

# “Comparative Ecological Balance“ study Construction of surfaces for public thoroughfares using different surface layers

## Studie „Vergleichende Ökobilanz“ Oberbaukonstruktionen von Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten

We first reported on the commissioned Comparative Ecological Balance Study in BFT INTERNATIONAL 04/2009. This essay will into detail on parameters and results of this study. Concrete goods performed better than other materials used for pavements.

The investigation was carried out by the well-known and accredited organisation PE INTERNATIONAL GmbH on behalf of BetonMarketing Deutschland GmbH and the concrete association SLG. It also underwent a Critical Review in accordance with ISO 14040 by an independent group of experts (Review Panel). The results were first published in December 2008.

### Basis

The aim of the study was to compare the effects on the environment of four typical surface constructions for public thoroughfares with different surface layers, on the basis of Construction Class V as defined in the “Guidelines for Standardising the Superstructure of Public Thoroughfares”. As an example, an access road – a typical public Class V thoroughfare – was investigated with regard to environmental effects. Some other public thoroughfares typically designated as Construction Class V are service

In BFT INTERNATIONAL 04/2009 berichteten wir erstmals über die Vergleichende Ökobilanz, die als Studie in Auftrag gegeben wurde. Nachfolgend soll auf diese Untersuchung, deren Parameter und die Ergebnisse im Detail eingegangen werden. Betonwaren schneiden in der Ökobilanzierung hervorragend ab und setzten sich erfolgreich gegen andere Befestigungsvarianten durch.

Die Untersuchung wurde von dem renommierten und anerkannten Unternehmen PE International GmbH im Auftrag der BetonMarketing Deutschland GmbH und dem Betonverband SLG erstellt. Sie wurde auch einem Critical Review nach ISO 14040 durch eine unabhängige Expertengruppe (Review-Panel) unterzogen. Die Ergebnisse wurden im Dezember 2008 erstmals veröffentlicht.

### Ausgangspunkte

Ziel der Studie war der Vergleich der Umweltwirkungen von vier typischen Oberbaukonstruktionen für Verkehrsflächen mit unterschiedlichen Deckschichten, für welche eine Konstruktion Bauklasse V gemäß den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“ (RStO) zugrunde gelegt wurde. Beispielhaft wurde eine Erschließungsstraße – typische Verkehrsfläche in der Bauklasse V – 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 wurden hierbei die Bauweisen mit Asphalt-, Betonpflaster-, Natursteinpflaster- und Klinkerpflasterdecke über den gesamten Lebenszyklus auf der Vergleichsbasis von 100 m<sup>2</sup> (Abb. 1). Alle vier untersuchten Bauweisen können innerhalb der Bauklasse V für gleiche Einsatzbereiche eingesetzt werden. Versickerungsfähige (wasserdurchlässige) Bauweisen werden im Rahmen der Studie nicht betrachtet. Die Dicke des frost-sicheren Oberbaues beträgt für die untersuchten Bauweisen jeweils 55 cm. Für die Studie waren reine Standardbauweisen ausgewählt. Innerhalb der Studie wird der Lebenszyklus der vier 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

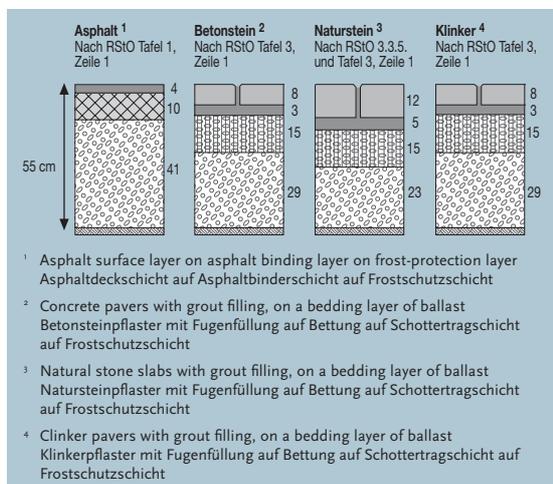


Fig. 1 Investigation of road pavement constructions with different types of surface finish.

