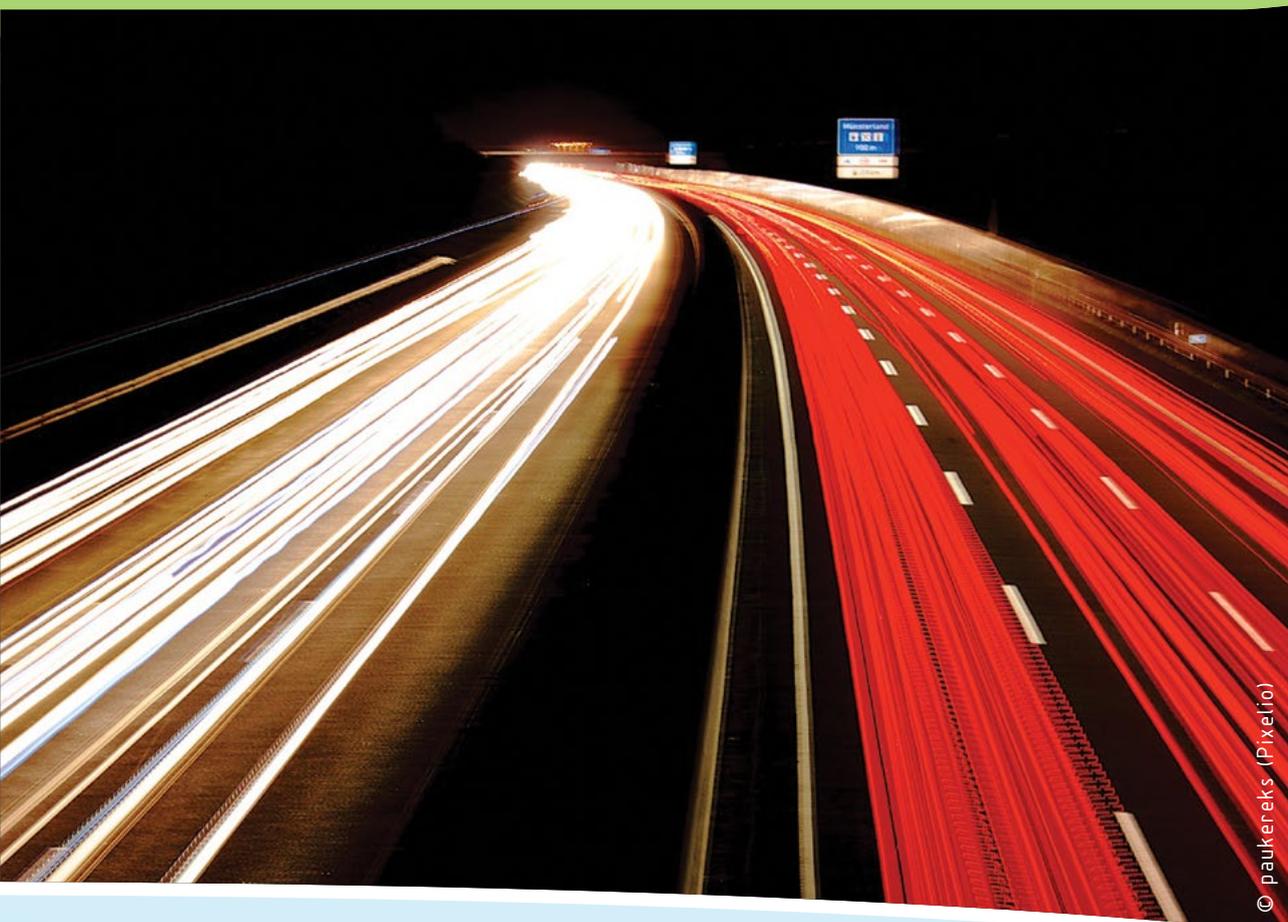


VDI

Zentrum  
Ressourceneffizienz

VDI ZRE Publikationen: Studien



© paukereks (Pixelio)

# Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau

## Materialaufwendungen und technische Lösungen

November 2015

# **Studie: Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau**

## **Materialaufwendungen und technische Lösungen**

Autoren

Thomas Bergmann, Öko-Institut e. V.

Daniel Bleher, Öko-Institut e. V.

Dr. Wolfgang Jenseit, Öko-Institut e. V.

