrten. Parallel dazu wurde in England das Prinzip der Dreiradwalze entwickelt. Dabei wurde die Hinterachse mit zwei Walzenkörpern angetrieben und die Vorderachse mit einem geteilten Walzenrad zur Lenkung ausgeführt. Die ersten Walzen mit Verbrennungsmotor wurden Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelt.

2.2.2 Straßenaufbau

In diesem Kapitel wird einerseits auf die geometrische Form und dem schichtförmigen Aufbau der Straße eingegangen, andererseits wird das Material Asphalt, dessen Bestandteile und deren Herstellung erklärt.

2.2.2.1 Schichten

Der Aufbau einer Straßenkonstruktion stellt sich bei dem Asphaltpaket (Asphalttragschicht, Asphaltbinderschicht, Asphaltdeckschicht) und bei den restlichen Bestandteilen einer Straße schichtweise dar. Dies hat vor allem den wirtschaftlichen Vorteil, dass lediglich die am meisten belastete Deckschicht aus besonders hochwertigem und somit teurem Material bestehen muss. Die Qualität der Materialien der restlichen Schichten kann nach unten hin, je nach deren Aufgabe innerhalb der Straßenkonstruktion, abnehmen [14, S. 128].

Grob wird der Straßenaufbau in die Bestandteile des Erdkörpers (Untergrund, Unterbau) und Straßenoberbau gegliedert, wobei die Trennfläche als Planum bezeichnet wird. Diese beiden Komponenten einer Asphaltstraße können wiederum in Schichten verfeinert werden. Ersichtlich ist dies in Abb. 2.5.

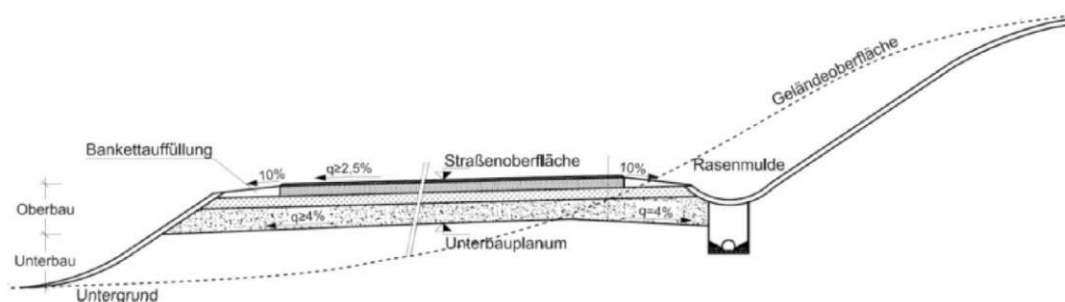


Abb. 2.5: Schichtaufbau bei Asphaltstraßen [15, S. 308]

Die einzelnen Schichten haben innerhalb der Straßenkonstruktion unterschiedliche Funktionen, welche folgend näher erläutert werden. Die Reihenfolge der Schichtelemente ist entsprechend des Straßenaufbaus von unten nach oben strukturiert.

- Bei dem **Untergrund** handelt es sich um den anstehenden, gewachsenen Boden. Diesen wird im Dammbereich nach Abtragen des Mutterbodens⁴ erreicht. Im Einschnittbereich wird der Untergrund mit dem Erreichen der Planungstiefe definiert. Der Untergrund bildet gemeinsam mit dem Unterbau und dem Straßenoberbau bei der Abtragung von Verkehrslasten ein zusammenwirkendes Ganzes. Somit kann ein tragfähiger Boden die Reduktion der konstruktiven Schichten bewirken. Andererseits hat ein weniger tragfähiger Boden zusätzliche Verbesserungsmaßnahmen wie dickere Tragschichten, Frostsicherungsmaßnahmen und ausreichend Entwässerungseinrichtungen zur Folge. Eine Bodenverbesserung bzw. Bodenverfestigung führt ebenfalls zu einer erhöhten Tragfähigkeit des Untergrundes. Diese kann bei nicht-bindigen Böden mechanisch (durch das Hinzufügen fehlender Körnungen) oder bei bindigen Böden mittels Stabilisierung (durch das Hinzufügen von Kalk oder Zement) geschehen [12, S. 14, 46].

⁴Organische, verwurzelte Bodenschicht an der Erdoberfläche.

- Der künstlich aufgeschüttete **Unterbau** ist ebenfalls ein Teil des Erdkörpers. Dieser wird bei Dammstrecken erforderlich, wobei eine Bodenverbesserung zur Erhöhung der Tragfähigkeit notwendig sein kann.
- Der **Oberbau** bzw. der Straßenoberbau, die eigentliche Straße, teilt sich in mehrere Schichten, welche sich nach ihrer Funktion unterscheiden.
 - Die **Tragschicht** hat die Aufgabe, die durch den Verkehr erzeugten Vertikal- und Horizontalbeanspruchungen so weit zu reduzieren, sodass das Planum keine unzulässigen Belastungen oder Verformungen erfährt. Hierbei hat auch der Frostschutz eine hohe Relevanz. Die Tragschicht selbst soll dabei ebenfalls keine plastischen Formänderungen erfahren. Die Anzahl der Tragschichten kann abhängig von der Belastung variieren und in ungebundene und gebundene Schichten⁵ eingeteilt werden.
 - Die **Binderschicht** befindet sich zwischen einer grobkörnigen, bituminösen Tragschicht und der feinkörnigen Deckschicht. Es handelt sich um eine Zone, in welcher eine besonders gute Spannungsaufnahme geschieht und Unebenheiten der Tragschicht ausgeglichen werden.
 - Die an der Oberfläche abschließende Schicht wird als **Deckschicht** bezeichnet. Dabei ist die Mischgutart Asphaltbeton bzw. AC (Asphalt Concrete) heutzutage die meist verwendete Form in Deckschichten. Nur bei hohen und ungewöhnlichen Erfordernissen wird Gussasphalt oder Splittmastixasphalt (SMA) bevorzugt. Die Aufgaben der Deckschicht sind folgende:
 - * Hindern des Eindringens von Oberflächenwasser und Schmutzstoffen in die Konstruktion
 - * Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen inklusive Frost
 - * Aufnehmen und übertragen der Kräfte des Verkehrs
 - * Aufweisen einer Oberfläche (Rauheit, Ebenheit, Griffigkeit, etc.), welche den Anforderungen entspricht [12, S. 140 ff].
- Im Untergeordneten Straßennetz besteht noch die Möglichkeit der Ausführung einer **Tragdeckschicht**, welche die Funktionen von Trag- und Deckschichten vereint.

2.2.2.2 Asphalt

Möglichkeiten zur Herstellung von Straßendecken ergeben sich nach dem aktuellen Stand der Technik in Form von Asphalt, Beton oder Pflastersteinen. In Deutschland stellen Asphaltdecken vor den Fahrbandecken aus Beton bzw. Pflaster die meisten Flächenbefestigungen dar. Hierbei handelt es sich vor allem um Heißmischasphalt beziehungsweise englisch Hot Mix Asphalt (HMA) [14, S. 20-21].

Asphalt ist ein natürlich vorkommendes (Naturasphalt⁶), jedoch meist künstlich hergestelltes, Gemisch aus Bitumen, Gesteinskörnung und eventuellen Zusätzen zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften [12, S. 407]. In der Vergangenheit wurden alternativ zur Asphaltstraße Teerstraßen hergestellt, wobei es sich bei Teer um ein Destillationsprodukt aus Steinkohle, Braunkohle, Holz bzw. Torf handelt, welche hierbei die Bindemittelfunktion übernimmt. Gegenwärtig wird dieser Baustoff, aufgrund des dringlichen Verdachtes seiner krebserregenden Wirkung, nicht mehr in Straßenbelägen verwendet [14, S. 20-21].

⁵Gebundene Schichten unterscheiden sich zu ungebunden, indem diesen zusätzlich ein hydraulisches Bindemittel (z.B. Zement, Bitumen) hinzugefügt wird.

⁶Das größte Naturasphalt-Vorkommen befindet sich in Pitch Lake auf der Insel Trinidad [14, S. 21]

Bitumen

Der Ausgangsstoff zur Herstellung von Bitumen ist das Erdöl bzw. Rohöl. Als Ausgangspunkt des Entstehens von letzterem gilt organisches Leben auf Meeresgründen. Durch die Einwirkung von Temperaturen, hohen Drücken und günstigen Randbedingungen auf diese Ablagerungen konnten über Millionen von Jahren Erdöle entstehen. Dabei sind vor allem die unterschiedlichen Randbedingungen für die vielfältige Auswahl von diesen Rohölen verantwortlich. Für die Bitumenproduktion müssen sie entsprechend selektiert werden.

In einem ersten Schritt zur Bitumenerzeugung müssen somit entsprechende Erdöllagerstätten erforscht werden. Da diese meistens einen marinen Ursprung haben, liegt der Fokus hierbei auf Meeren bzw. Gebieten, die in der Vergangenheit Meere waren. Durch Oberflächenmessungen und anschließende Tiefenbohrungen wird die Position bzw. die Art der Formation festgestellt. Sind alle Randbedingungen klar, kann mit der Förderung begonnen werden. Dabei können, solange ein ausreichender, natürlicher Druck vorherrscht, Methoden, wie die Druckerhaltung durch Einpressen von Erdgas in die Gaskappe oder das Einpressen von Wasser in die Randzone der Lagerstätte, angewendet werden. Ist dies nicht mehr möglich, sind Tiefen- oder Tauchpumpen einzusetzen. Der anschließende Transport in die Raffinerie zur Weiterverarbeitung geschieht entweder mittels Tankschiff oder als Überlandtransport per Pipeline.

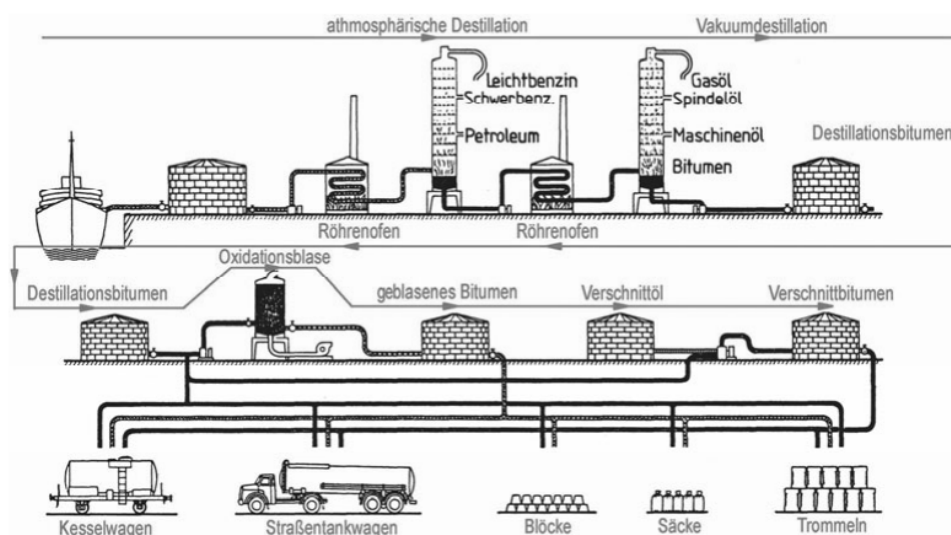


Abb. 2.6: Bitumenherstellung Abfolge [16, S. 393]

Die in der Raffinerie ablaufenden Teilschritte sind in Abb. 2.6 dargestellt. Die Rohöl-Lieferung wird vorerst in einem Lagertank gespeichert. Im ersten Röhrenofen erfolgt eine Aufheizung auf 350–400 °C. Im nächsten Abschnitt, der atmosphärischen Destillation, bildet sich aufgrund des Druckes ein atmosphärischer Rückstand auf dem Boden des Destillationsturmes. Dieser wird folgend wiederum in einem Rohölofen erhitzt und in einen Fraktionsturm mit vermindertem Druck geleitet. Dieser Prozessabschnitt wird Vakuumdestillation genannt. Neben einigen anderen Destillaten ist hierbei Bitumen eines der entstandenen Produkte. Optional kann an diesen Schritt eine Oxidation anschließen. Das fertig verarbeitete Bitumen kann nun unter Verwendung von Kesselwagen bzw. Straßentankwagen, auch Tankkraftwagen (Tkw), mit einer maximalen Nutzlast von 25–30 t heiß zu der entsprechenden Mischanlage transportiert werden. Dort wird es zu Asphalt weiterverarbeitet, wobei dessen Anteil durchschnittlich 5 % an der Gesamtmasse beträgt. Alternative Lieferformen stellen Trommel- oder Blockware dar. Üblicherweise wird das Bitumen

jedoch den gesamten Transportvorgang bis zum Mischprozess heiß gehalten. Auf der Mischanlage wird es deshalb in einem beheizbaren Tank gelagert [17, S. 261-265].

Gesteinskörnung

Der zweite wichtige Bestandteil von Asphalt ist die Gesteinskörnung. Hierbei handelt es sich vor allem um Natursteine. Diese sind als mineralische Aggregate definiert, welche durch geologische Vorgänge zusammengefügt und verfestigt wurden. Sie werden in einem hohen Ausmaß im Straßenbau als bearbeitete oder unbearbeitete Naturwerksteine oder in zerkleinerter Form als Schotter, Splitt, Kies und Sand verwendet. Außerdem können unter gewissen Voraussetzungen, falls die Umweltverträglichkeit gegeben ist, industrielle Nebenprodukte wie Stahl- und Metallhüttenschlacken bzw. recycelte Baustoffe genutzt werden [14, S. 81].

Generell können als Baustoffe im Asphalt Asphaltgranulat, gebrochene und ungebrochene, feine, sehr feine (Fülleranteil 0,063 mm) und grobe Gesteinskörnungen verwendet werden. Wird die Funktionsweise der Bestandteile betrachtet, so bildet die grobe Körnung das tragende Gerüst und die feine Körnung füllt die Hohlräume und stützt die groben Körner ab. Der Füller erzeugt mit Bitumen einen Mörtel, verhindert dessen zu schnelles Abfließen vom Gestein und füllt die Hohlräume [15, S. 417].

Die Gewinnung der Gesteine geschieht meistens im Tagbau, also in Steinbrüchen, Schotter-, Kies- und Sandgruben. Vereinzelt kommt auch Tiefbau mittels Stollen- und Schachtförderung zum Einsatz. Festgesteine werden unter anderem durch Bohren und Sprengen mittels Sprengmitteln gelöst, bei klüftigen Gesteinen auch durch Reißen. Im Gegensatz dazu wird Lockergestein mit Baggern oder Schaufelladern abgebaut, bzw. unter Wasser mit Schrapfern oder Saugbaggern.

Bitumenemulsion

Bei Bitumenemulsionen handelt es sich um Dispersionen von Bitumen in Wasser. Sie finden im Straßenbau vor allem im Spritz- bzw. Mischverfahren Anwendung. Dabei bildet das Bitumen die „innere Phase“ und das Wasser die „äußere Phase“. Da es sich hierbei jedoch um einen fragilen Zustand handelt, werden sogenannte Emulgatoren hinzugefügt, um die Emulsion zu stabilisieren [17, S. 380].

Bitumenemulsionen werden zur Oberflächenbehandlung, Schlämmen sowie für einen verbesserten Schichtverbund der Asphaltsschichten im Oberbau verwendet. Sobald die Emulsion verspritzt wird und mit einem Gestein in Kontakt kommt, bricht diese. Dabei verliert der Emulgator seine Wirkung; die Bitumentropfen bleiben haften an dem Gestein und schließen sich zu einer Bitumenschicht zusammen. Das Wasser verdunstet oder versickert [15, S. 416].

Einteilung und Kennzeichnung von Asphalt

Asphalte können empirisch oder funktional eingeteilt werden, wobei sich die Kennzeichnungen stark überschneiden. In Abb. 2.7 ist die Struktur der Asphaltbezeichnungen dargestellt.

Der Ausdruck beginnt mit der Grundbezeichnung. Üblich sind hierbei entweder AC oder SMA. Die dazugehörige Zahl gibt das Größtkorn der Gesteinskörnung wieder. Der anschließende Begriff gibt an, in welcher Schicht das Material eingebaut wird. Hierbei sind die Möglichkeiten deck (Deckschicht), binder (Binderschicht) oder trag (Tragschicht). Danach folgt die Bezeichnung des Bitumens. Hierbei handelt es sich um ein Polymer modifiziertes Bitumen (PmB), dessen Penetrations-Klasse 45-85 und Erweichungspunkt-Klasse 65 beträgt. Die Penetrationsprüfung und die Prüfung des Erweichungspunktes mit Ring und Kugel stellen konventionelle Bindemittelprüfungen dar. Der vorletzte Begriff verändert sich, abhängig davon, ob die Einteilung empirisch durchgeführt oder funktional durchgeführt wird. Bei ersterem handelt es sich um den Siebliniertyp, weiteres gibt an dieser Stelle funktionale Anforderungen bzw. das Gebrauchsverhalten an. Der letzte Teil ist wiederum bei beiden Formen gleich und bezeichnet die Gesteinsklasse.

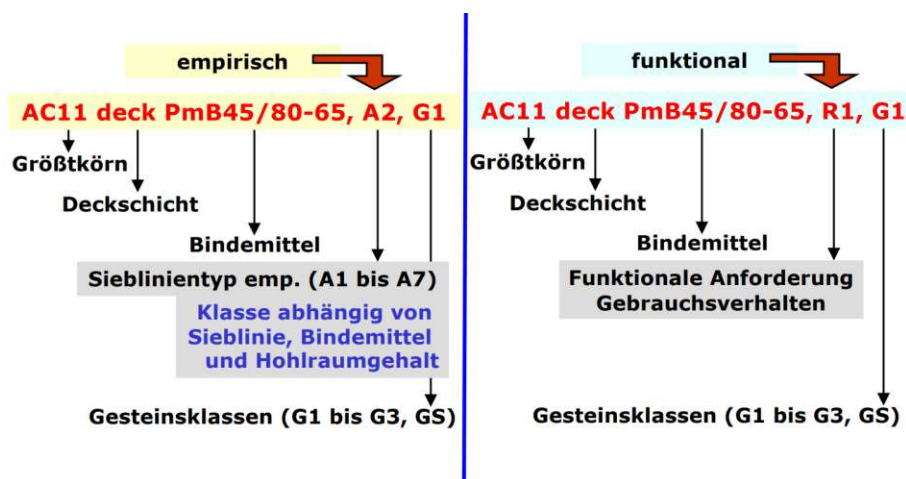


Abb. 2.7: Einteilung von Asphalt [18, S. 13]

2.2.3 Prozesskette

In diesem Kapitel wird der Prozessablauf einer Asphaltbaustelle behandelt. Da in Österreich vor allem Sanierbaustellen an Bedeutung gewinnen, während Neubauten in den Hintergrund rücken, liegt der Fokus auf ebensolchen Sanierungen. Charakteristisch für diese ist das Abtragen des Altbelags mittels Fräsen. Die Herstellung des Unterbaus wird nicht behandelt.

Die Durchführung einer solchen Sanierbaustelle ist oft aus dem Grund der Verkehrssicherheit notwendig. Diese wird erhöht, indem Unebenheiten entfernt werden bzw. eine neue, verbesserte Griffigkeit geschaffen wird. Weiterhin kann der Wasserabfluss verbessert werden und eine generell schadhafte Decke entfernt werden [15, S. 445-446].

Eine übersichtliche Darstellung der Teilprozesse im Lebenszyklus einer Asphaltstraße ist in Abb. 2.8 ersichtlich.



Abb. 2.8: Lebenszyklus einer Asphaltstraße [19, S. 25]

2.2.3.1 Fräsen

Im Zusammenhang mit der Instandhaltung bzw. Instandsetzung von Asphaltstraßen ist das Abfräsen der Fahrbahn notwendig. Mittels der Methode des KaltfräSENS kann entweder die

gesamte Asphaltbefestigung, oder nur Teile dieser entfernt werden. Eine andere Möglichkeit des Fräsens ist das Warmfräsen, jedoch ist diese heutzutage nicht mehr üblich [15, S. 445-446].

Es werden folgende Verfahrenstypen unterschieden:

- Das **Standardfräsen** ist eine Methode zur Entfernung des gesamten Asphaltpakets oder Teilen davon. Es können hierbei Tiefen bis 35 cm und Breiten zwischen 30 cm und 220 cm erreicht werden.
- **Feinfräsen** ist eine Möglichkeit zum genaueren Abfräsen von dünneren Schichten, um die Verkehrssicherheit zu erhöhen, indem Spurrinnen reduziert bzw. entfernt werden.
- Das **Schlitz-, Nut- oder Grabenfräsen** wird in dünneren Breiten ausgeführt [15, S. 445-446].

2.2.3.2 Asphalt Herstellung

Die Herstellung von Asphalt geschieht in sogenannten Asphaltmischanlagen (AMAs) aus Gesteinskörnungen, Bitumen und optionalen Zusätzen. Von besonderer Bedeutung ist die Lage der Mischanlage: diese sollte, einerseits, gut mit den Rohstoffen belieferbar sein und sich, andererseits, in Baustellennähe befinden, um unnötige Transportwege zu vermeiden. Bei größeren Autobahnprojekten kann es sinnvoll sein, eine mobile Asphaltmischanlage in direkter Umgebung der Baustelle zu positionieren. Die Anlieferung der Rohstoffe geschieht in Deutschland sowie in Österreich überwiegend mittels Lkw [17].

In Abb. 2.9 ist das Fließschema einer Asphaltmischanlage ersichtlich. Der Prozess beginnt links oben im Bild mit der Lagerung der einzelnen Materialien (Gesteinskörnungen), welche durch Wände getrennt sind. Im nächsten Schritt geschieht die Beschickung der Vordoseure. Diese wird üblicherweise mittels Radladern erreicht, kann aber alternativ auch durch Förderbänder erfolgen. Diese erfordern jedoch eine Lagerung der Mineralien in Silos. Unter der Verwendung von Dosierbändern bzw. Dosierrinnen werden die Stoffe nach Rezeptur auf ein Sammelband befördert und über das Aufgabeband zu der Trockentrommel transportiert, wo die Mineralien mit einem Öl- oder Gasbrenner aufgeheizt werden. Nachdem diese die Trommel durchlaufen haben, gelangen sie in den Heißelevator, welcher die Beförderung nach oben zu dem Vibrationssieb übernimmt. Das in der Trockentrommel entstandene Gas mit den enthaltenen Staubpartikeln wird über einen Vor- und Feinfilter abgesaugt. Der Staub aus der Vorfilterung wird in den Heißelevator gespeist. Der Bestandteil aus der Feinfilterung wird über den Füllerelevator in das Eigenfüllersilo gebracht. Die heißen Materialien werden nun in der Siebmaschine, abhängig von der Art und Größe der Mischanlage, in 4, 5 oder 6 Fraktionen geteilt und im Heißsilo gelagert. Bevor die einzelnen Bestandteile nun in die Mischmaschine gelangen, werden diese über eine Gesteinswaage, Bitumenwaage bzw. Füllerwaage verwogen. Nun können diese nach Rezeptur eingebracht und vermischt werden. Das fertige Asphaltmaterial wird über einen Verteilerwagen in die entsprechende Kammer des Verladesilos, abhängig von der Mischgutsorte, eingebracht. Über eine Durchlaufkammer können die Transportfahrzeuge direkt über die Mischmaschine mit Asphalt beschickt werden. Für Fremdfüller, welcher verwendet wird, wenn der Füller aus der Entstaubung nicht ausreicht, ist ein eigenes Silo vorhanden. Das Bitumen kann in horizontal oder vertikal positionierten beheizten Tanks gelagert werden. Hierbei erfolgt die Aufheizung entweder elektrisch oder unter Verwendung einer Thermalöl-Heizanlage. Alle Bitumenleitungen werden doppelwandig ausgeführt, um die Förderung zu sichern. Hierbei befindet sich in der inneren Schicht das Bitumen und in der äußeren das erhitzte Thermoöl. Um den Betrieb des Brenners in der Trockentrommel zu gewährleisten, steht ein Heizöl in einem Heizöltank zur Verfügung [20, S. 195-196].

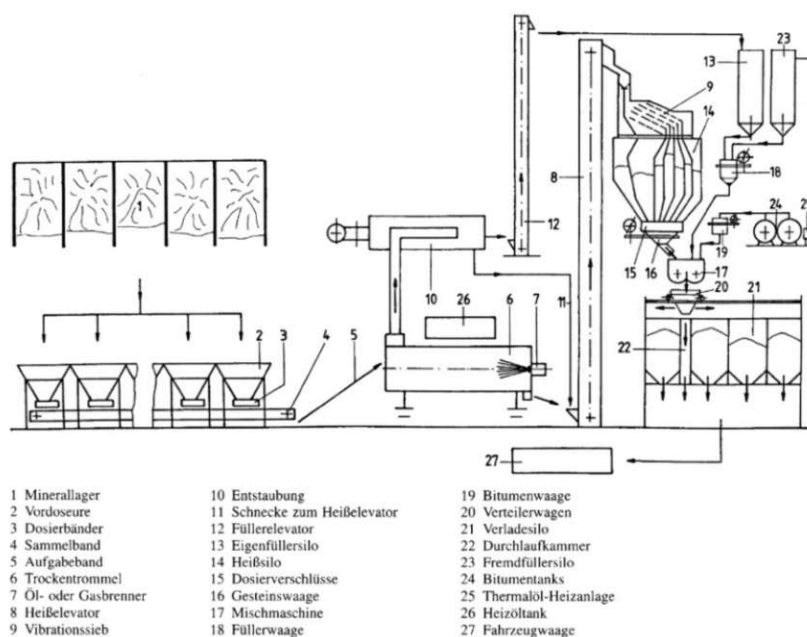


Abb. 2.9: Fließschema einer Asphaltmischanlage [20, S. 195]

In den folgenden Unterabschnitten wird noch genauer auf die Bauteile einer Asphaltmischanlage eingegangen.

Lagerung der Gesteinskörnung

Die Lagerung der Mineralien erfolgt getrennt nach Gesteinsart und -größe. Sie wird mittels Haufen, Boxen oder Hoch- bzw. Tiefsilos erreicht. Das Lagern in Haufen und Boxen kann sowohl ohne, als auch mit Überdachung erfolgen. Grundsätzlich ist es wünschenswert das Material vor Witterung zu schützen. Aufgrund von Wind wird vor allem der Fülleranteil des Gesteins reduziert. Durch die entstandene Nässe in der Gesteinskörnung als Folge von Regen können Produktionsschwankungen entstehen, da unter Umständen die Geschwindigkeit bzw. die Temperatur der Trockentrommel angepasst werden müssen. Dies kann negative Auswirkungen auf die Qualität des Gesteins haben [17][S.250-266].

Vordosierung der Mineralien

Die Vordosierung setzt sich aus mehreren, aneinander angeordneten Einzeldoseuren zusammen, welche nach Kornfraktionen aufgeteilt sind. Üblicherweise sind davon 10 bis 15 Stück vorhanden. Die Kubatur beträgt in der Regel 10 bis 15 Kubikmeter. Über ein Dosierband oder alternativ Vibrationsrinnen wird das Schüttgut dem Sammelband zugeführt. Die Länge dieses Bandes ist abhängig von der Anzahl der Einzeldoseure. Es besitzt eine Breite relativ zu der Größe der Mischanlage, welche 500, 650 oder 800 mm betragen kann. Das Sammelband transportiert die Mineralien zu dem Aufgabeband, welches dieselbe Breite hat und üblicherweise eine Länge von 15 bis 18 m. In Abb. 2.9 ist dies grafisch dargestellt [20, S. 196].

Trockentrommel und Heißelevator

Die Trockentrommel beinhaltet zwei Laufringe, welche auf vier Laufrollen gelagert werden. Der Antrieb kann direkt über die Laufrollen erfolgen, welche die Drehbewegung über Reibung anschließend auf die Laufringe übertragen. Eine andere Form des Trommelantriebs wäre eine Laschenkette und ein Getriebemotor. Aufgrund einer geringen Neigung⁷ der Trommel wird das

⁷ üblicherweise 4,5°

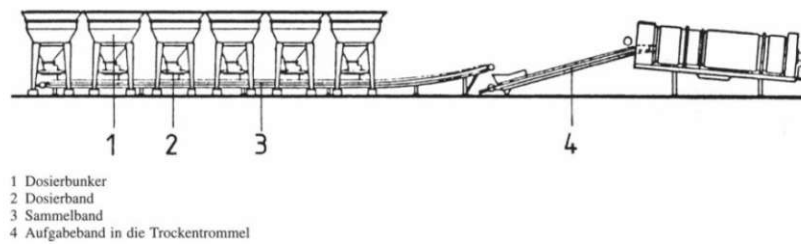


Abb. 2.10: Fließschema einer Asphaltmischanlage [20, S. 196]

Gestein über Leitbleche geleitet und in Richtung des Brenners weiterbefördert, wobei am Ende ein Austrag zum Heißelevator geschieht. Als Brenner kann ein Ölbrenner für leichtes Heizöl, ein Kombibrenner für leichtes Heizöl und Erdgas oder ein Kohlestaubbrenner genutzt werden. Zur Verhinderung einer Wärmeabstrahlung ist der Trommelmantel gedämmt. Ein Schema einer solchen Trommel ist in Abb. 2.11 ersichtlich. Die Abb. 2.12 gibt einen Einblick in das Innenleben einer Trockentrommel. Bei dem Heißelevator handelt es sich um ein Becherwerk, welches aus Stahlbechern und hochfesten Laschenketten aufgebaut ist. Dieser übernimmt die Funktion des Transportes der heißen Gesteinskörnung zur Siebmaschine [20, S. 196-197].

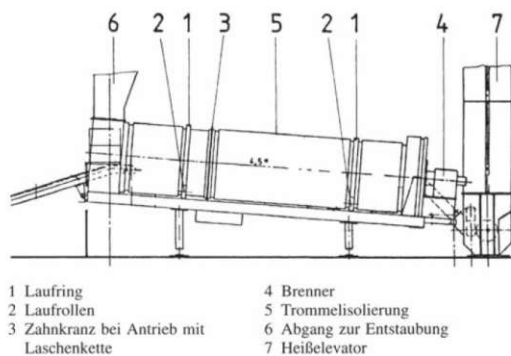


Abb. 2.11: Aufbau einer Trockentrommel [20, S. 197]



Abb. 2.12: Innenansicht einer Trockentrommel [21]

Entstaubung, Eigenfüller und Fremdfüller

Die Entstaubungsanlage muss auf die Größe der Trommel und ihrer Trockenleistung ausgelegt sein. Die groben Bauteile der Entstaubungsanlage beinhalten den Vorabscheider, den Feinfilter und einen Exhaustor mit Kamin. Letzterer saugt den Staub und die Abgase aus der Trockentrommel. Die groben Staubteilchen werden im Vorabscheider ausgeschieden. Der Feinfilter wird mit Filtertüchern aus synthetischen Fasern, welche in Form von Schläuchen angeordnet sind, ausgeführt. Dieser Schlauchfilter wird in regelmäßigen Intervallen abgerüttelt und mit Luft gegengeschpült. Diese gefilterten Staubpartikel gelangen in einen Sammelbehälter, der über Abzugsschnecken entleert wird. Der grobe Sand des Vorabscheiders wird in den Heißelevator gespeist und gelangt anschließend über das Heißeib in die Sandkammer des Heißmineralsilos. Der Feinfilterstaub wird mit einer Schnecke und einem Füllerelevator zu dem Eigenfüllersilo gebracht. Weil die Menge des Eigenfüllers meistens nicht ausreicht, steht zusätzlich ein Fremdfüllersilo zur Verfügung. Übliche Größen sind hierbei 30-50 m³. Die Förderung von den Silos zu den Füllerwaagen erfolgt mittels Schnecken [20, S. 197-198].

