

Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbahnen

- Aktualisierung 2009 -

**im Auftrag des
Deutschen Asphaltverbandes e.V. (DAV)**

Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbahnen

- Aktualisierung 2009 -

**im Auftrag des
Deutschen Asphaltverbandes e.V. (DAV)**

Prof. Dr.-Ing. Christian Holldorb

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Mayer

Biberach, Dezember 2009

Hochschule Biberach

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	2
2.	Literaturübersicht	3
3.	Methodik des Ökoprofiles	7
3.1	Anforderungen an eine umfassende Ökobilanz im Vergleich zu einem vereinfachten Ökoprofil	7
3.2	Abgrenzung Ökoprofil - Ökobilanz	9
4.	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	11
4.1	Ziel des Ökoprofiles	11
4.2	Untersuchungsrahmen	11
5.	Sachbilanz	18
5.1	Massenermittlung	18
5.2	Bilanzierung Primärenergieverbrauch	20
5.2.1	Materialgewinnung	20
5.2.2	Materialherstellung und -einbau	23
5.2.3	Materialtransporte	25
5.2.4	Materialausbau	25
5.3	Emission von Treibhausgasen	26
5.3.1	Methodik	26
5.3.2	Materialgewinnung	26
5.3.3	Materialherstellung und -einbau	28
5.3.4	Materialtransporte	30
5.3.5	Materialausbau	30
6.	Auswertung	31
	Literaturverzeichnis	37
	Verzeichnis der Abbildungen	41
	Verzeichnis der Tabellen	42
	Verzeichnis der Anlagen	43
	Anlagen	

1. Einleitung

Das deutsche Regelwerk sieht für den Straßenbau, insbesondere im Außerorts- und Autobahnbereich, sowohl Fahrbahnaufbauten aus Asphalt als auch aus Beton vor, die hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit gleichwertig sind [FGSV 2001a]. Beide Bauweisen unterscheiden sich jedoch nicht nur in der Verwendung unterschiedlicher Baustoffe, sondern auch im gesamten Aufbau der Straßenbefestigung. Hieraus resultieren unterschiedliche Aufwendungen für die erstmalige Herstellung der Fahrbahn. Weiterhin unterscheiden sich die Fahrbahnaufbauten in der Dauerhaftigkeit ihrer Oberflächeneigenschaften, aus der unterschiedliche Erneuerungszeiträume resultieren [FGSV 2001b].

Die Auswahl einer Bauweise wird von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Neben bautechnischen Kriterien spielen hierbei vor allem ökonomische Aspekte eine Rolle. Umweltrelevante Kriterien werden in der Regel für die Bewertung der Bauweisen nicht herangezogen, wenn man von unterschiedlichen Emissionsbelastungen, insbesondere Lärmemissionen infolge des Verkehrs, absieht. Hierbei stehen jedoch die Umweltauswirkungen des Verkehrs und nicht die ökologische Bewertung der Bauweisen im Vordergrund. Anforderungen an die ökologische Bewertung der verschiedenen Bauweisen sind im technischen Regelwerk nicht verankert. Zurzeit stehen aber auch keine vollständigen und abgesicherten Daten über die verschiedenen Bauweisen hinsichtlich ihrer ökologischen Bewertung zur Verfügung. Eine Möglichkeit für die ökologische Bewertung von Asphalt- und Betonbauweise ist die Aufstellung einer Ökobilanz gemäß DIN EN ISO 14040, die die notwendigen Verfahrensschritte formuliert [DIN 2006a]. Da hierfür umfangreiche und vor allem repräsentative Daten notwendig sind, die bei Bedarf erhoben werden müssen, beauftragte der Deutsche Asphaltverband e.V. im Jahre 2003 die Durth Roos Consulting GmbH mit der Erstellung eines vereinfachten Ökoprofiles zum Vergleich von Asphalt- und Betonbauweisen im Straßenbau, in dem je nach vorhandener Datenlage einzelne Einflussgrößen quantifiziert oder qualitativ in Abhängigkeit ihrer Relevanz für die Gesamtbewertung abgeschätzt werden [HOLLDORB/MEISENZAHN 2003]. Im Herbst 2008 wurde die Hochschule Biberach beauftragt, das vorliegende Ökoprofil mit gleicher Methodik zu aktualisieren. Neben der Anpassung an das aktuelle technische Regelwerk werden hierbei insbesondere aktuelle Untersuchungen zu den Umweltauswirkungen von Asphalt- und Betonbauweisen sowie Auswertungen von Messprotokollen aus Asphaltmischanlagen zum Energieeinsatz und zur CO₂-Emission [RESS 2009] berücksichtigt.

In diesem aktualisierten Ökoprofil werden im nachfolgenden nationale und internationale Studien zur ökologischen Bewertung von Asphalt- und Betonbauweisen vorgestellt. Hieran schließt sich in Kapitel 3 die Erläuterung der Methodik an, die im Rahmen des Ökoprofiles zur Anwendung kam. Ziel und Untersuchungsrahmen werden in Kapitel 4 definiert, die Sachbilanz ist in Kapitel 5 zusammengestellt. Eine Auswertung erfolgt in der zusammenfassenden Bewertung (Kapitel 6), in der auch auf die offenen Fragen für die Erstellung einer umfassenderen Ökobilanz eingegangen wird.

2. Literaturübersicht

Der Bundesminister für Verkehr hat bereits 1986 zwei Forschungsberichte [POHLE/BEYERT 1983] und [SCHMUCK/BREITER 1986] herausgegeben, die zum einen die Energiebilanz für verschiedene Oberbauarten, zum anderen energiewirtschaftliche Untersuchungen für Aufgabenstellungen im Pavement Management thematisieren. Ähnlich dem heute üblichen, umfassenderen Verfahren der Ökobilanz werden dort für den Teilbereich Energieaufwendung Rechenverfahren für unterschiedliche Straßenoberbauten vorgestellt. Es werden jedoch nicht die Umweltauswirkungen des Energieverbrauchs, wie CO₂-Emissionen etc., betrachtet, sondern allein der Energieverbrauch als Produktionsfaktor in Zeiten knapper werdender Energievorräte. Die Untersuchungen beinhalten dabei Energiewerte sowohl für Neubau- als auch für Erhaltungsmaßnahmen. Zunächst werden energetische Basisdaten für Baustoffproduktion, Transporte, Mischgutherstellung und Einbau der Schichten angegeben, welche etwa im Zeitraum 1975 bis 1981 erhoben wurden. Den für Deutschland maßgebenden Werten werden nach Möglichkeit internationale Erhebungen gegenübergestellt. Im Weiteren wird das Rechenverfahren beschrieben, angewendet und schließlich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei werden folgende Einflüsse untersucht: Verschiedene Baustoffe und Oberbauarten, Transportentfernungen und Transportmittel sowie die Wahl unterschiedlicher Regionen für die Baumaßnahme. Ziel war es, in einem Markt, der damals durch die Verknappung von Energieträgern und die hohen Preise insbesondere für Rohöl geprägt war, energetisch günstige und ungünstige Straßenoberbauten zu erkennen. In den Untersuchungen wurde deutlich, dass die untersuchten Betonbauweisen bei Verwendung von Portlandzement deutlich über dem Primärenergieverbrauch der untersuchten Asphaltbauweisen liegen, bei der Verwendung von Hochofenzement deutlich darunter.

Für den Vergleich von Entwurfsvarianten im Brückenbau leitet LÜNSER [1999] ein Bewertungsverfahren ab, welches umweltrelevante Merkmale berücksichtigt. Hierbei erweitert er das methodische Konzept von Ökobilanzen zu einer „Ganzheitlichen Bilanzierung“, welche letztlich technische, wirtschaftliche und ökologische Aspekte als gleichwertige Kriterien behandelt. Am Beispiel mehrerer Wettbewerbsentwürfe eines Brückenbauwerks wird dieser ganzheitliche Bewertungsansatz demonstriert, gleichzeitig aber auch auf die Möglichkeit hingewiesen, diese Methode auf andere Ingenieurbauwerke zu übertragen. Im Anhang findet sich eine umfangreiche Aufstellung von Sachbilanzdaten, die von der Energiebereitstellung über verschiedene Baustoffe bis hin zu Bauprozessen reicht. Die meisten Daten wurden im Zeitraum 1990 bis 1995 erhoben und gelten in der Regel für deutsche Bauvorhaben, so dass sie teilweise für die Erstellung des vorliegenden Ökoprofiles genutzt wurden.

Die ganzheitliche Bilanzierung ist auch Thema des Buches „Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden“ [EYERER/REINHARDT 2000]. In einer interdisziplinären Zusam-

menarbeit gelang es, repräsentative Daten basierend auf dem Stand Mitte der 90er Jahre für unterschiedlichste Baustoffe zu erheben, auf die ebenfalls zur Erstellung dieses Ökoprofiles zurückgegriffen wurde. Es werden dabei Informationen zur Sachbilanzierung und Qualität der Datenerhebung der einzelnen Baustoffe gegeben; abschließend wird ein Baustoffprofil erstellt. Letztlich wird eine Methode zur Bilanzierung von Gebäuden über die Herstellungs- und Nutzungsphase bis zum Rückbau bzw. Recycling vorgestellt und auf eine Softwareunterstützung zur Datenverwaltung und Bilanzierung von Gebäuden eingegangen. Die vorgeschlagene Methode wird an Beispielgebäuden verifiziert.

Die Vorreiterrolle bei Ökobilanzen im Straßenbau und der Straßenerhaltung haben die skandinavischen Länder durch die Veröffentlichung zweier Studien Mitte der 90er Jahre übernommen:

- Eine schwedische Untersuchung aus dem Jahre 1995 wurde von der schwedischen Straßenbauverwaltung finanziert und in Kooperation mit der Industrie durchgeführt; sie enthält unter anderem auch einen Vergleich von Asphalt- und Betonbauweise [STRIPPLE 2001]. Der Untersuchungsrahmen und die funktionale Einheit sind auf schwedische Verhältnisse abgestimmt, die Daten basieren großteils auf Angaben der schwedischen Industrie. Neben der baulichen Erhaltung über 40 Jahre werden auch Unterhaltungsarbeiten wie Winterdienst, Schilderreinigung, Markierungs- und Mäharbeiten, sowie die Beleuchtung der Straße berücksichtigt. Die Emissionen durch den Verkehr werden nicht in die Untersuchung einbezogen und lediglich am Ende überschlägig ermittelt, um die Größenordnung darzustellen. Im Ergebnis liegen die Werte der Bauweisen sowohl beim Energiebedarf wie auch bei den maßgebenden Emissionswerten in gleicher Größenordnung. Bei Bau und Erhaltung ist der Primärenergieverbrauch der Asphaltbauweise ca. 40 % geringer, die Schadstoffemissionen sind ca. 30 % geringer als bei der Betonbauweise, wenn man die inhärente Energie des Bitumens unberücksichtigt lässt. Diese wird zwar berechnet, aber gleichzeitig angeregt, sie nicht dem Energiebedarf, sondern dem Rohstoffbedarf an Bitumen zuzuschlagen.
- Eine finnische Studie [HÄKKINEN/MÄKELÄ 1996] wurde von der Zementindustrie finanziert und war ein direkter Vergleich von Asphalt- und Betonbauweise. Nach dem Festlegen der funktionalen Einheit wird in der finnischen Veröffentlichung neben der baulichen Erhaltung über 50 Jahre lediglich die Salzstreuung als wiederkehrende Unterhaltungsmaßnahme berücksichtigt. Wie bei der schwedischen Untersuchung geht die Straßenbeleuchtung in die Berechnungen ein; darüber hinaus wird auch eine Emissionsbelastung durch eine angenommene Verkehrsbelastung bestimmt. Dabei wird festgestellt, dass bereits eine Änderung des Treibstoffbedarfs der Verkehrsteilnehmer im Promillebereich in der selben Größenordnung liegt, wie der komplette

Neubau der Straße mit Erhaltung über 50 Jahre. In diesem Zusammenhang wird in der Anlage ausführlich begründet, dass eine Abhängigkeit zwischen dem Material des Straßenoberbaus und dem Treibstoffbedarf nicht gegeben ist und damit alles andere als eine Gleichbehandlung von Beton und Asphalt in diesem Punkt nicht zu rechtfertigen wäre. Da die Ergebnisse in unterschiedlichen Szenarien nach nationalen Zielen bewertet und gewichtet werden, ist es von dieser Bewertungsmethode abhängig, welcher Baustoff aus ökologischen Gründen zu bevorzugen ist. Bei der Betrachtung der ungewichteten Zahlen fällt jedoch auf, dass die Betonbauweise beim Verbrauch nicht erneuerbarer

Energien Vorteile hat, bedingt durch die umstrittene Einbeziehung der inneren Energie des Bitumens bei der Asphaltbauweise. Die maßgebenden Emissionswerte, insbesondere die Treibhausemissionen, liegen bei der Betonbauweise z.T. erheblich über denen der Asphaltbauweise.

SCHIESSL [2001] thematisierte bei der Betonstraßentagung 2001 die Bedeutung der Nachhaltigkeit im Straßenbau. Er hebt darin die zukünftig wachsende Bedeutung integrierter Lebenszyklus-Bemessungsansätze hervor, die aufgrund politischer Zielsetzungen, überarbeiteter Regelwerke und zunehmender Sensibilisierung der Gesellschaft auch im Straßenbau Platz greifen werden. Nach einer allgemeinen Erläuterung zum Erstellen von Ökobilanzen im Bauwesen wird auf den Einsatz von Reststoffen und Abfällen sowie die hohe Recyclingquote hingewiesen. SCHIESSL [2001] führt dann exemplarisch einen Vergleich von Beton- und Asphaltstraßen durch, der bei der Energiebilanz klare Vorteile für die Betonbauweise, bei Treibhauspotential und Versauerungseffekt deutliche Vorteile der Asphaltbauweise aufzeigt. Bei der Energiebilanz wird allerdings die innere Energie einbezogen, was umstritten ist; ohne die Berücksichtigung der inneren Energie liegen die Werte für Asphalt und Beton in der selben Größenordnung. Hervorgehoben werden Einspareffekte bei der Betonbauweise durch Verwendung von Zementen mit Hüttensandanteil (CEM III) anstelle von Portlandzement (CEM I). Diese Substitution von Portlandzement wird aber heute im Straßenbau außer auf wenigen Versuchsstrecken kaum durchgeführt. Die Nutzung von Recyclingbaustoffen bringt abgesehen von der bedeutsamen Primärrohstoffeinsparung in Bezug auf Primärenergiereduktion oder Emissionsminderung kaum Vorteile. Lediglich der Energieeinsatz der Asphaltbauweise sinkt merklich, da der Bindemittelgehalt des Ausbauasphalts auf den Bedarf an Frischbitumen angerechnet wird.

Die deutsche Zementindustrie befasst sich seit Jahren mit der Umweltverträglichkeit von Zement bzw. Beton und informiert die Öffentlichkeit durch entsprechende Publikationen, so dass Daten zum Energieeinsatz und zu Emissionsbelastungen durch die Zementindustrie auf dem neuesten Stand vorliegen. Neben Informationen einzelner Hersteller ist hier insbesondere der „Tätigkeitsbericht 2005-2007“ des Vereins deutscher Zementwerke e.V. [VDZ 2007] zu nennen, der sehr ausführlich über Umweltdaten der Zementindustrie berichtet.

EUROBITUME [1999] veröffentlichte 1999 ein Ökopprofil für Straßenbaubitumen, welches ausführlich auf Energieverbrauch, Rohstoffe und Emissionen von der Rohölförderung bis zur Bitumenlagerung eingeht. Die Untersuchung berücksichtigt dabei europäische Mittelwerte bei der Bereitstellung von Strom und anteilig Rohstofflieferungen aus den Exportregionen Venezuela und Mittlerer Osten nach Europa.

Darüber hinaus existieren weitere Veröffentlichungen, in denen einzelne Aspekte erläutert werden, die für die Erstellung des Ökoprofiles von Bedeutung sind. Sofern auf sie zurückgegriffen wird, wird dies in den nachfolgenden Kapiteln unmittelbar erläutert.

3. Methodik des Ökoprofils

3.1 Anforderungen an eine umfassende Ökobilanz im Vergleich zu einem vereinfachten Ökopprofil

Für eine umfassende Bewertung der Umweltbelastungen, die mit einem Produkt oder einem Prozess verbunden sind, werden vermehrt sogenannte Ökobilanzen erstellt. In ihnen sollen alle Auswirkungen im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse berücksichtigt werden. Ziel einer Ökobilanz kann sowohl das Aufzeigen von Verbesserungen des bewerteten Produkts oder Prozesses als auch eine Entscheidungsgrundlage für die Bewertung alternativer Produkte oder Prozesse sein. Prinzipien und allgemeine Anforderungen an die Erstellung einer Ökobilanz sind im Jahre 1997 in der Europäischen Norm DIN EN ISO 14040 definiert worden; diese Norm wurde 2006 aktualisiert [DIN 2006a] und mit der DIN EN ISO 14044 erweitert [DIN 2006b].