Fachliche Ansprechpartnerin: Dr. Nicole Becker, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Prof. Clemens Deilmann, Leiter des Forschungsbereichs Ressourceneffizienz von Siedlungsstrukturen am Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, für seine fachliche Unterstützung bei der Entstehung dieser Studie.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30 27 59 506 0

Fax +49 30 27 59 506 30

[zre-info@vdi.de](mailto:zre-info@vdi.de)

[www.ressource-deutschland.de](http://www.ressource-deutschland.de)

Titelbild: paukereks (Pixelio)

Satz und Gestaltung: Marco Naujokat

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

Druck: Sprintout Digitaldruck GmbH, Grunewaldstraße 18, 10823 Berlin

# Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau

Materialaufwendungen und technische Lösungen

Studie

## INHALTSVERZEICHNIS

|   |    |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis   | 6  |
| Tabellenverzeichnis   | 8  |
| Zusammenfassung   | 10 |
| 1 Einleitung  | 13 |
| 1.1 Projekthintergrund  | 15 |
| 1.2 Projektziel und Aufbau der Studie   | 15 |
| 2 Methodisches Vorgehen   | 18 |
| 2.1 Systemgrenzen und Scoping zu den Unterbranchen<br>des Tiefbaus            | 18 |
| 2.1.1 Systemgrenzen Verkehrsinfrastrukturen                                   | 21 |
| 2.1.2 Systemgrenzen der Energieversorgungsinfrastruktur                       | 23 |
| 2.1.3 Systemgrenzen der Wasserwirtschaft                                      | 24 |
| 2.1.4 Systemgrenzen der Informations- und<br>Kommunikationstechnologien (IKT) | 25 |
| 2.2 Grundlagen und Berechnungsprinzipien<br>der Stoffstromanalyse             | 25 |
| 2.3 Auswahl von Wirkungskategorien und deren Normierung                       | 29 |
| 2.4 Datenquellen  | 32 |
| 3 Materialbestand und Erneuerungsbedarf im Tiefbau                            | 34 |
| 3.1 Materialbestand und Erneuerungsbedarf<br>nach Unterbranchen               | 34 |
| 3.1.1 Straßenverkehrsinfrastruktur  | 34 |
| 3.1.2 Schienenverkehrsinfrastruktur   | 38 |
| 3.1.3 Wasserverkehrsinfrastruktur   | 40 |
| 3.1.4 Luftverkehrsinfrastruktur   | 42 |
| 3.1.5 Stromleitungsnetze  | 43 |
| 3.1.6 Gasleitungsnetze  | 45 |
| 3.1.7 Wärmeleitungsnetze  | 49 |
| 3.1.8 Wasserversorgung  | 52 |
| 3.1.9 Abwasserentsorgung  | 56 |
| 3.1.10 Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)                          | 59 |
| 3.2 Gesamtergebnisse jährlicher Erneuerungsbedarf                             | 60 |
| 3.3 Vergleich des Bottom-up- mit dem Top-down-Ansatz                          | 61 |
| 3.4 Ergebnisse Umweltwirkung  | 64 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4     | Vertiefung Straßen- und Schieneninfrastruktur                                 | 72  |
| 4.1   | Trends und Rahmenbedingungen  | 72  |
| 4.1.1 | Trends Verkehrsentwicklung  | 73  |
| 4.1.2 | Rechtlicher Rahmen  | 75  |
| 4.2   | Modelloptimierung hinsichtlich Recyclingmaterial                              | 81  |
| 4.3   | Detailanalyse zu Neu- und Ausbau bis 2030                                     | 89  |
| 4.3.1 | Neu- und Ausbau der Straßen- und<br>Schieneninfrastruktur bis 2030            | 89  |
| 4.4   | Potenzielle Ressourceneffizienzmaßnahmen                                      | 102 |
| 4.4.1 | Baustoffe & Herstellungsverfahren   | 102 |
| 4.4.2 | Ebene Bauteile  | 111 |
| 4.4.3 | Ebene Bauverfahren  | 113 |
| 4.4.4 | Ebene Recyclingverfahren Asphalt  | 115 |
| 4.5   | Auswahlverfahren zur Szenariobetrachtung von<br>Ressourceneffizienzmaßnahmen  | 122 |
| 5     | Szenarioanalyse   | 127 |
| 5.1   | „BAU“-Szenario  | 127 |
| 5.2   | Szenario „Ressourceneffizienz“  | 133 |
| 5.2.1 | Ergebnisdiskussion  | 139 |
| 6     | Diskussion von Effizienzpotenzialen in den Teilsektoren<br>Straße und Schiene | 142 |
| 7     | Literaturverzeichnis  | 145 |
| 8     | Anhang  | 154 |
| 8.1   | Methodisches Vorgehen   | 154 |
| 8.2   | Materialbestand und Erneuerungsbedarf im Tiefbau                              | 159 |

