



# **Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten**

**Research package PLANET  
EP-2: Life cycle assessment of warm mix asphalt**

**Programme de recherche PLANET  
EP-2: Analyse de cycle de vie d'asphalte à basse  
température**

**Neosys AG  
Dr. Jürg Liechti  
Dr. Annina Gaschen  
Dr.-Ing. Mathias Breimesser**

**IMP Bautest AG  
Dr. Christian Angst  
Dr. Fabrizio Gorla**

**Ammann Schweiz AG  
Lukas Boesiger  
Dr. Andrea Bieder**

**Forschungsprojekt VSS 2010/542 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

**Dezember 2016**

**1586**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten**

**Research package PLANET  
EP-2: Life cycle assessment of warm mix asphalt**

**Programme de recherche PLANET  
EP-2: Analyse de cycle de vie d'asphalte à basse  
température**

**Neosys AG  
Dr. Jürg Liechti  
Dr. Annina Gaschen  
Dr.-Ing. Mathias Breimesser**

**IMP Bautest AG  
Dr. Christian Angst  
Dr. Fabrizio Gorla**

**Ammann Schweiz AG  
Lukas Boesiger  
Dr. Andrea Bieder**

**Forschungsprojekt VSS 2010/542 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

**Dezember 2016**

**1586**

# Impressum

## **Forschungsstelle und Projektteam**

### **Projektleitung**

Dr. Jürg Liechti

### **Mitglieder**

Dr. Annina Gaschen  
Dr.-Ing. Mathias Breimesser  
Dr. Christian Angst  
Lukas Boesiger  
Dr. Andrea Bieder

## **Federführende Fachkommission**

Fachkommission 3 Baustoffe

## **Begleitkommission**

### **Präsident**

Heinz Aeschlimann

### **Mitglieder**

Hansruedi Eberhard  
Hans-Peter Beyeler  
Sandra Dünner  
Martin Horat  
Adrian Zippo  
Felix Solcà

## **Gesamtprojektleitung**

Thomas Arn

## **Antragsteller**

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

## **Bezugsquelle**

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>9</b>
<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>13</b>
1.1 Kontext – Projekt PLANET .....	13
1.2 Ausgangslage.....	14
1.3 Definition von Zielen und Systemgrenzen .....	14
1.3.1 Methodik.....	14
1.3.2 Ziel der Ökobilanz .....	14
1.3.3 Spezifikation der untersuchten Asphalt-Arten.....	15
1.3.4 Systemgrenzen .....	15
1.4 Sachbilanz (Life Cycle Inventory LCI) .....	16
1.5 Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment LCIA) .....	17
1.6 Interpretation .....	19
<b>2 Datenerhebung</b> .....	<b>21</b>
2.1 Messungen.....	21
2.2 Datenquellen .....	21
2.3 Voraussetzungen .....	21
<b>3 Resultate</b> .....	<b>23</b>
3.1 Zusammenstellung der Umweltauswirkungen für einzelne Lebensphasen.....	23
3.1.1 GWP .....	23
3.1.2 AP .....	24
3.1.3 EP .....	24
3.1.4 POF .....	25
3.1.5 OD .....	25
3.1.6 FAETP .....	26
3.1.7 HTP .....	26
3.1.8 PE.....	27
3.1.9 Shadow Costs .....	27
3.2 Dominanzanalyse.....	29
<b>4 Sensitivitätsanalyse</b> .....	<b>31</b>
4.1 Gewichtung der Wirkkategorien .....	31
4.2 Sensitivitätsanalyse: Lebensdauer des Belags.....	33
4.3 Sensitivitätsanalyse: Bitumenverbrauch und Recycling .....	34
4.4 Sensitivitätsanalyse: Leaching-Rate von PAKs während der Nutzungsphase.....	37
4.5 Sensitivitätsanalyse: Transportdistanzen.....	40
<b>5 Detailauswertung</b> .....	<b>41</b>
5.1 Phase 1: Materialien: Gewinnung primärer und sekundärer Ressourcen .....	41
5.2 Phase 2: Produktionsprozess: Herstellung von Asphalt im Mischwerk .....	45
5.2.1 Energieverbräuche .....	45
5.2.2 Emissionen aus der Mischtrommel .....	45
5.2.3 Auswertung .....	47
5.3 Phase 3: Verlad und Transport des Asphalts .....	51
5.3.1 Ressourcenverbrauch und Emissionen: LKW-Transport.....	51
5.3.2 Emissionen aus dem Mischgut: Transport und Verladevorgang .....	51
5.3.3 Auswertung .....	52
5.4 Phase 4: Einbau.....	56

5.4.1	Betrieb von Baumaschinen .....	56
5.4.2	Emissionen aus den Belagsmaterialien .....	56
5.4.3	Auswertung .....	57
5.5	Phase 5: Nutzungsphase, Unterhalt und Ausbau .....	62
5.5.1	Unterhalt und Ausbau .....	62
5.5.2	Emissionen ins Wasser .....	62
5.5.3	Auswertung .....	63
5.6	Phase 6: Bonus durch Materialrecycling .....	67
5.7	Phase 7: End-of-life: Verhalten des Materials als Abfall .....	71
5.7.1	Energie für die Abfallbehandlung .....	71
5.7.2	Leaching von Schadstoffen in Gewässer .....	71
5.7.3	Verhalten in der Deponie .....	71
5.7.4	Auswertung .....	71
<b>6</b>	<b>Diskussion und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>75</b>
	<b>Anhänge.....</b>	<b>77</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>85</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>87</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>89</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>93</b>

## Zusammenfassung

Niedertemperatur-Asphalte scheinen ein Mittel zu sein, um den Energieverbrauch und damit die Umweltbelastungen im Strassenbau zu vermindern. Niedertemperatur-Asphalte gelten dadurch als innovative umweltfreundliche Technologie, die auch im Sinne der Energiestrategie des Bundes angewendet werden sollte. Andererseits steht die Frage im Raum, inwieweit die verwendeten Additive und Produktionstechniken der Niedertemperaturasphalte Umweltbelastungen verursachen, welche die Vorteile des niedrigeren Energieverbrauchs kompensieren. Die vorliegende vergleichende Ökobilanz hat folgende fünf Asphaltarten über ihren ganzen Lebenszyklus hinweg untersucht:

- Warm verarbeiteter Asphalt mit chemischen Additiven zur Reduktion der Bitumen-Viskosität (FR-PACK).
- Warmverarbeiteter Asphalt mit Zugabe von Zeolithen (FR-ZEO)
- Warmasphalt mit Wasserzusatz zur Bildung von Schaumbitumen (FR-WATER)
- Derselbe Warmasphalt mit Wasserzusatz, jedoch mit 50% recykliertem Asphalt-Granulat (WATER-RAP)
- Heiss verarbeiteter Asphalt als Referenzmaterial (REF-HOT)

Der gesamte Lebensweg eines Asphaltbelags wurde in folgende sieben Phasen unterteilt, und deren jeweilige Ressourcenverbräuche und Emissionen einzeln bestimmt:

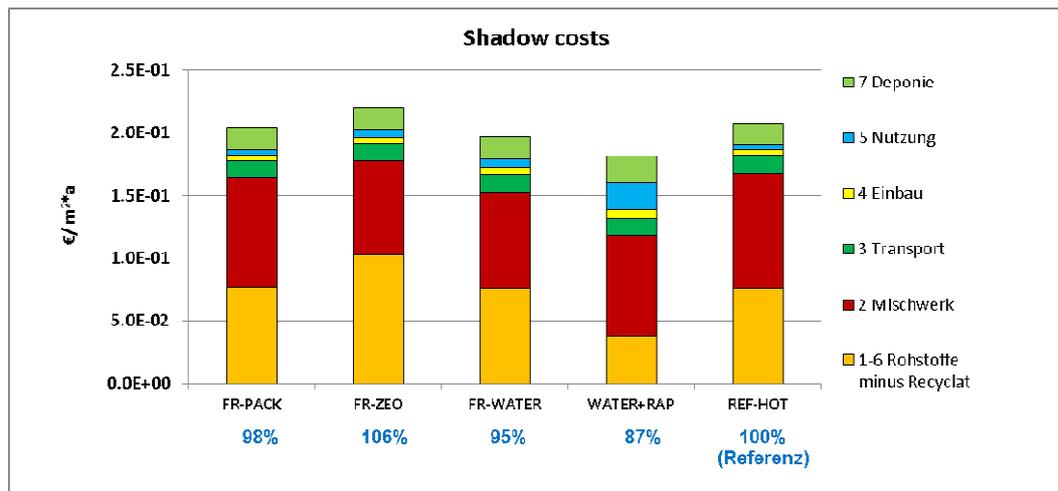
- Gewinnung / Bereitstellung der Rohstoffe
- Herstellung des Asphalts im Mischwerk
- Transporte des Asphalts
- Einbau des Asphalts in eine Strasse
- Nutzung / Gebrauch des Asphalts als Strassenbelag
- Recycling des Asphalts am Ende der Lebensdauer des Belags
- Verhalten des Asphalts als Abfall auf einer Deponie

Die Emissions- und Verbrauchsdaten wurden mit Feld- und Laborexperimenten ermittelt. Unter anderem konnte ein mehrere 100m langes Stück Kantonsstrasse in der Region Bern als Teststrecke gebaut und dabei die nötigen Messungen vorgenommen werden. Weitere Daten wurden aus Datenbanken bezogen.

Zur Quantifizierung der Emissionen, Verbräuche etc. in den gewünschten unterschiedlichen Wirkkategorien wurde auf die Ecoinvent-Datenbank zurückgegriffen. Zur Abdeckung und Quantifizierung aller relevanten Umwelteinflüsse wurden folgende Wirkkategorien ausgewählt:

- Klimaverändernde Wirkung (GWP)
- Ozonschicht abbauende Wirkung (OD)
- Versauerung von Böden (AP)
- Eutrophierung (Überdüngung) von Gewässern (EP)
- Sommersmog-bildende Wirkung (POF)
- Humantoxische Wirkung (HTP), sowie
- Toxische Wirkung auf Wasserlebewesen (FAETP)
- Primärenergieverbrauch (PE)

Die Ökobilanz wurde konform zu den ISO-Normen 14040 und 14044 durchgeführt, indem die Resultate separat in jeder einzelnen Wirkkategorie dargestellt wurden. Um dennoch eine Aggregation der Einzelkategorie-Resultate zu einem Gesamtergebnis zu ermöglichen, wurde die „Shadow Cost“-Methodik der TNO angewendet. Die gesamthafte Umweltbelastung der Asphalte wird so in Euro pro m<sup>2</sup> Belag und Jahr Nutzungsdauer gemessen. Unter Berücksichtigung aller durchgeführten Messungen und getroffenen Annahmen kommt die vergleichende Ökobilanz zu folgendem Resultat:



Dies bedeutet, dass die Niedertemperaturasphalte nicht generell besser abschneiden als die Heissasphalt-Referenz. Ohne zunächst die Verwendung von Recyclinggranulat zu betrachten, liegen die Bilanzresultate der Warmasphalte zwischen 95% und 106% der Heissasphalt-Referenz. FR-WATER (95%) zeigt dabei, dass ein Warmasphalt durchaus aufgrund des niedrigeren Energiebedarfs bei der Produktion ökologisch besser sein kann. FR-ZEO (106%) zeigt hingegen, dass der energetische Vorteil durch Nachteile bei der Verwendung von Roh- und Hilfsstoffen (hier: Zeolithe) übertrumpft werden kann. Bei der Verwendung von Wachsen (FR-PACK, 98%) gleichen sich Vor- und Nachteile annähernd aus. Das Resultat von WATER+RAP (87%) zeigt, dass die Verwendung von Recyclingmaterial im Asphalt eine signifikant bessere Ökobilanz bewirkt, selbst wenn das Recyclingmaterial moderat mit Polyzyklischen Aromaten (PAK) belastet ist. Dieses Resultat ergab aus einem ökologischen Zielkonflikt: Aufgrund des teilweisen Ausleachens der PAK weist dieser Asphalt nämlich die schlechteste Ökobilanz in der Nutzungsphase auf. Dies wird aber mehr als kompensiert durch eine massiv bessere Ökobilanz beim Rohmaterialverbrauch.

In der Gesamtwirkung dominiert die Wirkkategorie PE (Primärenergiebedarf). Dies ist allerdings hauptsächlich eine Folge des Bitumenbedarfs zur Asphaltherstellung und ist erst in zweiter Linie durch den Energieaufwand im Mischwerk gegeben.

Die Resultate schwanken zum Teil signifikant, wenn Variationen an Annahmen und Messresultaten im Rahmen der möglichen Messfehler gemacht werden. Dies wird im Kapitel 4 im Detail aufgezeigt. Unglücklicherweise ist gerade das gemessene Leaching der PAK aus dem Strassenbelag sehr schwierig auf die jahrelange Nutzungsphase zu extrapolieren, sodass die Schlussfolgerungen betreffend PAK-Emissionen mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind. Gleichzeitig führt die Giftigkeit der PAK dazu, dass geringe Fehler eine beachtliche Auswirkung auf die Bilanz haben können. Auch die wesentliche Frage, ob die verschiedenen Asphalttypen eine unterschiedliche Lebensdauer des gebauten Strassenbelags bewirken, konnte durch das „Schwester-Teilprojekt“ EP 4 nicht schlüssig beantwortet werden. Da das Bilanzresultat umgekehrt proportional mit der Lebensdauer des Belags schwankt, ist damit ebenfalls eine beträchtliche Unsicherheit der präsentierten Resultate verbunden.

Die präsentierten Resultate sind daher nicht als ‚sakrosanktes Urteil‘ über die relativen Vor- und Nachteile von Niedertemperaturasphalten anzusehen, sondern eher als experimentell gut hinterlegte Hinweise zugunsten von zwei klaren Aussagen:

- i. Niedertemperaturasphalte sind ökologisch nicht generell besser als Heissasphalte. Die ökologische Vorteilhaftigkeit hängt nebst dem Produktionsenergieverbrauch stark von weiteren Faktoren ab und muss im jeweiligen Einzelfall untersucht werden.
- ii. Wichtiger für die Ökobilanz als das Verwenden von Niedertemperaturasphalten ist das Verwenden von möglichst viel Recyclingmaterial.

## Résumé

Il semble que les asphaltes à basse température sont un moyen pour réduire l'utilisation d'énergie et en conséquence la pollution dans le secteur des constructions routières. Ce faisant, les asphaltes à basse température ont la réputation d'une technologie écologique, qui devrait aussi être utilisée d'après la stratégie énergétique de l'état. De l'autre côté il se pose la question à quel point les additifs et les techniques des productions utilisés causent des pollutions eux-mêmes, ce qui compensent les bénéfices de la basse consommation énergétique. Cette analyse de cycle de vie comparative a examiné les cinq sortes d'asphalte suivantes:

- Asphalte à basse température avec additives chimiques pour réduire la viscosité du bitume (FR-PACK).
- Asphalte à basse température avec l'addition des zéolithes et de l'eau (FR-ZEO)
- Asphalte à basse température avec l'addition de l'eau, pour former de bitume mousse (FR-WATER)
- Le même asphalte avec l'addition de l'eau, mais contenant 50% de granule d'asphalte recyclé (WATER-RAP)
- Asphalte à haute température comme matériaux de référence (REF-HOT)

Le cycle de vie d'un asphalte a été divisé en sept phases et les consommations de ressource et les émissions ont été déterminées pour chacune de ces phases:

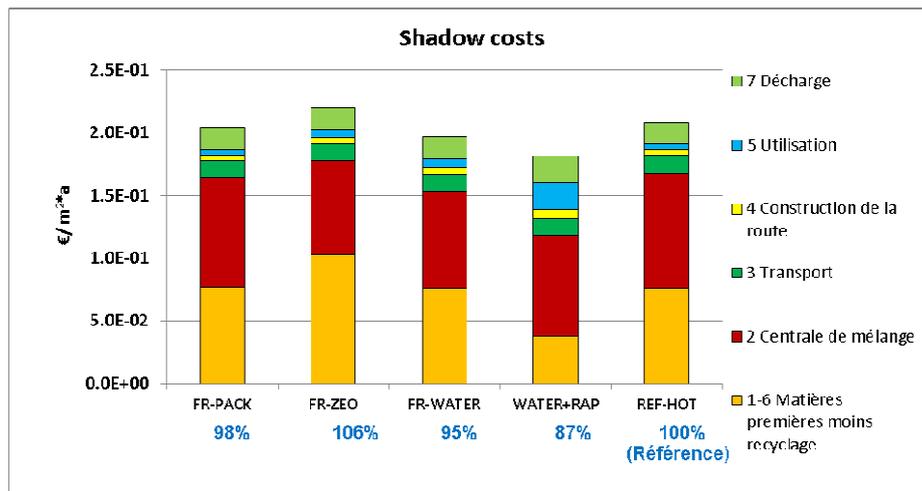
- Extraction / préparation des matières premières
- Production d'asphalte
- Transport d'asphalte
- Implantation de l'asphalte dans une route
- Usage de l'asphalte comme revêtement routier
- Recyclage de l'asphalte à la fin de vie du revêtement
- Comportement de l'asphalte comme déchets sur un dépôt de déchets

Les données d'émission et de consommation des matières premières ont été déduites avec des expériences sur le terrain et en laboratoire. Une de ces expériences a eu lieu dans la région de Berne en utilisant une partie de route (100m) pour faire les mesures nécessaires. Des données supplémentaires ont été prises des banques de données.

La banque de données Ecoinvent a été utilisée pour quantifier les émissions, les consommations des matières premières, etc. dans les différentes catégories d'impact. Pour prendre en compte tous les impacts environnementaux, les catégories d'impact suivantes ont été identifiées:

- Changement climatique (GWP)
- Destruction de l'ozone (OD)
- Acidification des sols (AP)
- Eutrophisation des eaux (EP)
- Formation de smog (été) (POF)
- Impact toxicologique pour l'humain (HTP)
- Impact toxicologique pour les organismes aquatique (FAETP)
- Consommation d'énergie primaire (PE)

En présentant les résultats séparément pour chaque catégorie d'impact l'analyse de cycle de vie a été réalisée selon les standards des normes ISO 14040 et 14044. Pour résumer ces résultats des catégories individuelles en un seul résultat d'ensemble, la méthode „shadow cost“ de TNO a été utilisée. La pollution totale de l'asphalte est alors mesurée en euro par m<sup>2</sup> revêtement et par année d'utilisation. En considération des toutes les mesures et des hypothèses, l'analyse de cycle de vie arrive au résultat suivant:



Il est possible de dire qu'en général l'asphalte à basse température n'est pas meilleur que la référence d'asphalte à haute température. Sans considérer l'utilisation des matériaux recyclés, les résultats de l'asphalte à basse température varient entre 95% et 106% de la référence de l'asphalte à haute température. FR-WATER (95%) montre que l'asphalte à basse température peut être plus écologique grâce à sa basse consommation d'énergie pour la production. FR-ZEO (106%) par contre montre que les désavantages de l'utilisation des matières premières et des additifs (ici: zéolithe) peuvent dominer l'avantage énergétique. En utilisant des cires (FR-PACK, 98%), les avantages et les désavantages sont presque équilibrés. Le résultat de WATER+RAP (87%) montre que l'analyse de cycle de vie est considérablement meilleure en utilisant des matériaux recyclés dans l'asphalte, même si ceux-ci sont pollués avec des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ce résultat est l'effet d'un conflit d'objectifs écologiques: à cause de la lixiviation possible des HAP, l'analyse de cycle de vie pour cet asphalte est la plus mauvaise en termes de phase d'utilisation. Mais ce désavantage est largement compensé en utilisant beaucoup moins de matière première pour la production.

Le résultat d'ensemble est dominé par la catégorie d'impact PE (Consommation d'énergie primaire). Cette forte influence est conséquence d'utilisation de bitume pour la production d'asphalte. La consommation énergétique pour la production n'est que la deuxième raison pour ce résultat.

En faisant des variations des hypothèses et des mesures, les résultats peuvent fluctuer fortement. Ces variations sont faites dans le cadre des erreurs de mesure possibles. Ceci est expliqué plus en détail au chapitre 4. Malheureusement, il est très difficile d'estimer la quantité de la lixiviation pour toute la période d'utilisation. Par conséquent, les conclusions concernant les HAP sont très incertaines/vagues. A cause de la toxicité des HAP, une petite faute peut avoir des conséquences importantes pour le résultat de l'analyse. Une question centrale c'est si les différents types d'asphalte influencent la durée de vie des revêtements routiers. Cette question n'était pas non plus répondue concluant par le sous-projet sœur EP 4. Vu que le résultat de l'analyse varie inversement proportionnel avec la durée de vie du revêtement, il existe une deuxième grande incertitude en regardant le résultat présenté.

Le résultat présenté ne peut donc pas être traité comme un résultat définitif pour les avantages et les désavantages de l'asphalte à basse température. Il est plutôt une indication bien documentée sur deux déclarations:

- i. Des asphaltes à basse température ne sont en général pas plus écologiques que les asphaltes à haute température. Les avantages écologiques dépendent non seulement de la consommation d'énergie pour la production mais aussi des autres facteurs. Par conséquent il faut regarder chaque cas séparément.
- ii. Il est plus important pour l'analyse de cycle de vie d'utiliser le plus possible des matériaux recyclés que d'utiliser des asphaltes à basse température.

## Summary

Low-temperature asphalts appear to be a means to reduce energy consumption and hence the ecological impact of road construction. Low-temperature asphalts are therefore regarded as an innovative, environmentally friendly technology, which also serve to meet the Federal Government's energy strategy. On the other hand, the question arises as to what extent the applied additives and production technology cause an environmental impacts which outweigh the benefits of reduced energy consumption. In the present comparative life cycle assessment, the following five types of asphalt were examined over their entire life cycle:

- Warm mix asphalt with chemical additives for reduced bitumen viscosity (FR-PACK).
- Warm mix asphalt with added zeolites and water (FR-ZEO)
- Warm mix asphalt with added water, forming foamed bitumen (FR-WATER)
- The same warm mix asphalt with added water, but composed of 50% recycled asphalt granulate (WATER-RAP)
- Hot mix asphalt as reference material (REF-HOT)

The entire life span of an asphalt pavement was divided into the following seven categories, and the respective resource consumptions and emissions were determined separately:

- Extraction / supply of resources
- Asphalt production in the mixing plant
- Transport of asphalt
- Asphalt paving
- Use of asphalt as road pavement
- Asphalt recycling at the end of the pavement's life span
- Behaviour of asphalt as waste in a landfill

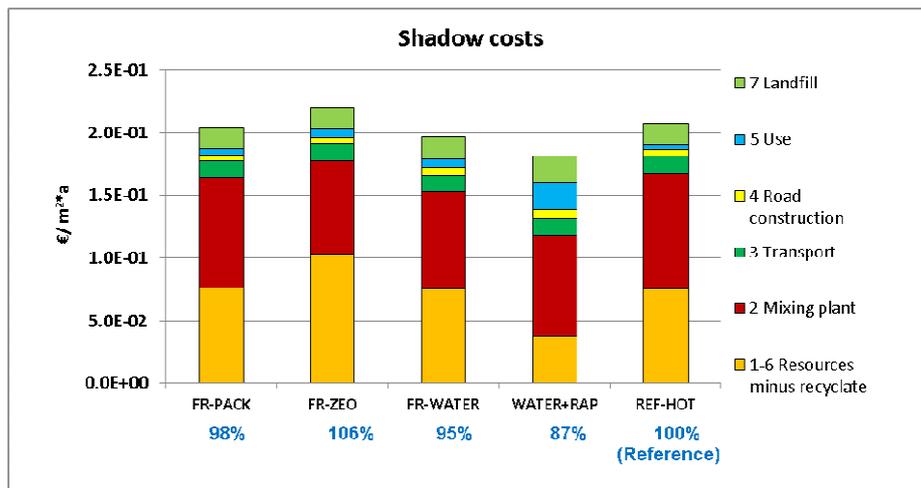
Consumption and emission data were determined by means of field and laboratory experiments. The research included constructing a several hundred meter section of cantonal road in the region of Berne to use as a test area, in order to undertake the necessary measurements. Further data were obtained from databases.

To quantify the emissions, resource consumptions, etc. in the respective impact categories, the Ecoinvent database was used. The following impact categories were selected to cover and quantify all relevant environmental effects:

- Global warming potential (GWP)
- Stratospheric ozone depletion (OD)
- Acidification of soils (AP)
- Eutrophication (over-fertilisation) of water bodies (EP)
- Summer smog potential (POF)
- Human toxicity effects (HTP), as well as
- Toxic effects on water creatures (FAETP)
- Primary energy consumption (PE)

This life cycle assessment was conducted in accordance with ISO-standards 14040 and 14044, as the results are presented separately in each impact category. To allow an aggregation of each category's result into an overall result, the „shadow cost“ methodology by TNO was applied. The total environmental impact of the asphalts is therefore measured in EUR per m<sup>2</sup> of pavement and year of use.

In consideration of all measurements performed and assumptions made for this comparative life cycle assessment, the following result was obtained:



This means that low temperature asphalts do not generally perform better than the hot mix reference. Without considering the performance of recycled granulate, the results of the impacts assessment for warm mix asphalts are between 95% and 106% of that of the hot mix reference. As shown for FR-WATER (95%), warm mix asphalts can indeed be ecologically favourable because of the lower energy demand during production. On the other hand, FR-ZEO (106%) shows that the energy benefits can be outweighed by impacts arising through the use of raw materials and additives (in this case: zeolite). When wax based additives are used (FR-PACK, 98%), advantages and disadvantages almost cancel each other out. The result for WATER+RAP (87%) shows, that the use of recycling material in asphalt leads to a significantly better life cycle assessment, even when the recycled material is moderately loaded with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). This result was achieved despite there being an inherent conflict of ecological goals. Partial leaching of PAH causes this asphalt to exhibit the worst environmental impact during the use phase, however this was more than compensated by a significantly favourable environmental impact during the resource consumption phase.

The dominant impact category proved to be PE (Primary energy demand). This is however mainly the result of the use of bitumen for asphalt production, and only secondly by energy consumption at the mixing plant.

Some of the results vary considerably when certain assumptions and experimental data are varied within the range of possible measuring errors. This is shown in detail in chapter 4. Unfortunately, the measured leaching of PAH from road pavement was especially difficult to extrapolate over the entire life span. Conclusions on PAH emissions can therefore only be made with a considerable degree of uncertainty. At the same time, the high toxicity of PAH causes small errors to have a potentially significant effect on the final impact. Furthermore, the essential question of whether different asphalt types produce different road life spans could not be answered conclusively by the „sister part project“ EP4. Due to the result of the analysis being directly related to the life span of the road (whereby the longer live span leads to a better result), this is a further cause for uncertainty in the presented results

The presented results should therefore not be regarded as a ‚sacrosanct decision over the relative advantages and disadvantages of low temperature asphalts, but rather as indications, which are well supported by experimental data, of two clear statements:

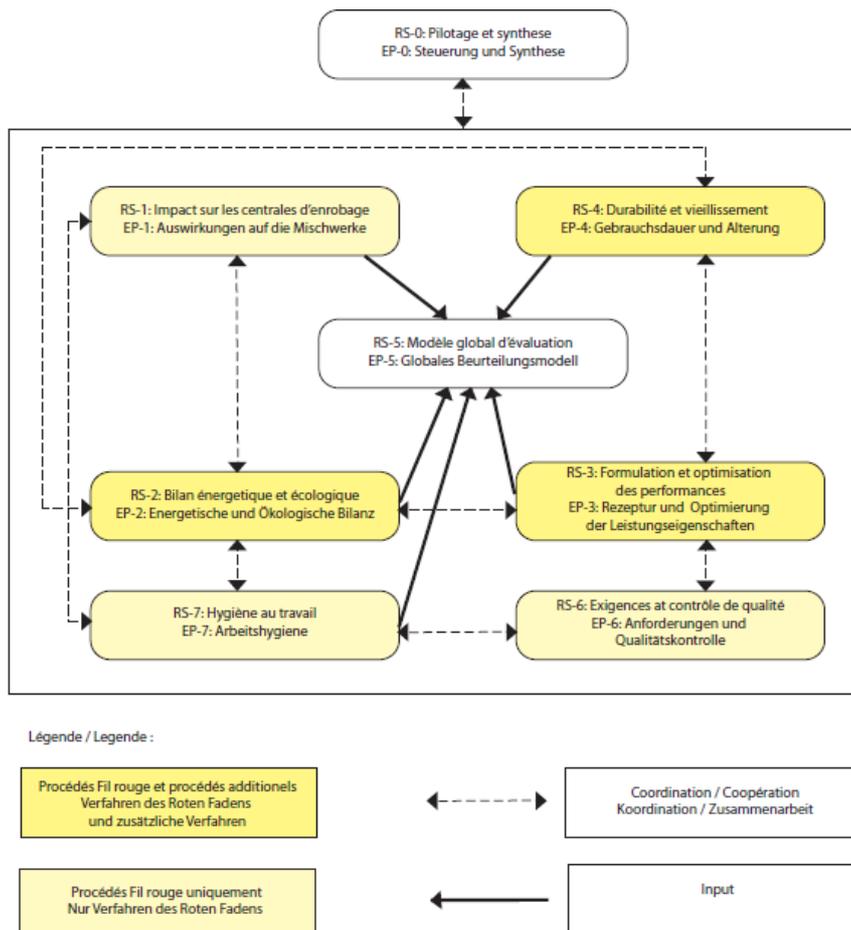
- i. Low-temperature asphalts are not generally environmentally better than high-temperature asphalts. The ecological advantages depend strongly on several factors on top of energy consumption during production, and needs to be evaluated for each individual case separately.
- ii. Using as much recycled material as possible is a more important factor in reducing the environmental impact than the application of warm mix asphalts.