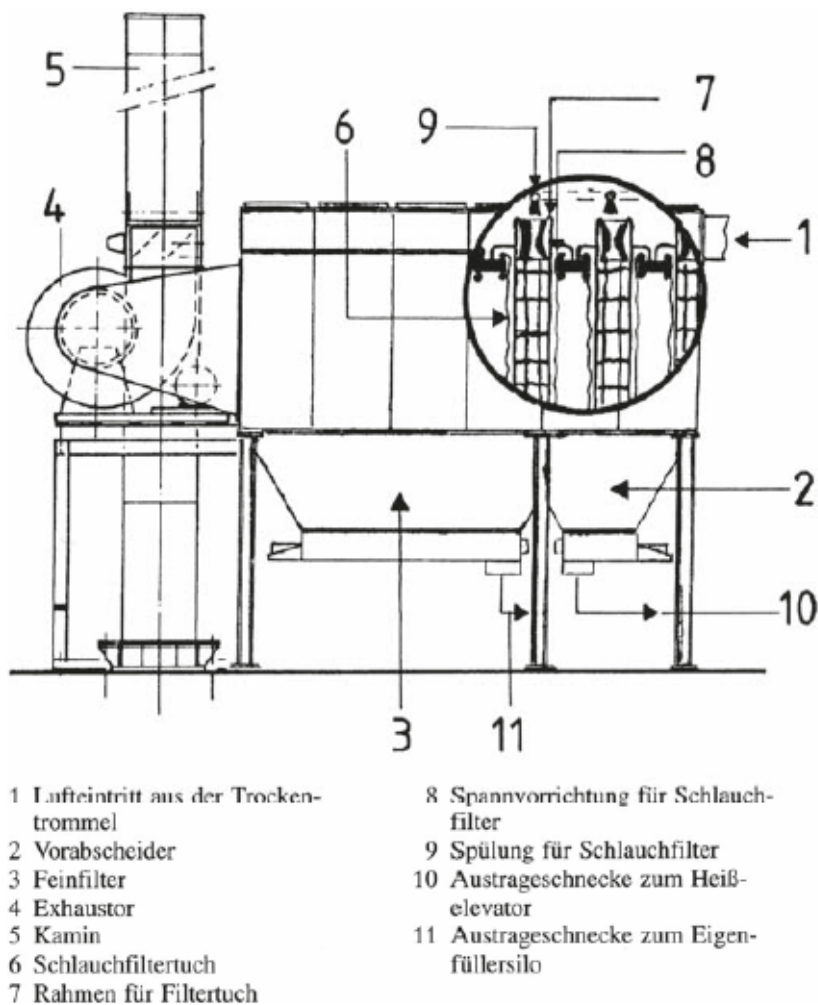


Abb. 2.13: Entstaubungsanlage [20, S. 197]

Mischturm

Von der Trockentrommel wird das aufgeheizte Material zum Mischturm hinauf transportiert. Dort wird es dann mittels Vibrationssieb auf 4 bis 6 Kornfraktionen aufgeteilt. Die nun folgende Lagerung erfolgt in den Heißmineralsilos. Dessen Dimensionierung ist stark davon abhängig ob es bei der Mischanlage zu Stoßzeiten kommt, oder die Mischgutsabnahme kontinuierlich erfolgt. Zusätzlich ist ein Bypass vorgesehen, um eine direkte Beschickung der Gesteinswaage und anschließend des Mischers zu ermöglichen. Die Heißmineralsilos sind stark isoliert. Das gewährleistet auch eine Verarbeitung am Folgetag. Bevor die einzelnen Materialien vermischt werden können, müssen diese unter Verwendung der nachfolgenden Waagen verwogen werden.

- **Gesteinswaage:** Hat eine Wiegefähigkeit von 1.500-4.000 kg. Dosierverschlüsse der Heißsilotaschen ermöglichen ein additives Verwiegen der Gesteinskörnungen nach Rezept, welche anschließend dem Mischer zugeführt werden.
- **Bitumenwaage:** Hat eine Wiegefähigkeit von 150-400 kg. Bitumen wird meistens verwogen, kann aber auch volumetrisch quantifiziert werden. Die Bitumenwaage ist isoliert und wird mit Thermalöl beheizt. Mittels einer Pumpe über eine Sprühvorrichtung wird das Bitumen nach der Verwiegen in den Mischer eingebracht.

- **Füllerwaage:** Hat eine Wiegefähigkeit von 300-750 kg. Die Beschickung erfolgt entweder über das Eigen- oder Fremdfüllersilo. Der Austrag in den Mischer geschieht über eine Schnecke.

Die üblichen Größen einer Mischmaschine sind 1.500-4.000 kg, wobei Zweiwellen-Zwangsmischer verwendet werden. Diese gewährleisten eine intensive Durchmischung der Asphalt-Bestandteile in kurzer Zeit [20, S. 198-199].

Bitumenlagerung und -erwärmung

Zum Zweck der Lagerung von Bitumen werden, präferiert, elektrisch beheizte, stehende Tanks verwendet, wobei übliche Tankgrößen 20.000 bis 60.000 l betragen. Diese Silos sind hochwertig isoliert, sodass das angelieferte Bitumen auch noch an dem fünften Tag ohne zusätzliche Beheizung eine ausreichende Verarbeitungstemperatur hat. Die elektrische Aufheizung wird mittels Heizstäben im Lagertankboden erreicht und beträgt eine ungefähre Leistung von 10 kW [20, S. 199-200].

Verladesilo

Üblicherweise sind 4 bis 8 Kammern welche jeweils eine Größe von 50 bis 500 t Inhalt haben, vorhanden. Das in der Mischmaschine vermischte Material fällt in einen Kübel der anschließend vollautomatisiert entweder schräg (nebenstehende Verladesilos) oder waagrecht (untergebaute Verladesilos) die richtige Kammer anfährt und entleert. Durch die gute Isolierung der Kammern kann das Material am Folgetag auch noch verwendet werden. Die Kammern sind oben durch Verschlussdeckel bedeckt, welche sich nur zum Befüllen öffnen. Die Verladesilos werden von Lkws unterfahren und mittels Augenschein befüllt. Die genaue Masse des Mischguts wird erst durch eine Wiegung beim Verlassen der Mischanlage bestimmt, wobei das Fahrzeuggewicht abgezogen werden muss [20, S. 200].

Verarbeitung und Aufbereitung von Asphaltgranulat

Das Asphaltgranulat, wobei es sich dabei um Recyclingmaterial handelt, entsteht durch das Zerkleinern der Schollen von ausgebauten alten Asphaltbelägen, welche während des Fräsvorganges entstehen. Die Korngröße des zerkleinerten Materials sollte 0/32 mm sein. Üblich ist hierbei die Verwendung von Prallmühlen. Das Ziel ist, die durch das Bitumen verbundenen Gesteinskörnungen zu trennen und dabei ein weiteres Zerkleinern der einzelnen Körner zu vermeiden. Die Materialaufgabe erfolgt meist mittels Hydraulikbagger. Da das Vorhalten einer Brechanlage meistens nicht wirtschaftlich ist, werden hierfür fahrbare Anlagen angemietet und das Recyclingmaterial auf Vorrat gebrochen [20, S. 204].

Das aufbereitete Altmischgut kann dem Produktionsprozess kalt oder warm zugeführt werden. Die Möglichkeiten der Kaltzugabe sind in Abb. 2.14 ersichtlich. Sie ist meistens nur für Asphalttragschichten erlaubt und darf 20-25 % der Chargenmenge nicht überschreiten. Da dieser Recyclinganteil einen großen Teil der Wärme aufnimmt, muss das Ausgangsmaterial auf eine höhere Temperatur aufgeheizt werden. Eine bestehende Gefahr ist die plötzliche Wasserdampfbildung, aufgrund des teilweise nassen Altasphalts. Hierbei ist eine Absaugung in der Mischmaschine notwendig [20, S. 202].

Bei der Warmzugabe, welche in Abb. 2.15 dargestellt ist, werden meistens separate Aufheiztrommeln verwendet. Die Beschickung dieser erfolgt über einen Aufgabebunker und einen Elevator bzw. ein Förderband. Das Material wird in der Aufheiztrommel mittels eines Öl- bzw. Gasbrenners gleichmäßig erhitzt und in einem Pufferbehälter gelagert. Danach wird es verwogen und chargenweise dem Mischer zugeführt. Bei Trag- und Binderschichten ist eine Zugabe von 50-60 % Recyclingmaterial zulässig [20, S. 202-203]. Eine alternative Art der Warmzugabe ist die mittels Mittenring. Hierbei wird lediglich eine einzelne Aufheiztrommel (kein Paralleltrommelbetrieb) verwendet, wobei der Altasphalt dem Trockner an einer Stelle geringerer Temperatur zugeführt

wird. Das Problem hierbei ist, dass es aufgrund des Bitumens zu Klumpenbildung kommen kann und diese Gesteinskörnungen anschließend nicht mehr richtig versiebt werden. Folglich muss auf die Bypass-Lösung, bei welcher das Gestein direkt in den Mischer kommt, zurückgegriffen werden. Diese Methode ist heutzutage eher unüblich [22].

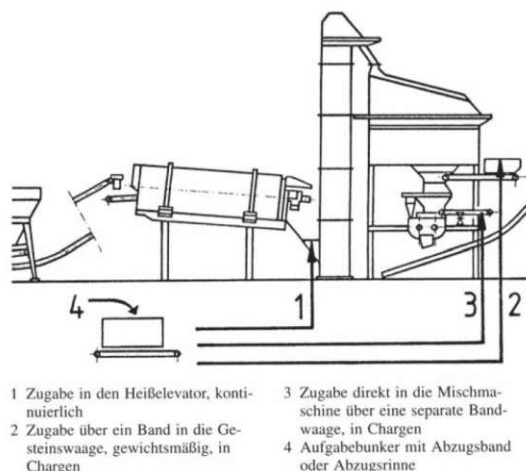


Abb. 2.14: Kaltzugabe von Recyclingmaterial [20, S. 203]

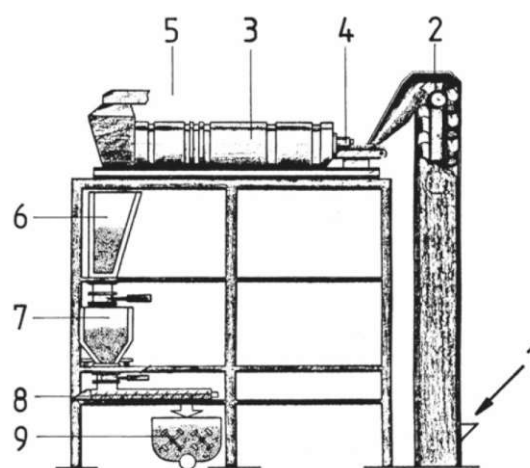


Abb. 2.15: Warmzugabe von Recyclingmaterial [20, S. 203]

Unter Umständen und den gegebenen technologischen Voraussetzungen ist auch ein reiner (100 %) Einsatz von Recyclingmaterial möglich [23]. Im Kapitel betreffend der Einsparpotentiale wird diesbezüglich näher darauf eingegangen.

Voraussetzungen für die Asphaltmischgutherstellung

Werden die Ausgangsstoffe von Asphalt betrachtet, sind folgende Teilprozesse zu berücksichtigen:

- Das Spektrum an Korngrößen der **Gesteinskörnungen** muss groß genug sein, um die Produktionspalette an Asphalten für die unterschiedlichen Verwendungszwecke abzudecken. Diese werden soweit möglich lokal; ansonsten, falls erforderlich, über größere Distanzen antransportiert.

Die *Lagerung* erfolgt in Haufen, Boxen oder in Hoch- bzw. Tiefsilos. Das Lagern in Haufen und Boxen kann sowohl ohne, als auch mit Überdachung erfolgen. Anschließend geschieht die *Vordosierung der Gesteinskörnungen*, welche abhängig von der Lagerungsart über Schaufelradlader oder über Silos mit Beschickungseinrichtung durchgeführt wird. Der Transport von Gesteinsgütern kann in der Mischanlage zusätzlich über Becherwerke (Elevator), Schwingförderer und Wurfbänder geschehen.

Diese Transportmechanismen werden verwendet um das Gestein von den Vordoseuren abzuziehen und zu der Trockentrommel, zur Erreichung einer *Trocknung*, zu befördern. Diese geschieht in einem speziell konstruierten Drehrohrföfen. Angetrieben wird dieser üblicherweise über Elektromotoren. Die Trocknungsflamme wird durch die Verbrennung von Heizöl, Erd- bzw. Flüssiggas oder Festbrennstoff erzeugt. Die Brennstoffmenge, die für 1 t Asphaltmischgut notwendig ist, schwankt zwischen 4 und 10 kg/t. Zur Kontrolle und zur Steuerung des Trocknungsprozesses werden Temperaturmessungen des auslaufenden Gesteines angestellt. Damit kann entweder die Temperatur bzw. die Durchlaufgeschwindigkeit der Gesteinskörnungen im Trocknungsöfen angepasst werden.

In den Abgasen der Trockentrommel befinden sich feine Partikel und Staubteilchen, welche eine *Entstaubung* erforderlich machen. Zur Abscheidung dieser ist eine Abgasreinigung

erforderlich, welche sich üblicherweise in zwei Stufen teilt. In der ersten Stufe, der sogenannten Grobreinigung, werden Feianteile mit einer Korngröße kleiner als 2,0 mm herausgenommen. Diese werden dem Strom der Gesteinskörnungen wieder zugeführt. In der zweiten Stufe wird der Feinstaub, auch Eigenfüller bezeichnet, zurückgehalten. Über eine getrennte Zuleitung wird dieser dem Mischprozess chargenweise rezeptgetreu zugeführt, wobei der überschüssige Feinstaub zwischengelagert wird. In Deutschland werden für die Entstaubung nur noch Textilfilter eingesetzt.

Vom Ausgang der Trockentrommel gelangt die heiße Gesteinskörnung zur Heißabsiebung oder über einen Bypass direkt zur Heißslierung. Erstere dient zum Ausscheiden von rezeptüberschreitenden Korngrößen⁸. Zusätzlich können damit Ungenauigkeiten aus vorhergehenden Schritten, wie der Vermischung verschiedener Korngruppen bei der Lagerung, die ungenaue Anzeige von Doseuren sowie die Aufgabe mehrerer Kornfraktionen auf Doseure ausgeglichen werden.

- Der letzte mögliche Bestandteil von Asphalt sind die **Zusätze**. Dabei kann es sich um Fasern oder Pellets handeln, welche insbesondere bei der Produktion von Splittmastixasphalten oder offenporigen Asphalten zugegeben werden müssen. Die Anlieferung der Zusätze kann lose (im Silofahrzeug oder Big Bags) oder in Paketform erfolgen [17, S. 250-266].

2.2.3.3 Asphalttransport

Walzasphalt, wie dieser im Straßenbau verwendet wird, kann mittels Hinterkipper-Lkw oder Lkw mit Abschiebevorrichtung zur Baustelle transportiert werden. Dabei sind die Mulden der Transportfahrzeuge wärmeisoliert und werden mit den Abgasen beheizt. Die Mischguttemperatur wird an verschiedenen Stellen des Fahrzeuges gemessen und dokumentiert. Um ein verfrühtes Abkühlen, und somit die Bitumenerhärtung, zu vermeiden, wird das Mischgut mit Planen abgedeckt. Weitere Vorteile der im Sinne der Abdeckung befestigten Plane sind der Schutz vor schädlichen Umwelteinflüssen (Fahrtwind, Niederschläge) und die Verhinderung oxidativer Schädigungen des Bitumens, welche einen Klebkraftverlust des Bitumens am Gestein zur Folge haben könnten. Bei dem Auftreten von langen Transportwegen oder des Transportes geringer Mengen an Asphalt ist die Verwendung von sogenannten Thermobehältern bzw. -mulden erforderlich. Diese werden von der Straßenbauverwaltung zur Steigerung der Einbauqualität zunehmend auch bei kürzeren Transportwegen gefordert. Für den Wegebau sollten vermehrt kleinere Lkws für den Asphalttransport genutzt werden. Damit wird, einerseits, das sowieso gering tragfähige Planum nicht zerstört und, andererseits, kann die Wendigkeit kleinerer Fahrzeuge bei beengten Platzverhältnissen vorteilhaft sein [12, S. 206] [17, S. 154].

2.2.3.4 Asphalteinbau

Grundlagen

Der Ausschreibung folgend wird in der Asphaltmischanlage, basierend auf der Erstprüfung, das geforderte Mischgut hergestellt. Die Produktion sowie der Transport des Asphalts müssen auf den Baufortschritt abgestimmt sein. Durch eine enge Zusammenarbeit muss gewährleistet werden, dass weder Einbaupausen als Folge eines Stillstandes des Fertigers aufgrund von fehlendem Asphaltmischgut entstehen, noch dass es zu einem Anstauen beladener Fahrzeuge vor dem Asphaltfertiger kommt. Bei zu langer Verweildauer des Mischguts im Lkw und daraus folgend, einer Temperaturreduktion unter die erlaubte Mindesttemperatur, darf dieses nicht eingebaut werden [17, S. 158].

⁸Über- und Unterkorn

Bezüglich des Bauablaufes und der Qualität der Straße wäre es optimal die gesamte Einbaubreite mittels eines Fertigers oder mit gestaffelt fahrenden Fertigern, also heiß auf heiß, einzubauen. Meistens ist dies jedoch nicht möglich, weshalb das Asphaltmischgut in einzelnen Bahnen eingebaut wird. Diese müssen, genauso wie die Schichten, hergestellt werden, sodass sie einen fugenlosen, kompakten Baukörper ergeben. Übereinander positionierte Nähte sind versetzt anzuordnen [17, S. 158].

Vorbereitung der Unterlage

Als Voraussetzung für den Asphalteinbau gilt die standfeste, tragfähige, profilgerechte und ebene Position der Unterlage. Wird diese ungebunden ausgeführt sind entsprechende Tragfähigkeiten einzuhalten, welche überprüft werden müssen und unter Umständen zu erforderlichen Nachbesserungen führen [17, S. 159].

Gebundene Unterlagen müssen frei von losen Bestandteilen und Verschmutzungen sein, was mittels Kehmaschine erreicht werden kann. Bei starker Schmutzansammlung kann diese auch mit einem Hochdruckwasserstrahl entfernt werden, wobei vor der weiteren Ausführung ein Abtrocknen sicherzustellen ist. Der verbleibende Schmutz verringert den Schichtverbund und stellt somit einen Qualitätsverlust dar [17, S. 159].

Zur Herstellung des erforderlichen Schichtenverbundes zwischen den Asphaltsschichten, wird auf die jeweilige Unterlage eine Bitumenemulsion aufgespritzt. Diese ist bei niedrigen Außentemperaturen unter Umständen vorzuwärmen. Bei der Dosierung dieser ist die Rauheit und Porosität der Unterlage sowie die Art dieser zu beachten. Das Vorspritzen geschieht üblicherweise mit Rampenspritzgeräten, da sich dadurch eine gleichmäßige Verteilung ergibt. Die vorgespritzten Flächen dürfen nur noch beim Asphalteinbau befahren werden [17, S. 159].

Der Einbau auf nasser Oberfläche sollte, wenn möglich, vermieden werden. Aufgrund der Nässe wird dem Asphalt Wärme entzogen, wodurch sich der Haftverbund verschlechtert und sich die Gefahr einer zu geringen Verdichtung, aufgrund der geringeren Bearbeitungszeit der Walzen, ergibt. Zusätzlich entsteht durch das Asphaltieren auf nasser Oberfläche sofort Wasserdampf, der das Entstehen eines Kapillarsystems im Mischgut zur Folge hat, und bei ungünstigen Bedingungen nicht mehr durch das Walzen ausgebessert werden kann [17, S. 160].

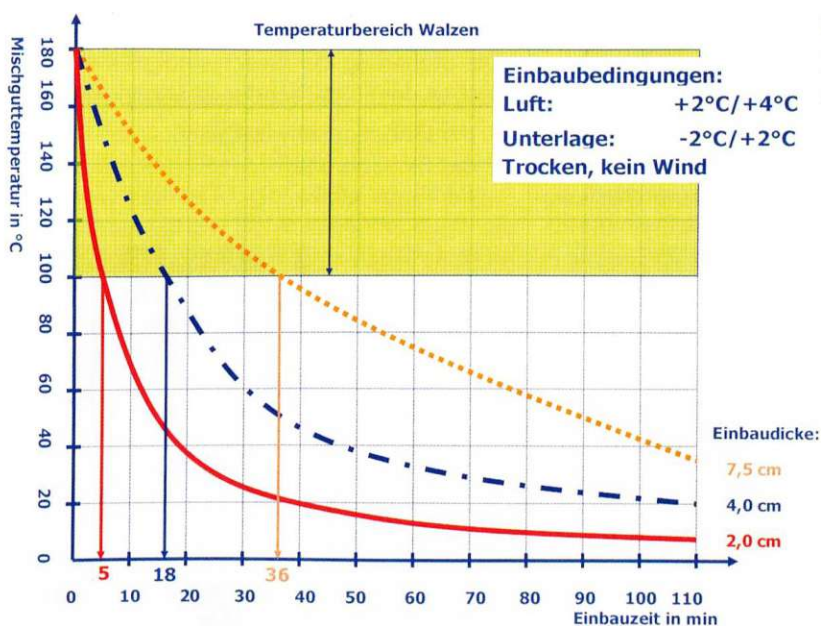


Abb. 2.16: Zusammenhang Einbaudicke-Einbauzeit-Mischguttemperatur [20, S. 197]

Einbaudicke

Die Dicke der Asphaltsschicht hat einen direkten Einfluss auf die Dauer, welche für den Einbau und das Verdichten zur Verfügung steht. Für eine dicke Tragschicht steht vergleichbar viel Zeit zum Verdichten zur Verfügung. Kritischer ist der Einbau von dünneren Deckschichten, insbesondere bei ungünstigen Witterungsbedingungen. In dem Diagramm Abb. 2.16 ist dieser Zusammenhang dargestellt [17, S. 161].

Einbau des Asphaltmischguts

Zum Einbau von Asphaltmischgut könnten unterschiedliche Methoden zur Anwendung kommen, wobei die häufigste die Verwendung eines Straßenfertigers ist. Dabei handelt es sich auch um die qualitativ hochwertigste Möglichkeit. Für untergeordnete Tragschichten kann auch ein Grader zum Einsatz kommen. Der Handeinbau soll auf ein Minimum begrenzt werden [17, S. 162].

Der Straßenfertiger besteht grundsätzlich aus der Antriebsmaschine mit Fahrwerk und der Verteiler- und Einbaueinheit. Der Antrieb erfolgt hierbei über einen Dieselmotor, teilweise mit Turbolader⁹, auch Saugmotor genannt. Der Asphaltfertiger kann mit Kettenfahrwerk oder als Radfertiger eingesetzt werden. Auch auf die Art der Schicht bezogen ist der Fertiger variabel einsetzbar. Sowohl Asphaltsschichten, hydraulisch gebundene Schichten, als auch ungebundene Gemische können erzeugt werden. Fertiger mit Raupenfahrwerk haben den Vorteil einer größeren Einbaubreite (bis ungefähr 16 m) als Radfertiger (bis ungefähr 8 m) [17, S. 162].

Der Materialfluss beginnt mit dem Aufgeben des Mischguts in den Materialkübel durch einen Lkw, welcher über an dem Fertiger angebrachten Schubrollen durch Drücken der Lkw-Räder vor diesem hergeschoben wird. Über Förderbänder wird das Asphaltmischgut zu den Verteilerschnecken gebracht. Um eine Entmischung zu verhindern soll der Kübel während des Einbaus möglichst nicht leer gefahren werden. Nun wird über die Verteilerschnecken das heiße Material vor die Einbaubohle gebracht, wo Sensoren die Mischgutmenge messen und den Mischgutdurchsatz sowie die Geschwindigkeit der Verteilerschnecken regeln. Die Vorverdichtung geschieht über die Einbaubohle, wodurch bereits ein Verdichtungsgrad von 90 % erreicht werden kann. Durch eine modifizierte Ausführung sind Verdichtungswerte von bis zu 98 % möglich. Die anschließende Verdichtung durch Walzeneinsatz wird damit nicht ersetzt. Um Anforderungen bezogen auf Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad zielsicher erfüllen zu können, ist das Verdichten durch Walzen unbedingt erforderlich [17, S. 162-164].

Die zur Steuerung der Ebenheit eingesetzten Methoden sind in folgender Auflistung dargestellt [17, S. 164-165]:

- Abtasten eines gespannten Drahtes
- Schleppski zum Abtasten des Planums als Referenz
- Messrad mit Impulszähler zur Positionsbestimmung
- Lasergesteuerte Nivellierautomatik

Die bewährte Methode bisher ist das Spannen von Leitdrähten, welche als Referenz für Einbauhöhe und -lage verwendet werden. Weil es sich bei dem Spannen dieser Drähte um zeitintensive Arbeit handelt, entstehen dadurch hohe Kosten. Der moderne Ansatz ist die Nutzung von sogenannten 3D-Fertigern, welche basierend auf einem 3D-Modell, welches von dem Vermesser bereitgestellt wird, neben der Nivellierung auch die Steuerung der Einbaulage und der Einbaurichtung vollautomatisch und hochpräzise übernimmt. Besonders bei dem Autobahnbau ist diese Methode, aufgrund der hohen Präzision und der Wirtschaftlichkeit, bereits Praxis [17, S. 165].

⁹Die Verbrennungsluft im Motor wird damit vorverdichtet, wodurch eine höhere Leistung ermöglicht wird.

Die Einbaulage wird hierbei über die Bohlenausziehteile geregelt, wobei Wegsensoren an der Unterseite der Bohle die aktuelle Breite der Einbaubohle ermitteln. Das System überwacht Querneigung, Einbauhöhe und Position der Bohle ständig und führt einen Soll-Ist Vergleich durch. Diese vollautomatische Abarbeitung des Projektes ist, besonders bei Bauvorhaben mit mehrfachen Änderungen in Einbauhöhe und Querneigungen, ein entscheidender Vorteil [17, S. 165].

Eine Sonderform des Fertigers ist der Straßenfertiger mit einer integrierten Vorsprüheinrichtung. Damit wird direkt vor dem Einbau über den Fertiger und einem auf diesem positionierten Bitumenemulsions-Tank eine Aufbringung des Vorspritzmittels erreicht. Die Fläche ist somit unbeschädigt und wurde weder von anliefernden Lkws noch sonstigen Fahrzeugen befahren [17, S. 166-167].

Verdichten des Asphaltmischgutes

Um eine optimale Verdichtung des Asphaltmischgutes zu erreichen, stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung: die Verwendung von statisch oder dynamisch wirkenden Walzen.

Die Verdichtungswirkung statischer Walzen wird vor allem durch den Vertikaldruck erreicht, welcher aus dem Gewicht der Bandage über der zu verdichteten Fläche resultiert. Dieser Walzen-Druck wird auch statische Linienlast genannt und ergibt sich durch den Quotienten der Achslast zur Bandagenbreite. Je weiter die Verdichtung fortschreitet, desto größer wird der spezifische Flächendruck aufgrund der verkleinerten Berührungsfläche. Wird die statische Linienlast erhöht, vergrößert sich auch die Tiefenwirkung [17, S. 175].

Ein großer Durchmesser des Walzenrades hat eine Minimierung der vertikalen Verschiebung zur Folge. Der Walzantrieb beeinflusst die horizontalen Bewegungen. Dabei werden angetriebene und nicht angetriebene Bandagen unterschieden, wobei erstere im Rahmen des Walzvorganges höher belastet werden können [17, S. 175-176].

Bei der nicht angetriebenen Bandage wird das Mischgut in Form einer „Bugwelle“ vor dieser hergeschoben. Um die Ebenheit der Oberfläche zu gewährleisten ist es notwendig den frisch eingebauten Asphalt mit der angetriebenen Bandage vorzuverdichten. Bei höheren Steigungen fährt die nicht angetriebene Bandage voraus, um das Durchdrehen der angetriebenen Bandage auf dem weichen, noch unverdichteten Mischgut zu verhindern [17, S. 176].

Bei dynamischen Walzen, auch Vibrationswalzen genannt, wird die Verdichtung mittels Anregung des Asphaltmischgutes durch Schwingungen erreicht, was wiederum eine Kornumlagerung zur Folge hat. Dabei entstehen diese Schwingungen durch Einbringung von schnellen, aufeinanderfolgenden Kraftimpulsen in den durch den Fertiger eingebauten Asphalt. Die in folgender Aufzählung genannten Parameter haben einen Einfluss auf die Verdichtungswirkung [17, S. 176-179]:

- **Das Gewicht der Walze:** Dieses wird mittels der Walzenbandagen in die Asphaltschicht eingetragen. Die dynamische Verdichtung erfordert ein geringeres Gewicht als die statische.
- **Die schwingende Masse:** Dabei handelt es sich um einen Bestandteil der Masse der Bandage. Diese wird durch Erregung in Schwingung versetzt. Durch Adaptierung der Größe der Masse kann die Verdichtungswirkung angepasst werden. Diese erhöht sich mit der Größe der schwingenden Masse, wodurch auch die wirksame Tiefe größer wird.
- **Die Frequenz und Amplitude:** Bei der Amplitude handelt es sich um den Weg, welcher durch das vibrierende Walzenrad, aufgrund der Anregung der schwingenden Masse zurückgelegt wird. Wird diese Distanz erhöht, folgt damit eine Vergrößerung der Tiefenwirkung und eine erhöhte Verdichtung. Jedoch darf diese Amplitude nicht zu groß ausfallen, da Folgen unter anderem Auflockerungen, Unebenheiten und Kornzertrümmerungen sein könnten.

Abhängig davon, welche Schicht verdichtet wird, Asphaltdeck- bzw. Asphaltbinderschichten (0,4 bis 0,6 mm) oder Asphalttragschichten (maximal 1,0 mm), sind empfohlene Amplituden vorhanden. Die Frequenz bezeichnet die Anzahl der Schwingungen der Bandage pro Sekunde. Als Richtwert kann hierbei eine Mindestfrequenz von 45 Hz angenommen werden. Die Verwendung von Oszillationstechnik in der Mischgutverdichtung ist eine Alternative zur reinen Vibrationsverdichtung, wobei auch hier eine dynamische Verdichtung erfolgt. Diese ist für jede Asphaltart sowie Schichtdicke verwendbar. Zusätzlich kann auf eine mechanische und elektronische Regelung und Messtechnik verzichtet werden. Dies folgt aus der Konstruktion des Oszillators. Die Bandage der aufliegenden Walze erzeugt eine oszillierende Drehbewegung, die an der Tangente des Walzmantels Scher- und Schubkräfte in das Material einleitet. Aufgrund des geringen Verdichtungswiderstandes in wenig verdichtetem Mischgutes, erfolgt hier eine relativ hohe Drehbewegung. Mit der fortlaufenden Verdichtung erhöht sich der relative Verdichtungswiderstand, wodurch die Amplitude des Oszillators automatisch kleiner wird. Folgend kann die Oszillatorbandage auf veränderte Mischgutbeschaffenheiten ohne Regelverzögerungen reagieren. Besonders gefordert sind solche Oszillatorwalzen bei Brückenarbeiten, da hierbei aufgrund der fehlenden schädigenden Erschütterungen auch eine Beschädigung des Brückenbauwerks vermieden werden kann. Außerdem kühlt besonders bei Brückenarbeiten das Mischgut schnell ab, wodurch die Oszillationstechnik hier vorteilhaft ist, da diese auch bei niedrigen Asphalttemperaturen eingesetzt werden kann.

- **Die Geschwindigkeit der Walze:** Aufgrund der Vergrößerung der Geschwindigkeit, erhöht sich der räumliche Abstand zwischen zwei vertikalen Bewegungen der schwingenden Masse der Bandage. Eine Kombination aus hoher Geschwindigkeit und geringer Frequenz hat eine Erhöhung des Vibrationsabstands und der Tiefe der Querwelle zur Folge. Dadurch verringert sich wiederum die Ebenheit der Schicht. Eine Vibrationswalze kann schneller als eine rein statisch wirkende Walze fahren. Es ergeben sich günstige Geschwindigkeiten, welche abhängig von der Schichtdicke im Intervall von 2 bis 6 km/h variieren.