Die methodischen Grundlagen bei der Anwendung von Ökobilanzen basieren zum Teil auf den wissenschaftlichen Grundlagen zur Erstellung von Energiebilanzen, die bereits in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts entwickelt wurden. In einem ersten Schritt wurde hierbei im Wesentlichen der Herstellungsprozess betrachtet, allerdings gab es bereits auch früher schon Energiebilanzen, in denen der gesamte Lebenszyklus eines Produkts betrachtet wurde [LÜNSER 1999]. Der Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus wird auch international hohe Bedeutung zugewiesen, wie der englische Begriff Life Cycle Assessment (LCA) verdeutlicht. Die Übertragung der methodischen Ansätze von Energiebilanzen auf Ökobilanzen hat ihre Berechtigung auch darin, dass bei vielen betrachteten Produkten und Prozessen eine wesentliche Umweltauswirkung auf den Einsatz von Energie zurückgeht.

Ökobilanzen sind nur eine von mehreren Umweltmanagementmethoden, von denen beispielsweise die Umweltverträglichkeitsprüfung im Straßenbau einen hohen Stellenwert besitzt; sie können diese nicht ersetzen. Weiterhin ist bei der Interpretation der Ergebnisse von Ökobilanzen zu beachten, dass weitergehende Aspekte, z.B. ökonomische und soziale Kriterien, unberücksichtigt bleiben [DIN 2006a]. Auf den Straßenbau übertragen lässt dies deutlich werden, dass für die Wahl einer Bauweise neben der ökologischen Bewertung die Baulastträgerkosten, der wirtschaftliche Nutzen für die Verkehrsteilnehmer sowie die Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit Bewertungsmaßstab sein müssen.

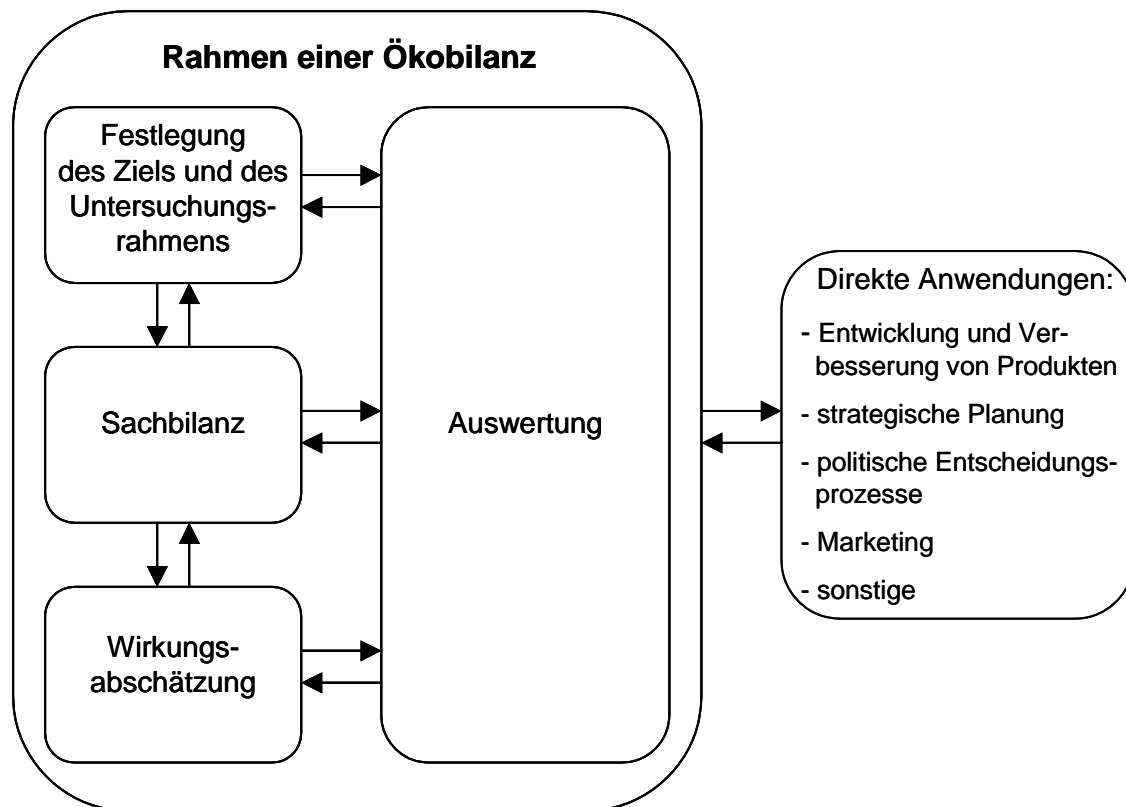


Abbildung 1: Bestandteile einer Ökobilanz [DIN 2006a]

Die Bestandteile einer Ökobilanz sind in Abbildung 1 dargestellt. Diese vier Schritte, die in den Normen EN ISO 14041 bis 14044 näher spezifiziert sind, lassen sich methodisch wie folgt voneinander abgrenzen:

- **Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens:** Bei der Zieldefinition sind die zu gewinnenden Erkenntnisse zu definieren, z.B. die Summe aller Umweltauswirkungen bei der Betrachtung eines Produkts oder die Differenzen der Umweltauswirkungen bei einem Produktvergleich. Hiervon abhängig ist auch die Definition des Untersuchungsrahmens, die neben der betrachteten funktionellen Einheit und den Systemgrenzen auch die Anforderungen an Datenumfang und Datenqualität beinhaltet, d.h. die Festlegung von Untersuchungsbreite und -tiefe [DIN 2006a].
- **Sachbilanz:** Im Rahmen der Sachbilanz werden alle Daten und Berechnungsansätze zusammengestellt, die für die Ökobilanz relevant sind. Sie berücksichtigt alle Lebensphasen und im wesentlichen quantifizierbare Daten, z.B. Rohstoffverbrauch oder Energieeinsatz. Daneben können jedoch auch Sachverhalte eingehen, die nur qualitativ benannt werden können [LÜNSER 1999].
- **Wirkungsabschätzung:** Inhalt der Wirkungsabschätzung ist die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu spezifischen Umweltauswirkungen. Dieser Schritt der Ökobi-

lanz befindet sich derzeit noch in der methodischen und wissenschaftlichen Entwicklung, da insbesondere die eindeutige Zuordnung von Sachdaten, z.B. Schadstoffemissionen, zu Umweltauswirkungen, z.B. Treibhauspotenzial, in der Regel nicht möglich ist. Wenn keine Wirkungsabschätzung durchgeführt wird, wird die Ökobilanz als „Sach-Ökobilanz“ bezeichnet [DIN 2006a].

- **Auswertung:** Im Rahmen der Auswertung werden auf Basis der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung Schlussfolgerungen und Empfehlungen entsprechend dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen gegeben. Da die Wirkungsabschätzung mit Schwierigkeiten verbunden ist, ist im Rahmen der Auswertung auch der Bezug auf die Sachdaten möglich.

Neben diesen Bearbeitungsschritten werden an eine Ökobilanz auch weitergehende methodische Anforderungen gestellt. Hervorzuheben sind insbesondere Anforderungen an die Datenqualität, die ausreichend repräsentativ, konsistent und nachvollziehbar sein soll. Hierbei zu berücksichtigen ist u.a. der zeitliche, der geographische und der technologische Erfassungsbereich, der bei der Verwendung von in der Literatur veröffentlichten Daten häufig stark voneinander abweicht oder nicht eindeutig bestimmbar ist. Im Rahmen der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung sollten Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Empfohlen wird weiterhin, die Ökobilanz einer „Kritischen Prüfung“, möglichst durch einen externen Sachverständigen, zu unterziehen, um ihre Glaubwürdigkeit zu erhöhen und zu ihrem besseren Verständnis beizutragen [DIN 2006a].

3.2 Abgrenzung Ökoprofil - Ökobilanz

Es wird deutlich, dass die vergleichende Bewertung der Umweltauswirkungen von Asphalt- und Betonbauweisen im Rahmen einer Ökobilanz mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass repräsentative Daten zur Verfügung stehen müssen, die zeitlich, geographisch und technologisch vergleichbar sind. Diese Anforderung kann bei einer ökologischen Bewertung auf Grundlage einer umfassenden Literaturstudie nicht erfüllt werden, da nicht nur aktuelle Veröffentlichungen und neben deutschen auch internationale Studien herangezogen werden müssten, da die Verfahren und Bauweisen in den Veröffentlichungen nicht immer eindeutig beschrieben sind und da der Untersuchungsrahmen vielfach nicht eindeutig definiert bzw. vergleichbar ist.

Weiterhin wird im Rahmen der durchgeführten Untersuchung auf Sensitivitätsanalysen weitestgehend verzichtet, so dass auch diese Anforderung an eine Ökobilanz nicht erfüllt ist. Ebenso erfolgt keine kritische Prüfung durch Dritte. Da die Wirkungsabschätzung mit großen Unsicherheiten behaftet ist, wird auf sie in Analogie zur Sach-Ökobilanz verzichtet, so dass die

Auswertung auf den Ergebnissen der Sachbilanz basiert. Um Missverständnissen vorzubeugen, wird diese Untersuchung als „Ökopprofil“ definiert, das als „vereinfachte Sach-Ökobilanz ohne kritische Prüfung“ in drei Bearbeitungsschritten erstellt wird:

- Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz als vergleichende Bilanzierung
- Auswertung

4. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

4.1 Ziel des Ökoprofiles

Ziel des Ökoprofiles ist die vergleichende Bewertung der Umweltauswirkungen von Asphalt- und Betonbauweise auf Grundlage vorliegender Daten und Veröffentlichungen ohne zusätzliche Erhebungen. Somit sollen keine absoluten Aussagen zu den Umweltauswirkungen einer Asphalt- oder Betonfahrbahn getroffen werden, sondern nur zum relativen Vergleich beider Bauweisen. Die Bewertung soll mit der Bearbeitungstiefe eine „Machbarkeitsstudie“ erfolgen und nimmt dementsprechend zur Minimierung des Untersuchungsaufwandes eine reduzierte Aussagequalität in Kauf.

Neben der Bewertung ist es ein weiteres Ziel, wesentliche Bewertungsparameter und Einflussgrößen sowie die relevanten Bilanzierungsparameter zu definieren. Für die Bewertung sollen neben der Bau- auch die Unterhaltungs- und Betriebsphase einschließlich der Erneuerungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Eine weitergehende Differenzierung nach Bauweisen ist bei der Bilanzierung nicht vorgesehen, jedoch ist die Wiederverwendung von Baustoffen bei Bau und Erneuerung zu betrachten.

4.2 Untersuchungsrahmen

Funktionale Bewertungseinheit

Die Bewertung erfolgt für einen 1 km langen zweibahnigen Streckenabschnitt mit einem Regelquerschnitt RQ 31 gemäß RAA, für den insgesamt 24.000 m² Fahrbahnoberbau notwendig sind [FGSV 2008a]. Es wird eine Bauklasse SV gemäß RStO mit einer Gesamtdicke des frostsicheren Aufbaus von 85 cm vorgesehen [FGSV 2001a].

Betrachtungszeitraum

Neben dem erstmaligen Neubau gehen alle Erneuerungsmaßnahmen während eines 50-jährigen Betrachtungszeitraumes ein. Ein Ende des Lebenszyklus der Straße und damit ein Rückbau sowie die hiermit verbundenen Aufwendungen bzw. Materialrückgewinnung bleiben unberücksichtigt, da diese nicht vorhersehbar sind.

Berücksichtigte Prozessketten

Bestandteil des erstellten Ökoprofiles sind die mit Bau und Erhaltungsmaßnahmen verbundenen ökologischen Auswirkungen von Asphalt- und Betonbauweise. Die Prozessketten, die hierfür berücksichtigt werden, sind qualitativ in Abbildung 2 bis Abbildung 5 dargestellt. Sie gelten bis auf den Prozessschritt „Ausbau“ jeweils sowohl für den Neubau der Fahrbahn als auch die Er-

haltungsmaßnahmen. In einer Variantenbetrachtung wird neben der Verwendung von neuen Baustoffen auch der Einsatz von Recycling-Baustoffen analysiert. Hierbei wird der Einsatz des Recycling-Materials nicht nur bei den Erhaltungsmaßnahmen, sondern bereits bei der erstmaligen Herstellung der Fahrbahn angesetzt, da die Recycling-Materialien auch von anderen Bau- maßnahmen zur Verfügung stehen können. Weiterhin wird in einer dritten Variante der Einsatz von Hochofenzement (CEM III-A) anstatt Portlandzement (CEM I) analysiert, wobei ebenfalls Recycling-Baustoffe berücksichtigt werden.