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 1: Aufbau und Vorgehen   | 17  |
| Abbildung 2: Systemgrenze Tiefbau und betrachtete Teilsektoren   | 20  |
| Abbildung 3: Schematische Herleitung der Modellgrößen<br>Materialbestand und jährlicher Erneuerungsbedarf  | 28  |
| Abbildung 4: Jährlicher Erneuerungsbedarf gesamt nach Teilsektoren   | 60  |
| Abbildung 5: Jährlicher Erneuerungsbedarf gesamt nach Baustoffen   | 60  |
| Abbildung 6: Vergleich der berechneten Ergebnisse (bottom up)<br>zu statistischen Angaben (top down) für die relevantesten Baustoffe<br>im Tiefbau   | 62  |
| Abbildung 7: Prozentuale Verteilung der Bereiche nach<br>Materialmengen und Wirkungsindikatoren  | 67  |
| Abbildung 8: Schematische Darstellung der Flächeninanspruchnahme<br>nach den drei verschiedenen Klassen: versiegelt, stark eingeschränkt,<br>leicht eingeschränkt. Die Fläche der Ringe ist nicht proportional zu der<br>angegebenen Flächeninanspruchnahme. | 68  |
| Abbildung 9: Normierung der Wirkungsindikatorenergebnisse auf<br>Deutschland   | 69  |
| Abbildung 10: Verteilung von In-situ-Recycling, externem Recycling<br>und Primärmaterial auf die Straßentypen für Erneuerungsaufwand<br>und Neubau nach Verdoppelung der Recyclingquoten aus Tabelle 28  | 89  |
| Abbildung 11: Spezifische CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen der<br>Basisvariante Herstellung Asphaltmischgut, der Variante mit<br>Reduktion des Wassergehaltes, der Temperaturabsenkung Asphalt<br>und der Kombination aus beiden                       | 107 |
| Abbildung 12: Anteile an Treibhausgas-Emissionen durch die<br>Herstellung einer Asphaltbinderschicht   | 115 |
| Abbildung 13: Prognostizierte Treibhausgas-Emissionen durch<br>Erneuerungsbedarf sowie Neu- und Ausbau pro Jahr bis 2030   | 130 |
| Abbildung 14: Prognostizierter kumulierter Rohstoffaufwand<br>durch Erneuerungsbedarf sowie Neu- und Ausbau pro Jahr bis<br>2030   | 131 |
| Abbildung 15: Prognostizierter kumulierter Energieaufwand durch<br>Erneuerungsbedarf sowie Neu- und Ausbau pro Jahr bis 2030   | 132 |
| Abbildung 16: Vergleich der prozentualen Verteilung über<br>Materialmengen sowie THG, KRA und KEA pro Jahr nach<br>Erneuerung und Ausbau für Straßen- und Schieneninfrastruktur<br>bis 2030  | 133 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 17: Reduktionspotenzial der THG-Emissionen durch Effizienzmaßnahmen bis 2030 bei maximaler Umsetzung | 138 |
| Abbildung 18: Reduktionspotenzial des KRA durch Effizienzmaßnahmen bis 2030 bei maximaler Umsetzung            | 138 |
| Abbildung 19: Reduktionspotenzial des KEA durch Effizienzmaßnahmen bis 2030 bei maximaler Umsetzung            | 139 |