Werden die Arten von Walzen betrachtet, können diese für die Verwendung der Verdichtung im Asphaltstraßenbau eingeschränkt werden [17, S. 179-181]:

- **Statische Dreiradwalze (Glattmantelwalze):** Diese haben heutzutage drei gleich große Walzenräder beziehungsweise drei Antriebsräder. Ältere Modelle haben zwei größere Antriebsräder und ein kleineres, nicht angetriebenes Rad zum Steuern. Durch das Variieren der Wassermenge des Ballasttanks kann die Verdichtungswirkung gesteuert werden.
- **Tandemwalze mit Vibration:** Üblicherweise sind beide Bandagen angetrieben und vibrationsfähig. Ohne Vibration werden diese vor allem zum Andrücken von niedrig vorverdichtetem Mischgut, bzw. zum Bügeln von Deckschichten verwendet. Mit Vibration erfolgt die Hauptverdichtung, besonders bei dicken Asphalttragschichten. Sie bewegen sich bezüglich ihrer Masse im Rahmen von 2-15 t.
- **Knickgelenkte Tandemwalze:** Werden bevorzugt auf Stadtstraßen, Autobahnen und kurvenreichen Strecken mit geringen Kurvenradien eingesetzt. Mittels Hundegang¹⁰ wird die Arbeitsbreite erhöht. Eine freie Sicht auf die Bandagenoberfläche, deren Außenkante und das Arbeitsumfeld ist vorhanden. Das Dienstgewicht beträgt 2-18 t.

¹⁰Durch das seitliche Versetzen der beiden Bandagen wird mit diesem Verfahren das Verteilen der Walzenmasse auf einer größeren Fläche erreicht.

- **Oszillationswalze:** Das Gewicht dieser Walzen bewegt sich in einem Rahmen von 6-12 t. Sie werden vor allem zur Hauptverdichtung und in Bereichen mit der Notwendigkeit für sensible Verdichtungstechnik, wie zum Beispiel auf Brückentragwerken, verwendet.
- **Gummiradwalze:** Diese besitzen über 7-11 Gummiräder. Die Steuerung der Verdichtung erfolgt hierbei mittels der Variation der Last (Sand oder Wasser) sowie der Anpassung des Luftdrucks, wobei dieser in allen Reifen gleich sein muss. Eingesetzt werden diese Geräte für Vorprofilierungen, die Hauptverdichtung, jedoch nicht bei schwer verdichtbarem Material wie Splittmastixasphalt und dem Oberflächenschluss. Das Dienstgewicht beträgt hierbei 10-35 t.
- **Kombiwalze:** Diese Walzen kombinieren drei oder vier Gummiräder mit einem vibrierenden Stahlrad, wodurch diese Art von Geräten vielfältig einsetzbar ist. Bevorzugt werden sie für kleinere Flächen und Steilstrecken verwendet. Je nach Dienstgewicht können diese bei Radwegen, ländlichen Wegen, Stadtstraßen und Autobahnen zum Einsatz kommen.
- **Platten und Stampfer:** Es handelt sich dabei um Kleingeräte mit einer Masse von 40-20 kg, welche schnell umgesetzt werden können. Sie werden vor allem bei kleinen Baustellen, Grabenabdeckungen und Flickstellen verwendet.

Das Walzen gliedert sich in mehrere Teilprozesse. Abhängig von der Art der verrichteten Arbeit muss unter Umständen auch die Wahl der eingesetzten Walze adaptiert werden [17, S. 184].

- **Andrücken:** Es handelt sich hierbei um einen Walzgang mit niedriger Linienlast, welcher notwendig ist, wenn das Mischgut in dicken Lagen unter niedriger Vorverdichtung eingebaut wurde und leicht verdichtbar ist. Alternativ kann ein Andrücken bei sehr heißem Mischgut mit hoher Schichtdicke notwendig sein.
- **Hauptverdichtung:** Dies ist der Hauptprozess, welcher vor allem für die Verdichtung des Asphalts verantwortlich ist. Es werden Dreirad-, Tandem-, Gummirad- und Kombiwalzen verwendet.
- **Nachwalzen:** Wird auch als „Bügeln“ bezeichnet. Zweck dieses Walzanges ist die Schaffung einer ebenen Oberfläche und eines Porenschlusses der Deckschicht. Der Übergang erfolgt auf Mischgut unter 100 °C und muss mit statischen Walzen oder Gummiradwalzen erfolgen.
- **Nahtwalzen:** Das Walzen der Nähte wird üblicherweise mit der Hauptverdichtungswalze, jedoch nicht mit einer Gummiradwalze, durchgeführt.

2.2.3.5 Nebenleistungen

Im Gegensatz zu den Hauptleistungen, welche einen direkten Bezug zu der Erstellung der Straße haben (Lkw liefert Asphalt, Fertiger baut Asphalt ein, Walze verdichtet Asphalt), kann bei den Nebenleistungen nur ein indirekter Zusammenhang festgestellt werden. Diese werden definiert als Leistungen, welche den Baustellengemeinkosten zugeordnet werden. Aufgrund ihrer geringen Signifikanz bezüglich des Ausstoßes von THG-Emissionen im Verhältnis zu dem Gesamtprojekt werden diese oft nicht berücksichtigt, weshalb auch Datensätze diesbezüglich rar sind. Mögliche Nebenleistungen im Rahmen von Asphaltbaustellen sind in folgender Liste ersichtlich:

- Diverse Pkw-Fahrten:
 - Kalkulant in der Ausschreibungsphase zur Überprüfung der Verhältnisse vor Ort mittels Pkw.

- Arbeiter für die Durchführung der Baustelleneinrichtung und -räumung, Durchführung der Fräs- und Asphaltierarbeiten (Verrichtung der Hauptleistungen) mittels Pkw sowie Kleintransporter (Pritsche).
 - Mechaniker für Reparaturzwecke mittels Pkw sowie Kleintransporter.
 - Anfahrt unterschiedlicher Beteiligter und Entscheidungsträger mittels Pkw (Projektleiter, Bauleiter, Techniker, Polier, Laborant, örtliche Bauaufsicht, Digitalisierungsexperten etc.) während der Bauausführung.
- An- und Abtransport des notwendigen Absperrmaterials (Zäune, Schilder, etc.) im Rahmen der Baustelleneinrichtung, bzw. Baustellenräumung mittels Lkw.
 - Einsatz von Bagger für kleinere Hilfsarbeiten z.B. einer auftretenden Verschmutzung durch verschütteten Asphalt.

Pkw-Anfahrten, welche direkt den Hauptleistungen zugeordnet werden können, sind die Personentransporte der Baustellenteams und somit der produktiv beteiligten Arbeiter zur Baustelle.

2.3 Einsparpotentiale

Aufgrund unterschiedlicher Anpassungen im Prozess ist eine mehr oder weniger große Einsparung an Treibhausgasemissionen möglich. Diese Optimierungen können organisatorische Maßnahmen in der Ausführung und auf der Mischanlage, Modifikationen in der Mischgutherstellung bzw. der Mischanlage oder der Wahl eines alternativen Kraftstoffs sowie Antriebs darstellen.

2.3.1 Organisatorische Maßnahmen

Durch organisatorische Maßnahmen können vor allem Emissionen im Transport eingespart werden. Die Reduktion vor Ort auf der Baustelle bei Leistungsgeräten werden verhältnismäßig gering ausfallen. Hierbei kann lediglich auf Schulungen verwiesen werden, welche ein ressourcensparendes Arbeiten vermitteln, bzw. eine erhöhte Energieeffizienz zur Folge haben. Beispielsweise kann das Schließen der Fenster bei laufender Klimaanlage oder Heizung erwähnt werden [24]. Durch Nutzung von Systemen zur flächendeckenden, dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) auf den Walzen ergibt sich hierbei ein weiteres Potential zur Einsparung von Treibhausgasemissionen. Der Walzenfahrer bekommt eine Rückmeldung über die Anzahl der Überfahrten, welche er sowie die anderen Lenker getätigt haben. Somit kann durch Berücksichtigung der maximalen und minimalen Überfahrtsgrenze ein optimales Walzschema eingehalten werden. Die dadurch erlangten Daten können zusätzlich zu Schulungszwecken genutzt werden.

Eine weitere organisatorische Maßnahme ist die Schaffung eines digitalen Prozessablaufs mittels Einführung eines Prozessoptimierungsprogramms. Durch die Optimierung der Prozesse besteht die Möglichkeit die täglichen Arbeitszeiten zu verringern, und somit ebenfalls die Betriebsstunden von Baumaschinen zu reduzieren.

Der digitale Prozess beginnt mit einem Kick-Off in Form eines Startgesprächs. Hierbei geht das Projekt von der Kalkulation zu der Bauleitung über. Die Einbauplanung beginnt mit der manuellen Eingabe der notwendigen Daten in die Prozessoptimierungssoftware. Daraus lässt sich sowohl die Ressourcenplanung sowie die Arbeitsvorbereitung softwaregestützt ableiten [25, S. 41].

Die Ausführungsphase beginnt bei dem digitalen Prozess mit dem Versenden der Zugangsdaten zur Software wenige Tage vor Einbaubeginn an alle involvierten Parteien (Mischanlage, Fräher, Einbaupartei). Abhängig von dem Kenntnisstand der Mitarbeiter ist hierbei eine entsprechend intensive Schulung notwendig. Um die Kommunikation der am Prozess Beteiligten zu vereinfachen,

ist es möglich sich direkt über die Software auszutauschen. Damit können, einerseits, Missverständnisse, welche durch ein Telefonat auf der Baustelle mit dem entsprechenden Baustellenlärm entstehen können, vermieden werden und, andererseits, sind alle involvierten Parteien sofort und gleichzeitig erreichbar und können somit direkt über beispielsweise einen Unfall oder ein Mischanlagebrechen informiert werden [25, S. 41-43].

Weiterhin erlaubt das Programm eine klare Darstellung des Prozesses in Echtzeit, womit der Fortschritt aus der Ferne mitverfolgt werden kann. Die involvierten Parteien werden immer auf dem aktuellen Stand der Baustelle gehalten.

Wird der Taktplan aus der Planung einwandfrei eingehalten, können sich monetäre Ersparnisse aus dem optimierten Transport ergeben, da Stehzeiten auf der Baustelle, wie auf der Mischanlage, vermieden werden. Zusätzlich wird dem Erkalten des Mischguts vorgebeugt und somit die Qualität der Asphaltstraße hochgehalten.

Auf der Mischanlage ergeben sich Einsparungen aufgrund des optimierten Transportes und der stetigen Echtzeitinformatoren. Denn dadurch muss die Mischanlage nicht abgeschaltet werden beziehungsweise kann ein solches Herunterfahren zu einer günstigen Zeit geschehen, sodass es mit organisatorisch geplanten Fertigerstillständen (z.B. im Rahmen des Umsetzens des Fertigers) auf der Baustelle koordiniert wird.

Auf der Baustelle kann die Fertigergeschwindigkeit konstant gehalten werden, wodurch die Qualität des Einbaus steigt. Zusätzlich können sich baustellenseitig, aufgrund der Prozessoptimierung, Zeitersparnisse ergeben, wodurch das Baustellenpersonal kürzere Arbeitszeiten hat, was wiederum eine Kostenersparnis bedeutet. Weiterhin ist davon auszugehen, dass bei solchen Arbeitszeitverkürzungen ebenfalls die Betriebsstunden der einzelnen Maschinen sinken. Falls keine zusätzlichen Maschinen als Folge der gesteigerten Effizienz benötigt werden (z.B. zusätzliche Walze, weil aufgrund einer höheren Fertigergeschwindigkeit die Verdichtungsleistung nicht mehr ausreichend ist), wird es hierbei zu einer Reduktion des Dieserverbrauchs kommen.

2.3.2 Mischgutherstellung

Im Rahmen der Mischgutherstellung ergeben sich vor allem THG-Einsparpotentiale durch die Anpassung der Mischgutrezeptur. Folgend wird auf die Form des Warmmischasphaltes (temperaturabgesenkter Asphalt) und die Adaption des Mischguts durch Zugabe von Recyclingmaterial eingegangen. Zusätzlich können Modifikationen an der Mischanlage zu einer Einsparung von Treibhausgasen beitragen, wobei diesbezüglich auf eine Überdachung der Gesteinskörnung und eine mögliche Anpassung der Organisation der Mischgutherstellung eingegangen wird.

2.3.2.1 Warmmischasphalt (WMA)

Warmmischasphalt oder auch Warm Mix Asphalt (WMA) Technologien haben das Potential die Einbautemperatur von Heißmischasphalt zu reduzieren und gleichzeitig die Verarbeitbarkeit zu verbessern ohne die Leistung des Mischguts zu verschlechtern [10, S. 309].

An dem Konzept wurde bereits Mitte des 20. Jahrhunderts geforscht, jedoch wurde die Idee des modernen WMA in Deutschland geboren. Dort wurde die Viskosität des Mastixasphaltes mittels Wachs-Zusätzen modifiziert. Seitdem haben sich unterschiedliche Technologien entwickelt. Anfang des 21. Jahrhunderts wurde WMA das erste Mal in den USA verwendet. Seitdem haben diese sich als Weltführer von WMA-Technologien etabliert. In Europa wird Warmmischasphalt eher als Nischenprodukt für spezielle Anwendungen, welche eine bessere Verarbeitbarkeit benötigen oder sich in umweltkritischen Zonen befinden, genutzt. Ebenfalls bedeutend ist diese Technologie bisher bei Projekten, welche nur ein geringes Zeitfenster für die Durchführung haben (Flugflächen, Nacharbeit) [10, S. 309-310].

Die Produkte werden nach ihrer Entwicklungstechnik drei Kategorien gegliedert:

- Schaumtechnologien
- Organische- und Wachs-Zusätze
- Chemische Zusätze

Manche dieser Technologien basieren auf der permanenten oder temporären Veränderung von den Bindemittel-Eigenschaften, wie der Reduktion der Viskosität. Andere funktionieren über die Verbesserung der Umhüllung der Zuschlagstoffe mittels der Erhöhung von Adhäsion zwischen Zuschlag und Bindemittel oder das Einbringen von oberflächenaktiven Mitteln zur Verbesserung der Benetzbarkeit [10, S. 310].

Oft wird Warmmischasphalt definiert als ein Heißmischasphalt, dessen Temperatur um mindestens 17 °C reduziert wurde, wobei dies stark von dem Typ des Bindemittels und der Referenztemperatur des Heißmischguts abhängt. Alternativ wird in der Literatur folgende Charakterisierung der Asphalte aufgrund ihrer Mischtemperatur getroffen [10, S. 317]:

- Kaltmischgut (bis 30 °C)
- Halb-Warmmischgut (65-100 °C)
- Warmmischgut (100-140 °C)
- Heißmischgut (über 140 °C)

Durch die Verwendung von Warmasphalt anstatt von Heißasphalt und der damit verbundenen Reduktion der Produktionstemperatur und verbesserten Verarbeitbarkeit, ergibt sich ein signifikantes Potential zur Reduktion des Energieverbrauchs in der Asphaltindustrie. Die Vorteile sowie gewisse Sorgen betreffend des Einsatzes von Warmasphalt lassen sich in vier Kategorien zusammenfassen [10, S. 310]:

- Asphalteinbau
- Asphaltproduktion
- Ökologisch
- Ökonomisch

Asphalteinbau

Bei einer gegebenen Temperatur verbessern WMA-Technologien die Verarbeitbarkeit verglichen mit Heißasphalt. Üblicherweise ist diese bei Warmmischasphalt auch bei niedrigeren Temperaturen besser. Das bedeutet, dass das WMA-Mischgut langsamer abkühlt, wodurch sich ein längeres Zeitfenster zur Verdichtung ergibt. Deshalb wird Warmmischasphalt gerne bei kalten Temperaturen verwendet, wodurch der Asphalteinbau in der Nacht sowie in großen Höhen ermöglicht wird. Ähnlich verhält es sich bei der Transportdistanz zur Baustelle, welche aufgrund der Verarbeitbarkeit bei niedrigeren Temperaturen vergrößert werden kann. Weiters kann durch die Verwendung von Warmmischasphalt, wenn dieses bei niedrigen Temperaturen eingebaut wird, die Abkühlzeit reduziert werden. Dies kann insbesondere auf Flughäfen vorteilhaft sein, wo das Zeitfenster für die Durchführung solcher Asphaltarbeiten sehr klein sein kann [10, S. 310-311].

Asphaltproduktion

Warmmischasphalt kann in bereits existierenden Mischanlagen durch Zubau der notwendigen Ausrüstung für die entsprechende Technologie produziert werden. Ein großer Vorteil ist die potentielle Nutzung von mehr Recyclingmaterial, auch Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) bzw. Reclaimed Asphalt Shingles (RAS), in dem Mischgut. Aufgrund der besseren Verarbeitbarkeit auch bei niedrigeren Temperaturen müssen die Rohstoffe nicht so sehr erhitzt werden. Deshalb wird bei der Zugabe von Recyclingstoff der unvorteilhafte Alterungsprozess des bereits steifen Bindemittels verringert [10, S. 311-312].

Ökologisch

Einer der größten Vorteile von WMA ist die Reduktion des **Energieverbrauchs**. In einer Schätzung wurde mit einer Abminderung der Asphalttemperatur um 6 °C eine Verkleinerung des Treibstoffverbrauchs von 2-3 % festgestellt. In praktischen Untersuchungen von Mischanlagen konnte eine Einsparung des Treibstoffes um durchschnittlich 23 % bestimmt werden. Dabei war die durchschnittliche Temperaturreduktion bei 27 °C [10, S. 312-313].

Mit der Verringerung des Treibstoffverbrauchs kommt es ebenfalls zu einer **Emissionsreduktion**. Hier herrscht eine lineare Beziehung. Eine Untersuchung, bei der eine Reduktion des Treibstoffes aufgrund der Nutzung von WMA um 21 % mit einer Temperaturverringerung von 29 °C erreicht wurde, bestätigt dies. Denn der CO₂ Ausstoß verringerte sich um 20 %. Auch andere Emissionsstoffe wie SO₂, NO_x, VOC und CO konnten reduziert werden [10, S. 313-315].

Ökonomisch

Abhängig von den Randbedingungen kann der Einsatz von Warmmischasphalt zu Ersparnissen oder zu Verlusten führen. Die Einflussfaktoren sind vor allem die Energiekosten und damit verbunden die verwendete Art des Energieträgers sowie die genutzte Technologie. Durch eine erhöhte Verwendung von RAP können Materialkosten signifikant gesenkt werden. Erhöhte Kosten können aus den folgenden Gründen entstehen [10, S. 315-316]:

- Investment in den Mischanlagen-Umbau
- Kosten für Zusätze
- Kosten für die Lizenzierung der Technologie

2.3.2.2 Recyclingmaterial

Die meisten Lebenszyklusanalysen, welche im Bereich des Asphaltstraßenbaus durchgeführt wurden, stellen klar fest, dass eine erhöhte Nutzung von Recyclingmaterial Treibhausgasemissionen und den Energieverbrauch reduziert. In entwickelten Ländern herrscht die Sanierung im Gegensatz zum Neubau von Straßen vor. Damit ergibt sich durch die Entstehung von Fräsgut und dessen Weiterverwendung als Recyclingmaterial in Neuasphalt ein großes Potential. Momentan wird ein großer Anteil des RAP als Gesteinskörnung in ungebundenen Schichten verwendet. Nur ein geringer Prozentsatz wird in neuem Asphalt verwertet [23, S. 2].

Bezüglich Heißasphalt sind die zwei Hauptprozesse, welche Treibhausgase erzeugen und aus denen der Energieverbrauch resultiert, die Bindemittel- und Asphaltproduktion. Die Verwendung von RAP reduziert den Bindemittelverbrauch, wodurch auch die entsprechende Umweltbelastung eingedämmt wird. Unter anderem wurde festgestellt, dass auch ein geringer RAP-Anteil von 15 % zu einer größeren Reduktion der Treibhausgase führen kann, im Vergleich zu der Anwendung von Warmasphalttechnologien, bei denen zur Herstellung von Heißasphalt die Produktionstemperatur um 30-35 °C verringert wird [23, S. 12].

In Österreich werden üblicherweise Deckschichten mittels der ausschließlichen Verwendung von Rohstoffen hergestellt und somit kein RAP-Anteil beigemischt. Lediglich bei Binder- und Tragschichten kommt Recyclingmaterial zum Einsatz. Hierbei ist normalerweise, abhängig davon ob der rezyklierte Asphaltanteil dem Mischprozess kalt oder warm zugeführt wird, ein Anteil von bis zu 60 % Altasphalt möglich. Besteht 60 % des erzeugten Asphaltmischgutes aus Recyclingmaterial, haben diverse Studien unterschiedliche Höhen des Reduktionspotentials für die Herstellung von Asphaltbindemittel (Bitumen) festgestellt. Die Ergebnisse sind in Abb.2.17 [26] dargestellt.

Asphalt Binder Model	Energy Reduction		GWP Reduction		Energy with Feedstock Reduction	
	%	GJ	%	tonne CO ₂ e	%	GJ
ICT	20.9	175	21.8	11.4	46.1	1431
Stripple (2)	16.5	122	18.3	8.6	45.8	1379
Häkkinen & Mäkelä (1)	22.5	202	22.1	11.5	46.2	1459
Eurobitume (18)	14.8	105	16.1	7.1	45.7	1362
Athena (17)	25.2	240	27.4	17.1	46.4	1497
US-EI 2.2 (21)	20.6	170	23.6	12.9	46.0	1427

Abb. 2.17: Tabelle Reduktionspotential Asphaltbindemittel-Produktion [26, S. 11]

Es besteht auch die Möglichkeit bis zu 100 % RAP für die Produktion von neuem Asphalt zu verwenden. Am Markt gibt es bereits mehrere Technologien, welche eine solche Herstellung ermöglichen. Die vorherrschenden Bedenken sowie Problemstellungen sind in folgender Liste dargestellt [23, S. 2, 6]:

- **Rissbildung:** Durch die Verwendung von rezykliertem Material, wird in der Mischung bereits ausgehärtetes Bindemittel verwendet. Dadurch steigt die Steifigkeit des Mischguts. Folgen dafür können Ermüdungsschäden bzw. Risse sein. Durch Verwendung von Zusätzen (Petroleum, organische Zusätze) zur Verringerung der Steifigkeit, können ähnliche Eigenschaften wie die von Neu-Asphalt erreicht werden, wobei die Verarbeitbarkeit schlechter ist.
- **Spurrinnenbildung:** Aufgrund des gealterten Bindemittels ist der Widerstand von Asphalt mit einem großen RAP-Anteil sehr gut. Bei der Zugabe des Zusatzes muss auf die Dosierung geachtet werden, sodass das Mischgut nicht zu weich wird. Außerdem muss das Zusatzmittel vor Verkehrsfreigabe ausreichend diffundiert sein.
- **Wasserempfindlichkeit:** Es ist davon auszugehen, dass RAP-Asphalt eine ähnliche oder höhere Wasserempfindlichkeit hat als konventioneller Asphalt.
- **Bluten des Asphalts:** Bei Verwendung von inkompatiblen Produkten sowie einer zu hohen Dosierung des Zusatzmittels kann es zu Ablagerungen an der Asphaltoberfläche kommen, was ein verschlechterte Griffigkeit der Deckschicht zur Folge hat. Dies wird auch als „Bluten“ des Asphalts bezeichnet.

Jedoch ist es grundsätzlich der Fall, dass Asphalte mit einem RAP-Anteil von 100 % eine höhere Steifigkeit haben, als welche, die nur aus Rohstoffen hergestellt wurden. Für übliche Anwendungen muss diese Steifigkeit reduziert werden, um Ermüdung und thermische Risse zu verhindern. Mittels unterschiedlicher Zusätze (Petroleum, organische Zusätze) war es in der Vergangenheit möglich das gealterte Bindemittel entsprechend zu modifizieren. Hierbei war die Verarbeitbarkeit jedoch meistens schlechter als die von dem Rohstoff-Bindemittel.

Durch die richtige Wahl eines Zusatz-Typs und einer passenden Dosierung ist es jedoch möglich einen Asphalt aus 100 % RAP-Material auf das Niveau eines aus reinen Rohstoffen zu bringen, während sich der Widerstand gegen Spurrinnen erhöht. Die große Unsicherheit ist die Haltbarkeit des Materials, weshalb hierfür noch weiterer Forschungsaufwand notwendig ist.

RAP-Tool

Zur Quantifizierung von Treibhausgasen für die Asphaltproduktion steht das RAP-Tool, welches in Zusammenarbeit zwischen GESTRATA und der Technischen Universität Wien entwickelt wurde. Die Verwendung dieses wird in Ausschreibungen von Asphaltstraßen von der ASFINAG¹¹ oft gefordert. Hierbei wird in der Planungsphase ein THG-Emissions-Planwert berechnet. Abhängig von dessen Höhe erhält der Bauwerber für das Straßenbauprojekt eine höhere oder niedrigere Punkteanzahl.

Im ersten Schritt werden hierfür die Massenanteile des Mischguts und des verwendeten Recycling-Materials eingegeben. Danach wird festgesetzt wie hoch der RAP-Anteil an der Gesamtmasse ist. Mittels der Feuchteanteile der Gesteinsorten werden die Lagergegebenheiten abgebildet. Die Möglichkeiten hierfür sind in Abb.2.18 ersichtlich.

Beschreibung der Anlagenvoraussetzungen für die Materiallagerung	Feuchtegehalt "Neumaterial" (FNM) M-%	Feuchtegehalt RAP (FRA) %
sämtliche Gesteinsmaterial (NM, RAP) überdacht	1,5	1,5
alle Primärrohstoffe (NM) überdacht, RAP nicht	1,5	5,0
alle Primärrohstoffe (NM) 0 mm bis 2mm Korngröße überdacht, RAP nicht	2,5	5,0
alle Primärrohstoffe (NM) 0 mm bis 2mm Korngröße und RAP überdacht	2,5	1,5
alle Primärrohstoffe (NM) nicht überdacht, RAP überdacht	5,0	1,5
keine Überdachung	5,0	5,0

Abb. 2.18: Zusammenhang zwischen Feuchteanteil und Materiallagerung (Quelle: Ausschreibungsunterlagen A09 Wald-Mautern)

Im nächsten Schritt werden die Temperaturdifferenzen mittels der Eingabe der Lagertemperatur (Ausgangstemperatur) und der Erwärmungstemperatur für die Gesteinsanteile und das Bitumen bestimmt. Folgend wird der in der Mischanlage genutzte Energieträger eingestellt. Hierbei unterscheidet die Software Erdgas, Heizöl und Steinkohle. Schlussendlich wird die Distanz zwischen den einzelnen Rohstoffabbau- bzw. Lagerstätten und der Mischanlage, sowie die Distanz zwischen Mischanlage zur Baustelle gebildet [22].

Im Hintergrund wird zur Berechnung des Energieverbrauches die spezifische Wärmekapazität [Joule / (Gramm * Kelvin)] zur Hilfe genommen, welche angibt wie viel Energie notwendig ist, um eine gewisse Temperatursteigerung der Masse eines Materials zu erreichen. Dies wird sowohl auf den Gesteinsanteil, als auch dessen Feuchtigkeit, also das Wasser, angewendet. Mit dieser Vorgehensweise wird die erforderliche Energie für die Produktion einer bestimmten Asphaltart

¹¹Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

festgestellt. Um die hierbei durchgeführten theoretischen Berechnungen an die Realität anzupassen, fließen zusätzlich Erfahrungswerte, welche auf einigen Mischanlage gesammelt wurden, mit ein. Nun wird die dafür notwendige Menge des gewählten Energieträgers berechnet. Schlussendlich werden über die Materialmenge, den Brennstoffverbrauch und den Transportabständen mittels Emissionsfaktoren die Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten bestimmt [22].

Das Tool vernachlässigt den Energieanteil, welcher notwendig ist, um Bitumen auf einer konstanten Temperatur zu halten, welche in der Applikation mit 160 °C beziffert ist [22].

2.3.2.3 Überdachung der Gesteinskörnung

Viele Mischanlagen weisen keine, oder lediglich eine, Teilüberdachung der Gesteinskörnung für die Asphaltproduktion auf. Hiermit ergibt sich durch die Nässe des Gesteins die Problematik, dass die Heiztrommel zusätzlich zu dem Gestein auch das Wasser erhitzt. Aufgrund der Verdampfung dieses kommt es zu einem Überdruck, welcher über entsprechende Vorrichtungen abgesaugt werden muss. Zusätzlich muss bei erhöhter Nässe die Geschwindigkeit der Produktion reduziert werden, um die Absauganlage nicht zu überlasten. Eine Überdachung verhindert den Eintritt von Wasser zu dem Gesteinsmaterial und gewährleistet somit eine konstante Mischgutproduktion. Zusätzlich wird die Energie eingespart, welche notwendig gewesen wäre, um den Feuchteanteil aus dem Gestein zu entfernen.

2.3.3 Alternative Kraftstoffe/Antriebe

Im Rahmen von Nutzfahrzeugen und Baumaschinen ist der Antrieb mittels Verbrennungsmotor, welcher Dieseldieselkraftstoff aus Mineralöl verbrennt, vorherrschend. Es wird erwartet, dass dieser Dieselmotor hierbei auch in den nächsten 20 Jahren eine dominierende Rolle einnehmen wird. Es gibt jedoch Bestrebungen um Ergänzungen, beziehungsweise Alternativen, für die konventionelle Verwendung von Dieselmotoren zu finden. Die Motivation für so einen Wandel sind endliche Mineralölreserven, der Wunsch nach energetischer Unabhängigkeit von politisch unberechenbaren Ländern, sowie die dringende Notwendigkeit der Eindämmung des Klimawandels. Letzteres hat den wichtigsten Anstoß für diese Entwicklung gegeben. Momentan sind drei diskutierte Stoßrichtungen zu erwähnen, welche das Ziel haben den heute bekannten Antrieb zu verändern und somit eine Reduktion des CO₂ Ausstoßes zu erreichen [27, S. 3-5].

1. Effizientere Nutzung von Dieseldieselkraftstoff aus fossilen Vorräten und somit einer Verbrauchsreduktion.
2. Suche nach alternativen Kraftstoffen, welche es erlauben den Verbrauch von fossilem Dieseldieselkraftstoff zu reduzieren.
3. Suche nach „echten“ alternativen Antrieben, welche den klassischen Verbrennungsmotor komplett ablösen.

2.3.3.1 Alternative Antriebe

In diesem Abschnitt werden die Alternativen zu dem konventionellen Dieseldieselstoff-Antrieb diskutiert. Hierfür gibt es momentan zwei grundlegende Ansätze: den elektrischen Antrieb und den hybriden Antrieb.

Elektrischer Antrieb

Eine „echte“ Alternative des Dieseldieselmotors wäre der elektrische Antrieb, da dieser Motor hierbei komplett überflüssig wird. Für jeden elektrischen Antrieb sind bestimmte Komponenten notwendig [27, S. 7-18]:

- **Elektromotor und Generator:** Der Elektromotor dient dem mechanischen Antrieb des Fahrzeuges beziehungsweise der Maschine. Der Generator wandelt mechanische Energie in elektrische um. Oft werden diese zwei Komponenten kombiniert, wobei hierbei von einer „elektrischen Maschine“ oder „E-Maschine“ gesprochen wird.
- **Energiespeicher:** Für die Speicherung von Energie kommen Batterien oder hochleistungsfähige Kondensatoren zum Einsatz. Hierbei ist die wichtigste Eigenschaft die Gesamtenergie, welche der Energiespeicher aufnehmen kann. Weiterhin muss der Speicher eine hohe Leistungsaufnahme und -abgabe bereitstellen können, um bei der Bremsenergie-Rekuperation die hohe elektrische Leistung, die schlagartig verfügbar ist, aufnehmen zu können. Eine weitere wichtige Eigenschaft des Energiespeichers ist die Zyklenfestigkeit. Beim Einsatz von Batterien kommen unterschiedlichste Technologien zur Verwendung, wobei diese jeweils auf einer chemischen Reaktion beruhen. Im Gegensatz dazu stehen Kondensatoren, welche quasi-verschleisfrei agieren, jedoch hohe Anschaffungskosten mit sich bringen und eine deutlich geringere Energiedichte als Batterien aufweisen.
- **Leistungselektronik:** Die Aufgabe der Leistungselektronik ist es elektrische Energie aus dem Generator in die Batterien (oder die Kondensatoren) zu bringen und wieder zurückfließen zu lassen. Hierbei muss Gleichstrom in Wechselstrom umgewandelt werden und umgekehrt.
- **Kühlung:** Zur Einhaltung gewisser Temperaturgrenzen ist für die Leistungselektronik, die E-Maschine und auch, abhängig von der Technologie, die Batterien eine aktive Kühlung erforderlich.
- **Steuerung:** Die Steuerung übernimmt das Energiemanagement, sodass alle elektrischen Komponenten vor Überlast geschützt sind. Vor allem bei einem hybriden Antrieb ist eine komplexe Steuerlogik notwendig.