# 1 Einleitung

## 1.1 Kontext – Projekt PLANET

Das Projekt PLANET (Potential und Analyse der Niedertemperatur-Asphalte) ist ein Forschungspaket des Bundesamtes für Strassen ASTRA, welches auf Vorschlag der VSS initiiert wurde. Das Projekt hat das Ziel, eine wissenschaftliche und technische Basis für die Förderung und weitgehende Nutzung von Niedertemperaturasphalten in der Schweiz zu bestimmen, sodass die energetische und ökologische Belastung minimiert werden kann. Schlussendlich sollen die Eigenschaften und Ansprüche für eine optimale Nutzung von Niedertemperaturasphalten ermittelt werden. Das Projekt umfasst folgende Teilprojekte, welche jeweils einen Aspekt der Gesamtproblematik behandeln (siehe Abbildung 1):

- EP-1 (VSS 2010/541): Auswirkungen auf die Mischwerke
- EP-2 (VSS 2010/542): Energetische und ökologische Bilanz der Aufbereitung
- EP-3 (VSS 2010/543): Rezeptur und Optimierung des Leistungsumfangs
- EP-4 (VSS 2010/544): Gebrauchsdauer und Alterung
- EP-5 (VSS 2010/545): Globales Auswertungsmodell
- EP-6 (VSS 2010/546): Anforderungen und Qualitätskontrolle
- EP-7 (VSS 2010/547): Arbeitshygiene



**Abbildung 1** Organigramm des Projekts «PLANET».

Das vorliegende Teilprojekt EP-2 stützt sich zum Teil auf Daten anderer Forschungsprojekte. Insbesondere Daten des Teilprojekt EP-7 Arbeitshygiene fanden Eingang in die Ökobilanz der verschiedenen Belagsmaterialien.

## 1.2 Ausgangslage

In der Schweiz und Liechtenstein werden jährlich in rund 100 stationären Produktionsanlagen gegen fünf Millionen Tonnen Mischgut produziert und verarbeitet. Bituminöses Mischgut ist der am meisten verwendete Baustoff zur Herstellung von Asphaltsschichten und nimmt im modernen Strassen- und Autobahnbau und bei den Massnahmen zur Erhaltung bestehender Strassen eine dominierende Stellung ein. Der Bedarf an Walzasphalt wird auch in Zukunft vorhanden sein, weil Strassenbeläge von Zeit zu Zeit erneuert werden müssen, was insbesondere auch zu einem erheblichen Anfall von Recyclingmaterial führt. Andererseits werden die Walzasphalt-Produkte laufend weiter entwickelt (Haltbarkeit, Lärmdämmung, etc.), was zusätzlich zu Ersatzbedarf führt.

Die Aufbereitungsanlagen sind daran interessiert, Produkte auf den Markt zu bringen, die weniger heiss ausgeliefert werden müssen: Durch eine Temperaturabsenkung von z.B. 20 °C könnten dabei in der Produktion gut 5 kWh/t eingespart werden. Dies bezogen auf typische Werte von 80 kWh/t (thermisch) plus 8 kWh/t (elektrisch). Neben Kosteneinsparungen werden für eine Temperaturabsenkung auch ökologische Vorteile erwartet: Einerseits werden CO<sub>2</sub>-Emissionen des Herstellungsprozesses gesenkt, andererseits können mit der Verarbeitung bei tieferen Temperaturen die Schadstoffemissionen aus dem Asphalt reduziert werden.

Um eine tiefere Verarbeitungstemperatur zu ermöglichen, werden Asphalte mit Additiven versetzt. Eine Vielzahl derartiger Niedertemperatur-Asphalte ist auf dem Markt erhältlich, und eine Beurteilung der einzelnen Produkte bezüglich mechanischer, energetischer und ökologischer Eigenschaften wird für die Endabnehmer zunehmend schwieriger. Insbesondere ist unklar, welchen Effekt unterschiedliche Additive auf das Umweltverhalten der Beläge haben. In diesem Teilprojekt des Forschungspaketes PLANET wurde versucht, die positiven und negativen Effekte von Niedertemperatur-Asphalten zu identifizieren und zu quantifizieren. Dies umfasst die Ressourcenbereitstellung, Fertigungs-, Einbau-, und Entsorgungsprozesse und die damit zusammenhängenden Schadstoffemissionen. Der Vorliegende Bericht stützt sich dabei auf Feldmessungen und Laborversuche, ergänzt durch Datenerhebungen aus den anderen Teilprojekten des Forschungspaketes PLANET.

## 1.3 Definition von Zielen und Systemgrenzen

### 1.3.1 Methodik

Die Erstellung einer Ökobilanz unterliegt ISO-Standards: Nach ISO 14040 und 14044 muss eine Ökobilanz in vier Schritten ausgeführt werden:

- Definition von Zielen und Systemgrenzen
- Erstellen der Sachbilanz (engl. life cycle inventory, LCI)
- Wirkungsabschätzung (engl. life cycle impact assessment, LCIA)
- Interpretation der Resultate (Dominanz- und Sensitivitätsanalysen, Monetarisierung)

Die vorliegende Ökobilanz wurde in Übereinstimmung mit diesen ISO-Standards erstellt.

### 1.3.2 Ziel der Ökobilanz

Einer der Hauptvorteile der Niedertemperaturasphalte liegt in den von den Herstellern angepriesenen energetischen und ökologischen Gewinnen. Diese energetischen und ökologischen Aspekte sind ein Schlüsselement im Entscheidungsprozess und müssen im Vergleich mit den traditionellen Heissasphalten bewertet werden. Das Ziel dieser Ökobilanz ist die Erstellung einer globalen energetischen und ökologischen Bilanz der

Niedertemperaturtechnologien um die Umweltwirkungen dieser Asphaltarten mit konventionellem heissverarbeitetem Asphalt zu vergleichen.

### 1.3.3 Spezifikation der untersuchten Asphalt-Arten

Es wurden fünf verschiedene Asphalte untersucht, welche sich insbesondere in Ihrer Zusammensetzung und Verarbeitungstemperatur unterscheiden:

- FR-PACK: Warm verarbeiteter Asphalt mit chemischen Additiven zur Reduktion der Bitumen-Viskosität. Die Additive werden dem Bindemittel zugeführt, bevor das Material in den Asphaltmischer gefüllt wird.
- FR-ZEO: Warm verarbeiteter Asphalt mit Zugabe von Zeolithen.
- FR-WATER: Warm verarbeiteter Asphalt mit Wasserzugabe. Durch die Zugabe von Wasser wird der Bitumen aufgeschäumt, die Viskosität sinkt dabei stark ab, während das Volumen erhöht wird.
- WATER+RAP: Warm verarbeiteter Asphalt mit Wasserzugabe, zusätzlich 50% recyklierten Asphalt-Granulat (RAP).
- REF-HOT: Referenzprobe eines herkömmlichen, heiss verarbeiteten Asphalts.

Für sämtliche Asphalte sind Materialdichte (ca. 2'400 kg/m<sup>3</sup>) und Einbaudicke im Strassenbelag (0.065 m) identisch.

**Hinweis zum Vergleich mit EP-5 (1):** Die im Berechnungsbeispiel des Teilprojekts EP-5 untersuchten Beläge waren REF-HOT, FR-PACK sowie FR-WAX, PA-HWAM und EBT. Ein Vergleich der Ergebnisse der zwei Teilprojekte EP-2 und EP-5 ist daher nur für die Beläge REF-HOT und FR-PACK möglich.

### 1.3.4 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen der vorliegenden Studie sind in Abbildung 2 dargestellt. Die untersuchte Lebensspanne umfasst die Rohstoffgewinnung, die Herstellung des Mischgutes, Transport und Einbau des Belages, Nutzung, Instandhaltung, Rückbau, Recycling und Deponierung. Nicht berücksichtigt wurde der Bau von Maschinen und Produktionsstätten.

**Hinweis zum Vergleich mit EP-5 (1):** Im Berechnungsbeispiel des Teilprojekts EP-5 wurden die Phasen 1 bis 4 erfasst. Das Verhalten während der Nutzungsphase (Phase 5) wurde in Form von Performance-Indices in der Bewertung berücksichtigt, das Recycling (Phase 6) ist in Form eines qualitativen Kriteriums der Recyklierbarkeit im Modell enthalten.

Die **funktionelle Einheit** für die Ökobilanz ist 1 m<sup>2</sup>-a bezogen auf die Nutzung des fertigen Strassenbelags.

**Hinweis zum Vergleich mit EP-5 (1):** Im Berechnungsbeispiel von EP-5 wurde in Abweichung zu EP-2 als funktionelle Einheit die Herstellung von einer Tonne Belagsmaterial gewählt. Während die Qualität des Belags in EP-2 anhand der Lebensdauer Eingang in die Bilanzierung findet, erfolgt in EP-5 eine separate Beurteilung der Belagsqualität anhand verschiedener Performance-Indikatoren, jedoch nicht der Lebensdauer. In beiden Teilprojekten wird von einer Einbaudicke von 0.065 m ausgegangen.

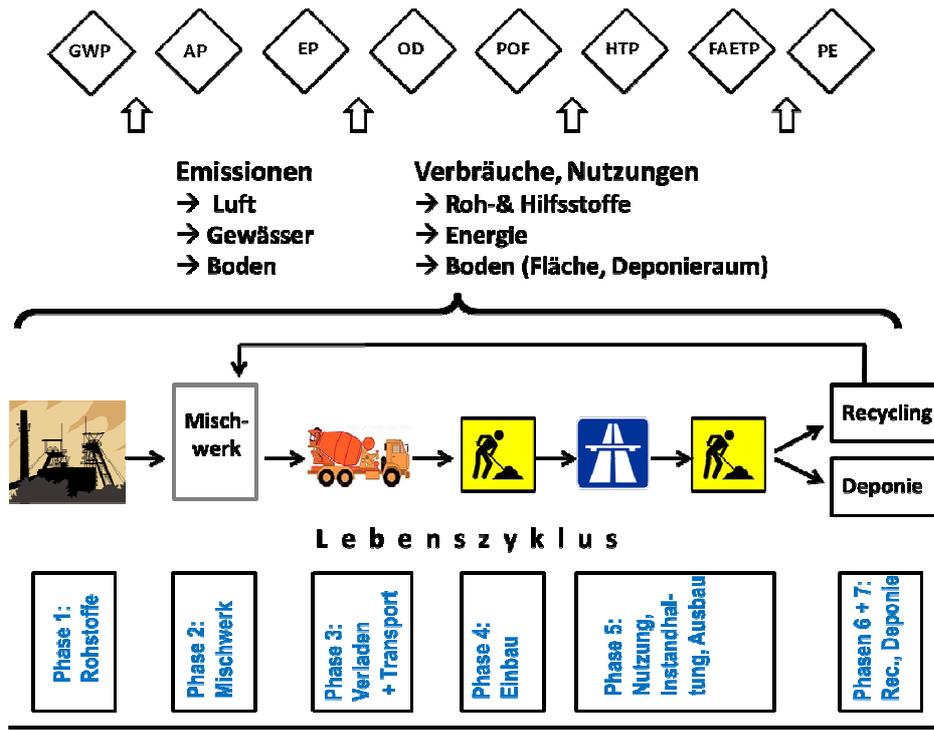


Abbildung 2 Struktur der Ökobilanz. Nutzungsphasen und untersuchte Indikatoren.

## 1.4 Sachbilanz (Life Cycle Inventory LCI)

Abbildung 3 zeigt die untersuchten Umweltauswirkungen sowie ihre Zuordnung zu den Lebensphasen:

- Phase 1: Materialien: Gewinnung primärer und sekundärer Ressourcen.  
Diese Phase umfasst Umweltauswirkungen, welche bei der Gewinnung von Kies, Sand, Bitumen, Wachs, Bindemitteln und weiteren Chemischen Zusätzen auftreten.
- Phase 2: Produktionsprozess: Herstellung von Asphalt im Mischwerk.  
Diese Phase umfasst Ressourcenverbräuche (Strom, Heizöl, Gas) und Abgas-Emissionen von Mischwerk und Hilfsfahrzeugen (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Staub, VOC, PAK).
- Phase 3: Verladen und Transport des Asphalts.  
Umweltauswirkungen der Phase 3 setzen sich einerseits aus Energieverbräuchen für Transport und Warmhalten des Mischgutes (Diesel, Gas), andererseits aus Emissionen während des Transports zusammen. Es wurden Emissionen der Transportfahrzeuge (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Staub, HC, Dieseleruss) und des heißen Mischgutes (VOC, PAK, Staub) berücksichtigt.
- Phase 4: Einbau.  
Analog zur Phase 3 sind in Phase 4 Energieverbräuche (Diesel, Gas) für den Einbauprozess, sowie die dabei entstehenden Luftemissionen (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Staub, HC, Dieseleruss, VOC, PAK) berücksichtigt. Zusätzlich berücksichtigt wurde das Leaching von Schadstoffen aus dem Mischgut ins Wasser.
- Phase 5: Nutzungsphase, Unterhalt und Ausbau.  
Leaching von Schadstoffen (PAK) während der Nutzungsphase sowie Energieverbräuche (Diesel, Gas) und Emissionen (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Staub, HC, Dieseleruss) von Instandhaltungs- und Ausbauarbeiten wurden in dieser Phase erfasst.
- Phase 6: Bonus durch Materialrecycling.  
Die Einsparung von Ressourcenverbräuchen und Emissionen durch die Gewinnung von Recyclingmaterial aus alten Belägen wird in dieser Phase berücksichtigt.
- Phase 7: End-of-life: Verhalten des Materials als Abfall.

Das End-of-life Verhalten umfasst Ressourcenverbräuche (Diesel, Gas) für die Behandlung und Deponierung von Altbelag, sowie die Emissionen in Luft (VOC, PAK, Staub) und Wasser (PAK) aus Behandlungsprozessen und Deponierung.

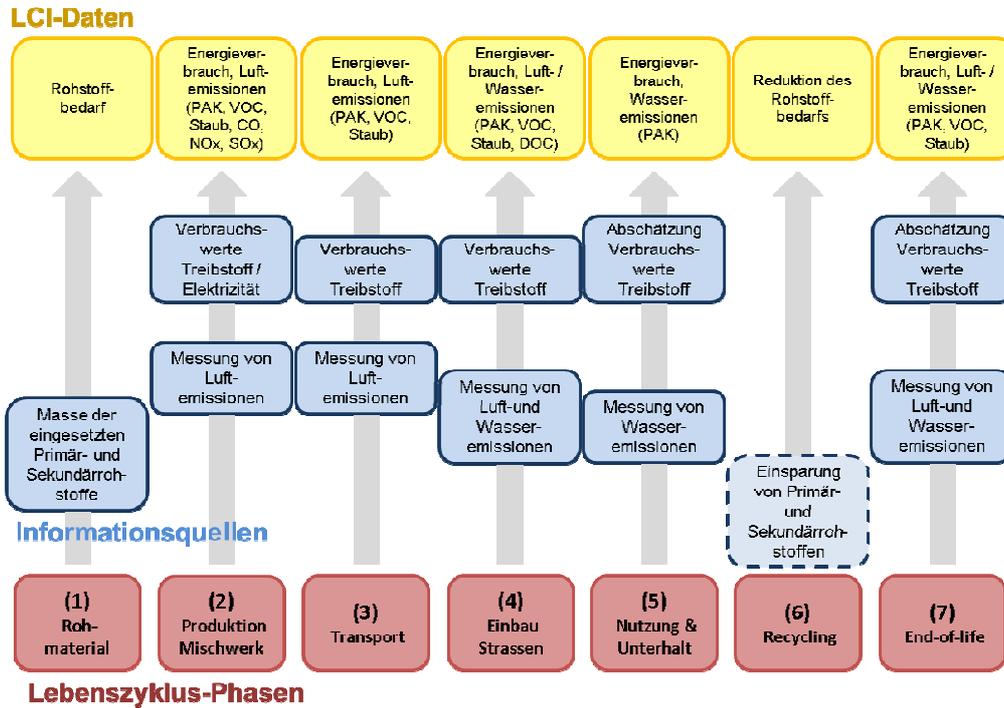


Abbildung 3 Untersuchte Phasen des Lebenszyklus.

## 1.5 Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment LCIA)

Zur Abdeckung aller relevanten Umwelteinflüsse wurden 8 Wirkkategorien und Indikatoren ausgewählt (siehe Tabelle 1). Es existiert keine Standard-LCA-Methodologie, welche genau diese Auswahl an Wirkkategorien abdeckt. Sieben der acht gewählten Kategorien sind jedoch Bestandteil der CML-Methode, benannt nach dem Institute of Environmental Sciences (CML) an der Universität Leiden, wo die Methode entwickelt wurde (2).

Nicht Teil der CML-Methode ist die Quantifizierung des Energieverbrauchs. Diese ist jedoch von zentraler Bedeutung für die vorliegende Studie. Für die Verwendung von Niedertemperatur-Asphalten wird ein geringerer Energieverbrauch erwartet, als für herkömmliches Hochtemperatur-Mischgut. Um dies zu untersuchen wurde daher als achte Wirkungskategorie der Primärenergieverbrauch (PE) in die Studie aufgenommen.

Zur Quantifizierung der unterschiedlichen Wirkkategorien wurde auf Daten der Ecoinvent-Datenbank (Version 2, Data V2.2) zurückgegriffen (3). Zur Ermittlung des gesamten Primärenergieverbrauchs wurden Werte der Ecoinvent-Datenbank für nicht-erneuerbare Energieträger (Kohle, Erdöl, Uran, ...) und erneuerbare Energieressourcen (Wind- und Wasserkraft, Photovoltaik, ...) aufsummiert.

**Tabelle 1** Ausgewählte Wirkkategorien und Indikatoren für die vorliegende Ökobilanz.

Wirkkategorie	Indikator	Einheit
Treibhauseffekt, Klima	GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq
Versauerung der Böden	AP	kg SO <sub>2</sub> -eq
Eutrophierung der Gewässer	EP	kg NO <sub>x</sub> -eq
Sommersmog-Bildung	POF	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq
Ozonschichtabbau	OD	kg CFC11-eq
Wassertoxizität	FAETP	kg 1,4-DCB-eq
Humantoxizität	HTP	kg 1,4-DCB-eq
Primärenergieverbrauch	PE	MJ-eq
Treibhauseffekt, Klima	GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq

**Hinweis zum Vergleich mit EP-5 (1):** Im Berechnungsbeispiel des Teilprojekts EP-5 wurden andere und eine geringere Anzahl von Umweltindikatoren untersucht. Insbesondere wurden Human- und Wassertoxizität nicht berücksichtigt, womit die Problematik eines möglichen PAK-Leachings der Materialien (vgl. Abschnitt 4.4) anhand der Kriterien von EP-5 nicht registriert und bewertet wird. Sowohl in EP-5 als auch in EP-2 wurde die Kategorie GWP berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.1.1).

## 1.6 Interpretation

Im angewandten Modell werden Umweltauswirkungen anhand der beschriebenen acht Wirkkategorien beurteilt. Dies erlaubt den Vergleich der untersuchten Asphalte untereinander in jeder der Kategorien. Um die untersuchten Asphalte jedoch gesamthaft miteinander zu vergleichen, müssen die Auswirkungen in den einzelnen Wirkkategorien auf eine gemeinsame Währung umgerechnet und aufsummiert werden. Nur so ist es beispielsweise möglich, eine erhöhte klimaschädigende Wirkung von Belag A mit dem Beitrag zur Sommersmogbildung von Belag B in Relation zu setzen.

Eine Aggregation der verschiedenen Umweltauswirkung kann anhand der sogenannten Shadow Price Methode erfolgen (4). Im Rahmen dieser Methode werden die verschiedenen Wirkkategorien anhand eines Geldwertes (Shadow Cost) gewichtet. Der Wert repräsentiert dabei die Bereitschaft einer Volkswirtschaft, Mittel zur Behebung von Umweltschädigung aufzuwenden. Die „Shadow Costs“ einer Umweltbelastung entsprechen dem maximalen Betrag, den eine Bevölkerung bereit ist, für die Beseitigung oder Verhinderung eines resultierenden Umweltschadens aufzubringen. Weitere Methoden zur Aggregation von Umweltauswirkungen sind im Teilprojekt EP-5 beschrieben (1).

**Hinweis zum Vergleich mit EP-5:** Mit der Wahl der Shadow Price Methode und der Festlegung der Shadow Cost Faktoren ist die Gewichtung der einzelnen Wirkkategorien festgelegt. Demgegenüber bietet das in EP-5 beschriebene Bewertungsmodell die Möglichkeit, die Gewichtung einzelner Wirkkategorien jederzeit anzupassen. Die Wahl der Gewichtung muss in jedem Fall solide abgestützt und begründet werden, da das Resultat einer vergleichenden Ökobilanz in hohem Mass von der Gewichtung der einzelnen Faktoren abhängt.

Die Shadow Costs der einzelnen Wirkkategorien sind zeitlichen Veränderungen unterworfen und variieren von Land zu Land. Für Länder mit hinreichend ähnlichen Wirtschaftssystemen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Verhältnis der Werte untereinander vergleichbar ausfällt. In der vorliegenden Studie wurde auf Literaturwerte zurückgegriffen, welche für die ökonomischen Bedingungen in den Niederlanden ermittelt wurden.

Der Faktor Primärenergie repräsentiert keine direkte Umweltschädigung. Zum Vergleich mit den Shadow Costs der übrigen Kategorien wird für Primärenergie ein mittlerer Preis für Primärenergie verwendet, abgeleitet aus den aktuellen Preisen für Gas, Öl und Elektrizität. Für die vorliegende Studie wurde ein Preis von 0.0163 € / MJ angenommen.

In Abbildung 4 ist das Prinzip der Methode illustriert, und die Gewichtungsfaktoren für die untersuchten Wirkkategorien, welche in dieser Studie verwendet wurden, sind angegeben.

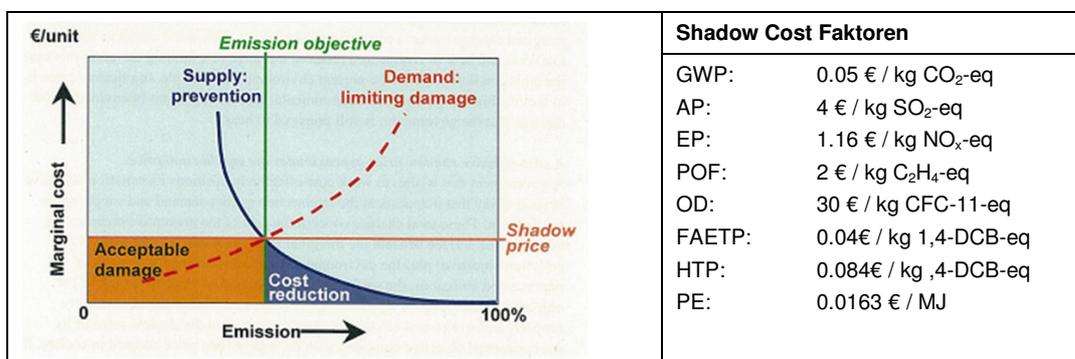


Abbildung 4 Shadow Price und Shadow Cost-Faktoren.



## 2 Datenerhebung

### 2.1 Messungen

Zur Datenerhebung wurden Betriebsdaten, Feld- und Labormessungen kombiniert. Feldmessungen für Phase 2 umfassten die Emissionen im Mischwerk. Im Rahmen von Feldmessungen wurden in Phase 4 der Treibstoffverbrauch der eingesetzten Baumaschinen und deren Einsatzdauer ermittelt und die Emissionen in die Luft während des Einbaus gemessen.

Labormessungen wurden für das Leaching von Schadstoffen aus dem Asphalt angewandt, sowie zur Bestimmung der PAK-Emissionen in die Luft während des Transports (Konzentrationsmessung im Asphalt vor und nach Transport).

### 2.2 Datenquellen

Wirkfaktoren wurden zum grössten Teil aus der Ecoinvent-Datenbank bezogen. Diese umfasst LCIA-Daten für ein weites Spektrum von Materialien und Prozessen, und deckt die Wirkkategorien der gebräuchlichen Ökobilanzierungsmethoden ab. Eine detaillierte Auflistung der verwendeten Daten findet sich im Anhang. Wo die Ecoinvent-Datenbank keine Wirkfaktoren lieferte, wurde insbesondere auf den Operational Annex Part 2 des CML-Handbuches (5) zurückgegriffen.

### 2.3 Voraussetzungen

Zur Erstellung der Sachbilanz wurde eine Reihe von Grundannahmen getroffen. Diese sind in Tabelle 2 aufgelistet.

**Tabelle 2** Grundannahmen zur Erstellung der Sachbilanz.

Prozess / Produkt	Annahme
Lebensdauer	Entsprechend den Resultaten des Teilprojekts EP-4 „Gebrauchsdauer und Alterung“ (6). Nachdem dieses Teilprojekt keine schlüssigen Hinweise auf eine unterschiedliche Gebrauchsdauer der verglichenen Asphalte ergeben hat, wird für alle Beläge eine Lebensdauer von 25 Jahren angenommen. Der Einfluss der Lebensdauer auf das Endresultat ist in Kapitel 4.2 untersucht.
Einbauparameter	Für alle Beläge: Dicke 0.065m, Einbaudichte ca. 2'400 kg/m <sup>3</sup>
Recycling	Ein Recyclinganteil von 70% für Kies, Sand und Bitumen wird angenommen. Additive werden nicht berücksichtigt.
Deponierung	Ablagerung auf einer Reaktordeponie und somit kein langfristiges Leaching.
Stromverbrauch Mischwerk	Strommix CH

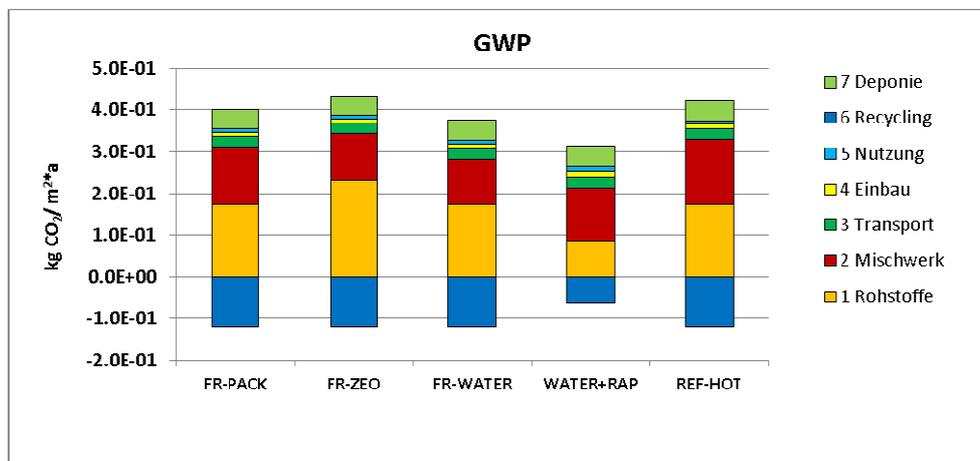


## 3 Resultate

### 3.1 Zusammenstellung der Umweltauswirkungen für einzelne Lebensphasen.

In den Abschnitten 3.1.1 bis 3.1.9 sind die einzelnen Umweltauswirkungen sowie die daraus errechneten Shadow Costs der verschiedenen Asphaltarten gegenübergestellt. Die Beiträge der einzelnen Lebensphasen sind farblich unterschieden. Die Beiträge der Nutzungsphase 6 Recycling sind negativ, da es sich hierbei um Boni handelt, welche von den übrigen Wirkungen subtrahiert werden können.

#### 3.1.1 GWP



**Abbildung 5** Vergleich des Globalen Erwärmungspotentials der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen.

Das Treibhauspotential wird insbesondere durch die Bereitstellung von Rohstoffen und durch die Verarbeitung im Mischwerk verursacht. FR-ZEO zeigt ein erhöhtes Treibhauspotential in Phase 1, verursacht durch die Bereitstellung von Zeolithen. FR-PACK, FR-WATER und REF-HOT weisen alle sehr ähnliche Werte in Phase 1 auf, während für WATER+RAP durch den Einsatz von Recyclat deutlich weniger Primärrohstoffe eingesetzt werden müssen. Entsprechend geringer ist die Treibhauswirkung für dieses Material.

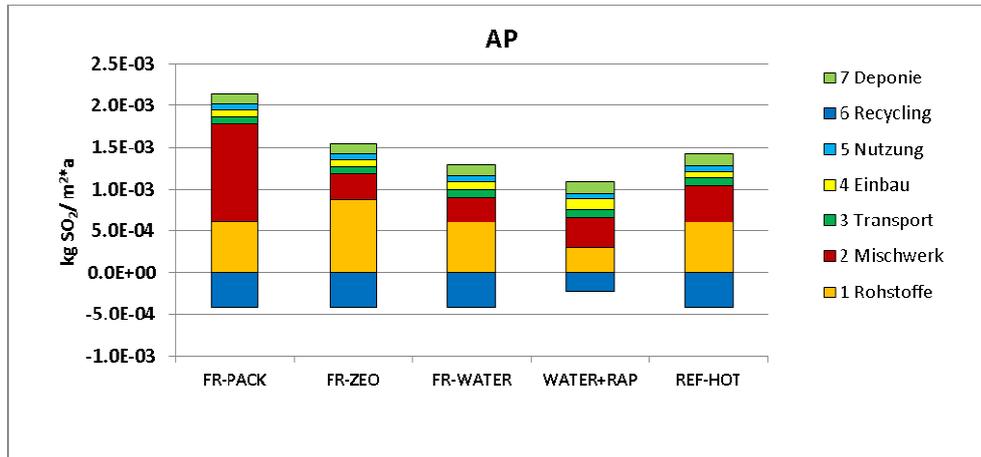
Das Treibhauspotential in Phase 2 wird überwiegend durch den Heizöl- und Dieserverbrauch im Mischwerk verursacht. Die Treibhauswirkung ist am höchsten für das heiss verarbeitete Material REF-HOT. Für FR-ZEO und FR-WATER wurden die tiefsten Werte ermittelt. Insgesamt ergeben sich die Werte gemäss Tabelle 3:

**Tabelle 3** GWP der fünf untersuchten Asphalte: Absolute und relative Werte bezogen auf REF-HOT.

Belag	GWP [CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> a]	GWP relativ, bez. auf REF-HOT
FR-PACK	0.280	93%
FR-ZEO	0.313	104%
FR-WATER	0.254	85%
WATER+RAP	0.252	84%
REF-HOT	0.300	100%

**Hinweis zum Vergleich mit EP-5 (1):** Im Berechnungsbeispiel von EP-5 wurden ebenfalls GWP-Werte für die Materialien REF-HOT und FR-PACK errechnet (Fig. 62 des EP-5 Berichtes). Für REF-HOT wurden  $0.264 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2\text{a}$  ( $45.81 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}$ ) errechnet. Für FR-PACK wurden  $0.248 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^2\text{a}$  ( $43.13 \text{ kg CO}_2\text{eq/t}$ ) errechnet. Damit liegen die Ergebnisse im selben Grössenbereich wie in der vorliegenden Bilanz und die relative  $\text{CO}_2$ -Intensität von FR-PACK zu REF-HOT beträgt in EP-5 93.9% in ausgezeichneter Übereinstimmung mit dem vorliegenden Resultat von EP-2, 93.3%.