## TABELLENVERZEICHNIS

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Struktur des Tiefbausektors  | 14 |
| Tabelle 2: Normierungsgrößen für Deutschland 2013   | 32 |
| Tabelle 3: Materialbestand der Straßenverkehrsinfrastruktur   | 36 |
| Tabelle 4: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Straßenverkehrsinfrastruktur  | 37 |
| Tabelle 5: Materialbestand der Schieneninfrastruktur  | 39 |
| Tabelle 6: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Schieneninfrastruktur   | 40 |
| Tabelle 7: Materialbestand der Wasserverkehrsinfrastruktur  | 41 |
| Tabelle 8: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Wasserverkehrsinfrastruktur   | 42 |
| Tabelle 9: Materialbestand der Luftverkehrsinfrastruktur  | 43 |
| Tabelle 10: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Luftverkehrsinfrastruktur  | 43 |
| Tabelle 11: Materialbestand im Stromnetz 2012   | 44 |
| Tabelle 12: Jährlicher Erneuerungsbedarf im Stromnetz 2012  | 45 |
| Tabelle 13: Materialbestand im Erdgasnetz 2012  | 47 |
| Tabelle 14: Jährlicher Erneuerungsbedarf im Erdgasnetz 2012   | 48 |
| Tabelle 15: Materialbestand im Wärmenetz 2012   | 50 |
| Tabelle 16: Erneuerungsbedarf im Wärmenetz 2012   | 51 |
| Tabelle 17: Materialbestand der Trinkwasserversorgungsinfrastruktur   | 54 |
| Tabelle 18: Erneuerungsbedarf der Trinkwasserversorgungsinfrastruktur   | 55 |
| Tabelle 19: Materialbestand der Abwasserentsorgungsinfrastruktur  | 57 |
| Tabelle 20: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Abwasserentsorgung   | 58 |
| Tabelle 21: Materialbestand der IKT-Infrastrukturen   | 59 |
| Tabelle 22: Jährlicher Erneuerungsbedarf der IKT-Infrastrukturen  | 59 |
| Tabelle 23: Vergleich der im Bottom-up- und Top-down-Ansatz berücksichtigten Baustoff-Kategorien und resultierenden Mengen                      | 64 |
| Tabelle 24: Ergebnisdarstellung aus dem jährlichen Erneuerungsbedarf für die Materialmengen und Wirkungsindikatoren nach Teilsektor und Bereich | 66 |
| Tabelle 25: Prozentuale Anteile der Teilsektoren am Gesamtergebnis für THG, KRA und KEA sowie die Summe ihrer Anteile                           | 70 |
| Tabelle 26: Übersicht hinsichtlich Trends und Rahmenbedingungen mit Einfluss auf den Ressourcenverbrauch der Bereiche Straße und Schiene        | 80 |
| Tabelle 27: Asphalttypen und ihr Bitumengehalt  | 82 |
| Tabelle 28: In-situ-Recycling und Gesamtrecycling der verschiedenen Straßentypen  | 84 |
| Tabelle 29: Vergleich der THG-Emissionen mit alten und neuen Charakterisierungsfaktoren bei gleichem Materialbedarf                             | 87 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabelle 30: In-situ-Recycling, Recycling und Einsatz von Primärmaterialien für die Straßenerneuerung und den Neubau                        | 88  |
| Tabelle 31: Ermittelte Längen der geplanten Bauvorhaben ab 2014 für Bundesautobahnen nach Bedarfsplanüberprüfung 2010                      | 93  |
| Tabelle 32: Längen der Straßen nach Straßenkategorien von Ausgangs- und Zielnetz   | 95  |
| Tabelle 33: Materialströme über Erneuerungs- und Neu- sowie Ausbaubedarf der Straßenverkehrsinfrastruktur                                  | 96  |
| Tabelle 34: Ermittelte Längen der geplanten Bauvorhaben für die Bundesschienenwege nach Bedarfsplanüberprüfung 2010                        | 99  |
| Tabelle 35: Materialströme über Erneuerungs- und Neu- sowie Ausbaubedarf der Schienenverkehrsinfrastruktur                                 | 101 |
| Tabelle 36: Zusätzliche Wassergehalte und Energieverluste bei der Asphaltherstellung   | 106 |
| Tabelle 37: Wärmebedarf und CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen in der Asphaltherstellung   | 107 |
| Tabelle 38: Überblick der betrachteten Ressourceneffizienzmaßnahmen und Integration in die Szenariobetrachtung                             | 123 |
| Tabelle 39: Ergebnisse für das BAU-Szenario für Materialmengen, THG, KRA und KEA nach Teilbereichen pro Jahr                               | 129 |
| Tabelle 40: Jährliche Asphaltmengen der einzelnen Szenaretten  | 135 |
| Tabelle 41: Ergebnisse der verschiedenen Effizienzmaßnahmen über die Wirkungsindikatoren, differenziert nach Bereichen der Infrastrukturen | 137 |
| Tabelle A.1: Detaillierte Darstellung der betrachteten Bereiche und Baukörper  | 154 |
| Tabelle A.2: Charakterisierungsfaktoren für neue Bauteile des Szenarios BAU  | 156 |
| Tabelle A.3: Charakterisierungsfaktoren für neue Bauteile des Szenarios Ressourceneffizienz  | 157 |
| Tabelle A.4: Charakterisierungsfaktoren für Ersatz von Holz durch Kunststoffschwellen im Szenario Ressourceneffizienz                      | 158 |
| Tabelle A.5: Mengengerüst der Verkehrsinfrastrukturen  | 159 |
| Tabelle A.6: Mengengerüst der Energieversorgungsinfrastrukturen  | 160 |
| Tabelle A.7: Mengengerüst der Wasserver- & Abwasserentsorgungsinfrastrukturen  | 161 |
| Tabelle A. 8: Mengengerüst der Informations- und Kommunikationstechnik Infrastrukturen   | 161 |
| Tabelle A.9: Lebensdauern der verschiedenen Straßenelemente nach Knappe et al  | 162 |
| Tabelle A.10: Lebensdauern aller Baukörper und Elemente außer Straßen mit Quellenangabe  | 166 |

## ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Studie untersucht die Potenziale, die im Tiefbau durch eine Steigerung der Ressourceneffizienz erschlossen werden könnten. Die Analysen fokussierten aufgrund der Relevanz auf den Straßen- und den Schienenbau. Der Straßenbau stellt jedoch über alle betrachteten Infrastrukturen des Tiefbaus den dominierenden Teilsektor dar. Dies gilt für die Menge der jährlich verwendeten Baustoffe wie für die daraus resultierenden Umweltauswirkungen. Alleine die jährliche Instandhaltung (Erneuerung) bestehender Straßen, Brücken und Tunnel ist mit dem Ausstoß von knapp vier Millionen Tonnen Treibhausgasen verbunden. Durch den Neu- und Ausbau von Straßen ist bis 2030 zusätzlich jährlich mit der Emissionen von 900.000 Tonnen Treibhausgas (THG) zu rechnen.