Im Pkw-Bereich haben sich seit einigen Jahren die ersten ernsthaften Serienprodukte mit Elektroantrieb etabliert. Im Lkw-Bereich sind zwar wenige Modelle verfügbar, jedoch sind diese lediglich im Nischenbereich einsetzbar. Hierbei handelt es sich um Nutzfahrzeuge mit einem geringen Eigengewicht (<3,5 t), welche nur eine geringe Reichweite von ungefähr 100 km zurücklegen können [27, S. 7, 16].

Im Maschinenbereich werden heutzutage bereits elektrische Minibagger verwendet. Für größere Maschinen besteht jedoch die Schwierigkeit der ausreichenden Energiespeicherung, um Arbeitsunterbrechung aufgrund von Ladetätigkeiten zu verhindern. Hier tritt das Problem auf, dass mit steigender Leistungsklasse auch der Nutzungsgrad wächst [28].

Die Ausführung von elektrischen Straßenbaumaschinen (Beschicker, Fertiger, Walze) ist kaum vorhanden. Es werden keinerlei solche Produkte von den führenden Herstellern in diesem Bereich angeboten bzw. befinden sich erst in der Pilotphase.

Hybrider Antrieb

Die hybride Lösung kombiniert zwei Formen von Antrieben. In der Regel besitzen Hybridfahrzeuge einen Verbrennungsmotor mit einem Tank als Energiespeicher und über ein zweites Antriebssystem. Die häufigste Hybridvariante stellt die dar, welche neben dem Verbrennungsmotor einen elektrischen Antrieb mit Batteriespeicher besitzt [27, S. 19].

Ein Vorteil zu konventionellen Fahrzeugen ist hierbei die Energierückgewinnung bzw. Rekuperation, welche bei dem Bremsen des Fahrzeuges erfolgt. Dies wird durch das zweite Antriebssystem ermöglicht, welches Teile der kinetischen Energie des Fahrzeuges beim Bremsen speichern kann. Beim Beschleunigen wird mittels dieser Energie das Fahrzeug angetrieben. Grundsätzlich soll

durch das hybride System in Kombination mit einer intelligenten Steuerung fossiler Dieselmotoren eingespart werden, und somit CO₂ Emissionen verringert werden [27, S. 19-20].

In Pkws wird das System bereits in Serienausführung angewendet. Hierbei wird es auch als Übergangslösung für ein voll-elektrifiziertes Fahrzeug beziehungsweise eines mit Brennstoffzellenantrieb gesehen. Bei Nutzfahrzeugen gibt es für Fahrzeuge mit einem hybriden Antrieb eine Nischenlösung. Bei Gefährten im Fernverkehrseinsatz betragen **typische Einsparungen 4-7 %**. Hierbei unterscheidet sich die Höhe des Reduktionspotentials stark von der gefahrenen Strecke und ob diese dem hybriden Antrieb entgegen kommt [27, S. 20].

Werden Baumaschinen betrachtet, wird festgestellt, dass gegenwärtig lediglich vereinzelt bei Baggern sowie Radladern ein hybrides Antriebssystem ausgeführt wird, wobei die Hersteller **Kraftstoff-Einsparungen von 20-40 %** versprechen [28]. Für Straßenbaumaschinen wurde hierbei nur eine Walzenform festgestellt, welche mit einem hydraulischen Speicher ausgestattet ist. Dabei werden Lastspitzen unter der Nutzung von Bremsenergie abgedeckt. Die Hersteller versprechen hierbei eine Kraftstoffeinsparung **von bis zu 20 %**. Die Ausführung sonstiger hybrider Straßenbaumaschinen (Beschicker, Fertiger, Walze) ist nicht bekannt.

2.3.3.2 Alternative Kraftstoffe

Durch die Nutzung alternativer Kraftstoffe wird es ermöglicht den CO₂-Ausstoß, pro Liter verbrauchten Kraftstoff, zu verringern. Weiterhin ergibt sich die Möglichkeit für den Transportsektor sich von der Abhängigkeit des Erdöls zu lösen. Folgend werden Kraftstoffe erläutert, die schon eine gewisse Bedeutung haben, oder in der Literatur als vielversprechende Optionen angesehen werden [27, S. 47].

Kraftstoffe für Verbrennungsprozesse nach dem Dieselpinzip

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Dieselmotoren zu ersetzen; dabei sind vor allem Öle zahlreicher Pflanzen zu erwähnen [27, S. 51-56].

- **Nicht veresterte Pflanzenöle:** In Mitteleuropa ist vor allem Rapsöl das Öl, welches am häufigsten zur Kraftstoffherstellung verwendet wird. In der Produktion erfolgt keine chemische Umwandlung. Es handelt sich hierbei um langkettige Moleküle, bei dessen Verbrennung unter Umständen Sauerstoffmangel auftreten kann. Dies hat möglicherweise Verkorkungen und Ablagerungen im Motor zur Folge.
- **Veresterte Pflanzenöle:** Zur Verbesserung der Eigenschaften von Pflanzenölen als Kraftstoff werden diese verestert, wobei es sich hierbei um eine kontrollierte Reaktion des Öls mit Methanol handelt. Heute ist es üblich das Methanol aus fossilen Rohstoffen zu gewinnen. Alternativ wäre eine Herstellung aus Biomasse möglich. Bei dem Prozess der Veresterung werden die langkettigen Moleküle aufgebrochen und in kurze, zündwillige Bestandteile zerlegt, welche als Fettsäuremethylester (FAME) oder Biodiesel bezeichnet werden. Die Umesterung erfordert einen gewissen verfahrenstechnischen Aufwand, der sich energieintensiv darstellt. Da in Europa das Ausgangsöl meistens Rapsöl ist, folgt daraus das Endprodukt Rapsmethylester (RME). Dieses wird heutzutage schon mit konventionellem Diesel-Kraftstoff gemischt. In Europa handelt es sich um eine Beimengung von 7,5 %. Eine hohe Konzentration an Biodiesel beziehungsweise purer FAME-Kraftstoff haben jedoch einen hohen Verschleiß des Motors und anderer Bestandteile des Fahrzeuges zur Folge.
- **Hydriertes Pflanzenöl:** Zur Herstellung von hydriertem Pflanzenöl wird dieses einer industriellen Hydrieranlage zugeführt und dort bei hohen Temperaturen und unter hohem Druck hydriert. Hierfür ist Wasserstoff notwendig. Es ergeben sich langkettige, unverzweigte Kohlenwasserstoffe ohne den Nachteilen von FAME-Kraftstoffen. Sie sind dem fossilen

Dieselmotoren gleichwertig und können mit diesem somit uneingeschränkt vermischt werden oder pur genutzt werden. Momentan sind diese Kraftstoffe jedoch nicht wirtschaftlich.

- **Synthetische Kraftstoffe:** Es handelt sich hierbei um Erzeugnisse aus Kohlenwasserstoffen. Dabei werden vor allem Kohle (Coal to liquid - CTL), Erdgas (Gas to liquid - GTL) und Biomasse (Biomass to liquid - BTL) verwendet. Die ersteren zwei haben sich schon lange etabliert. Letzteres hat aufgrund des klimatischen Gesichtspunktes erst in jüngerer Vergangenheit an Bedeutung gewonnen. Folgend wird nur die BTL-Variante näher erläutert, da nur diese nicht direkt auf fossilen Energieträgern beruht. Für die Produktion von BTL-Kraftstoff wird nicht nur die Frucht der Pflanze, sondern auch Ausgangsstoffe, die als Abfall zur Verfügung stehen (Holzschnitzel, Pflanzenreste, etc.), verwendet, wodurch auch die Ausbeute von Energie pro Anbaufläche höher als bei Biodiesel ist.

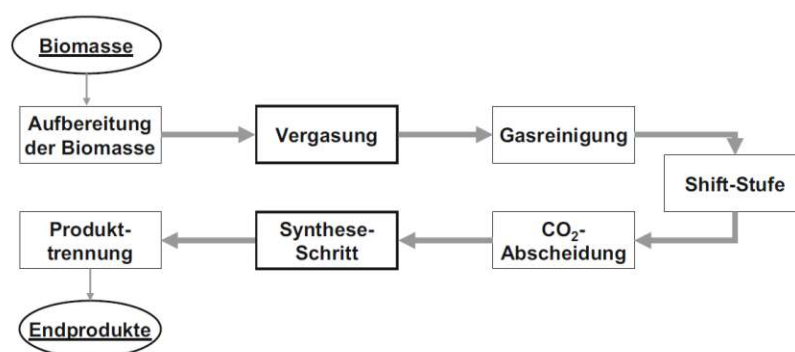


Abb. 2.19: Schema der Prozessschritte eines BTL-Prozesses [27, S. 55]

Der Produktionsprozess ist in Abb. 2.19 dargestellt. Er beginnt mit der Vorbereitung der Biomasse. Falls notwendig wird diese zerkleinert, der notwendige Feuchtigkeitsgrad wird eingestellt und gegebenenfalls werden unerwünschte Stoffe beseitigt. Im Vergasungs-Prozess wird Rohgas hergestellt, wobei die wichtigen Parameter hierbei Temperatur, Druck und die Zufuhr von Luft und Sauerstoff sowie die Eigenschaften des Rohmaterials sind. In dem Gasreinigungs-Abschnitt werden Staub, Teer, Stickstoff- und Schwefelverbindungen entfernt. Die anschließende Shift-Stufe stellt das gewünschte Kohlenmonoxid-Wasserstoff Verhältnis her, wobei das überschüssige Kohlendioxid aus dem Gasgemisch entfernt wird. Im Syntheseschritt werden die gewünschten Verbindungen gebildet. Es entsteht ein Produktmix aus verschiedenen Endprodukten. Es handelt sich um Rohbenzin, synthetischen Diesel und langkettige Verbindungen. Schlussendlich wird die Mischung in ihre Bestandteile zerlegt. BTL-Kraftstoff kann mit gleichen oder besseren Eigenschaften als fossiler Dieselmotoren hergestellt werden. Aufgrund der hohen Produktionskosten ist dieser jedoch momentan nicht wirtschaftlich.

- **Dimethylether:** Wird abgekürzt DME bezeichnet. Es handelt sich hierbei um ein farbloses, leicht entzündliches Gas, welches bei moderatem Druck (5-10 bar) verflüssigt wird und per Drucktank transportiert wird. Es ist für einen Dieselmotorenprozess geeignet, besitzt jedoch lediglich zwei Drittel der Energiedichte von Diesel. Die Verbrennung von Dimethylether läuft vollständig ab, wodurch keine Partikel entstehen. Es kann aus Biomasse oder fossilen Rohstoffen wie Kohle oder Erdgas gewonnen werden.

Kraftstoffe für Verbrennungsprozesse nach dem Ottoprinzip

Im Bereich schwerer Nutzfahrzeuge werden vor allem Dieselmotoren verwendet, wobei wenige auch mit Erdgasmotoren bestückt werden. Leichte Lastwagen und Transporter werden auch mit Ottomotoren ausgerüstet [27, S. 57-59].

- **Erdgas:** Bei Erdgas handelt es sich um einen fossilen Energieträger, der zum größten Teil aus Methan besteht. Verglichen mit anderen fossilen Energieträgern verursacht es den geringsten CO₂-Ausstoß pro Energieeinheit. Als Fahrzeugkraftstoff wird Erdgas als Compressed Natural Gas (CNG) verwendet. Hierbei wird es unter hohem Druck gesetzt und bei ungefähr 200 bar gespeichert. Alternativ kann es als Liquefied Natural Gas (LNG) verwendet werden. Hierbei muss es auf -162 °C gekühlt werden, denn bei dieser Temperatur ist das Erdgas flüssig. Der Vorteil ist die deutlich höhere volumetrische Energiedichte. Nachteile sind die Notwendigkeit eines hochisolierten LNG-Tanks sowie den darin entstehenden Verdampfungsverlusten. Dieses verdampfende Gas führt zu einem erhöhten Druck im Tank. Deshalb muss dieses bei längeren Standzeiten des Fahrzeuges abgelassen oder verwendet werden.
- **Autogas:** Dieses Gas, auch Liquefied Petroleum Gas (LPG) genannt, besteht aus einem Gemisch aus Butan und Propan, welches als Nebenprodukt bei der Verarbeitung von Erdöl entsteht. Es verflüssigt sich bereits bei geringem Druck (<10 bar) und eignet sich somit gut zur Speicherung. Aufgrund seiner Entstehung im Rahmen der Verarbeitung eines fossilen Energieträgers löst es jedoch weder die CO₂-Problematik, noch die der endlichen Erdölreserven.
- **Ethanol:** Es kann rein sowie als Gemisch von Ethanol und Benzin verwendet werden. In Deutschland enthält Ottokraftstoff eine Ethanol Beimischung von 5 %. Kritisch zu betrachten ist bei Ethanol, dass es die Leitungen und Dichtungen, insbesondere bei älteren Fahrzeugen, angreifen kann. Die Herstellung erfolgt entweder aus fossilen Grundstoffen oder mittels biogener Produktion.
- **Methanol:** Es gibt drei Arten wie Methanol zum Antrieb von Fahrzeugen verwendet werden kann: direkt zur Verwendung im Verbrennungsmotor, als Ausgangsstoff zur Produktion anderer Kraftstoffe (Benzin, DME), oder als Kraftstoff für Brennstoffzellenantriebe. Methanol wird üblicherweise aus fossilen Rohstoffen gewonnen, könnte jedoch auch biogen produziert werden.

Wasserstoff als Kraftstoff

Wasserstoff wird oftmals als Kraftstoff der Zukunft gesehen. Er kann auf folgende Arten für die Kraftstoffversorgung genutzt werden [27, S. 59]:

- Direkte Verwendung als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren.
- Zum Betrieb von Brennstoffzellen.
- Im Syntheseprozess mit Kohlenwasserstoffverbindungen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen.

Bei der Verbrennung von Wasserstoff im Verbrennungsmotor bzw. bei Nutzung in der Brennstoffzelle entsteht nur Wasser. Ansonsten ist der Prozess komplett schadstofffrei. Das häufigste Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff ist die Dampfreformierung, bei welcher der heiße Wasserdampf katalytisch mit Methan reagiert. Für diesen Prozess sind somit fossile Energieträger, insbesondere Erdgas, notwendig. Bei dieser Art der Herstellung gehen die ökologischen Vorteile des Wasserstoffs verloren [27, S. 59-60]. Das größte Problem bei Wasserstoff als Kraftstoff ist jedoch die Speicherung. Hierbei gibt es drei Möglichkeiten [27, S. 60-61]:

- Die **Speicherung mittels Verflüssigung** bei extrem niedrigen Temperaturen (-253 °C). Hierbei ist ein enormer Aufwand zur Isolation des Tanks und der Leitungen notwendig. Zusätzlich wird ein bedeutender Anteil (ca. 20 %) der Energie zur Verflüssigung benötigt.
- Wasserstoff kann in **Druckgasspeichern**, in denen es unter enormen Druck (700 bar) komprimiert wird, gespeichert werden. Diese Kompression benötigt ebenfalls einen entsprechend hohen Energieanteil.
- Es wird untersucht den Wasserstoff als **Einlagerung in Feststoffen**, zum Beispiel im Kristallgitter eines Metalls, zu speichern. Diese Technologie wird in U-Booten verwendet, ist jedoch weit entfernt vom Einsatz in Kraftfahrzeugen.

Weitere Probleme, die einen Einsatz in naher Zukunft unrealistisch machen, sind die geringe Energiedichte im Vergleich zu gebräuchlichen Kraftstoffen, die Diffundierung von Wasserstoff durch viele Materialien sowie der kostspielige Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur. Es wird nicht damit gerechnet das Wasserstoff als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge vor dem Jahr 2050 zum Einsatz kommen wird [27, S. 61].

2.3.4 Organisation der Mischgutherstellung

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion des Treibhauspotentials ist die organisatorische Anpassung der Mischgutproduktion. Hierfür werden die Einbautage einer Mustermischanlage in Österreich für die Jahre 2019-2021 analysiert. Auf Grundlage von Betriebstagebüchern, welche von dem Mischanlagenpersonal täglich mit der Menge des produzierten Mischguts und des Gasverbrauch befüllt wurden, und der Abrechnung des Energieversorgers, wird eine kategorische Übersicht erstellt. Es wird hierbei nach der Menge des produzierten Mischguts unterschieden. Die Ergebnisse sind in Tab. 2.1 ersichtlich. Der Gasverbrauch wird in Normkubikmetern angegeben, wobei die Berechnung, unter Berücksichtigung von Temperatur und Druck, vom Energieunternehmen durchgeführt wurde.

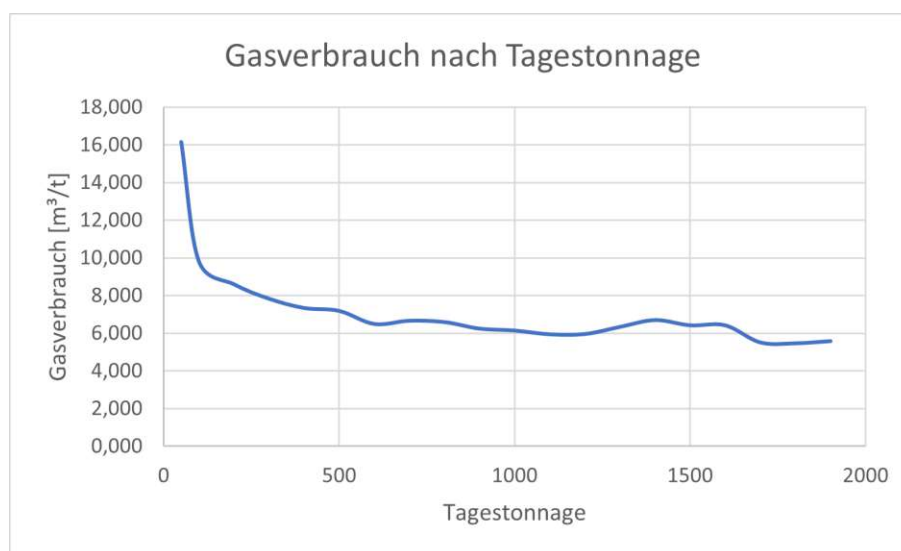


Abb. 2.20: Gasverbrauch nach Tagestonnage bei Mustermischanlage

Wird die grafische Darstellung der Ergebnisse in Abb. 2.20 betrachtet, ist erkennbar, dass vor allem bei einer geringen, täglichen Mischgutherstellung der Verbrauch pro produzierter Tonne sehr hoch ist. In der kleinsten Kategorie (0-50 t) ergibt sich hierbei ein Maximalwert von $16,145\text{ t/Nm}^3$.

Dies folgt daraus, dass sich der Gasverbrauch des Aufheizvorgangs der Mischanlage auf eine sehr viel geringere Tonnage verteilt. Unter Umständen, falls ein größerer Zeitraum zwischen den einzelnen Beladungen entsteht, muss sogar ein mehrmaliges Aufheizen durchgeführt werden. Eine Lösung wäre bei wenig ausgelasteten Mischanlagen den Mischvorgang auf weniger Wochentage zu beschränken, sodass sich die Kunden danach richten müssen, wodurch eine tägliche Mindesttonnage eingehalten werden kann. Bei den Kategorien mit einer höheren Tagestonnage ist kein eindeutig sinkender Verbrauch pro Tonnenproduktion mehr ersichtlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier das Aufheizen der Heiztrommel nicht mehr das ausschlaggebende Kriterium für den Kraftstoffverbrauch ist, sondern andere Einflüsse eine größere Auswirkung haben. Zusätzlich sinken mit der Höhe der Tagestonnage auch die Stichproben.

Tab. 2.1: Gasverbrauch nach produzierter Tonnage

Kategorie	Tonnen-Von t	Tonnen-Bis t	Gas Nm ³	Tonnen t	Gasverbrauch Nm ³ /t
1	0	50	24.588,20	1.522,92	16,145
2	50	100	41.160,33	4.190,12	9,823
3	100	200	130.689,81	15.195,46	8,601
4	200	300	96.264,81	12.290,04	7,833
5	300	400	95.278,86	12.976,92	7,342
6	400	500	50.715,13	7.056,34	7,187
7	500	600	28.197,89	4.342,46	6,494
8	600	700	30.246,72	4.538,00	6,665
9	700	800	69.672,75	10.566,57	6,594
10	800	900	43.166,26	6.910,72	6,246
11	900	1.000	34.307,82	5.582,40	6,146
12	1.000	1.100	67.750,54	11.395,60	5,945
13	1.100	1.200	27.518,68	4.617,34	5,960
14	1.200	1.300	79.050,74	12.470,50	6,339
15	1.300	1.400	81.496,37	12.164,62	6,699
16	1.400	1.500	166.109,85	25.866,90	6,422
17	1.500	1.600	48.714,74	7.585,48	6,422
18	1.600	1.700	18.165,00	3.295,26	5,512
19	1.700	1.800	9.678,00	1.770,00	5,468
20	1.800	1.900	10.476,00	1.876,26	5,583

Kapitel 3

Prozesse und Treibhausgasemissionen des Musterprojekts A09 Wald-Mautern

Das gegenständliche Kapitel behandelt die Prozesse des Autobahnprojektes A09 Wald-Mautern zur Sanierung des Straßenbelags, welche in den einzelnen Projektphasen ausführungssseitig stattgefunden haben bzw. zum Zeitpunkt des Schreibens der Arbeit noch stattfinden. Zur Bestimmung der Emissionen und Feststellung von etwaigen Einsparpotentialen, wurde eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt.

3.1 Projektbeschreibung

Bei dem betrachteten Bauprojekt handelt es sich um die Fahrbahn- und Brückeninstandsetzung des Streckenabschnittes A09 Pyhrn Autobahn, km 105,65-112,00 auf der Richtungsfahrbahn Spielfeld, dessen Ausführungsphase sich in den Frühlings-, Sommer- und Herbstmonaten des Jahres 2022 befindet. Das Projektgebiet ist in Abb. 3.1 ersichtlich.

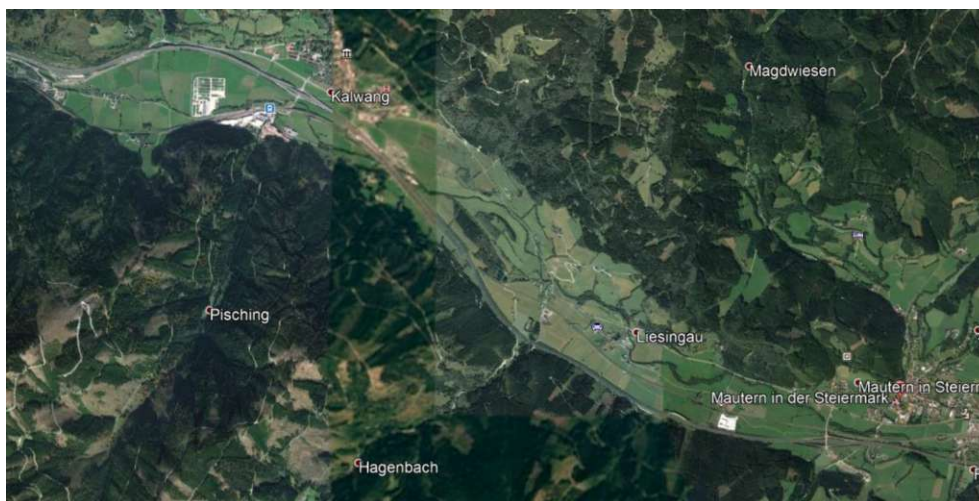


Abb. 3.1: Übersicht des Projektgebiets (Quelle: Google Earth)

Die Hauptbaumaßnahmen des Bauvorhabens teilen sich in drei Bauabschnitte. Der erste Bauabschnitt (Bauphase 1) beinhaltet die Sanierung der RFB Spielfeld von km 106,90 bis 111,90, inklusive zweier Rampen der Anschlussstelle Kalwang. Im zweiten Bauabschnitt wird die RFB Spielfeld von km 105,65 bis 106,90 in halbseitiger Bauweise unter Verkehr saniert. Schlussendlich werden im dritten Bauabschnitt die Abbrucharbeiten des Fahrzeugrückhaltesystems (FRS) im Mittelstreifen und auf den Innenrandbalken der Brückenobjekte, und Rohrsanierungen sowie die Mittelstreifenbefestigungen durchgeführt.

Im Rahmen der gegenständlichen Erhebung **wird lediglich die Sanierung der Hauptfahrbahn während der Bauphase 1 betrachtet**. Diese erfolgt durch Abfräsen der obersten zwei Asphaltsschichten und Neuaufbau dieser Schichten mit einer Gesamtstärke von 12 cm bzw. 14 cm (im Rampenbereich 16 cm). In Abhängigkeit des Fräsbildes werden bereichsweise Tieferfräsungen durchgeführt. Solche Tieferfräsungen sind ebenfalls zum Ausgleich von etwaigen Wannenausbildungen erforderlich. Es erfolgt kein Eingriff in den Unterbau.

Die Stärke der Asphaltsschichten ist abschnittsweise unterschiedlich. Es werden eine oder zwei Binderschichten und eine Deckschicht eingebaut, wobei letztere eine konstante Stärke von 3,5 cm aufweist. Die verwendeten Materialien, welche Bestandteile des Straßenaufbaus darstellen, sind in Tab. 3.1 ersichtlich.

Tab. 3.1: Verwendete Materialien

Mischgutbezeichnung	Kurzform	Schicht	Schichtdicke
AC22bin, PmB45/80-65,H1,G4	AC22	Binderschicht	5,5-10,5 cm
SMA11deck, PmB45/80-75,S3,GS	SMA11	Deckschicht	3,5 cm
Bitumenemulsion (Vorspritzmittel)			

Im Rahmen der Bauausführung kommen folgende Baumaschinen zum Einsatz:

- **2 Fräsmaschinen:** Diese übernehmen die Fräsarbeiten. Aufgrund eines Schadens musste eine weitere Fräsmaschine bereitgestellt werden, jedoch waren nie mehr als zwei Fräsmaschinen gleichzeitig im Einsatz.
- **1 Kanalspülwagen:** Der Kanalspülwagen hat die Aufgabe der Befüllung der Fräsen mit ausreichend Wasser. Da an zwei unterschiedlichen Enden der Baustelle gleichzeitig gefräst wird, musste dieser regelmäßig den Standort wechseln.
- **2 Kehrmaschinen:** Die Aufgabe der Kehrmaschinen ist es, die Verschmutzung der Straße mit Fräsmaterial möglichst gering zu halten, sodass ein ebenes, sauberes Planum für die Asphaltierarbeiten gewährleistet wird. Jede Kehrmaschine war für eine der beiden aktiven Fräsmaschinen verantwortlich.
- **1 Vorspritzwagen:** Zum Vorspritzen zwischen dem Fräsplanum und der Binderschicht sowie zwischen den einzelnen Asphaltsschichten wird ein Vorspritzwagen verwendet, welcher die gesamte Fläche überfährt und eine Bitumenemulsion (auch Vorspritzmittel genannt) aufbringt.
- **1 Beschicker:** Zur Steigerung der Einbaueffizienz wird ein Beschicker verwendet, welcher von Lkws mit Asphaltmischgut beladen wird. Der Beschicker verteilt dieses Material wiederum weiter an die dahinter fahrenden Asphaltfertiger.
- **3 Asphaltfertiger:** Für den Hauptfahrbereich werden zwei Asphaltfertiger verwendet, welche hinter dem Beschicker den Einbau des Mischguts übernehmen. Der dritte Fertiger kommt lediglich bei dem Asphalteinbau im Rampenbereich zum Einsatz.
- **4 Walzen:** Für die Verdichtung des Mischguts sind vier Walzen erforderlich. Diese überfahren das Mischgut direkt nach dem Einbau mehrere Male, um eine entsprechende Dichte des Mischguts zu erreichen.

Da es sich bei dem Bauvorhaben um ein Projekt handelt, bei welchem ein besonderer Wert auf Digitalisierung gesetzt wird, kommen unterschiedlichste digitale Tools zum Einsatz. Die für den Straßenbau relevanten Systeme sind in der folgenden Liste ersichtlich:

- **Logistik-Tool:** Zur Überprüfung und Optimierung der Logistikprozesse im Rahmen der Ausführung, wird eine erprobte Software eingesetzt. Diese erlaubt eine Betrachtung des Fortschrittes auf der Baustelle durch alle Beteiligten in Echtzeit auf Tagesbasis. In der Nachbereitungsphase ist eine Überprüfung sowie Analyse der Leistung möglich. Mit dieser Datenbasis kann der Anwender Optimierungspotentiale feststellen.
- **Verdichtungs-Tool:** Dieses erlaubt eine Feststellung der Verdichtungsleistung. Es wird eine flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle sowohl im Erdbau, als auch Asphaltbau ermöglicht. Bei letzterem werden die dynamischen und statischen Überfahrten, die Temperatur des Asphaltmischguts sowie der Standort der Walze aufgenommen. Dies ist durch das Anbringen entsprechender Sensoren (Temperatur, GPS, Vibration) möglich. In der Ausführung werden die Überfahrten von mehreren Walzen gleichzeitig aufgenommen und miteinander überlagert. Nach Überprüfung eines Bohrkerns im Labor bzw. der Feststellung der Dichte mittels einer Isotropensonde, wird die optimale Überfahrtsanzahl bestimmt. Der Walzenfahrer hat die Aufgabe sowohl die minimale, als auch die maximale Anzahl der Überfahrten einzuhalten, um eine Unter- sowie Überverdichtung und damit einhergehend eine Beschädigung der Asphaltschicht zu verhindern.

Für die Abwicklung solcher Bauvorhaben haben sich gewisse Personenrollen bzw. Unternehmen etabliert, welche Baustellenanfahrten in regelmäßigen Abständen tätigen. In folgender Liste sind diese nach Auftraggeber, Auftragnehmer und dessen Subunternehmer aufgeteilt.

- **Auftraggeber:**
 - **Projektleiter:** Der Projektleiter, also der Vertreter des Auftraggebers der Baumaßnahme, führt Anfahrten im Rahmen von stichprobenartigen Kontrollfahrten und zur Klärung von Unklarheiten mit dem Bauunternehmen durch.
 - **ÖBA:** Im Auftrag des Auftraggebers übernimmt dieses Unternehmen die Koordination, Kontrolle und Überwachung der Baumaßnahmen vor Ort. Zu diesem Zweck sind regelmäßige Anfahrten zur Baustelle unumgänglich.
- **Auftragnehmer (Bauunternehmen):**
 - **Bauleiter:** Hat die Vertretung des Bauunternehmens für die gegenständliche Baustelle gegenüber den anderen Parteien inne. Der Bauleiter muss aus unterschiedlichsten Gründen (Koordination der Subunternehmer sowie der eigenen Parteien, Kommunikation mit Beteiligten, etc.) regelmäßig die Baustelle besuchen.
 - **Techniker:** Tätigt Hilfsarbeiten des Bauleiters und unterstützt diesen bei seinen Verpflichtungen. Dafür sind gelegentlich Anfahrten zur Baustelle erforderlich.
 - **Polier:** Hat die Verantwortung der richtigen Bauausführung inne. Somit ist dieser ständig vor Ort, muss jedoch aufgrund der Länge der Baustelle viele Kilometer entlang des Geländes fahren.
 - **Laborant:** Im Rahmen des Asphaltvorgangs ist die regelmäßige Überprüfung der Qualität sowie der Verdichtungsleistung des Asphalttes durch den Laboranten notwendig. Tägliche Fahrten zum Zwecke der Entnahme einer bzw. mehrerer Asphaltproben und Transport dieser zum Labor sind notwendig.

- **Operational Management:** Aufgrund der besonderen Relevanz der Digitalisierung auf dieser Baustelle, wurde die Unterstützung des Operational Managements (interne Abteilung des Bauunternehmens) angefordert. Dabei handelt es sich um Experten, welche den Support der vor Ort eingesetzten Tools übernehmen. Es sind regelmäßige Anfahrten zur Baustelle aus der Unternehmenszentrale erforderlich.
- **Baustellen-Partie** während des Asphalteinbaus:
 - * Beschickerfahrer
 - * Fertigerfahrer
 - * Walzenfahrer
 - * Vorarbeiter
- **Subunternehmen:**
 - **Fräsenunternehmen:** Im Auftrag des Bauunternehmens übernimmt diese Firma die Leistung der Fräsarbeiten.

