



## Vergleichende Ökobilanz

Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen  
mit unterschiedlichen Deckschichten

## Inhalt

1 Ziel der Studie .....	3
2 Herstellung .....	4
3 Nutzung .....	6
4 End-of-Life .....	7
5 Ergebnisse .....	8
6 Interpretation der Ergebnisse .....	10
7 Literatur .....	11

## Impressum

### Autoren

Melanie Goymann,  
Siegrun Kittelberger,  
Johannes Kreißig,  
PE INTERNATIONAL GmbH,  
Leinfelden-Echterdingen

### Herausgeber

Betonverband Straße, Landschaft,  
Garten e.V. (SLG)  
Schlossallee 10  
53179 Bonn

In Zusammenarbeit mit der  
BetonMarketing Deutschland GmbH  
Steinhof 39  
40699 Erkrath

© Gestaltung und Gesamtproduktion  
Verlag Bau+Technik GmbH  
Düsseldorf 2009

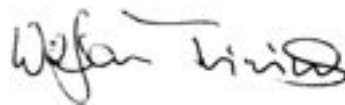
## Vorbemerkung

Die vorliegende Broschüre stellt eine Zusammenfassung der Studie „Vergleichende Ökobilanz – Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten“ (Dezember 2008) dar, welche nach den internationalen Standards für Ökobilanzen DIN ISO 14040 und DIN ISO 14044 durchgeführt wurde. Die Studie wurde von dem renommierten und anerkannten Unternehmen PE INTERNATIONAL GmbH im Auftrag der BetonMarketing Deutschland GmbH und des Herausgebers erstellt. Sie wurde einem Critical Review nach ISO 14040 durch eine unabhängige Expertengruppe (Review-Panel) unterzogen.

## Zusammenfassung des Critical Review Statement

Die vorliegende Studie sowie der Bericht erfüllen die Anforderungen der ISO 14040. Die verglichenen Oberbaukonstruktionen entstammen der einschlägigen Referenzliteratur (RSTO 2001 – Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen). Die Datengrundlage entstammt der GaBi4 Datenbank, zur Charakterisierung und zur Abschätzung der Umweltwirkungen wird auf die Indikatoren der prEN 15804 verwiesen, wobei eine begründete Auswahl aus den in der Norm aufgeführten Indikatoren getroffen wird. Die Kernanforderungen an die angewendete Methodik und die angewendeten Daten sind erfüllt. Der Bericht erfüllt die Anforderungen an Nachvollziehbarkeit und Transparenz.

**Die Studie ist konform zu internationalen Normen durchgeführt und kann als wissenschaftlich und technisch korrekt angesehen werden.**



Dr. Wolfram Trinius  
Ingenieurbüro Trinius  
Dorotheenstr. 21  
22301 Hamburg  
trinius@trinius.de  
Hamburg, den 22.01.2009

Ziel der Studie ist der Vergleich der Umweltwirkungen von 4 typischen Oberbaukonstruktionen für Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten, für welche die Bauklasse V gemäß den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“ (RStO) zugrunde gelegt wird. In der Studie wird als Beispiel für eine typische Verkehrsfläche in der Bauklasse V eine Erschließungsstraße hinsichtlich der Umweltwirkungen untersucht. Weitere Verkehrsflächen, die häufig der Bauklasse V zugeordnet werden, sind z. B. Anliegerstraßen, befahrbare Wohnwege sowie Parkflächen mit geringem Schwerverkehrsanteil.

Untersucht werden hierbei die Bauweise mit Asphaltdecke, mit Betonpflasterdecke, mit Natursteinpflasterdecke und mit Klinkerpflasterdecke über den gesamten Lebenszyklus auf Vergleichsbasis von 100 m<sup>2</sup> (Abbildung 1-1).

Alle Bauweisen können innerhalb der Bauklasse V für gleiche Einsatzbereiche eingesetzt werden. Versickerungsfähige (wasserdurchlässige) Bauweisen werden im Rahmen der Studie nicht betrachtet.

Die Dicke des frostsicheren Oberbaues beträgt für die untersuchten Bauweisen jeweils 55 cm. Für die Studie ausgewählt sind reine Standardbauweisen.

Innerhalb der Studie wird der Lebenszyklus der 4 Oberbaukonstruktionen untersucht (cradle to grave), der die Herstellungs-, Nutzungs- und Recycling-/ Entsorgungsphase umfasst. Die Ökobilanz wurde für den Bezugsraum Deutschland erstellt. Dies hat zur Folge, dass neben den Produktionsprozessen unter diesen Randbedingungen auch die für Deutschland relevanten Vorstufen, wie Strom- oder Energieträgerbereitstellung, verwendet wurden.

Daten zum Lebenszyklus der Asphaltbauweise entstammen vorwiegend der Fachliteratur.