Asphalt und Baukies des Straßenbaus werden bereits heute recycelt. Dies gilt auch für Gleisschotter, der beim Bau von Schieneninfrastruktur verwendet wird. Die Studie zeigt dennoch, dass sich durch eine konsequente Erfassung und Wiederverwendung der eingesetzten Baustoffe weitere Minderungspotenziale bis 2030 erschließen lassen. Bezogen auf die Teilsektoren Straße und Schiene kann durch eine vollständige Umsetzung der unterstellten und heute technisch möglichen Maßnahmen eine Reduktion der Treibhausgas-Emissionen um rund 11 % erreicht werden. Der kumulierte Rohstoffaufwand kann um 24 % und der kumulierte Energieaufwand um 35 % reduziert werden. Dies bezieht sich nur auf die eingesetzten Materialien und die Vorketten der Herstellung. Für alle Betrachtungsebenen kommt dem Erneuerungsaufwand im Vergleich Neu- und Ausbau eine deutlich wichtigere Rolle zu.

Aufgrund der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Relevanz des Tiefbaus wird im Rahmen der vorliegenden Studie erstmals eine Stoffstromanalyse des gesamten Tiefbaus und seiner Teilsektoren durchgeführt. Die Stoffstromanalyse bilanziert die zur Errichtung der vorhandenen Infrastruktur eingesetzten Baustoffe und weist die zu deren Erhaltung jährlich benötigten Baustoffmengen aus. Dieser jährliche Bedarf errechnet sich über die Zuweisung einer spezifischen Lebensdauer je Bauwerk bzw. Bauwerk-Teilsystem. Entsprechend dem jährlichen Baustoffeinsatz zur Instandhaltung

werden die damit verbundenen Umweltwirkungen für die drei ausgewählten Wirkungsindikatoren Treibhausgas-Emissionen (THG), kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) und kumulierter Energieaufwand (KEA) dargestellt.

Für eine vertiefte Betrachtung werden die Teilsektoren Straße und Schiene ausgewählt, da diese zusammen einen relativen Anteil von 64 % der THG-Emissionen, 53 % des kumulierten Rohstoffaufwandes und 74 % des kumulierten Energieaufwandes in Relation zum jeweils gesamten Erneuerungsaufwand des Tiefbaus aufweisen.

Für diese Teilsektoren werden absehbare Trends und Rahmenbedingungen, mögliche Ressourceneffizienzpotenziale sowie die zu erwartenden Neu- und Ersatzbauaktivitäten betrachtet.

Die Studie zeigt auf, dass in den ausgewählten Teilsektoren Straße und Schiene aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen, wie z. B. rechtlicher Vorgaben zum Schallschutz, mit einem zusätzlichen Ressourcenverbrauch zu rechnen ist. Es wird allerdings auch deutlich, dass die möglichen Effekte auf den Ressourcenverbrauch i. d. R. nicht quantifiziert werden können.

Weiterhin wird im Rahmen der Studie die heutige Situation bezüglich der Verwendung von Recyclingmaterial dargestellt. De facto wird heute sowohl der Erneuerungsaufwand als auch der Sanierungsaufwand von Recyclingbaustoffen deutlich beeinflusst. Anhand der Erkenntnisse werden aktualisierte Datensätze für Recyclingbaustoffe erstellt und in die weitere Szenarioberechnung aufgenommen.

Die Baustoffe für Neu- und Ausbaumaßnahmen der Straßen- und Schieneninfrastruktur bis 2030 werden gemäß bestehenden Planwerken und eigenen Abschätzungen ermittelt. Die Gegenüberstellung von Materialbedarfen für Erneuerungsaufwand und Neu- bzw. Ausbau zeigt für beide Bereiche, Straße und Schiene, dass der Großteil der zukünftigen Ressourcennachfrage über die Erneuerungsbedarfe entsteht.

Zudem wird eine Reihe von Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz beschrieben. Es ist erkennbar, dass durch prozess- und verfahrenstechnische Maßnahmen auf

unterschiedlichen Ebenen des Bauverfahrens Einsparungen hinsichtlich der verwendeten Energie- und Materialmengen erreichbar sind. Die Auswertung zeigt allerdings auch, dass sich die meisten der untersuchten Maßnahmen entweder noch in einem Erforschungsstadium befinden oder der Umsetzungsgrad unbekannt ist und damit keine verlässlichen Aussagen zu tatsächlichen Einsparungen getroffen werden können.