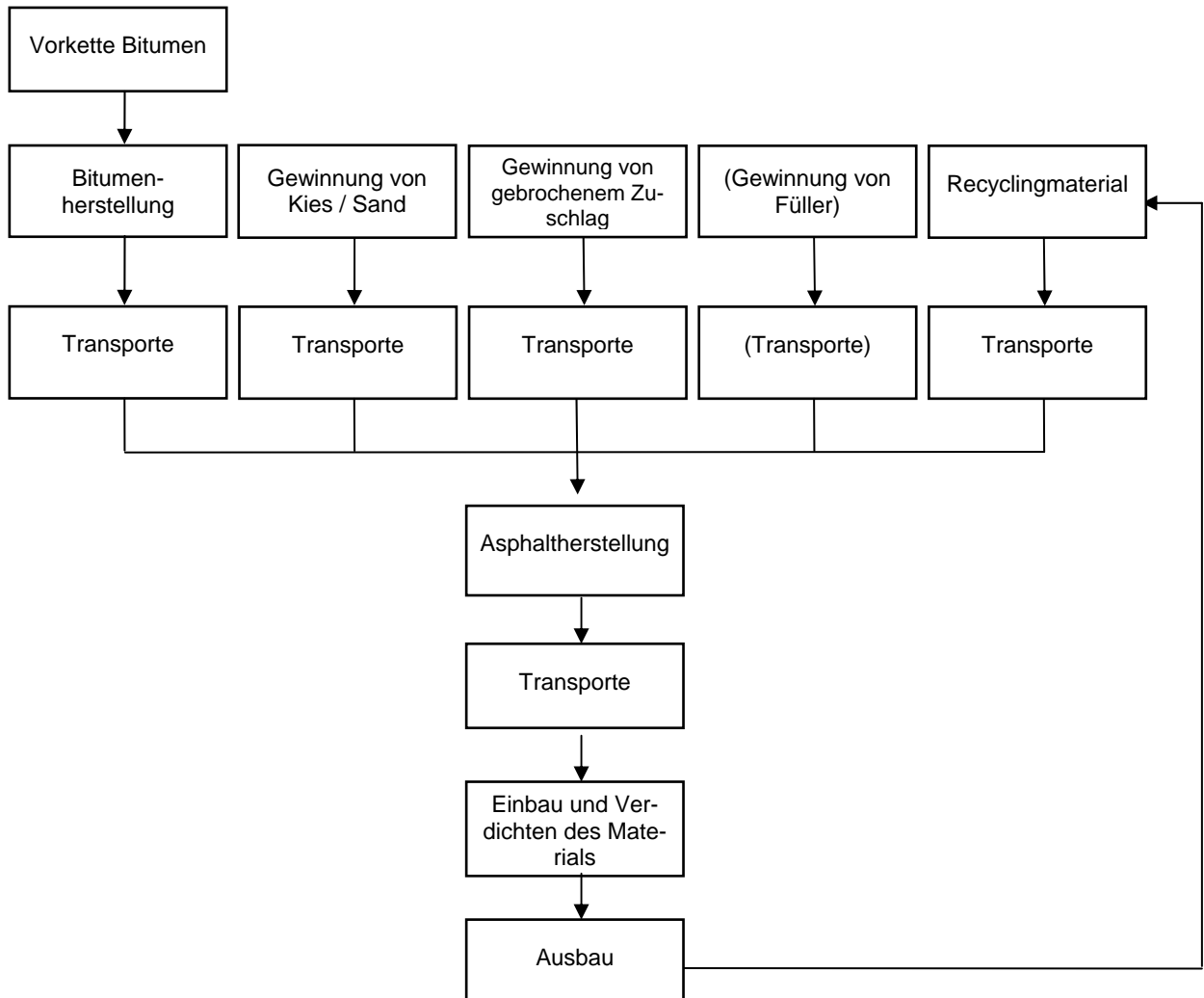


Abbildung 2: Prozesskette Asphalteinbau

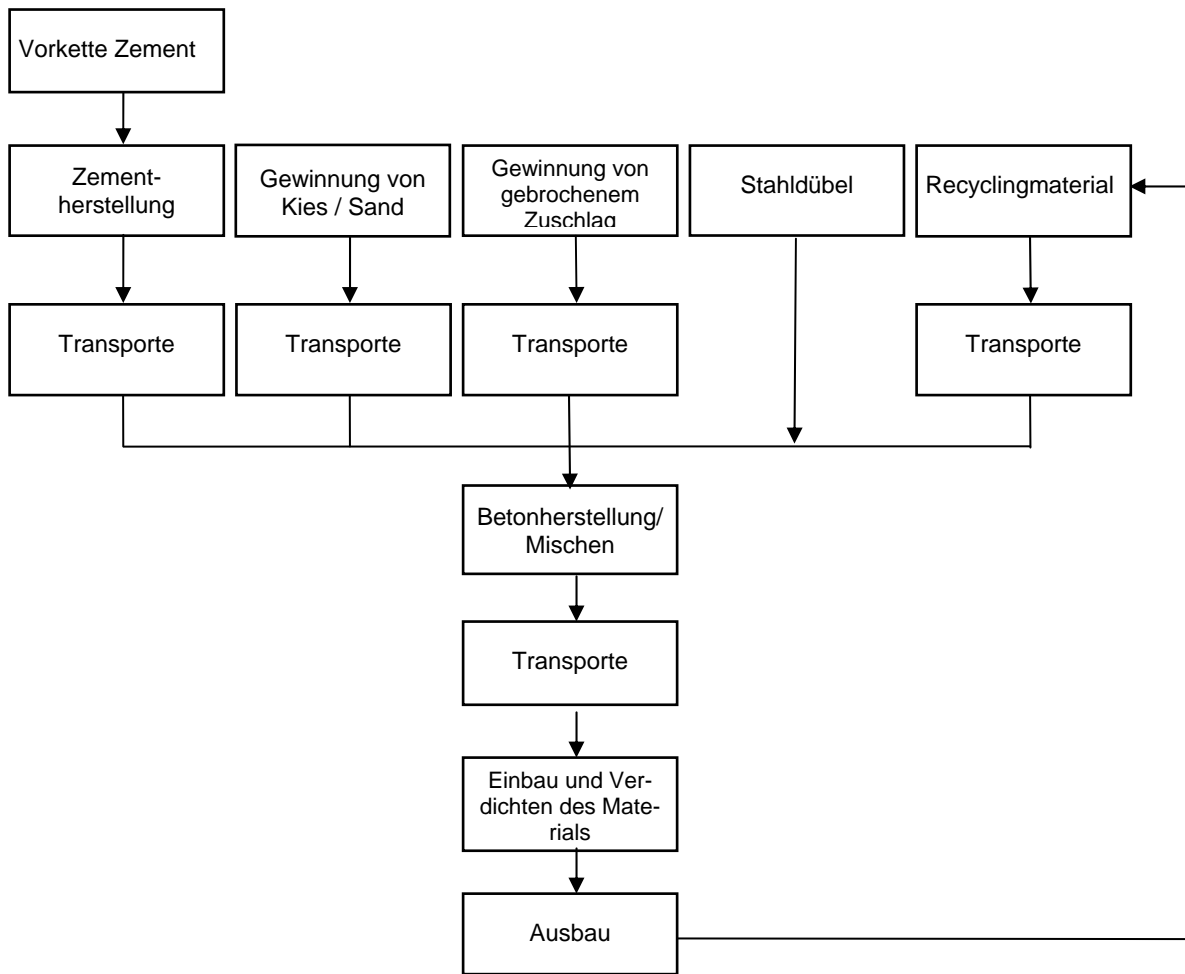


Abbildung 3: Prozesskette Betoneinbau

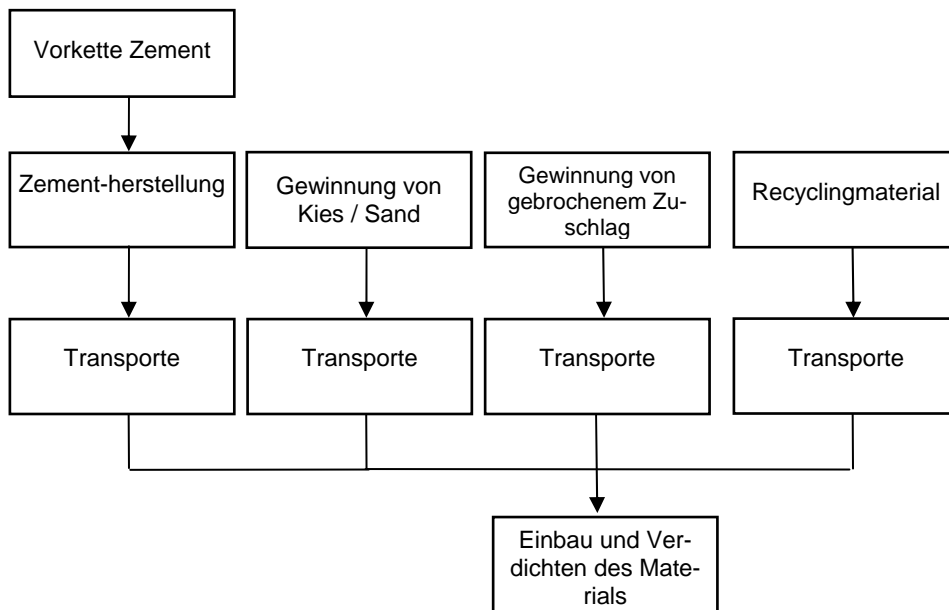


Abbildung 4: Prozesskette Einbau hydraulisch gebundener Tragschicht

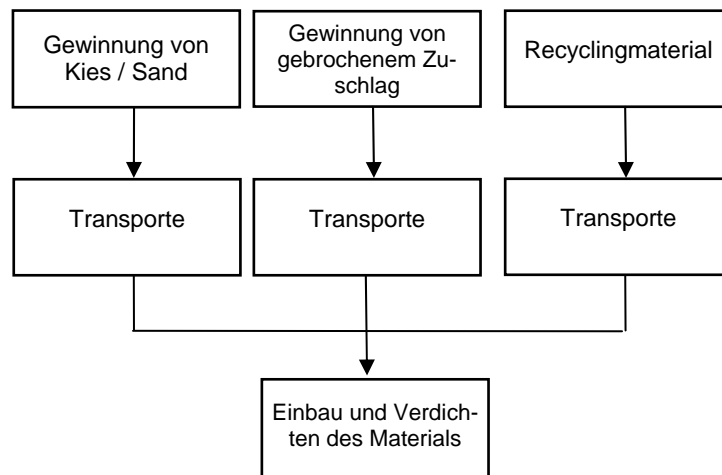


Abbildung 5: Prozesskette Einbau Frostschutzschicht

Für die einzelnen Prozessschritte wird nur jeweils der direkte Verbrauch bilanziert, indirekte Verbräuche bleiben unberücksichtigt. Für den Energieverbrauch der Transporte beispielsweise wird nur der Kraftstoffverbrauch zugrunde gelegt, indirekte Verbräuche für die Herstellung der Transportfahrzeuge gehen nicht in die Energiebilanzierung ein (s. Abbildung 6).

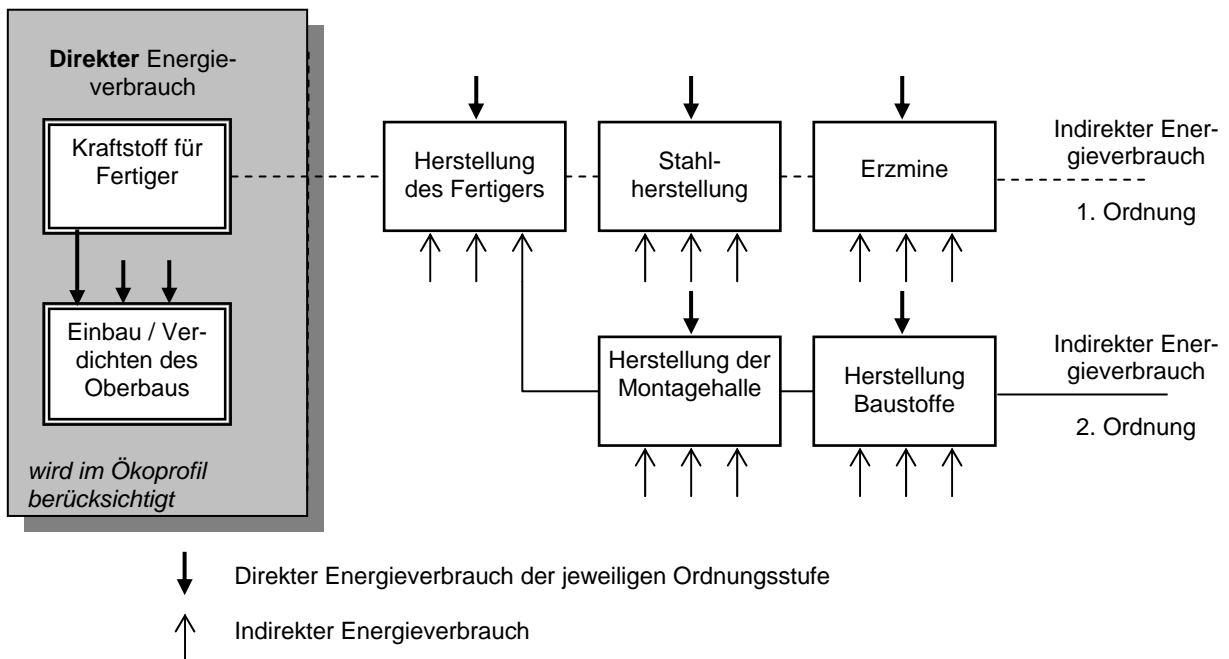


Abbildung 6: Beispiel für direkte/indirekte Verbräuche, nach POHLE/BEYERT [1983]

Neben den direkten Umweltauswirkungen, die beim Bau bzw. der Erhaltung der Fahrbahnen auftreten, gibt es auch indirekte Umweltauswirkungen, die durch die Nutzung der Fahrbahn

entstehen. Diese werden jedoch im Ökopprofil nicht berücksichtigt, da sie von einer Vielzahl weiterer Einflussgrößen abhängen und sich daher nicht eindeutig den entsprechenden Bauweisen zuordnen lassen. Hierzu zählen vor allem:

- **Einflüsse auf den Kraftstoffverbrauch durch unterschiedliche Rollwiderstände:** Auf Autobahnen wird der Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge zu einem großen Teil durch den Rollwiderstand beeinflusst. Da die Fahrleistungen der Fahrzeuge während des gesamten Betrachtungszeitraumes zu erheblich höheren Energieverbräuchen führen als alle Bau- und Erhaltungsmaßnahmen, können sich unterschiedliche Rollwiderstände von Asphalt- und Betonbauweise erheblich auf die ökologische Bewertung auswirken. Eine Vielzahl von Untersuchungen, die u.a. von HÄKKINEN/MÄKELÄ [1996] analysiert und zusammengestellt wurden, haben die Ermittlung von Rollwiderständen und Kraftstoffverbrauch zum Inhalt. Es wird jedoch deutlich, dass diese weniger von der Bauweise an sich, sondern vielmehr von der Ebenheit der Fahrbahnoberfläche, den verwendeten Materialien, dem Alter der Fahrbahndecke, der Temperatur, den klimatischen Einflüssen sowie der Art der Verkehrs (Pkw/Lkw), den Achslasten und der Bereifung abhängen. Aus diesem Grund lassen sich keine allgemeinen Aussagen zum Rollwiderstand und dem damit verbundenem Kraftstoffverbrauch von Asphalt- und Betonbauweise machen, so dass sie in einem Ökopprofil - wie auch bei HÄKKINEN/MÄKELÄ [1996] - nicht zum Ansatz kommen können.
- **Einflüsse auf die Lärmemissionen:** Der Einfluss des Fahrbahnbelages wurde bereits in einer Vielzahl von Untersuchungen analysiert. Hieraus resultieren u.a. verschiedene Korrekturwerte in den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS) [FGSV 1990], die je nach Belagsart bei der Ermittlung der Lärmemissionen von Straßen angesetzt werden können. Da auf Grundlage dieser Richtlinien ggf. weitere Lärmschutzmaßnahmen in den Planungsprozess einfließen, um die geforderten Immissionsgrenzwerte einzuhalten, finden unterschiedliche Lärmemissionen von Asphalt- und Betonfahrbahnen bereits Eingang in den Planungs- und Bewertungsprozess von Fahrbahnen. Eine Berücksichtigung im Rahmen des Ökoprofiles würde somit zu einer doppelten Bewertung dieser Umweltauswirkungen führen.
- **Umweltauswirkungen durch Abtragungen der Straßenbaustoffe:** Dieser Effekt wird im Wesentlichen durch Spikesreifen hervorgerufen, wie sie in Skandinavien im Einsatz sind; ansonsten ist der Abrieb nur gering. HÄKKINEN/MÄKELÄ [1996] kommen in ihrer Untersuchung weiterhin zu dem Schluss, dass die Abtragungen (Abrieb) in Finnland, wo Spikesreifen im Winter weit verbreitet sind, bei vorhandenen Asphaltbauweisen doppelt so hoch wie bei Betonbauweisen sind. Da diese Ergebnisse nicht

auf Deutschland übertragbar sind und da die Auswirkungen des Abriebs auf die Umwelt vernachlässigbar sind, bleiben sie im Ökoprofil unberücksichtigt.

- **Einflüsse auf die Straßenbeleuchtung:** Reflexionsmessungen, die an finnischen Untersuchungsstrecken durchgeführt wurden, zeigen im Ergebnis, dass neue Asphaltfahrbahnen eine erheblich schlechtere Retroreflexion haben als neue Betonfahrbahnen. Im Lauf der Zeit wird jedoch die Reflexion bei Asphalt besser, während sie bei Beton abnimmt, so dass alte Beläge praktisch gleiche Reflexionsgrade aufweisen [HÄKKINEN/MÄKELÄ 1996]. Somit ist bei älteren Belägen kein Einfluss auf die Beleuchtung erkennbar. Weiterhin wird das Ökoprofil für den Einbau von Asphalt oder Beton auf einer Autobahn erstellt, wo in der Regel diese beiden Bauweisen zur Wahl stehen. Diese werden jedoch bis auf wenige Einzelfälle in Deutschland nicht beleuchtet, so dass kein Einfluss unterschiedlicher Reflexionsgrade in das Ökoprofil eingeht.

Bilanzierungsparameter

Es gibt eine Vielzahl von Bilanzierungsparametern, die im Rahmen von Ökobilanzen oder vergleichbaren Untersuchungen bilanziert werden können. Im Rahmen dieses Ökoprofils zu Asphalt- und Betonbauweise von Fahrbahnen werden jedoch nur zwei wesentliche Parameter berücksichtigt: **Primärenergieverbrauch** und **Emission von Treibhausgasen**, Es wurde keine Unterscheidung vorgenommen, ob der Primärenergiebedarf aus nachwachsenden Rohstoffen, aus Wasserkraft oder aus nicht erneuerbaren Quellen gedeckt wird, da dies nicht bauweisespezifisch ist. Die Leitgröße bei der Emission von Treibhausgasen für Brennprozesse der Steine-Erden Industrie ist CO₂ [EYERER/REINHARDT 2000]. Folgende Bilanzierungsparameter werden nicht berücksichtigt:

- **Primärrohstoffverbrauch:** Da für Asphalt- und für Betonbauweise gleiche Dicken des frostsicheren Aufbaus vorgesehen werden, ist der Materialeinsatz quantitativ gleich. Die Unterschiede infolge unterschiedlicher Erhaltungsmaßnahmen und -zeiträume sind gering und können vernachlässigt werden. Sie wären auch nur dann zu berücksichtigen, wenn die eingesetzten Baustoffe nicht wieder- oder weiterverwertet werden, was jedoch in der Regel erfolgt.
- **Flächeninanspruchnahme durch Rohstoffgewinnung und Deponierung:** Da der Primärrohstoffverbrauch gleich ist, ist auch der hierfür notwendige Flächenverbrauch gleich, und hat auf die vergleichende Bewertung von Asphalt und Beton keinen Einfluss. Ebenso ist die Flächeninanspruchnahme beider Bauweisen gleich. Für die Deponierung von Reststoffen sind keine Flächen zu berücksichtigen, da kein endgültiger Rückbau des Straßenaufbaus vorgesehen ist und da ausgebaute Baustoffe wieder- oder weiterverwertet werden.

- **Ozonabbaupotential (ODP):** ODP als Umweltwirkung entfällt für Brennprozesse, da nur reaktionsträge chlor- und bromhaltige Kohlenstoffverbindungen Ozonabbau in der Stratosphäre bewirken. Diese treten hier als Verbrennungsprodukte nicht auf [EYERER/REINHARDT 2000].

- **Versauerungspotential, Eutrophierungspotential und Oxidantienbildungspotential:**
Die Datenbasis dieser Wirkkategorien ist erheblich schlechter als die von Treibhausgasen, was eine verlässliche Berücksichtigung erschwert. Die Versauerung stellt eine der gravierendsten Umweltbelastungen dar, die insbesondere auf Verbrennungsprozesse in Industrie, Kraftwerken, Haushalten etc. zurückzuführen ist. Auswirkungen von Versauerungs- und Eutrophierungspotential (Überdüngung) sind allerdings teilweise reversibel und regional zu differenzieren, im Gegensatz zur globalen Wirkung des Treibhauseffekts. Des weiteren gibt es bei der Versauerung Unsicherheiten bei der Modellbildung. Die Photooxidantienbildung (Sommersmog) ist ein regional begrenztes sowie technisch beeinflussbares Problem und wird genau wie das Eutrophierungspotential nicht als herausragende Wirkkategorie im Straßenbau betrachtet [EYERER/REINHARDT 2000].

5. Sachbilanz

5.1 Massenermittlung

Bauweisen

Als Bauweisen werden miteinander verglichen:

- Asphalttragschicht mit Frostschutzschicht (gemäß Zeile 1, Tafel 1 RStO) [FGSV 2001a]:

Asphaltdeckschicht:	4 cm
Asphaltbinderschicht:	8 cm
Asphalttragschicht:	22 cm
Frostschutzschicht:	51 cm

- Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel auf Frostschutzschicht bzw. Schicht aus frostunempfindlichem Material (gemäß Zeile 1.1, Tafel 2 RStO) [FGSV 2001a]:

Betondecke:	27 cm
Vliesstoff (bleibt in der Sachbilanz unberücksichtigt)	
Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT):	15 cm
Frostschutzschicht:	43 cm

Erneuerungsmaßnahmen

In Anlehnung an die Richtlinien für die Planung von Erneuerungsmaßnahmen an Straßen [FGSV 2001b] werden für die beiden Bauweisen folgende Erneuerungsmaßnahmen angesetzt:

- Asphaltbauweise: Einmaliger Austausch von Deck- und Binderschicht (nach 25 Jahren) sowie zweimaliger Austausch der Deckschicht (nach 12 und 37 Jahren), jeweils Fräsen und Einbau

- Betonbauweise: Einmaliger Austausch der Betondecke nach 25 Jahren.