Abb. 1 Untersuchte Oberbaukonstruktionen mit unterschiedlichen Deckschichten.

roads, residential streets suitable for vehicular traffic, and light-usage parking areas.

The investigation considered designs surfaced with asphalt, concrete paving, natural stone paving and brick paving, over the entire life cycle, on a comparative basis of 100 m<sup>2</sup> (Fig. 1). All these four investigated types of construction can be used within Construction Class V for the same types of applications. Infiltration-tolerant constructions (water-permeable) were not considered within the scope of the study. The thickness of the frost-resistant layer is 55 cm for each of the designs investigated. Straightforward, standard designs were chosen for the study. The entire life cycle of the four surface structures (cradle to grave) was investigated in the study, including the construction phase, the service life, and the recycling/disposal phase.

The ecological balance was drawn up using Germany as a reference area. This means that, in addition to the production processes affected by these boundary conditions, the preliminary stages, such as electrical and energy sources, were also relevant for Germany.

Life cycle data for the asphalt design was taken mainly from the technical literature. Where data was lacking, the following procedure was adopted: if no primary data was available, data from the literature was used, as far as possible. If there was no data available in the literature either, data based on a documented estimate was used. The balance for the commonly used concrete paving slabs was calculated starting with their manufacture at a paving plant and the materials and energy consumed in that process.

In the production of concrete, the formulation plays a key role. Factory data was collected in four regions, and this showed regional variations. Using the data obtained, the environmental performance was determined for manufacture of concrete paving slabs in each plant, consisting chiefly of the primary energy requirement and the global warming potential.

Data on construction using natural stone, and for the manufacture of paving slabs from natural stone, was provided by the German Natural Stone Association (Deutscher Naturwerkstein Verband, DNV). The sources of paving slabs made of natural stone vary greatly. Local deposits are just as common as imports from abroad. The observations in this study are therefore based on a variety of sources (DNV). For the sourcing scenarios, means of transport and energy sources were chosen that are typical for the country. The manufacture of paving bricks was based on data from the Ecological Balance Database GaBi 4 [GaBi 2007]. This data is based on factory data from the tile industry in 2006 (D-A-CH).

The estimation of environmental effects for the various different forms of surface construction was carried out using GaBi 4 software. The study was carried out in line with the requirements for ecological balances, in accordance with DIN ISO 14040 and DIN ISO 14044, which includes a Critical Review.

### Realization of the construction types

Since the surface constructions that were investigated all have a similar layered construction, a detailed description of the construction types is given on the basis of the individual layers.

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 und zeigt entsprechend regionale Unterschiede. 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 Deutschen 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).

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.

### Ausführung der Bauweisen

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

#### **Frost protection layer**

The frost protection layer consists of a construction material mixture 0/32 according to TL SoB-StB, consisting of uncrushed aggregate (sand, gravel). The material is transported 20 km by truck to the construction site. Diesel construction machines are used for spreading and compacting. The primary energy consumed for this is 6 MJ/t [DAV 2003]. For the asphalt construction method, the thickness of the frost-protection layer is 41 cm, for the natural stone paving method it is 23 cm, and for the concrete paving and brick paving methods it is 29 cm in each case.

#### **Ballast substructure**

The ballast substructure consists of a construction material mixture 0/32 according to TL SoB-StB, consisting of crushed aggregate (crushed sand, chippings), which is transported 20 km by truck to the construction site. Diesel construction machines are used for spreading and compacting. The primary energy consumed for this is 4.5 MJ/t [DAV 2003]. The thickness of the ballast substructure, when compacted, is 15cm for each of the paved construction designs. For the asphalt construction design there is no ballast substructure.