Bei fehlenden Daten wurde folgendermaßen vorgegangen: wenn keine Primärdaten zur Verfügung standen wurden, soweit verfügbar, Daten aus der Literatur verwendet. Wenn auch keine Daten aus der Literatur verfügbar waren, wurden Daten aufgrund einer dokumentierten Schätzung eingesetzt.

Die Bilanzierung der üblicherweise verwendeten Pflastersteine aus Beton erfolgt ausgehend von der Herstellung im Pflasterwerk und den dort eingesetzten Stoff- und Energieverbräuchen. Der Rezeptur kommt

bei Betonprodukten eine Schlüsselrolle zu. Die werksseitige Datenerhebung wurde in vier Regionen durchgeführt, sie zeigt regionale Unterschiede der Werke. Mit Hilfe der erhobenen Daten konnte die Umweltperformance, u. a. der Primärenergiebedarf sowie das Treibhauspotenzial, der werkspezifischen Herstellung der Pflastersteine aus Beton ermittelt werden.

Daten zum Natursteinabbau sowie der Herstellung von Pflastersteinen aus Naturstein wurden seitens des Deutscher Naturwerkstein Verband e.V. (DNV) zur Verfügung gestellt. Die Herkunft von Pflastersteinen aus Naturstein variiert stark. Regionale Vorkommen sind ebenso möglich wie Importe aus Übersee. Der Betrachtung innerhalb dieser Studie wird deshalb ein Herkunftsmix zugrunde gelegt (DNV). Bei den Herkunftsszenarien wurden ländertypische Transportmittel und Energieträger gewählt.

Die Herstellung der Pflasterklinker basiert auf Daten aus der Ökobilanz-Datenbank GaBi 4 [GaBi 2007]. Diese Daten stützen sich auf Werksdaten aus der Ziegelindustrie aus dem Jahr 2006 (D-A-CH). Das Brennen stellt innerhalb der Prozesskette der Klinkerherstellung den energieintensivsten Prozess dar.

Die Abschätzung der Umweltwirkungen der verschiedenen Oberbaukonstruktionen erfolgt unter Verwendung der Software GaBi 4.

Die Durchführung der Studie erfolgt nach den Anforderungen für Ökobilanzen, nach DIN ISO 14040 und DIN ISO 14044. Dies schließt ein Critical Review ein.

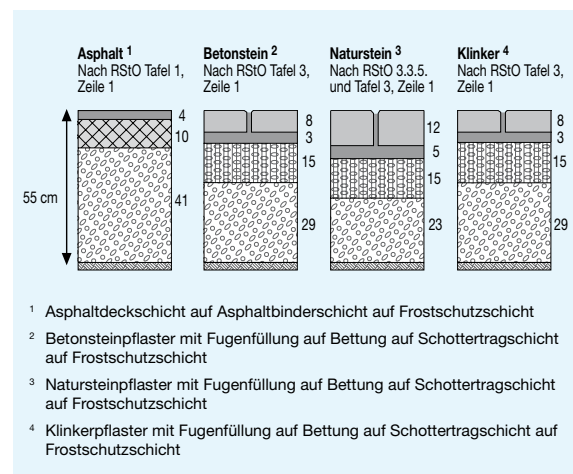


Abbildung 1-1: Untersuchte Oberbaukonstruktionen mit unterschiedlichen Deckschichten

## 2 Herstellung

Da die untersuchten Oberbaukonstruktionen einen ähnlichen Schichtenaufbau aufweisen, erfolgt eine detailliertere Beschreibung der unterschiedlichen Bauweisen auf Basis der einzelnen Schichten.

### **Frostschuttschicht**

Die Frostschuttschicht besteht aus einem Baustoffgemisch 0/32 nach den TL SoB-StB aus ungebrochenen Gesteinskörnungen (Sand, Kies). Das Material wird 20 km mittels Lkw zum Einbauort transportiert. Für den Einbau und die Verdichtung werden Baumaschinen auf Dieselmotorbasis eingesetzt. Der Primärenergiebedarf beträgt hierzu 6 MJ/t [DAV 2003]. Bei der Asphaltbauweise beträgt die Dicke der Frostschuttschicht 41 cm, bei der Natursteinpflasterbauweise 23 cm und bei der Beton- und der Klinkerpflasterbauweise jeweils 29 cm.

### **Schottertragschicht**

Die Schottertragschicht besteht aus einem Baustoffgemisch 0/32 nach den TL SoB-StB aus gebrochenen Gesteinskörnungen (Brechsand, Splitt), welches 20 km mittels Lkw zum Einbauort transportiert wird. Für den Einbau und die Verdichtung werden Baumaschinen auf Dieselmotorbasis eingesetzt. Der Primärenergiebedarf beträgt hierzu 4,5 MJ/t [DAV 2003]. Die Dicke der Schottertragschicht im verdichteten Zustand beträgt bei den Pflasterbauweisen jeweils 15 cm. Bei der Asphaltbauweise entfällt eine Schottertragschicht.