Ausgehend von dem BAU-Szenario, werden für das Szenario „Ressourceneffizienz“ aus heutiger Sicht technisch mögliche und in ihrem Umfang quantifizierbare Potenziale ausgewählter Maßnahmen beschrieben. Dabei umfasst das Szenario im Wesentlichen drei Maßnahmen, für die das Effizienzpotenzial bis 2030 erfasst wird.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass viele Recyclingmaßnahmen bereits heute durchgeführt werden und dabei auf das existierende Lager von ursprünglich aus Primärmaterial hergestellten Infrastrukturen zurückgegriffen wird. Gleichzeitig bedeutet diese Feststellung, dass leicht erschließbare Effizienzpotenziale („low hanging fruits“) schon realisiert wurden oder aktuell noch werden. Daher ergibt sich die Forderung, das bestehende Recyclingniveau zu halten. Gleichzeitig gilt es, das Recyclingniveau zu steigern und verbleibende Effizienzpotenziale zu erschließen. Mit einem fortschreitenden Recyclingniveau entstehen allerdings auch ökonomische und ökologische Zielkonflikte. Weiterhin muss eine Steigerung des Recyclingniveaus durch eine Änderung und Weiterentwicklung der technischen Regelwerke begleitet werden. Die Öffentliche Hand ist auf den verschiedenen Ebenen Hauptnachfrager von Verkehrsinfrastruktur und damit gleichzeitig maßgeblicher Hauptakteur. Aus diesem Grund sollte die Akzeptanz von Recyclingmaterial bei den Entscheidungsträgern in den Straßenbauämtern erhöht werden.

## 1 EINLEITUNG

Die Ressourceneffizienz rückt in Deutschland seit einigen Jahren immer stärker in den Fokus der Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik. So wird in der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie „Perspektiven für Deutschland“ aus dem Jahr 2002 eine Verdopplung der Rohstoffproduktivität bis zum Jahr 2020 gefordert, bezogen auf die Situation von 1994.<sup>1</sup> Im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) aus dem Jahr 2012 wird wegen der Mengenrelevanz der eingesetzten Rohstoffe dem Handlungsfeld „Nachhaltiges Bauen und Wohnen“ verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet.<sup>2</sup> Bisher lag der wissenschaftliche Fokus vor allem auf dem Hochbau. Für einzelne Bereiche des Tiefbaus, wie z. B. den Straßenbau, werden Fragen eines effizienten Ressourceneinsatzes behandelt, es finden sich allerdings keine Untersuchungen, die den Materialbestand, jährlichen Materialeinsatz sowie mögliche Ressourceneffizienzpotenziale für den Tiefbau insgesamt behandeln.

Wie der Begriff vermuten lässt, bezieht sich der Tiefbau als Fachgebiet des Bauwesens insbesondere auf Bauwerke an und unter der Erdoberfläche. Das Statistische Bundesamt – Destatis – definiert den Tiefbau als: „große bauliche Anlagen wie Autobahnen, Straßen, Brücken, Tunnel, Bahnverkehrsstrecken, Rollbahnen, Häfen und andere Wasserbauten, Bewässerungsanlagen, Kanalisationen, Industrieanlagen, Rohrleitungen und elektrische Kabelnetze, Sportanlagen usw.“<sup>3</sup> Aus dieser Beschreibung wird deutlich, dass zentrale Teile der Infrastruktur und damit die Grundlage einer wirtschaftlichen Entwicklung durch den Tiefbau bereitgestellt werden.

Bei Destatis ist der Tiefbau in drei Gruppen unterteilt:<sup>4</sup>

- Bau von Straßen und Bahnverkehrsstrecken
  - Bau von Bahnverkehrsstrecken
  - Bau von Straßen
  - Brücken- und Tunnelbau
- Leitungsbau und Kläranlagenbau

<sup>1</sup> Bundesregierung (2002)

<sup>2</sup> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2012a)

<sup>3</sup> Statistisches Bundesamt (2008)

<sup>4</sup> Statistisches Bundesamt (2008)

- Kabelnetzleitungstiefbau
- Rohrleitungstiefbau, Brunnenbau und Kläranlagenbau
- Sonstiger Tiefbau
  - Sonstiger Tiefbau (z. B. Raffinerien, Chemiefabriken oder Sportanlagen)
  - Wasserbau

Das Baugewerbe erzielte im Jahr 2013 einen Gesamtumsatz von 96,6 Mrd. Euro, davon entfiel auf den Tiefbau mehr als ein Drittel (rund 35 %; 34,1 Mrd. Euro). Auch wenn der Umsatz des Tiefbaus im Vergleich zum Hochbau nur etwa halb so groß ist<sup>5</sup>, zeigt sich hier seine Relevanz und macht deutlich, warum eine ressourcenbasierte Betrachtung des Tiefbaus erfolgversprechend erscheint.

Tabelle 1 gibt Aufschluss über die Bedeutung der genannten drei Gruppen innerhalb des Tiefbaus.