#### **Asphalt binding layer**

For the asphalt binding layer, an asphalt binder 0/16 using crushed limestone is assumed, which is transported 20 km by truck to the asphalt-mixing plant. The binding material content is 3.6% by weight. The bitumen is transported 200 km by truck to the mixing plant. Manufacture of one tonne of material for the asphalt binding layer requires 334 MJ of thermal energy (fuel oil) and 11 MJ of electrical energy [LÜNSER 1999]. It is then transported 100 km by truck, spread and compacted, which requires 10 MJ/t of primary energy [DAV 2003]. This primary energy consists mainly of the diesel consumption of the road-finisher and rollers needed for this task.

#### **Asphalt surface layer**

For the asphalt surface layer, an asphalt-concrete 0/11 using crushed limestone is assumed. The binding material content is 6.5% by weight. Manufacture of one tonne of material for the asphalt surface layer requires 334 MJ of thermal energy (fuel oil) and 11 MJ of electrical energy [LÜNSER 1999]. It is then transported 100 km by truck, spread and compacted, which requires 10 MJ/t of primary energy [DAV 2003]. This primary energy consists mainly of the diesel consumption of the road-finisher and rollers needed for this task.

#### **Bedding for the slabbed surfaces**

The bedding material for the concrete-paved and brick-paved construction methods is assumed to be a material mixture 0/5 according to TL paving-StB, consisting of limestone, crushed sand and chippings. The bedding material for natural stone paving is assumed to be a material mixture 0/11 according to TL paving-StB. Preparation of the bedding, including pre-compaction and subsequent shaking down of the paving surface, is estimated to require 4.5 MJ/t of primary energy (as diesel consumption) [DAV 2003]. The bedding layer thickness when compacted is 3 cm for both concrete-paved and brick-paved surfaces, and 5 cm for natural stone paving.

Dieselbasis 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 el) 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 el) 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. Für die Natursteinpflasterbauweise wird ein Baustoffgemisch 0/8 nach den TL Pflaster-StB zur Fugenfüllung (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

### Grouting

As grouting material for the concrete-paved and brick-paved construction methods, a material mixture 0/4 according to TL paving-StB is assumed (assuming a crack width of 4 mm). As grouting material for the natural stone paving method, a material mixture 0/8 according to TL paving-StB is assumed (assuming a crack width of 10 mm).

### Concrete paving slabs

In the course of gathering data (in 2007) for the manufacture of concrete paving slabs, factories in various regions were asked about the energy and mass flows, the raw material transport distances, the type of energy sources and the refuse and waste created within their plant. From the specific data obtained for each plant, weighted values were created for the production amounts and from this a mix was calculated for this study. The concrete paving slabs are transported by truck for 100 km to the construction site. Data for cement, aggregate and additives, and also for energy, are derived from GaBi 2007. Concrete paving slabs are laid using special laying machines. For a normal laying machine, the consumption for one day's operation of about 500 m<sup>2</sup> is about 15 l of diesel fuel for a stone thickness of 10 cm. For a stone thickness of 8 cm, a concrete density of 2.4 t per m<sup>3</sup> and a gap width of 4 mm which is maintained when laying, this corresponds to an installation mass of 181 kg per m<sup>3</sup> of surface laid.

### Brick pavers

The manufacture of brick pavers is based on data from the Ecological Balance Database GaBi 4 [GaBi 2007]. This data is based upon factory data from the tile industry for the year 2006. The energy requirement here is chiefly in terms of natural gas and heating oil. Compared to tile manufacture, there is no use of secondary fuels and the energy requirement for firing is generally higher. The firing process is the most energy-intensive process within the brick-making chain. Transport to the construction site is 100 km by truck. The brick pavers are laid manually.

### Natural stone paving slabs

Fuel costs for construction using natural stone are based on data from the DNV. To construct 1 m<sup>3</sup> in natural stone requires 15 litres of diesel. After being split to the desired format, paving slabs of natural stone can be used in road-making. Natural stone is split using hydraulic splitting machines. It may be assumed that a 50 kW machine requires about 40 seconds to split the amount of stone required for 1 m<sup>3</sup> of stone paving slabs. In splitting the stone, there are losses of the order of 15%. There are great variations in the sources of natural stone paving slabs;

ihrer Werke befragt. Aus den jeweils werkspezifischen 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 Dieselkraftstoff. Bei einer Steindicke von 8 cm, einer Rohdichte des Betons von 2,4 t/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 Ziegelerstellung 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 mithilfe 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. 19.000 km.