Einfache Unterhaltungsmaßnahmen, wie das Verfüllen von Schlaglöchern, die Fugenpflege sowie das Heben und Erneuern einzelner Betonplatten werden nicht bilanziert, da ihr Umfang nur schwer abschätzbar ist und da für diese Arbeiten keine Bilanzierungsparameter bekannt sind.

Verwendete Baustoffe

Für die Asphaltbauweise werden ein Splittmastixasphalt SMA 11 S als Deckschicht, ein Asphaltbinder AC 22 BS als Binderschicht sowie ein AC 32 TS als Asphalttragschicht nach ZTV-Asphalt 2007 [FGSV 2008b] bzw. TL-Asphalt 2007 [FGSV 2008c] zugrunde gelegt. Die Betondecke wird mit einem C 30/37, die hydraulische gebundene Tragschicht als HGT 0/45 gemäß ZTV-Beton 2007 [FGSV 2008d] bzw. TL Beton 2007 [FGSV 2008e] erstellt. Für die Frostschutzschicht kommen je zur Hälfte gebrochener und natürlicher Zuschlag zum Einsatz. Die Bindemittel- und Zuschlaganteile sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

	Bitumen [M.-%]	Zement [M.-%]	gebrochener Zuschlag [M.-%]	natürlicher Zuschlag [M.-%]
Splittmastixasphalt	6,5	/	93,5	/
Asphaltbinder	4,5	/	95,5	/
Asphalttragschicht	3,6	/	57,8	38,6
Betondeckschicht	/	14,0	30,0	56,0
hydraulisch gebundene Tragschicht	/	3,0	/	97,0
Frostschutzschicht	/	/	50,0	50,0

Tabelle 1: Bindemittel- und Zuschlagsanteile der verschiedenen Schichten bei Asphalt- und Betonbauweise

Zusätzlich werden bei der Betonbauweise die Fugen längs und quer verdübelt. Hierfür werden nach ZTV-Beton 2007 [FGSV 2008d] ca. 22.400 Dübel mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Länge von 500 mm zum Ansatz gebracht, so dass der Stahlverbrauch ca. 43,1 t beträgt.

Neben der Verwendung von neuen Baustoffen wird in einer Variantenbetrachtung auch die Verwendung von Recyclingbaustoffen bilanziert. In dieser Variante werden die Recyclingbaustoffe sowohl beim erstmaligen Einbau als auch bei den Erneuerungsmaßnahmen verwendet. Der Anteil der Recyclingbaustoffe wird entsprechend der derzeitigen Praxis wie folgt angesetzt:

- Asphaltbauweise:
 - Asphaltdeckschicht: 0 %
 - Asphaltbinderschicht: 25 %
 - Asphalttragschicht: 50 %
 - Frostschutzschicht: 100 %

- Betonbauweise
 - Betondecke obere Lage (10 cm): 0 %
 - Betondecke untere Lage (17 cm): 75 %

Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT):	75 %
Frostschuttschicht:	100 %

Zusammenstellung der Massen

Für alle Schichten und Baustoffe wird die gleiche Materialdichte von 2.400 kg/m³ angesetzt. In Tabelle 2 ist für die funktionale Bewertungseinheit (1 km Autobahn mit RQ 31) der Massenbedarf bei Verwendung neuer Baustoffe und unter Berücksichtigung eingesetzter Recyclingmaterialien zusammengestellt.

	Bitumen [t]	Zement [t]	gebrochener Zuschlag [t]	natürlicher Zuschlag [t]	Recycling- material [t]
Asphaltbauweise (ohne Recycling)	813	/	28.567	19.579	/
davon					
- Asphaltaufbau	813		13.879	4.891	
- Frostschuttschicht	/		14.688	14.688	
Betonbauweise¹⁾ (ohne Recycling)	/	2.436	17.049	29.473	/
davon					
- Betondecke		2.177	4.665	8.709	
- HGT		259	/	8.380	
- Frostschuttschicht		/	12.384	12.384	
Asphaltbauweise (mit Recycling)	533	/	9.116	2.445	36.864
davon					
- Asphaltaufbau	533		9.116	2.445	7.488
- Frostschuttschicht	/		/	/	29.376
Betonbauweise¹⁾ (mit Recycling)	/	2.436	2.462	6.691	37.369
davon					
- Betondecke		2.177	2.462	4.596	6.316
- HGT		259	/	2.095	6.285
- Frostschuttschicht		/	/	/	24.768

¹⁾ zzgl. 43,1 t Stahl für die Verdübelung der Fugen

Tabelle 2: Zusammenstellung der Massen für Asphalt- und Betonbauweise

5.2 Bilanzierung Primärenergieverbrauch

5.2.1 Materialgewinnung

Bitumenherstellung

Für die Ermittlung des Primärenergiebedarfs von Bitumen gibt es unterschiedliche Ansätze: Zum einen kann Bitumen als „Abfallprodukt“ bei der Raffinierung des Rohöls angesehen werden, so dass kein Energieaufwand für seine Herstellung berücksichtigt werden soll. Zum ande-

ren ist im Bitumen als Rohölprodukt eine große latente Energiemenge gespeichert, die als potentielle Energie bei der Bilanzierung zu berücksichtigen ist. Beide Ansätze werden nicht für sachgerecht gehalten, so dass sie dem Vergleich von Asphalt- und Betonbauweise in diesem Ökoprofil nicht zugrunde gelegt werden, sondern wie folgt verfahren wird:

Bitumen ist ein Produkt der Raffinierung wie andere Produkte, z.B. Benzin und Diesel, auch. Zwar ist das Angebot an Bitumen zum Teil größer als die Nachfrage, da es als Nebenprodukt anfällt, jedoch gibt es neben der Verwendung im Asphaltbereich auch andere Einsatz- und Weiterverarbeitungsmöglichkeiten für Bitumen, so dass Bitumen in Anlehnung an POHLE/BEYERT [1983] nicht als Abfallprodukt anzusehen ist. Sicherlich sollte bei der Ermittlung des Primärenergieaufwandes berücksichtigt werden, dass Bitumen nicht am Ende des Raffinierungsprozesses anfällt, sondern bereits nach der atmosphärischen Destillation. Somit ist nur der bis zu diesem Verfahrensschritt notwendige Energiebedarf anteilig auf die Endprodukte zu verteilen [POHLE/BEYERT 1983].

Die Berücksichtigung des Heizwertes entspricht ebenfalls nicht der gängigen Praxis, da die Alternative zum Bitumeneinsatz für die Asphaltherstellung nicht die Verbrennung ist. Dem stehen u.a. der hohe Schwefel- und Schwermetallgehalt entgegen [POHLE/BEYERT 1983]. Ebenso wird in einem Bericht der Europäischen Bitumenindustrie der Heizwert des Bitumen nicht berücksichtigt, da Bitumen als Rohstoff und nicht als Energieträger bei der Asphaltherstellung zum Einsatz kommt [EUROBITUME 1999]. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die latent im Bitumen gespeicherte Energie nicht verloren ist, sondern bei der Wiederverwendung von Asphaltsschichten zur Energieerzeugung verwendet werden könnte und somit zu einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung stehen würde.

In der Literatur lassen sich folgende Angaben zum Primärenergieaufwand für die Bitumenherstellung finden:

- POHLE/BEYERT [1983] setzen den Primärenergieaufwand mit 2.095 MJ/t an; hiervon werden ca. 1.450 MJ/t für Förderung und Transport des Rohöls zur Raffinerie berücksichtigt.
- Nach LÜNSER [1999] liegt der Primärenergieaufwand bei ca. 2.000 MJ/t Bitumen. Demgegenüber steht ein Heizwert des Bitumens von ca. 40.000 MJ/t. Diese Zahlen beziehen sich auf Untersuchungen Anfang der Neunziger Jahre.
- STRIPPLE [2001] ermittelt für Schweden einen Primärenergieaufwand von 3.384 MJ/t. Hierbei berücksichtigt er Gewinnung, Transport, Raffinierung und Lagerung.
- Durch die Eurobitumen wurde ein Primärenergieaufwand von insgesamt 4.710 MJ/t für die Bitumenherstellung und -lagerung ermittelt. Hiervon entfallen 2.784 MJ/t auf die

Rohölgewinnung und den Transport nach Europa, 1.304 MJ/t auf die Bitumenherstellung sowie 204 MJ/t auf die Lagerung [EUROBITUME 1999].

Auf Grundlage dieser veröffentlichten Zahlen wird für die Erstellung des Ökoprofiles der für die Asphaltbauweise sehr ungünstige Wert von **4.710 MJ/t** angesetzt.

Zementherstellung

Für die Herstellung von Portlandzement (CEM I) ist in der Vorkette die Herstellung von Klinker und Gips zu betrachten, wobei der Klinkeranteil mit 95 % und der Gipsanteil mit 5 % berücksichtigt werden. Nach LÜNSER [1999] beträgt der Primärenergiebedarf für die Klinkerherstellung insgesamt 3.757 MJ/t, für die Gipsherstellung 68 MJ/t. Durch den Verein der Deutschen Zementindustrie wird der aktuelle Primärenergiebedarf mit 2.674 MJ/t für die Herstellung einer Tonne Zement sowie 1.024 MJ/t elektrische Energie angesetzt [VDZ 2006]. Für das Ökoprofil werden diese aktuellen Daten zugrunde gelegt und mit den von LÜNSER [1999] veröffentlichten Daten für die Gipsherstellung kombiniert. Somit beträgt der Primärenergiebedarf für Portlandzement (CEM I) **3.698 MJ/t**.

Der Vergleich mit anderen Literaturangaben bestätigt diese angesetzten Werte in ihrer Größenordnung: POHLE/ BEYERT [1983] haben einen Primärenergiebedarf von 5.650 MJ/t ermittelt, wobei zu beachten ist, dass diese Werte ca. 25 Jahre zurückliegen. EYERER/ REINHARDT [2000] haben für einen durchschnittlichen Zement mit einem Klinkeranteil von 85 % einen Primärenergieaufwand von 4.394 MJ/t angegeben. Nach etwas älteren skandinavischen Untersuchungen liegt der Energieaufwand mit 5.872 MJ/t [HÄKKINEN/MÄKELÄ 1996] bzw. 4.774 MJ/t [STRIPPLE 2001] höher.

Zum Energiebedarf bei der Herstellung von Hochofenzement (CEM III) liegen in der Literatur keine verwertbaren Angaben vor. Daher wird der gleiche Energiebedarf für die Zementherstellung wie bei Portlandzement angesetzt. Allerdings wird berücksichtigt, dass Hochofenzement zu ca. 50 % aus Klinker und zu 50 % aus Hüttensand besteht. Für den Hüttensand wird kein Energiebedarf zugrunde gelegt, da dieser als Abfallprodukt bewertet wird. Somit setzt sich der Primärenergiebedarf für die Herstellung des Hochofenzements aus ca. 1.337 MJ/t und 1.024 MJ/t elektrische Energie zusammen und wird mit insgesamt **2.361 MJ/t** angesetzt.

Zuschlaggewinnung

Gegenüber der Bindemittelproduktion ist der Energieaufwand für die Gewinnung der natürlichen und gebrochenen Zuschläge weitaus geringer. POHLE/BEYERT [1983] setzen für natürliche Zuschläge einen Primärenergiebedarf von 25 MJ/t, für gebrochene Zuschläge je nach Zu-

schlagsart von 60 bis 73 MJ/t an. EYERER/REINHARDT [2000] geben den Bedarf für natürliche Zuschläge mit 35 MJ/t an. Nach LÜNSER [1999] sind 31,3 MJ/t anzusetzen.

Für die Sachbilanzierung kommen für die Gewinnung der natürlichen Zuschläge **31,3 MJ/t** zum Ansatz. Für die gebrochenen Zuschläge wird auf einen mittleren Wert von POHLE/BEYERT [1983] zurückgegriffen, die für die Splittherstellung **66 MJ/t** ansetzen.

Gewinnung Recyclingmaterial

Bei diesem Prozessschritt wird die Gewinnung von Recyclingmaterial aus bereits angeliefertem Ausbaumaterial berücksichtigt. Für die Untersuchung wird auf Werte von WEIL ET AL. [2003] zurückgegriffen, die im Rahmen einer ökobilanziellen Betrachtung den Einsatz von Recyclingmaterial für die Betonherstellung analysiert haben. Bei der Analyse von insgesamt sieben Aufbereitungsanlagen beträgt der mittlere Primärenergiebedarf ca. 78,6 MJ/t. Hierbei wurde neben Sieben und Verladen auch der Transport zur Aufbereitungsanlage (20 km Fahrtstrecke incl. Rückfahrt) berücksichtigt. Setzt man für diesen Transport gemäß Kapitel 5.2.3 1,4 MJ/tkm an, so werden ca. 35 % des Primärenergiebedarfs für den Transport benötigt, so dass noch **51,1 MJ/t** für die reine Aufbereitung des Recyclingmaterials zu berücksichtigen sind. Dieser Wert wird in seiner Größenordnung durch Angaben von LÜNSER [1999] und EYERER/REINHARDT [2000] bestätigt, die einen Primärenergiebedarf von 43 MJ/t bzw. 84 MJ/t angegeben haben. Da für die Gewinnung von Recyclingmaterial aus Asphalt keine vergleichbaren Angaben vorliegen, werden 51,1 MJ/t auch für Asphaltrecycling berücksichtigt, auch wenn hier der Primärenergieverbrauch voraussichtlich geringer ist.

Herstellung Stahldübel

Nach Angaben von LÜNSER [1999] beträgt der Energiebedarf für die Herstellung von Betonstahl **10.793 MJ/t**.

5.2.2 Materialherstellung und -einbau

Asphaltherstellung

Der Energieaufwand für die Asphaltherstellung hängt u.a. von der Mineralfeuchte und der Gesteinstemperatur ab. Beispielsweise kann der Energiebedarf im Winter bis zu 80 % höher als in den Sommermonaten sein [POHLE/BEYERT 1983]. Auf Grundlage eigener Erhebungen geben POHLE/BEYERT [1983] den Primärenergiebedarf bei einer Mineralfeuchte von 5 % für Walz-asphalt mit 397 MJ/t als Basiswert an. Ausländische Literaturquellen hatten diesen Wert bestätigt. LÜNSER [1999] hat mit 402 MJ/t für das Bezugsjahr 1990 einen fast identischen Primärenergiebedarf angegeben. Die VDI-Richtlinie 2283 (Emissionsminderung – Aufbereitungsanla-

gen für Asphaltmischgut) [VDI 2008] gibt einen Energieaufwand für die Asphaltmischung von 252 MJ/t bis 360 MJ/t an.

Um für die Asphaltherstellung belastbare Daten zum Primärenergiebedarf zu erhalten, wurden im Rahmen einer Untersuchung Messungen, die zur Überprüfung der Emissionsgrenzwerte von Asphaltmischanlagen in den Jahren 1999 bis 2004 durchgeführt wurden, ausgewertet [RESS 2009]. Zur Verfügung standen Protokolle von 91 Emissionsmessungen für Anlagen, die über eine Kapazität größer 150 t Asphalt pro Stunde verfügen und somit repräsentativ für Mischgutanlagen sind, wie sie im Bereich Autobahnbau genutzt werden. Hiernach liegt der spezifische Wärmebedarf bei 57,4 kWh/t, was einem mittleren Primärenergiebedarf von **207 MJ/t** entspricht. Im Rahmen dieses Ökoprofiles wird dieser Wert zugrunde gelegt, da hierbei zum einen für den Autobahnbau repräsentative Anlagengrößen und zum anderen eine dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Anlagentechnik berücksichtigt sind. Weitergehende Möglichkeiten zur Senkung des Primärenergiebedarfs bei der Asphaltherstellung, z.B. die Reduktion des Feuchtegehalts der Ausgangstoffe durch trockene Lagerung, bleiben im Rahmen dieses Ökoprofiles hingegen unberücksichtigt, da sie derzeit nur in wenigen Asphaltwerken umgesetzt sind.

Betonherstellung

Angaben zum Energiebedarf für die Betonherstellung sind nur bei LÜNSER [1999] zu finden. Dieser setzt einen Primärenergiebedarf von **11 MJ/t** für die Betonherstellung an.