3.2 Analysegrundlagen

Als Grundlage für die Analyse werden wichtige Eingangsparameter festgesetzt und die Vorgehensweise grundlegend erklärt. Folgend wird diese im Detail erläutert, wobei es sich um eine Lebenszyklusanalyse handelt. Zusätzlich werden die verwendeten Emissionsfaktoren dargestellt und geometrische Vorberechnungen durchgeführt.

3.2.1 Systemabgrenzung der Lebenszyklusanalyse

Für die Feststellung des Treibhauspotentials wird eine Lebenszyklusanalyse der Form "cradle-to-gate", also von der Wiege bis zum Tor, durchgeführt. Das Ziel ist die Quantifizierung der realen Treibhausgasemissionen auf einer Asphaltbaustelle und die Feststellung möglicher Einsparpotentiale. Es wird nur die Herstellungsphase (A1-A3) und die Errichtungsphase (A4-A5) laut ÖNORM EN 15978:2011 betrachtet. Dabei werden für die Herstellung mittels des RAP-Tools jegliche Emissionen aus der Herstellung der Rohstoffe, des Rohstofftransports und der Rohstoffaufbereitung berücksichtigt. Die Errichtung beinhaltet vor allem den Dieserverbrauch der Baumaschinen und der Materialtransporte (LKW und PKW). Der Anteil der indirekten Emissionen (z.B. Lkw-Produktion) der Transporte wird über entsprechende Emissionswerte abgedeckt. Die indirekten Emissionen der Baumaschinen bleiben hingegen vernachlässigt. Es wird die Wirkungskategorie „Klimawandel- oder Erderwärmungspotenzial (GWP)“ betrachtet, welche in CO₂-Äquivalenten gemessen wird. Personentransporte werden nicht berücksichtigt.

3.2.2 Emissionsfaktoren

Im Rahmen der Wirkungsanalyse, zur Bestimmung der Höhe der ausgestoßenen Schadstoffe, kommen folgende Emissionsfaktoren zur Anwendung (siehe Tab. 3.2):

Tab. 3.2: Emissionsfaktoren Material

Material	Emissionsfaktor	Quelle
Diesel	0,09195 kg CO ₂ -Eq/MJ	Forschungsbericht CO ₂ -Neutrale Baustelle [24]
Bitumen	149,6 kg CO ₂ -Eq/t	Ther Eurobitume Life-Cycle Inventory For Bitumen [29]

Für die Berechnung der Fahrzeug-Emissionen werden die von dem österreichischen Umweltbundesamt bereitgestellten Werte verwendet. Es wird in den behandelten Berechnungen die Summe der direkten und indirekten Emissionen (gesamte Emissionen) verwendet. Die Emissionsfaktoren werden hierbei nach ihrer Bezugseinheit (Personen-/Tonnenkilometer oder Fahrzeugkilometer) aufgeteilt. Die entsprechenden Werte finden sich in Tab. 3.3 und Tab. 3.4.

Tab. 3.3: Emissionsfaktoren Transport bezogen auf Personen-/Tonnenkilometer

Fahrzeug	Energieverbrauch	Direkte Emissionen	Indirekte Emissionen	Gesamte Emissionen
PKW Benzin	0,57 kWh/Pkm	146,00 g/Pkm	80,90 g/Pkm	226,90 g/Pkm
PKW Diesel	0,59 kWh/Pkm	149,40 g/Pkm	64,70 g/Pkm	214,10 g/Pkm
PKW Durchschnitt	0,58 kWh/Pkm	147,40 g/Pkm	69,30 g/Pkm	216,70 g/Pkm
LKW LNF (< 3,5 t) (D)	2,62 kWh/tkm	643,20 g/tkm	255,10 g/tkm	898,30 g/tkm
LKW SNF (< 18 t) (D)	1,19 kWh/tkm	290,70 g/tkm	86,70 g/tkm	377,40 g/tkm
LKW SNF (> 18 t) (D)	0,46 kWh/tkm	111,40 g/tkm	37,30 g/tkm	148,70 g/tkm
Sattelzüge (40 t) (D)	0,22 kWh/tkm	51,90 g/tkm	17,10 g/tkm	69,00 g/tkm
Durchschnitt LKW SNF	0,26 kWh/tkm	64,60 g/tkm	20,50 g/tkm	85,10 g/tkm

Tab. 3.4: Emissionsfaktoren Transport bezogen auf Fahrzeugkilometer

Fahrzeug	Energieverbrauch	Direkte Emissionen	Indirekte Emissionen	Gesamte Emissionen
PKW Benzin	0,65 kWh/Fzkm	164,20 g/Fzkm	163,70 g/Fzkm	327,90 g/Fzkm
PKW Diesel	0,67 kWh/Fzkm	170,80 g/Fzkm	168,00 g/Fzkm	338,80 g/Fzkm
PKW Durchschnitt	0,66 kWh/Fzkm	167,10 g/Fzkm	165,00 g/Fzkm	332,10 g/Fzkm
LKW LNF (<3,5 t) (D)	0,87 kWh/Fzkm	214,60 g/Fzkm	211,40 g/Fzkm	426,00 g/Fzkm
LKW SNF (<18 t) (D)	1,87 kWh/Fzkm	463,00 g/Fzkm	453,10 g/Fzkm	916,10 g/Fzkm
LKW SNF (>18 t) (D)	2,98 kWh/Fzkm	733,40 g/Fzkm	246,10 g/Fzkm	979,50 g/Fzkm
Sattelzüge (40 t) (D)	3,26 kWh/Fzkm	799,20 g/Fzkm	261,40 g/Fzkm	1.060,60 g/Fzkm
Durchschnitt LKW SNF	2,88 kWh/Fzkm	706,50 g/Fzkm	225,50 g/Fzkm	932,00 g/Fzkm

3.2.3 Vorberechnungen Geometrie

Zusätzlich zur Durchführung der Lebenszyklusanalyse, ist ein Teilziel bei der Untersuchung der Treibhausgasemissionen dieses Projektes, die Entwicklung von Emissionsfaktoren in dem Format „THG-Emissionen [kg CO₂-Eq] pro Fläche [m²] pro Schichtstärke [cm]“. Hierfür muss die Fläche und die Schichtdicke der einzelnen Schichten (Binderschicht, Deckschicht, Frässhicht) bekannt

sein. Die Berechnung erfolgt auf unterschiedliche Art und Weise, wobei diese in den Folgekapiteln noch näher beleuchtet werden.

3.2.3.1 Asphaltmaterial

Das Logistik-Tool und die darin erstellte Planung wird für die folgenden geometrischen Berechnungen genutzt. In diesem werden die Flächen mittels Abschnitten in einzelne Bereiche geteilt. Durch Export dieser Teilbereiche, welche SOLL-Fläche, SOLL-Tiefe, Material und Masse beinhalten, kann folgend für beide Asphaltmaterialien eine gewichtete Dicke bestimmt werden. Dafür wird zuerst die Summe der Massen für beide Materialien gebildet. Nun wird für jeden Abschnitt ein Dickenanteil mittels Multiplikation der Abschnitts-Dicke mit dem Quotienten aus Abschnitts-Masse zur Gesamtmasse des Abschnitts-Materials berechnet. Durch Summe aller Dickenanteile eines Materials ergibt sich die gewichtete Dicke. Beispielhaft für das Mischgut AC22 (Binderschichten) ist folgend der mathematische Rechenweg dargestellt.

$$\text{Gewichtete-Dicke-Abschnitt}_1 = \text{Dicke} * \frac{\text{Masse-Abschnitt}_1}{\text{Gesamtmasse-AC22}}$$

$$\text{Gewichtete-Dicke-Abschnitt}_2 = \text{Dicke} * \frac{\text{Masse-Abschnitt}_2}{\text{Gesamtmasse-AC22}}$$

$$\text{Gewichtete-Dicke-Abschnitt}_X = \text{Dicke} * \frac{\text{Masse-Abschnitt}_X}{\text{Gesamtmasse-AC22}}$$

$$\text{Gewichtete-Dicke} = \sum \text{Gewichtete-Dicke-Abschnitte}$$

Zur Bestimmung der Gesamtfläche werden die Abschnitte nach Material getrennt und eine Summe der Abschnittsflächen gebildet.

3.2.3.2 Fräsmaterial

Eine bereitgestellte Abrechnung der Fräsarbeiten dient hierbei als Datengrundlage. Diese Unterlage unterscheidet die Fräsflächen in die Frästiefen 12 cm, 14 cm und 16 cm. Durch einen gewichteten Mittelwert, wie dieser schon für die Asphalt-schichtdicken berechnet wurde, ergibt sich eine durchschnittliche Frästiefe. Die gesamte Fräsfläche berechnet sich durch eine Summe aller gefrästen Teilflächen.

3.2.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der geometrischen Berechnungen sind in Tab.3.5 zusammengefasst.

Tab. 3.5: Geometrie der Asphalt- und Fräsflächen

Material	Gesamtmasse	Gesamtfläche	Gewichtete Dicke
AC22	13.176,8 t	58.854,0 m ²	9,12 cm
SMA11	5.353,7 t	62.956,0 m ²	3,50 cm
Fräsgut	14.477,4 t	45.007,1 m ²	13,25 cm

3.3 Herstellungsphase (A1-A3)

In diesem Abschnitt geht es um die Bestimmung der Treibhausgasemissionen, welche im Rahmen der Herstellungsphase der eingebauten Baumaterialien entstanden sind. Diese werden für die Mischgüter mittels des RAP-Tools durchgeführt. Für Bitumenemulsion wird das CO₂-Äquivalent durch eine Nebenrechnung bestimmt.

3.3.1 Asphalt

Bestimmung der Masse

Zur Bestimmung der Menge des eingebauten Asphalttes werden aus dem Logistik-Tool Lieferscheinlisten exportiert, welche jeden Lkw inklusive der transportierten Masse sowie die Art des Mischguts beinhalten. Mittels einer Summe nach Art des Materials gefiltert ergibt sich die entsprechende Masse des gesamten Mischguts.

Tab. 3.6: Eingebaute Asphaltmasse

Mischgutbezeichnung	Masse
AC22bin, PmB45/80-65,H1,G4	13.176,8 t
SMA11deck, PmB45/80-75,S3,GS	5.353,7 t

Aus der Summe der zur Baustelle transportierten Asphaltmasse und der berechneten Masse der Bitumenemulsion ergeben sich in Kombination mit den entsprechenden Emissionsfaktoren, welche dem RAP-Tool zu entnehmen sind, deren Treibhausgasemissionen. Hierfür wird die Tabellenkalkulationssoftware durch den Kalkulanten mit den entsprechenden Werten befüllt. Dies sind, einerseits, Parameter der Bestandteile des Asphalttes (RAP, Gestein, Füller, Bitumen), wie das Verhältnis dieser zueinander, der Feuchteanteil sowie die Ausgangs- und die Erwärmungstemperatur, andererseits, werden Eigenschaften (Wirkungsgrad Trocknung, Wirkungsgrad Mischer, Energieträger) der Mischanlage festgesetzt. Schließlich müssen noch alle notwendigen Abstände für die Materialtransporte (Gestein, RAP, Füller, Bitumen) angegeben werden. Die befüllten Eingabemasken für das Binderschicht- und das Deckschichtmaterial sind in Abb. 3.2 und Abb. 3.3 ersichtlich.

ohne Masseanteil RAP														
Masseanteil RAP [%]		Masseanteil Gestein [%]		Masseanteil Füller [%]		Masseanteil Bitumen [%]		Überprüfung Masseanteil						
-	20	+	-	93,5	+	-	2,0	+	-	4,5	+	100,0 %		
Gesteinsanteil RAP [M%]		Fülleranteil RAP [M%]		Bitumenanteil RAP [M%]		Überprüfung Masseanteil								
-	89,6	+	-	7,9	+	-	2,5	+	100,0 %					
Feuchtanteil RAP [M%]		Feuchtanteil Gestein [M%]		Feuchtanteil Füller [M%]		PmB								
-	1,5	+	-	2,5	+	-	0,0	+	-	ja	+			
Ausgangstemperatur RAP [°C]		Ausgangstemperatur Gestein [°C]		Ausgangstemperatur Füller [°C]		Ausgangstemperatur Bitumen [°C]								
15,0		15,0		15,0		160,0								
Erwärmungstemperatur RAP [°C]		Erwärmungstemperatur Gestein [°C]		Erwärmungstemperatur Füller [°C]		Erwärmungstemperatur Bitumen [°C]								
-	15,0	+	-	205,0	+	-	15,0	+	-	180,0	+			
Wirkungsgrad Trocknung [%]		Wirkungsgrad Mischer [%]		Energieträger										
85		85		Erdgas										
Materialtransport RAP [km]		Materialtransport Gestein [km]		Materialtransport Füller [km]		Materialtransport Bitumen [km]		Materialtransport zur Baustelle [km]						
-	0	+	-	5	+	-	0	+	-	155	+	-	20	+

Abb. 3.2: RAP-Tool: Eingabewerte AC22

ohne Masseanteil RAP																													
Masseanteil RAP [%]	Masseanteil Gestein [%]	Masseanteil Füller [%]	Massenanteil Bitumen [%]	Überprüfung Masseanteil																									
- 0 +	- 89,3 +	- 5,5 +	- 5,2 +	100,0 %																									
Gesteinsanteil RAP [M%]																													
-		89,3	+		-		5,5	+		5,2	+		100,0 %																
Feuchtanteil RAP [M%]																													
-		1,5	+		-		2,5	+		-		0,0	+		ja														
Ausgangstemperatur RAP [°C]																													
-		15,0	+		-		15,0	+		-		15,0	+		160,0														
Erwärmungstemperatur RAP [°C]																													
-		15,0	+		-		185,0	+		-		15,0	+		180,0														
Wirkungsgrad Trocknung [%]																													
-		85	+		Wirkungsgrad Mischer [%]																								
-		85	+		Energieträger																								
-		85	+		-										Erdgas	+													
Materialtransport RAP [km]																													
-		0	+		Materialtransport Gestein [km]																								
-		0	+		-		20	+		Materialtransport Füller [km]																			
-		0	+		-		20	+		-		35	+		Materialtransport Bitumen [km]														
-		0	+		-		20	+		-		35	+		-		155	+		Materialtransport zur Baustelle [km]									
-		0	+		-		20	+		-		35	+		-		155	+		-		20	+						

Abb. 3.3: RAP-Tool: Eingabewerte SMA11

In Tab. 3.7 ist das Ergebnis des RAP-Tools und somit die Umweltbelastung des Herstellungsprozesses, der entsprechenden Asphaltorte, tabellarisch dargestellt. Das Resultat der Software für den Materialtransport zur Baustelle wird nicht berücksichtigt, da hierfür in dem Kapitel der Errichtungsphase genauere Berechnungen unter der Verwendung von Echtzeitdaten durchgeführt werden.

Tab. 3.7: Ergebnisse des RAP-Tools

Material	Anteil RAP %	Materialrucksack kg CO ₂ -Eq/t	Transport zur AMA kg CO ₂ -Eq/t	Herstellung Mischgut kg CO ₂ -Eq/t	Emissionsfaktor Gesamt kg CO ₂ -Eq/t
AC22	20 % RAP	17,9	0,9	16,7	35,5
SMA11	0 % RAP	23,2	2,6	17,2	43,0

3.3.2 Bitumenemulsion

Bestimmung der Masse

Zur Bestimmung der verwendeten Menge an Bitumenemulsion wird durch Nachfrage bei dem verantwortlichen Labor ein Standardwert für den Verbrauch pro Quadratmeter bei einer Fräs- und Asphaltsschicht im Rahmen der Vorspritzarbeiten in Erfahrung gebracht. Die nun für die Berechnung notwendigen Flächen werden den Plan-Werten des Logistik-Tools, bzw. für die gefrästen Flächen der Abrechnung des Technikers, entnommen. Die Rechenwerte sowie die Ergebnisse können Tab. 3.8 entnommen werden.

Tab. 3.8: Berechnung der Bitumenmasse

Schicht	Unterlage	Fläche m ²	Gesamt- menge kg/m ²	Dosierung	Bitumen- menge kg/m ²	Bitumen- masse t	Gesamt- masse t
Binder1	Fräsfläche	45.007	0,50	0,6	0,3	13,50	22,50
Binder2	Asphaltfläche	13.847	0,33	0,6	0,2	2,74	4,57
Deck	Asphaltfläche	62.956	0,33	0,6	0,2	12,47	20,78

Daraus ergeben sich die Flächen der gesamten Binderschichten (**58.854 m²**), der Deckschicht (**62.956 m²**) und der Frässhicht, also der gefrästen Fläche (**45.007 m²**). Da eine unterschiedliche Menge an Bitumenemulsion, abhängig von der Unterlage (Fräsplanum oder Asphaltsschicht), notwendig ist, ist hierbei eine Unterscheidung erforderlich. Es wird angenommen, dass auf die gesamte Fräsfläche eine Binderschicht aufgebracht wird. Der restliche Anteil des Binders wird somit auf einer bereits erzeugten Asphaltsschicht eingebaut. Es wird sowohl die Masse der gesamten Emulsion, als auch des reinen Bitumenanteils, berechnet. Dies ist notwendig, um das Gewicht für den Transport (gesamte Emulsion inklusive Wasser) und in weiterer Folge die THG-Emissionen der Bitumenproduktion (lediglich Bitumenanteil) zu bestimmen. Der Rechenweg ist folgend dargestellt.

$$\text{Bitumenmasse[t]} = \text{Fläche[m}^2\text{]} * \text{Bitumenmenge[kg/m}^2\text{]} * \text{Dosierung} / 1.000$$

$$\text{Gesamtmasse[t]} = \text{Fläche[m}^2\text{]} * \text{Gesamtmenge[kg/m}^2\text{]} * \text{Dosierung} / 1.000$$

3.3.3 Ergebnisse

Unter Verwendung der berechneten Massen aus dem vorigen Abschnitt, sowie der Emissionsfaktoren aus der Literatur (Tab. 3.2), und denen, welche mittels dem RAP-Tool bestimmt wurden (Tab. 3.7), wird nun die Höhe der Treibhausgasemissionen festgestellt.

Die Rechenparameter und Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tab. 3.9 ersichtlich. Hierbei wird die Abkürzung EF für Emissionsfaktor verwendet um eine übersichtliche Darstellung zu gewährleisten. Dieser wird für die Gruppen A1 bis A3 berechnet und anschließend mit der entsprechenden Masse multipliziert, wodurch sich die THG-Emissionen ergeben.

Tab. 3.9: Berechnung der THG-Emissionen für A1-A3

Material	EF_A1	EF_A2	EF_A3	EF_A1-A3	Masse t	THG- Emissionen
	kg CO ₂ -Eq/t	kg CO ₂ -Eq/t	kg CO ₂ -Eq/t	kg CO ₂ -Eq/t		kg CO ₂ -Eq
AC22	17,93	0,93	16,73	35,60	13.176,8	469.093,4
SMA11	23,23	2,63	17,23	43,10	5.353,7	230.742,7
Bitumen				149,6	28,7	4.294,9

3.4 Errichtungsphase (A4-A5)

Die Errichtungsphase wird im Sinne der ÖNORM EN 15978:2011 in die Bestandteile Transport (A4) und Errichtung/Einbau (A5) zerlegt. Nicht in dem Umfang der eben genannten ÖNORM liegen Personenfahrten, weshalb diese getrennt betrachtet werden.

3.4.1 Transport (A4)

Zur Bestimmung der Transportemissionen werden nachstehende Transportarten berücksichtigt und folgend getrennt von einander berechnet.

- Mischgut- und Fräsguttransporte
- Baumaschinentransporte
- Diverse andere Lkw-Transporte
- Pkw-Fahrten

Für Analysezwecke wurden diese Transportarten wiederum nach Art der Leistung (Hauptleistung oder Nebenleistung) sowie nach Schicht (Binderschicht, Deckschicht, Frässchicht) kategorisiert.

3.4.1.1 Mischgut- und Fräsguttransporte

Bestimmung der Distanzen/Massen

Zur Bestimmung der zum Zweck des Transports verfahrenen Distanzen, sowie der transportierten Massen, werden die in dem Logistik-Tool gespeicherten Lieferscheindaten exportiert. Bei der Analyse werden folgende Datensätze verwendet:

- Datum
- Kennzeichen
- Mischgut
- Masse des Mischguts

Diese Daten werden nach Lkw und Datum gefiltert. Dementsprechend wird die Masse des Mischguts aufsummiert. Zusätzlich dazu wird die Anzahl der Vollfahrten gezählt. Die Leerfahrten werden mittels Abzug von einer Fahrt, da die letzte tägliche Vollfahrt keine Rückfahrt (Leerfahrt) mehr benötigt, berechnet.

Zur Bestimmung der Anzahl der Heimfahrten wird, nach Absprache mit dem Bauleiter des Projektes, die Annahme getroffen, dass alle Fahrer deren Heimatort weniger als 100 km entfernt ist

täglich Heimfahrten durchführen. Alle anderen Lenker führen eine Heimfahrt ein Mal wöchentlich, somit alle 5 Tage, durch. Hierbei wird die Distanz mittels der Ortsangabe des Kennzeichens und dem Abstand dieser Gemeinde zu der Baustelleneinfahrt, unter der Verwendung von Google Maps, ermittelt. Der Abstand zwischen Mischanlage und Baustelle wird ebenfalls mit Google Maps bestimmt.

Der Rechenvorgang zur Errechnung der Leerfahrten in Fahrzeugkilometern (Leer_KM) und der Vollfahrten in Tonnenkilometern (Voll_KM) wird folgend dargestellt. Hierfür wurde die Anzahl der Fahrten mit den entsprechenden Distanzen multipliziert. Die Ermittlung der Vollfahrten erfordert eine weitere Multiplikation mit der transportierten Masse.

$$\text{Leer_KM[Fzkm]} = \text{Heimfahrten} * \text{Distanz(BST-Heimat)} * 2 + \text{Rückfahrten} * \text{Distanz(MA-BST)}$$

$$\text{Voll_KM[tkm]} = \text{Vollfahrten} * \text{Masse} * \text{Distanz(MA-BST)}$$

Um eine für die Analyse notwendige Schichtzuordnung zu schaffen, werden sowohl die Spalten der Vollfahrt- und Leerfahrt-Kilometer, als auch der Masse nach den beiden Materialien, aufgeteilt. Daraus ergibt sich eine Ergebnistabelle mit den folgenden zur Auswertung verwendeten Werten:

- Datum
- Kennzeichen
- Abstand-Heimfahrt
- Heimfahrten
- Vollfahrten
- Leerfahrten
- Voll_KM-Material1 & Voll_KM-Material2
- Leer_KM-Material1 & Leer_KM-Material2
- Masse-Material1 & Masse-Material2

Aufgrund der Beobachtungen vor Ort und der Höhe der verladenen Massen wird angenommen, dass nur Sattel-Fahrzeuge für den Transport des Mischguts bzw. des Fräsguts verwendet wurden.

3.4.1.2 Baumaschinentransporte

Unter Absprache mit dem Baustellentechniker werden die Arten der Baumaschinen und demzufolge die **Anzahl der Baumaschinentransporte** ermittelt (An- und Rücktransport vom bzw. zum Lager). Das Gewicht der Maschine wird über dessen technisches Datenblatt bestimmt. Die **Feststellung der Distanz** erfolgt über eine Google Maps Route zwischen Baustelleneinfahrt und Gerätelager. Die zur THG-Berechnung erforderlichen Kilometer, sowohl der Vollfahrten, als auch der Leerfahrten, werden auf die selbe Art und Weise wie bei dem Mischgut- und Fräsguttransport berechnet. Der Transport erfolgt mittels Tiefladern.

Um eine Zuordnung zu der entsprechenden Schicht zu ermöglichen, werden die Transporte der Asphaltmaschinen nach Asphaltmassen (AC22, SMA11) gewichtet. Hierbei wird somit für beide Schichten jeweils ein Asphalt-Massen-Faktor ermittelt, welcher aus dem Verhältnis des Mischguts zur gesamten Asphaltmasse hervorgeht. Die Transporte der Fräsmaschinen können direkt der

Frässhicht zugerechnet werden. Da das Fräsen als Subunternehmerleistung durchgeführt wird und der Standort des Lagers nicht bekannt ist, muss dieser durch den Firmensitz abgeschätzt werden.

3.4.1.3 Diverse andere Lkw-Transporte

Hierbei handelt es sich um Transporte, welche nur indirekt einen Beitrag zum Baufortschritt leisten. Da kalkulatorisch keine direkte Zuordnung zur Leistung geschieht und diese somit als Gemeinkosten eingeordnet werden, sind diese als Nebenleistungen einzustufen. Berücksichtigt werden die Fahrten aus Baustelleneinrichtung und -räumung sowie die der Dieseltransporte.

Baustelleneinrichtung und -räumung

Die Baustelleneinrichtung geschieht bereits vor der Baustellenabwicklung, die Baustellenräumung direkt danach. Mit Hilfe des Technikers wird die Anzahl und das Gewicht der Fuhren, sowie der Typ der transportierenden Lkws abgeschätzt. Da hierbei ein direkter Bezug zu dem Asphaltmischgut bzw. Fräsgut fehlt, wird ein Gesamtmassenfaktor verwendet, welcher ein Verhältnis der einzelnen Massen (AC22, SMA11, Fräsgut) zur Gesamtmasse darstellt. Dadurch kann eine direkte Schicht- bzw. Materialzuordnung erfolgen.

Dieseltransporte

Die Dieseltransporte geschehen auf täglicher Basis mittels einer Pritsche (Lkw < 3,5 t). Die Tankstelle während des Asphalteinbaus und somit die Distanz dorthin ist bekannt. Der Abstand zur Betankungsstelle im Rahmen der Fräsarbeiten wird mit 10 km abgeschätzt. Die Masse und somit das Transportgewicht des Diesels wurde mittels der Dichte berechnet. Die Anzahl der Transporte, und folglich der An- und Rückfahrten, wird mittels der durchgeführten Baustellentage abgeschätzt.

3.4.1.4 Ergebnisse

Durch die Multiplikation der berechneten Distanzen (Voll_KM, Leer_KM) in den Einheiten Tonnenkilometer, Personenkilometer oder Fahrzeugkilometer mit den entsprechenden Emissionsfaktoren ergeben sich die gesamten Transportemissionen. Die Vorgehensweise einer solchen Berechnung ist folgend ersichtlich.

$$\text{THG-Emissionen}[\text{kg CO}_2\text{-eq}] = \text{Voll_KM}[\text{tkm}] * \text{Emissionswert}[\text{kg CO}_2\text{-eq}/\text{tkm}] + \text{Leer_KM}[\text{Fzkm}] * \text{Emissionswert}[\text{kg CO}_2\text{-eq}/\text{Fzkm}]$$

$$\text{THG-Emissionen}[\text{kg CO}_2\text{-eq}] = \text{Personen_KM}[\text{Pkm}] * \text{Emissionswert}[\text{kg CO}_2\text{-eq}/\text{Pkm}]$$

Die Darstellung der Ermittlung der Treibhausgasemissionen wird nach Lkw- und Pkw-Verkehr aufgeteilt. In Tab. 3.10 finden sich die THG-Emissionen der Lastkraftfahrzeuge wieder.

Tab. 3.10: Berechnung der THG-Emissionen für Lkw-Transporte

Transport	Fahrzeug	tkm	Fzkm	Emissionsfaktor1 kg CO ₂ -Eq/tkm	Emissionsfaktor2 kg CO ₂ -Eq/Fzkm	THG-Emissionen kg CO ₂ -Eq
Antransport von Material (NL)	LKW LNF (<3,5t)	537	786	0,8983	0,4260	2.546
Antransport von Material (HL)	LKW LNF (>18t)	9.378	1.176	0,1487	0,9795	817
Antransport von Material (HL)	Sattelzüge (40t)	1.494.957	78.718	0,0690	1,0606	186.641
Antransport von Gerät (HL)	LKW LNF (>18t)	31.367	1.338	0,1487	0,9795	5.975

Für eine Berechnung der Lkw-Emissionen sind zwei Emissionsfaktoren notwendig: einer, welcher die beladene Fahrt in Tonnenkilometern berücksichtigt (Emissionsfaktor 1), und einer, der die Leerfahrten in Fahrzeugkilometern einschließt (Emissionsfaktor 2).

Werden diese gesamten THG-Emissionen nun auf die einzelnen Schichten (Binderschicht, Deckschicht, Frässhicht) aufgeteilt, und anschließend mittels Division durch die Schichtfläche sowie die gemittelte Dicke angepasst, so ergibt sich der entsprechende Emissionsfaktor. Hierfür wurden aufgrund ihres niedrigen Ausmaßes, und um im Rahmen der ÖNORM EN 15978:2011 zu bleiben, die Personenfahrten vernachlässigt.

Tab. 3.11: Berechnung der Emissionsfaktoren für den Transportanteil (A4)

Schicht	Material	Fläche m ²	Gewichtete		THG-Emissionen kg CO ₂ -Eq	Emissionsfaktor kg CO ₂ -Eq/m ² /cm
			Dicke cm			
Binderschicht	AC22	58.854,0	9,12		82.780,7	0,154
Deckschicht	SMA11	62.956,0	3,50		34.559,3	0,157
Frässhicht	Fräsgut	45.007,1	13,25		78.639,0	0,132

3.4.2 Errichtung/Einbau (A5)

Der andere Bestandteil der Errichtungsphase, neben Transport, lautet Errichtung/Einbau. Dabei werden die Prozesse vor Ort behandelt. Es stehen sowohl für die Fräsmaschinen, als auch die Geräte, welche für den Asphalteinbau notwendig sind, die realen Dieserverbräuche zur Verfügung. Für einige wenige müssen Verbrauchswerte bestimmt bzw. muss auf Literaturwerte zurückgegriffen werden.

3.4.2.1 Bestimmung von Verbrauchswerten

Für einzelne Baumaschinen sind keine realen Verbräuche erhältlich. Dies betrifft die Kehrmaschinen und den Wasserwagen. Deshalb müssen diese aufgrund von Tankrechnungen, welche die Fahrer der Fahrzeuge bereitgestellt haben, und geschätzter Betriebsstunden ermittelt werden. Für den Mobilbagger wird ein Verbrauchswert aus der Literatur angenommen.

Zur Berechnung des Dieserverbrauchs des Wasserwagens wurde eine Rechnung bereitgestellt; für die Kehrmaschinen sind zwei Belege verfügbar. Bei letzteren wird somit ein Mittelwert gebildet.

Tab. 3.12: Bestimmung der Verbrauchswerte

Maschine	Verbrauch1 l	Dauer1 h	Verbrauch2 l	Dauer2 h	Verbrauchswert l/h
Kehrmaschine	307	9,0	312	10,5	31,91
Wasserwagen	78	10,3	-	-	7,57
Mobilbagger	-	-	-	-	10,16

3.4.2.2 Asphaltieren & Fräsen

Asphaltieren

Die im Rahmen des Asphaltierprozesses eingesetzten Maschinen beinhalten die Asphaltiermaschinen (Beschicker, Fertiger, Walzen), die Kehrmaschine (nur auf Anforderung bei Verschmutzungen) und den Mobilbagger (auf Anforderung vor Ort).

Für die Asphaltiermaschinen stehen detaillierte Aufzeichnungen des Dieserverbrauchs zur Verfügung. Hierbei wurde bei der Befüllung jeder Maschine die eingefüllte Dieselmenge mitgeschrieben. Um den Dieserverbrauch der Kehrmaschine bzw. des Mobilbaggers zu bestimmen, werden Schätzungen der Betriebsstunden durch den Baustellentechniker zu Grunde gelegt und anschließend mit dem entsprechenden Verbrauchswert multipliziert. Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen muss diese nur in Megajoule umgerechnet und anschließend mit dem Emissionsfaktor multipliziert werden.