Das Versetzen der Pflastersteine aus Naturstein erfolgt manuell.

Point of origin Herkunft	Truck Lkw	Rail Bahn	Container ship Container-Schiff	Rail Bahn	Truck Lkw
Italy (truck) Italien (Lkw)	1,000	–	–	–	–
Italy (rail) Italien (Bahn)	50	–	–	1,000	50
China	10	100	18,880	400	50

**Table 1** Accumulated transport distances for different point-of-origin scenarios.

**Tabelle 1** Kumulierte Transportentfernungen für Szenarien unterschiedlicher Herkunft.

therefore a mix has been created for the balance, with respective distances as follows:

- » 40% regional sources (Germany), average transport distance 350 km
- » 30% European sources (e.g. Italy), average transport distance 1,000 km
- » 30% sourced from overseas (e.g. China), transport distance approx. 19,000 km.

Natural stone paving slabs are laid manually.

### Transport

In order to observe the influence of transport on imported paving slabs, three transport scenarios were calculated "from plant to site". They reflect the typical distances, which are also used for the source-mix of natural stone paving slabs.

### Usage

For the comparison of ecological balances carried out in this study, it is assumed that all four surface construction methods have a sufficient durability for the intended useful lifetime (as a rule this is 30 years) [RStO 2001]. This ensures that the four construction methods under comparison fulfil the same function – the same usage scenario is assumed for all four surface construction methods. Maintenance work during the working life, if carried out properly, is not relevant in terms of the ecological balance. During the working lifetime there is no emission of environmentally harmful materials to the air, to the soil, or to the groundwater [ARBIT 2008]. According to [RiStWag 2002], asphalt layers are deemed to be environmentally harmless. Paved surfaces are also deemed environmentally harmless, based on many years of experience with practical applications.

### End-of-Life

For the present study, complete removal of the surface construction was not assumed. The unbonded load-bearing layers (the frost protection layer and the ballast substructure) are not removed. Assumptions apply to the surface layer, in relation to the application:

#### Asphalt surface layer

The asphalt surface layer is first milled off and sent to an asphalt recycling plant. Depending on the preparation procedures used, the chilling method or hot recycling, the amount added varies widely (25% to 100%). The primary energy required to recycle one tonne of asphalt surface layer is estimated as 51 MJ [DAV 2003]. In manufacturing asphalt binding layer, a proportion of 25% of recycled construction material is assumed, but no recycled construction material is used in the asphalt surface layer [DAV 2003].

#### Concrete paving slab surface

Concrete paving slabs are normally removed using a mechanical shovel. 80% of the slabs are damaged in the process, and are sent for concrete recycling and processed into recycled aggregate. 20% of the removed slabs can be cleaned (sorting losses = 5%) and re-used.

#### Brick paver surface

Brick pavers are normally removed using a mechanical shovel. 80% of the slabs are damaged in the process, and are sent for recycling and processed into recycled aggregate.

### Transporte

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

### 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. 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.

### Nutzungsende

Für die vorliegende Studie wird kein vollständiger Rückbau der Oberbaukonstruktionen zu Grunde gelegt. Die ungebundenen Tragschichten (Frostschuttschicht und Schottertragschicht) werden nicht ausgebaut. Für die Deckschicht gelten praxisbezogene Annahmen:

#### Asphaltdecke

Zunächst wird die Asphaltdecke gefräst und einem Asphaltrecycling zugeführt. Je nach Aufbereitungsverfahren, Kaltzugabe-Verfahren oder Heißrecycling, variiert die Zugabemenge stark (25% bis 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% Recyclingbaustoffen 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 mithilfe 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 Ausbaupercentage berücksichtigt

gate. 20% of the removed slabs can be cleaned (sorting losses = 5%) and re-used.