**Tabelle 1: Struktur des Tiefbausektors**

|  | Anzahl Betriebe (Juni 2013) | beschäftigte Pers. (Juni 2013) | Gesamtumsatz (ohne USt.) in Mio. Euro (2012) |
|--|-----------------------------|--------------------------------|--|
| Bau von Straßen und Bahnverkehrsstrecken           | 3.410                       | 104.605                        | 15.602                                       |
| Bau von Bahnverkehrsstrecken                       | 221                         | 16.595                         | 2.317  |
| Bau von Straßen                                    | 3.073                       | 80.927                         | 11.798                                       |
| Brücken- und Tunnelbau                             | 116                         | 7.083                          | 1.487  |
| Leitungstiefbau und Kläranlagenbau                 | 2.561                       | 63.542                         | 7.684  |
| Kabelnetzleitungstiefbau                           | 558                         | 13.145                         | 1.707  |
| Rohrleitungstiefbau, Brunnenbau und Kläranlagenbau | 2.003                       | 50.397                         | 5.977  |
| Sonstiger Tiefbau                                  | 1.795                       | 34.510                         | 5.290  |
| Sonstiger Tiefbau, a.n.g                           | 1.692                       | 33.126                         | 4.976  |
| Wasserbau  | 103                         | 1.384                          | 314  |
| Tiefbau gesamt                                     | 7.766                       | 202.657                        | 28.575                                       |

Quelle: Statistisches Bundesamt 2014b (Destatis 2012)

<sup>5</sup> Statistisches Bundesamt (2015)

Es zeigt sich, dass die Gruppe „Bau von Straßen und Bahnverkehrsstrecken“ hinsichtlich der Anzahl an Betrieben, beschäftigten Personen und des erzielten Gesamtumsatzes<sup>6</sup> die höchste Relevanz aufweist.

Die Unterteilung des Tiefbaus im Rahmen der weiteren Projektbearbeitung orientiert sich an der Gliederung nach Destatis, führt aber funktionale Teilbereiche ein, die bezüglich einer Stoffstrommodellierung von Vorteil sind.

## 1.1 Projekthintergrund

Die vorliegende Studie wurde von der VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE) beauftragt und durch das Öko-Institut e. V. bearbeitet. Sie ist eingebettet in einen Auftrag des BMUB und wurde aus Mitteln der Nationalen Klimaschutzinitiative finanziert. Der Bericht stellt die Dokumentation der vom Öko-Institut e. V. durchgeführten Arbeiten dar. Neben der fachlichen Unterstützung durch das VDI ZRE erfolgte jeweils zu Projektbeginn und -ende ein Expertenworkshop mit Fachvertretern des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), des Umweltbundesamts (UBA) und des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).

## 1.2 Projektziel und Aufbau der Studie

Das Ziel der vorliegenden Studie liegt in der Bilanzierung des aktuellen und zukünftigen Ressourceneinsatzes im Tiefbau und im Aufzeigen von Ressourceneffizienzpotenzialen. Dafür werden auf Basis einer Stoffstromanalyse über einen Bottom-up-Ansatz zunächst alle (relevanten) Materialmengen, die in Deutschland bislang im Tiefbau eingesetzt wurden, abgebildet (Kapitel 3, siehe Abbildung 1). Der mit der Förderung und der Herstellung der Baumaterialien verbundene Ressourcenverbrauch, dargestellt in verschiedenen Wirkungskategorien, ist integraler Teil der Stoffstromanalyse und gibt Aufschluss über die Ressourcenintensität des Tiefbaus insgesamt (Kapitel 3.2). Auf Grundlage dieser Ergebnisse erfolgt für die weitere Arbeit eine Fokussierung auf die beiden relevantesten Teilbereiche des Tiefbaus, die Straßen- und Schieneninfrastruktur.

<sup>6</sup> Hier bezogen auf das Jahr 2012

Die vertieft behandelten Teilbereiche werden zunächst bezüglich allgemeiner Trends und Rahmenbedingungen, die Einfluss auf die Ressourceninanspruchnahme haben, untersucht (Kapitel 4.1). Weiterhin folgt eine Detailanalyse der beiden Teilbereiche hinsichtlich des bereits heute stattfindenden Einsatzes von Recyclingprodukten (Kapitel 4.2). Mit den dabei gewonnenen Ergebnissen werden die Berechnungen der Teilbereiche nachjustiert. In einem weiteren Arbeitsschritt wird für beide Teilbereiche der prognostizierte Neu- und Ausbaubedarf ermittelt (Kapitel 4.3). Abschließend werden die Teilbereiche hinsichtlich der Erreichung von Ressourceneffizienzpotenzialen untersucht und - soweit möglich - bilanziert (Kapitel 4.4). In einer Szenarioberechnung wird für beide Teilbereiche der prognostizierte Neubaubedarf zusammen mit dem rechnerischen Ersatzbaubedarf (der bestehenden Infrastruktur) bis zum Jahr 2030 ausgewiesen (Kapitel 5). Diesem Referenzszenario gegenübergestellt wird ein ressourceneffizientes Szenario, in dem die im vorangegangenen Arbeitsschritt ermittelten Ressourceneffizienzpotenziale abgebildet werden. Anhand dieser beiden Szenarien lässt sich die Größenordnung möglicher Ressourceneinsparungen im Tiefbau ausweisen (Kapitel 5.2).