### **Asphaltbinderschicht**

Für die Asphaltbinderschicht wird ein Asphaltbinder 0/16 unter Verwendung von gebrochenem Kalkstein angenommen, welcher mittels Lkw über 20 km zum Asphaltmischwerk transportiert wird. Der Bindemittelgehalt beträgt 3,6 M.-%. Das Bitumen wird mittels Lkw über 200 km zum Mischwerk transportiert. Für die Herstellung von einer Tonne Material für die Asphaltbinderschicht werden 334 MJ thermische Energie (Heizöl) und 11 MJ Strom benötigt [LÜNSER 1999]. Nach 100 km Lkw-Transport erfolgt der Einbau und die Verdichtung, wobei 10 MJ/t Primärenergie benötigt werden [DAV 2003]. Beiträge zur Primärenergie resultieren vorrangig aus dem hierzu nötigen Dieserverbrauch von Straßenfertiger und Walze.

### **Asphaltdeckschicht**

Für die Asphaltdeckschicht wird ein Asphaltbeton 0/11 unter Verwendung von gebrochenem Kalkstein angenommen. Der Bindemittelgehalt beträgt 6,5 M.-%. Für die Herstellung von einer Tonne Material für die Asphaltdeckschicht werden 334 MJ thermische Energie (Heizöl) und 11 MJ Strom benötigt [LÜNSER 1999].

Nach 100 km Lkw-Transport erfolgen der Einbau und die Verdichtung, wobei 10 MJ/t Primärenergie benötigt werden [DAV 2003]. Beiträge zur Primärenergie resultieren vorrangig aus dem hierzu nötigen Dieserverbrauch von Straßenfertiger und Walze.

### **Bettung der Pflasterdecken**

Als Bettungsmaterial für die Beton- und die Klinkerpflasterbauweise wird ein Baustoffgemisch 0/5 nach den TL Pflaster-StB aus einem Kalkstein-Brechsand-Splitt-Gemisch angenommen. Als Bettungsmaterial für die Natursteinpflasterbauweise wird ein Baustoffgemisch 0/11 nach den TL Pflaster-StB angenommen. Für das Vorbereiten der Bettung einschließlich Vorverdichten und späterem Abrütteln der Pflasterdecke werden 4,5 MJ/t Primärenergie (als Dieserverbrauch) veranschlagt [DAV 2003]. Die Bettungsdicke im verdichteten Zustand beträgt bei der Beton- und der Klinkerpflasterbauweise jeweils 3 cm und bei der Natursteinpflasterbauweise 5 cm.

### **Fugenfüllung**

Als Fugenmaterial für die Beton- und die Klinkerpflasterbauweise wird ein Baustoffgemisch 0/4 nach den TL Pflaster-StB (angenommene Fugenbreite 4 mm) angenommen. Als Fugenmaterial für die Natursteinpflasterbauweise wird ein Baustoffgemisch 0/8 nach den TL Pflaster-StB (angenommene Fugenbreite 10 mm) angenommen.

### **Pflastersteine aus Beton**

Im Rahmen einer Datenerhebung (2007) für die Herstellung von Pflastersteinen aus Beton wurden Werke verschiedener Regionen zu den Energie- und Massenflüssen, Transportdistanzen der Rohstoffe, Art der Energieträger sowie anfallenden Abfällen und Reststoffen innerhalb ihrer Werke befragt. Aus den jeweils werksspezifischen Daten wurde eine Wichtung über die Produktionsmenge vorgenommen und daraus ein Mix für diese Studie errechnet. Die Pflastersteine aus Beton werden mittels Lkw 100 km zum Einbauort transportiert. Daten für Zement, Gesteinskörnungen, Zusatzmittel und Zusatzstoffe sowie Energie entstammen GaBi 2007. Die Verlegung der Pflastersteine aus Beton erfolgt mit speziellen Verlegemaschinen. Der Verbrauch einer üblichen Verlegemaschine für eine Tagesleistung von ca. 500 m<sup>2</sup> beträgt bei einer Steindicke von 10 cm etwa 15 l Dieseldieselkraftstoff. Bei einer Steindicke von 8 cm, einer Rohdichte des Betons von 2,4 t pro m<sup>3</sup> und einer Fugenbreite von 4 mm, die bei der Verlegung eingehalten wird, entspricht dies einer Einbaumasse von 181 kg pro m<sup>2</sup> verlegter Fläche.