### Natural stone paving slab surface

Natural stone paving slabs are taken up manually, which involves a 5% dismantling loss. The slabs are washed in a preparation plant (5% washing and sorting losses) and afterwards they can be re-used directly.

## Results

To determine the possible environmental effects of the four surface construction methods over their life cycle, the CML Method is used [CML 2001] with characterisation factors from 2001. In addition to the consumption of renewable and non-renewable energy, this monitors the categories of global warming potential (GWP), ozone depletion potential (ODP), acidification potential (AP), eutrophication potential (EP) and summer smog potential (POCP).

In summary, the following results can be seen in the monitored categories and in terms of primary energy consumption. **Table 2** shows the results for supplying 100 m<sup>2</sup> of surface construction and for the total life cycle (in italics). Considering the entire life cycle, it is evident that surface construction with natural stone compensates for high cost in the manufacturing phase with very good reusability at the end of the life cycle. The **Fig. 2 und 3** show the results for consumption of primary energy and global warming potential over the total life cycle, with the vier surface construction methods compared alongside each other.

### Scenario of transport distances for natural stone

As an analytical scenario, the transport distances for the natural stone were varied, so as to investigate the influence of the point of origin on the effects upon the environment. The basic scenario assumed the mixture of sources as described above. The effects of the different transport scenarios upon the consumption of fossil primary energy for the manufacture of a natural stone paving surface were represented graphically, divided up to show the proportion of raw material, the construction work, and the transport (**Fig. 4**). This showed that, compared with the basic scenario, importing from China increased the results for primary energy consumption and global warm-

wird. Die Steine werden in einer Aufbereitungsanlage gewaschen (5 % Wasch- und Sortierverlust) und können anschließend direkt wieder verwendet werden.

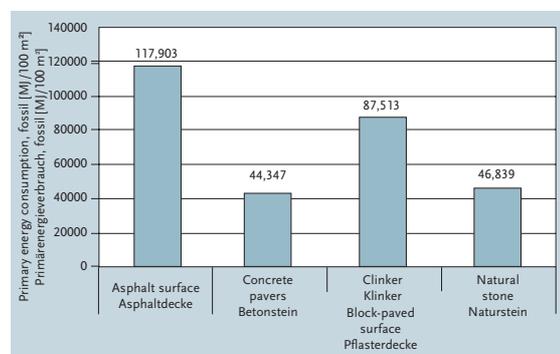
## Ergebnisse

Um die möglichen Umweltauswirkungen der vier 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), Ozonabbauopotenzial (ODP), Versauerungspotenzial (AP), Eutrophierungspotenzial (EP) und Sommermogpotenzial (POCP) betrachtet.

Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse in den betrachteten Wirkkategorien und im Primärenergiebedarf verzeichnen. **Tabelle 2** stellt die Resultate für die Herstellung von 100 m<sup>2</sup> Oberbaukonstruktion und den gesamten Lebenszyklus (kursiv) dar. Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus fällt auf, dass die Oberbaukonstruktion mit Natursteinen aufgrund der sehr guten Wiederverwendbarkeit die Aufwendungen in der Herstellungsphase kompensiert. Die **Abb. 2 und 3** zeigen die Ergebnisse zum Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial über den gesamten Lebenszyklus, wobei die vier Oberbaukonstruktionen vergleichend gegenübergestellt werden.

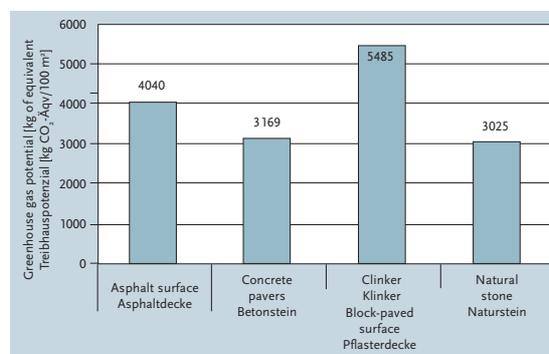
### Szenario Transportdistanzen der Natursteine

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 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 (**Abb. 4**). 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. Eine Variation der Transportszenarien in Distanz und Transportmittel hat beträchtlichen Einfluss auf die Umweltwirkungen.