Einbau des Oberbaus

Für den Primärenergiebedarf zum Einbau des Oberbaus werden die nachfolgenden Angaben von POHLE/BEYERT [1983] herangezogen:

- Asphalttragschicht:	7,8 MJ/t
- Asphaltbinderschicht:	8,8 MJ/t
- Asphaltdeckschicht:	10,2 MJ/t
- hydraulisch gebundene Tragschicht:	4,5 MJ/t
- Frostschuttschicht:	6,0 MJ/t
- Betondecke:	15,0 MJ/t

5.2.3 Materialtransporte

Lage des Streckenabschnittes, der Mischwerke und der Bindemittelproduktion (Transportentfernungen)

Für die Bilanzierung der Transportleistungen werden folgende Entfernungen angesetzt:

- Entfernung Baustelle - Mischanlage: 50 km
Diese Entfernung wird sowohl für Asphalt- als auch Betonbauweise angesetzt und gilt sowohl für den Transport des einzubauenden Mischgutes als auch den Transport des ausgebauten Recyclingmaterials von einer Baustelle zur Aufbereitungsanlage, die sich unmittelbar bei der Mischanlage befindet.
- Entfernung Zuschlaggewinnung - Mischanlage: 20 km
- Entfernung Zementfabrik - Betonmischanlage: 100 km
- Entfernung Bitumenraffinerie - Asphaltmischanlage: 200 km

Diese Entfernungen sind mittlere Transportentfernungen, die sowohl die Anlieferung als auch die leere Rückfahrt berücksichtigen.

Primärenergiebedarf

Der Energiebedarf für die Materialtransporte ist im wesentlichen von der Motorleistung, dem spez. Energiebedarf und dem Verhältnis von Zuladung zu zulässigem Gesamtgewicht abhängig. Einen Wert von 1 MJ/tkm gibt LÜNSER [1999] an. SCHUCHARDT [2006] gibt in seiner Arbeit „Primärenergetische Analyse der Infrastruktur von Wohnsiedlungen“ einen Wert von 1,78 MJ/tkm an. Für das Ökopprofil wird daher entsprechend für alle Materialtransporte, die in der Regel als Ferntransporte mit Sattelzügen durchgeführt werden, ein mittlerer Wert von **1,4 MJ/tkm** angesetzt.

5.2.4 Materialausbau

Zum Energiebedarf für den Ausbau der Asphaltsschichten bzw. der Betondecke können nur Angaben von SCHMUCK/BREITER [1986] herangezogen werden. Diese haben den Energiebedarf für das Fräsen eine Asphaltdeckschicht mit **6,2 MJ/m² cm** angegeben. Dieser Wert kann in seiner Größenordnung auch auf das Fräsen der Asphaltbinderschicht übertragen werden. Für den Aufbruch gebundener Betonschichten beträgt der Primärenergiebedarf **14,71 MJ/m³**.

5.3 Emission von Treibhausgasen

5.3.1 Methodik

Zum Treibhauseffekt tragen mehrere Schadstoffe bei: Im wesentlichen CO_2 , aber auch CH_4 und N_2O . Die Gewichtung dieser Schadstoffe zur Beurteilung ihres Treibhauspotenzials erfolgt über so genannte Äquivalenzfaktoren. Nach LÜNSER [1999] beträgt die Gewichtung für $\text{CO}_2:\text{CH}_4:\text{N}_2\text{O}$ 1:11:270. Bei der Sachbilanzierung ist diese Gewichtung zu berücksichtigen; allerdings sind die Emissionen von CH_4 und N_2O in der Regel so viel geringer als die von CO_2 , dass ihr Einfluss auf das Treibhauspotenzial von untergeordneter Bedeutung ist.

Wesentlicher Emissionsherd für diese Schadstoffe ist die Verbrennung fossiler Energieträger, so dass vielfach ein direkter Zusammenhang zwischen Primärenergieverbrauch und Schadstoffemissionen besteht. Darüber hinaus können jedoch auch, z.B. bei der Zementherstellung Schadstoffemissionen infolge chemischer Prozesse entstehen.

Die Sachbilanzierung für die Emission der Treibhausgase erfolgt analog der Bilanzierung des Primärenergiebedarfs. Hierfür wird auf Veröffentlichungen zurückgegriffen, wenn für die einzelnen Prozessschritte entsprechende Angaben vorliegen. Grundlage sind die Literaturquellen, die auch für den Primärenergiebedarf herangezogen werden. Finden sich hierin keine Angaben zu CH_4 - und N_2O -Emissionen, werden diese aufgrund ihres geringen Anteils vernachlässigt; ansonsten werden sie in die Sachbilanzierung aufgenommen. Liegen keine Angaben zu den Emissionen vor, werden sie aufgrund des Primärenergiebedarfs bestimmt.

5.3.2 Materialgewinnung

Für die **Bitumenherstellung** einschließlich Gewinnung des Rohöls, Transport nach Europa, Raffinierung und Lagerung, wurde durch die Eurobitumen ein CO_2 -Ausstoss von **277.000 g/t** ermittelt. Angaben zu CH_4 - und N_2O -Emissionen liegen nicht vor, so dass sie vernachlässigt werden [EUROBITUME 1999].

Bei der **Zementherstellung** ist nach Portlandzement (CEM I) und Hochofenzement (CEM III) zu unterscheiden. Für **Portlandzement** kann die gesamte CO_2 -Emission mit **573.000 g/t** angesetzt werden. Hierin berücksichtigt ist neben der CO_2 -Emission infolge Energieverbrauch auch der CO_2 -Ausstoss infolge Entsäuerung des Kalksteins, die über die Hälfte der Gesamtemission hervorruft. [VDZ 2006]

Direkte Angaben zur CO_2 -Emission bei der Herstellung von Hochofenzement (CEM III) liegen nicht vor. Da diese jedoch wesentlich durch die Entsäuerung des Kalksteins bestimmt wird, ist eine Berechnung auf Grundlage des Primärenergiebedarfs ebenfalls nicht möglich. Daher wird zur Bestimmung der CO_2 -Emission auf eine Vergleichrechnung von JENSEIT [1999] zurückge-

griffen, der die CO₂-Emission für Frischbeton mit Hochofen- und mit Portlandzement bestimmt hat. Hiernach beträgt die CO₂-Emission bei Verwendung von Hochofenzement nur 55,7 % gegenüber Portlandzement. Berücksichtigt man einerseits, dass Hochofenzement nur halb so viel Klinker enthält wie Portlandzement und andererseits, dass bei der Betonherstellung sowohl Energiebedarf als auch Schadstoffemissionen im wesentlichen bei der Zementherstellung entstehen, erscheint diese geringere CO₂-Emission plausibel. Somit werden für die Herstellung von **Hochofenzement (CEM III)** 55,7 % der CO₂-Emission von Portlandzement, entsprechend **319.161 g/t** angesetzt.

Für **natürliche Zuschläge** hat LÜNSER [1999] eine Emission von Treibhausgasen in Höhe von insgesamt **2.028 g/t** ermittelt.

Für gebrochene Zuschläge werden die Emissionen auf Grundlage des Energieverbrauchs ermittelt. Hierfür wird berücksichtigt, dass der Primärenergieverbrauch von 66 MJ/t (s. Kapitel 5.2.1) zu 66 % über die Verbrennung von Rohöl und zu 34 % durch Strom bereitgestellt wird. Unter Berücksichtigung eines Energiebereitstellungsgrades von 1,093 bei Verbrennung von Rohöl und 2,778 für die Stromerzeugung, werden 40 MJ/t Endenergie durch Rohölverbrennung und 8,1 MJ/t durch Stromverbrauch für die Gewinnung der gebrochenen Zuschläge genutzt [POHLE/BEYERT 1983].

Für die Ermittlung der Schadstoffemissionen infolge Energieverbrauch wird auf Angaben von FRITSCH ET AL. [1995] zurückgegriffen, die auch durch LÜNSER [1999] für die Ermittlung der Emissionen genutzt wurden. Diesen Werten liegt bei der Stromgewinnung ein Energiemix aus Steinkohle, Braunkohle, Rohöl, Erdgas und Uran zugrunde. Weiterhin werden Emissionen, die für die Gewinnung, den Transport und die Bereitstellung dieser Energieträger notwendig sind, sowie Verluste durch die Stromverteilung berücksichtigt. Der Wirkungsgrad für die Stromerzeugung wird mit 35,5% angesetzt, d.h. um 1 MJ Strom zu erzeugen, müssen 2,82 MJ Primärenergie eingesetzt werden. Bei der Verbrennung von Rohölprodukten werden ebenfalls zusätzliche Emissionen infolge Bereitstellung des Energieträgers angesetzt. Die Emissionen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Emissionen [mg/MJ Endenergie]		
CO ₂	CH ₄	N ₂ O

Elektrische Energie

Energieträger	Energiemix			
Steinkohle	0,3830	35.753	0,15	19,15
Braunkohle	1,2100	112.954	0,48	60,50
Rohöl	0,0185	1.457	0,06	0,04
Erdgas	0,0065	358	0,02	0,01
Uran	1,2000	0	0,00	0,00
Bereitstellung und Verteilung		171.261	203,40	4,60
Gesamt	2,8200	321.783	204,11	84,29

Rohölverbrennung

Verbrennung	78.770	3,00	2,00
Bereitstellung und Verteilung	10.699	21,30	0,20
Gesamt	89.469	24,30	2,20

Tabelle 3: Ermittlung der Emissionen infolge Energieverbrauch, nach FRITSCH ET AL. [1995] und LÜNSER [1999]

Für die Gewinnung der **gebrochenen Zuschläge** werden 3.578 g/t infolge Rohölverbrennung und 2.597 g/t infolge Stromverbrauch, zusammen **6.176 g/t CO₂**-Emissionen erzeugt. Für **CH₄** betragen die Emissionen **2,6 g/t** und für **N₂O 0,8 g/t**.

Bei der Gewinnung von **Recyclingmaterial** fallen nach Angaben von WEIL ET AL. [2003] 5.610 g/t CO₂, 5,4 g/t CH₄ und 0,3 g/t N₂O an. Unter der Voraussetzung, dass diese Emissionen ausschließlich durch den Energieverbrauch erzeugt werden und dass ca. 35 % des Primärenergieverbrauchs auf Transportleistungen entfallen, sind nur folgende Emissionen in Ansatz zu bringen: **3.647 g/t CO₂, 3,5 g/t CH₄ und 0,2 g/t N₂O**.

Bei der Herstellung von **Betonstahl** fallen insgesamt **958.199 g/t** Treibhausgase an [LÜNSER 1999].

5.3.3 Materialherstellung und -einbau

Die Schadstoffemissionen bei der Asphaltherstellung hängen im wesentlichen von dem spezifischen Wärmebedarf des Mischgutes und somit der Lagertemperatur der Ausgangsstoffe sowie den eingesetzten Brennstoffen ab. Zu den CO₂-Emissionen, die je nach eingesetztem Brennstoff anfallen, werden in der VDI-Richtlinie 2283 nähere Angaben gemacht [VDI 2008]. Bei den verschiedenen Energieträgern, wie Heizöl, Erdgas, Butan, Steinkohle und Braunkohle ist die

auftretende Menge an CO₂ je Tonne Mischgut sehr unterschiedlich. Bei Einsatz von Erdgas ist beispielsweise die CO₂-Emission ca. 50 % geringer als bei Einsatz von Braunkohle.

Die Auswertungen von RESS [2009] bestätigen diesen signifikanten Einfluss des Energieträgers auf die CO₂-Emission weitgehend: Für Anlagen mit einer Mischgutproduktion größer 150 t Asphalt pro Stunde wurde bei Erdgas eine mittlere CO₂-Emission von 14,78 kg CO₂ je t Asphalt, bei Heizöl von 20,33 kg CO₂ je t Asphalt sowie bei Braunkohlestaub von 25,42 kg CO₂ je t Asphalt ermittelt. Da die drei Energieträger bei den untersuchten Anlagen gleich häufig zum Einsatz kommen (31 Erdgas, 34 Heizöl, 26 Braunkohlestaub), wird im Rahmen des Ökoprofiles die mittlere CO₂-Emission aller Anlagen in Höhe von **19,9 kg/t für die Asphaltherstellung** zugrunde gelegt.

Bei der Betonherstellung wird erheblich weniger Energie verbraucht, und somit werden weniger Schadstoffe erzeugt. Auf Grundlage des angesetzten Primärenergiebedarfs von 11 MJ/t (s. Kapitel 5.2.2) und der Annahme, dass ausschließlich elektrische Energie mit einem Wirkungsgrad von 2,82 eingesetzt wird, berechnet sich der Endenergieverbrauch zu 3,9 MJ/t. Gemäß Tabelle 3 betragen die Emissionen für die Betonherstellung somit **1.255 g/t CO₂, 0,8 g/t CH₄ und 0,3 g/t N₂O**.

Die Emissionen, die beim Einbau des Oberbaus zu berücksichtigen sind, werden ebenfalls auf Grundlage des Primärenergiebedarfs ermittelt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der gesamte Energieverbrauch durch Verbrennung von Rohöl erfolgt, für den ein Energiebereitstellungsgrad von 1,093 zum Ansatz kommt [POHLE/BEYERT 1983]. Die sich hieraus ergebenden Schadstoffemissionen werden auf Grundlage von Tabelle 3 berechnet und sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

	Emissionen [g/t]		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Asphalttragschicht	640,5	0,17	0,02
Asphaltbinderschicht	722,6	0,20	0,02
Asphaltdeckschicht	837,5	0,23	0,02
hydraulisch gebundene Tragschicht	369,5	0,10	0,01
Frostschuttschicht	492,7	0,13	0,01
Betondecke	1.232	0,33	0,03

Tabelle 4: Zusammenstellung der angesetzten Emissionsbelastungen für den Einbau des Oberbaus

5.3.4 Materialtransporte

Nach LÜNSER [1999] können bei allen Materialtransporten folgende Treibhausemissionen angesetzt werden: 81,8 g/tkm CO₂, 0,018 g/tkm CH₄ und 0 g/tkm N₂O. Da die CH₄-Emissionen trotz eines Äquivalenzfaktors von 11 weitaus geringer sind als die CO₂-Emissionen und keine messbaren N₂O-Emissionen auftreten, werden nur die CO₂-Emissionen in Höhe von **81,8 g/tkm** in Ansatz gebracht.

5.3.5 Materialausbau

Die Treibhausemissionen infolge Materialausbau werden wie für den Einbau des Oberbaus auf Grundlage des Primärenergiebedarfs (s. Kapitel 5.2.4) und der Annahme, dass der Energieverbrauch ausschließlich durch Rohölverbrennung mit einem Energiebereitstellungsgrad von 1,093 erfolgt, berechnet. Sie sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

	Emissionen		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Fräsen von Asphaltsschichten [g/m ² cm]	507,3	0,14	0,01
Aufbruch einer Betondecke [g/m ³]	1.204,3	0,33	0,03

Tabelle 5: Zusammenstellung der angesetzten Emissionsbelastungen für den Materialausbau

6. Auswertung

Im Rahmen des Ökoprofiles wurden folgende Varianten analysiert:

- Variante 1: Vergleich von Asphaltoberbau und Betonoberbau mit Portlandzement ohne Einsatz von Recyclingbaustoffen
- Variante 2: Vergleich von Asphaltoberbau und Betonoberbau mit Portlandzement mit Einsatz von Recyclingbaustoffen
- Variante 3: Vergleich von Asphaltoberbau und Betonoberbau mit Hochofenzement (CEM III), der gemäß TL Beton-StB 07 [FGSV 2008e] nur in Ausnahmefällen und in Abstimmung mit dem Bauherrn zum Einsatz kommt, sowie mit Einsatz von Recyclingbaustoffen

Die Grundlagendaten sowie die Ergebnisse der Sachbilanzierung für die Bilanzierungsparameter „Primärenergiebedarf“ und „Emission von Treibhausgasen“ auf Basis der in Kapitel 5 definierten Ansätze sind in den Anlagen 1 bis 3 zusammengestellt. In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die Ergebnisse bezogen auf einen Quadratmeter Fahrbahnoberfläche für die drei betrachteten Varianten gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass der Verbrauch an Primärenergie bei der Variante 1 für Asphalt um ca. 10 %, bei Variante 2 sogar um ca. 17 % geringer als bei der Betonbauweise ist. Wenn im Einzelfall Hochofenzement (CEM III) eingesetzt wird, sinkt hingegen der Primärenergiebedarf des Betons gegenüber der Asphaltbauweise um ca. 6 %. Der Einsatz von Recyclingbaustoffen hat keinen signifikanten Einfluss auf den Primärenergiebedarf, da der reduzierte Energiebedarf für das Bindemittel durch zusätzlichen Energiebedarf für Gewinnung und Transport des Recyclingmaterials kompensiert wird.

Bei der Emission der Treibhausgase ist ein deutlicher Unterschied zwischen Asphalt- und Betonbauweise zu erkennen: Bei Verwendung von Portlandzement liegen diese Emissionen bei Betonfahrbahnen um 79 % (ohne Recyclingbaustoffe) bzw. 86 % (mit Recyclingbaustoffen) höher als bei Asphaltfahrbahnen. Durch den Einsatz von Hochofenzement kann die Emission der Treibhausgase zwar um knapp ein Drittel gesenkt werden, trotzdem liegen die Emissionen noch um ca. 27 % höher als bei der Asphaltbauweise. Auch auf die Emission der Treibhausgase hat der Einsatz von Recyclingbaustoffen nur vernachlässigbaren Einfluss.