**Pflasterklinker**

Die Herstellung der Pflasterklinker basiert auf Daten aus der Ökobilanz-Datenbank GaBi 4 [GaBi 2007]. Diese Daten stützen sich auf Werksdaten der Ziegelindustrie aus dem Jahr 2006. Der Energiebedarf wird hierbei vorrangig mit Erdgas und Heizöl gedeckt. Im Vergleich zur Ziegelherstellung erfolgt kein Einsatz von Sekundärbrennstoffen und der Energiebedarf zum Brennen ist generell höher. Das Brennen stellt innerhalb der Prozesskette der Klinkerherstellung den energieintensivsten Prozess dar. Der Transport zum Einbauort erfolgt mittels Lkw über 100 km. Die Pflasterklinker werden manuell verlegt.

**Pflastersteine aus Naturstein**

Treibstoffaufwendungen für den Natursteinabbau basieren auf Daten des DNV. Zum Abbau von 1 m<sup>3</sup> Naturstein werden demnach 15 Liter Diesel benötigt. Nach dem Spalten in das gewünschte Format können die Pflastersteine aus Naturstein im Straßenbau verwendet werden. Das Spalten der Natursteine erfolgt mit Hilfe von hydraulischen Spaltmaschinen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass eine Maschine mit

50 kW etwa 40 Sekunden zum Spalten der erforderlichen Steinanzahl für 1 m<sup>2</sup> Natursteinpflaster benötigt. Beim Spalten treten Verluste in Höhe von 15 % auf. Die Herkunft der Pflastersteine aus Naturstein unterliegt großen Schwankungen, es wird daher ein Mix mit zugehörigen Distanzen wie folgt bilanziert:

- 40 % regionaler Bezug (Deutschland),  
Transportentfernung im Mittel 350 km
- 30 % europäischer Bezug (z. B. Italien),  
Transportentfernung im Mittel 1.000 km
- 30 % Bezug aus Übersee (z. B. China),  
Transportentfernung ca. 20.000 km.

Das Versetzen der Pflastersteine aus Naturstein erfolgt manuell.

**Transporte**

Um die Einflüsse von Transporten bei importierten Pflastersteinen zu betrachten, wurden drei Transportszenarien „vom Werk zur Baustelle“ berechnet, Sie zeigen typische Entfernungen, die auch für den Herkunftsmix der Pflastersteine aus Naturstein verwendet wurden.

Tabelle 2-1: Transportentfernungen für Szenarien unterschiedlicher Herkunft

Herkunft	Lkw	Bahn	Container-Schiff	Bahn	Lkw
Italien (Lkw)	1.000	-	-	-	-
Italien (Bahn)	50	-	-	1.000	50
China	10	100	18.880	400	50

### 3 Nutzung

Für den in dieser Studie durchgeführten Vergleich der Ökobilanzen wird davon ausgegangen, dass alle vier Oberbaukonstruktionen eine ausreichende Dauerhaftigkeit für den angestrebten Nutzungszeitraum (in der Regel 30 Jahre) haben [RStO 2001]. Damit ist sichergestellt, dass die vier zu vergleichenden Bauweisen dieselbe Funktion erfüllen.

Für alle vier Oberbaukonstruktionen wird das gleiche Nutzungsszenario vorausgesetzt. Obwohl die Fahrbahn von Erschließungsstraßen normalerweise nicht gereinigt werden muss, kann für ein vergleichbares Beispiel (Platzsituation) die Reinigung mit einer Kehmaschine 1-mal pro Monat angenommen werden (jährlicher Verbrauch auf 100 m<sup>2</sup> etwa 5,9 kWh bzw. 21,2 MJ).

Erfahrungsgemäß sind bei einem Nutzungszeitraum von 30 Jahren bei keiner der Oberbaukonstruktionen grundlegende Erneuerungsarbeiten vorzunehmen. Erhaltungsmaßnahmen sind über den Nutzungszeitraum bei fachgerechter Ausführung aus Sicht der Ökobilanz nicht relevant.

Während der Nutzungsdauer erfolgt keine Abgabe von umweltschädlichen Stoffen an Luft, Boden und Grundwasser [ARBIT 2008]. Nach [RiStWag 2002] gelten Schichten aus Asphalt als umweltunbedenklich. Ebenso gelten Pflasterschichten aufgrund langjähriger Erfahrung mit Praxisanwendungen als umweltunbedenklich.



Für die vorliegende Studie wird kein vollständiger Rückbau der Oberbaukonstruktionen zu Grunde gelegt. Die ungebundenen Tragschichten (Frostschutzschicht und Schottertragschicht) werden nicht ausgebaut. Für die Deckschicht gelten praxisbezogene Annahmen, die im Gespräch mit Baufirmen abgestimmt wurden.