**Fig. 2** Primary energy consumption over the whole life cycle, for 100 m<sup>2</sup> of road pavement on a public infrastructure roadway in accordance with Construction Class V (RStO), [MJ]/100 m<sup>2</sup>.

**Abb. 2** Primärenergiebedarf über den Lebenszyklus von 100 m<sup>2</sup> Oberbaukonstruktion einer Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V, [MJ]/100 m<sup>2</sup>,



**Fig. 3** Greenhouse gas potential over the whole life cycle for 100 m<sup>2</sup> of road pavement construction on a public infrastructure roadway in accordance with Construction Class V (RStO), [kg of equivalent CO<sub>2</sub>]/100 m<sup>2</sup>.

**Abb. 3** Treibhauspotenzial über den Lebenszyklus von 100 m<sup>2</sup> Oberbaukonstruktion einer Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V, [kg CO<sub>2</sub>-Äqv./100 m<sup>2</sup>].

	Asphalt surface Asphaltdecke	Block-paved surface Concrete pavers Pflasterdecke Betonstein	Block-paved surface Clinker pavers Pflasterdecke Klinker	Block-paved surface Natural stone Pflasterdecke Naturstein
Primary energy consumption (non-renewable) [MJ] Primärenergieverbrauch (nicht erneuerbar) [MJ]	119566 <i>117903</i>	49843 <i>44347</i>	104020 <i>87513</i>	89434 <i>46839</i>
Primary energy consumption (renewable) [MJ] Primärenergieverbrauch (erneuerbar) [MJ]	627 <i>608</i>	3993 <i>3343</i>	1108 <i>913</i>	771 <i>596</i>
GWP [kg of equivalent CO <sub>2</sub> ] 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 of equivalent R11] 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 of equivalent SO <sub>2</sub> ] 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 of equivalent PO <sub>4</sub> ] 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 of ether equivalent] 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>
GWP Global warning potential/Treibhauspotenzial ODP Ozone depletion potential/Ozonabbau-potenzial AP Acidification potential/Versauerungspotenzial EP Entrophication potential/Entrophierungspotenzial POCP Summer smogpotential/Sommersmopotenzial				

**Table 2** Summary of balancing results for the supply and over for the life cycle (*in italics*) for 100 m<sup>2</sup> of road pavement construction on a public infrastructure roadway in accordance with Construction Class V (RStO).

**Tabelle 2** Zusammenfassung der Bilanzierungsergebnisse für die Herstellung und den Lebenszyklus (*kursiv*) von 100 m<sup>2</sup> Oberbau-konstruktion für eine Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V.

ing potential by a factor of 1.9, and the acidification potential by a factor of 2.9. Varying the transport scenario in terms of distance and means of transport has a significant influence on the environmental effects. Local building materials without high transport costs are the best option in every case.

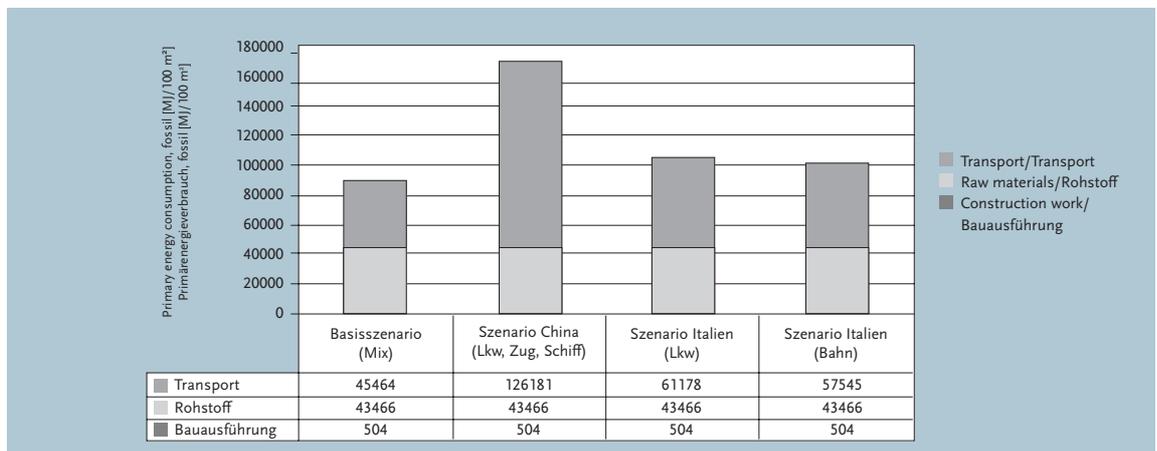
**Scenario of allocation of the refinery**