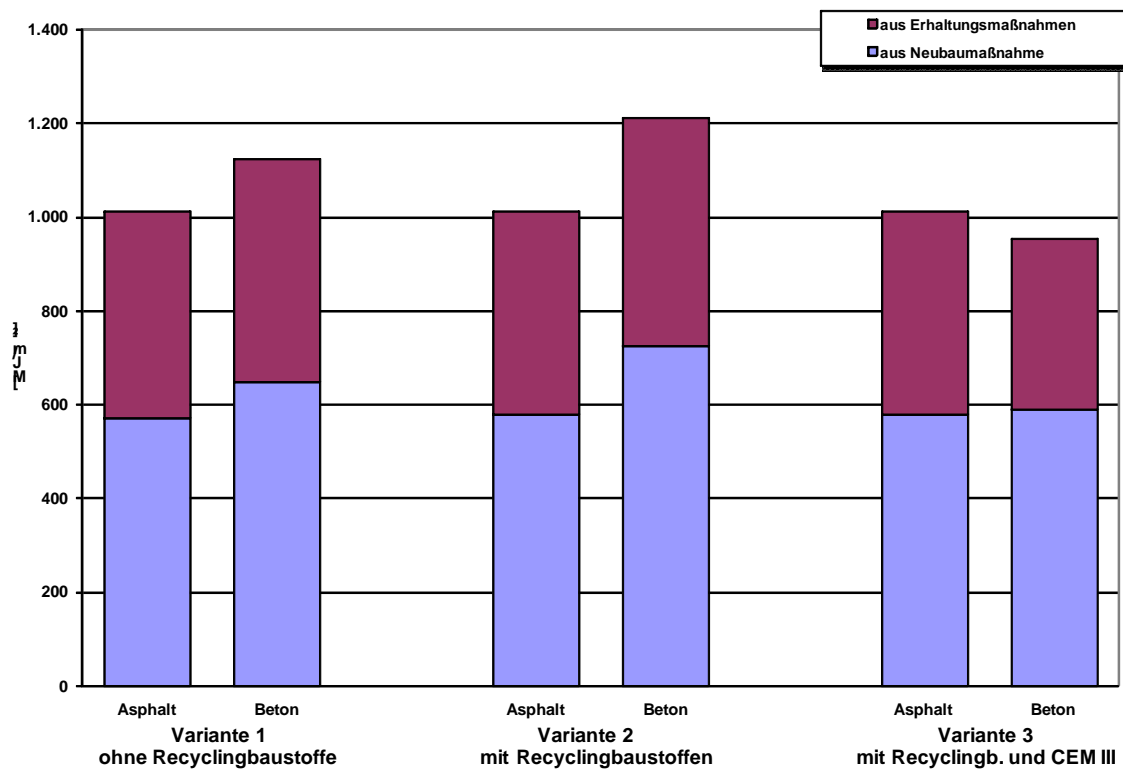


Abbildung 7: Verbrauch an Primärenergie je Quadratmeter Fahrbahnoberfläche für die betrachteten Varianten

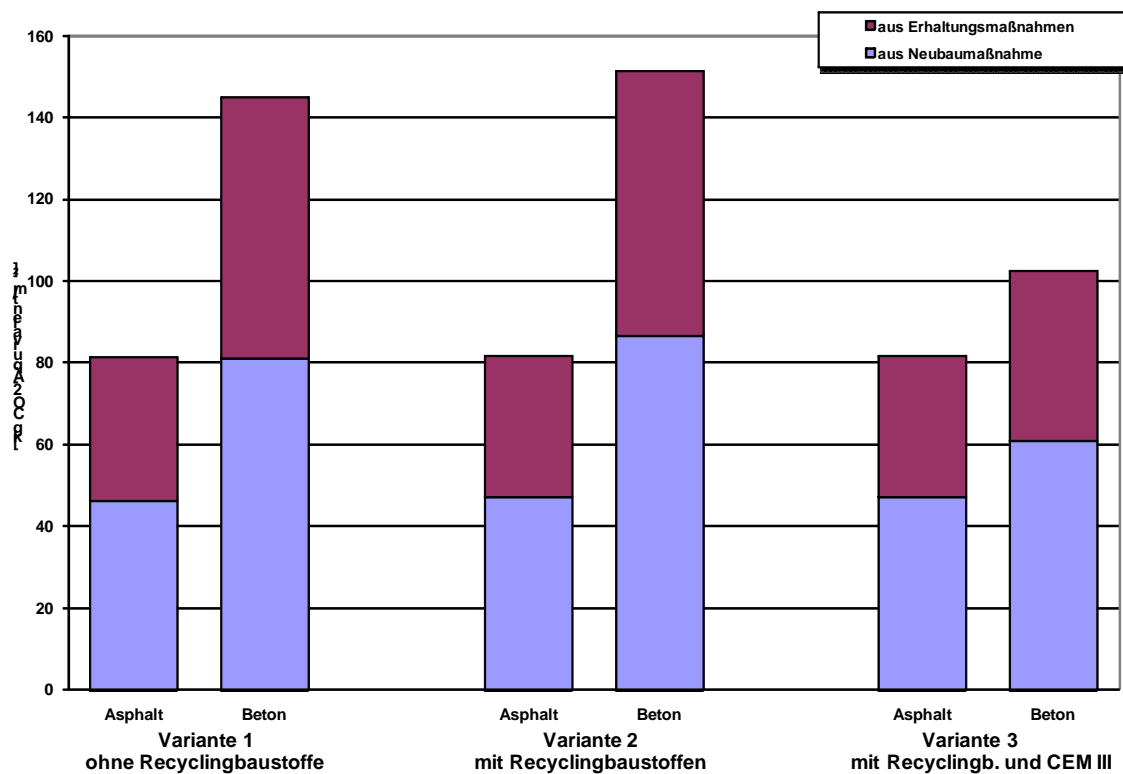


Abbildung 8: Emission von Treibhausgasen je Quadratmeter Fahrbahnoberfläche für die betrachteten Varianten

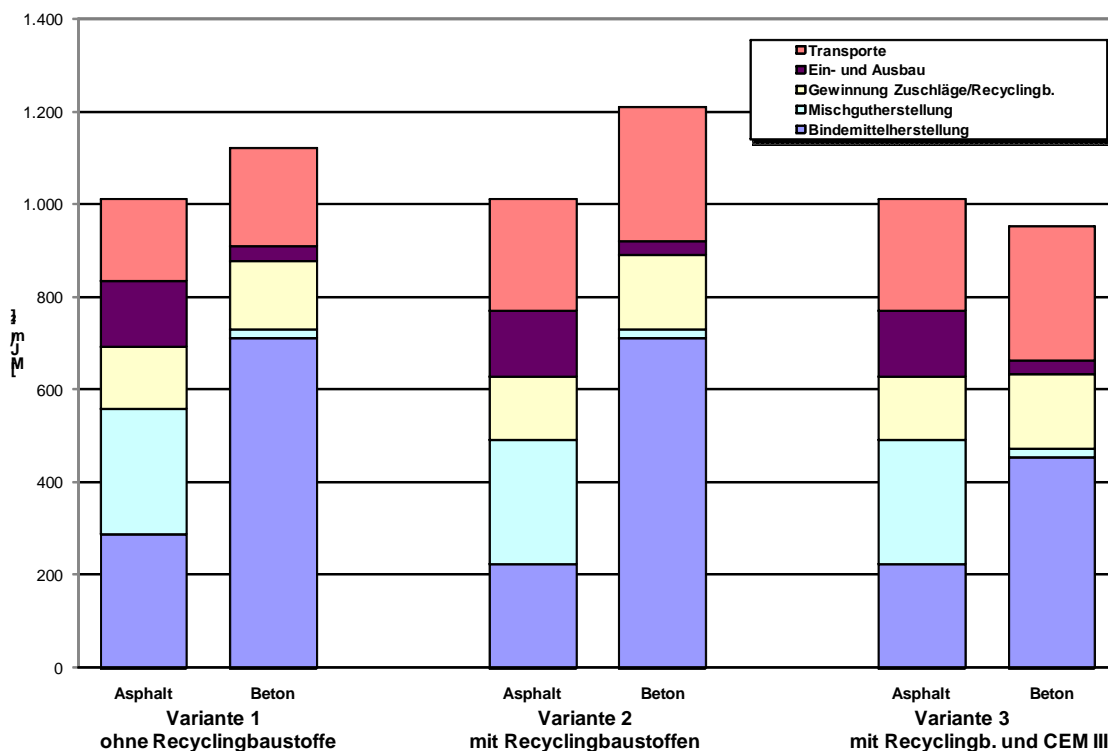


Abbildung 9: Verbrauch an Primärenergie je Quadratmeter Fahrbahnoberfläche für die betrachteten Varianten nach ihrer Entstehung differenziert

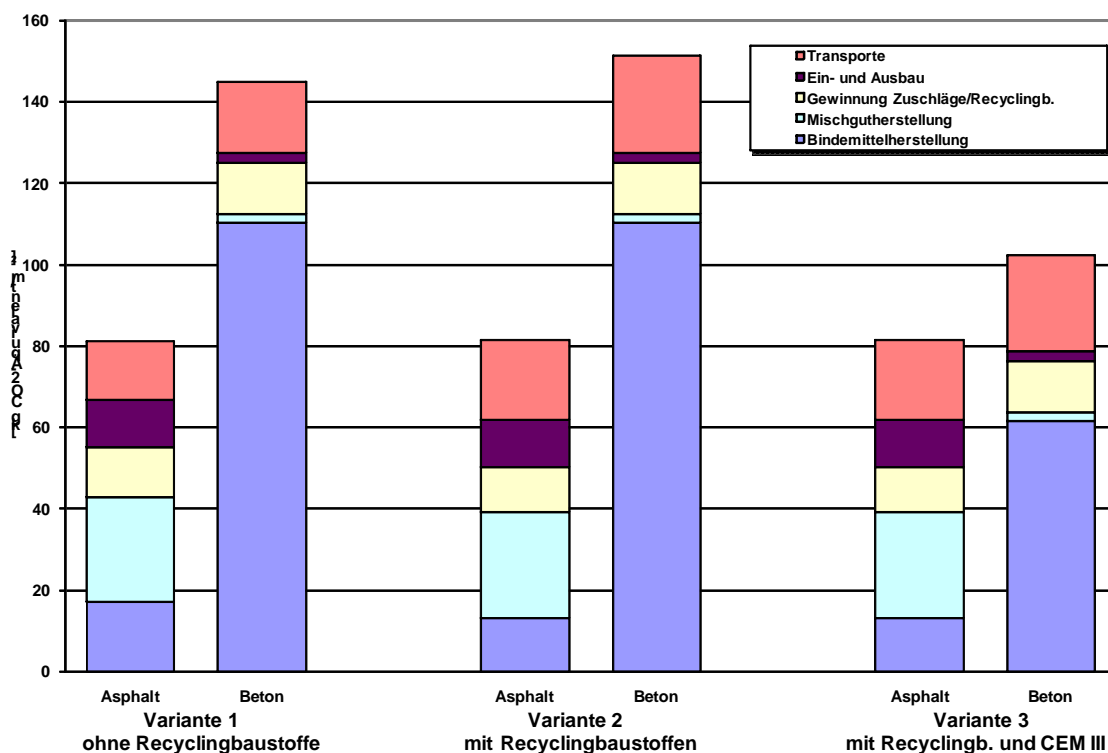


Abbildung 10: Emission von Treibhausgasen je Quadratmeter Fahrbahnoberfläche für die betrachteten Varianten nach ihrer Entstehung differenziert

In Abbildung 9 und Abbildung 10 ist der Primärenergiebedarf und die Emission der Treibhausgase nach den Gruppen ihrer Entstehung differenziert. Bei der Betonbauweise ist der wesentliche Energiebedarf in der Zementherstellung zu sehen, während er für die Bitumenproduktion incl. der Vorkette nur bei ca. 28 % (ohne Verwendung von Recyclingbaustoffen) bzw. 22 % (mit Verwendung von Recyclingbaustoffen) liegt. Bei der Asphaltbauweise ist der hohe Energiebedarf für die Mischgutherstellung mit 27 % ebenfalls wesentlich für die Energiebilanz. Der Energiebedarf für die Gewinnung der Zuschlagstoffe und die Aufbereitung des Recyclingmaterials, den Einbau des Oberbaus und den Aufbruch der Deckschichten sowie alle Materialtransporte beträgt bei den Asphaltbauweisen jeweils zwischen 13 und 24 %. Für die Betonbauweisen sind die Anteile für die Gewinnung der Zuschlagstoffe und die Aufbereitung des Recyclingmaterials sowie alle Transporte je nach untersuchter Variante in einer Größenordnung von 13 bis 30 % zu finden. Der Energiebedarf für den Einbau und den Aufbruch der Betondeckschicht ist hingegen mit 2 bis 3 % weitaus geringer.

Es wird die sehr große Emission der Treibhausgase bei der Zementherstellung deutlich, die 76 % der Gesamtemission bei der Betonbauweise ausmacht. Dieser Anteil ist nochmals höher als aufgrund des Energiebedarfs zu erwarten wäre, da ein großer Teil der Treibhausgasemission auf die Entsäuerung des Kalksteins bei der Klinkerherstellung zurückzuführen ist. Durch den Einsatz von Hochofenzement (CEM III) können diese Emissionen zwar erheblich gesenkt werden, liegen jedoch immer noch bei 60 %. Bei der Asphaltbauweise entfallen hingegen nur 21 % (ohne Recyclingbaustoffe) bzw. 16 % (mit Recyclingbaustoffen) der gesamten Treibhausgasemission auf die Bitumengewinnung. Ansonsten sind die Emissionen in ihrer Gewichtung analog dem Primärenergiebedarf auf die verschiedenen Entstehungsgruppen zurückzuführen.

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Asphaltbauweise einen signifikant geringeren Primärenergiebedarf aufweist als die Betonbauweise. Nur durch den Einsatz von Hochofenzement könnten bei Betonfahrbahnen leichte Vorteile gegenüber der Asphaltbauweise erzielt werden, wenn dieser regelmäßig für die Betonherstellung verwendet werden würde. Die Emission von Treibhausgasen ist bei der Asphaltbauweise sogar noch weitaus geringer als bei der Betonbauweise, da bei der Zementproduktion hohe CO₂-Emissionen bei der Klinkerherstellung auftreten. Diese könnten durch den Einsatz von Hochofenzement (CEM III) wie der Primärenergiebedarf deutlich gesenkt werden, bleiben jedoch aufgrund des 50 %igen Klinkeranteils weiterhin immer noch deutlich höher als bei Asphaltbauweisen, auch wenn sich beim Beton die Emission der Treibhausgase im Bindemittelherstellungsprozess in den letzten Jahren verbessert hat. Die Verwendung von Recyclingbaustoffen hat bei beiden Bauweisen weder auf den Primärenergiebedarf noch auf die Emission der Treibhausgase größeren Einfluss. Bei der weitergehenden Interpretation dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei um eine vorläufige Bewertung im Rahmen eines vereinfachten Ökoprofiles handelt und dass bei einer detaillierteren Analyse ggf. abweichende Aussagen möglich sind. Aufgrund der vielfach

für die Asphaltbauweise ungünstig getroffenen Annahmen, z.B. bei der Bitumenherstellung, ist jedoch zu erwarten, dass sich die Ergebnisse qualitativ nicht zu Ungunsten der Asphaltbauweise verschieben.

Gegenüber einer vertiefenden Ökobilanz wurden bei der Sachbilanzierung vor allem folgende Defizite deutlich:

- Ein Teil der verwendeten Datengrundlagen ist veraltet und entspricht ggf. nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik. Dies kann sowohl Auswirkungen auf den Primärenergiebedarf als auch auf die Schadstoffemissionen haben. Allerdings kommen technische Entwicklungen hierbei in der Regel sowohl Asphalt- als auch Betonbauweise zugute.
- Es wurden Angaben verschiedener Herkunft in die vergleichende Bewertung einbezogen, die ggf. unter verschiedenen Randbedingungen ermittelt wurden.
- Die Berechnungsmethodik konnte nicht durchgehend konsistent gehalten werden, da zum Teil für eine einheitliche Systematik keine Daten vorhanden waren und somit auf veröffentlichte Summenwerte zurückgegriffen werden musste. Die Sachbilanzierung basiert zum Teil auf - zwar plausiblen - Einzelwerten, deren Repräsentativität jedoch nicht überprüft wurde, beispielsweise bei der Ermittlung von Emissionen und Energiebedarf für Transportfahrten.
- Ggf. entscheidende Einflussgrößen, wie der Rollwiderstand, sind völlig unberücksichtigt geblieben, da für diese Einflussgrößen keine eindeutigen Werte in Abhängigkeit der Bauweise definiert werden können. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass z.B. der Rollwiderstand nicht nur durch die Bauweise, sondern vor allem durch die Art der Ausführung bestimmt wird, so dass für die Bewertung eine weitere Differenzierung der Fahrbeläge erforderlich wäre.

Trotz dieser Defizite lässt das aufgestellte Ökopprofil Aussagen zur ökologischen Bewertung der Bauweisen zu. Ihre Qualität und Repräsentativität sollten jedoch in einem weiteren Schritt verbessert werden. Hierfür ist es zum einen notwendig, für alle signifikanten Einflussgrößen vergleichbare und repräsentative Daten zu gewinnen, die dem aktuellen Stand der Technik in Deutschland entsprechen, wofür neben entsprechenden Parameterstudien bei Bedarf auch Erhebungen vor Ort, z.B. zum Energieverbrauch bei der Asphaltherstellung oder dem Aufbruch vorhandener Deckschichten, zweckmäßig sind. Zum anderen sollte als weitere Einflussgröße der Rollwiderstand in die Analyse einbezogen werden, wofür neben einer umfassenden Analyse der Einflussgrößen ggf. auch Grenzwertbetrachtungen zielführend sind. Weiterhin kann es im Rahmen einer Szenarienbetrachtung sinnvoll sein, die Bedeutung verschiedener Einflussgrößen, z.B. Temperatur und Feuchte der Ausgangsstoffe bei der Asphaltherstellung, zu analysieren. Durch diese weitergehende Analyse kann die Aussagequalität so weit verbessert wer-

den, dass die Ergebnisse für eine ökologische Bewertung von Asphalt- und Betonbauweisen z.B. auch im Rahmen von Angebotswertungen herangezogen werden können. Aus dem derzeitigen Kenntnisstand heraus werden diese vertiefenden Untersuchungen jedoch keine signifikant anderen Ergebnisse für Asphalt- und Betonbauweisen erwarten lassen.