#### **Asphaltdecke**

Zunächst wird die Asphaltdecke gefräst und einem Asphaltrecycling zugeführt. Je nach Aufbereitungsverfahren, Kaltzugabe-Verfahren oder Heißrecycling, variiert die Zugabemenge stark (25 % - 100 %). Der benötigte Primärenergiebedarf für das Recycling von einer Tonne Asphaltdeckschicht wird mit 51 MJ abgeschätzt [DAV 2003]. Beim Herstellen der Asphaltbinderschicht wird ein Anteil von 25 % Recyclingbaustoffe angenommen, für die Asphaltdeckschicht werden keine Recyclingbaustoffe verwendet [DAV 2003].

#### **Betonsteinpflasterdecke**

Die Pflastersteine aus Beton werden üblicherweise mit Hilfe eines Schaufelladers ausgebaut. 80 % der Steine

sind dadurch anschließend beschädigt und werden dem Betonrecycling zugeführt und zu recycelter Gesteinskörnung verarbeitet. 20 % der ausgebauten Steine können gereinigt (Sortierverlust 5 %) und wieder verwendet werden.

#### **Klinkerpflasterdecke**

Die Pflasterklinker werden üblicherweise mit Hilfe eines Schaufelladers ausgebaut. 80 % der Steine sind dadurch anschließend beschädigt und werden dem Recycling zugeführt und zu recycelter Gesteinskörnung verarbeitet. 20 % der ausgebauten Steine können gereinigt (Sortierverlust 5 %) und wieder verwendet werden.

#### **Natursteinpflasterdecke**

Die Pflastersteine aus Naturstein werden manuell ausgebaut, wobei ein 5 %iger Ausbauperlust berücksichtigt wird. Die Steine werden in einer Aufbereitungsanlage gewaschen (5 % Wasch- und Sortierverlust) und können anschließend direkt wieder verwendet werden.

## 5 Ergebnisse

Um die möglichen Umweltauswirkungen der 4 Oberbaukonstruktionen über deren Lebenszyklus zu ermitteln, wird die CML-Methodik [CML 2001] mit den Charakterisierungsfaktoren von 2001 verwendet. Neben dem Verbrauch an erneuerbaren sowie nicht erneuerbaren Energien werden die Wirkkategorien Treibhauspotenzial (GWP), Ozonabbaupotenzial (ODP), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierungspotenzial (EP) und Sommersmogpotenzial (POCP) betrachtet.

Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse in den betrachteten Wirkkategorien und im Primärenergiebedarf verzeichnen. Tabelle 5-1 stellt die Resultate für die Herstellung von 100 Quadratmetern Oberbaukonstruktion und den gesamten Lebenszyklus (kursiv) dar. In der Herstellungsphase erzielt die Bauweise mit Betonsteinpflasterdecke in allen betrachteten Wirkkategorien (mit Ausnahme des ODP) die beste Umweltperformance. Der Primärenergiebedarf beträgt weniger als die Hälfte des Primärenergiebedarfs der Asphalt- und Klinkerbauweise und 56 % des Primärenergiebedarfs der Natursteinbauweise. Auch das Treibhauspotenzial der Betonsteinpflaster-Oberbaukonstruktion zeigt die geringsten Werte. Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus fällt auf, dass die Oberbaukonstruktion mit Natursteinen aufgrund der sehr guten Wiederverwendbarkeit im End-of-Life Aufwendungen in der Herstellungsphase kompensiert.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse zum Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial über den gesamten Lebenszyklus, wobei die 4 Oberbaukon-

struktionen vergleichend gegenübergestellt werden. Der fossile Primärenergiebedarf der Natursteinpflasterkonstruktion liegt nur noch 6 % über dem der Betonsteinvariante (vgl. Abbildung 5-1). Das Treibhauspotenzial der Natursteinvariante und der Betonpflastersteinvariante sind nahezu identisch (Abbildung 5-2).

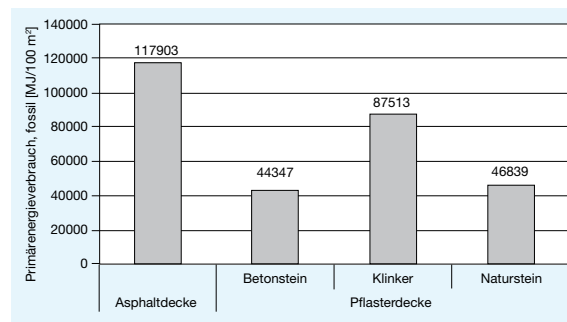


Abbildung 5-1: Primärenergiebedarf über den Lebenszyklus von 100 m<sup>2</sup> Oberbaukonstruktion einer Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V (RStO), [MJ/100 m<sup>2</sup>]