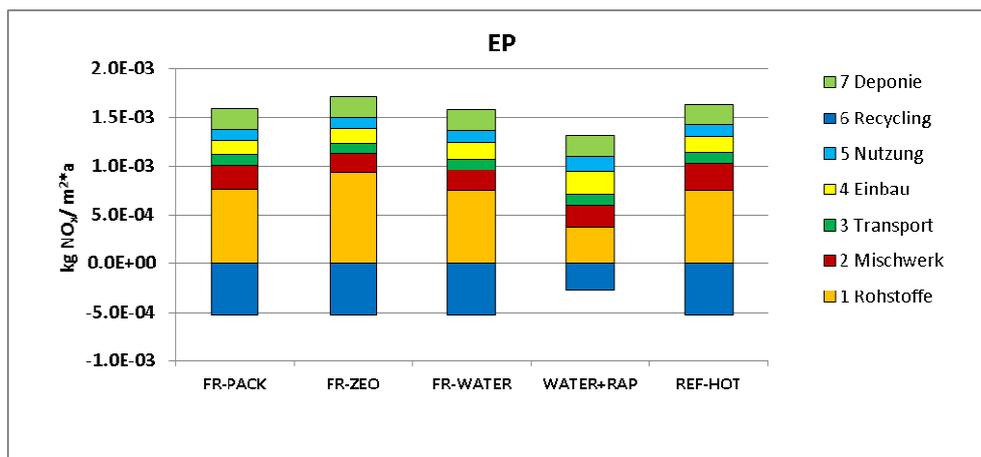
### 3.1.2 AP



**Abbildung 6** Vergleich des Versauerungspotentials der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen.

Das Versauerungspotential wird wie das GWP durch die Phasen 1 und 2 bestimmt. In Phase 1 zeigt sich dasselbe Muster wie für das GWP: FR-ZEO weist die höchste Wirkung aus, da die Zeolith-Bereitstellung in dieser Wirkkategorie stark ins Gewicht fällt. WATER+RAP weist die tiefste Wirkung in Phase 1 auf, infolge des tieferen Primärrohstoffbedarfs. In Phase 2 zeigt FR-PACK eine deutlich höhere Wirkung als die übrigen Asphalte: Für FR-PACK wurden 25 bis 1000-fach höhere Schwefeldioxid-Emissionen aus der Mischtrommel gemessen, als für die anderen Asphalte.

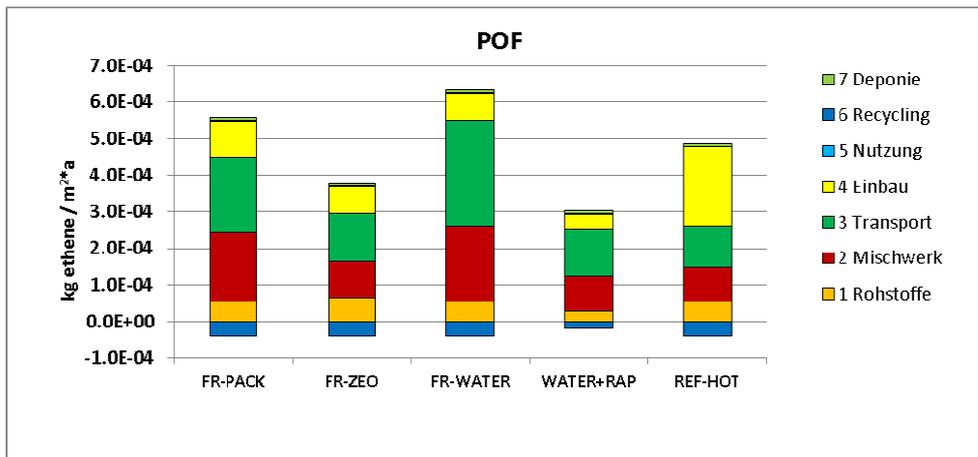
### 3.1.3 EP



**Abbildung 7** Vergleich des Eutrophierungspotentials der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen.

Das Eutrophierungspotential ergibt sich zu ca. 50% aus der Bereitstellung der Rohstoffe. Die restlichen 50% verteilen sich auf die weiteren Lebensphasen. Analog zu den Kategorien GWP und AP weist der Belag FR-ZEO ein erhöhtes Potential in Phase 1 auf, WATER+RAP ein deutlich geringeres.

### 3.1.4 POF

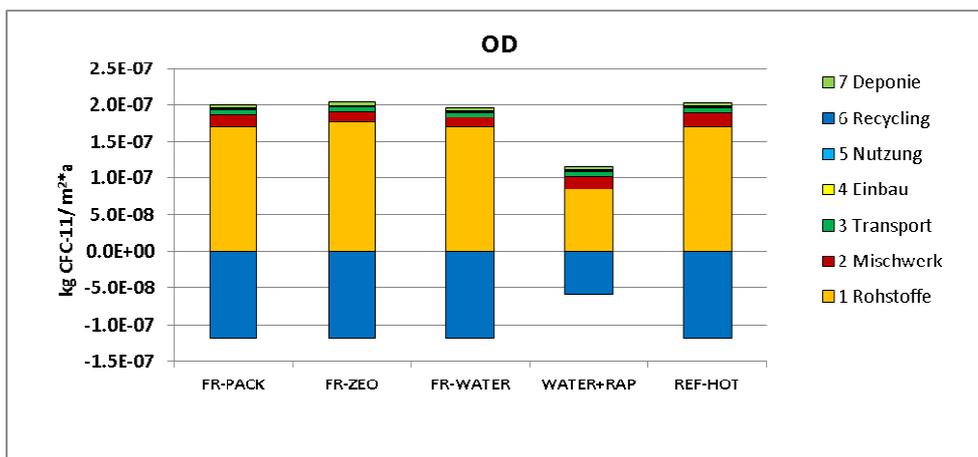


**Abbildung 8** Vergleich des Potentials zur Sommersmogbildung der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen.

Das Potential zur Sommersmog-Bildung zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Belägen. Ausschlaggebend sind die Phasen 2, 3 und 4. Die relative Bedeutung der einzelnen Phasen für die Gesamtwirkung ist je nach Belag unterschiedlich: FR-PACK und FR-WATER weisen hohe POF-Wirkungen in den Phasen 2 und 3 auf. Für REF-HOT ergibt sich dagegen eine hohe Wirkung in Phase 4. FR-ZEO und WATER+RAP zeigen im Vergleich zu den anderen Asphalten geringere POF-Wirkung.

Die Wirkungen sind auf VOC-Emissionen aus dem Mischgut zurückzuführen. Feldmessungen haben hierbei für FR-PACK und FR-WATER die höchsten Emissionen während der Herstellung im Mischwerk und des anschließenden Transportes ergeben, während für REF-HOT die Emissionen beim Einbau deutlich höher waren, als für die anderen Beläge.

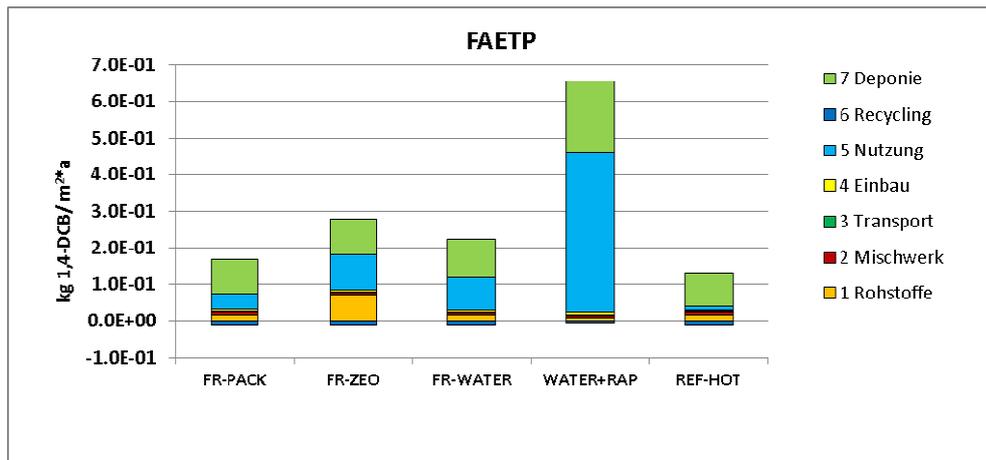
### 3.1.5 OD



**Abbildung 9** Vergleich des Potentials zur Ozonschichtschädigung der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen.

Das ozonschicht-schädigende Potential der Asphalte rührt insbesondere von der Bereitstellung von Bitumen in Phase 1 her. WATER+RAP weist die geringste Schädigung auf, infolge des geringeren Primärrohstoff-Verbrauchs verglichen mit den anderen Asphalten. Die übrigen Unterschiede sind gering. Die Rückgewinnung von Asphalt in Phase 6 hat eine hohe Bedeutung um die Auswirkungen zu reduzieren.

### 3.1.6 FAETP

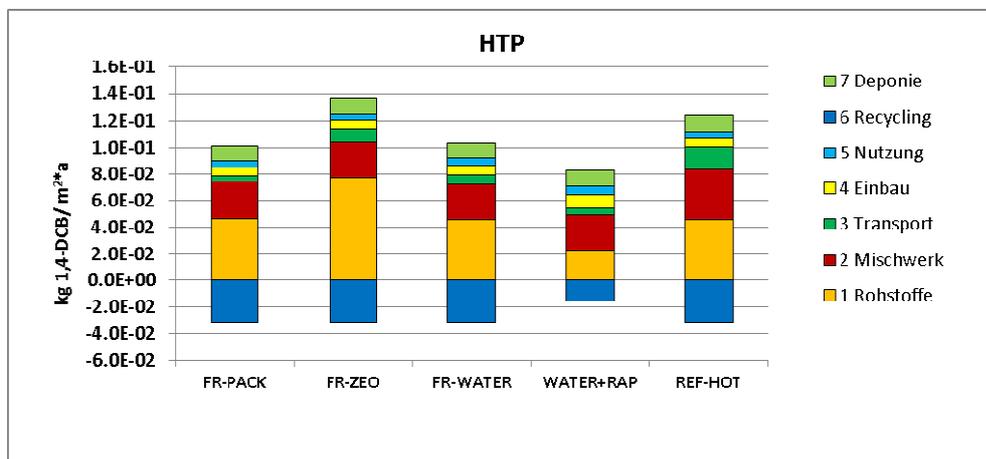


**Abbildung 10** Vergleich der Gewässertoxizität der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen.

Die Gewässertoxizität wird klar dominiert durch Nutzungs- und Deponiephase, wobei das Material WATER+RAP ein mehr als doppelt so hohes Schadpotential aufweist als die anderen Asphalte. Hauptursache für die gewässerschädigende Wirkung ist das Leaching von PAK aus dem Belag in Gewässer. Die Unterschiede in Schadpotential zwischen den Belägen entsprechen dabei den unterschiedlichen PAK-Konzentrationen in den Asphaltarten.

Einen zusätzlichen Beitrag liefert die Bereitstellung von Zeolithen in der Phase 1 für den Belag FR-ZEO. Andere Beiträge sind vernachlässigbar.

### 3.1.7 HTP

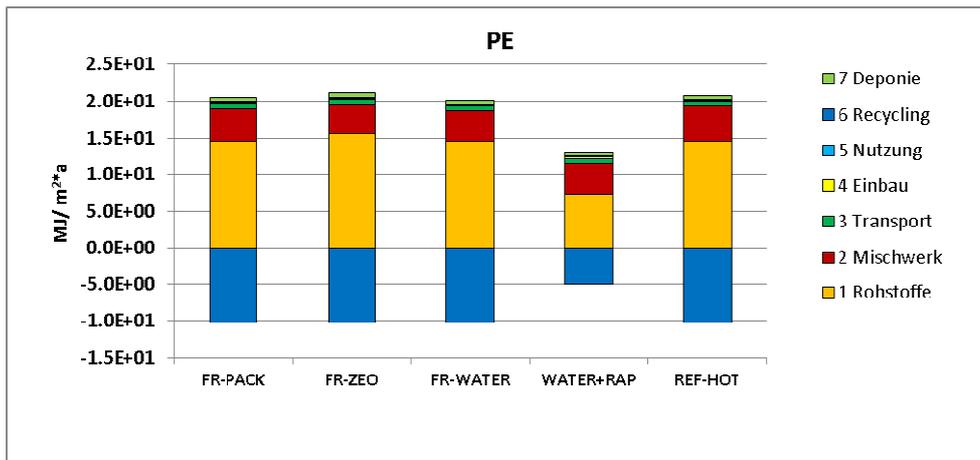


**Abbildung 11** Vergleich der Humantoxizität der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen.

Das humantoxische Potential wird stark von den Phasen 1, 2 und 6 geprägt. Die Auswirkung der Phase 1 variiert dabei am stärksten für die verschiedenen Beläge. Die tiefste Wirkung zeigt WATER+RAP infolge des geringeren Rohstoffbedarfs. FR-ZEO weist ein erhöhtes humantoxisches Potential in Phase 1 auf. Wie für die Gewässerschädigung ist auch in diesem Fall die Bereitstellung von Zeolithen die Ursache.

Das Material REF-HOT zeigt in Phase 2 ein erhöhtes humantoxisches Potential: Ursache hierfür sind Benzol-Emissionen aus dem Mischgut, welche bei der Verarbeitung von REF-HOT gemessen wurden.

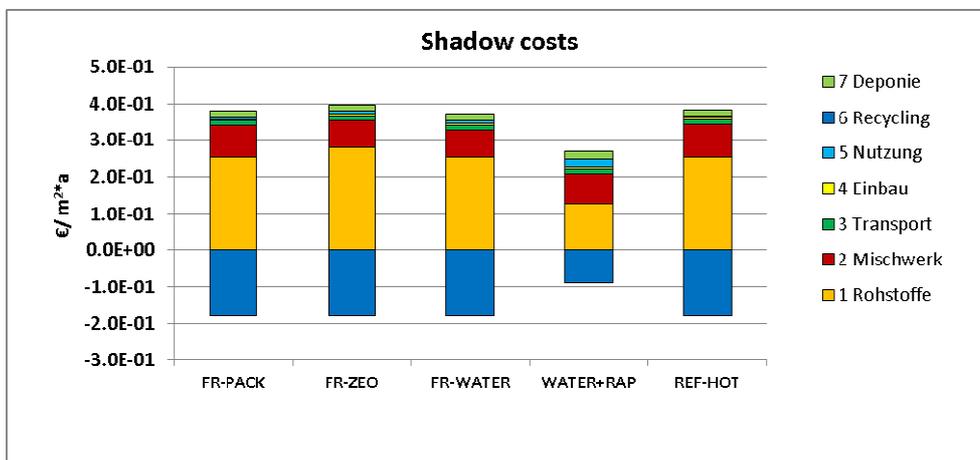
### 3.1.8 PE



**Abbildung 12** Vergleich der Primärenergieverbräuche der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen.

Die Daten zum Primärenergieverbrauch ähneln den Ergebnissen zum GWP, sind jedoch noch ausgeprägter: Die Phasen 1 und 2 leisten den grössten Beitrag. Die Nutzung von Recyclingmaterial hat einen signifikanten Einfluss. Das Material WATER+RAP weist einen deutlich tieferen Energieverbrauch auf, als direkte Folge des geringeren Einsatzes von Primärrohstoffen. Die Unterschiede zwischen den übrigen Asphalten fallen gering aus. Der grundsätzlich erwartete tiefere Energieverbrauch der Niedertemperaturasphalte in der Herstellung (Phase 2) ist zwar vorhanden, fällt aber in der Summe aller Phasen kaum ins Gewicht.

### 3.1.9 Shadow Costs



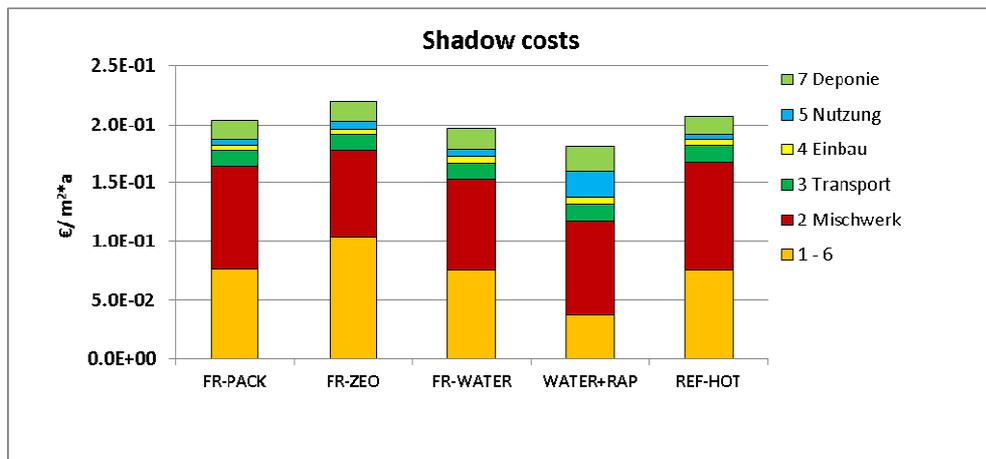
**Abbildung 13** Vergleich der Shadow Costs der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen.

Aus der Gegenüberstellung der Shadow Costs wird ersichtlich, dass drei der sieben untersuchten Lebensphasen massgeblich Einfluss auf die Bilanz haben: Dies sind die Phasen 1, 2 und 6. Subtraktion des Bonus aus Phase 6 (Materialrecycling) von Phase 1 ergibt als Endresultat die Gesamt-Shadow Costs der fünf Beläge (Abbildung 14).

Das Material WATER+RAP weist insgesamt die geringsten Shadow Costs in auf. FR-ZEO weist die höchsten Shadow Costs auf (Zahlenwerte: siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4** Shadow Costs der fünf untersuchten Asphalte: Absolute und relative Werte bezogen auf REF-HOT.

Belag	Shadow Costs [€/m <sup>2</sup> a]	Shadow Costs relativ, bez. auf REF-HOT
FR-PACK	0.204	98.4%
FR-ZEO	0.220	106.1%
FR-WATER	0.196	94.6%
WATER+RAP	0.181	87.3%
REF-HOT	0.207	100%



**Abbildung 14** Vergleich der Shadow Costs der unterschiedlichen Asphalte, aufgeschlüsselt nach Nutzungsphasen, nachdem Recycling-Bonus der Phase 6 von Phase 1 subtrahiert wurde.

**Hinweis zum Vergleich mit EP-5:** Ebenso wie im Berechnungsbeispiel des Teilprojekts EP-5 schneidet der Belag FR-PACK besser ab als das Referenzmaterial REF-HOT. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkkategorien, Systemgrenzen und Gewichtungsfaktoren hätte es aber durchaus zu abweichenden Resultaten zwischen den Teilprojekten kommen können. Dies ist keine Schwäche der verwendeten Methoden, sondern logische Konsequenz unterschiedlicher Betrachtungswinkel und Gewichtungen.

## 3.2 Dominanzanalyse

Die dominanten Prozesse, welche die beschriebenen Wirkkategorien überwiegend prägen, sind in Tabelle 5 aufgelistet. Diese Prozesse verursachen 70-79% der gesamten Auswirkungen der einzelnen Asphalte. Fehler, Unsicherheiten oder Störfaktoren, die diese Parameter beeinflussen, haben eine entsprechend starke Auswirkung auf das Endresultat der Wirkanalyse. Gleichzeitig sind auch Massnahmen, die diese Umweltwirkungen reduzieren, sehr wirkungsvoll. Die Sensitivität der einzelnen Parameter wird im folgenden Kapitel diskutiert.

**Tabelle 5** Dominante Prozesse und Ressourcen, sortiert nach Relevanz.

Prozess	Phasen	Relevante Kategorien	Anteil an Gesamtwirkung (Shadow Cost)	Relevante Einflussfaktoren
Bereitstellung Bitumen	1, 6	Sämtliche Kategorien	20 – 37%	Bitumenanteil am Asphalt Recycling-Faktor
Stromverbrauch Mischwerk	2	PE, FAETP, HTP	19-24%	Verbrauch Mischwerk, Wahl des Strommix
Heizöl- / Dieserverbrauch Mischwerk	2	Sämtliche ausser POF	14-22%	Verbrauch Mischwerk
Leaching von PAKs	5	FAETP (HTP)	0.3 – 12%	PAK-Gehalt, Leaching-Rate



## 4 Sensitivitätsanalyse

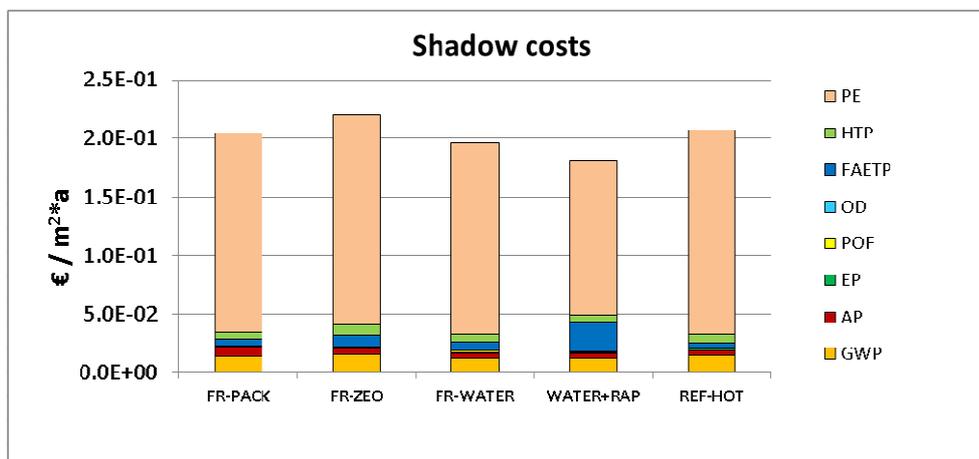
### 4.1 Gewichtung der Wirkkategorien

Die Gewichtung der einzelnen Wirkkategorien erfolgt durch die Shadow Cost-Methode. Tabelle 6 listet die einzelnen Umrechnungsfaktoren für die 8 analysierten Kategorien auf.

**Tabelle 6** Umrechnungsfaktoren zur Ermittlung der Shadow Costs.

Kategorie	Faktor
GWP	0.05 € / kg CO <sub>2</sub> eq
AP	4 € / kg SO <sub>2</sub> eq
EP	1.16 € / kg NO <sub>x</sub> eq
POF	2 € / kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
FAETP	0.04€ / kg 1,4-DCB eq
HTP	0.084€ / kg 1,4-DCB eq
PE	0.0163 € / MJ

Die Beiträge der einzelnen Wirkkategorien zu den gesamten Shadow Costs sind in Abbildung 15 für alle untersuchten Asphalte aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die Shadow Costs überwiegend vom Primärenergieverbrauch, und in geringerem Mass vom Treibhauspotential und von der Gewässertoxizität bestimmt werden. Dies ist in Übereinstimmung mit den als dominant identifizierten Prozessen (Tabelle 5): Die Gewässertoxizität wird dominiert vom Leaching von PAK aus dem Belag. Die energieintensiven Prozesse im Mischwerk schlagen sich direkt im Primärenergieverbrauch nieder. Ebenso ist für die Bitumenbereitstellung der Primärenergieverbrauch ausschlaggebend, da es sich beim Bitumen um ein Erdölderivat mit hohem Energieinhalt handelt.



**Abbildung 15** Aufstellung der Shadow Costs nach Wirkkategorien für die untersuchten Asphalt-Arten.

Wird der Primärenergieverbrauch als Wirkkategorie nicht berücksichtigt, so verändert sich das Gesamtbild erheblich. Es ergeben sich Shadow Costs gemäss Abbildung 16 bzw. Tabelle 7. Die Phasen 1 und 6 verlieren insgesamt an Bedeutung, die Bedeutung der übrigen Lebensphasen steigt. Durch die grössere Bedeutung der human- und gewässertoxischen Wirkungen schneidet das Material WATER+RAP insgesamt am

schlechtesten ab. Die tiefsten Shadow Costs weist FR-WATER auf, gefolgt vom Referenzmaterial REF-HOT.

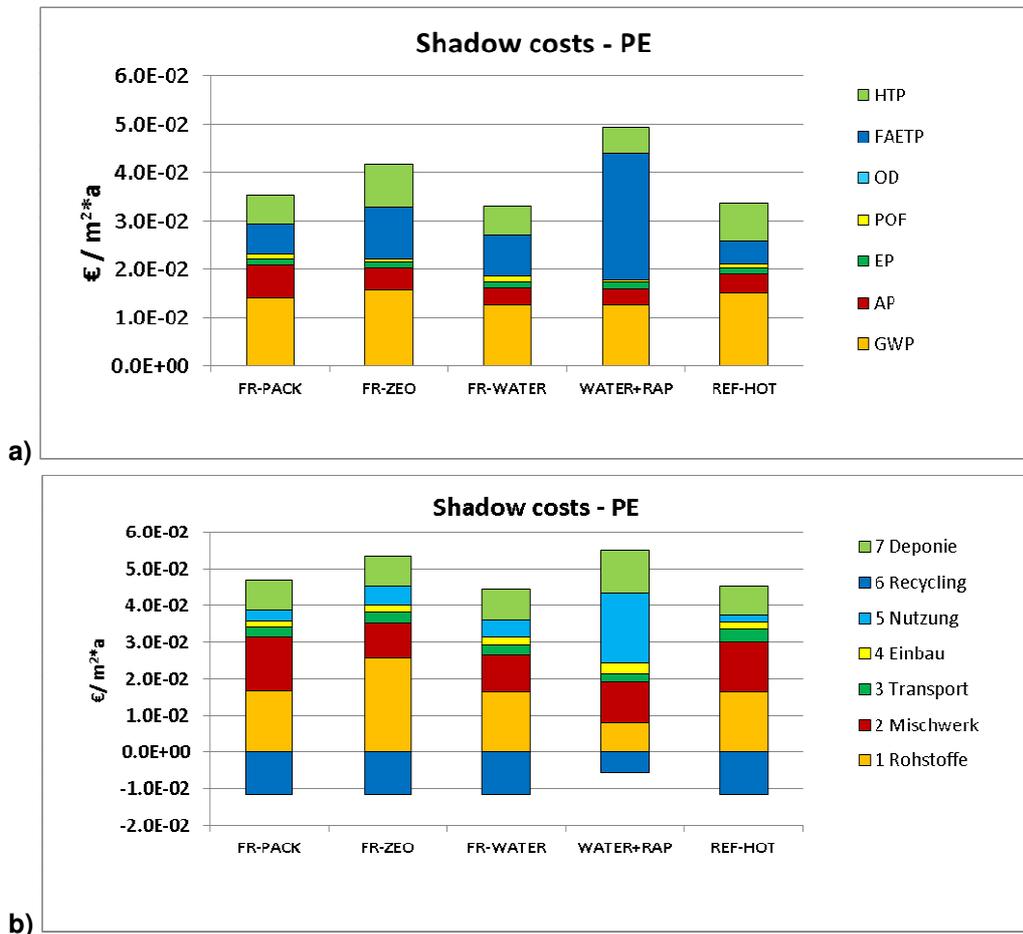


Abbildung 16 Aufstellung der Shadow Costs nach a) Wirkkategorien und b) Lebensphasen, ohne Primärenergieverbrauch (PE).

**Tabelle 7** Shadow Costs der fünf untersuchten Asphalte ohne Primärenergie: Absolute und relative Werte bezogen auf REF-HOT.

Belag	Shadow Costs [€ / m2·a]	Shadow Costs relativ, bez. auf REF-HOT
FR-PACK	0.0353	105.9%
FR-ZEO	0.0418	124.1%
FR-WATER	0.0331	98.3%
WATER+RAP	0.0495	147.0%
REF-HOT	0.0337	100%

## 4.2 Sensitivitätsanalyse: Lebensdauer des Belags

Die funktionelle Einheit der vorliegenden Ökobilanz ist 1 m<sup>2</sup>·a, womit das Resultat der Bilanz in hohem Mass von der Einsatzdauer des Strassenbelags abhängt. Nachdem das Teilprojekt EP-4 keine schlüssigen Hinweise auf eine unterschiedliche Gebrauchsdauer der verglichenen Asphalte ergeben hat, wird für alle Beläge eine Lebensdauer von 25 Jahren angenommen. Eine erhöhte Lebensdauer würde zu geringeren Umweltwirkungen aller Phasen führen. Der Primärenergieverbrauch, welcher die gesamten Umweltwirkungen dominiert, skaliert in erster Näherung umgekehrt proportional zur Lebensdauer.

Werden die angenommenen Werte der Lebensdauer für alle Belagsmaterialien um denselben Betrag verändert, so ergeben sich keine Änderungen in der Reihenfolge der Beläge bezogen auf die Shadow Costs. Relevant für das Gesamtergebnis der Ökobilanz wären insbesondere Unterschiede in der Lebensdauer zwischen den verschiedenen Belägen. Tabelle 8 zeigt den Einfluss der Lebensdauer (Variation von +/- 30%) auf die Shadow Costs der Beläge. Bereits ein Unterschied in der Lebensdauer von 10% (2.5 Jahre) zwischen zwei Belägen kann dazu führen, dass ein vormals besserer Belag schlechter abschneidet, als ein Vergleichsmaterial.

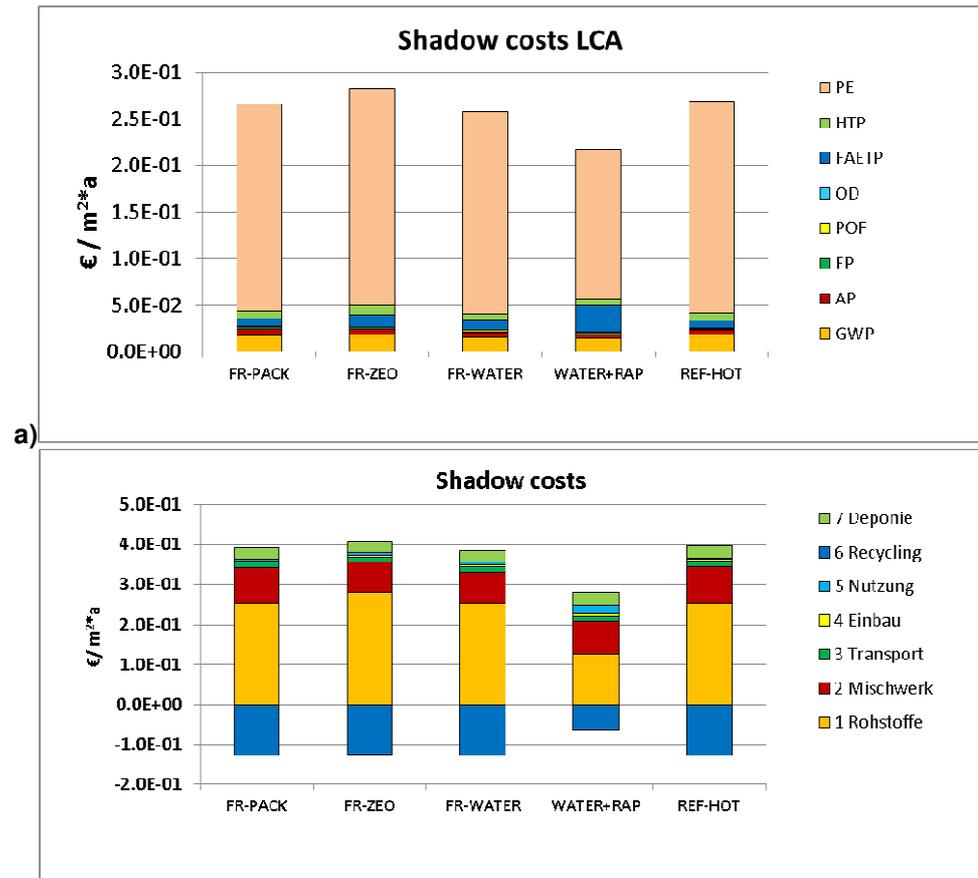
**Tabelle 8** Shadow Costs [€/m<sup>2</sup>a] der fünf untersuchten Asphalte für variierende Lebensdauer.