Literaturverzeichnis

DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 14040 – Umweltmanagement - Ökobilanz, Grundsätze und Rahmenbedingungen, Ausgabe 2006
Berlin 2006 (a)

DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 14044 - Umweltmanagement - Ökobilanz, Anforderungen und Anleitungen, Ausgabe 2006
Berlin 2006 (b)

EUROBITUME

Partial Life Cycle Inventory or „Eco-Profile“ for Paving Grade Bitumen
Eurobitume Report 99/007
Brussels 1999

EYERER, P. / REINHARDT, H.-W.

Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden: Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung
Basel 2000

FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-90)
Köln 1990

FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO 01)
Köln 2001(a)

FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra 01)
Köln 2001 (b)

FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Richtlinien für die Anlange von Autobahnen – Ausgabe 2008 (RAA)
Köln 2008 (a)

- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 07)
Köln 2008 (b)
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07)
Köln 2008 (c)
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (ZTV Beton-StB 07)
Köln 2008 (d)
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baugemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (TL Beton-StB 07)
Köln 2008 (e)
- FRITSCH, U. ET AL.
Gesamt-Emissionsmodell Integrierter Systeme, Version 2.1, Erweiterter Endbericht
Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten
Wiesbaden 1995
- HÄKKINEN, T / MÄKELÄ, K.
Environmental adaption of concrete - Environmental impact of concrete and asphalt pavements
Espoo 1996
- HOLLDORB, C. / MEISENZAHN, M.
Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbahnen
Durth Roos Consulting GmbH im Auftrag des Deutschen Asphaltverbandes e.V.
Karlsruhe 2003
- JENSEIT, W.
Einsatz des Kummulierten Energieaufwandes (KEA) im Baubereich
Beitrag zur KEA-Tagung am 01.10.1999 in Weimar
Weimar 1999

LÜNSER, H.

Ökobilanzen im Brückenbau: Eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung
Basel 1999

POHLE, G. / BEYERT, J.

Aufstellung einer Energiebilanz für verschiedene Oberbauarten im Straßenbau
in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 485
Bonn 1983

RESS, C.

CO₂ Emission bei der Asphaltherstellung
Bachelorarbeit im Studiengang Projektmanagement der Hochschule Biberach
Biberach 2009

SCHIESSL, P.

Bedeutung der Nachhaltigkeit im Straßenbau
in: Betonstraßentagung 2001
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Köln 2001

SCHMUCK, A. / BREITER, B.

Energiewirtschaftliche Untersuchungen für Aufgabenstellungen im Pavement
Management
in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 485
Bonn 1986

STRIPPLE, H..

Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis
Gothenburg 2001

SCHUCHARDT, R.

Primärenergetische Analyse der Infrastruktur von Wohnsiedlungen
Dissertation
Münster 2006

VDI - Verein Deutscher Ingenieure

Emissionsminderung: Aufbereitungsanlagen für Asphaltmischgut (Asphalt-
Mischanlagen)
VDI-Richtlinie 2283
Düsseldorf 2008

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2006

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Monitoring-Bericht 2004-2007

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e.V.

Tätigkeitsbericht 2005-2007

WEIL, M. / JESKE, U. / SCHEBEK, L.

Einsatz von natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung:
Eine ökobilanzielle Betrachtung

in: Baustoff Recycling und Deponietechnik 19(2003) Nr.1, S.30-41
2003

Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Abbildung 1: Bestandteile einer Ökobilanz [DIN 2006]	8
Abbildung 2: Prozesskette Asphalteinbau	12
Abbildung 3: Prozesskette Betoneinbau	13
Abbildung 4: Prozesskette Einbau hydraulisch gebundener Tragschicht	13
Abbildung 5: Prozesskette Einbau Frostschutzschicht	14
Abbildung 6: Beispiel für direkte/indirekte Verbräuche, nach POHLE/BEYERT [1983]	14
Abbildung 7: Verbrauch an Primärenergie je Quadratmeter Fahrbahnoberfläche für die betrachteten Varianten	32
Abbildung 8: Emission von Treibhausgasen je Quadratmeter Fahrbahnoberfläche für die betrachteten Varianten	32
Abbildung 9: Verbrauch an Primärenergie je Quadratmeter Fahrbahnoberfläche für die betrachteten Varianten nach ihrer Entstehung differenziert	33
Abbildung 10: Emission von Treibhausgasen je Quadratmeter Fahrbahnoberfläche für die betrachteten Varianten nach ihrer Entstehung differenziert	33

Verzeichnis der Tabellen

	Seite
Tabelle 1: Bindemittel- und Zuschlagsanteile der verschiedenen Schichten bei Asphalt- und Betonbauweise	19
Tabelle 2: Zusammenstellung der Massen für Asphalt- und Betonbauweise	20
Tabelle 3: Ermittlung der Emissionen infolge Energieverbrauch, nach FRITSCHKE ET AL. [1995] und LÜNSER [1999]	28
Tabelle 4: Zusammenstellung der angesetzten Emissionsbelastungen für den Einbau des Oberbaus	29
Tabelle 5: Zusammenstellung der angesetzten Emissionsbelastungen für den Materialausbau	30

Verzeichnis der Anlagen

- Anlage 1: Sachbilanzierung Variante 1 ohne Recyclingbaustoffe
- Anlage 2: Sachbilanzierung Variante 2 mit Recyclingbaustoffen
- Anlage 3: Sachbilanzierung Variante 3 mit Recyclingbaustoffen und Hochofenzement (CEM III)

Anlagen

Sachbilanzierung Variante 1: ohne Recyclingbaustoffe

Eingabedaten

Die Breite der zweibahnigen Straße beträgt gemäß RAA- 2008: 2x12,0m = 24,0m
(Weiterführung von Tragschicht bzw. Frostschuttschicht sowie Abböschungen dieser beiden Schichten bleiben unberücksichtigt.)
Die im Untersuchungsraum gewählte Streckenlänge beträgt 1000m.
Der Bau und die Erhaltung erfolgt ohne Einsatz von Recyclingbaustoffen.

Asphaltoberbau									
	Dicke [m]	Breite [m]	Länge [m]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [t]	Bitumen [t]	gebr. Zuschlag [t]	nat. Zuschlag [t]
Deckschicht (z.B. Splittmastixasphalt 0/11 S)	0,04	24	1.000	960	2.400	2.304,0	149,8	2.154,2	0,0
Binderschicht	0,08	24	1.000	1.920	2.400	4.608,0	207,4	4.400,6	0,0
Asphalttragschicht	0,22	24	1.000	5.280	2.400	12.672,0	456,2	7.324,4	4.891,4
Frostschuttschicht	0,51	24	1.000	12.240	2.400	29.376,0	0,0	14.688,0	14.688,0
Frostsicherer Oberbau (gesamt)	0,85						813,3	28.567,3	19.579,4

Betonoberbau									
	Dicke [m]	Breite [m]	Länge [m]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [t]	Zement [t]	gebr. Zuschlag [t]	nat. Zuschlag [t]
Betondecke C 30/37	0,27	24	1.000	6.480	2.400	15.552,0	2.177,3	4.665,6	8.709,1
Vliesstoff	ja	24	1.000						
Hydr. geb. Tragschicht	0,15	24	1.000	3.600	2.400	8.640,0	259,2	0,0	8.380,8
Frostschuttschicht	0,43	24	1.000	10.320	2.400	24.768,0	0,0	12.384,0	12.384,0
Frostsicherer Oberbau (gesamt)	0,85						2.436,5	17.049,6	29.473,9

**Sachbilanzierung Variante 1:
ohne Recyclingbaustoffe**

Asphaltoberbau								
	Masse [t]	Entfernung [km]	Emissionen [g/t] bzw. [g/tkm]			Primärenergie [MJ/t] bzw. [MJ/tkm]	Treibhauseffekt [t]	Primärenergie [GJ]
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O			
Neubau								
Bitumenherstellung incl. Vorkette	813		277.000,0	k.A.	k.A.	4.710,0	225,3	3.830,7
Bitumentransport	813	200	114,5	k.A.	k.A.	1,4	18,6	227,7
Gewinnung Kies/Sand	19.579		2.028,0			31,3	39,7	612,8
Transport Kies/Sand	19.579	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	44,8	548,2
Gewinnung gebr. Zuschlag	28.567		6.176,0	2,6	0,8	66,0	183,4	1.885,4
Transport gebr. Zuschlag	28.567	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	65,4	799,9
<i>(Gewinnung Recyclingmaterial)</i>								
<i>(Transport Recyclingmaterial)</i>								
Asphaltherstellung	19.584		19.900,0	k.A.	k.A.	207,0	389,7	4.053,9
Transport Asphalt	19.584	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	112,1	1.370,9
Einbau und Verdichten								
<i>Deckschicht</i>	2.304		837,5	0,2	0,0	10,2	1,9	23,5
<i>Binderschicht</i>	4.608		722,6	0,2	0,0	8,8	3,4	40,6
<i>Tragschicht</i>	12.672		640,5	0,2	0,0	7,8	8,2	98,8
<i>Frostschutzschicht</i>	29.376		492,7	0,1	0,0	6,0	14,6	176,3
						GESAMT (Neubau)	1.107,3	13.668,7
Erhaltung über 50 Jahre								
Austausch Deckschicht (2x)								
Deckschicht fräsen je m ² x cm			507,3	0,1	0,0	6,2	98,2	1.190,4
Bitumenherstellung incl. Vorkette	300		277.000,0	k.A.	k.A.	4.710,0	83,0	1.410,7
Bitumentransport	300	200	114,5	k.A.	k.A.	1,4	6,9	83,9
Gewinnung gebr. Zuschlag	4.308		6.176,0	2,6	0,8	66,0	27,7	284,4
Transport gebr. Zuschlag	4.308	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	9,9	120,6
<i>(Gewinnung Recyclingmaterial)</i>								
<i>(Transport Recyclingmaterial)</i>								
Asphaltherstellung	4.608		19.900,0	k.A.	k.A.	207,0	91,7	953,9
Transport Asphalt	4.608	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	26,4	322,6
<i>Einbau und Verdichten</i>								
<i>Deckschicht</i>	4.608		837,5	0,2	0,0	10,2	3,9	47,0
Austausch Deck- u. Binderschicht								
Deck-u. Binderschicht fräsen je m ² x cm			507,3	0,1	0,0	6,2	147,3	1.785,6
Bitumenherstellung incl. Vorkette	357		277.000,0	k.A.	k.A.	4.710,0	98,9	1.682,0
Bitumentransport	357	200	114,5	k.A.	k.A.	1,4	8,2	100,0
Gewinnung gebr. Zuschlag	6.555		6.176,0	2,6	0,8	66,0	42,1	432,6
Transport gebr. Zuschlag	6.555	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	15,0	183,5
<i>(Gewinnung Recyclingmaterial)</i>								
<i>(Transport Recyclingmaterial)</i>								
Asphaltherstellung	6.912		19.900,0	k.A.	k.A.	207,0	137,5	1.430,8
Transport Asphalt	6.912	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	39,6	483,8
<i>Einbau und Verdichten</i>								
<i>Deckschicht</i>	2.304		837,5	0,2	0,0	10,2	1,9	23,5
<i>Binderschicht</i>	4.608		722,6	0,2	0,0	8,8	3,4	40,6
						GESAMT	1.948,8	24.244,6

**Sachbilanzierung Variante 1:
ohne Recyclingbaustoffe**

Betonoberbau								
	Masse [t]	Entfernung [km]	Emissionen [g/t] bzw. [g/tkm]			Primärenergie [MJ/t] bzw. [MJ/tkm]	Treibhauseffekt [t]	Primärenergie [GJ]
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O			
Neubau								
Vorkette Zement (CEM I)	2.436			k.A.	k.A.	2.674,0	1.396,1	6.515,1
Zementherstellung (CEM I)	2.436		573.000,0	k.A.	k.A.	1.024,0		2.495,0
Zementtransport	2.436	100	114,5	k.A.	k.A.	1,4	27,9	341,1
Gewinnung Kies/Sand	29.474			2.028,0		31,3	59,8	922,5
Transport Kies/Sand	29.474	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	67,5	825,3
Gewinnung gebr. Zuschlag	17.050		6.176,0	2,6	0,8	66,0	109,5	1.125,3
Transport gebr. Zuschlag	17.050	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	39,0	477,4
<i>(Gewinnung Recyclingmaterial)</i>	---							
<i>(Transport Recyclingmaterial)</i>	---							
Betonherstellung	24.192		1.255,0	0,8	0,3	11,0	32,5	266,1
Transport Beton	24.192	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	138,5	1.693,4
Stahlherstellung (Ann. Elektrostahl)	43			958.199,0		10.793,0	41,3	465,4
<i>Einbau und Verdichten</i>								
Betondecke	15.552		1.232,0	0,3	0,0	15,0	19,3	233,3
hydr. Tragschicht	8.640		369,5	0,1	0,0	4,5	3,2	38,9
Frostschuttschicht	24.768		492,7	0,1	0,0	6,0	12,3	148,6
						GESAMT (Neubau)	1.947,0	15.547,4
Erhaltung über 50 Jahre								
Austausch Betondecke								
Aufbruch gebundener Schichten je m ³			1.204,3	0,3	0,0	14,7	7,9	95,3
Vorkette Zement (CEM I)	2.177			k.A.	k.A.	2.674,0	1.247,6	5.822,0
Zementherstellung (CEM I)	2.177		573.000,0	k.A.	k.A.	1.024,0		2.229,5
Zementtransport	2.177	100	114,5	k.A.	k.A.	1,4	24,9	304,8
Gewinnung Kies/Sand	8.709			2.028,0		31,3	17,7	272,6
Transport Kies/Sand	8.709	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	19,9	243,9
Gewinnung gebr. Zuschlag	4.666		6.176,0	2,6	0,8	66,0	30,0	307,9
Transport gebr. Zuschlag	4.666	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	10,7	130,6
<i>(Gewinnung Recyclingmaterial)</i>	---							
<i>(Transport Recyclingmaterial)</i>	---							
Betonherstellung	15.552		1.255,0	0,8	0,3	11,0	20,9	171,1
Transport Beton	15.552	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	89,0	1.088,6
Stahlherstellung (Ann. Elektrostahl)	43			958.199,0		10.793,0	41,3	465,4
<i>Einbau und Verdichten</i>								
Betondecke	15.552		1.232,0	0,3	0,0	15,0	19,3	233,3
						GESAMT	3.476,3	26.912,5

Sachbilanzierung Variante 2: mit Recyclingbaustoffe

Eingabedaten

Die Breite der zweibahnigen Straße beträgt gemäß RAA-2008: $2 \times 12,0\text{m} = 24,0\text{m}$
 (Weiterführung von Tragschicht bzw. Frostschuttschicht sowie Abböschungen dieser beiden Schichten bleiben unberücksichtigt.)
 Die im Untersuchungsraum gewählte Streckenlänge beträgt 1000m.
 Recyclingmaterial: Deckschicht: 0%; Binderschicht: 25%; Tragschicht: 50%; Frostschuttschicht: 100%
 Betondecke: obere Lage: 0%; untere Lage: 75%; hydr. geb. Tragschicht: 75%; Frostschuttschicht: 100%
 Weiterhin wird CEM I (Portlandzement) verwendet sowie die Betondecke 2-lagig ausgebildet (oben 10cm, unten 17cm)!!!