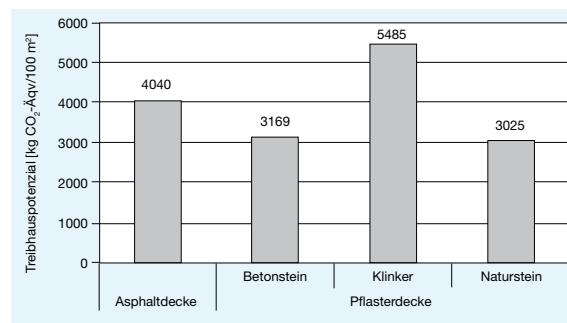


Abbildung 5-2: Treibhauspotenzial über den Lebenszyklus von 100 m<sup>2</sup> Oberbaukonstruktion einer Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V (RStO), [kg CO<sub>2</sub>-Äqv/100 m<sup>2</sup>]

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Bilanzierungsergebnisse für die Herstellung und den Lebenszyklus (kursiv) von 100 m<sup>2</sup> Oberbaukonstruktion für eine Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V (RStO)

	Asphaltdecke	Pflasterdecke Betonstein	Pflasterdecke Klinker	Pflasterdecke Naturstein
Primärenergieverbrauch (nicht erneuerbar) [MJ]	119566 <i>117903</i>	49843 <i>44347</i>	104020 <i>87513</i>	89434 <i>46839</i>
Primärenergieverbrauch (erneuerbar) [MJ]	627 <i>608</i>	3993 <i>3343</i>	1108 <i>913</i>	771 <i>596</i>
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente]	4116 <i>4040</i>	3553 <i>3169</i>	6479 <i>5485</i>	6013 <i>3025</i>
ODP [kg R11-Äquivalente]	1,23E-04 <i>1,19E-04</i>	1,47E-04 <i>1,24E-04</i>	2,12E-04 <i>1,74E-04</i>	1,40E-04 <i>1,19E-04</i>
AP [kg SO <sub>2</sub> -Äquivalente]	10,9 <i>12,8</i>	9,16 <i>9,72</i>	16,5 <i>15,6</i>	94,3 <i>16,3</i>
EP [kg PO <sub>4</sub> -Äquivalente]	1,28 <i>1,60</i>	1,24 <i>1,38</i>	1,90 <i>1,91</i>	9,58 <i>1,93</i>
POCP [kg Ethen-Äquivalente]	5,49 <i>5,68</i>	0,94 <i>0,98</i>	1,68 <i>1,57</i>	5,86 <i>1,24</i>



**Szenario Transportdistanzen der Natursteine**

Im Rahmen einer Szenarioanalyse wurden die Transportdistanzen der Natursteine variiert und damit der Einfluss auf die Ergebnisse der Umweltwirkungen der Herstellung untersucht. Das Basisszenario basiert auf dem in Kapitel 2 beschriebenen Herkunftsmix.

Graphisch dargestellt werden die Auswirkungen der veränderten Transportszenarien auf den fossilen Primärenergiebedarf der Herstellung der Natursteinpflaster-Oberbaukonstruktion, getrennt nach den Anteilen des Rohstoffs, der Bauausführung und des Transports (Abbildung 5-3).

In Relation zum Basisszenario zeigt sich, dass bei Importen aus China die Ergebnisse im Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial gegenüber dem Basisszenario um den Faktor 1,9 steigen, das Versauerungspotenzial steigt um den Faktor 2,9.

Es fällt auf, dass beispielsweise bei Importen aus China der Primärenergiebedarf der Rohstoffe lediglich 34 % des PE der Transportaufwendungen ausmacht. Der Import per Bahn aus Italien spart gegenüber dem Import per Lkw 3,6 GJ ein.

Analog den Ergebnissen zum Primärenergiebedarf übersteigt das GWP des Transports bei Importen aus Übersee das GWP der Rohstoffe um den Faktor 3. Der Import per Bahn aus Italien spart gegenüber dem Import per Lkw 460 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente ein.

Eine Variation der Transportszenarien in Distanz und Transportmittel hat beträchtlichen Einfluss auf die Umweltwirkungen. Lokale Baustoffe ohne größere Transportaufwendungen sind in jedem Fall die vorteilhafteste Variante.

**Szenario Allokation der Raffinerie**

Im Rahmen einer Szenarioanalyse wurde die Allokation der Raffinerie variiert, um den Einfluss auf die Ergebnisse der Umweltwirkungen der Asphaltvariante zu untersuchen. Die folgende Tabelle 5-2 veranschaulicht neben den Ergebnissen des Basisszenarios der Asphaltvariante Resultate für ein zweites Szenario, wonach die Umweltwirkungen von Bitumen lediglich in Abhängigkeit vom Rohölbedarf bilanziert wurden (Raffinerieaufwand wurde zu 100 % den leichten Produkten wie Gase, Benzin und Mitteldestillate zugerechnet).