Belag	17.5 a	20 a	22.5 a	25 a	27.5 a	30 a	32.5
FR-PACK	0.291	0.255	0.227	<b>0.204</b>	0.186	0.170	0.157
FR-ZEO	0.313	0.274	0.244	<b>0.220</b>	0.200	0.184	0.170
FR-WATER	0.279	0.245	0.218	<b>0.196</b>	0.179	0.164	0.152
WATER+RAP	0.252	0.222	0.199	<b>0.181</b>	0.166	0.154	0.143
REF-HOT	0.296	0.259	0.231	<b>0.207</b>	0.189	0.173	0.160

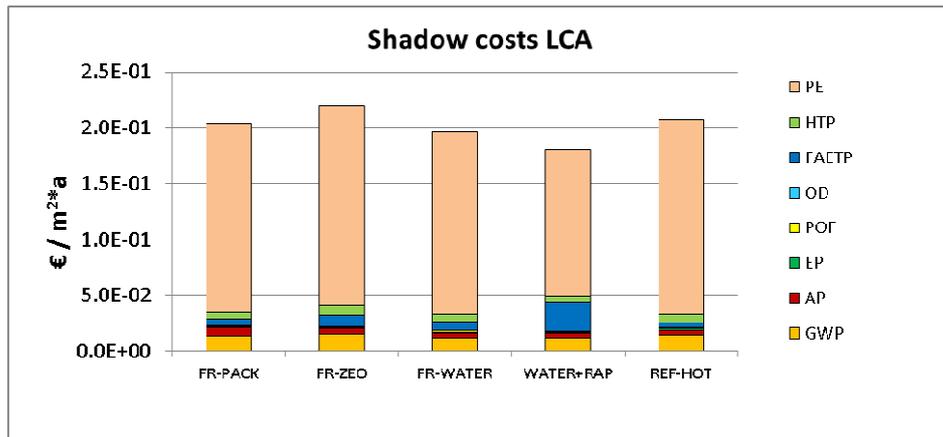
**Beispiel zum Lesen der Tabelle:** Angenommen, Beläge aus den vier Warmasphalttypen würden nur 20 Jahre gebrauchsfähig bleiben, im Vergleich mit 25 Jahren Gebrauchsdauer von REF-HOT: Dann hätte REF-HOT die beste Ökobilanz mit 0.207 €/m<sup>2</sup>a. Die anderen vier stünden mit 0.255 bzw. 0.274 bzw. 0.245 bzw. 0.222 €/m<sup>2</sup>a schlechter da.

### 4.3 Sensitivitätsanalyse: Bitumenverbrauch und Recycling

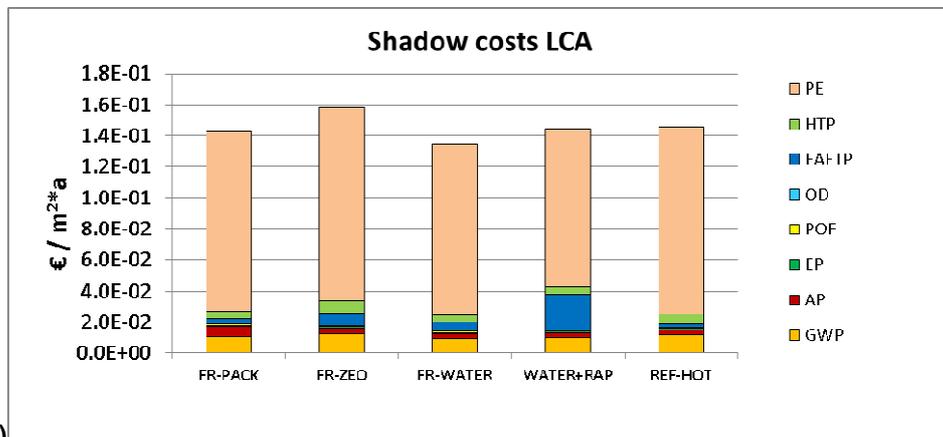
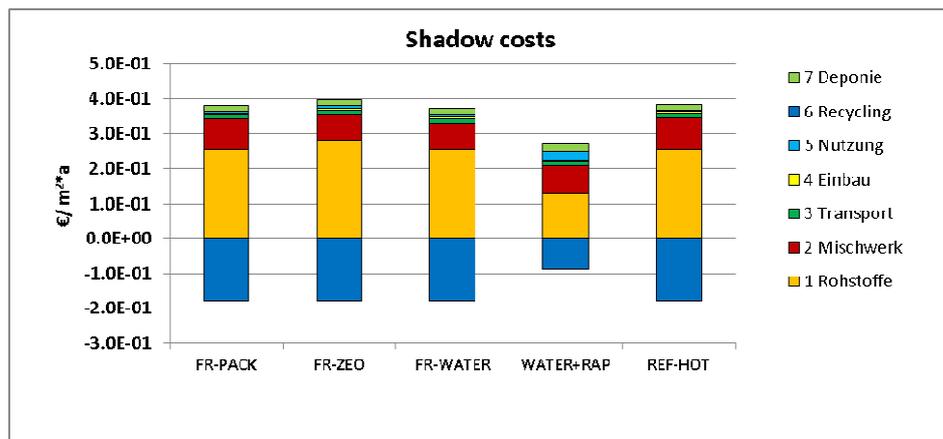
Die Bitumenbereitstellung trägt stark zur Gesamtwirkung der untersuchten Beläge bei. Eine Reduktion des Bitumenanteils im Belag hätte grundlegende Änderungen der Belageigenschaften zur Folge und ist nicht ohne weitere Massnahmen möglich. Hingegen kann der Bedarf an Bitumen durch verstärktes Recycling von Altbelag reduziert werden. In Phase 6 der vorliegenden Studie wurde von 70% Recyclingrate für Kies, Sand und Bitumen ausgegangen. Die Auswirkung einer Erhöhung des Recyclatanteils auf 90% sowie einer Reduktion auf 50% auf die Shadow Costs sind in Abbildung 17 und Tabelle 9 gezeigt. Es resultieren bis zu 30% höhere bzw. tiefere Shadow Costs. (Für das Material WATER+RAP wurde eine unveränderte Zusammensetzung mit 50% Recyclingmaterial angenommen.)



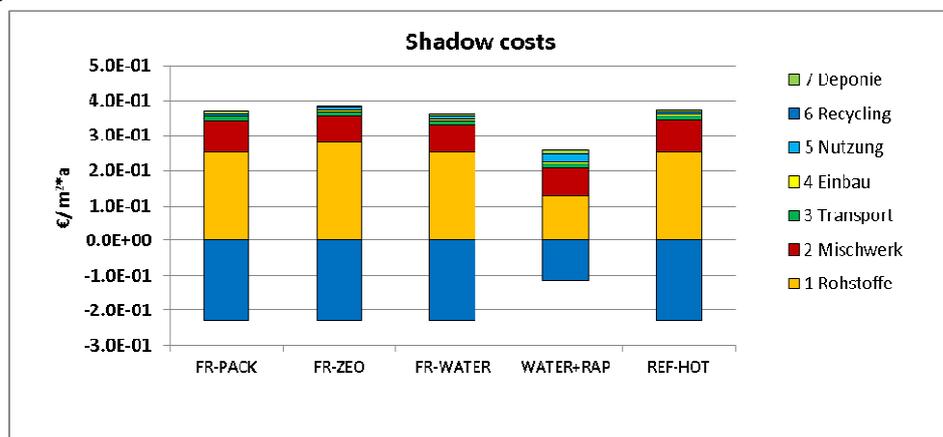
**Abbildung 17** Variation des Recyclatanteils an Altbelag. a) 50%.  
Nächste Seite: b) 70% (Berechnungsbasis). c) 90%.



b)



c)



Fortsetzung von Abbildung 17.

**Tabelle 9** Shadow Costs [€/m<sup>2</sup>a] für variierende Nutzung von Recykat.

Recykatanteil	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
50%	0.266 (+30.4%)	0.282 (+28.2%)	0.258 (+31.6%)	0.218 (+20.4%)	0.269 (+30.0%)
<b>70%</b>	<b>0.204</b>	<b>0.220</b>	<b>0.196</b>	<b>0.181</b>	<b>0.207</b>
90%	0.142 (-30.4%)	0.158 (-28.2%)	0.135 (-31.1%)	0.145 (-19.9%)	0.146 (-29.5%)

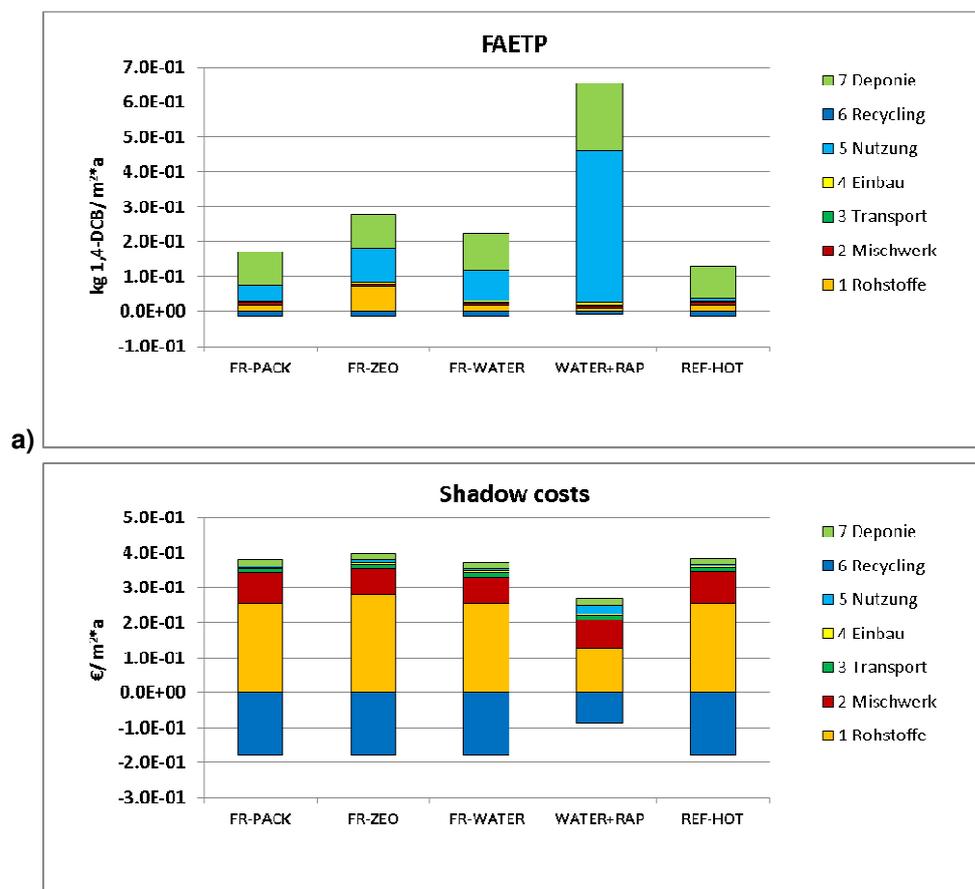
Anmerkung: Mit steigendem Recycling-Grad sinkt insgesamt die Bedeutung der recyklatfreien Beläge, und die Bedeutung von recyklathaltigem Belag steigt. Damit gewinnt auch der PAK-Gehalt als spezifischer Nachteil des Recykat-Belags insgesamt an Bedeutung.

## 4.4 Sensitivitätsanalyse: Leaching-Rate von PAKs während der Nutzungsphase

In der vorliegenden vergleichenden Studie weist das Material WATER+RAP einen deutlich höheren PAK-Gehalt auf, als die übrigen Beläge, und schneidet daher in der Wirkkategorie FAETP deutlich schlechter ab. Ursache für den hohen PAK-Gehalt ist der Einsatz von Recyclingmaterial bei der Herstellung. Aus demselben Grund benötigt WATER+RAP deutlich weniger Energie und Ressourcen in der Herstellung. Der PAK-Gehalt und das Ausmass des Leaching sind daher von höchster Bedeutung dafür, ob der Einsatz von Recyklat im Strassenbau aus Sicht der Ökobilanzierung sinnvoll ist. Abbildung 18 zeigt drei Fälle:

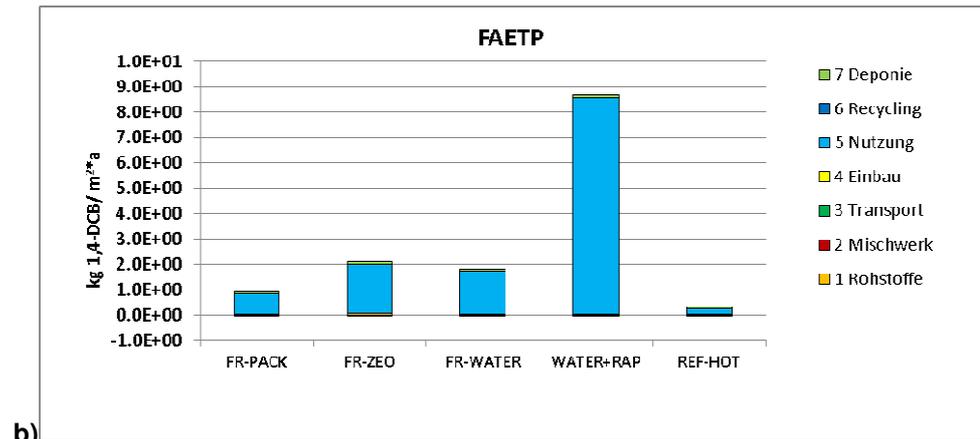
- Referenzfall (a) ergibt sich aus den durchgeführten Messungen und geht von 5% PAK-Leaching aus.
- Extremfall (b) geht von einer Freisetzung des gesamten PAK-Gehalts während der Nutzungsphase aus.
- Fall (c) mit keinerlei Freisetzung von PAKs während der Nutzungsphase.

Extremfall (b) zeigt, dass im Fall eines vollständigen Leaching das Material WATER+RAP mit Abstand die höchsten Shadow Costs aufweisen würde, während das Material in den anderen Fällen die tiefsten Shadow Costs aufweist.

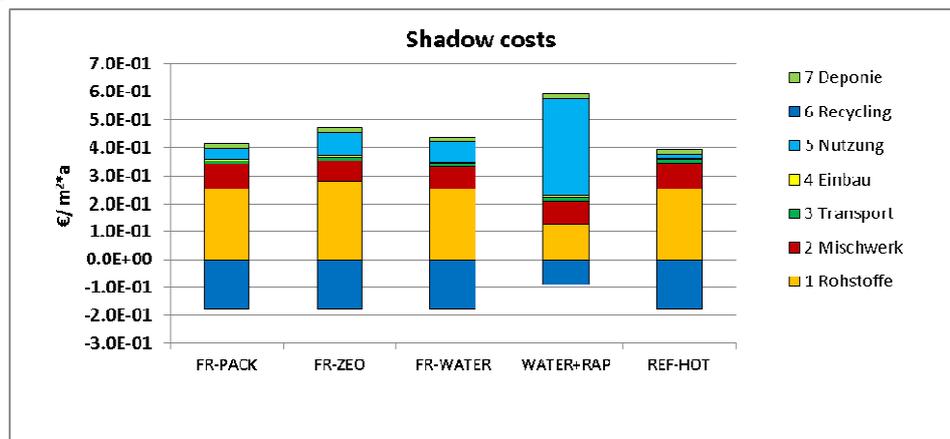


**Abbildung 18** Variation des PAK-Leachings während der Nutzungsphase. a) Berechnete Leaching-Rate.

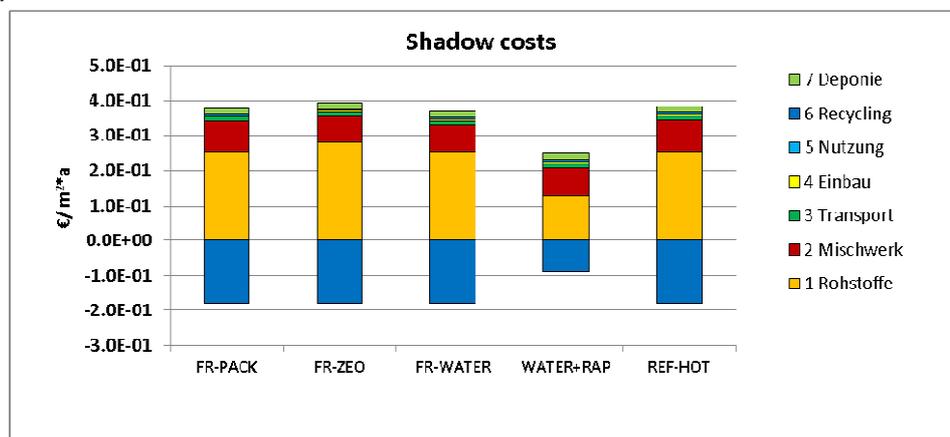
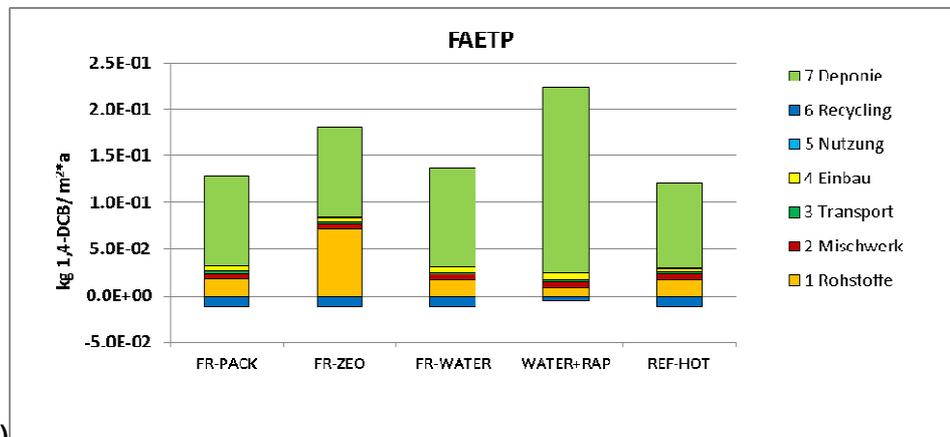
Nächste Seite: b) Leaching von 100% des PAK-Gehalts während der Nutzungsphase. c) Keinerlei PAK-Leaching während Nutzungsphase.



b)



c)



Fortsetzung von Abbildung 18.

Die Shadow Costs in Abhängigkeit des PAK-Leachings in der Nutzungsphase sind in *Tabelle 10* aufgeführt. Ab einem Anteil von 25% PAK-Leaching in der Nutzungsphase schneidet das Material WATER+RAP schlechter ab, als die übrigen Beläge.

**Tabelle 10** *Shadow Costs [€/m<sup>2</sup>a] für variierendes PAK-Leaching.*

PAK-Leaching während Nutzungsphase	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
0%	0.202	0.216	0.193	0.164	0.207
<b>5%</b>	<b>0.204</b>	<b>0.220</b>	<b>0.196</b>	<b>0.181</b>	<b>0.207</b>
10%	0.206	0.224	0.200	0.198	0.208
15%	0.207	0.228	0.203	0.214	0.208
20%	0.209	0.232	0.206	0.231	0.209
25%	0.211	0.235	0.210	0.248	0.209
30%	0.212	0.239	0.213	0.265	0.210
40%	0.216	0.247	0.220	0.299	0.210
50%	0.219	0.254	0.227	0.333	0.211
75%	0.227	0.274	0.243	0.417	0.213
100%	0.235	0.293	0.260	0.501	0.215

## 4.5 Sensitivitätsanalyse: Transportdistanzen

Neben den in Abschnitt 3.2 beschriebenen dominanten Parametern ist der Einfluss der Transportwege zwischen Asphaltwerk und Einbaustelle von speziellem Interesse und soll untersucht werden.

Dargestellt sind Shadow Costs der Phase 3 Transport sowie der Gesamtbilanz für drei Fälle: Tatsächliche Distanz Mischwerk – Einbaustelle, wie sie für diese Studie vorlag (2 x 17 km Fahrt), Distanz + 50% (2 x 25.5 km Fahrt), Distanz -50% (2 x 8.5 km Fahrt). Auf die gesamten Shadow Costs bezogen resultiert eine Zunahme von 3-4% bei +50%, bzw. eine Reduktion von 3-3.4% bei -50%.

**Table 11** Shadow Costs [€/m<sup>2</sup>a] für variierende Transportdistanzen.

Fahrdistanz	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
2 x 8.5 km (-50%)	0.198 (-3.29%)	2.13 (-3.0%)	0.190 (-3.3%)	0.175 (-3.6%)	0.201 (-3.1%)
2 x 17 km (tatsächliche Distanz)	0.204	0.220	0.196	0.181	0.207
2 x 25.5 km (+50%)	0.211 (+3.29%)	0.227 (+3.0%)	0.203 (+3.3%)	0.188 (+3.6%)	0.214 (+3.1%)

Da die so errechnete Änderung der Shadow Costs für alle Beläge identisch ist, ändert sich nichts an den absoluten Unterschieden zwischen den Belägen.

Anmerkung: Es ist anzunehmen, dass in der Realität bei längeren Transporten mehr Emissionen aus dem Mischgut auftreten als bei kürzeren. Bei obiger Berechnung wurden die Emissionen aus dem Mischgut während des Transportes als identisch angenommen. Diese Vereinfachung wird als vertretbar angesehen, da die Shadow Costs der Phase 3 für die untersuchte Transportdistanz von 2 x 17 km zu mehr als 90% durch den Transport-LKW verursacht werden. Weniger als 10% stammen aus den Emissionen des Mischgutes.

## 5 Detailauswertung

### 5.1 Phase 1: Materialien: Gewinnung primärer und sekundärer Ressourcen

Asphalte setzen sich primär aus Kies, Sand und Bindemittel (Bitumen) zusammen. Je nach Asphalt werden unterschiedliche Zusatzstoffe eingesetzt, oder Grundmaterialien werden durch Recyklat (RAP) substituiert. Die Zusammensetzungen gemäss Herstellerangaben für die untersuchten Asphaltarten sind in Tabelle 12 gegeben.

**Tabelle 12** Zusammensetzung [kg/kg] der untersuchten Asphaltarten.

Material	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
Kies	0.51	0.51	0.515	0.312	0.51
Sand (inkl. Filler)	0.444	0.440	0.444	0.165	0.444
Bitumen	0.046	0.046	0.046	0.023	0.046
Chemikalien	0.0002				
Zeolithe		0.003			
Wasser			0.001	0.0004	
RAP				0.5	

Für Sand, Kies, Bitumen und Zeolithe liefert die Ecoinvent-Datenbank Emissionsfaktoren. Für die chemischen Additive wurde ein genereller Emissionsfaktor für anorganische Chemikalien verwendet.

Das Bindemittel Bitumen macht mengenmässig einen kleinen Anteil (ca. 5% für Neumaterial) am Gesamtasphalt aus, dominiert aber die einzelnen Wirkkategorien. Die Hauptbestandteile Kies und Sand haben vergleichsweise geringe Umweltauswirkungen (siehe Abbildungen 19 bis 21). Zeolithe, als Bestandteil des Asphalts FR-ZEO, fallen trotz ihres geringen Massenanteils (0.3%) ebenfalls stark ins Gewicht, insbesondere in den Kategorien FAETP und HTP. FR-ZEO schneidet als Folge am schlechtesten ab. Die geringsten Umweltauswirkungen weist das Material WATER+RAP auf, da aufgrund des Einsatzes von Recyclingmaterial der Bedarf an Rohstoffen, allen voran Bitumen, reduziert wird.

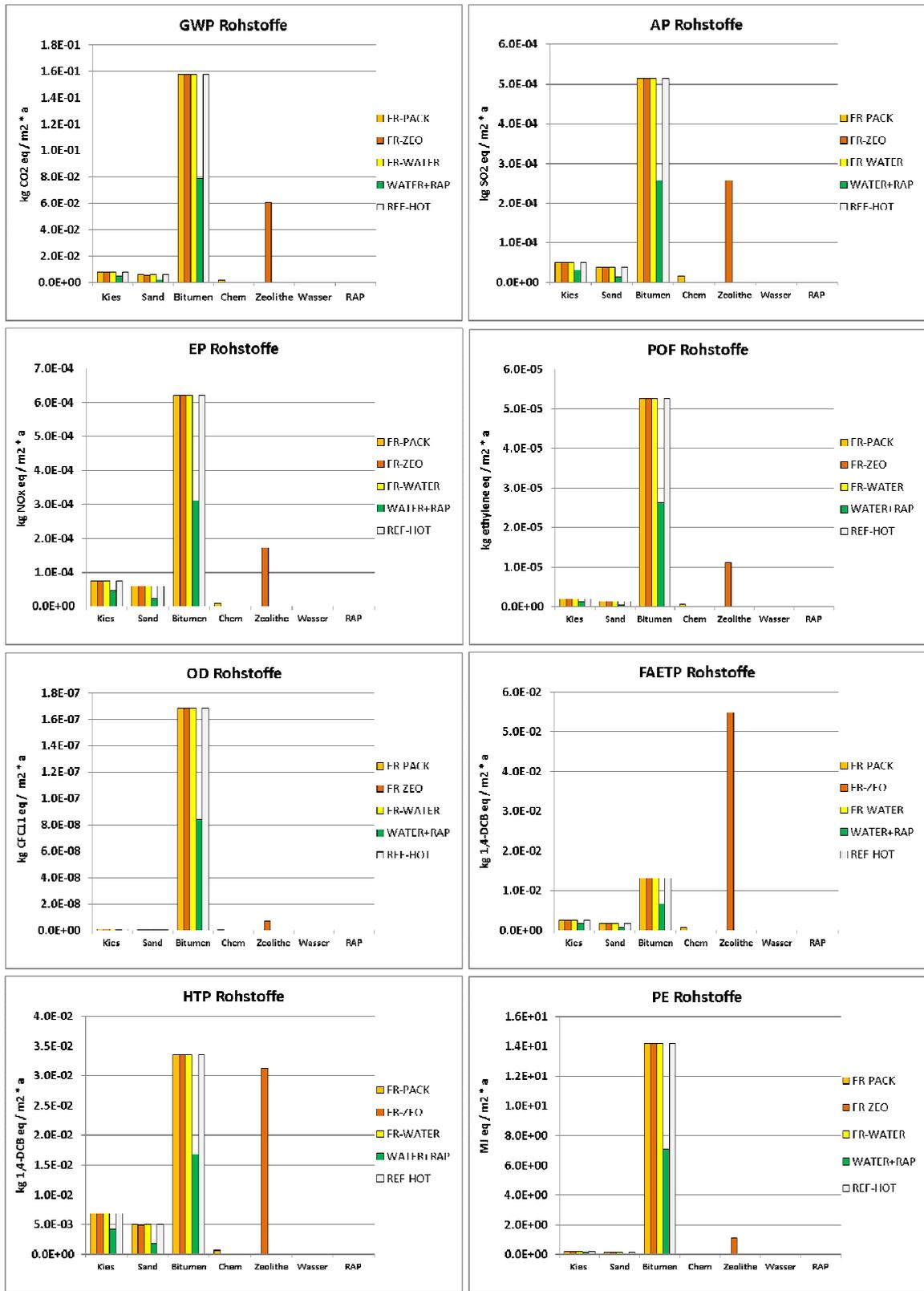
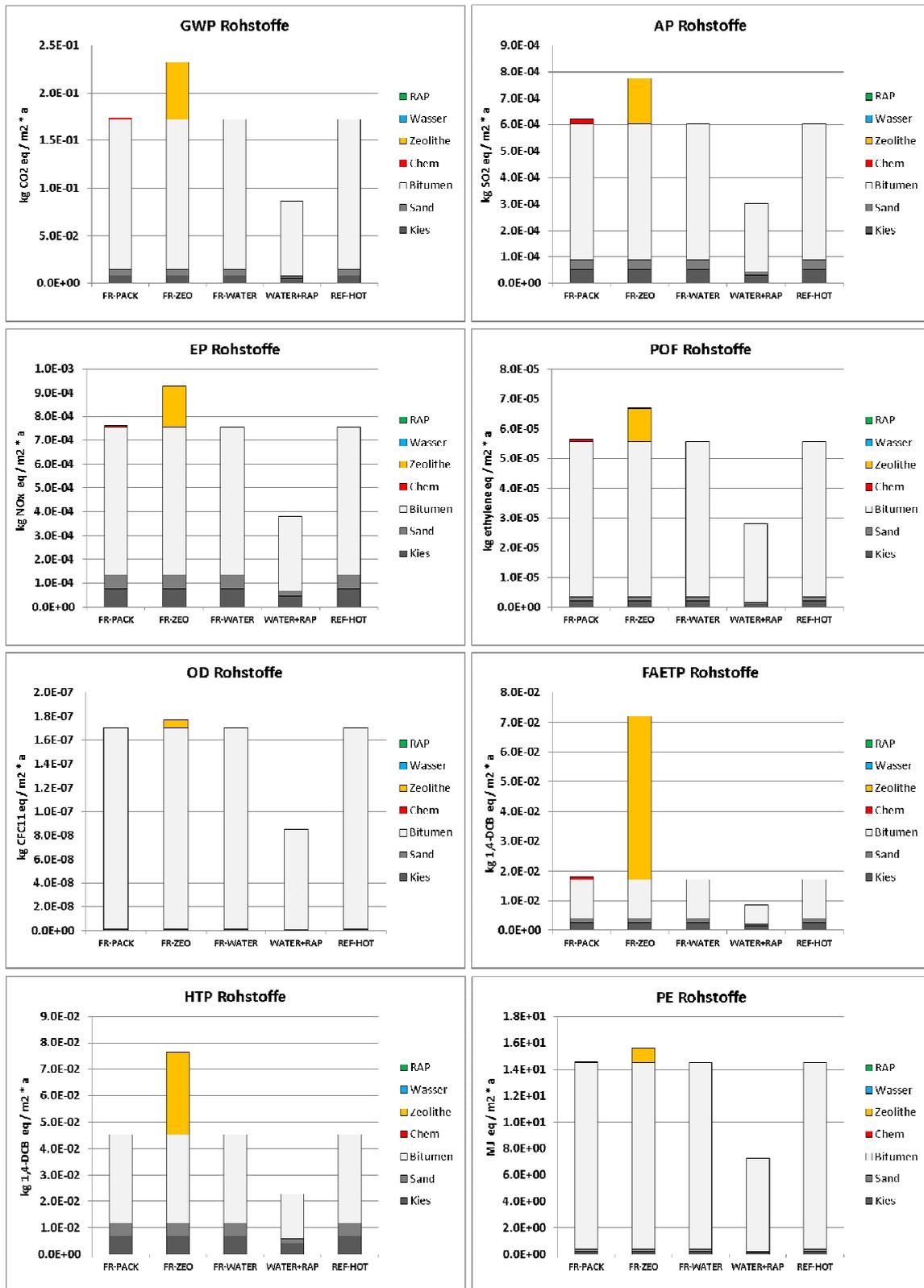


Abbildung 19 Auswirkungen der einzelnen Prozesse aus Phase 1, dargestellt für alle Wirkkategorien.