Tab. 3.13: Bestimmung der Verbräuche während der Asphaltierarbeiten

Maschine	Stunden l	Verbrauch/h l/h	Verbrauch1 l	Verbrauch2 MJ
Beschicker	-	-	3.330,0	119.880,0
Fertiger1	-	-	2.216,0	79.776,0
Fertiger2	-	-	1.836,0	66.096,0
Fertiger3	-	-	698,0	25.128,0
Walze1	-	-	1.004,0	36.144,0
Walze2	-	-	820,0	29.520,0
Walze3	-	-	617,0	22.212,0
Walze4	-	-	435,0	15.660,0
Kehrmaschine	15	31,91	478,7	17.232,9
Mobilbagger (NL)	30	10,16	304,8	10.972,8

Fräsen

Während der Fräsarbeiten kommen drei Fräsmaschinen, zwei Kehrmaschinen und der Mobilbagger zum Einsatz. Für die Fräsen wird ein gesamter Dieserverbrauch bereitgestellt und ist mit **11.443**

Liter Diesel bezieht. Hierfür wird eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt, indem dieser Betrag durch die maximal werkenden Fräsen und anschließend durch die gesamte Arbeitszeit, welche aus den Lieferscheinen approximiert wurde, dividiert wird.

$$\begin{aligned}\text{Stundenverbrauch[l/h]} &= \text{Gesamtverbrauch[l]} / \text{Fräsenanzahl[-]} / \text{Arbeitszeit[h]} \\ &= 11.443[\text{l}] / 2[-] / 64,72[\text{h}] \\ &= \mathbf{88,40 \text{ l/h}}\end{aligned}$$

Wird der Stundenverbrauchswert mit Angaben aus technischen Datenblättern verglichen, so handelt es sich hierbei um ähnliche Zahlenwerte. Nachfolgend in Tab. 3.14 wird der Dieserverbrauch und der damit verbundene Energieverbrauch aller, während des Fräsvorgang eingesetzten, Maschinen dargestellt.

Tab. 3.14: Bestimmung der Verbräuche während der Asphaltierarbeiten

Maschine	Stunden l	Verbrauch/h l/h	Verbrauch1 l	Verbrauch2 MJ
Alle Fräsen	-	-	435,0	15.660,0
Kehrmaschine	15	31,91	478,7	17.232,9
Mobilbagger (NL)	30	10,16	304,8	10.972,8

Ergebnisse

Zur Berechnung der gesamten Treibhausgasemissionen für die Errichtung/Einbau-Phase, werden nun die bereits bestimmten Diesel- und folglich Energieverbräuche mit dem entsprechenden Emissionsfaktor multipliziert. Die entsprechenden Resultate finden sich in Tab. 3.15 wieder.

Tab. 3.15: Berechnung der THG-Emissionen für Errichtung/Einbau (A5)

Prozess	Diesel- verbrauch l	Energie- verbrauch MJ	Emissionsfaktor kg CO ₂ -Eq/MJ	THG-Emissionen kg CO ₂ -Eq
Asphaltieren & Fräsen (HL)	27.498,6	989.949,0	0,09195	91.025,8
Vorhalteleistungen (NL)	335,3	12.070,1	0,09195	1.109,8

Zur Bestimmung der Emissionsfaktoren müssen die THG-Emissionen nach der entsprechenden Schicht aufgeteilt werden. Dies geschieht über einen Massefaktor, der eine verhältnismäßige Zuteilung erlaubt. Anschließend wird die Emissionssumme durch die Fläche und die gewichtete Dicke der Schicht dividiert. Die Ergebnisse hierfür sind in Tab. 3.16 dargestellt.

Tab. 3.16: Berechnung der Emissionsfaktoren für den Errichtung/Einbau-Anteil (A5)

Schicht	Material	Gewichtete		THG-	Emissionsfaktor kg CO ₂ -Eq/m ² /cm
		Fläche m ²	Dicke cm	Emissionen kg CO ₂ -Eq	
Binderschicht	AC22	58.854,0	9,12	27.632,9	0,051
Deckschicht	SMA11	62.956,0	3,50	11.227,1	0,051
Frässhicht	Fräsgut	45.007,1	13,25	53.275,59	0,089

3.5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die erhobenen Daten entsprechend aufbereitet, sodass eine Interpretation möglich ist. Einerseits werden hierbei Verhältnisse der Emissionsanteile anhand unterschiedlicher Kategorien erörtert, und andererseits werden Emissionsfaktoren in der Form Treibhausgasemissionen [kg CO₂-Eq] pro Fläche [m²] pro Schichtstärke [cm] bestimmt.

3.5.1 Emissionsübersicht

Zur Übersicht der gesamten Treibhausgasemissionen dient Tab. 3.17. Es erfolgt eine Aufteilung nach ÖNORM EN 15978:2011.

Tab. 3.17: Gesamte THG-Emissionsübersicht

Kategorie lt. ÖNORM	Bezeichnung	Phase	THG-Emissionen kg CO ₂ -Eq	Anteil %
A1	Rohstoffbeschaffung	Herstellung	363.798,4	35,48
A2	Transport	Herstellung	27.632,9	2,96
A3	Produktion	Herstellung	315.864,4	31,67
A4	Transport	Errichtung	195.979,2	19,65
A5	Errichtung/Einbau	Errichtung	92.135,7	9,24
Summe			997.285,4	100,0

Diese tabellarische Darstellung ist in Abb. 3.4 grafisch aufbereitet. Ein Tortendiagramm zeigt farblich den Anteil der einzelnen Kategorien an dem gesamten THG-Ausstoß.

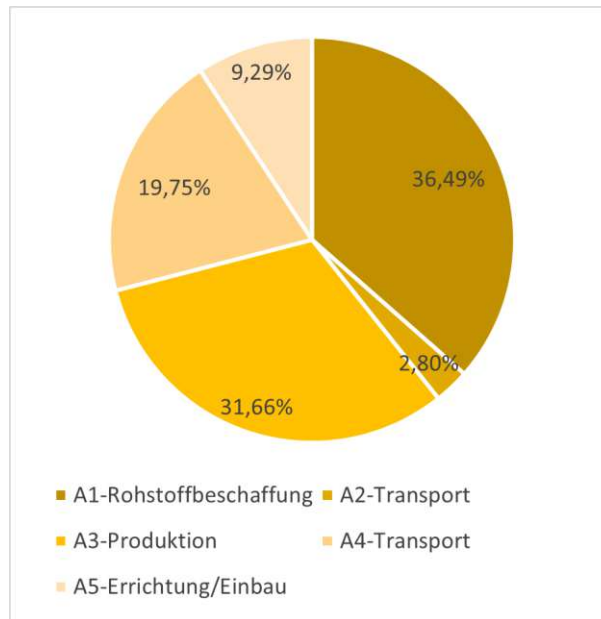


Abb. 3.4: Diagramm THG-Emissionsübersicht

3.5.2 Emissionsverhältnisse

Für etwaige Vergleiche ist es von Bedeutung, Verhältnisse der einzelnen Einflusskategorien zu bilden. Hierbei wird jeweils unterschieden in „Asphaltieren/Fräsen“, „Hauptleistungen/Nebenleistungen“ und nach Schichtart.

3.5.2.1 Asphaltieren/Fräsen

In dem Verhältnis der THG-Emissionen zwischen den Asphaltier- und den Fräsarbeiten werden lediglich die Leistungen aus dem Transport (Mischgut bzw. Fräsgut) und den Arbeiten vor Ort berücksichtigt. Die Herstellung des Asphaltmaterials fällt hier also nicht ins Gewicht.

Tab. 3.18: Emissionsverhältnis Asphaltieren/Fräsen

Prozess	THG-Emissionen kg CO ₂ -Eq	Anteil %
Asphaltierarbeiten	156.137	54,19
Fräsarbeiten	131.977	45,81
Summe	288.155	100,0

Die tabellarisch aufbereitete Verteilung ist grafisch in Abb. 3.5 dargestellt.

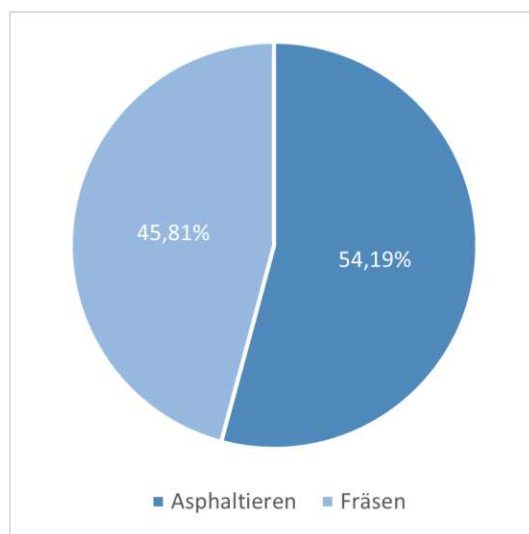


Abb. 3.5: Diagramm THG-Emissionen Asphaltieren/Fräsen

3.5.2.2 Hauptleistungen/Nebenleistungen

Weiterhin ist es möglich den Treibhausgasausstoß nach Hauptleistungen und Nebenleistungen zu unterteilen. Hierbei wird zusätzlich zwischen der Aufteilung nach Norm (exkl. Pkw-Fahrten) und der inkl. Pkw-Fahrten unterschieden. Beide Varianten sind in Tab. 3.19 ersichtlich.

Tab. 3.19: Emissionsverhältnis Hauptleistung/Nebenleistung

Leistungsart	THG-Emissionen (lt. Norm) kg CO ₂ -Eq	Anteil (lt. Norm) %	THG-Emissionen (inkl. Pkw) kg CO ₂ -Eq	Anteil (inkl. Pkw) %
Hauptleistungen	989.297	99,70	994.830	99,54
Nebenleistungen	2.949	0,30	4.570	0,46
Summe	992.246	100,0	999.400	100,0

3.5.2.3 Schichtart

Wird die THG-Erzeugung nach Schichtart unterschieden, ergibt sich die in Tab. 3.20 dargestellte Aufteilung. Es ist zu betonen, dass hierbei die Masse der Materialien der ausschlaggebende Faktor ist, welche bei der Binderschicht (AC22) überwiegt.

Tab. 3.20: Emissionsverhältnis nach Schicht

Schicht	THG-Emissionen kg CO ₂ -Eq	Anteil %
Binderschicht	586.144,7	58,77
Deckschicht	279.226,0	28,00
Frässhicht	131.914,8	13,23
Summe	997.285	100,0

3.5.3 Emissionsfaktoren

Aus der Aufteilung nach Schichtart und folglich nach Material werden in Kombination mit Planungswerten (Schichtfläche, Schichtstärke) Emissionsfaktoren gebildet. Diese werden zuerst nach den Kategorien der ÖNORM EN 15978:2011 aufgeteilt. Anschließend ergibt sich mittels Summe dieser ein gesamtheitlicher Emissionsfaktor pro Schichtart in dem Format THG-Emissionen [kg CO₂-Eq] pro Schichtfläche [m²] pro Schichtstärke [cm]. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tab. 3.2 zusammengefasst.

Tab. 3.21: Emissionsfaktoren

Schicht	A1 kg CO ₂ - Eq/m ² /cm	A2 kg CO ₂ - Eq/m ² /cm	A3 kg CO ₂ - Eq/m ² /cm	A4 kg CO ₂ - Eq/m ² /cm	A5 kg CO ₂ - Eq/m ² /cm	Gesamt kg CO ₂ - Eq/m ² /cm
Binderschicht	0,442	0,025	0,413	0,154	0,051	1,085
Deckschicht	0,566	0,066	0,421	0,157	0,051	1,261
Frässhicht	-	-	-	0,132	0,089	0,221

Folgend werden die Emissionsfaktoren nach den Schichten aufgeteilt und in einem Balkendiagramm (Abb. 3.6) dargestellt. Die Beiträge der einzelnen Kategorien sind farbliche Bestandteile der Balken.

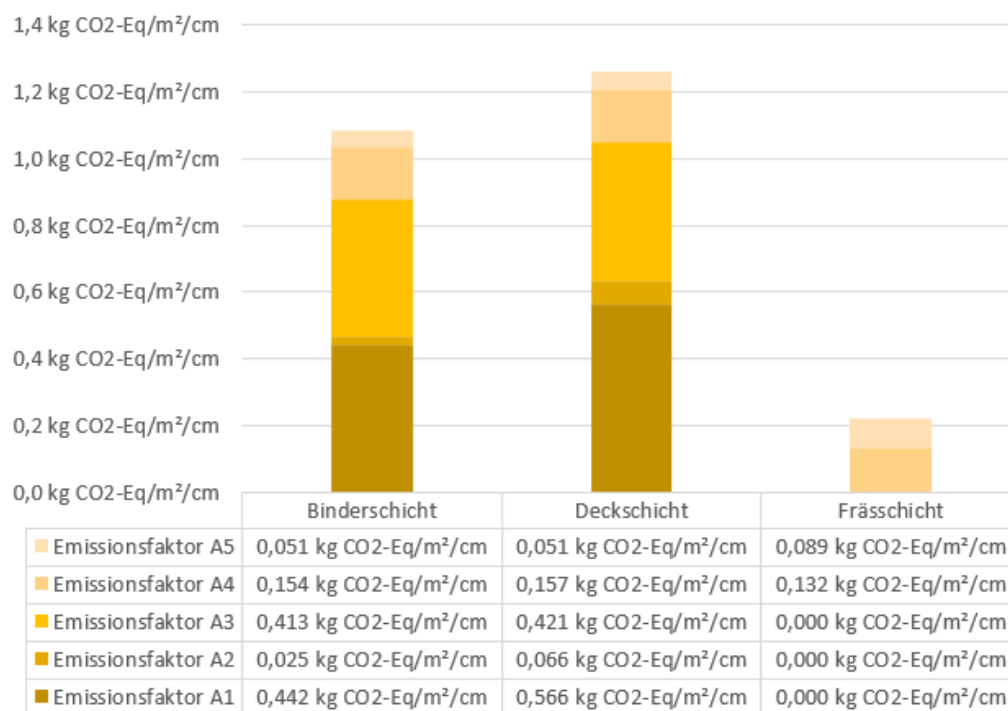


Abb. 3.6: Diagramm THG-Emissionen Asphaltieren/Fräsen

3.6 Einsparpotentiale

Der letzte Schritt einer Lebenszyklusanalyse ist die Bilanzbewertung. Hierbei werden für das gegenständliche Projekt Einsparpotentiale definiert. Kategorisch sind diese, wie auch schon im

Grundlagenkapitel beschrieben, in organisatorische Maßnahmen, Anpassungen im Rahmen der Mischgutherstellung und alternative Kraftstoffe sowie Antriebe eingeteilt.

3.6.1 Organisatorische Maßnahmen

Organisatorische Maßnahmen im Rahmen des Asphalteinbaus können einen positiven Beitrag zur Treibhausgasreduktion beitragen. Hierfür ist vor allem die Digitalisierung des Einbauprozesses ein wichtiger Hebel. Relevant ist eine korrekte Nutzung der Software, sodass daraus Einspar- bzw. Optimierungspotentiale herausgelesen werden können.

Logistik-Tool

In der Ausführungsphase wird eine Logistik-Software angewendet. Bei der Bewertung von Einsparpotentialen ist es mittels dieser möglich SOLL-IST-Vergleiche anzustellen. Da kein direkter Einblick auf das tägliche Baugeschehen vorhanden und die Dokumentation nicht ausreichend genau ist, können lediglich Vermutungen angestellt werden. Ist die Planung selbst bereits fehlerhaft und entspricht somit nicht der Realität, sind nicht einmal solche Vermutungen sinnvoll. Aufgrund der Nutzung der Applikation in vorangegangenen Projekten durch die Bauleitung, ist ausreichend Erfahrung vorhanden und folglich davon auszugehen, dass eine richtige Verwendung der Software erfolgt ist. Werden die täglichen Auswertungen des Projektes nach der eingebauten Tonnage betrachtet, wird festgestellt, dass die Planung größtenteils mit nur wenigen Ausnahmen mit der Ausführung übereinstimmt.

Beispielhaft wird folgend der Einbautag 19.05.2022 betrachtet. Das Einbaudiagramm ist in Abb. 3.7 ersichtlich. Auf der horizontalen Achse ist die Uhrzeit dargestellt, auf der vertikalen die eingebaute Asphalt-Tonnage. Hierbei ist die rote Linie die „SOLL-Linie“, also der geplante Verlauf des Bauvorhabens für diesen Tag; die blaue Linie die „IST-Linie“, welche den realen Verlauf darstellt. Im besten Fall sollten diese beiden Linien identisch sein, denn dann ist die Ausführung genau so verlaufen, wie diese vorher geplant war. Werden die beiden Linien miteinander verglichen, wird erkannt, dass sie seitlich versetzt sind, was als Folge eines verfrühten Einbaubeginns zu werten ist. Da die Steigung der IST-Linie gleichbleibend ist, ist anzunehmen, dass die Fertigergeschwindigkeit konstant gehalten wurde. In der Planung ergeben sich, aufgrund der gesetzlich geregelten Pausenzeiten der Lenker, Stillstände. Diese wurden in der Ausführung nicht ideal eingehalten, sondern vermutlich zeitlich versetzt durchgeführt. Die etwas erhöhte Leistung ergibt sich aufgrund von der geringeren Umlaufzeit der Lkws in der Realität, als in der Planungsphase angenommen. Dies kann beispielhaft mit besonders guten Verkehrsverhältnissen an diesem Tag zusammenhängen.

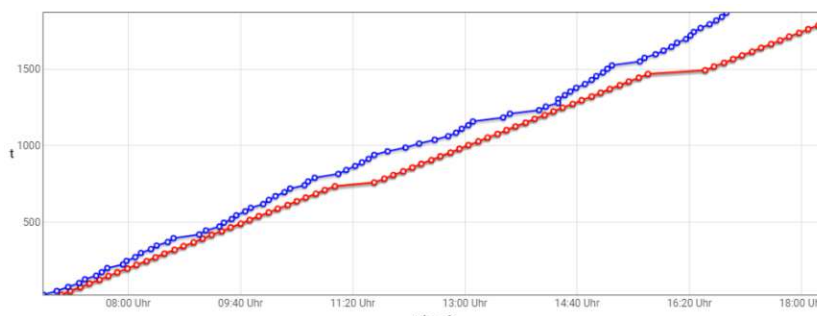


Abb. 3.7: Logistik-Software: Einbaudiagramm vom 19.05.2022

Auch die Kennzahlen in Abb. 3.8 des Einbautages 19.05.2022 lassen auf einen planmäßigen Bauablauf schließen. Insbesondere die Tonnage zeigt geringe Abweichungen auf. Aus der kürzeren Einbauzeit, welche auch im Einbaudiagramm ersichtlich ist, folgt eine erhöhte Einbauleistung.



Abb. 3.8: Logistik-Software Kennzahlen des Einbaus vom 19.05.2022

Eine wichtige Anmerkung hierbei ist, dass es sich baustellenseitig teilweise um manuelle Eingaben handelt (Beginn Entladung, eingebaute Strecke), welche mit menschlichen Fehlern behaftet sein können. Die Ankunft der Lkws auf der Baustelle geschieht automatisiert mittels eines GeoFence. Hierbei wird auf einer Karte ein Bereich definiert, welcher festlegt, wo angenommen werden kann, dass ein ankommender Lkw bereits auf eine Entladung wartet. Somit handelt es sich um eine Umrandung der Baustelle.

Verdichtungs-Tool

Das Verdichtungs-Tool gibt Rückschluss auf die Verdichtungsleistung. Ein Ausschnitt der Darstellung der Anzahl der dynamischen Überfahrten vom 01.06.2022 ist in Abb. 3.9 ersichtlich und wird farblich entlang der Strecke dargestellt; die entsprechende Legende ist links oben in der Grafik abgebildet. Es ist erkennbar, dass vor allem der grüne (optimale Verdichtung) und der blaue (Überverdichtung) Bereich vorherrschen. Hierbei ist als mögliches Potential die Optimierung der Fahrweise der Walzen mittels Schulungen zu erwähnen. Damit kann die Anzahl der Überfahrten verringert werden, wodurch einerseits die Qualität des Asphalts steigt, und andererseits der Dieserverbrauch und die Abnutzung der Walzen sinkt.

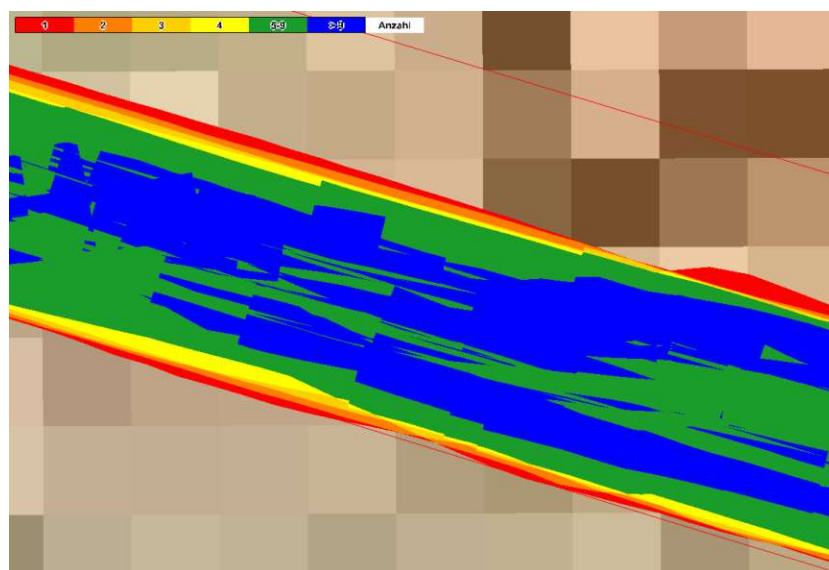


Abb. 3.9: Verdichtungs-Software: Anzeige der dynamischen Überfahrten vom 01.06.2022

Einsparpotential

Sowohl das Logistik-Tool als auch das Verdichtungs-Tool lassen indirekt Schlüsse zu, dass THG-Einsparungen möglich sind. Über ersteres kann der Bestellung von zu viel Material, welches entsorgt werden muss, vorgebeugt werden. Weiterhin ist davon auszugehen, dass bei einer optimalen Prozessabwicklung eine höhere Effizienz vorherrscht, womit gleichzeitig eine Verkürzung der Arbeitszeit einhergeht, wodurch wiederum die Betriebsstunden aller involvierten Baumaschinen reduziert werden. Das Verdichtungs-Tool ermöglicht eine Optimierung der Walzenwege, womit einerseits Betriebsstunden eingespart werden (üblicherweise kommt es zu Überverdichtung), und andererseits die Qualität der Straße steigt. Letzteres sorgt vor allem in der Nutzungsphase, welche in dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet wird, für THG-Einsparungen bei Pkw- und Lkw-Überfahrten. Es ist sowohl für das Logistik-, als auch das Verdichtungs-Tool, nicht möglich quantifizierbare, verlässliche Einsparpotentiale zu bestimmen, ohne detaillierten Einblick auf den Einbauvorgang zu haben, welcher in diesem Fall nicht möglich war.

3.6.2 Mischgutherstellung

Für die Mischgutproduktion wurden die Potentiale des Recyclings, des Warmasphaltes sowie der gesamten Überdachung der Gesteinskörnung auf der Mischanlage untersucht.

3.6.2.1 Recycling

Durch einen erhöhten Recyclinganteil ist es möglich den Bestandteil der THG-Emissionen des Materialrucksacks zu reduzieren, da sich die Prozesse von dem Rohstoffabbau und sonstiger aufbereitender Maßnahmen auf das Fräsen des Altbestands reduzieren. Das Bauvorhaben wurde mittels 20 % RAP-Anteil in Form von Kaltzugabe in den Binderschichten durchgeführt. Die Deckschicht enthielt keinen Recyclinganteil, da dies in Österreich momentan unüblich ist. Das Potential hierbei ist die Erhöhung des RAP-Anteils in den Binderschichten.

Aktuell wird der RAP-Anteil bei Asphaltsschichten mit 50 % bzw. seltener mit 60 % begrenzt. Das RAP-Tool erlaubt einen maximalen Anteil von 50 %. Da bei so einer hohen Quote an Asphaltgranulat jedoch eine Warmzugabe mittels Paralleltrommel notwendig ist, muss die Erwärmungstemperatur sowohl für den Recycling- als auch den Gesteinsanteil korrigiert werden.

Hierbei wurde für das RAP-Material 120,0 °C und für das Gesteinsgut 200,0 °C gewählt [30, S. 37]. Die Eingabewerte des RAP-Tools werden folgend in Abb. 3.10 angeführt.

Eingabe														
Masseanteil RAP [%]		ohne Masseanteil RAP						Überprüfung Masseanteil						
Masseanteil Gestein [%]		Masseanteil Füller [%]		Masseanteil Bitumen [%]		Überprüfung Masseanteil								
-	50	+	-	93,5	+	-	2,0	+	-	4,5	+	100,0 %		
Gesteinsanteil RAP [M%]		Fülleranteil RAP [M%]		Bitumenanteil RAP [M%]		Überprüfung Masseanteil								
-	89,6	+	-	7,9	+	-	2,5	+	100,0 %					
Feuchtanteil RAP [M%]		Feuchtanteil Gestein [M%]		Feuchtanteil Füller [M%]		PmB								
-	1,5	+	-	2,5	+	-	0,0	+	-	ja	+			
Ausgangstemperatur RAP [°C]		Ausgangstemperatur Gestein [°C]		Ausgangstemperatur Füller [°C]		Ausgangstemperatur Bitumen [°C]								
15,0		15,0		15,0		160,0								
Erwärmungstemperatur RAP [°C]		Erwärmungstemperatur Gestein [°C]		Erwärmungstemperatur Füller [°C]		Erwärmungstemperatur Bitumen [°C]								
-	120,0	+	-	200,0	+	-	15,0	+	-	180,0	+			
Wirkungsgrad Trocknung [%]		Wirkungsgrad Mischer [%]		Energieträger										
85		85		Erdgas										
Materialtransport RAP [km]		Materialtransport Gestein [km]		Materialtransport Füller [km]		Materialtransport Bitumen [km]		Materialtransport zur Baustelle [km]						
-	0	+	-	5	+	-	0	+	-	155	+	-	0	+

Abb. 3.10: AC22 (Recycling) - Eingabewerte im RAP-Tool

Die Ergebnisse aus der Berechnung des RAP-Tools werden in Tab. 3.22 dargestellt. Es handelt sich um die Emissionsfaktoren aufgeschlüsselt nach den Kategorien aus ÖNORM EN 15978:2011, sowie deren Summe.

Tab. 3.22: AC22 (Recycling) - Emissionsfaktoren aus RAP-Tool

Kategorie	Emissionsfaktor kg CO ₂ -Eq
A1	14,37
A2	0,67
A3	16,67
Gesamt	31,70

Durch Vergleich der im Bauvorhaben entstandenen CO₂-Emissionen, als Folge der Materialherstellung des Mischguts AC22 mit den adaptierten Werten aus dem RAP-Tool, wird das Reduktionspotential bezogen auf die realen Gesamtemissionen bestimmt. Schlussendlich ergibt sich eine Einsparmöglichkeit von **5,18 %**. Der Rechenweg hierfür ist folgend nachvollziehbar.

$$\begin{aligned}
\text{THG-AC22-Neu[kg CO}_2\text{-Eq]} &= \text{AC22_Faktor} * \text{AC22_Masse} = \\
&= 31,7[\text{kg CO}_2\text{-Eq/t}] * 13.176,8[\text{t}] = \\
&= 417.703,9 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
\text{THG-AC22-Alt[kg CO}_2\text{-Eq]} &= 469.093,4 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
\text{THG-AC22-Diff[kg CO}_2\text{-Eq]} &= \text{THG-AC22-Alt} - \text{THG-AC22-Neu} = \\
&= 469.093,4[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] - 417.703,9[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\
&= 51.389,4 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
\text{THG-Gesamt-Alt[kg CO}_2\text{-Eq]} &= 992.245,8 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
\text{THG-Reduktion[\%]} &= \text{THG-AC22-Diff} / \text{THG-Gesamt-Alt} = \\
&= 51.389,4[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] / 992.245,8[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\
&= \mathbf{5,18 \%}
\end{aligned}$$

Wird die berechnete Einsparung von 51.389,4 kg CO₂-Eq alternativ ins Verhältnis zu dem gesamten Treibhausgasausstoß, aufgrund der Materialproduktion des entsprechenden Mischguts (AC22), welche 469.093,4 kg CO₂-Eq beträgt, gesetzt, ergibt sich eine Einsparung von **10,96 %**.

3.6.2.2 Warmasphalt

Eine weitere mögliche Anpassung im Rahmen der Mischgutherstellung betrifft die Reduktion der Erwärmungstemperatur des Gesteins und somit der Herstellung von Warmasphalt. Für die Zieltemperatur des Gesteinguts wird hierbei 140 °C gewählt. Diese Temperatur stellt die obere Grenze der Warmasphalt-Kategorie (100-140 °C) dar. Weiterhin wird in diesem Szenario auf einen Recycling-Anteil verzichtet. Es werden somit lediglich Rohstoffe für die Produktion verwendet. Die eingegebenen Daten im RAP-Tool finden sich in Abb. 3.11 wieder.

Eingabe												
Masseanteil RAP [%]		Masseanteil Gestein [%]		Masseanteil Füller [%]		Masseanteil Bitumen [%]		Überprüfung Masseanteil				
-	0	+	-	93,5	+	-	2,0	+	-	4,5	+	100,0 %
		Gesteinsanteil RAP [M%]		Fülleranteil RAP [M%]		Bitumenanteil RAP [M%]		Überprüfung Masseanteil				
		-	89,6	+	-	7,9	+	-	2,5	+	100,0 %	
Feuchtanteil RAP [M%]		Feuchtanteil Gestein [M%]		Feuchtanteil Füller [M%]		PmB						
-	1,5	+	-	2,5	+	-	0,0	+	-	ja	+	
Ausgangstemperatur RAP [°C]		Ausgangstemperatur Gestein [°C]		Ausgangstemperatur Füller [°C]		Ausgangstemperatur Bitumen [°C]						
15,0		15,0		15,0		160,0						
Erwärmungstemperatur RAP [°C]		Erwärmungstemperatur Gestein [°C]		Erwärmungstemperatur Füller [°C]		Erwärmungstemperatur Bitumen [°C]						
15,0		140,0		15,0		180,0						
Wirkungsgrad Trocknung [%]		Wirkungsgrad Mischer [%]		Energieträger								
85		85		Erdgas								
Materialtransport RAP [km]		Materialtransport Gestein [km]		Materialtransport Füller [km]		Materialtransport Bitumen [km]		Materialtransport zur Baustelle [km]				
0		5		0		155		0				

Abb. 3.11: AC22 (Warmasphalt) - Eingabewerte im RAP-Tool

Die Ergebnisse der Berechnung des Tools sind in Tab. 3.23 dargestellt.

Tab. 3.23: AC22 (Warmasphalt) - Emissionsfaktoren aus RAP-Tool

Kategorie	Emissionsfaktor kg CO ₂ -Eq
A1	20,33
A2	1,13
A3	14,93
Gesamt	36,40

Da in dem aktuellen Szenario im Gegensatz zur Realität kein Recyclinganteil in Rechnung gestellt wurde, ergibt sich, trotz der Temperaturreduktion, eine Erhöhung der Treibhausgasemissionen. Diese wird, ersichtlich in nachfolgender Rechnung, mit **1,06 %** quantifiziert. Vernachlässigt ist hierbei der Einfluss von etwaigen Zugabemitteln (Wachse, chemische Zusätze, etc.).

$$\begin{aligned}
 \text{THG-AC22-Neu[kg CO}_2\text{-Eq]} &= \text{AC22_Faktor} * \text{AC22_Masse} = \\
 &= 36,4[\text{kg CO}_2\text{-Eq/t}] * 13.176,8[\text{t}] = \\
 &= 479.634,8 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \\
 \text{THG-AC22-Alt[kg CO}_2\text{-Eq]} &= 469.093,4 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \\
 \text{THG-AC22-Diff[kg CO}_2\text{-Eq]} &= \text{THG-AC22-Neu} - \text{THG-AC22-Alt} = \\
 &= 479.634,8 [\text{kg CO}_2\text{-Eq}] - 469.093,4[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\
 &= 10.541,4 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \\
 \text{THG-Gesamt-Alt[kg CO}_2\text{-Eq]} &= 992.245,8 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \\
 \text{THG-Erh\u00f6hung[\%]} &= \text{THG-AC22-Diff} / \text{THG-Gesamt-Alt} = \\
 &= 10.541,4[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] / 992.245,8[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\
 &= \mathbf{1,06 \%}
 \end{aligned}$$

Wird die berechnete Einsparung von 10.541,4 kg CO₂-Eq alternativ ins Verh\u00e4ltnis zu dem gesamten Treibhausgasaussto\u00df aufgrund der Materialproduktion des entsprechenden Mischguts (AC22), welche 469.093,4 kg CO₂-Eq betr\u00e4gt, gesetzt, ergibt sich eine Erh\u00f6hung der Treibhausgasemission von **2,25 %**. Ein Ersatz des Recyclinganteils mittels Kaltzugabe zum Zwecke einer geringeren Erw\u00e4rmungstemperatur ist folglich, im Sinne der Entstehung von Treibhausgasemissionen, nicht sinnvoll.