Tabelle 5-2: Ergebnisse der Herstellung zum Primärenergieverbrauch, GWP je 100 m<sup>2</sup> Oberbaukonstruktion für eine Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V (RStO) nach Variation der Bitumenallokation

	Basisszenario Asphaltdecke	2. Szenario Asphaltdecke
Primärenergieverbrauch (nicht erneuerbar) [MJ]	122.456	119.543
Primärenergieverbrauch (erneuerbar) [MJ]	565	551
GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente]	4.120	3.990

Anhand der Ergebnisse ist ersichtlich, dass eine veränderte Allokation des Bitumens von geringerer Bedeutung ist, da der Rohölbedarf die entscheidende Größe darstellt.

Die Ergebnisse des Szenarios 2 sind durchschnittlich um 3 % geringer als die des Basisszenarios. Dies gilt sowohl für die Herstellung als auch für die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus.

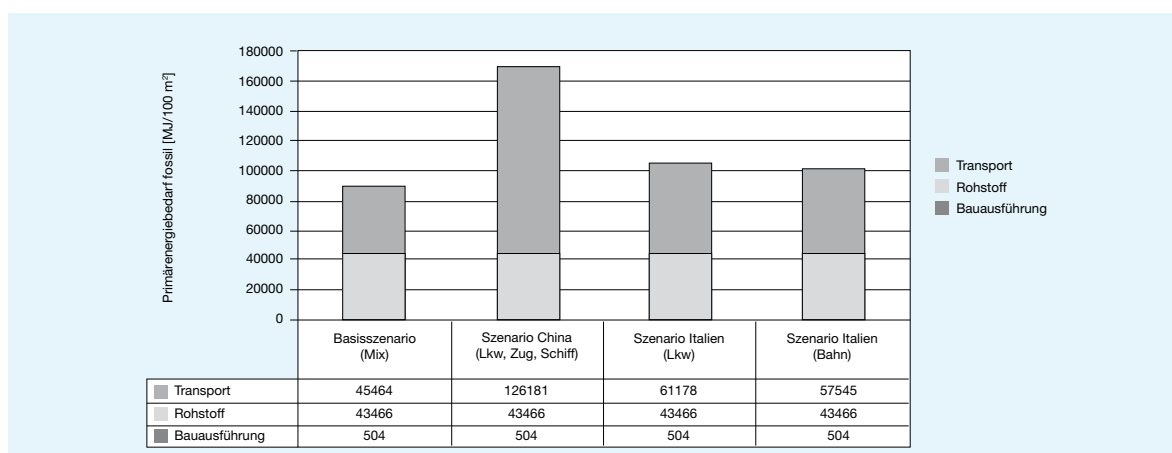


Abbildung 5-3: Auswirkung des Transports von Pflastersteinen aus Naturstein auf den Primärenergieverbrauch (nicht erneuerbar) der Herstellung

## 6 Interpretation der Ergebnisse

Die Methode der Ökobilanzierung ist vielseitig nutzbar. Sie erlaubt sowohl einen systemischen Vergleich von baulichen Lösungen wie beispielsweise Fahrbahnaufbauten als auch die Analyse der Herstellung von Produkten wie Pflastersteinen aus Beton und anderen Produkten für die Verkehrsflächenbefestigung.

Die werksseitige Datenerhebung für Pflastersteine aus Beton wurde in vier Regionen durchgeführt, sie zeigt regionale Unterschiede der Werke. Mit Hilfe der erhobenen Daten konnte die Umweltperformance, wie beispielsweise der Primärenergiebedarf oder das Treibhauspotenzial, der Herstellungskette von Pflastersteinen aus Beton ermittelt werden. Der Rezeptur kommt bei Betonprodukten eine Schlüsselrolle zu. Der Zementgehalt der Pflastersteine ist dabei die bestimmende Größe. Der Herstelleraufwand in den Werken zeigt Unterschiede bei der eingesetzten Technologie, die Transporte spielen durch relativ kurze Transportentfernungen aller Rohstoffe (20 – 110 km) eine untergeordnete Rolle. Nach einer Gewichtung über die jeweils produzierte Menge in den Werken, ergeben sich ein mittlerer Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar) von etwa 1.200 MJ/m<sup>3</sup> Pflastersteinen aus Beton sowie ein Treibhauspotential (GWP) von etwa 120 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro m<sup>3</sup>. Ein Vergleich für die Oberbaukonstruktionen einer Erschließungsstraße zeigt, dass mit Pflastersteinen aus Beton aus Sicht der Ökobilanz vorteilhafte Gesamtlösungen zu erzielen sind.