**Abbildung 20** Summierte Umweltwirkungen aus Phase 1, dargestellt für alle Wirkkategorien.

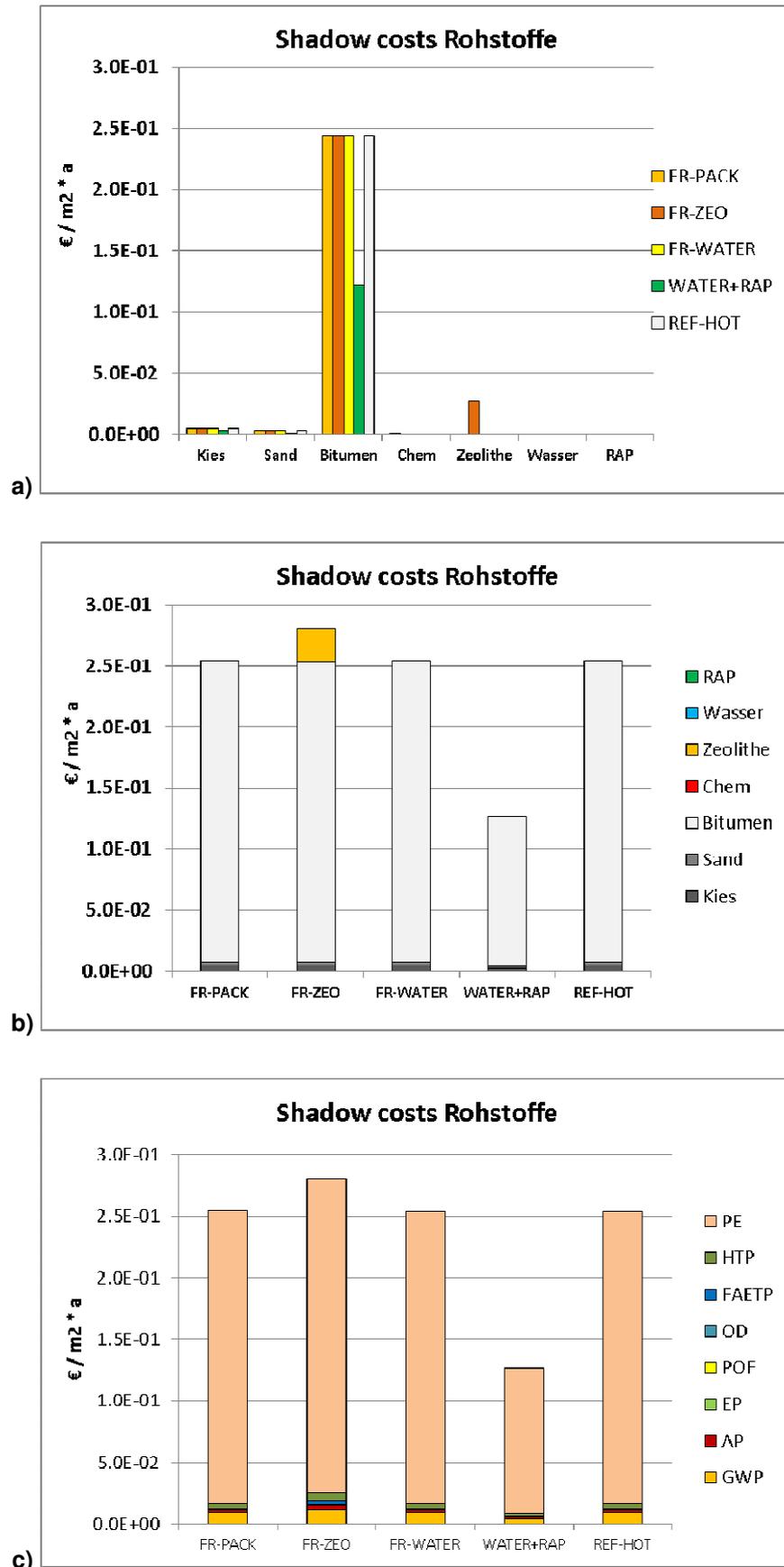


Abbildung 21 Shadow Costs der Phase 1, a) für die einzelnen Prozesse, b) aufsummiert nach Prozess, c) aufsummiert nach Wirkkategorie.

## 5.2 Phase 2: Produktionsprozess: Herstellung von Asphalt im Mischwerk

Die Umweltauswirkungen der Asphalt-Herstellung im Mischwerk setzen sich zusammen aus dem Energieverbrauch für den Betrieb, sowie aus den Emissionen des Werks. Der Bau der Produktionsstätte und der Maschinen wurde für die vorliegende Studie nicht berücksichtigt.

### 5.2.1 Energieverbräuche

Das Mischwerk benötigt für den Betrieb Strom und Heizöl. Radlader für den Werksbetrieb benötigen Diesel. Heizöl- und Dieserverbrauch wurden für die Darstellung in den Abbildungen 22 bis 24 zusammengefasst. Es wurden die realen Verbrauchsdaten im Werksbetrieb ermittelt (siehe Tabelle 13). Zur Berechnung der Umweltauswirkungen konnte auf Emissionsfaktoren der Ecoinvent-Datenbank zurückgegriffen werden. Für die Elektrizitätsbereitstellung wurden Daten für den Schweizer Strommix verwendet.

**Tabelle 13** Energieverbräuche von Mischwerk und Radlader in Phase 2 bezogen auf die funktionelle Einheit.

Material	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
Elektrizität [kWh/m <sup>2</sup> a]	0.338	0.322	0.348	0.325	0.339
Heizöl EL[MJ/m <sup>2</sup> a]	1.408	1.118	1.077	1.329	1.644
Diesel Radlader[MJ/m <sup>2</sup> a]	0.0236	0.0236	0.0236	0.0236	0.0236

Der Strombedarf pro Tonne Mischgut variiert geringfügig zwischen den verschiedenen Belägen (~5% bezogen auf REF-HOT). Der Heizölbedarf im Mischwerk zeigt jedoch deutliche Unterschiede: Das heiss verarbeitete Referenzmaterial REF-HOT weist den höchsten Bedarf an Heizöl auf. Der Bedarf der warmverarbeiteten Beläge liegt 15 – 35% tiefer, wobei FR-WATER und FR-ZEO am besten abschneiden.

### 5.2.2 Emissionen aus der Mischtrommel

Die Emissionen der Asphalt-Mischtrommel in die Luft wurden im Betrieb gemessen (7). Eine Auflistung der gemessenen Schadstoffe und die ermittelten Emissionswerte sind in Tabelle 14 dargestellt. Die Ecoinvent-Datenbank lieferte hier keine nutzbaren Faktoren. Es wurde auf Daten des CML-Handbuchs (5) sowie auf einen Bericht (8) von BAFU und Öbu (Netzwerk für nachhaltiges Wirtschaften) zurückgegriffen (siehe Tabelle 15).

In den Kategorien POF und FAETP liegen Faktoren sowohl für Stoffgruppen insgesamt (gesamte PAK, gesamte volatile organische Kohlenstoffverbindungen), als auch für Einzelstoffe der jeweiligen Gruppe vor. Um Doppelzählungen zu vermeiden wurde jeweils entweder nur die Stoffgruppe, oder nur die Summe der Einzelstoffe berücksichtigt, je nachdem welche Umweltauswirkung in Summe grösser war.

Es zeigen sich zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Belägen. So übersteigen die SO<sub>x</sub>-Emissionen für FR-PACK die SO<sub>x</sub>-Werte der anderen Beläge um das 20 – 1000-fache. Entsprechend hoch ist das Versauerungspotential (AP) für diesen Belag. Demgegenüber ist der Herstellungsprozess von FR-WATER mit 10 – 50-fach höheren PAK-Emissionen verbunden, als die anderen Asphalte.

Die Beläge FR-PACK und FR-WATER weisen die höchsten VOC-Werte auf, was erhöhte Auswirkungen in der Kategorie POF zur Folge hat. Die Fertigungsprozesse REF-HOT und FR-ZEO weisen zudem hohe Benzolwerte auf, welche sich in der Wirkkategorie HTP am stärksten auswirken.

**Tabelle 14** Luft-Emissionen der Mischtrommel in Phase 2, bezogen auf die funktionelle Einheit [mg/m<sup>2</sup>a].

Emission	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
CO	1.89·10 <sup>3</sup>	1.53·10 <sup>3</sup>	2.95·10 <sup>3</sup>	6.74·10 <sup>2</sup>	1.65·10 <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	1.42·10 <sup>2</sup>	93.6	1.11·10 <sup>2</sup>	54.8	1.50·10 <sup>2</sup>
SO <sub>x</sub>	6.39·10 <sup>2</sup>	16.0	0.843	26.1	0.593
PAK (gesamt, im Staub)	9.81·10 <sup>-2</sup>	3.08·10 <sup>-2</sup>	0.910	1.89·10 <sup>-2</sup>	0.102
Naphthalin	8.66·10 <sup>-2</sup>	2.63·10 <sup>-2</sup>	0.711	7.19·10 <sup>-3</sup>	7.27·10 <sup>-2</sup>
Anthracen	0.00	0.00	8.59·10 <sup>-4</sup>	0.00	2.37·10 <sup>-4</sup>
Phenanthren	1.14·10 <sup>-3</sup>	0.00	2.36·10 <sup>-2</sup>	1.98·10 <sup>-3</sup>	7.12·10 <sup>-3</sup>
Benzo[a]pyren	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TVOC	1.21·10 <sup>2</sup>	74.2	1.70·10 <sup>2</sup>	71.9	63.8
Benzol	0.131	1.71	0.826	0.198	4.45
Xylole	0.441	0.171	0.236	0.306	0.193
Toluol	0.114	9.13·10 <sup>-2</sup>	0.388	0.494	0.578
Staub, TPM	2.12	1.14	1.85	0.719	1.04

**Tabelle 15** Faktoren zur Berechnung der Umweltauswirkung für Emissionen in die Luft während Phase 2.

Emission	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq]	AP [kg SO <sub>2</sub> -eq / kg]	EP [kg NO <sub>x</sub> -eq / kg]	POF [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq / kg]	FAETP [kg 1,4-DCB-eq / kg]	HTP [kg 1,4-DCB-eq / kg]
CO	1.57 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-
NO <sub>x</sub> (als NO <sub>2</sub> )	-	0.500 <sup>a</sup>	0.130 <sup>a</sup>	0.02.80 <sup>a</sup>	-	1.20 <sup>a</sup>
SO <sub>x</sub>	-	1.20 <sup>a</sup>	-	0.0480 <sup>a</sup>	-	0.0960 <sup>a</sup>
PAK (gesamt, im Staub)	-	-	-	-	4.61 <sup>b</sup>	-
Naphthalin	-	-	-	-	0.500 <sup>a</sup>	8.10 <sup>a</sup>
Anthracen	-	-	-	-	140 <sup>a</sup>	0.520 <sup>a</sup>
Phenanthren	-	-	-	-	1.30 <sup>a</sup>	-
Benzo[a]pyren	-	-	-	-	88.0 <sup>a</sup>	-
TVOC	-	-	-	1.11 <sup>a</sup>	-	-
Benzol	-	-	-	0.218 <sup>a</sup>	8.40·10 <sup>-5</sup> <sup>a</sup>	1900 <sup>a</sup>
Xylole	-	-	-	0.105 <sup>a</sup>	9.30·10 <sup>-5</sup> <sup>a</sup>	0.120 <sup>a</sup>
Toluol	-	-	-	0.637 <sup>a</sup>	7.00·10 <sup>-5</sup> <sup>a</sup>	0.330 <sup>a</sup>
Staub, TPM	-	-	-	-	-	0.00820 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Wert aus dem CML-Handbuch (OPERATIONAL ANNEX Part 2b).

<sup>b</sup> Wert rechnerisch ermittelt aus dem Faktor für Benzo[a]pyren gem. CML-Handbuch, und aus dem Verhältnis der Ökofaktoren für BaP und PAK gesamthaft (210'000 UBP/g BaP bzw. 11'000 UBP/g PAK) gem. öbu-Bericht.

<sup>c</sup> Wert rechnerisch ermittelt aus dem Faktor für PM 10 gem. CML-Handbuch, und aus dem Verhältnis der Ökofaktoren für Staub und PM10 (150 UBP/g Staub bzw. 17'000 UBP/g PM10) gem. öbu-Bericht.

### 5.2.3 Auswertung

Die einzelnen Umweltauswirkungen sind in den Abbildungen 22 bis 24 dargestellt. Insgesamt werden die Shadow Costs der Phase 2 vom Primärenergiebedarf dominiert, als Folge der Strom- und Heizöl/Diesel-Verbräuche im Werk. REF-HOT weist erwartungsgemäss den höchsten Energiebedarf auf (siehe Tabelle 16). Die zum Teil deutlichen Unterschiede im Bereich der Luftemissionen aus der Mischtrommel haben einen geringen Einfluss auf die Gesamtbilanz. Einzig das Versauerungspotential im Fall von FR-PACK hat einen merklichen Einfluss auf das Endergebnis.

**Tabelle 16** Primärenergieverbrauch und Shadow Costs der Beläge in Phase 2.

Parameter	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
PE [MJ/m <sup>2</sup> a]	4.47	3.97	4.11	4.26	4.78
PE [% bez. REF-HOT]	93.5%	83.1%	86.0%	89.1%	100%
Shadow Cost [€/m <sup>2</sup> a]	0.0875	0.0745	0.0769	0.0803	0.0916
Shadow Cost [% bez. REF-HOT]	95.5%	81.3%	84.0%	87.6	100%

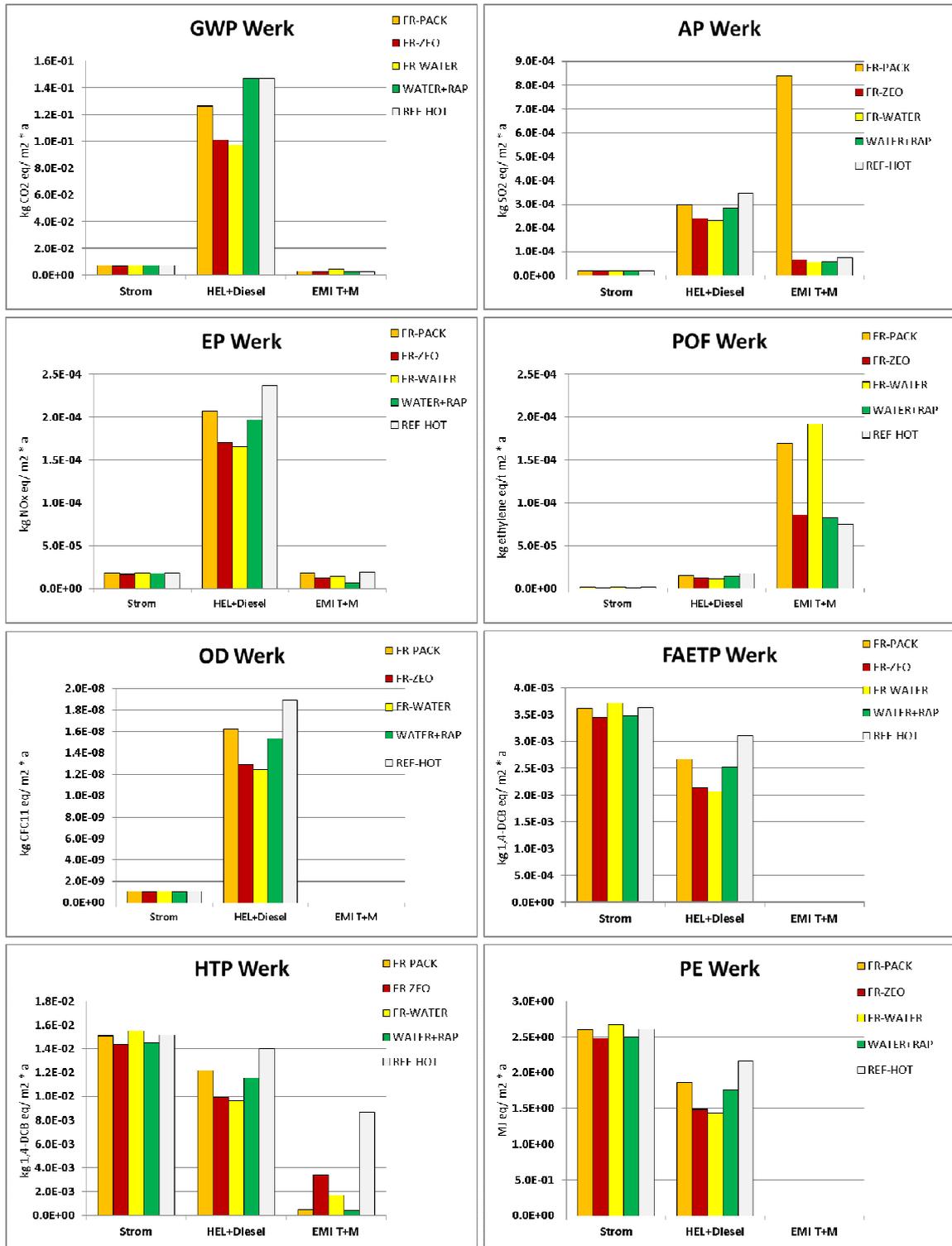


Abbildung 22 Auswirkungen der einzelnen Prozesse aus Phase 2, dargestellt für alle Wirkkategorien.

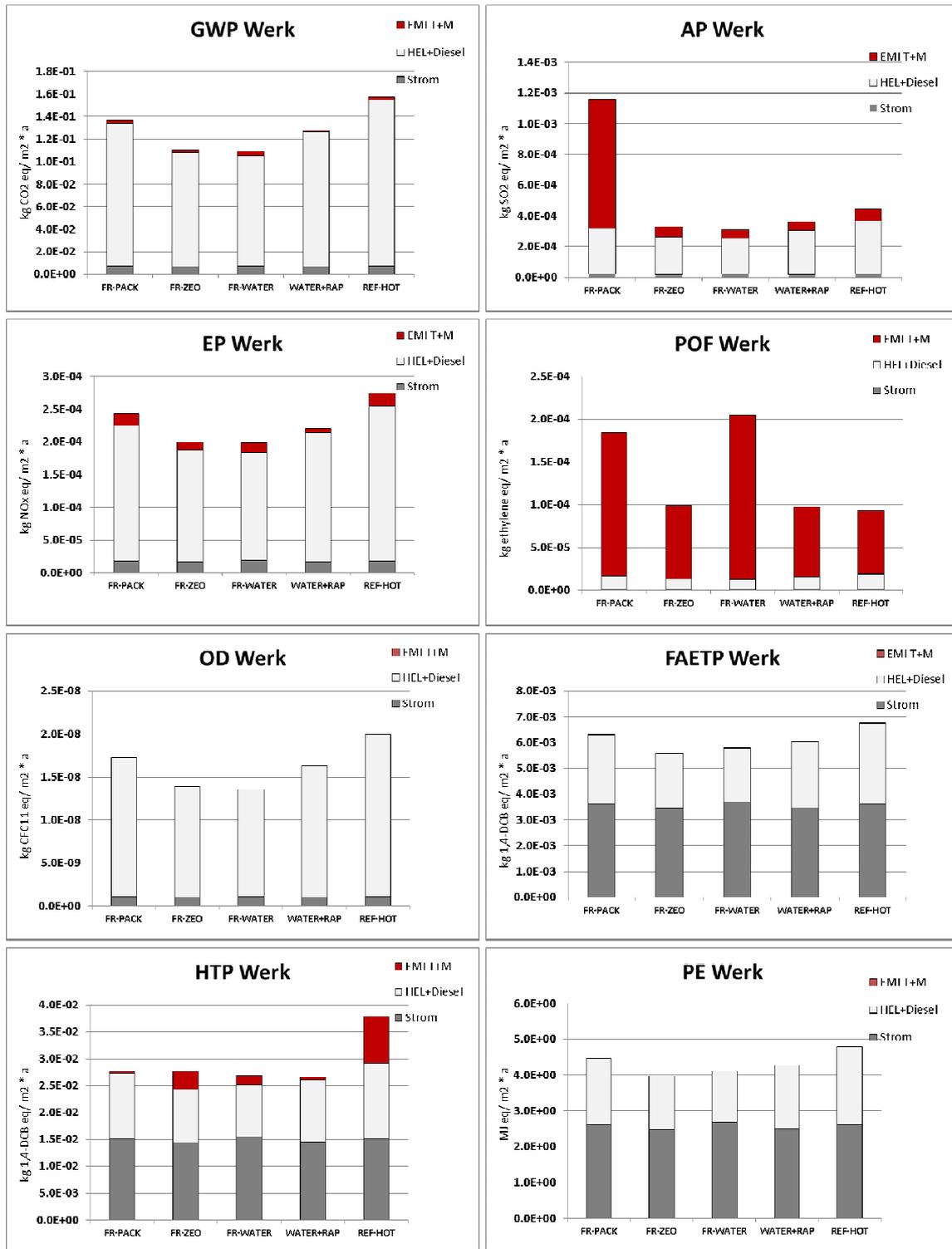
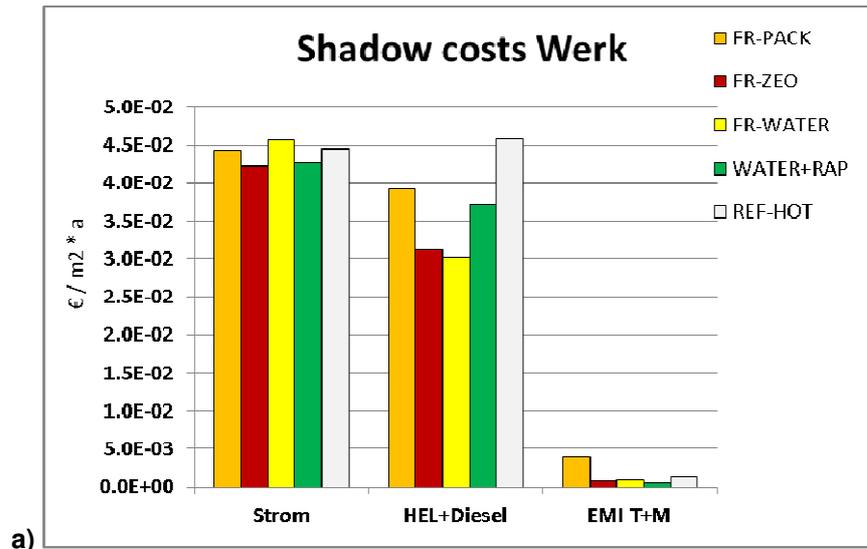
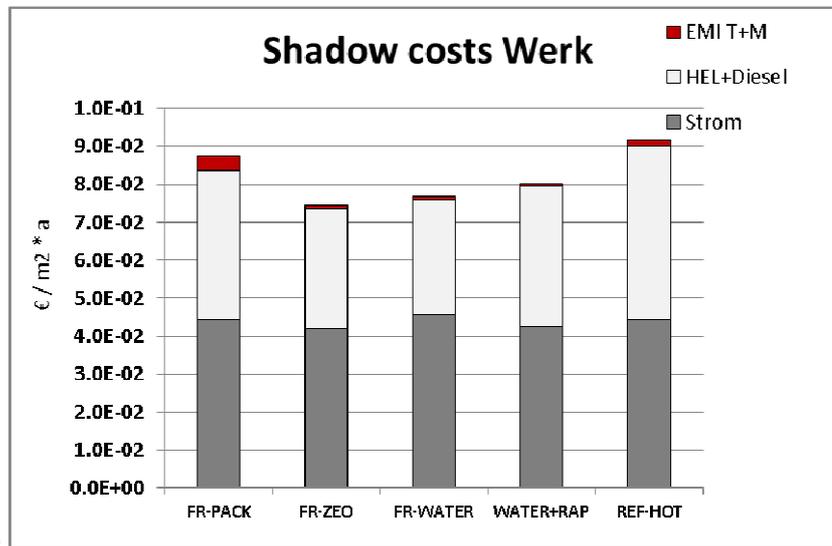


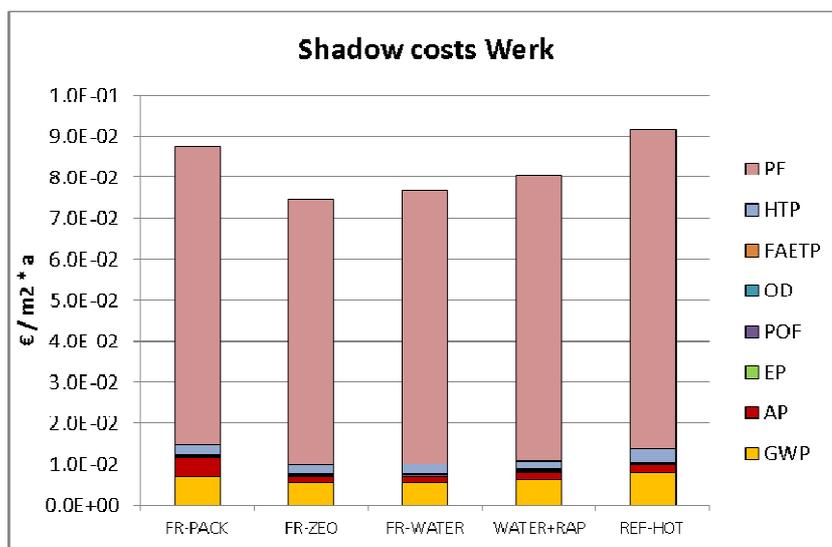
Abbildung 23 Summierte Umweltwirkungen aus Phase 2, dargestellt für alle Wirkkategorien.



a)



b)



c)

**Abbildung 24** Shadow Costs der Phase 2, a) für die einzelnen Prozesse, b) aufsummiert nach Prozess, c) aufsummiert nach Wirkkategorie.

## 5.3 Phase 3: Verlad und Transport des Asphalts

Dieses Kapitel umfasst Umweltauswirkungen, die während des Verlads und des Transportes vom fertigen Mischgut zur Baustelle entstehen. Primär sind dies Energieverbrauch und Emissionen des Transportfahrzeuges. Hinzu kommen Luft-Emissionen des heißen Mischgutes während Verlad und Transport.

### 5.3.1 Ressourcenverbrauch und Emissionen: LKW-Transport

Der Transport des Mischgutes vom Werk zur Baustelle erfolgt durch LKWs. Die Emissionen und Verbräuche ergeben sich aus LKW-Typ und Fahrstanz. Für die vorliegende Studie wurden Verbrauchs- und Emissionswerte eines Euro 5 LKWs verwendet. Die Transportdistanz betrug im untersuchten Fall 34 km (Distanz Werk – Baustelle 17 km). Diese Werte sind identisch für alle Asphalt-Arten (Tabelle 17).

**Tabelle 17** Parameter zur Bestimmung der Umweltauswirkung durch LKW-Transporte.

Parameter	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
Transport [tkm / m <sup>2</sup> a]	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196
Diesel für LKW-Transport [kg / m <sup>2</sup> a]	2.81·10 <sup>-3</sup>				

### 5.3.2 Emissionen aus dem Mischgut: Transport und Verladevorgang

Die Emissionen während des Verlads wurden nicht messtechnisch erfasst. Stattdessen wurde eine Worst case-Annahme getroffen und dieselben Emissionen für PAK, VOC und Staub wie in Phase 2 als Input-Daten eingesetzt (Werte gem. Tabelle 14). Für VOC- und Staubemissionen während des Transportes wurden um 50% tiefere Werte angenommen. PAK-Emissionen während des Transportes wurden Anhand von Konzentrationsmessungen im Mischgut vor und nach dem Transport ermittelt (siehe Tabelle 18) (9). Aus der Differenz ergaben sich die Emissionen während des Transportes. Dieses Mess- und Rechnungsverfahren führte teilweise zu negativen Werten. In diesen Fällen wurde der Wert 0 eingesetzt.

Zur Berechnung der Umweltauswirkungen wurden die Wirkfaktoren gem. Tabelle 15 verwendet, und es wurde das analoge Verfahren zur Vermeidung von Doppelzählungen innerhalb der PAK und TVOC angewandt.

**Tabelle 18** Luft-Emissionen aus dem heißen Mischgut während des Transports [mg/m<sup>2</sup>a].

Parameter	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT	
Ermittelt aus Konzentrationsdifferenz vor und nach Transport	PAK (gesamt, im Staub)	9.81·10 <sup>-2</sup>	3.08·10 <sup>-2</sup>	0.910	1.89·10 <sup>-2</sup>	0.102
	Naphthalin	8.66·10 <sup>-2</sup>	2.63·10 <sup>-2</sup>	0.711	7.19·10 <sup>-3</sup>	7.27·10 <sup>-2</sup>
	Anthracen	0.00	0.00	8.59·10 <sup>-4</sup>	0.00	2.37·10 <sup>-4</sup>
	Phenanthren	1.14·10 <sup>-3</sup>	0.00	2.36·10 <sup>-2</sup>	1.98·10 <sup>-3</sup>	7.12·10 <sup>-3</sup>
	Benzo[a]pyren	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50% der Emissionen während Phase 2	TVOC	1.21·10 <sup>2</sup>	74.2	1.70·10 <sup>2</sup>	71.9	63.8
	Benzol	0.131	1.71	0.826	0.198	4.45
	Xylole	0.441	0.171	0.236	0.306	0.193
	Toluol	0.114	9.13·10 <sup>-2</sup>	0.388	0.494	0.578
	Staub, TPM	2.12	1.14	1.85	0.719	1.04

\* Berechnung ergab negative Differenz.