As an analytical scenario, the allocation of the refinery was varied, so as to investigate the influence on the environmental effects of the type of asphalt. The **Table 3** illus-

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 **Tabelle 3** veranschaulicht neben den Ergebnissen des Basisszenarios der Asphaltvariante Resultate für ein zweites Szenario, wonach die Umweltwirkungen von Bitumen lediglich in Abhängigkeit vom Rohölbedarf bi-



**Fig. 4** Impact of the transport of natural stone slabs on the primary energy consumption (non-renewable) for construction.

**Abb. 4** Auswirkung des Transports von Pflastersteinen aus Naturstein auf den Primärenergieverbrauch (nicht erneuerbar) der Herstellung.

trates, alongside the results for the basic scenario for the asphalt option, the results for a second scenario in which the environmental effects of bitumen were balanced solely as a function of consumption of crude oil (refinery costs were classified 100% as light products such as gas, petroleum and medium distillates).

Based on the results, it is clear that altering the allocation of the bitumen is not very significant, since the crude oil consumption is the significant factor.

### Interpretation of the results

The ecological balance method is useful in many ways. It allows a systematic comparison of construction solutions for projects such as construction of thoroughfares, and also allows analysis of the sourcing of products such as concrete paving slabs and other products for laying surfaces that carry traffic. The factory data for concrete paving slabs was collected from four regions, and it shows regional differences. The data collected can be used to determine the environmental performance, such as the primary energy consumption or the global warming potential, for the manufacturing chain for concrete paving slabs. The recipe plays a key role in production of concrete. The cement content of the paving slabs is the determining factor. The production costs in the plant show differences according to the technology used, although transport costs for all the raw materials play a less important role where the transport distances are relatively short (20 to 110 km). By taking the weighted value for the amounts produced in each plant, an average is obtained for the primary energy consumption (non-renewable) of about 1,200 MJ/m<sup>3</sup> of concrete paving slab, and a global warming potential (GWP) of about 120 kg of CO<sub>2</sub> equivalent per m<sup>3</sup>. A comparison for the surface construction of an example access road shows that using concrete paving slabs is a preferred overall solution from the point of view of the ecological balance. The present comparison of options for a typical surface construction of an access road according to Construction Class V (RStO) shows advantages for the concrete-slab option, particularly in comparison with the options using asphalt and brick paving.

In summary, for the whole cycle “from cradle to grave”, there are similar results for the concrete slab and natural stone options, based on assumed recycling quotas of 90% for natural stone and 20% for concrete slabs and on the average transport routes for natural stone. In the manufacturing phase, the concrete slab option scored the best environmental performance in all the categories that were monitored (with the exception of the ODP). The primary energy consumption is less than half of that for the asphalt and brick-paved options, and 56% of the primary energy consumption for the natural stone option. The surface constructed of concrete paving slabs also had the lowest value for global warming potential.