3.6.2.3 \u00dcberdachung

Eine weitere M\u00f6glichkeit zur Modifikation des Mischprozesses mit einem potentiellen Mehrwert zur Reduktion von THG-Emissionen, ist die \u00dcberdachung jeglicher Gesteinsk\u00f6rnungen sowie des Recyclingmaterials zur maximalen Reduktion des Feuchteanteils. Die in dem gegenst\u00e4ndlichen Projekt verwendete Mischanlage weist eine teilweise \u00dcberdachung auf. Gesteinsk\u00f6rnungen bis zu einem Durchmesser von 2 mm befinden sich unter einem Dach, der Rest des Gesteins ist frei gelagert. Wird hierbei ebenfalls ein Witterungsschutz angebracht, ergeben sich die in Abb. 3.12 und Abb. 3.13 dargestellten Eingabewerte im RAP-Tool.

Tab. 3.24: AC22 & SMA11 (\u00dcberdachung) - Emissionsfaktoren aus RAP-Tool

Kategorie	Emissionsfaktor AC22 kg CO ₂ -Eq	Emissionsfaktor SMA11 kg CO ₂ -Eq
A1	17,93	23,17
A2	0,93	2,57
A3	14,93	15,17
Gesamt	33,80	40,90

Eingabe				
Masseanteil RAP [%]	Masseanteil Gestein [%]	ohne Masseanteil RAP		Überprüfung Masseanteil
- 20 +	- 93,5 +	Masseanteil Füller [%]	Massenanteil Bitumen [%]	
		- 2,0 +	- 4,5 +	100,0 %
Gesteinsanteil RAP [M%]				
	- 89,6 +	Füllereanteil RAP [M%]	Bitumenanteil RAP [M%]	Überprüfung Masseanteil
		- 7,9 +	- 2,5 +	100,0 %
Feuchtanteil RAP [M%]	Feuchtanteil Gestein [M%]	Feuchtanteil Füller [M%]	PmB	
- 1,5 +	- 1,5 +	- 0,0 +	ja +	
Ausgangstemperatur RAP [°C]	Ausgangstemperatur Gestein [°C]	Ausgangstemperatur Füller [°C]	Ausgangstemperatur Bitumen [°C]	
15,0	15,0	15,0	160,0	
Erwärmungstemperatur RAP [°C]	Erwärmungstemperatur Gestein [°C]	Erwärmungstemperatur Füller [°C]	Erwärmungstemperatur Bitumen [°C]	
- 15,0 +	- 205,0 +	- 15,0 +	- 180,0 +	
Wirkungsgrad Trocknung [%]	Wirkungsgrad Mischer [%]	Energieträger		
85	85	Erdgas +		
Materialtransport RAP [km]	Materialtransport Gestein [km]	Materialtransport Füller [km]	Materialtransport Bitumen [km]	Materialtransport zur Baustelle [km]
- 0 +	- 5 +	- 0 +	- 155 +	- 0 +

Abb. 3.12: RAP-Tool (Überdachung)-AC22

Eingabe				
Masseanteil RAP [%]	Masseanteil Gestein [%]	ohne Masseanteil RAP		Überprüfung Masseanteil
- 0 +	- 89,3 +	Masseanteil Füller [%]	Massenanteil Bitumen [%]	
		- 5,5 +	- 5,2 +	100,0 %
Gesteinsanteil RAP [M%]				
	- 89,3 +	Füllereanteil RAP [M%]	Bitumenanteil RAP [M%]	Überprüfung Masseanteil
		- 5,5 +	- 5,2 +	100,0 %
Feuchtanteil RAP [M%]	Feuchtanteil Gestein [M%]	Feuchtanteil Füller [M%]	PmB	
- 1,5 +	- 1,5 +	- 0,0 +	ja +	
Ausgangstemperatur RAP [°C]	Ausgangstemperatur Gestein [°C]	Ausgangstemperatur Füller [°C]	Ausgangstemperatur Bitumen [°C]	
15,0	15,0	15,0	160,0	
Erwärmungstemperatur RAP [°C]	Erwärmungstemperatur Gestein [°C]	Erwärmungstemperatur Füller [°C]	Erwärmungstemperatur Bitumen [°C]	
- 15,0 +	- 185,0 +	- 15,0 +	- 180,0 +	
Wirkungsgrad Trocknung [%]	Wirkungsgrad Mischer [%]	Energieträger		
85	85	Erdgas +		
Materialtransport RAP [km]	Materialtransport Gestein [km]	Materialtransport Füller [km]	Materialtransport Bitumen [km]	Materialtransport zur Baustelle [km]
- 0 +	- 20 +	- 35 +	- 155 +	- 0 +

Abb. 3.13: RAP-Tool (Überdachung)-SMA11

$$\begin{aligned} \text{THG-AC22-Neu}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= \text{AC22_Faktor} * \text{AC22_Masse} = \\ &= 33,8[\text{kg CO}_2\text{-Eq/t}] * 13.176,8[\text{t}] = \\ &= 445.375,2 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \end{aligned}$$

$$\text{THG-AC22-Alt}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = 469.093,4 \text{ kg CO}_2\text{-Eq}$$

$$\begin{aligned} \text{THG-AC22-Diff}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= \text{THG-AC22-Alt} - \text{THG-AC22-Neu} = \\ &= 469.093,4[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] - 445.375,2[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\ &= 23.718,2 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{THG-SMA11-Neu}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= \text{AC22_Faktor} * \text{AC22_Masse} = \\ &= 40,9[\text{kg CO}_2\text{-Eq/t}] * 5.353,7[\text{t}] = \\ &= 218.964,7 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \end{aligned}$$

$$\text{THG-SMA11-Alt}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = 230.742,7 \text{ kg CO}_2\text{-Eq}$$

$$\begin{aligned} \text{THG-SMA11-Diff}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= \text{THG-SMA11-Alt} - \text{THG-SMA11-Neu} = \\ &= 230.742,7[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] - 218.964,7[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\ &= 11.778,1 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{THG-Sum-Diff}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= \text{THG-AC22-Neu} + \text{THG-SMA11-Neu} = \\ &= 23.718,2[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] + 11.778,1[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\ &= 35.496,3 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \end{aligned}$$

$$\text{THG-Gesamt-Alt}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = 992.245,8 \text{ kg CO}_2\text{-Eq}$$

$$\begin{aligned} \text{THG-Erhöhung}[\%] &= \text{THG-Sum-Diff} / \text{THG-Gesamt-Alt} = \\ &= 35.496,3[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] / 992.245,8[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\ &= \mathbf{3,58 \%} \end{aligned}$$

Wird die berechnete Einsparung von 35.496,3 kg CO₂-Eq alternativ ins Verhältnis zu dem gesamten Treibhausgasausstoß aufgrund der gesamten Materialproduktion, welche 699.836,1 kg CO₂-Eq beträgt, gesetzt, ergibt sich eine Einsparung von **5,07 %**.

3.6.2.4 Recycling & Warmasphalt & Überdachung

Mittels der Kombination der in den vorigen Unterkapiteln genannten Methoden zur Adaption der Mischgutproduktion, wird die Reduktion des Treibhauspotentials maximiert. Es wird folglich angenommen, dass alle Gesteinsbestandteile, inklusive des Recyclingmaterials, überdacht sind. Weiterhin wird das Mischgut AC22 als Warmasphalt unter Warmzugabe von 50 % RAP-Anteil optimiert. Sowohl Gesteins- als auch Recyclingmaterial werden auf 140 °C erhitzt. Der Einfluss der notwendigen Zusatzmittel wurde wiederum vernachlässigt. In Abb. 3.14 sind die Eingabewerte der kombinierten Maßnahmen ersichtlich.

Eingabe				
Masseanteil RAP [%]	Masseanteil Gestein [%]	Masseanteil Füller [%]	Massenanteil Bitumen [%]	Überprüfung Masseanteil
- 50 +	- 93,5 +	- 2,0 +	- 4,5 +	100,0 %
Gesteinsanteil RAP [M%]	Fülleranteil RAP [M%]	Bitumenanteil RAP [M%]	Überprüfung Masseanteil	
- 89,6 +	- 7,9 +	- 2,5 +	100,0 %	
Feuchtanteil RAP [M%]	Feuchtanteil Gestein [M%]	Feuchtanteil Füller [M%]	PmB	
- 1,5 +	- 1,5 +	- 0,0 +	ja	
Ausgangstemperatur RAP [°C]	Ausgangstemperatur Gestein [°C]	Ausgangstemperatur Füller [°C]	Ausgangstemperatur Bitumen [°C]	
15,0	15,0	15,0	160,0	
Erwärmungstemperatur RAP [°C]	Erwärmungstemperatur Gestein [°C]	Erwärmungstemperatur Füller [°C]	Erwärmungstemperatur Bitumen [°C]	
- 140,0 +	- 140,0 +	- 15,0 +	- 180,0 +	
Wirkungsgrad Trocknung [%]	Wirkungsgrad Mischer [%]	Energieträger		
85	85	Erdgas		
Materialtransport RAP [km]	Materialtransport Gestein [km]	Materialtransport Füller [km]	Materialtransport Bitumen [km]	Materialtransport zur Baustelle [km]
- 0 +	- 5 +	- 0 +	- 155 +	- 0 +

Abb. 3.14: AC22 (Recycling & Warmasphalt & Überdachung) - Eingabewerte im RAP-Tool

Die sich folgend ergebenden Ergebnisse finden sich in Tab. 3.25 wieder.

Tab. 3.25: AC22 & SMA11 (Überdachung) - Emissionsfaktoren aus RAP-Tool

Kategorie	Emissionsfaktor AC22 kg CO ₂ -Eq	Emissionsfaktor SMA11 kg CO ₂ -Eq
A1	14,40	23,17
A2	0,70	2,57
A3	14,20	15,17
Gesamt	29,30	40,90

Die Berechnung des möglichen Reduktionspotentials erfolgt über die Berechnung der Differenzen zwischen der neuen, optimierten THG-Emissionen und den alten aus dem realen Projekt. Für das Mischgut SMA11 wird der Differenzwert aus dem vorigen Kapitel verwendet, da hierbei weder Recyclinggut zugegeben, noch wurde dieses in Form von Warmasphalt ausgeführt. Schlussendlich ergibt sich ein Einsparpotential von **9,50 %** bezogen auf die gesamten Emissionen.

$$\begin{aligned}
 \text{THG-AC22-Neu}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= \text{AC22_Faktor} * \text{AC22_Masse} = \\
 &= 29,3[\text{kg CO}_2\text{-Eq/t}] * 13.176,8[\text{t}] = \\
 &= 386.079,7 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \\
 \text{THG-AC22-Alt}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= 469.093,4 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \text{THG-AC22-Diff}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= \text{THG-AC22-Alt} - \text{THG-AC22-Neu} = \\
 &= 469.093,4[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] - 386.079,7[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\
 &= 83.013,7 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \\
 \text{THG-SMA11-Diff}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= 11.778,1 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \text{THG-Sum-Diff}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= \text{THG-AC22-Neu} + \text{THG-SMA11-Neu} = \\
 &= 83.013,7[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] + 11.778,1[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] \\
 &= 94.256,4 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \\
 \text{THG-Gesamt-Alt}[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] &= 992.245,8 \text{ kg CO}_2\text{-Eq} \\
 \text{THG-Reduktion}[\%] &= \text{THG-Sum-Diff} / \text{THG-Gesamt-Alt} = \\
 &= 94.256,4[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] / 992.245,8[\text{kg CO}_2\text{-Eq}] = \\
 &= \mathbf{9,50 \%}
 \end{aligned}$$

Wird die berechnete Einsparung von 94.256,4 kg CO₂-Eq alternativ ins Verhältnis zu dem gesamten Treibhausgasausstoß aufgrund der gesamten Materialproduktion, welche 699.836,1 kg CO₂-Eq beträgt, gesetzt, ergibt sich eine Einsparung von **13,47 %**.

3.6.3 Alternative Antriebe/Kraftstoffe

Zur Einsparung von Treibhausgasen ist eine Möglichkeit Kraftstoffe, mit einem geringeren CO₂-Ausstoß als Diesel, zu verwenden. Eine weitere Art der Reduktion ist der Wechsel auf eine andere Antriebsform. Letzteres würde es ermöglichen den Ausstoß direkter Emissionen stark zu reduzieren bzw. bei der Wahl eines elektrischen Antriebes eine komplett emissionsfreie, bezogen auf direkte Emissionen, Arbeit erlauben.

3.6.3.1 Alternative Antriebe

Eine „echte Alternative“ zum Dieselmotor stellt der **elektrische Antrieb** dar. Dieser hat sich aktuell jedoch erst im Pkw-Bereich mit den ersten ernsthaften Serienprodukten zu einer Alternative entwickelt. Im Maschinenbereich gibt es Pilotmodelle für Bagger bzw. Radlader. Erste Versuche Walzen zu elektrifizieren sind auch bekannt, jedoch werden hierfür noch keine Serienmodelle angeboten. Weiters ist der Hauptzweck dieser in Bereichen mit höheren Anforderungen bzgl. des Lärmschutzes eingesetzt zu werden. Dies ist in Freilandbereichen, wie dies die A09 Wald Mautern einer ist, üblicherweise nicht von Bedeutung. Elektrifizierte Nutzfahrzeuge (> 3,5 t) für den Mischguttransport sind ebenfalls noch nicht verfügbar. Betreffend eines elektrischen Antriebes konnten keine Einsparpotentiale ermittelt werden, welche einen relevanten Einfluss auf den Ausstoß der THG-Emissionen haben würden.

Eine weitere Möglichkeit ist der Wechsel von einem Dieselantrieb auf einen „hybriden Antrieb“. Hierbei werden zwei Antriebssysteme kombiniert: üblicherweise eines mit Verbrennungsmotor und eines mit elektrischem Antrieb. Auch hierfür gibt es im Pkw-Bereich bereits ein breites Angebot. Im Nutzfahrzeugbereich gibt es ebenfalls Lösungen mit hybridem Antrieb, welche im Fernverkehrseinsatz, wobei dieser mit Strecken größer als 50 km definiert ist, Einsparungen mit 4-7 % beziffert sind. Da es sich hierbei um keinen typischen Fernverkehr, sondern um Regionalverkehr, handelt, und die Strecke auch knapp unter 50 km liegt [31], wird die untere Grenze (4 %) als Potential gewählt. Zumal bei dem Mischgut- bzw. Fräsguttransport THG-Emissionen in der Höhe von 185.618,8 CO₂-Eq entstanden sind, beträgt das Einsparpotential hierbei **2,58 %**, bezogen auf die Emissionen aus dem Materialtransport (Kategorie A4) und den Prozessen vor Ort (Kategorie A5).

Für Straßenbaumaschinen wurde lediglich ein Walzenmodell vorgefunden, welches einen hybriden Antrieb bereitstellt, wobei ein Dieselmotor mit einem hydraulischen Speicher kombiniert wurde. Hierfür versprechen die Hersteller eine Einsparung von bis zu 20 % der Treibhausgasemissionen. Wird nun der reine CO₂-Ausstoß der Walzen betrachtet, ergibt sich dieser mit 9.520 kg CO₂-Eq. Somit wäre bei einer kompletten Umstellung aller verwendeten Walzen eine Einsparung von bis zu 1.904 kg CO₂-Eq möglich. Werden diese mit den Emissionen aus dem Materialtransport (Kategorie A4) und den Prozessen vor Ort (Kategorie A5) ins Verhältnis gesetzt, welche mit 288.114,8 kg CO₂-Eq beziffert sind, ergibt sich eine **Einsparung von 0,66 %**.

Die zukunftssträchtige Technologie des **Wasserstoffantriebs** befindet sich momentan noch in der Entwicklungsphase. Aufgrund unterschiedlicher Problemstellungen und der noch lange nicht ausgereiften Technologie, wird es nicht als sinnvoll erachtet, hierbei Einsparpotentiale zu untersuchen.

3.6.3.2 Alternative Kraftstoffe

Es werden Kraftstoffe nach ihrem Verbrennungsprozess unterschieden. Die zwei möglichen Varianten sind das Diesel- und das Ottoprinzip. Erstere Möglichkeit (nicht veresterte Pflanzenöle, veresterte Pflanzenöle, hydrierte Pflanzenöle, synthetische Kraftstoffe, Dimethylether) haben unterschiedliche Nachteile, welche den Wechsel von Diesel zu dem gegenwärtigen Zeitpunkt verhindern. Solche Kontras sind der zusätzlicher Verschleiß des Motors, die Produktion, welche auf fossilen Energien basiert, und die Herstellung mittels hohen Energieaufwands und folglich der fehlenden Wirtschaftlichkeit.

Kraftstoffe, welche für einen Verbrennungsprozess nach dem Ottoprinzip eignen, sind Erdgas, Autogas, Ethanol oder Methanol. Für Baumaschinen ist keine Serienausführung bekannt, welche einen der eben genannten Antriebsstoffe nutzt. Es sind jedoch Pilotprojekte bekannt, die beispielsweise Methan zum Antrieb eines Baggers nutzen [32]. Für Lkws gibt es einige Modelle, welche auf Gasbasis funktionieren. Hierbei werden THG-Einsparungen von bis zu 20 % versprochen [33]. Decken sich diese Angaben mit der Realität und es wird wiederum von den entstandenen Transportemissionen in der Höhe von 185.618,8 CO₂-Eq ausgegangen, würde sich ein Einsparpotential von 37.123,8 CO₂-Eq ergeben. Dies stellt **Einsparungen in der Höhe von 12,89 %** der Emissionen aus der Ausführung dar (Materialtransport + Prozesse vor Ort).

Kapitel 4

Diskussion der Ergebnisse

Dieses Kapitel widmet sich der Diskussion der im vorherigen Kapitel ermittelten Einsparpotentiale. Hierfür wird zuerst die Datengrundlage analysiert und folgend werden mögliche Unschärfen aufgezeigt. Anschließend werden die berechneten Einsparpotentiale, aufgeschlüsselt wie schon in dem Grundlagenkapitel nach organisatorischen Maßnahmen, Mischgutherstellung sowie alternative Antriebe und Kraftstoffe, analysiert und bewertet.

4.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage unterscheidet sich nach Herstellungs- und Errichtungsphase. Für erstere wurde ein Planungstool (RAP-Tool) verwendet. Die Daten während der Errichtungsphase mussten auf unterschiedliche Art und Weise bestimmt werden.

4.1.1 Herstellungsphase

Für die Bestimmung der Emissionen im Rahmen der Herstellung wurde das RAP-Tool verwendet. Dieses berücksichtigt den Rohstoffabbau, den Transport zur Mischanlage sowie die Produktion des Asphaltens basierend auf Planungswerten. Die Funktionsweise wurde in grundlegenden Zügen mit dem Entwickler der RAP-Software besprochen. Da die entsprechende, wissenschaftliche Arbeit jedoch noch nicht veröffentlicht ist, kann der Rechengvorgang nicht verifiziert werden.

4.1.2 Errichtungsphase

Für die Errichtungsphase stehen unterschiedliche Datenquellen zur Verfügung. Diese sind abhängig davon, ob die Daten durch das Team als Teil ihrer üblichen Arbeit bzw. mittels einer Software aufgenommen wurden. Alternativ wurden die Daten von einem Subunternehmen bereitgestellt, oder Annahmen im Nachhinein getätigt.

4.1.2.1 Maschinenverbrauch

Zur Bestimmung des Verbrauchs von Kraftstoff durch die auf der Baustelle tätigen Maschinen wurden unterschiedliche Methoden angewendet. Bevorzugt wurde hierbei die reale Erhebung vor Ort durch das Baustellenpersonal bzw. externe Lieferanten, welche größtenteils verfügbar war. War eine Aufstellung des Dieserverbrauchs dieser Art nicht möglich, wurden Alternativen entwickelt, welche sich in Verbrauchswerte aus der Literatur und die Bereitsstellung von Tankrechnungen teilen.

Physische Listenführung

Für die, während des Asphalteinbaus betankten, Maschinen wurden jeweils die Mengen an befülltem Diesel notiert. Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Werten um reale, korrekte Werte handelt, wobei menschliche Fehler nicht auszuschließen sind.

Bekanntgabe externer Firmen

Der Verbrauch der Fräsen wurde lediglich mit einem Pauschalwert über die gesamte Baustelle beziffert. Genauere Zuteilungen waren nicht möglich, da der Kraftstofflieferant des Fräsenunternehmens keine detaillierte Aufzeichnung über die Art der befüllten Maschine bereitgestellt hat. Der Wert wurde einer Plausibilitätsprüfung unterzogen und ist nach Vergleich mit dem technischen Datenblatt der Fräse vor Ort nicht abwegig.

Verbrauchswerte aus der Literatur

Für viele Baumaschinen gibt es Literaturwerte für den Dieserverbrauch pro Betriebsstunde. In dieser Arbeit wurde lediglich der Wert für den Mobilbagger angewendet. Da der Verbrauch jedoch stark von der Art der verrichteten Leistung sowie dem Verhältnis von Leerlaufstunden zu Betriebsstunden abhängt, ist dieser mit Unsicherheiten behaftet. Da es sich jedoch um einen Mobilbagger handelt, welcher nur wenige Stunden pro Tag zum Einsatz gekommen ist, entstehen geringe Unschärfen.

Tankrechnungen

Für einige Maschinen war, aufgrund der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten (z.B. Kahrmaschine, Kanalspülwagen), kein standardisierter Literaturwert verfügbar, weshalb auch die Vertreter dieser keinen bereitstellen konnten. Bei den entsprechenden Geräten waren, aufgrund fehlender Aufzeichnungen, auch keine realen Verbräuche verfügbar. Es wurden, während der Bauausführung, Tankrechnungen der Fahrer erfragt. Bei der Kehrmaschine wurde zwischen zwei Tankrechnungen und deren geschätzter Arbeitszeit interpoliert; für den Kanalspülwagen stand lediglich eine Rechnung zur Verfügung. Da die genannten Maschinen während des Fräsprozesses ganztägig in Betrieb waren und es keine großen Unterschiede in der Verwendungsart gab, ist davon auszugehen, dass der berechnete Verbrauchswert korrekt ist. Jedoch birgt die geringe Anzahl an Daten eine Unsicherheit.

4.1.2.2 Kfz-Verbrauch

Hierbei ist zu unterscheiden nach den Lkw-Transporten zur Mischgutzufuhr während des Einbauvorgangs bzw. des Fräsguts während der Fräsarbeiten, und den restlichen Transporten (z.B. Geräte, Einrichtungsmaterial), sowie den Personentransporten.

Lkw-Transporte Mischgut/Fräsgut

Nach Rücksprache mit dem Techniker des Musterbauvorhabens und auch durch eigene Erkenntnisse vor Ort wurde die Annahme getroffen, dass jeglicher Transport von Mischgut bzw. Fräsgut mittels Sattelzügen abgewickelt wurde. Dies muss nicht unbedingt der Fall sein, jedoch ist aufgrund der großen Dimension der Baustelle davon auszugehen, dass diese einen überwiegenden Anteil ausmachen. Da der Emissionsfaktor bei den Lkw-Varianten der geringste ist, könnte es sein, dass es hierbei zu einer Unterschätzung des THG-Ausstoßes kommt.

Restliche Lkw-Transporte & Personentransporte

Für die geringe Anzahl an weiteren Lkw-Transporten sowie die Pkw-Anfahrten der Beteiligten wurden Annahmen, in Absprache mit dem Techniker, getroffen. Zusätzlich wurden an zwei Tagen, während der Ausführung, eigene Erhebungen durchgeführt, welche als Ergänzung dienen. Da es sich hierbei lediglich um Annahmen handelt und die Stichprobe nur aus zwei Tagen besteht, sind Abweichungen nicht auszuschließen.

Distanzen

Jegliche Distanzen für Pkw- und Lkw-Fahrten wurden mittels Google-Maps bestimmt. Für die Baustelle wurde als Standort die Baustelleneinfahrt definiert; es wurden somit die Fahrten entlang

der Baustelle (sowohl für Pkw- sowie Lkw-Fahrten) vernachlässigt. Jedoch ist davon auszugehen, dass diese anteilmäßig gering sind.

4.2 Emissionsverhältnisse

Wird die Aufteilung der THG-Emissionen in Abb. 3.4 betrachtet, ist ersichtlich, dass vor allem die Materialproduktion, beziffert mit einem Anteil an den Gesamtemissionen von **70,96 %**, einen enormen Anteil der Emissionssumme ausmacht. Der Transport der Materialien (vor allem Mischgut und Fräsgut) mit einer Emissionsmenge von **19,75 %** sollte ebenfalls beachtet werden. Die Tätigkeiten vor Ort mit einem Anteil von **9,29 %** sind verhältnismäßig klein, jedoch, unter Betrachtung der Höhe der Gesamtemissionen des Bauvorhabens, von Relevanz. Werden ausschließlich die Emissionen durch Materialtransport (A4) und Arbeiten vor Ort (A5) berücksichtigt, wie in Abb. 3.5 dargestellt, und diese durch Kategorisierung in Asphaltier- und Fräsarbeiten getrennt, ist erkennbar, dass beide einen ähnlichen Anteil an den Gesamtemissionen haben. Während dem Fräsen kommen zwar weniger Maschinen, als im Laufe des Asphaltiervorgangs, zum Einsatz, jedoch benötigen diese (vor allem die Fräsen) eine enorme Leistung. Dies zieht wiederum einen entsprechenden Dieselverbrauch nach sich und ist, schlussendlich, für die Entstehung der THG-Emissionen verantwortlich. Der Transportanteil der Treibhausgasemissionen, während der Asphaltarbeiten, ist deutlich größer als im Laufe des Fräsens. Aus diesem Grund, und weil der Asphaltierprozess deutlich komplexer ist sowie auf einem konstanten Materialzufluss basiert, sollte hierbei eine Optimierung vorangetrieben werden.

4.3 Emissionsfaktoren

Um bereits in der Angebotslegung, oder auch bei dem Fehlen von Informationen über den detaillierten Kraftstoffverbrauch im Nachhinein, eine ungefähre Abschätzung der THG-Emissionen ohne viel Aufwand zu ermöglichen, wurden, in Kombination mit Planungswerten (Asphaltfläche, Dicke der Asphaltsschicht) mit den vorab bestimmten Treibhausgasemissionen, Emissionsfaktoren errechnet. Diese werden in der Form THG-Emissionen pro Fläche pro Schichtstärke dargestellt. Deren Aufteilung ist in Tab. 3.21 bzw. in dem Diagramm Fig. 3.6 ersichtlich.

Werden die beiden Asphaltsschichten (Binderschicht und Deckschicht) betrachtet, wird erkannt, dass diese sich vor allem grundlegend in den Kategorien A1 (Rohstoffbeschaffung) und A2 (Rohstofftransport) unterscheiden. Diese sind somit beides vorgelagerte Prozesse und können, weder von der Mischanlage noch baustellenseitig, beeinflusst werden. Der Faktor, welcher, während der Baustellenausführung, eine hohe Auswirkung auf die THG-Emissionsentstehung hat und auch in der Sphäre der Ausführung liegt, ist die Mischgutproduktion (A3).

Bemerkenswert ist vor allem, dass die Prozesse vor Ort während des Fräsvorgangs, im Verhältnis zur den Asphaltierarbeiten, einen hohen THG-Ausstoß pro Quadratmeter pro Zentimeter haben.

Da es sich bei einer Asphaltstraßenbaustelle sowie der dazu notwendigen Herstellung des Mischguts um ein komplexes Vorhaben handelt, welches stark abhängig von den örtlichen Gegebenheiten ist, ist jedoch die Aussagekraft solcher Emissionsfaktoren zu hinterfragen.

4.4 Einsparpotentiale

In diesem Kapitel folgt eine Diskussion der berechneten Einsparpotentiale. Unterschieden werden diese nach organisatorischen Maßnahmen, Potentiale im Rahmen der Mischgutherstellung sowie alternativen Antrieben bzw. Kraftstoffen betreffend Maschinen und Nutzfahrzeugen.

4.4.1 Organisatorische Maßnahmen

Aufgrund des Fehlens einer ausreichenden Datengrundlage waren keine schlüssigen Ergebnisse für Treibhausgaseinsparungen möglich. Notwendige Unterlagen, wie Einbauunterbrechungen aufgrund von Maschinenschäden, Gebrechen der Mischanlage, Staus und anderer Gründe, sind nicht vorhanden. Damit können Zeitverluste aufgrund von organisatorischen Fehlern, und welche aufgrund externer, unvermeidbarer Geschehnisse, nicht unterschieden werden, weshalb auf eine quantitative Analyse des Einsparpotentials verzichtet wurde.

4.4.2 Mischgutherstellung

Zur Feststellung der Potentiale im Rahmen der Mischgutherstellung wurde vor allem das RAP-Tool verwendet. Es wurden hierbei die entsprechenden Parameter angepasst und anschließend die resultierenden Emissionsfaktoren ausgelesen.

Recycling

In dem ausgeführten Projekt wurde für die Binderschichten ein Mischgut mit einem Recyclinganteil von 20 % produziert, welches mittels Kaltzugabe zugeführt wurde. Als Alternative wurde die Warmzugabe von RAP betrachtet. Hierfür steht die Methode mittels Mittenring sowie die einer separaten Aufheiztrommel zur Verfügung. Aufgrund der Verklumpungsthematik wird erstere Vorgehensweise heutzutage selten verwendet. Die Zugabe von Recyclingmaterial mittels einer Paralleltrommel ist eine attraktive Lösung. Hierbei kann bei Binderschichten eine Zugabe von 50 bis 60 % erfolgen [20, S. 202-203]. Das RAP-Tool erlaubt eine maximale Zugabe von 50 % Recyclingmaterial, welche in weiterer Folge angesetzt wurde. Um eine Mischtemperatur von 150 °C zu erhalten, wurde hierfür eine Erwärmungstemperatur des Gesteins von 200 °C und die des RAP-Anteils mit 120 °C gewählt. Wird nun der THG-Ausstoß des neuen Materials berechnet, ergibt sich zu dem originalen Mischgut auf die Gesamtemissionen bezogen eine **Reduktion** von **5,18 %**. Werden nur die Materialemissionen betrachtet, ergibt sich eine **Einsparung** von **10,96 %**.

Somit bestätigt sich damit, dass die Verwendung von Recyclingmaterial mit der Reduktion von Asphaltmischgut einhergeht. Da Österreich, was Gesteinskörnung angeht, ein sehr rohstoffreicher Staat ist [22], wird aufgrund der geringeren Qualität des Endprodukts und auch den teilweise höheren Kosten, auf die Verwendung von Recyclingmaterial verzichtet bzw. minimal gehalten.

Warmmischasphalt

Das abgewickelte Bauvorhaben hat als Asphaltvariante, wie es bei den meisten Straßenbauvorhaben üblich ist, Heißmischgut verwendet. Eine Alternative hierzu ist Warmmischasphalt, welcher auch temperaturabgesenkter Asphalt genannt wird. Hierbei wird unter Verwendung von organischen bzw. chemischen Zusätzen sowie der Anwendung von Schaumtechnologien, die Verarbeitbarkeit des Mischguts stark verbessert. Hierdurch wird eine Reduktion der Temperatur ermöglicht. Definitionsgemäß sind dies 17 °C, jedoch üblicherweise 30-35 °C. In der ausgeführten Auswertung wurde hierbei anfänglich ein Mischgut ohne Recyclingmaterial analysiert, wodurch es zu einer **Erhöhung** des Treibhausgasausstoßes um **1,06 %** kam. Damit wurde die Aussage bestätigt, dass bereits ein geringer RAP-Anteil, in diesem Fall 20 %, eine größere Treibhausgaseinsparung bringt, als die Temperaturreduktion des gesamten Mischguts.