### 5.3.3 Auswertung

Die einzelnen Umweltauswirkungen für Phase 3 sind in den Abbildungen 25 bis 27 dargestellt. In den Wirkkategorien POF und HTP ist ein nennenswerter Einfluss der Emissionen aus dem Mischgut festzustellen. Alle übrigen Wirkkategorien sowie die aggregierten Shadow Costs werden durch den LKW-Transport bestimmt, welcher für alle Asphalte identisch ist. Unterschiede zwischen den einzelnen Asphalten in dieser Phase des Lebenszyklus ergeben sich als Folge ebenfalls aus den Wirkkategorien POF und HTP.

In der Kategorie POF weisen FR-WATER und FR-PACK höhere Werte auf als die übrigen Asphalte. Dies ist zurückzuführen auf höhere VOC-Emissionen (TVOC) dieser Asphalte.

Ausschlaggebend für die Unterschiede in der Wirkkategorie HTP ist der Benzolgehalt der verschiedenen Beläge. Das Referenzmaterial REF-HOT weist einen deutlich höheren Benzolgehalt auf als die übrigen Asphalte und hat entsprechend hohe Umweltwirkungen in dieser Kategorie.

Die Emissionen während Verlad und Transport basieren zu einem grossen Teil auf Abschätzungen und Worst case Annahmen und sind daher mit einer hohen Ungenauigkeit behaftet. Für die Shadow Costs sind diese Faktoren letztlich jedoch nur in geringem Masse relevant. Der mit Abstand grösste Beitrag zu den Shadow Costs ergibt sich aus dem Primärenergieverbrauch für den LKW-Transport: Für das Gesamtgewicht der Lebensphase 3 ist somit nicht die Art des Belages entscheidend, sondern die Distanz zwischen Mischwerk und Einbaustelle des Belags.

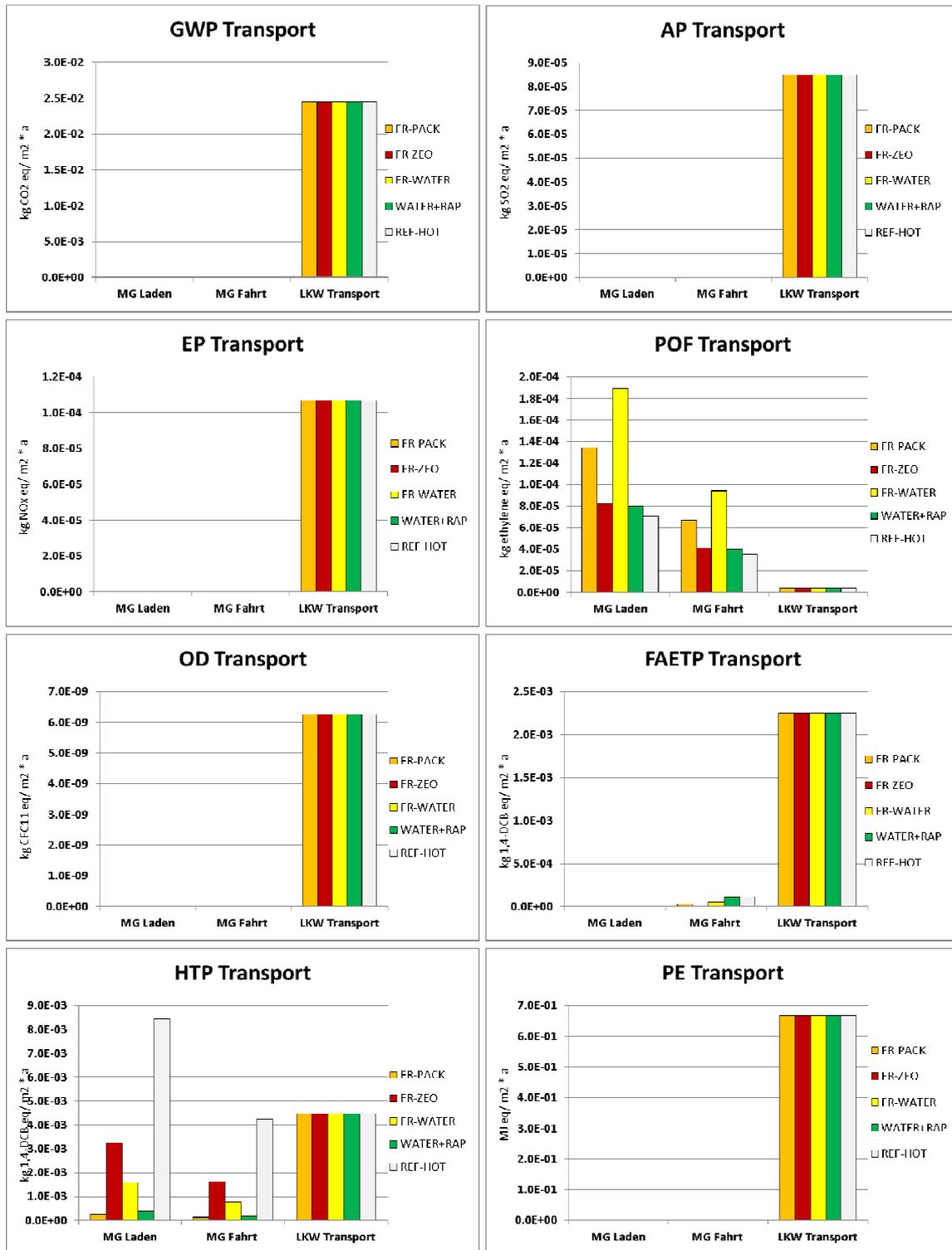
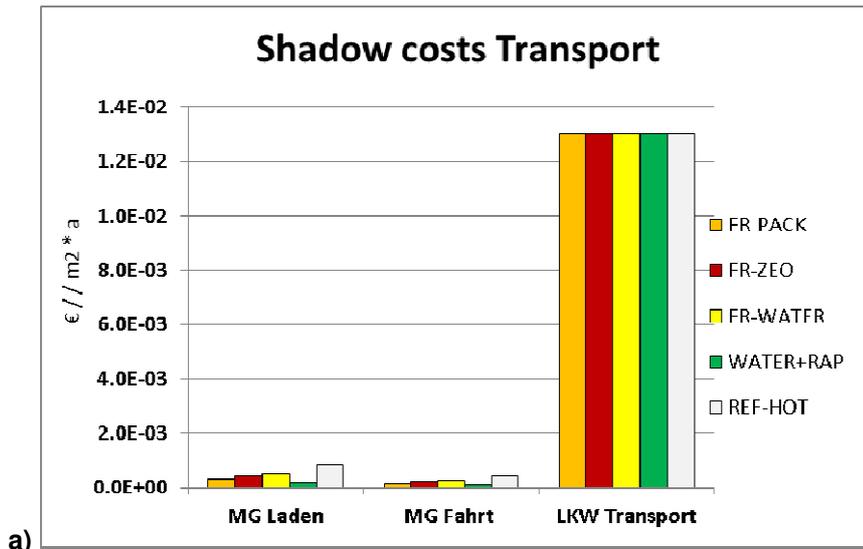


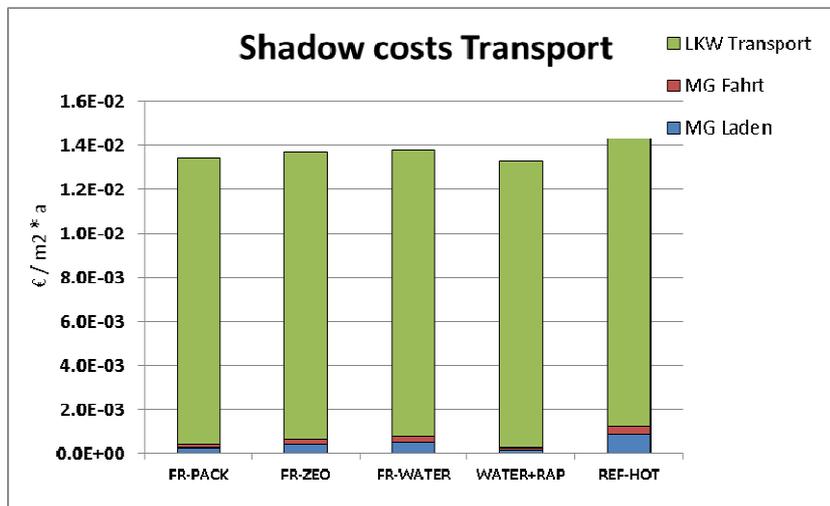
Abbildung 25 Auswirkungen der einzelnen Prozesse aus Phase 3, dargestellt für alle Wirkkategorien.



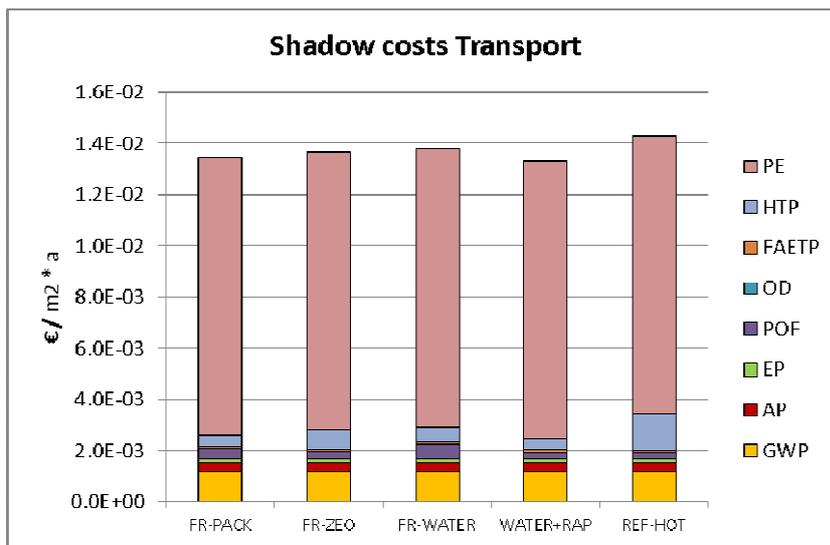
Abbildung 26 Summierte Umweltwirkungen aus Phase 3, dargestellt für alle Wirkkategorien.



a)



b)



c)

**Abbildung 27** Shadow Costs der Phase 3, a) für die einzelnen Prozesse, b) aufsummiert nach Prozess, c) aufsummiert nach Wirkkategorie.

## 5.4 Phase 4: Einbau

Phase 4 umfasst den Einbau des Belags. Die Umweltwirkungen in dieser Phase setzen sich zusammen aus der Umweltbelastung durch die Einbaumaschinen, Emissionen aus dem Belag in die Luft, und Emissionen aus dem Belag ins Wasser.

### 5.4.1 Betrieb von Baumaschinen

Für den Einbau des Belages werden dieselbetriebene Baumaschinen eingesetzt. Der Dieselverbrauch pro Tonne eingebauten Mischgutes wurde während des Einbaus von REF-HOT gemessen. In einem Laborversuch wurde für alle Beläge die notwendige Anzahl Walzdrehungen ermittelt, um 100% Marshall-dichte zu erreichen. Aus dem Treibstoffverbrauch für REF-HOT und den Drehungszahlen wurden die Energieverbräuche für alle Beläge abgeleitet (siehe Tabelle 19) und daraus die Umweltauswirkungen errechnet (10).

Hierbei zeigte sich für WATER+RAP ein erhöhter Energiebedarf beim Einbau (145% bezogen auf REF-HOT).

**Tabelle 19** Verhalten der Beläge beim Einbau und resultierender Energieverbrauch.

Parameter	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
Drehungen bis 100% Marshall-dichte	21	22	25	33	23
Dieselverbrauch Baumaschinen [MJ/m <sup>2</sup> a].	0.113	0.118	0.134	0.177	0.124

### 5.4.2 Emissionen aus den Belagsmaterialien

Tabelle 20 stellt die gemessenen Luft-Emissionen aus dem Belagsmaterial zusammen (11). Die gesamten VOC-Emissionen (TVOC) wurden während des Einbaus gemessen, die Werte für Staub, PAK und die einzelnen VOC-Verbindungen stammen aus Labormessungen, da die betroffenen Stoffe bei der Feldmessung nicht detektiert werden konnten. Wiederum wurden die Wirkfaktoren gem. Tabelle 15 angewandt.

**Tabelle 20** Luft-Emissionen aus den Asphalten während der Einbau-Phase [mg/m<sup>2</sup>a].

Parameter	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
PAK (gesamt, im Staub)	2.13·10 <sup>-3</sup>	2.49·10 <sup>-3</sup>	1.96·10 <sup>-3</sup>	3.91·10 <sup>-3</sup>	2.31·10 <sup>-3</sup>
Naphthalin	2.13·10 <sup>-4</sup>	2.13·10 <sup>-4</sup>	5.51·10 <sup>-4</sup>	2.13·10 <sup>-4</sup>	1.42·10 <sup>-4</sup>
Anthracen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Phenanthren	4.98·10 <sup>-4</sup>	5.33·10 <sup>-4</sup>	1.07·10 <sup>-4</sup>	1.39·10 <sup>-3</sup>	6.93·10 <sup>-4</sup>
Benzo[a]pyren	0.00	8.89·10 <sup>-5</sup>	0.00	0.00	0.00
TVOC	88.2	67.0	67.0	35.9	1.94·10 <sup>2</sup>
Benzol	8.89·10 <sup>-4</sup>	1.07·10 <sup>-3</sup>	1.24E·10 <sup>-3</sup>	1.24·10 <sup>-3</sup>	3.02·10 <sup>-3</sup>
Xylol	2.19·10 <sup>-2</sup>	2.88·10 <sup>-2</sup>	3.39·10 <sup>-2</sup>	3.25·10 <sup>-2</sup>	2.43·10 <sup>-2</sup>
Toluol	0.204	2.67·10 <sup>-2</sup>	5.76·10 <sup>-2</sup>	3.77·10 <sup>-2</sup>	2.56·10 <sup>-2</sup>
Staub, TPM	< d.l.	7.11·10 <sup>-2</sup>	< d.l.	< d.l.	0.924

Zur Abschätzungen der möglichen Emissionen aus dem Belagsmaterial ins Wasser wurden Laborversuche durchgeführt (12). Hierzu wurden lose Mischgutproben während 2 Tagen in Wasser getaucht (0.2 kg/L). Anschliessend wurde die Gesamtkonzentration an Kohlenstoffverbindungen (DOC) und die PAK-Konzentration im Eluat gemessen. Die Werte wurden auf die gesamte ausgewaschene Stoffmenge umgerechnet (Tabelle 21).

Es wurden die Wirkfaktoren gemäss Tabelle 22 angewendet. Um Doppelzählungen in der Kategorie FAETP zu vermeiden, wurde entweder die Wirkung PAK gesamt, oder die Summe der Wirkungen der vier spezifischen Stoffe verwendet, je nachdem welcher Wert höher ausfiel.

**Tabelle 21** Emissionen ins Wasser (Leaching) aus den Asphalten während der Einbau-Phase [mg/m<sup>2</sup>a].

Parameter	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
PAK (gesamt, im Staub)	2.88·10 <sup>-3</sup>	2.88·10 <sup>-3</sup>	5.76·10 <sup>-3</sup>	3.20·10 <sup>-2</sup>	3.74·10 <sup>-3</sup>
Naphthalin	8.64·10 <sup>-4</sup>	1.15·10 <sup>-3</sup>	4.90·10 <sup>-3</sup>	2.02·10 <sup>-3</sup>	2.02·10 <sup>-3</sup>
Anthracen	< d.l.	< d.l.	< d.l.	2.59E-03	< d.l.
Phenanthren	1.44·10 <sup>-3</sup>	1.15·10 <sup>-3</sup>	5.76·10 <sup>-4</sup>	9.50·10 <sup>-3</sup>	1.15·10 <sup>-3</sup>
Benzo[a]pyren	< d.l.				
DOC	11.8	8.35	12.4	12.4	6.05

**Tabelle 22** Faktoren zur Berechnung der Umweltauswirkung für Emissionen ins Wasser während Phase 4.

Parameter	FAETP [kg 1,4-DCB-eq / kg]	HTP [kg 1,4-DCB-eq / kg]
PAK (gesamt)	77'000 <sup>a</sup>	
Naphthalin	660 <sup>a</sup>	5.60 <sup>b</sup>
Anthracen	5.70·10 <sup>4</sup> <sup>a</sup>	2.10 <sup>b</sup>
Phenanthren	520 <sup>a</sup>	
Benzo[a]pyren	2.50·10 <sup>5</sup> <sup>a</sup>	
DOC	360 <sup>b</sup>	

<sup>a</sup>: Wert aus dem CML-Handbuch (OPERATIONAL ANNEX Part 2b)

<sup>b</sup>: Wert abgeleitet aus dem Verhältnis der Faktoren BaP : PAK gesamt, und aus dem Verhältnis der Ökofaktoren BaP : PAK gesamt : DOC gemäss öbu-Bericht.

### 5.4.3 Auswertung

Die einzelnen Umweltauswirkungen für Phase 4 sind in den Abbildungen 28 bis 30 dargestellt. Die Wirkkategorie FAETP wird erwartungsgemäss dominiert durch das Leaching von Schadstoffen ins Gewässer. Die Kategorie POF wird geprägt durch Luftemissionen aus dem Belag. Alle übrigen Wirkkategorien werden durch den Betrieb der Baumaschinen dominiert. Hierbei schneidet WATER+RAP am schlechtesten ab, in Übereinstimmung mit dem erhöhten Energiebedarf beim Einbau.

FAETP: Das gewässerschädigende Potential durch Leaching von Schadstoffen aus den Belägen ist am höchsten für WATER+RAP, gefolgt von FR-WATER und FR-PACK. Die Umweltwirkung setzt sich dabei aus dem Gehalt an PAK und löslichen organischen Verbindungen zusammen. WATER+RAP weist einen deutlich höheren PAK-Gehalt auf als die übrigen Beläge, bei gleichzeitig hohem Gehalt an löslichen organischen Verbindungen.

Die Auswirkungen in der Kategorie POF korrelieren mit den Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen. Die gemessenen Werte zeigen eine andere Verteilung als

jene in Phase 3. Beim Einbau wurde die höchsten VOC-Emissionen für das Material REF-HOT gemessen, die Messwerte für die anderen Asphalte sind 50-80% tiefer.

Luftemissionen aus dem Belag tragen nicht signifikant zur Wirkkategorie HTP in Phase 4 bei. Die PAK mit hoher Toxizität wurden bei den Feldmessungen nicht nachgewiesen.

Analog zur Auswertung in Phase 3 werden auch die Shadow Costs der Phase 4 durch die eingesetzten dieselgetriebenen Maschinen dominiert. Wichtigste Wirkkategorie ist der Primärenergieverbrauch. Luft- und Wasser-Emissionen haben nur sehr geringen Einfluss auf die Shadow Costs.

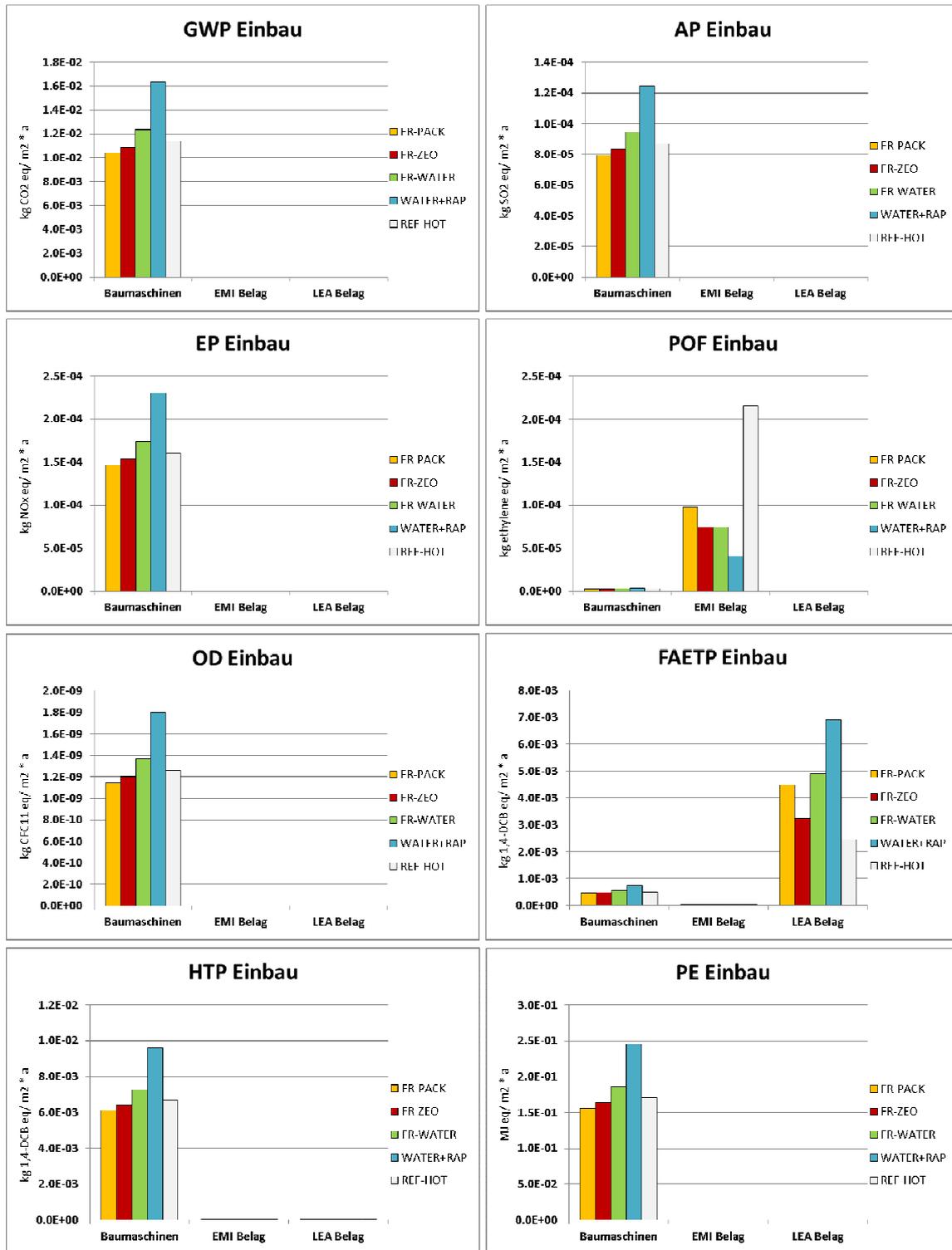
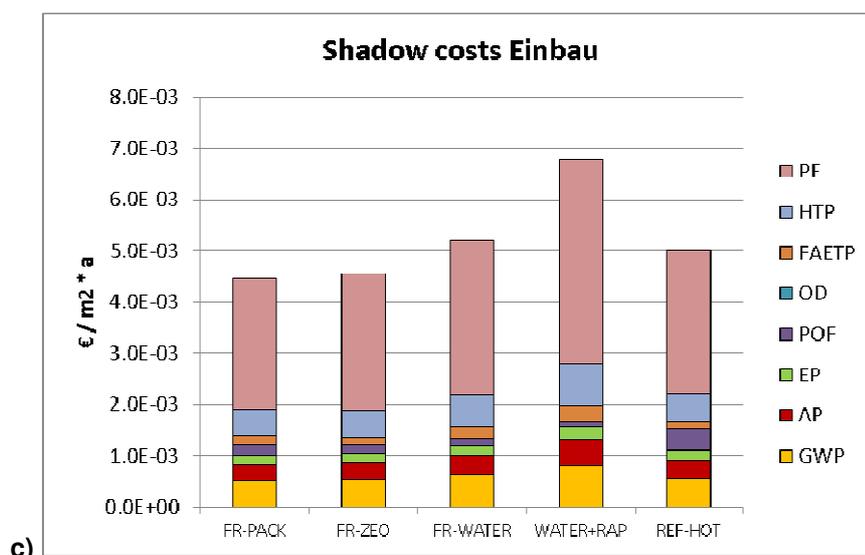
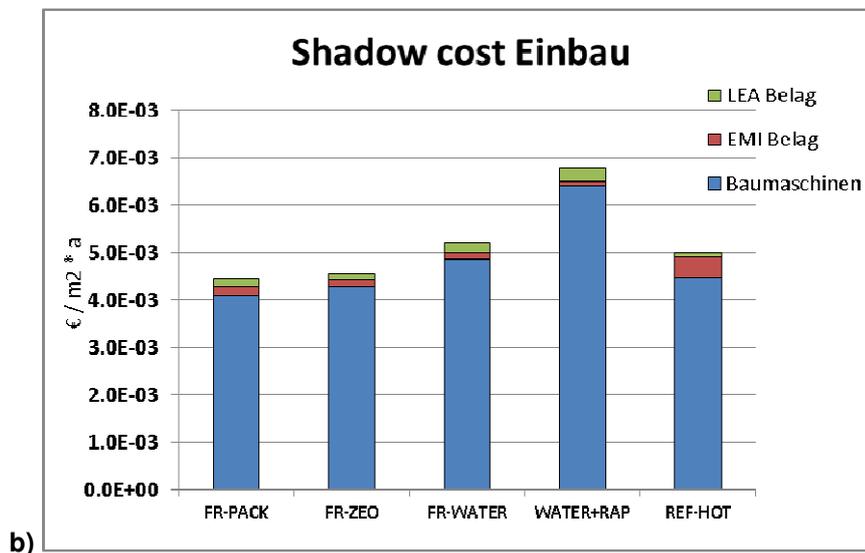
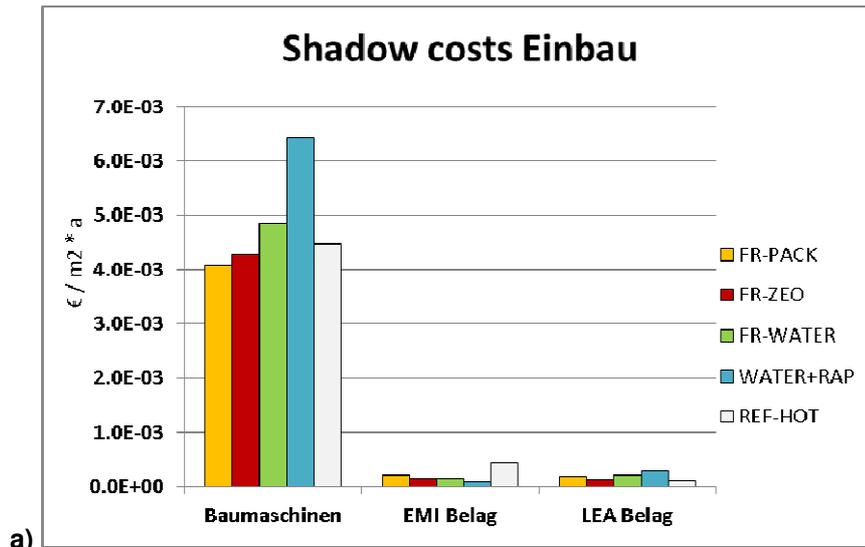


Abbildung 28 Auswirkungen der einzelnen Prozesse aus Phase 4, dargestellt für alle Wirkkategorien.



Abbildung 29 Summierte Umweltwirkungen aus Phase 4, dargestellt für alle Wirkkategorien.



**Abbildung 30** Shadow Costs der Phase 4, a) für die einzelnen Prozesse, b) aufsummiert nach Prozess, c) aufsummiert nach Wirkkategorie.

## 5.5 Phase 5: Nutzungsphase, Unterhalt und Ausbau

In dieser Phase werden Unterhaltmassnahmen und Ausbau des Altbelags, sowie Emissionen aus dem Belag während seiner Nutzungsdauer berücksichtigt.

### 5.5.1 Unterhalt und Ausbau

Für Unterhalt und Ausbau liegen keine Messwerte vor. Es wurden folgende Annahmen getroffen:

- Annahme 1: Die notwendige Energie für Unterhaltsarbeiten über die gesamte Lebensdauer wurde auf 50% der für den Einbau aufgewendeten Energie geschätzt.
- Annahme 2: Die gesamte Strassenfläche wird am Ende der Lebensdauer mit einer Fräse (Ripper) abgetragen. Ein mittlerer Energiebedarf des Abbruchgerätes wurde aus den Betriebsdaten ermittelt.
- Annahme 3: Alle verwendeten Maschinen sind mit Partikelfiltern ausgerüstet.

Die resultierenden Werte für den Energiebedarf von Unterhaltmassnahmen sind in Tabelle 23 dargestellt. Es wurden Wirkfaktoren gem. Ecoinvent-Datenbank verwendet.

**Tabelle 23** Energiebedarf für Unterhalt und Ausbau der Strassenbeläge [ $\text{MJ}/\text{m}^2\text{a}$ ].

Parameter	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
Ripping: Diesel Fräse	$3.22 \cdot 10^{-2}$				
Wartung: Diesel	$5.64 \cdot 10^{-2}$	$5.91 \cdot 10^{-2}$	$6.72 \cdot 10^{-2}$	$8.87 \cdot 10^{-2}$	$6.18 \cdot 10^{-2}$

### 5.5.2 Emissionen ins Wasser

Über die gesamte Nutzungsdauer eines Strassenbelages besteht die Möglichkeit, dass Schadstoffe aus dem Belag ins Gewässer emittiert werden. Für das langfristige Leaching sind insbesondere PAK relevant: Im Gegensatz zu flüchtigen organischen Verbindungen verbleiben sie über längere Zeit im Belag und können so über Jahre zu einer kontinuierlichen Gewässerbelastung beitragen. Zudem weisen PAK zum Teil eine sehr hohe Toxizität auf, wodurch sie trotz sehr geringer Konzentration im Belag umweltrelevant sind.