Asphaltoberbau										
	Dicke [m]	Breite [m]	Länge [m]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [t]	Bitumen [t]	gebr. Zuschlag [t]	nat. Zuschlag [t]	Recycling-zuschlag [t]
Deckschicht (z.B. Splittmastixasphalt 0/11 S)	0,04	24	1.000	960	2.400	2.304,0	149,8	2.154,2	0,0	0,0
Binderschicht	0,08	24	1.000	1.920	2.400	4.608,0	155,5	3.300,5	0,0	1.152,0
Asphalttragschicht	0,22	24	1.000	5.280	2.400	12.672,0	228,1	3.662,2	2.445,7	6.336,0
Frostschuttschicht	0,51	24	1.000	12.240	2.400	29.376,0	0,0	0,0	0,0	29.376,0
Frostsicherer Oberbau (gesamt)	0,85						533,4	9.116,9	2.445,7	36.864,0

Betonoberbau										
	Dicke [m]	Breite [m]	Länge [m]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [t]	Zement [t]	gebr. Zuschlag [t]	nat. Zuschlag [t]	Recycling-zuschlag [t]
Betondecke C 30/37	0,27	24	1.000	6.480	2.400	15.552,0	2.177,3	2.462,4	4.596,5	6.315,8
Vliesstoff	ja	24	1.000							
Hydr. geb. Tragschicht	0,15	24	1.000	3.600	2.400	8.640,0	259,2	0,0	2.095,2	6.285,6
Frostschuttschicht	0,43	24	1.000	10.320	2.400	24.768,0	0,0	0,0	0,0	24.768,0
Frostsicherer Oberbau (gesamt)	0,85						2.436,5	2.462,4	6.691,7	37.369,4

Sachbilanzierung Variante 2: mit Recyclingbaustoffe

Asphaltoberbau								
	Masse [t]	Entfernung [km]	Emissionen [g/t] bzw. [g/tkm]			Primärenergie [MJ/t] bzw. [MJ/tkm]	Treibhauseffekt [t]	Primärenergie [GJ]
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O			
Neubau								
Bitumenherstellung incl. Vorkette	533		277.000,0	k.A.	k.A.	4.710,0	147,7	2.512,2
Bitumentransport	533	200	114,5	k.A.	k.A.	1,4	12,2	149,3
Gewinnung Kies/Sand	2.446		2.028,0			31,3	5,0	76,6
Transport Kies/Sand	2.446	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	5,6	68,5
Gewinnung gebr. Zuschlag	9.117		6.176,0	2,6	0,8	66,0	58,5	601,7
Transport gebr. Zuschlag	9.117	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	20,9	255,3
Gewinnung Recyclingmaterial	36.864		3.647,0	3,5	0,2	51,1	137,9	1.883,8
Transport Recyclingmaterial	36.864	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	211,0	2.580,5
Asphaltherstellung	19.584		19.900,0	k.A.	k.A.	207,0	389,7	4.053,9
Transport Asphalt	19.584	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	112,1	1.370,9
Einbau und Verdichten								
Deckschicht	2.304		837,5	0,2	0,0	10,2	1,9	23,5
Binderschicht	4.608		722,6	0,2	0,0	8,8	3,4	40,6
Tragschicht	12.672		640,5	0,2	0,0	7,8	8,2	98,8
Frostschuttschicht	29.376		492,7	0,1	0,0	6,0	14,6	176,3
						GESAMT (Neubau)	1.128,8	13.891,7
Erhaltung über 50 Jahre								
Austausch Deckschicht (2x)								
Deckschicht fräsen je m ² x cm			507,3	0,1	0,0	6,2	98,2	1.190,4
Bitumenherstellung incl. Vorkette	300		277.000,0	k.A.	k.A.	4.710,0	83,0	1.410,7
Bitumentransport	300	200	114,5	k.A.	k.A.	1,4	6,9	83,9
Gewinnung gebr. Zuschlag	4.308		6.176,0	2,6	0,8	66,0	27,7	284,4
Transport gebr. Zuschlag	4.308	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	9,9	120,6
Gewinnung Recyclingmaterial	0		3.647,0	3,5	0,2	51,1	0,0	0,0
Transport Recyclingmaterial	0	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	0,0	0,0
Asphaltherstellung	4.608		19.900,0	k.A.	k.A.	207,0	91,7	953,9
Transport Asphalt	4.608	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	26,4	322,6
Einbau und Verdichten								
Deckschicht	4.608		837,5	0,2	0,0	10,2	3,9	47,0
Austausch Deck- u. Binderschicht								
Deck-u. Binderschicht fräsen je m ² x cm			507,3	0,1	0,0	6,2	147,3	1.785,6
Bitumenherstellung incl. Vorkette	305		277.000,0	k.A.	k.A.	4.710,0	84,6	1.437,9
Bitumentransport	305	200	114,5	k.A.	k.A.	1,4	7,0	85,5
Gewinnung gebr. Zuschlag	5.455		6.176,0	2,6	0,8	66,0	35,0	360,0
Transport gebr. Zuschlag	5.455	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	12,5	152,7
Gewinnung Recyclingmaterial	1.152		3.647,0	3,5	0,2	51,1	4,3	58,9
Transport Recyclingmaterial	1.152	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	6,6	80,6
Asphaltherstellung	6.912		19.900,0	k.A.	k.A.	207,0	137,5	1.430,8
Transport Asphalt	6.912	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	39,6	483,8
Einbau und Verdichten								
Deckschicht	2.304		837,5	0,2	0,0	10,2	1,9	23,5
Binderschicht	4.608		722,6	0,2	0,0	8,8	3,4	40,6
						GESAMT	1.956,1	24.245,0

Sachbilanzierung Variante 2: mit Recyclingbaustoffe

Betonoberbau								
	Masse [t]	Entfernung [km]	Emissionen [g/t] bzw. [g/tkm]			Primärenergie [MJ/t] bzw. [MJ/tkm]	Treibhauseffekt [t]	Primärenergie [GJ]
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O			
Neubau								
Vorkette Zement (CEM I)	2.436			k.A.	k.A.	2.674,0	1.396,1	6.515,1
Zementherstellung (CEM I)	2.436		573.000,0	k.A.	k.A.	1.024,0		2.495,0
Zementtransport	2.436	100	114,5	k.A.	k.A.	1,4	27,9	341,1
Gewinnung Kies/Sand	6.692			2.028,0		31,3	13,6	209,4
Transport Kies/Sand	6.692	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	15,3	187,4
Gewinnung gebr. Zuschlag	2.462		6.176,0	2,6	0,8	66,0	15,8	162,5
Transport gebr. Zuschlag	2.462	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	5,6	68,9
Gewinnung Recyclingmaterial	37.369		3.647,0	3,5	0,2	51,1	139,7	1.909,6
Transport Recyclingmaterial	37.369	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	213,9	2.615,9
Betonherstellung	24.192		1.255,0	0,8	0,3	11,0	32,5	266,1
Transport Beton	24.192	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	138,5	1.693,4
Stahlherstellung (Ann. Elektrostahl)	43		958.199,0			10.793,0	41,3	465,4
Einbau und Verdichten								
Betondecke	15.552		1.232,0	0,3	0,0	15,0	19,3	233,3
hydr. Tragschicht	8.640		369,5	0,1	0,0	4,5	3,2	38,9
Frostschuttschicht	24.768		492,7	0,1	0,0	6,0	12,3	148,6
						GESAMT (Neubau)	2.075,3	17.350,6
Erhaltung über 50 Jahre								
Austausch Betondecke								
Aufbruch gebundener Schichten je m ³			1.204,3	0,3	0,0	14,7	7,9	95,3
Vorkette Zement (CEM III)	2.177			k.A.	k.A.	2.674,0	1.247,6	5.822,0
Zementherstellung (CEM III)	2.177		573.000,0	k.A.	k.A.	1.024,0		2.229,5
Zementtransport	2.177	100	114,5	k.A.	k.A.	1,4	24,9	304,8
Gewinnung Kies/Sand	4.596			2.028,0		31,3	9,3	143,9
Transport Kies/Sand	4.596	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	10,5	128,7
Gewinnung gebr. Zuschlag	2.462		6.176,0	2,6	0,8	66,0	15,8	162,5
Transport gebr. Zuschlag	2.462	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	5,6	68,9
Gewinnung Recyclingmaterial	6.316		3.647,0	3,5	0,2	51,1	23,6	322,7
Transport Recyclingmaterial	6.316	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	36,2	442,1
Betonherstellung	15.552		1.255,0	0,8	0,3	11,0	20,9	171,1
Transport Beton	15.552	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	89,0	1.088,6
Stahlherstellung (Ann. Elektrostahl)	43		958.199,0			10.793,0	41,3	465,4
Einbau und Verdichten								
Betondecke	15.552		1.232,0	0,3	0,0	15,0	19,3	233,3
						GESAMT	3.627,3	29.029,6

Sachbilanzierung Variante 3: mit Recyclingbaustoffe und Hochofenzement (CEM III)

Eingabedaten

Die Breite der zweibahnigen Straße beträgt gemäß RAA-2008: $2 \times 12,0\text{m} = 24,0\text{m}$
 (Weiterführung von Tragschicht bzw. Frostschuttschicht sowie Abböschungen dieser beiden Schichten bleiben unberücksichtigt.)
 Die im Untersuchungsraum gewählte Streckenlänge beträgt 1000m.
 Recyclingmaterial: Deckschicht: 0%; Binderschicht: 25%; Tragschicht: 50%; Frostschuttschicht: 100%
 Betondecke: obere Lage: 0%; untere Lage: 75%; hydr. geb. Tragschicht: 75%; Frostschuttschicht: 100%
 Weiterhin wird CEM III A (Hochofenzement) statt CEM I (Portlandzement) verwendet sowie die Betondecke 2-lagig ausgebildet (oben 10cm, unten

Asphaltoberbau										
	Dicke [m]	Breite [m]	Länge [m]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [t]	Bitumen [t]	gebr. Zuschlag [t]	nat. Zuschlag [t]	Recycling-zuschlag [t]
Deckschicht (z.B. Splittmastixasphalt 0/11 S)	0,04	24	1.000	960	2.400	2.304,0	149,8	2.154,2	0,0	0,0
Binderschicht	0,08	24	1.000	1.920	2.400	4.608,0	155,5	3.300,5	0,0	1.152,0
Asphalttragschicht	0,22	24	1.000	5.280	2.400	12.672,0	228,1	3.662,2	2.445,7	6.336,0
Frostschuttschicht	0,51	24	1.000	12.240	2.400	29.376,0	0,0	0,0	0,0	29.376,0
Frostsicherer Oberbau (gesamt)	0,85						533,4	9.116,9	2.445,7	36.864,0

Betonoberbau										
	Dicke [m]	Breite [m]	Länge [m]	Volumen [m ³]	Dichte [kg/m ³]	Masse [t]	Zement [t]	gebr. Zuschlag [t]	nat. Zuschlag [t]	Recycling-zuschlag [t]
Betondecke C 30/37	0,27	24	1.000	6.480	2.400	15.552,0	2.177,3	2.462,4	4.596,5	6.315,8
Vliesstoff	ja	24	1.000							
Hydr. geb. Tragschicht	0,15	24	1.000	3.600	2.400	8.640,0	259,2	0,0	2.095,2	6.285,6
Frostschuttschicht	0,43	24	1.000	10.320	2.400	24.768,0	0,0	0,0	0,0	24.768,0
Frostsicherer Oberbau (gesamt)	0,85						2.436,5	2.462,4	6.691,7	37.369,4

**Sachbilanzierung Variante 3:
mit Recyclingbaustoffe und Hochofenzement (CEM III)**

Asphaltoberbau								
	Masse [t]	Entfernung [km]	Emissionen [g/t] bzw. [g/tkm]			Primärenergie [MJ/t] bzw. [MJ/tkm]	Treibhauseffekt [t]	Primärenergie [GJ]
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O			
Neubau								
Bitumenherstellung incl. Vorkette	533		277.000,0	k.A.	k.A.	4.710,0	147,7	2.512,2
Bitumentransport	533	200	114,5	k.A.	k.A.	1,4	12,2	149,3
Gewinnung Kies/Sand	2.446			2.028,0		31,3	5,0	76,6
Transport Kies/Sand	2.446	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	5,6	68,5
Gewinnung gebr. Zuschlag	9.117		6.176,0	2,6	0,8	66,0	58,5	601,7
Transport gebr. Zuschlag	9.117	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	20,9	255,3
Gewinnung Recyclingmaterial	36.864		3.647,0	3,5	0,2	51,1	137,9	1.883,8
Transport Recyclingmaterial	36.864	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	211,0	2.580,5
Asphaltherstellung	19.584		19.900,0	k.A.	k.A.	207,0	389,7	4.053,9
Transport Asphalt	19.584	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	112,1	1.370,9
Einbau und Verdichten								
Deckschicht	2.304		837,5	0,2	0,0	10,2	1,9	23,5
Binderschicht	4.608		722,6	0,2	0,0	8,8	3,4	40,6
Tragschicht	12.672		640,5	0,2	0,0	7,8	8,2	98,8
Frostschuttschicht	29.376		492,7	0,1	0,0	6,0	14,6	176,3
						GESAMT (Neubau)	1.128,8	13.891,7
Erhaltung über 50 Jahre								
Austausch Deckschicht (2x)								
Deckschicht fräsen je m ² x cm			507,3	0,1	0,0	6,2	98,2	1.190,4
Bitumenherstellung incl. Vorkette	300		277.000,0	k.A.	k.A.	4.710,0	83,0	1.410,7
Bitumentransport	300	200	114,5	k.A.	k.A.	1,4	6,9	83,9
Gewinnung gebr. Zuschlag	4.308		6.176,0	2,6	0,8	66,0	27,7	284,4
Transport gebr. Zuschlag	4.308	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	9,9	120,6
Gewinnung Recyclingmaterial	0		3.647,0	3,5	0,2	51,1	0,0	0,0
Transport Recyclingmaterial	0	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	0,0	0,0
Asphaltherstellung	4.608		19.900,0	k.A.	k.A.	207,0	91,7	953,9
Transport Asphalt	4.608	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	26,4	322,6
Einbau und Verdichten								
Deckschicht	4.608		837,5	0,2	0,0	10,2	3,9	47,0
Austausch Deck- u. Binderschicht								
Deck-u. Binderschicht fräsen je m ² x cm			507,3	0,1	0,0	6,2	147,3	1.785,6
Bitumenherstellung incl. Vorkette	305		277.000,0	k.A.	k.A.	4.710,0	84,6	1.437,9
Bitumentransport	305	200	114,5	k.A.	k.A.	1,4	7,0	85,5
Gewinnung gebr. Zuschlag	5.455		6.176,0	2,6	0,8	66,0	35,0	360,0
Transport gebr. Zuschlag	5.455	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	12,5	152,7
Gewinnung Recyclingmaterial	1.152		3.647,0	3,5	0,2	51,1	4,3	58,9
Transport Recyclingmaterial	1.152	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	6,6	80,6
Asphaltherstellung	6.912		19.900,0	k.A.	k.A.	207,0	137,5	1.430,8
Transport Asphalt	6.912	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	39,6	483,8
Einbau und Verdichten								
Deckschicht	2.304		837,5	0,2	0,0	10,2	1,9	23,5
Binderschicht	4.608		722,6	0,2	0,0	8,8	3,4	40,6
						GESAMT	1.956,1	24.245,0

**Sachbilanzierung Variante 3:
mit Recyclingbaustoffe und Hochofenzement (CEM III)**

Betnoberbau								
	Masse [t]	Entfernung [km]	Emissionen [g/t] bzw. [g/tkm]			Primärenergie [MJ/t] bzw. [MJ/tkm]	Treibhauseffekt [t]	Primärenergie [GJ]
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O			
Neubau								
Vorkette Zement (CEM III)	2.436			k.A.	k.A.	1.337,0	777,6	3.257,6
Zementherstellung (CEM III)	2.436		319.161,0	k.A.	k.A.	1.024,0		2.495,0
Zementtransport	2.436	100	114,5	k.A.	k.A.	1,4	27,9	341,1
Gewinnung Kies/Sand	6.692			2.028,0		31,3	13,6	209,4
Transport Kies/Sand	6.692	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	15,3	187,4
Gewinnung gebr. Zuschlag	2.462		6.176,0	2,6	0,8	66,0	15,8	162,5
Transport gebr. Zuschlag	2.462	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	5,6	68,9
Gewinnung Recyclingmaterial	37.369		3.647,0	3,5	0,2	51,1	139,7	1.909,6
Transport Recyclingmaterial	37.369	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	213,9	2.615,9
Betonherstellung	24.192		1.255,0	0,8	0,3	11,0	32,5	266,1
Transport Beton	24.192	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	138,5	1.693,4
Stahlherstellung (Ann. Elektrostahl)	43		958.199,0			10.793,0	41,3	465,4
Einbau und Verdichten								
Betondecke	15.552		1.232,0	0,3	0,0	15,0	19,3	233,3
hydr. Tragschicht	8.640		369,5	0,1	0,0	4,5	3,2	38,9
Frostschuttschicht	24.768		492,7	0,1	0,0	6,0	12,3	148,6
						GESAMT (Neubau)	1.456,8	14.093,1
Erhaltung über 50 Jahre								
Austausch Betondecke								
Aufbruch gebundener Schichten je m ³			1.204,3	0,3	0,0	14,7	7,9	95,3
Vorkette Zement (CEM III)	2.177			k.A.	k.A.	1.337,0	694,9	2.911,0
Zementherstellung (CEM III)	2.177		319.161,0	k.A.	k.A.	1.024,0		2.229,5
Zementtransport	2.177	100	114,5	k.A.	k.A.	1,4	24,9	304,8
Gewinnung Kies/Sand	4.596			2.028,0		31,3	9,3	143,9
Transport Kies/Sand	4.596	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	10,5	128,7
Gewinnung gebr. Zuschlag	2.462		6.176,0	2,6	0,8	66,0	15,8	162,5
Transport gebr. Zuschlag	2.462	20	114,5	k.A.	k.A.	1,4	5,6	68,9
Gewinnung Recyclingmaterial	6.316		3.647,0	3,5	0,2	51,1	23,6	322,7
Transport Recyclingmaterial	6.316	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	36,2	442,1
Betonherstellung	15.552		1.255,0	0,8	0,3	11,0	20,9	171,1
Transport Beton	15.552	50	114,5	k.A.	k.A.	1,4	89,0	1.088,6
Stahlherstellung (Ann. Elektrostahl)	43		958.199,0			10.793,0	41,3	465,4
Einbau und Verdichten								
Betondecke	15.552		1.232,0	0,3	0,0	15,0	19,3	233,3
						GESAMT	2.456,2	22.861,0