Überdachung der Gesteinskörnung

Eine gänzliche Überdachung der Gesteinskörnung, birgt große Vorteile mit einem geringen Aufwand, da lediglich einmalig ein Dach hergestellt werden muss. In der Mischanlage, welche im gegenständlichen Projekt zur Mischgutproduktion verwendet wurde, war eine Teilüberdachung vorhanden. Durch die fiktive Herstellung einer kompletten Überdachung, ergibt sich ein

Einsparpotential von **3,58 %**, bezogen auf das Gesamtprojekt, und **5,07 %**, bezogen auf den Materialanteil. Es ist davon auszugehen, dass, bei dem gänzlichen Fehlen einer Überdachung, das Einsparpotential weit größer ist.

Optimierte Mischgutherstellung

Mittels Optimierung des Mischvorgangs durch Erhöhung des Recyclinganteils, dem Wechsel auf Warmmischasphalt sowie der Verwendung einer Überdachung der Gesteinskörnung, kann die THG-Einsparung maximiert werden. Bezogen auf das Gesamtprojekt ergibt sich ein Einsparpotential von **9,50 %**. Werden lediglich die Emissionen in der Herstellungsphase betrachtet, erhöht sich diese Einsparung prozentuell auf **13,47 %**

4.4.3 Alternative Antriebe/Kraftstoffe

Alternative Antriebe sind eine sinnvolle Variante, um zukünftig Treibhausgasemissionen einzusparen. Für den Mischguttransport wurde, bei Nutzung eines hybriden Antriebs, ein Einsparpotential von **2,58 %**, bezogen auf die Emissionen aus dem Materialtransport (Kategorie A4) und den Prozessen vor Ort (Kategorie A5), ermittelt. Hierbei wurde ein Einspargrad von 4 % angenommen. Da es sich hierbei um einen ungefähren Wert für den gesamten Fernverkehr handelt, müsste dieser noch für Sattelzüge, welche vor allem beim Mischguttransport zum Einsatz kommen, verifiziert werden. Langfristig gesehen ist, bei einer Bestätigung der Annahmen, eine Investition sinnvoll. Bezogen auf Baumaschinen, ist für eine Freilandbaustelle der Wechsel des Antriebs keine realistische Möglichkeit. Elektrische Antriebe befinden sich bei Straßenbaumaschinen noch in der Pilotphase, haben aber ohnehin ihre Vorteile im innerstädtischen Bereich. Bezüglich hybrider Antriebe wurde ein Walzenmodell mit einem Einsparpotential von **0,66 %**, bezogen auf die Emissionen aus dem Materialtransport (Kategorie A4) und den Prozessen vor Ort (Kategorie A5), festgestellt. Dabei werden dem Hersteller zufolge bis zu 20 % THG-Emissionen eingespart. Sobald diese Angaben unabhängig verifiziert werden können, ist auch hierbei eine Investition anzudenken. Die Zukunftstechnologie des Wasserstoffantriebs stellt momentan noch keine praktische Alternative dar. Deren Entwicklung sollte jedoch aufmerksam mitverfolgt werden.

Werden alternative Kraftstoffe betrachtet stellt momentan lediglich der Gasantrieb und somit ein Wechsel von einem Antrieb nach Dieselprinzip zu einem mit Ottoprinzip, welcher jedoch mittels Serienmodellen nur für Nutzfahrzeuge verfügbar ist, eine Alternative dar, die sichtbare Treibhausgaseinsparungen bringt. Diese wurden mit **12,89 %** der Emissionen aus der Errichtungsphase (Materialtransport + Prozesse vor Ort) ermittelt. Somit ist hierbei eine Investition durchaus vorstellbar. Jedoch stellt dieser alternative Kraftstoff weiterhin einen fossilen Energieträger dar, welcher lediglich mit einem geringeren CO₂-Ausstoß verbunden ist.

4.4.4 Übersicht der Einsparpotentiale

Folgende Tab. 4.1 gibt eine Übersicht über die zuvor ermittelten Einsparpotentiale. Klar ersichtlich ist, dass vor allem in der Mischgutproduktion ein erhebliches Reduktionspotential vorhanden ist. In dieser Tabelle werden die Ergebnisse prozentuell zunächst den Gesamtemissionen (Reduk1) und dann ihrer zugehörigen Unterkategorie (Reduk2) gegenübergestellt. Die Bezugsgrößen werden in den Spalten Bezug1 und Bezug2 dargestellt.

Tab. 4.1: Übersicht der Einsparpotentiale

Einsparpotential	Kategorie	Reduk1	Bezug1	Reduk2	Bezug2
Recycling (RAP)	Mischgut	5,18 %	A1-A5	10,96 %	A1-A3
Warmmischasphalt (WMA)	Mischgut	-1,06 %	A1-A5	-2,25 %	A1-A3
Überdachung	Mischgut	3,58 %	A1-A5	5,07 %	A1-A3
RAP & WMA & Überdachung	Mischgut	9,50 %	A1-A5	13,47 %	A1-A3
Hybrider Antrieb Lkw	Antrieb	0,75 %	A1-A5	2,58 %	A4-A5
Hybrider Antrieb Walze	Antrieb	0,19 %	A1-A5	0,66 %	A4-A5
Gasantrieb Lkw	Kraftstoff	3,74 %	A1-A5	12,89 %	A4-A5

Kapitel 5

Conclusio und Ausblick

5.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Die eingangs gestellte Frage „Welche Einsparpotentiale ergeben sich zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Asphaltstraßenbau und wie sind diese zu bewerten?“ benötigt eine mehrschichtige Antwort, welche Anhand der vorab definierten Unterfragen behandelt wird.

Welche rechtlichen und politischen Implikationen existieren auf nationaler und internationaler Ebene im Zusammenhang mit dem Ausstoß von Treibhausgasen?

Aufgrund des Klimawandels ist die Thematik insbesondere in den letzten Jahren stark in das Rampenlicht gerückt, denn durch den Treibhauseffekt entstehen vermehrt Naturkatastrophen und stellen Gesellschaften vor zuvor nie dagewesene Herausforderungen. Um diese Situation nicht weiter eskalieren zu lassen, wurden internationale Klimaverträge abgeschlossen, welchen beinahe alle Länder weltweit zugestimmt haben. Die Ziele des Aktuellsten, dem Klimaabkommen von Paris, sind, einerseits, die Eindämmung der Erderwärmung auf 2 °C, wobei 1,5 °C wünschenswert wären, wobei als Referenz das Niveau im vorindustriellen Zeitalter gewählt wurde. Andererseits, sollen bis 2050 Netto-Null-Emissionen erreicht werden, und somit effektiv keine CO₂-Emissionen mehr ausgestoßen werden. Um diese Ziele einzuhalten, wurden von der EU zahlreiche Initiativen gestartet. Es wurden Etappenziele, eine Strategie und ein Governance-System formuliert. Zusätzlich wurde der europäische Green Deal, welcher politische Initiativen empfiehlt, und das europäische Klimagesetz rechtlich verankert. Diese internationale sowie europäische Judikatur führt zu nationalen Klimazielen und Verpflichtungen, die ein nachhaltiges Handeln weiter forcieren sollen. Um einen einheitlichen Rahmen zur Darstellung, Berechnung und Kategorisierung von Treibhausgasemissionen zu ermöglichen, wurden entsprechende Normen geschaffen. Die Einführung der EU-Taxonomie Verordnung zur Einrichtung eines Rahmens für die Erleichterung nachhaltiger Investitionen soll den Fokus auf Nachhaltigkeit weiter verstärken.

Um all diese Anforderungen zu erfüllen und eine maximale Transparenz zu ermöglichen, ist es notwendig, den Ausstoß der Treibhausgasemissionen möglichst genau zu kennen. Erst wenn diese bekannt sind, können auf dieser Grundlage entsprechende Maßnahmen zur Reduktion empfohlen und anschließend umgesetzt werden.

Wie ist der Ablauf des Prozesses zur Sanierung einer Asphaltstraße definiert?

Mittels einer umfangreichen Literaturrecherche wurde der Prozess zur Sanierung einer Asphaltstraße durchgängig beleuchtet und geschichtliche Fortschritte erläutert. Der moderne Prozess einer solchen Straßenerneuerung beginnt mit dem Abtrag des alten Straßenbelags mittels Fräsens, wobei das ausgebaute Fräsgut als Recyclingmaterial für das neue Mischgut genutzt werden kann. Danach wird ein Vorspritzmittel aufgebracht, welches einen besseren Verbund zwischen der Fräs- und der Asphaltsschicht gewährleistet. Anschließend wird das, der Schicht entsprechende, Mischgut unter Verwendung eines Asphaltfertigers eingebaut. Für eine erhöhte Effizienz ist es möglich einen Beschicker zu verwenden, welcher den gelieferten Asphalt entgegennimmt und anschließend den bzw. die Fertiger damit beschickt. Das Asphaltmaterial wird in einer Asphalt-

mischanlage aus Gesteinskörnung, Bitumen und etwaigen Zusatzstoffen produziert und mittels Lkws antransportiert. Nachdem das Mischgut eingebracht wurde, wird es mittels statischer und dynamischer Überfahrten durch die Walzen verdichtet. Nun beginnt der Einbau der nächsten Schicht wiederum mit dem Aufbringen des Vorspritzmittels. Sobald alle Straßenschichten (Tragschicht, Binderschicht, Deckschicht) eingebaut und ausreichend verdichtet wurden, ist die Sanierung des Straßenbelags abgeschlossen.

Wie verteilen sich die Emissionen der Treibhausgase und welche Tätigkeiten sind vor allem für diese verantwortlich? Können diese abgeschätzt werden?

Um die Darstellung einer Verteilung zu ermöglichen, wurden die Treibhausgasemissionen auf mehrere Arten kategorisiert. Unter anderem geschah eine Unterteilung in „Asphaltieren/Fräsen“, „Hauptleistungen/Nebenleistungen“ und nach den Kategorien der ÖNORM EN 15978:2011. Dabei wurde festgestellt, dass die Emissionen während des Asphaltierprozesses knapp überwiegen. Wird das Verhältnis der Nebenleistungen zu den Hauptleistungen betrachtet, wurde errechnet, dass diese sowohl unter Berücksichtigung von Pkw-Fahrten, als auch ohne dieser (wie es die ÖNORM EN 15978:2011 vorschreibt) **weniger als 1 %** ausmachen. Die Kategorisierung nach ÖNORM EN 15978:2011 erlaubt eine grobe Einteilung in Herstellung (Mischgutproduktion inkl. vorgelagerter Prozesse) und Errichtung (Mischguttransport und -einbau). Hierbei wurde festgestellt, dass der weit bedeutendere Anteil mit einer Größe von **ca. 70 %** aus der Mischgutproduktion stammt. Die restlichen Treibhausgasemissionen entstehen im Rahmen des Transportes des Misch- bzw. Fräsgutes sowie des Asphalteinbaues. Zur Abschätzung dieser wurden Emissionsfaktoren entwickelt. Diese haben die Einheit Treibhausgasemissionen [kg CO₂-Eq] pro Fläche [m²] pro Schichtstärke [cm]. Es wurde jeweils einer für jede Schicht (Binderschicht, Deckschicht, Frässhicht), wobei dieser wiederum in seine Bestandteile nach den Kategorien der ÖNORM EN 15978:2011 geteilt wurde, berechnet. Schichtabhängig bewegen sich diese Faktoren auf der betrachteten Baustelle in der Herstellungsphase (A1-A3) zwischen **0,880 und 1,053 kg CO₂-Eq/m²/cm**, in der Transportphase (A4) zwischen **0,132 und 0,157 kg CO₂-Eq/m²/cm** und in der Errichtungsphase (A5) zwischen **0,051 und 0,089 kg CO₂-Eq/m²/cm**. Die Emissionen der betrachteten Phasen werden zusätzlich nach den einzelnen Schichten zusammengefasst, wodurch sich alternative Emissionsfaktoren ergeben. Für die Binderschicht beträgt dieser **1,085 kg CO₂-Eq/m²/cm**, für die Deckschicht **1,261 kg CO₂-Eq/m²/cm** und für die Frässhicht **0,221 kg CO₂-Eq/m²/cm**. Es ist davon auszugehen, dass sich der THG-Ausstoß baustellenabhängig stark unterscheidet. Zu berücksichtigen ist hierbei vor allem die Größe der Baustelle und somit der Anzahl der verwendeten Baumaschinen sowie die Entfernung der Mischanlage und sämtliche andere Distanzen, welche in der Materialherstellung zum Tragen kommen.

Die Abschätzung der THG-Emissionen in der Phase der Materialproduktion ist bereits mit dem RAP-Tool möglich. Unter der Verwendung der entwickelten Emissionsfaktoren gehen die in dem RAP-Tool verankerten Distanzen (Lieferung von Rohstoffen, RAP, Füller, Bitumen und der Mischguttransport von der Mischanlage zur Baustelle) verloren. Weiterhin können keine Unterscheidungen aufgrund von Gesteinsfeuchte, RAP-Anteil und Temperatur getroffen werden. Um die Berücksichtigung all dieser Einflüsse zu ermöglichen, müssten separate Emissionsfaktoren für alle möglichen Mischgutausführungen bestimmt werden. Hierbei ist die Sinnhaftigkeit zu hinterfragen, da es etliche, realistische Kombinationen gibt. Problemhaft ist hierbei vor allem die gegenwärtige, mangelhafte Datenmenge.

Wie kann der Ausstoß von Treibhausgasen maßgebend reduziert werden?

Eine Reduktion des Ausstoßes der Treibhausgase kann entweder in der Mischgutproduktion sowie den dabei vorgelagerten Prozessen (Rohstoffabbau und -transport) oder direkt bei der Bauausführung erreicht werden. Aus Sicht des ausführenden Bauunternehmens können die

Tätigkeiten, welche die Rohstoffbeschaffung betreffen, jedoch nicht beeinflusst werden und wurden in dieser Arbeit deshalb nicht näher behandelt.

Einsparpotentiale ergeben sich in der **verbesserten Organisation der Baustelle und Adaption der Mischgutproduktion**. Ersteres kann mittels digitaler Hilfsmittel gewährleistet werden. So stehen bereits Applikationen zur Verfügung, welche es erlauben, die Logistik der Baustelle zu verbessern, wodurch einem falschen Mischguttransport und der anschließend notwendigen Entsorgung vorgebeugt, sowie die Arbeitszeit, und somit die Betriebsstunden der Baumaschinen, verkürzt werden können. Andere Systeme erlauben es, während des Walzvorgangs eine flächendeckende, dynamische Verdichtungskontrolle durchzuführen. Damit bekommt der Walzenfahrer eine ständige Rückmeldung über sein Walzergebnis, wodurch die Einhaltung eines vordefinierten Walzschemas ermöglicht wird. Die Software erlaubt somit eine optimierte Anzahl an dynamischen und statischen Überfahrten. Bei beiden Potentialen ist jedoch nicht davon auszugehen, dass es zu einer verhältnismäßig (bei Betrachtung der Gesamtemissionen) großen Reduktion des Treibhausgasausstoßes kommt. Eine weitere Möglichkeit ist der Umstieg auf andere Kraftstoffe sowie der Wechsel auf eine alternative Antriebsform. Die Kombination von herkömmlichem Diesel mit einem geringen Bestandteil von Biodiesel ist bereits allgegenwärtig. Jedoch hat ein zu hoher Anteil dieses einen Verschleiß des Motors und anderer Bestandteile der Maschine bzw. des Fahrzeuges zur Folge. Ein Wechsel zu einer anderen Art von Kraftstoff ist momentan energetisch nicht sinnvoll bzw. ebenfalls mit einer Form von zusätzlichem Verschleiß verbunden.

Die Adaption der Mischgutproduktion kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Zunächst ist eine Modifikation der Mischanlage, wie die Anbringung von Überdachungen, möglich. Damit wird die Nässe der Gesteinskörnung auf ein Minimum beschränkt und somit wird Energie während der Aufheizung in der Trockentrommel eingespart. Eine andere Alternative ist die Anpassung der Mischgutherstellung bezogen auf die Temperatur des Asphalt, wobei letzteres verringert wird. Dieser Warmasphalt hat vor allem den Vorteil, dass unter der Zugabe von Zusatzmitteln (z.B. Wachse) die Produktions- sowie Verarbeitungstemperatur gesenkt wird. Eine weitere Methode zur Einsparung von Treibhausgasen ist die Verwendung eines höheren Anteils von Recyclingmaterial. Hierfür besteht die Möglichkeit, einen geringen Anteil (bis zu 25 %) mittels Kaltzugabe beizumengen. Weiterhin ist es erwägenswert, Recyclingmaterial warm zuzugeben, wobei üblicherweise bis zu 60 % des Gesamtischguts aus RAP bestehen kann. Weniger üblich, jedoch theoretisch möglich, ist die 100 %-ige Ausführung mittels Recyclingmaterial.

Die Einsparung von Treibhausgasemissionen mittels der Umstellung des Kraftstoffes bzw. des Antriebes wird momentan als nicht relevant angesehen, vor allem weil das Angebot solcher Straßenbaumaschinen sehr gering ist. Insbesondere bei Freilandbaustellen wäre aufgrund der ständig notwendigen Ladevorgänge der Bauablauf stark gestört. Bei innerstädtischen Baustellen ergibt sich bei Verwendung von rein elektrisch betriebenen Baumaschinen zumindest der Vorteil der Lärmreduktion, welcher auf Freilandbaustellen nicht von Bedeutung ist.

Für eine Autobahnbaustelle, wie diese in der gegenständlichen Arbeit betrachtet wurde, ergibt sich durch Optimierung der Asphaltherstellung (erhöhte Verwendung von Recyclingmaterial, Wechsel von Heißasphalt zu Warmasphalt, Anbringung einer vollständigen Überdachung der Gesteinskörnung auf dem Mischanlagengelände) ein **Reduktionspotential von 9,50 %** bezogen auf die gesamten Emissionen aus Herstellung und Einbau.

5.2 Ausblick

Zur akkuraten Feststellung des Treibhauspotentials bedarf es einer sorgfältig erhobenen Datengrundlage. Zusätzlich zu der in dieser Arbeit durchgeführten Erhebung wird vorgeschlagen weitere Daten, bevorzugt in Kooperation mit vertrauenswürdigen und motiviertem Personal, auf diversen Asphaltstraßenbaustellen einzuholen und jeweils eine Lebenszyklusanalyse durchzuführen. Die hierbei relevanten Daten sind folgend angeführt:

- Energieverbrauch der Mischanlage für Produktion des Mischguts
- Dieserverbrauch jeglicher Baumaschinen
- Informationen über Lkw-Transporte (digitale Lieferscheinlisten)

Um vollständige und korrekte Daten zu erhalten, sollten unbedingt klärende Gespräche mit der Bauleitung geführt und diese gemeinsam auf Plausibilität überprüft werden.

Für eine weiterführende Analyse, insbesondere bezogen auf Emissionsfaktoren in der Form Treibhausgasemissionen [kg CO₂-Eq] pro Fläche [m²] pro Schichtstärke [cm], sind zumindest Plandaten, bevorzugt jedoch Echtdateien notwendig:

- Mischgutart
- Fläche des eingebauten Mischguts
- Stärke des eingebauten Mischguts

Ziel muss es sein, eine umfassende Datenbank zu schaffen, um jegliche Situation und Rahmenbedingung abzudecken. Dies ermöglicht, je nach Qualität der Daten, eine entsprechend gute Schätzung der THG-Emissionen einer jeden Asphaltstraßenbaustelle, wodurch die Berechnung für Ausweisungszwecke stark vereinfacht wird, bzw. zumindest einen Teil der Plausibilitätsprüfung ermöglicht. Anzudenken wäre sich vor allem auf übliche Mischgüter sowie Baumaschinenkombinationen zu konzentrieren.

Literatur

- [1] A. Zechmeister. *Klimaschutzbericht*. Report. Umweltbundesamt, 2021.
- [2] P. Z. Valérie Masson-Delmotte. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Report. Intergovernmental panel on climate change, 2021.
- [3] R. Kleinöder. *Deutschland in der Klimakrise*. 1. Aufl. München: Klimaneutral Verlag, 2021.
- [4] *Global Monitoring Laboratory*. URL: https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2_data_mlo.png.
- [5] M. Hauck, C. Leuschner und J. Homeier. *Klimawandel und Vegetation - Eine globale Übersicht*. ger. 1st ed. 2019. Berlin Heidelberg, 2019. ISBN: 3662597918. URL: 10.1007/978-3-662-59791-0.
- [6] S. Buhofer. *Der Klimawandel und die internationale Klimapolitik in Zahlen*. 2. Aufl. München: oekom verlag München, 2018.
- [7] *Kyoto Protokoll - Austritt von Kanada*. URL: <https://oe1.orf.at/artikel/293114/Berlakovich-weiter-fuer-Kyoto-Strafzahlungen>.
- [8] *Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP*. URL: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/ganzheitliche-bilanzierung/methoden-ganzheitliche-bilanzierung/oekobilanzierung.html>.
- [9] *ISO 14040:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. 2006.
- [10] K. Gopalakrishnan. *Climate change, energy, sustainability and pavements*. eng. Green energy and technology. Berlin [u.a.]: Springer, 2014. ISBN: 3662447185.
- [11] *Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger*. URL: <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>.
- [12] H. L. Horst Mentlein. *Straßenbau Straßenbautechnik*. 8. Aufl. Köln: Reguvis Fachmedien GmbH, 2021. ISBN: 978-3-8462-1051-2.
- [13] M. Kappel. *Angewandter Straßenbau: Straßenfertiger Im Einsatz*. ger. 3. Aufl. 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020. ISBN: 3658294698.
- [14] E. E. Herbert Buchta. *Gestrata Asphalt Handbuch*. 3. Aufl. Wien: GESTRATA - Gesellschaft zur Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt, 2002.
- [15] N. C. Simon Batz. *BAUTECHNIK Straßen und Tiefbau*. 15. Aufl. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2021. ISBN: 978-3-8085-4679-6.
- [16] M. H. Dietrich Richter. *Straßen- und Tiefbau*. 11. Aufl. Rendsburg: Springer Fachmedien, 2011. ISBN: 978-3-8348-9846-3.
- [17] T. W. Jürgen Hutschenreuther. *Asphalt im Straßenbau*. 3. Aufl. Bonn: Kirschbaum Verlag, 2017.
- [18] R. Blab. *Vorlesungsunterlagen-Straßenbau und Straßenerhaltung-VO4: Arten und Eigenschaften technischer Asphalte - WS2021*. Report. TU Wien, 2021.

- [19] S. Kytzia. *der asphaltprofi 1-17*. Report. MOAG Baustoffe, 2021.
- [20] H. König. *Maschinen im Baubetrieb : Grundlagen und Anwendung*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008. ISBN: 3835192388.
- [21] *Alfa Tech International*. URL: <http://www.alfatechinternational.com/de/projekte/trockentrommel.aspx>.
- [22] *Interview mit Michael R. Gruber bezüglich RAP-Tool*. 2022.
- [23] M. Zaumanis, R. B. Mallick und R. Frank. „100 Percent recycled hot mix asphalt: A review and analysis“. In: *Resources, Conservation and Recycling* 92 (2014), S. 230–245. ISSN: 0921-3449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344914001505>.
- [24] R. Obernosterer, L. Winkler, B. Lepuschitz und M. Weigert. *Die CO₂ neutrale Baustelle*. Report. STADT der Zukunft, 2021.
- [25] D. Bachinger. „Digitale Prozessunterstützung im Asphaltstraßenbau“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2012.
- [26] R. Yang, H. Ozer, S. Kang und I. L. Al-Qadi. „Environmental impacts of producing asphalt mixtures with varying degrees of recycled asphalt materials“. In: *International Symposium on Pavement LCA*. 2014, S. 14–16.
- [27] M. Hilgers. *Alternative Antriebe und Ergänzungen zum konventionellen Antrieb*. Jan. 2016. ISBN: 978-3-658-14642-9. DOI: 10.1007/978-3-658-15492-9.
- [28] A. Opgenoorth, S. Quabeck, R. W. De Doncker und K. Schmitz. „Challenges and possibilities of the integration of electric drives in mobile machinery“. In: (2020).
- [29] *The Eurobitume Liefere-Cycle Inventory for Bitumen*. Report. European Bitumen Association, 2020.
- [30] *Wiederverwendung Ausbauasphalt und Einsatz Niedertemperaturasphalt, Best Practise Guide*. 2021.
- [31] A. Marx. *Autohöfe des Güterkraftverkehrs: Entwicklung und Funktionen. Ein Beitrag zur Verkehrsrationalisierung und Verkehrskoordinierung*. Gabler Verlag, 2013. ISBN: 9783663023302. URL: <https://books.google.at/books?id=SBeuBgAAQBAJ>.
- [32] *Case Construction - Methan angetriebenes Baufahrzeug*. URL: <https://www.casece.com/emea/de-de/ressourcen/nachrichten/2019/case-prasentiert-auf-bauma-methan-angetriebene-baufahrzeug>.
- [33] *Volvo - LKW MIT LNG-ANTRIEB*. URL: <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/alternative-antriebe/lng-lkw.html>.

Anhang

Eindrücke des Musterprojektes A9 Wald-Mautern

In den nachstehenden Unterkapiteln werden Eindrücke in das Musterprojekt A9 Wald-Mautern gegeben. Erreicht wird diese mittels vor Ort aufgenommenen Fotos. Die Unterteilung dieser erfolgt in Fräs- und Asphaltierarbeiten.

Fräsarbeiten



Abb. A.1: Fräse mit 2,00 m Fräsbreite

Aufgrund eines technischen Gebrechens musste die, in Abb. A.1 dargestellte, Fräse, für den entsprechenden Tag abgestellt und durch ein alternatives Gerät ersetzt werden müssen.



Abb. A.2: Fräse und davor fahrender Lkw

Entlang der Fräskante, welche aufgrund der zuvor bereits gefrästen Fläche entstanden ist, wird der Altasphalt auf der selben Höhe ausgebaut. Das Material wird direkt in einen Lkw geschüttet, welcher sich langsam mitbewegt. Lkw-Fahrer und Fräsen-Fahrer kommunizieren hierfür mittels akustischer Signale (Hupen).



Abb. A.3: Fräse und davor fahrender Lkw

In Abb. A.3 ist ein etwas älteres Fräsmodell ersichtlich, welches aufgrund der beschädigten Fräse bereitgestellt hat werden müssen. Es handelt sich um den letzten Fräsabschnitt auf dieser Fläche.



Abb. A.4: Kehrmaschine zur Reinigung der Fräsfläche

Die Kehrmaschine, wie sie in Abb. A.4 dargestellt ist, fährt während dem Fräsprozess der Fräse ununterbrochen hinterher. Damit werden Verschmutzungen der Oberfläche verhindert, wodurch das Vorspritzen ohne Bedenken durchgeführt werden und Schäden verhindert werden können.



Abb. A.5: Kanalspülwagen während der Wasserzuführung zur Fräse

Die Fräse benötigt einen gewissen Wasservorrat. Dieser musste regelmäßig aufgefüllt werden, wobei dies von dem Kanalspülwagen, wie er in Abb. A.4 ersichtlich ist, durchgeführt wurde. Dieser hat beide Fräsabschnitte gleichzeitig bedient, wodurch er oft, je nach Notwendigkeit, Position wechseln musste.



Abb. A.6: Tieflader für den Transport der Fräse

Aufgrund eines technischen Schadens musste eine weitere Fräse angeliefert werden. Dafür wurde ein Tieflader verwendet. Dargestellt ist dieser in Abb. A.6.



Abb. A.7: Baggerarbeiten zur Reinigung der Fräsfläche

Um die Fräsfläche von Verschmutzungen, wie diese beispielsweise durch Verschütten von Material entstehen können, zu reinigen, kam unter anderem ein Bagger, wie er in Abb. A.7 ersichtlich ist, zum Einsatz.

Asphaltierarbeiten



Abb. A.8: Lkw während der Entladung in den Beschicker

Der Einbauprozess beginnt damit, dass der Lkw in den Beschicker entlädt. Dieser dient als sogenannter Puffer für die Fertiger. Dies ist in Abb. A.8 ersichtlich.



Abb. A.9: Beschicker und Fertiger während des Beschickvorgangs

Der Beschicker fährt während des gesamten Einbauprozesses vor den beiden Fertigern her. Mittels eines schwenkbaren Förderbandes werden abwechselnd die beiden Fertiger mit Mischgut beschickt. In Abb. A.9 ist der Vorgang abgebildet.



Abb. A.10: Walze und Fertiger in der Ausführung

Die Walzen dienen der Verdichtung des Mischguts, sodass eine ausreichende Dichte gewährleistet ist. Sie fahren ununterbrochen hinter den Fertigern her. In Abb. A.10 ist eine Walze ersichtlich.



Abb. A.11: Walzen während der Verdichtungsarbeiten

In Abb. A.11 sind drei der vier eingesetzten Walzen während der Verdichtungsarbeiten sichtbar. Über ein FDVK-System waren diese miteinander verbunden, sodass jeder Walzenfahrer wusste wie viele Überfahrten an einer bestimmten Stelle bereits getätigt wurden.



Abb. A.12: Baggerarbeiten zu Reinigung

Wie schon im Fräsprozess, wurde auch während der Asphaltierarbeiten ein Bagger zu Reinigungszwecken (verschüttetes Mischgut) eingesetzt. In Abb. A.12 ist dieser sichtbar.



Abb. A.13: Händischer Einbau mit Baggerbeschickung

Für kleinere Asphaltierabschnitte kann ein händischer Einbau sinnvoll sein. Hierfür wurde ein Bagger dazu genutzt das Mischgut von dem Lkw zu entnehmen und an der richtigen Stelle zu positionieren. Die Arbeiter haben die ausgeglichene Verteilung und die Verdichtung übernommen. Die Fotos in Abb. A.13 und Abb. A.14 stellen dies dar.



Abb. A.14: Händischer Einbau mit Baggerbeschickung



Abb. A.15: Kehrmaschine während Reinigungsarbeiten

Auch während der Asphaltierarbeiten kam eine Kehrmaschine zum Einsatz (Säuberungsarbeiten bei Notwendigkeit). In Abb. A.15 wurde verschüttetes Mischgut von der Fahrbahnfläche entfernt.



Abb. A.16: Anfahrt der Mechaniker

Bei Fertigergebriechen war eine schnelle Reparatur notwendig. Die entsprechenden Mechaniker wurden firmenintern angefordert und führten die entsprechenden Arbeiten durch. Die Zufahrtfahrzeuge (Abb. A.16) sowie der Reparaturprozess (Abb. A.17) sind folgend dargestellt.



Abb. A.17: Fertigerreparatur

Aufgrund der ständigen Überfahrten der Lkws wird die Vorspritzschicht gestört. Unter Umständen wird ein erneutes Vorspritzen notwendig sein, um den Verbund zu gewährleisten.



Abb. A.18: Vorspritzwagen während Vorspritzarbeiten

Mischanlage für A09-Belieferung (Feistritz)

Zur Belieferung der Baustelle wurde eine Mischanlage mit dem Standort in Feistritz verwendet. Es handelt sich um eine Mischanlage mit Teilüberdachung. Die Darstellung des gelagerten Materials ist in Abb. A.19 sichtbar.



Abb. A.19: Mischanlage Feistritz mit Teilüberdachung

Mustermischanlage für Organisationsberechnung (Mürzzuschlag)

In Kapitel 2 wurden für eine Mustermischanlage zum Zweck der Analyse der Organisations Berechnungen durchgeführt. Die betrachtete Mischanlage steht in Mürzzuschlag in Österreich. Im folgenden werden Fotos dieser Produktionsstätte dargestellt. In den folgenden Abbildungen (Abb. A.20, Abb. A.21, Abb. A.22) ist diese ersichtlich.



Abb. A.20: Mischanlage Mürzzuschlag (Mischturm und Waage)



Abb. A.21: Mischanlage Mürzzuschlag (Mischturm und teilüberdachtes Gesteinslager)



Abb. A.22: Mischanlage Mürzzuschlag (Mischturm und teilüberdachtes Gesteinslager)