Die Leaching-Rate der PAK aus dem intakten Belag wurde anhand von Laborexperimenten abgeschätzt (13). Hierzu wurden Asphaltplatten mit genau bestimmtem, erhöhtem PAK-Gehalt ( $1000 \text{ mg PAK} / \text{kg Belag}$ ) während insgesamt 88 Tagen in Wasser getaucht. Während 87 Tagen wurde das Wasser im Versuch nicht ausgetauscht, und in regelmässigen Abständen wurden die PAK-Konzentrationen im Wasser bestimmt. Es zeigte sich, dass nicht sämtliche PAK-Konzentrationen im Wasser wie erwartet kontinuierlich anstiegen: Stattdessen zeigten mehrere PAK einen steilen Konzentrationsanstieg gefolgt von einem Abfallen der Konzentration. Ein Verlust von PAK aus dem Versuchsaufbau war weder über die Luft noch über das Versuchsgefäss anzunehmen. Eine denkbare Erklärung für das beobachtete Verhalten ist eine inhomogene Verteilung der PAK im Material, wodurch PAK nach Eintauchen ins Wasser mit verhältnismässig hoher Rate aus Regionen hoher Konzentration ausdiffundieren. Danach diffundieren PAK zurück in die Asphaltmatrix, in Regionen mit tiefer PAK-Anfangskonzentration, bis sich ein Gleichgewicht einstellt.

Nach 87 Tagen wurde das Eluatwasser ausgetauscht und nach einem weiteren Tag eine erneute Konzentrationsmessung durchgeführt. Die so gemessenen Werte stimmten gut mit den letzten Messwerten vor dem Eluatwechsel überein, und diese Endkonzentration wurde zur Abschätzung der Leaching-Rate im realen System verwendet: Die prozentuale Leaching-Rate der PAK pro Belagfläche und Tag wurde auf die untersuchten Strassenbeläge und die prognostizierte Lebensdauer von 25 Jahren linear extrapoliert.

Die so ermittelten Werte sind in Tabelle 24 angegeben und entsprechen einem Austrag von 5.3% der im Belag enthaltenen PAK über die Nutzungsphase hinweg.

**Tabelle 24** Errechnete Werte für das Auswaschen von PAK während der Nutzungsphase [mg/m<sup>2</sup>a].

Parameter	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
PAK (gesamt)	0.550	1.28	1.14	5.70	0.140
Naphthalin	0.130	0.483	0.104	0.289	1.28·10 <sup>-2</sup>
Anthracen	4.49·10 <sup>-2</sup>	7.07·10 <sup>-2</sup>	7.07·10 <sup>-2</sup>	0.207	1.33·10 <sup>-2</sup>
Phenanthren	0.149	0.227	0.233	0.522	5.63·10 <sup>-2</sup>
Benzo[a]pyren	0.00	0.00	3.54·10 <sup>-2</sup>	0.460	0.00

Für die weitere Berechnung wurden dieselben Wirkfaktoren wie in Phase 4 verwendet (siehe Tabelle 22).

Anmerkung: Neben einer linearen Extrapolation wurde auch eine Berechnung für exponentiell abnehmende Leaching-Rate erstellt. Der so errechnete Austrag beträgt 5.1%. Angesichts der insgesamt grossen Unsicherheit in der Abschätzung der Leaching-Rate ist diese Abweichung unbedeutend.

### 5.5.3 Auswertung

Die einzelnen Umweltauswirkungen für Phase 5 sind in den Abbildungen 31 bis 33 dargestellt. Das Belagsmaterial WATER+RAP zeigt in sämtlichen Wirkkategorien die höchsten Werte. Diese Lebensphase unterscheidet sich darin von den bisher beschriebenen Lebensphasen 1 bis 4 (ebenfalls Phase 6), in denen der recyklathaltige Belag jeweils besser abschneidet als die übrigen Beläge.

Die hohen Werte für WATER+RAP rühren einerseits von dem höheren Energiebedarf für die Wartung her, welcher aus den Werten für den Einbau in Phase 4 abgeleitet wurde. Andererseits enthält das Material WATER+RAP deutlich mehr PAK, insbesondere das als besonders schädlich eingestufte Benzo[a]pyren. Die Konzentrierung der PAK als Folge des Recyclingprozesses führt zu verstärktem Leaching während der Nutzung, wodurch das gewässerschädigende Potential FAETP für diesen Belag verhältnismässig hoch ausfällt.

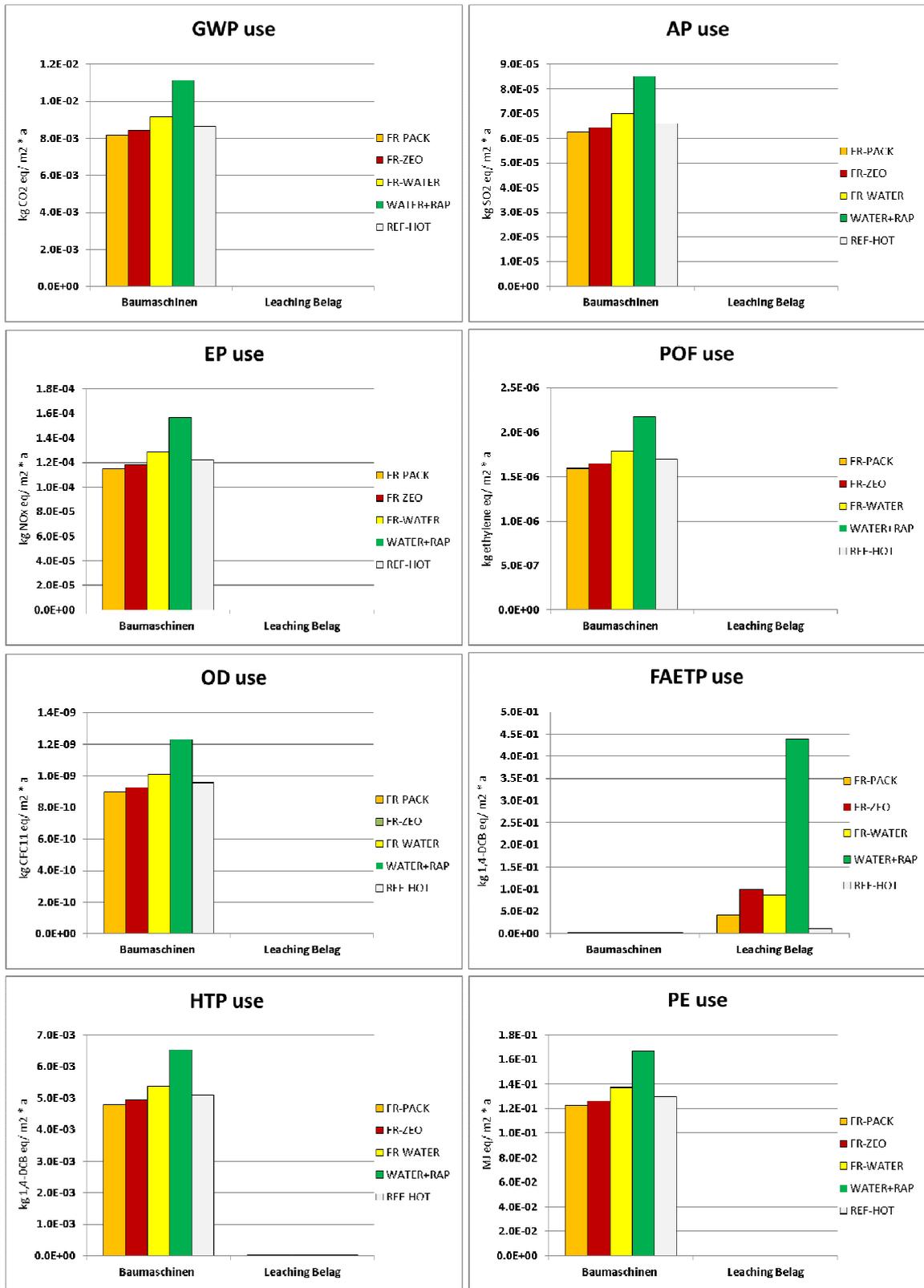
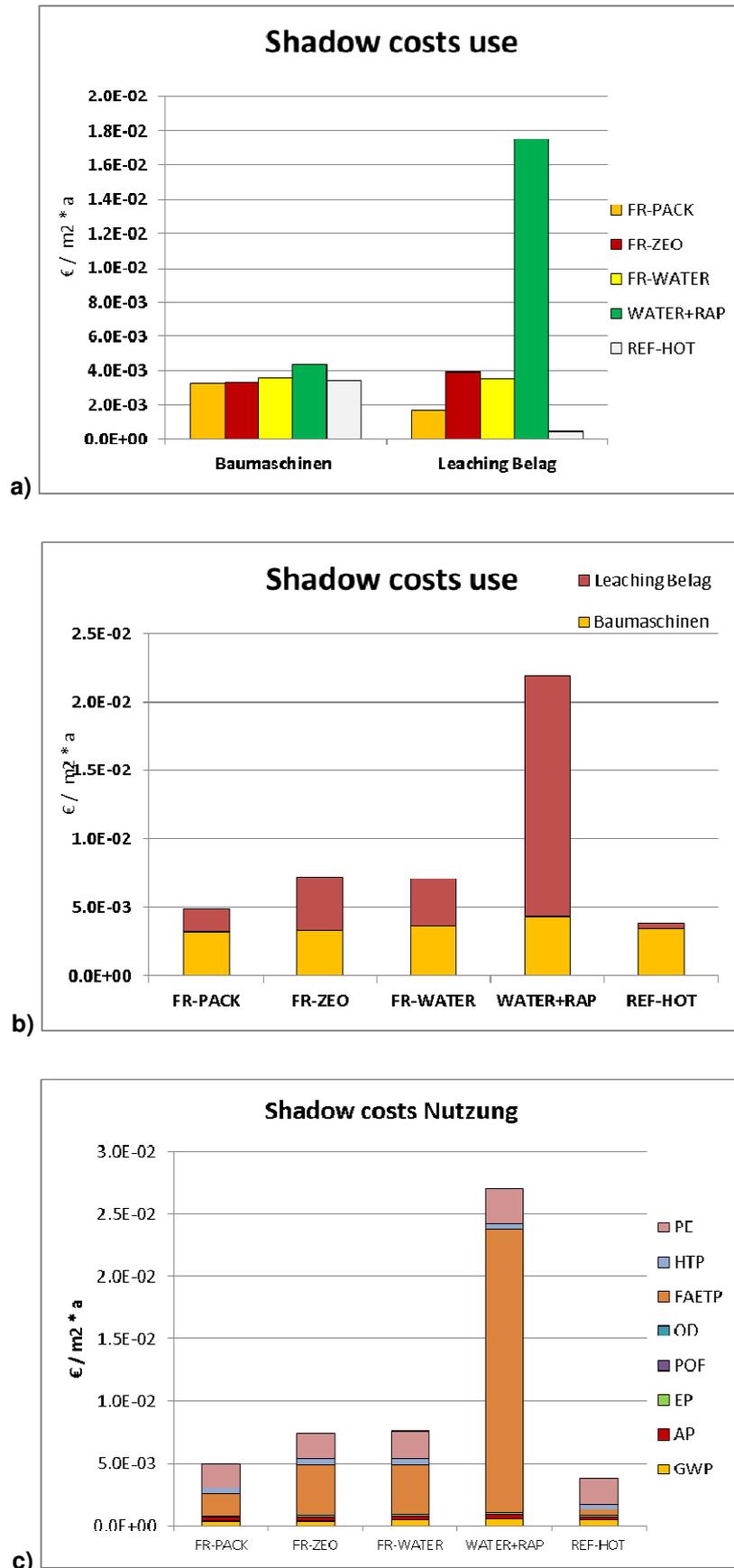


Abbildung 31 Auswirkungen der einzelnen Prozesse aus Phase 5, dargestellt für alle Wirkkategorien.



Abbildung 32 Summierte Umweltwirkungen aus Phase 5, dargestellt für alle Wirkkategorien.



**Abbildung 33** Shadow Costs der Phase 5, a) für die einzelnen Prozesse, b) aufsummiert nach Prozess, c) aufsummiert nach Wirkkategorie.

## 5.6 Phase 6: Bonus durch Materialrecycling

In dieser Phase wird der Bonus aus dem Recycling von Altbelag berechnet. Es wurde ein Anteil von 70% für die Ressourcen Kies, Sand und Bitumen angenommen, der wieder für den Einsatz in Strassenbelägen verwendet wird. Die damit gewonnene Einsparung errechnet sich aus den Ressourcenverbräuchen und Emissionen für die Primär- und Sekundärrohstoffgewinnung. Die dargestellten Daten in den Abbildungen 34 bis 36 entsprechen somit den Daten aus Phase 1, multipliziert mit dem Faktor 0.7. In der Gesamtbilanz werden diese Werte von den anderen Wirkkategorien subtrahiert.

Nicht berücksichtigt wurden chemische Additive (FR-PACK) und Zeolithe (FR-ZEO). Es wurde angenommen, dass die im Belag enthaltenen Additive ihre Wirkung nicht ein zweites Mal entfalten können. Für Zeolithe ist dies wahrscheinlich, da der Wirkmechanismus der Zeolithe auf der Freisetzung von Kristallwasser während des Fertigungsprozesses beruht. Im fertigen Belag liegen die Zeolithe ‚ausgebrannt‘ und in der Asphaltmatrix gebunden vor. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass Zeolith-Additive ohne ein spezielles Aufbereitungs- und Regenerierungsverfahren des Recyklats ihre Wirksamkeit einbüßen.

Im Fall der chemischen Additive ist diese Annahme von geringer Bedeutung, da diese Additive in keiner Wirkkategorie signifikante Umweltauswirkungen zeigen. Im Fall der Zeolithe hat die Annahme erhebliche Auswirkungen auf das Gesamtergebnis der Ökobilanz: Der Belag FR-ZEO zeigt aufgrund der Verwendung von Zeolithen erhöhte Umweltauswirkungen in Phase 1 und schneidet in allen Wirkkategorien während dieser Lebensphase schlechter ab als die übrigen Beläge. Indem der Zeolith-Anteil im Belag als nicht rezyklierbar angesehen wird, fällt der Bonus für den Belag FR-ZEO geringer aus, und die negativen Effekte bei der Verwendung von Zeolithen fallen noch einmal stärker aus.

Die Graphiken 34 bis 36 belegen erneut das hohe Gewicht des Bitumens an den Umweltwirkungen von Asphalt im Vergleich zu den mengenmässig überwiegenden Bestandteilen Sand und Kies.

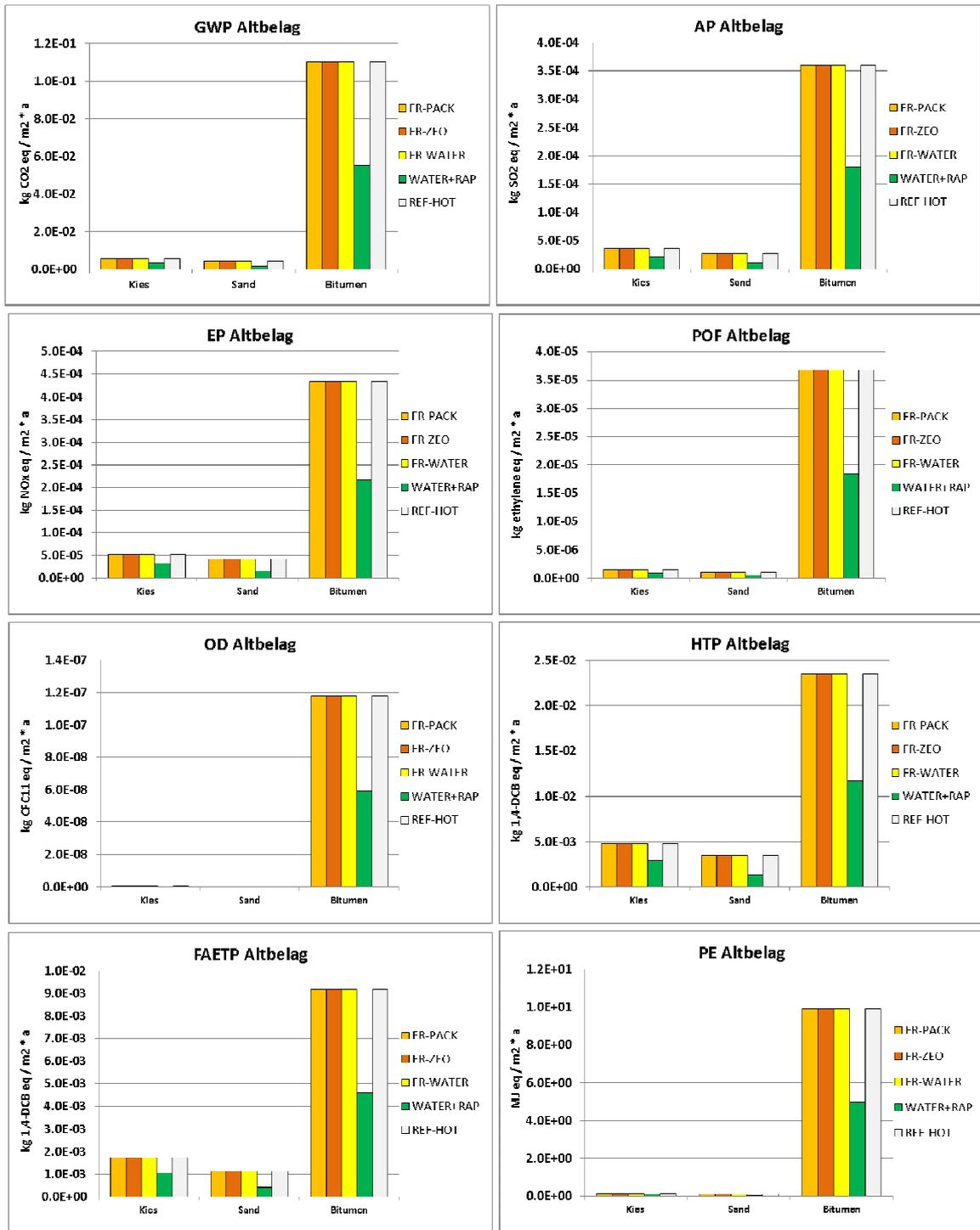
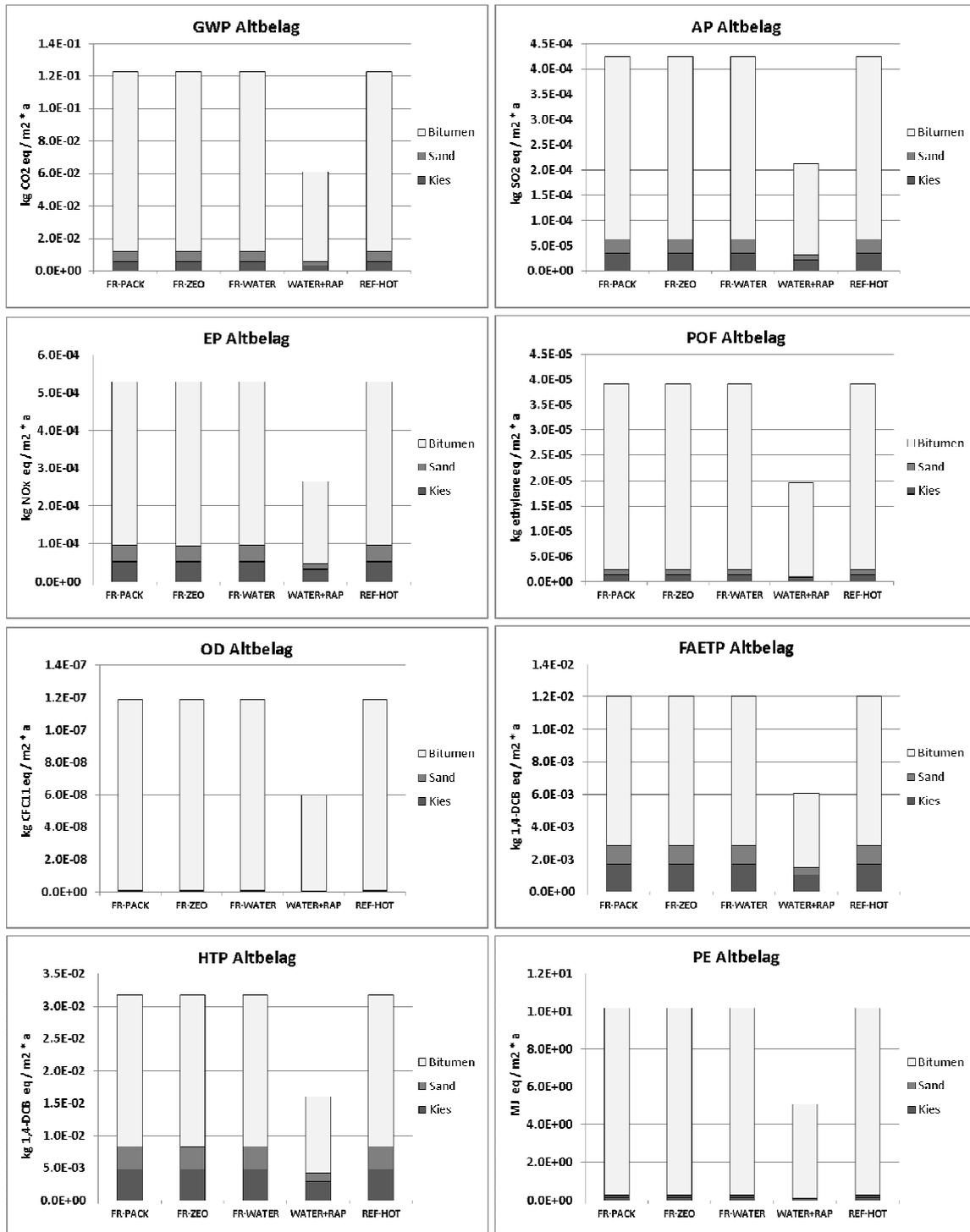


Abbildung 34 Auswirkungen der einzelnen Prozesse aus Phase 6, dargestellt für alle Wirkkategorien.



**Abbildung 35** Summierte Umweltwirkungen aus Phase 6, dargestellt für alle Wirkkategorien.

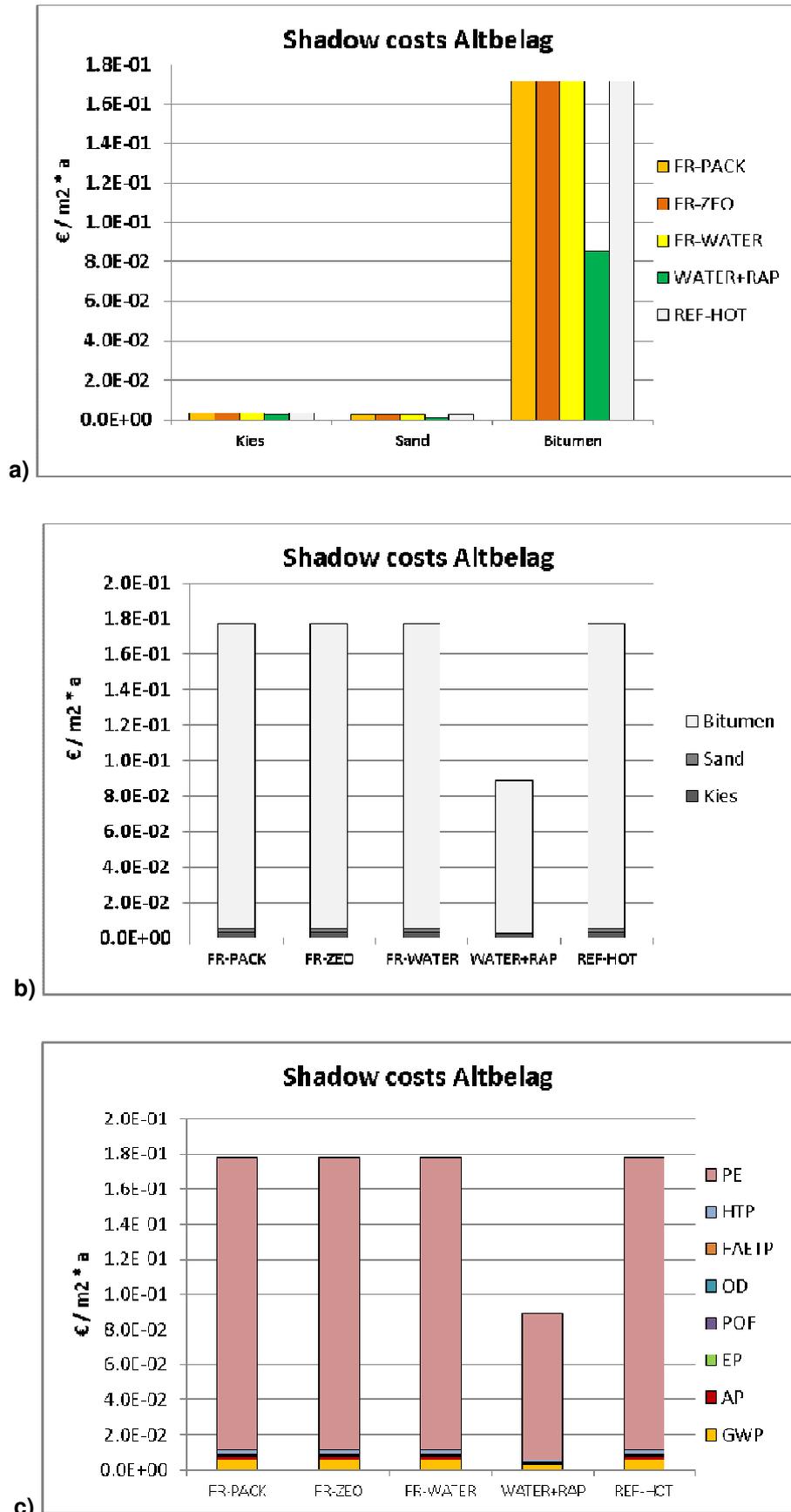


Abbildung 36 Shadow Costs der Phase 6, a) für die einzelnen Prozesse, b) aufsummiert nach Prozess, c) aufsummiert nach Wirkkategorie.

## 5.7 Phase 7: End-of-life: Verhalten des Materials als Abfall

Phase 7 umfasst die Deponierung von Altbelag und die Umweltwirkung nach der Deponierung. Nicht in Phase 7 berücksichtigt werden der Ausbau des Belages sowie Luftemissionen des Abfallmaterials vor der Deponierung, da diese Beiträge bereits in Phase 5 berücksichtigt werden.

### 5.7.1 Energie für die Abfallbehandlung

Für den Deponierungsprozess liegen keine belastbaren Daten vor. Ein entsprechender Wert wurde abgeschätzt: Es wird für sämtliche Belagsarten ein Energiebedarf von 0.5 MJ Diesel pro Tonne Mischgut angenommen. Der Aufwand für die Materialverschiebungen im Rahmen der Abfallbehandlung sind im Vergleich zum Belagsbau als klein einzustufen, der Einfluss auf die Gesamtbilanz der Beläge ist nicht signifikant.

### 5.7.2 Leaching von Schadstoffen in Gewässer

Es wird von einer Entsorgung auf einer Reaktordeponie ausgegangen. Zusätzlich zu den Auswirkungen nach der Deponierung (siehe 5.3.1) wird angenommen, dass das zerstörte Belagsmaterial während 90 Tagen offen liegt und der Witterung ausgesetzt ist. Während dieser Zwischenphase können PAK in Boden und Gewässer aus dem aufgebrochenen Belagsmaterial ausgewaschen. Das Ausmass des Leaching von Schadstoffen wurde errechnet aus dem PAK-Gehalt des Materials nach der Nutzungsphase und aus Laborversuchen zum Leaching aus zerstörtem Belagsmaterial.

Es wurde eine exponentiell abnehmende Austrittsrate angenommen, basierend auf den Labormessungen beschrieben in Phase 4 (Leaching aus losem Mischgut über 2 Tage, siehe 5.4.2). Die erwarteten Stoffmengen sind in Tabelle 25 dargestellt. Für die weitere Berechnung wurden die Wirkfaktoren gem. Tabelle 22 verwendet.

**Tabelle 25** Ausgetragene PAK-Mengen aus dem zerstörtem Belagsmaterial vor der endgültigen Deponierung [ $\text{mg}/\text{m}^2\text{a}$ ].

Parameter	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WATER	WATER+RAP	REF-HOT
PAK (gesamt)	0.116	0.122	0.226	1.36	$3.25 \cdot 10^{-2}$
Naphthalin	$2.73 \cdot 10^{-2}$	$4.59 \cdot 10^{-2}$	$2.06 \cdot 10^{-2}$	$6.87 \cdot 10^{-2}$	$2.98 \cdot 10^{-3}$
Anthracen	$9.45 \cdot 10^{-3}$	$6.73 \cdot 10^{-3}$	$1.41 \cdot 10^{-2}$	$4.92 \cdot 10^{-2}$	$3.08 \cdot 10^{-3}$
Phenanthren	$3.14 \cdot 10^{-2}$	$2.16 \cdot 10^{-2}$	$4.63 \cdot 10^{-2}$	0.124	$1.31 \cdot 10^{-2}$
Benzo[a]pyren	0.00	0.00	$7.03 \cdot 10^{-3}$	0.109	0.00

### 5.7.3 Verhalten in der Deponie

Nachdem in Phase 6 von einer Recyclingrate von 70% ausgegangen wurde, verbleiben 30% zur Deponierung. Für die Auswirkungen des deponierten Asphalts liegt ein Ecoinvent-Datensatz vor, welcher Emissionen in die Luft sowie Leaching von Schadstoffen in Grundwasser und Kanalisation beinhaltet.

### 5.7.4 Auswertung

Die einzelnen Umweltauswirkungen für Phase 7 sind in den Abbildungen 37 bis 39 dargestellt. Der Hauptbeitrag stammt aus dem Deponieverhalten, für welches identische Werte für alle Beläge angenommen wurden. Der Energieverbrauch für den Deponierungsprozess gemäss der gemachten Annahme beeinflusst das Resultat nicht nennenswert. Das Leaching von PAKs aus dem zerstörtem Belagsmaterial liefert als einziger Parameter in dieser Lebensphase unterschiedliche Werte für die untersuchten

Beläge. Analog zur Phase 5 weist das Material WATER+RAP aufgrund des hohen PAK-Gehalts die höchste Wirkung auf.