Der vorliegende Variantenvergleich einer typischen Oberbaukonstruktion für eine Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V (RStO) zeigt Vorteile für die Betonstein-Variante insbesondere gegenüber der Asphaltvariante und der Klinkervariante. Deutliche Vorteile gegenüber der Natursteinvariante in der Herstellungsphase werden, über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, kompensiert, da die Natursteine nahezu vollständig wieder eingebaut werden können und somit erneute Aufwendungen in der Herstellungsphase eingespart werden. Zusammenfassend ergeben sich für die Betonstein- und die Natursteinvariante ähnliche Ergebnisse von „cradle to grave“. Grundlage für diese Aussage ist die Annahme einer Recyclingquote von 90 % für Naturstein und 20 % für Betonsteine und die durchschnittlichen Transportwege bei Naturstein.

In der Herstellungsphase erzielt die Betonsteinvariante in allen betrachteten Wirkkategorien (mit Ausnahme

des ODP) die beste Umweltperformance. Der Primärenergiebedarf beträgt weniger als die Hälfte des Primärenergiebedarfs der Asphalt- und Klinkervariante und 56 % des Primärenergiebedarfs der Natursteinvariante. Auch das Treibhauspotenzial der Oberbaukonstruktion mit Pflasterdecke aus Betonstein zeigt die geringsten Werte.

Untersucht wurden die prozentualen Anteile verschiedener Kategorien an den betrachteten Umweltwirkungen. Dabei zeigen die Bauausführung, Rohstoffe der Tragschichten und Decke sowie Transporte der Tragschichten und Decke bei 3 der Oberbaukonstruktionen nahezu identische relative Beiträge. Ausnahme bildet das POCP der Asphaltvariante infolge der VOC-Emissionen bei Straßenbelagsarbeiten und somit eine Dominanz der Kategorie Bauausführung. Eine weitere Ausnahme bildet die Natursteinvariante. Hierbei dominieren nicht die Rohstoffe der Tragschichten und Decke die Ergebnisse in den betrachteten Wirkkategorien, sondern die Transportaufwendungen für die Pflastersteine aus Naturstein.

Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus fällt auf, dass die Oberbaukonstruktion mit Natursteinpflasterdecke aufgrund der sehr guten Wiederverwendbarkeit im End-of-Life Aufwendungen in der Herstellungsphase kompensiert. Der fossile Primärenergiebedarf liegt nur noch 6 % über dem der Betonsteinvariante. Das Treibhauspotenzial der Natursteinbefestigung und der Betonpflastersteinbefestigung sind nahezu identisch und geringer als das der beiden anderen Oberbaukonstruktionen.

Um den Einfluss von Transporten bzw. Importen in Bezug auf die Umweltwirkungen der Herstellung herauszuarbeiten, wurde eine Szenarioanalyse durchgeführt, wobei typische Transportdistanzen für Pflastersteine aus Naturstein bilanziert wurden. Die Auswertung des Primärenergieverbrauchs macht deutlich, dass selbst bei Transporten innerhalb Europas durch den Transport dieselbe Größenordnung wie durch die Herstellung der Pflastersteine aus Naturstein verbraucht werden kann. Auch das Treibhauspotenzial zeigt für einen Transport aus Übersee höhere Werte als für die alleinige Herstellung. Ein lokaler Bezug ist daher in jedem Fall vorzuziehen. Die Transporte aus Übersee zeigen am Beispiel China deutlich, dass diese Bezugsform für Pflastersteine aus Naturstein nicht nachhaltig ist.

ARBIT 2008	Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V.: Bitumen in unserer Welt – Der richtige Weg: Wiederverwendung, im Internet erhältlich unter: <a href="http://www.arbit.de/html/biuw19.htm">http://www.arbit.de/html/biuw19.htm</a> , 2008
CML 2001	Centre of Environmental Science, Leiden University (CML): Life cycle Assessment. An operational guide to the ISO standard, Wirkfaktoren im Internet, unter <a href="http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html">http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html</a> , Update vom September 2001
DAV 2003	Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbahnen, im Auftrag des Deutschen Asphaltverbandes e.V. (DAV), Karlsruhe, November 2003
DNV 2008	Deutscher Naturwerkstein-Verband e.V., Würzburg, Kontakt R. Krug, Januar-Mai 2008
GaBi 2007	PE INTERNATIONAL, LBP: GaBi 4 Software-System und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart, Echterdingen, 2007.“
ISO 14040 2006	ISO 14040 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework, 2006
ISO 14044 2006	ISO 14044, Environmental Management – Life Cycle Assessment, 2006
LÜNSER 1999	Heiko Lünser: Ökobilanzen im Brückenbau – Eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung, Basel – Bosten – Berlin: Birkhäuser, 1999
RiStWag 2002	Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten, RiStWag, 2002
RStO 2001	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO), 2001
TL Pflaster-StB 2006	Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen, Ausgabe 2006, TL Pflaster-StB 06
TL SoB-StB 2004	Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Ausgabe 2004 / Fassung 2007, TL SoB-StB 04

**Beton**

Es kommt drauf an,  
was man draus macht.

[www.betonstein.de](http://www.betonstein.de)