Observation of the total life cycle shows that surface construction using natural stone slabs makes up for its expense in the manufacturing phase by its excellent reuse potential at the end of the life cycle. In order to assess the influence of transport and importing in relation to the environmental effects of manufacture, a scenario analysis was carried out in which typical transport distances for natural stone paving slabs were evaluated. The evaluation of primary energy consumption showed clearly that, even for transport within Europe, it can cost as much to transport the natural stone paving slabs as to manufacture

	Basic scenario Asphalt surface Basisszenario Asphaltdecke	2 <sup>nd</sup> scenario Asphalt surface 2. Szenario Asphaltdecke
Primary energy consumption (non-renewable) [MJ] Primärenergieverbrauch (nicht erneuerbar) [MJ]	122.456	119.543
Primary energy consumption (renewable) [MJ] Primärenergieverbrauch (erneuerbar) [MJ]	565	551
GWP [kg of equivalent CO <sub>2</sub> ] GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente]	4.120	3.990

**Table 3** Results for construction in terms of primary energy consumption, GWP per 100 m<sup>2</sup> of road pavement construction for a public infrastructure roadway in Building Class V (RStO), by variation of allocation of bitumen.

**Tabelle 3** Ergebnisse der Herstellung zum Primärenergieverbrauch, GWP je 100 m<sup>2</sup> Oberbaukonstruktion für eine Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V nach Variation der Bitumenallokation.

lanziert wurden (Raffinerieaufwand wurde zu 100 % den leichten Produkten wie Gase, Benzin und Mitteldestillate zugerechnet).

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

### 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 und zeigt entsprechende regionale Unterschiede. 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 bis 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 je m<sup>3</sup> Pflastersteinen aus Beton sowie ein Treibhauspotenzial (GWP) von etwa 120 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro m<sup>3</sup>. Ein Vergleich für die Oberbaukonstruktionen am Beispiel einer Erschließungsstraße zeigt, dass mit Pflastersteinen aus Beton aus Sicht der Ökobilanz vorteilhafte Gesamtlösungen zu erzielen sind. Der vorliegende

them. The global warming potential for transport from overseas gave higher values than for indigenous sourcing. Local sourcing is therefore preferable in all cases. This type of sourcing for natural stone paving slabs is not sustainable.

An example makes the advantage of concrete pavement design clear: If used instead of asphalt concrete paving blocks for a 2,000 m<sup>2</sup> parking area, this design choosing will be saved as much primary energy (seen over the entire life cycle) as so the annual average power consumption of 34 German households could be met.

### References/Literatur

- [ARBIT 2008]  
Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V.: Bitumen in unserer Welt – Der richtige Weg: Wiederverwendung, im Internet erhältlich unter: <http://www.arbit.de/html/biuw19.htm>, 2008
- [CML 2001]  
Centre of Environmental Science, Leiden University (CML): Life cycle Assessment. An operational guide to the ISO standard, Wirkfaktoren im Internet, unter <http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>, 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 SoBStB 04

Variantevergleich einer typischen Oberbaukonstruktion für eine Erschließungsstraße gemäß Bauklasse V (RStO) zeigt Vorteile für die Betonstein-Variante insbesondere gegenüber der Asphaltvariante und der Klinkervariante.

Zusammenfassend ergeben sich für die Betonstein- und die Natursteinvariante ähnliche Ergebnisse von „der Wiege zur Bahre“. 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.

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. 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 diesen 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.

Ein Beispiel macht den ökobilanziellen Vorteil der Betonpflasterbauweise deutlich: Wird für einen 2.000 m<sup>2</sup> großen Parkplatz anstelle der Asphaltbauweise die Betonpflasterbauweise gewählt, wird dadurch – über den gesamten Lebenszyklus der Bauweise betrachtet – so viel Primärenergie eingespart, dass damit der Jahresstromverbrauch von 34 durchschnittlichen Privathaushalten in Deutschland gedeckt werden kann.

Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG)  
Schloßallee 10  
53179 Bonn/Germany  
Tel.: +49 228 95456-21  
Fax: +49 228 95456-90  
[slg@betoninfo.de](mailto:slg@betoninfo.de)  
[www.betonstein.de](http://www.betonstein.de)