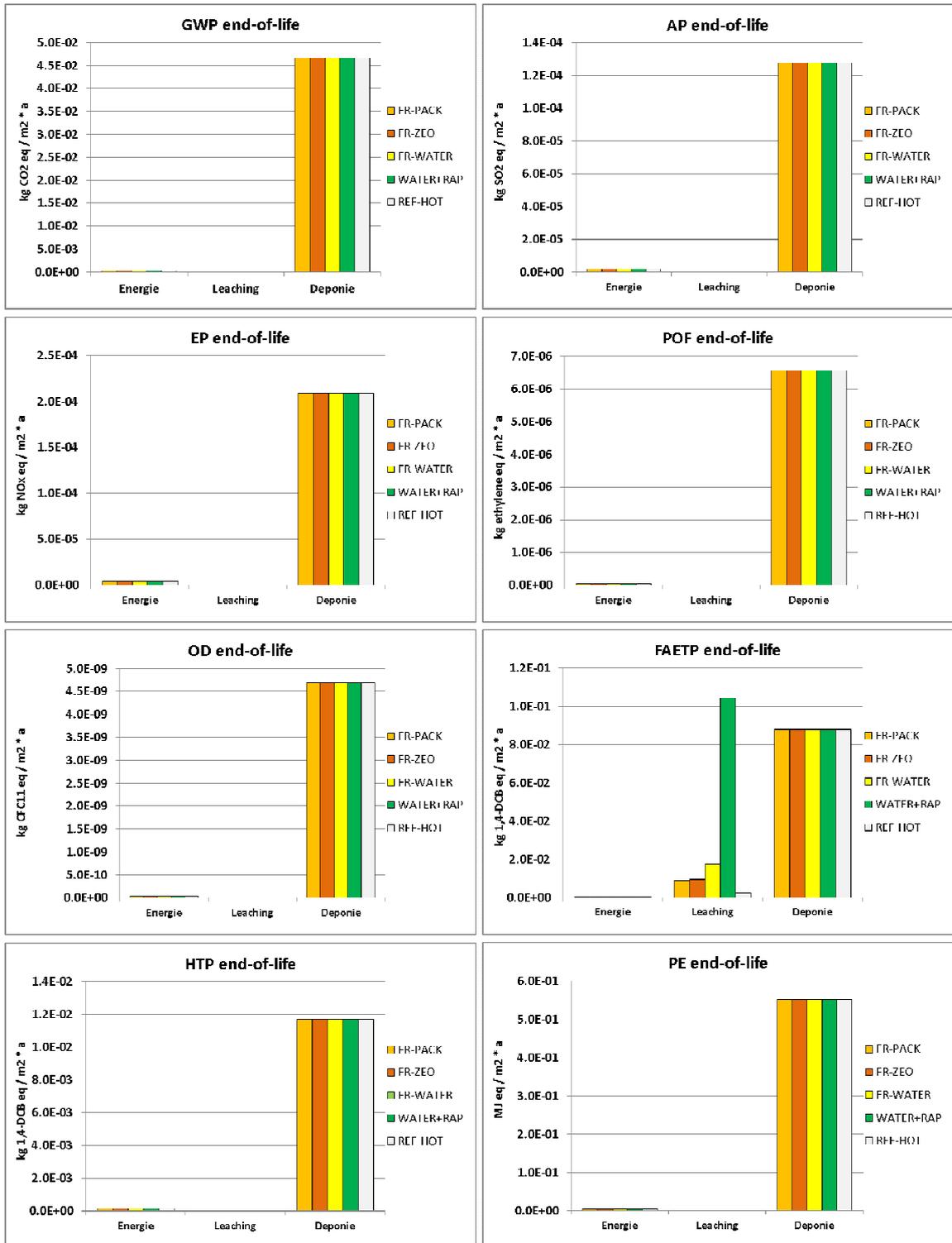
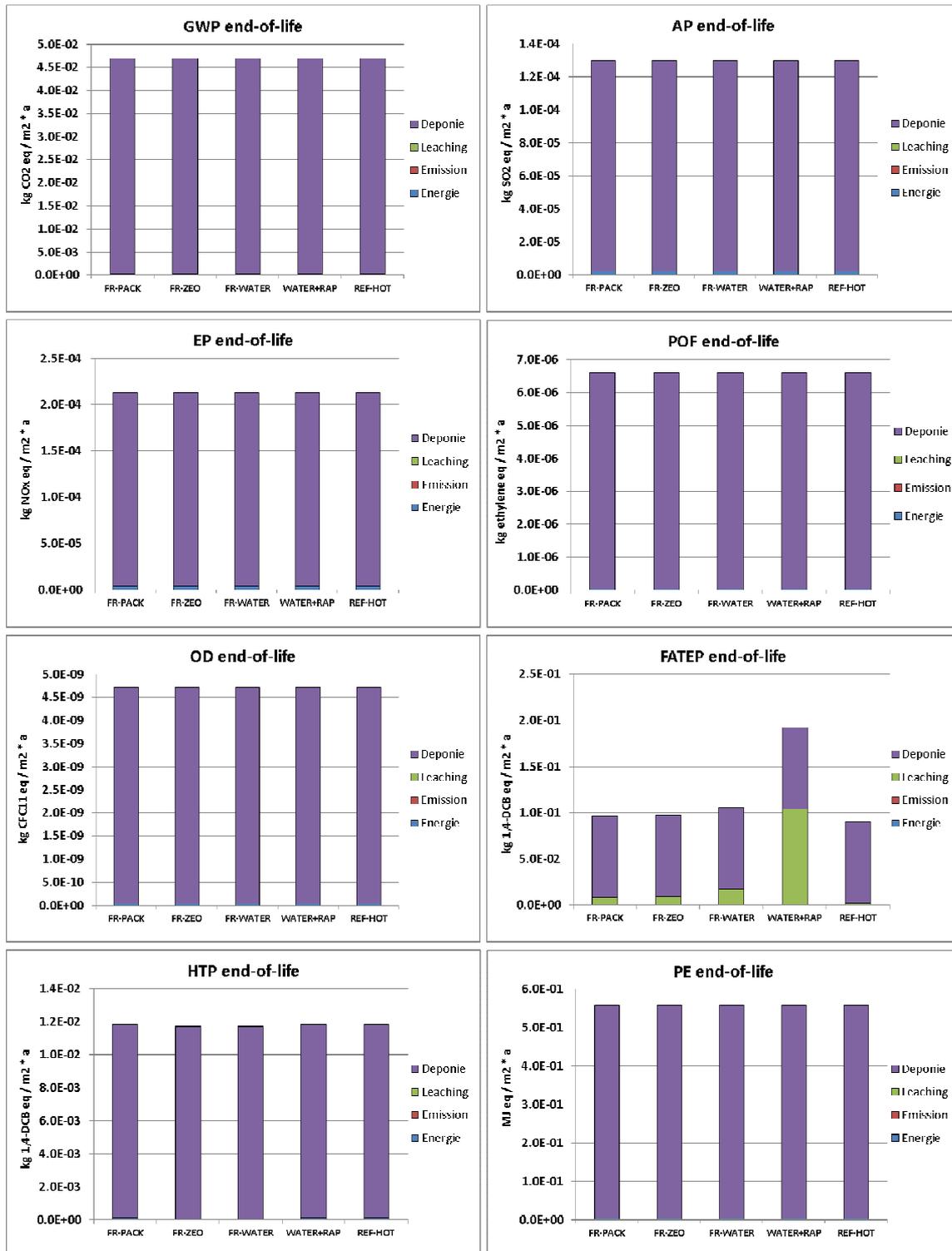
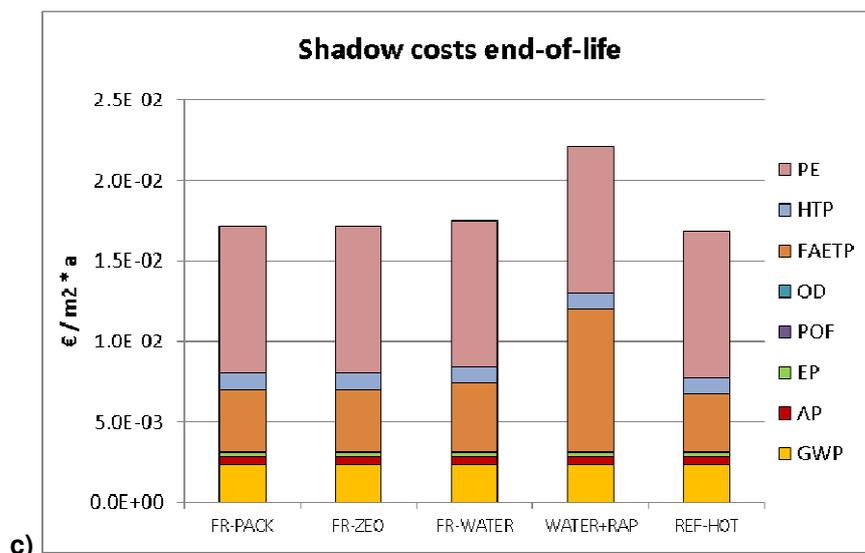
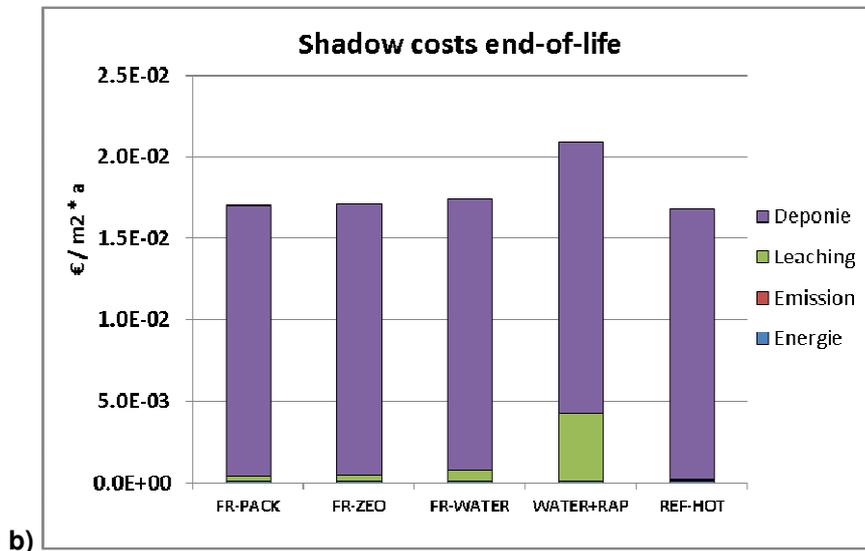
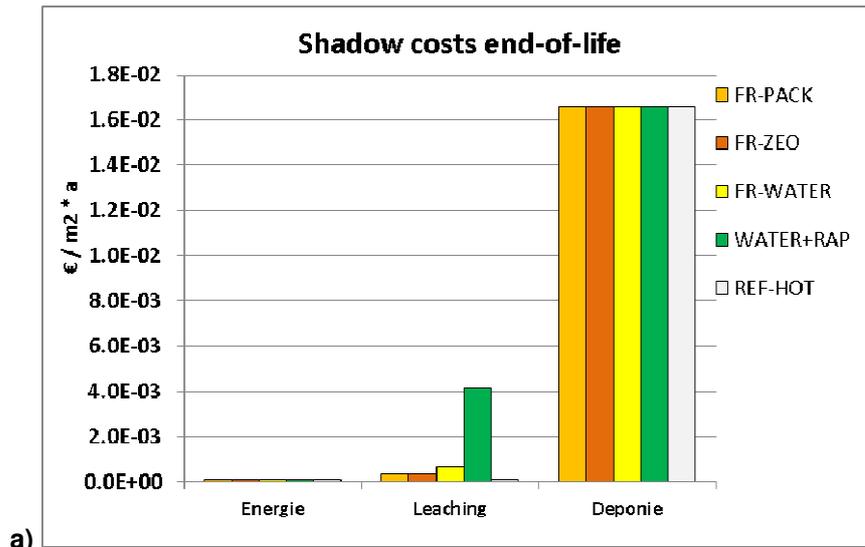


Abbildung 37 Auswirkungen der einzelnen Prozesse aus Phase 7, dargestellt für alle Wirkkategorien.



**Abbildung 38** Summierte Umweltwirkungen aus Phase 7, dargestellt für alle Wirkkategorien.



**Abbildung 39** Shadow Costs der Phase 7, a) für die einzelnen Prozesse, b) aufsummiert nach Prozess, c) aufsummiert nach Wirkkategorie.

## 6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Als Ergebnis der vorliegenden Studie schneiden die untersuchten warmverarbeiteten Beläge nur zum Teil besser ab, als das heiss verarbeitete Referenzmaterial. Die Unterschiede sind teilweise sehr gering und mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Eine generelle Aussage, dass warmverarbeitete Asphalte bezüglich Umweltauswirkungen besser abschneiden als heissverarbeitete Produkte, kann somit nicht gemacht werden.

Das Beispiel des Belags FR-ZEO und der Zugabe von Zeolith zur Belagsmischung zeigt, dass die Energieeinsparungen bei der Verarbeitung von Warmasphalt im Mischwerk unter Umständen zunichte gemacht werden können durch die Umweltauswirkungen der eingesetzten Additive.

Werden einzelne Wirkkategorien verglichen, so zeichnet sich ein uneinheitliches Bild ab, was darauf hinweist, dass ökologische Zielkonflikte vorliegen. Je nach Technologie schneiden die einzelnen Asphalte in bestimmten Wirkkategorien und Lebensphasen besonders gut oder schlecht ab. Das heisst, dass die Wahl und Gewichtung der Wirkkategorien kritisch für das erhaltene Endresultat ist. Wie in Abbildung 15 ersichtlich werden die Shadow Costs (€/m<sup>2</sup>·a) über die gesamte Nutzung für sämtliche Asphalt-Arten vom Primärenergieverbrauch dominiert. Hohe Primärenergieverbräuche fallen hauptsächlich bei der Bereitstellung von Bitumen (Phase 1) an, womit dem Recycling von Bitumen eine entscheidende Rolle zukommt. Als Folge zeigt in dieser Studie der recyklathaltige Belag WATER+RAP das beste Ergebnis, da er deutlich weniger Ressourcen zur Herstellung benötigt.

In geringerem Masse trägt die Verarbeitung im Mischwerk (Phase 2) zum gesamten Primärenergieverbrauch bei. REF-HOT weist erwartungsgemäss den höchsten Energieverbrauch auf und schneidet insgesamt in dieser Lebensphase am schlechtesten ab.

Der Transport und der Einbau des Belags sowie die Entsorgung haben in der vorliegenden Studie nur gering zur Gesamtwirkung beigetragen. Phase 6 senkt massgeblich die Wirkung aller Beläge, da durch das Recycling von Belagsmaterial der hohe Primärenergieverbrauch in Phase 1 teilweise kompensiert wird.

Die Nutzungsphase ist ein Sonderfall, da sie geprägt ist von der Wirkkategorie Gewässertoxizität. Dies rührt vom Leaching von PAK aus dem Belag her. Der teilweise sehr hohen Toxizität von einzelnen PAK wird im verwendeten System von Indikatoren und Gewichtungsfaktoren eine grosse Bedeutung zugemessen. Als Folge schneidet Asphalt mit einem hohen Anteil an Recyclingmaterial und infolge dessen mit einem hohen PAK-Gehalt deutlich schlechter ab als andere Belagsmaterialien.

Dem Recycling von Asphalt kommt somit eine doppelte Bedeutung zu: Einerseits reduziert der Einsatz von Recyclingmaterial den Bedarf an Primärressourcen, insbesondere Bitumen. Andererseits ist eine damit einhergehende Konzentration von PAK als problematisch einzustufen. Ob für das Recycling die positiven oder die negativen Aspekte überwiegen, hängt davon ab, wie stark die Freisetzung von PAK gewichtet wird, und wieviel PAK tatsächlich aus dem Belag in die Umwelt austritt.

Gerade zur Bewertung von PAK-Emissionen mussten in der vorliegenden Studie diverse Annahmen getroffen werden, um die erarbeiteten Laborergebnisse auf die reale Situation zu übertragen. Die Extrapolation eines neunzigstägigen Leaching-Versuches auf 25 Jahre prognostizierter Fahrbahnlebensdauer ist mit hoher Unsicherheit behaftet. Zusätzlich lagen die gemessenen PAK-Konzentrationen zum Teil nahe der Detektionsgrenze der angewandten Messmethode. Weiter lagen nicht für alle gemessenen PAK spezifische Wirkfaktoren vor, sodass die Bewertung der Umweltauswirkung unvollständig bleibt.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass folgende Parameter das Resultat der Ökobilanz stark prägen können:

- Wahl und Gewichtung der Wirkfaktoren: Die gewählten Wirkfaktoren zeigen jeweils unterschiedliche Bilder für die untersuchten Beläge, sodass die Wahl anderer Faktoren, (insbesondere das Weglassen des Faktors Primärenergie) das Endresultat der Ökobilanz verändern kann.
- Lebensdauer der Beläge: Variationen der Lebensdauer im Bereich von +/- 10% können die Bilanz derart beeinflussen, dass sich die Reihenfolge der Beläge bezüglich Shadow Costs verändert.
- PAK-Leaching: Sollte die Leaching-Rate von PAK in die Umwelt deutlich höher ausfallen, oder die langfristige Zusammensetzung des Eluats höhere Werte besonders toxischer PAK (z.B. BaP) aufweisen, würde sich insbesondere die Gesamtbilanz für recyklathaltige Beläge verschlechtern, womit die Verwendung von RAP in Frage gestellt würde.

## Anhänge

<b>I</b>	<b>Wirkfaktoren der Ecoinvent-Datenbank.....</b>	<b>79</b>
<b>II</b>	<b>Berechnung der Ökobilanz .....</b>	<b>83</b>



# I Wirkfaktoren der Ecoinvent-Datenbank

Wenn nichts anderes angegeben ist, wurden die Daten der Ecoinvent-Datenbank, V2.2 (2010), entnommen:

## electricity, high voltage, production CH, at grid, CH, [kWh] (#583)

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NO <sub>x</sub>	20a	20a	20a	sum
0.021939	6.10E-05	5.28E-05	3.96E-06	3.11E-09	0.010696	0.044628	7.71E+00

## natural gas, burned in industrial furnace low-NO<sub>x</sub> >100kW, RER, [MJ] (#1364)

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NO <sub>x</sub>	20a	20a	20a	sum
0.070035	6.26E-05	6.06E-05	5.30E-06	1.51E-08	0.001680 4	0.00756	1.32E+00

## light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating, CH, [MJ] (#1600)

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NO <sub>x</sub>	20a	20a	20a	sum
0.088249	0.00020084	0.00012537	1.03E-05	1.13E-08	0.001829 5	0.007744 8	1.30E+00

## transport, lorry >32t, EURO5, RER, [tkm] (#7308)

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NO <sub>x</sub>	20a	20a	20a	sum
0.10704	0.00033454	0.00047098	1.40E-05	1.55E-08	0.009774 7	0.018607	1.84E+00

## transport, lorry 16-32t, EURO5, RER, [tkm] (#7305)

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NO <sub>x</sub>	20a	20a	20a	sum
0.16779	0.00050291	0.00070415	2.03E-05	2.34E-08	0.013359	0.025535	2.79E+00

**diesel, burned in building machine, GLO, [MJ] (#559)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
0.092049	0.00070334	0.0012987	1.80E-05	1.02E-08	0.0041049	0.054148	1.38

**gravel, unspecified, at mine, CH, [kg] (#465)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
0.0028247	1.73E-05	2.58E-05	6.63E-07	2.70E-10	0.000834 7	0.002327	0.07

**sand, at mine, CH, [kg] (#478)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
0.0024064	1.51E-05	2.35E-05	5.47E-07	2.38E-10	0.000635 56	0.001947 6	0.06

**bitumen, at refinery, CH, [kg] (#1538)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
0.59465	1.94E-03	2.34E-03	1.98E-04	6.36E-07	0.04939	0.1265	53.43

**chemicals inorganic, at plant, GLO, [kg] (#264)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
1.8599	0.015056	0.0068068	0.0005868	3.97E-07	0.6434	0.64777	27.03

**zeolite, powder, at plant, RER, [kg] (#1996)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
4.1958	0.017868	0.011898	0.00077195	4.94E-07	3.8079	2.1775	76.82

**diesel, low-sulphur, at refinery, CH, [kg] (#1545)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
0.63687	0.0020385	0.0024301	0.00020261	6.43E-07	0.049526	0.13053	53.92

**diesel, low-sulphur, at regional storage, CH, [kg] (#1547)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
0.61204	0.0048423	0.002776	0.00030074	5.03E-07	0.069232	0.16568	55.23

**disposal, bitumen, 1.4% water, to sanitary landfill, CH, [kg] (#2217)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
0.11377	1.35E-04	1.23E-04	2.44E-05	2.72E-09	0.93339	0.027558	3.30E-01

**disposal, asphalt, 0.1% water, to sanitary landfill, CH, [kg] (#2216)**

<b>GWP</b>	<b>AP</b>	<b>EP</b>	<b>POF</b>	<b>OD</b>	<b>FAETP</b>	<b>HTP</b>	<b>PE</b>
[kg CO <sub>2</sub> eq]	[kg SO <sub>2</sub> eq]	[kg NO <sub>x</sub> eq]	[kg ethene eq]	[kg CFC-11 eq]	kg 1,4-DCB-eq	kg 1,4-DCB-eq	MJ eq
100a	RER	RER	high NOx	20a	20a	20a	sum
0.027018	7.41E-05	1.21E-04	3.79E-06	2.71E-09	0.05079	0.0067818	3.20E-01



## II Berechnung der Ökobilanz

Das Berechnungsfile zur Ökobilanz im Excel-Format ist als separates File elektronisch verfügbar und liegt dem gedruckten Bericht auf CD bei.



## Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
1,4-DCB	1,4-Dichlorobenzol
AP	Acidification potential
BaP	Benzo[a]pyren
BAFU	Bundesamt für Umwelt
CFC-11	Trichlorfluormethan
CML	Institute of Environmental Sciences - Universiteit Leiden
d.l.	detection limit
DOC	Dissolved organic carbon
eq	equivalent
EP	Eutrophication potential
FAETP	Freshwater aquatic ecotoxicity potential
GWP	Global warming potential
HC	Hydrocarbons
HTP	Human toxicity potential
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life cycle assessment
LCI	Life cycle inventory
LCIA	Life cycle impact assessment
MG	Mischgut
OD	Ozone depletion
öbu	Netzwerk für nachhaltiges Wirtschaften
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PE	Primary energy
PM10	Particulate Matter up to 10 µm
POF	Photochemical oxidant formation
RAP	Recycled asphalt pavement
TNO	Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung
TPM	Total particulate matter
TVOC	Total volatile organic compounds
VOC	Volatile organic compounds
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute



## Literaturverzeichnis

---

### Dokumentation

- 
- [1] N. Bueche, A.-G. Dumont. **Forschungspaket PLANET EP-5: Globales Auswertungsmodell**. Lausanne: EPFL, 2015.

---

  - [2] Jeroen B. Guinée, Gjalt Huppes, Reinout Heijungs,. **Developing an LCA guide for decision support**. Environmental Management and Health. 2001, Bd. 12, 3.

---

  - [3] **The ecoinvent database**. [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch). [Online]

---

  - [4] Harmelen, A.K. van, Ligthart, T.N., Leeuwen, S.M.H. van, Korenromp, R.H.J., Gijlswijk, R.N. Toxicity has its price. **Shadow prices for eco and other toxicity and exhaustion of abiotic raw materials within DuboCalc**.

---

  - [5] Part 2b Operational Annex. [Buchverf.] Jeroen Guinée. **Guide on Environmental Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards**. s.l.: Springer Netherlands, 2001.

---

  - [6] Christiane Raab. **Forschungspaket PLANET EP-4: Gebrauchsdauer und Alterung**. Dübendorf: Empa, 2015.

---

  - [7] **Airmes AG. Emissionsmessungen im Belagswerk Oberwangen**. Wiler b. Utzenstorf: Airmes AG, 2010. 5967.

---

  - [8] Rolf Frischknecht, Roland Steiner, Niels Jungbluth (ESU-services GmbH). **Ökobilanzen: Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006**. Zürich: Öbu, BAFU, 2008. Öbu SR 28/2008.

---

  - [9] **IMP Bautest AG. Messbericht PAK in Bitumen**. Oberbuchsitzen: IMP Bautest AG, 2013. 211412.

---

  - [10] **IMP Bautest AG. Kurzbericht Labormischungen & Ermittlung der Misch- und Verdichtungsenergie**. Oberbuchsitzen: IMP Bautest AG, 2013. 211412.

---

  - [11] Martin Hugener, Joachim Moh, Kerstin Zeyer. **Forschungspaket PLANET EP-7: Arbeitshygiene**. Dübendorf: Empa, 2015.

---

  - [12] **IMP Bautest AG. TVA Eluat (H2O)**. Oberbuchsitzen: IMP Bautest AG, 2012/2013. 211412.

---

  - [13] **IMP Bautest AG. Attest Eluat 2 (H2O)**. Oberbuchsitzen: IMP Bautest AG, 2014. 14-02-4344.

---



# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 06. Januar 2016

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2010/542  
Projekttitel: Energetische und ökologische Bilanz der Aufbereitung von Niedertemperaturasphalten  
Enddatum: Januar 2016

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die vorliegende vergleichende Ökobilanz hat fünf Asphaltarten über ihren ganzen Lebenszyklus hinweg untersucht:  
Warm verarbeiteter Asphalt mit chemischen Additiven  
Warmverarbeiteter Asphalt mit Zugabe von Zeolithen und Wasser  
Warmasphalt mit Wasserzusatz  
Warmasphalt mit Wasserzusatz und mit 50% recyceltem Asphalt-Granulat  
Heiss verarbeiteter Asphalt als Referenzmaterial

Unter Berücksichtigung aller durchgeführten Messungen und getroffenen Annahmen kommt die vergleichende Ökobilanz zu folgendem Resultat:

Niedertemperaturasphalte sind ökologisch nicht generell besser als Heissasphalte. Die ökologische Vorteilhaftigkeit hängt nebst dem Produktionsenergieverbrauch stark von weiteren Faktoren ab und muss im jeweiligen Einzelfall untersucht werden:  
Während der Warmasphalt mit Wasserzusatz besser abschnitt als das Referenzmaterial, zeigte der Zeolith-haltige Asphalt ein schlechteres Resultat.

Wichtiger für die Ökobilanz als das Verwenden von Niedertemperaturasphalten ist das Verwenden von möglichst viel Recyclingmaterial. Der Recyclat-haltige Asphalt schnitt in der Ökobilanz am besten ab.

Es liegt jedoch ein ökologischer Zielkonflikt vor: Einerseits reduziert der Einsatz von Recyclingmaterial den Bedarf an Primärressourcen, insbesondere Bitumen. Andererseits ist eine damit einhergehende Konzentration von PAK als problematisch einzustufen. Ob für das Recycling die positiven oder die negativen Aspekte überwiegen, hängt davon ab, wie stark die Freisetzung von PAK gewichtet wird, und wieviel PAK tatsächlich aus dem Belag in die Umwelt austritt.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

- Globale energetische und ökologische Bilanz der Niedertemperaturtechnologien  
Erreicht: Bilanzen für drei unterschiedliche Niedertemperaturtechnologien sowie ein recyclathaltiges Material wurden erstellt.
- Vergleich der Ergebnisse mit Referenztechnologie (konventionelle Asphaltbeläge)  
Erreicht: Der Vergleich mit der Referenztechnologie ergab, dass Niedertemperaturasphalte nicht in jedem Fall ökologisch besser abschneiden.
- Kritische Analyse der anwendbaren theoretischen Modelle zur Bilanzierung  
Erreicht: Als kritisch identifiziert wurden insbesondere die Auswahl der Wirkkategorien und die Beurteilung des PAK-Leaching.

Folgerungen und Empfehlungen:

Der Einsatz von Niedertemperaturasphalten kann bezüglich ökologischer und energetischer Gesichtspunkte nicht grundsätzlich empfohlen werden.

Aus ökologischer Sicht scheint der Einsatz von Recyclatmaterial im Strassenbau vorteilhaft, die Resultate sind jedoch mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Das Langzeitverhalten von PAK-belasteten Strassenbelägen bietet sich als weiteres Forschungsfeld an.

Publikationen:

- A. Gaschen, J. Liechti: Energiebilanz und Emissionen unter der Lupe - Vergleichende Ökobilanz von Niedertemperatur-Asphaltbelägen; UmweltPerspektiven 2/2013
- M. Breimesser, J. Liechti: Ökobilanzierung von Asphalten – Ist Niedertemperatur tatsächlich besser?; Infrastruktur- und Tunnelbau 4/2015

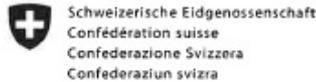
Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Liechti

Vorname: Jürg

Amt, Firma, Institut: Neosys AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes in Bezug auf die gesamtheitliche Ökobilanz sind sehr interessant und zeigen, dass einzelne, auch positive, Aspekte, nicht losgelöst vom umfassenden Fragenkomplex beurteilt werden können.

Auf eindrücklicher Art werden die Zusammenhänge, die Grenzen und die Widersprüche der Ökobilanz dargestellt.

Das Resultat ist nicht eindeutig und wird stark von der Wahl und der Gewichtung der Wirkfaktoren geprägt. Wesentliche Einflussfaktoren, die im Rahmen dieses Forschungspaketes nicht genau feststellbar waren, und somit auch das Endergebnis beeinflussen, sind die Lebensdauer der Beläge sowie das Auswaschen der PAK aus dem Belag. Kleine Änderungen dieser Faktoren können das Ergebnis wesentlich beeinflussen. Schliesslich konnte nur eine eindeutige Aussage gemacht werden: das Beimischen von Recycling-Asphalt beeinflusst die Ökobilanz sehr positiv.

##### Umsetzung:

Das nicht eindeutige Ergebnis der gesamtheitlichen Ökobilanz stösst die ökologische Argumentation des kleineren Energiebedarfs für die Herstellung der Niedertemperaturasphalte in den Hintergrund.

Die grundsätzliche Begründung für die Anwendung von Niedertemperaturasphalte muss somit in anderen Bereichen gesucht werden.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Ein wesentlicher Parameter, die Lebensdauer der eingebauten Beläge, konnte innerhalb des Forschungspaketes PLANET nicht eindeutig bestimmt werden. Eine erste Antwort könnte die Untersuchung des im Rahmen dieses Forschungsprojektes eingebautes und auf natürlicher Art gealtertes Niedertemperaturasphaltes in Wohlen / BE geben.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Die untersuchten Parameter sind nicht im VSS-Bereich des Schweizer Normenwerks enthalten. Es entsteht somit kein Handlungsbedarf in dieser Hinsicht.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Aeschlimann Vorname: Heinz

Am, Firma, Institut: Aeschlimann Asphalt Engineering AG

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

Seite 3 / 3



## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter <https://www.astra.admin.ch> (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.