Daraus abgeleitet werden Handlungsempfehlungen, die eine Erschließung möglichst umfassender Ressourceneffizienzpotenziale zum Ziel haben (Kapitel 6).



Abbildung 1: Aufbau und Vorgehen, eigene Darstellung

## 2 METHODISCHES VORGEHEN

Die in besonderem Maße relevanten Infrastrukturen des Tiefbaus werden über eine Bottom-up-Stoffstromanalyse identifiziert. Dies setzt einen definierten Bilanzierungsrahmen voraus. Demnach wurden Systemgrenzen für die Infrastruktursysteme bestimmt, um somit die Bestandsaufnahme aller relevanten Daten und Informationen zu den Infrastrukturen und ihren Bestandteilen sicherzustellen.

Dieser Prozess untergliedert sich in zwei Schritte. Vorerst wird ein größerer Erfassungsrahmen gespannt, um mit überschaubarem Aufwand eine Übersicht über Materialbestände und -flüsse für die Unterbranchen des Tiefbaus und deren Komponenten zu erstellen. Darüber soll es ermöglicht werden, zwei Unterbranchen zu identifizieren, die die größten Ressourceneffizienzpotenziale zeigen.

Für die beiden Teilspektoren mit besonderem Ressourceneffizienzpotenzial (Straßen- und Schieneninfrastruktur) werden die Systemgrenzen in einem zweiten Schritt verschärft. Somit soll die Stoffstromanalyse für diese beiden Teilspektoren in zweiter Iteration präzisiert werden, um eine möglichst genaue Darstellung der Materialbestände und -flüsse über Bau und Instandsetzung der Infrastrukturen zu erreichen. Die Stoffstromanalyse soll dann über eine vertiefte Betrachtung der technischen Optionen zu einer – wo plausibel – quantitativen Beurteilung der Potenziale führen. Sind quantitative Aussagen nicht tragbar, sollen qualitative Aussagen unter Bezug auf die Ergebnisse der Stoffstromanalyse getroffen werden.

In den folgenden Kapiteln werden die Systemgrenzen (2.1), die Grundlagen und Berechnungsprinzipien der Stoffstromanalyse (2.2) und hauptsächliche Datenquellen (2.3) beschrieben.

### 2.1 Systemgrenzen und Scoping zu den Unterbranchen des Tiefbaus

Die vier „technischen Basisinfrastrukturen“<sup>7</sup> werden im Rahmen dieser Arbeit in zehn Infrastrukturteilsysteme

<sup>7</sup> Bundesministerium des Innern (2009)

oder Unterbranchen differenziert: Straße, Schiene, Luft und Wasser (Verkehrsinfrastruktur), Strom, Gas und Wärme (Energieinfrastruktur), Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung sowie Übertragungsnetze der Informations- und Kommunikationstechnologien (siehe Abbildung 2). Diese Unterteilung ist im Vergleich zu der in Kapitel 1 vorgestellten Gliederung des Tiefbaus nach Destatis<sup>8</sup> deutlich anders strukturiert. Hierfür sind zwei Gründe zu nennen: Erstens bietet die in der Studie gewählte Struktur eine bessere Gliederung nach den übergeordneten Funktionen anhand der technischen Basisinfrastrukturen. Zweitens schließt sich die Studie so der Strukturierung vorangehender und auch parallel laufender Projekte<sup>9</sup> zu sich überschneidenden Themen an.

Für die Auswahl der betrachteten Baukörper bezieht sich die Studie wieder verstärkt auf die Klassifizierung nach Destatis<sup>10</sup> mit der Ausnahme, dass sämtliche dort eingeschlossenen Gebäude (z. B. der Kraftwerkspark) aus den Systemgrenzen ausgeschlossen werden. Eine detaillierte Listung der betrachteten Baukörper für die in Abbildung 2 dargestellten Bereiche findet sich in Tabelle A.1 des Anhangs.

Die Systemgrenzen beziehen sich nur auf die zum Bau von Infrastrukturen des Tiefbaus relevanten Prozesse. Generell werden alle mobilen Elemente der Infrastrukturen von der Betrachtung ausgeschlossen. Insbesondere der Kraftstoffverbrauch der die Infrastrukturen nutzenden Fahrzeuge wird nicht berücksichtigt.

<sup>8</sup> Statistisches Bundesamt (2012)

<sup>9</sup> Knappe et al. (laufend); Mottschall und Bergmann (2013); Schmied und Mottschall (2010); Steger et al. (2011)

<sup>10</sup> Statistisches Bundesamt (2014b); Statistisches Bundesamt (2012)

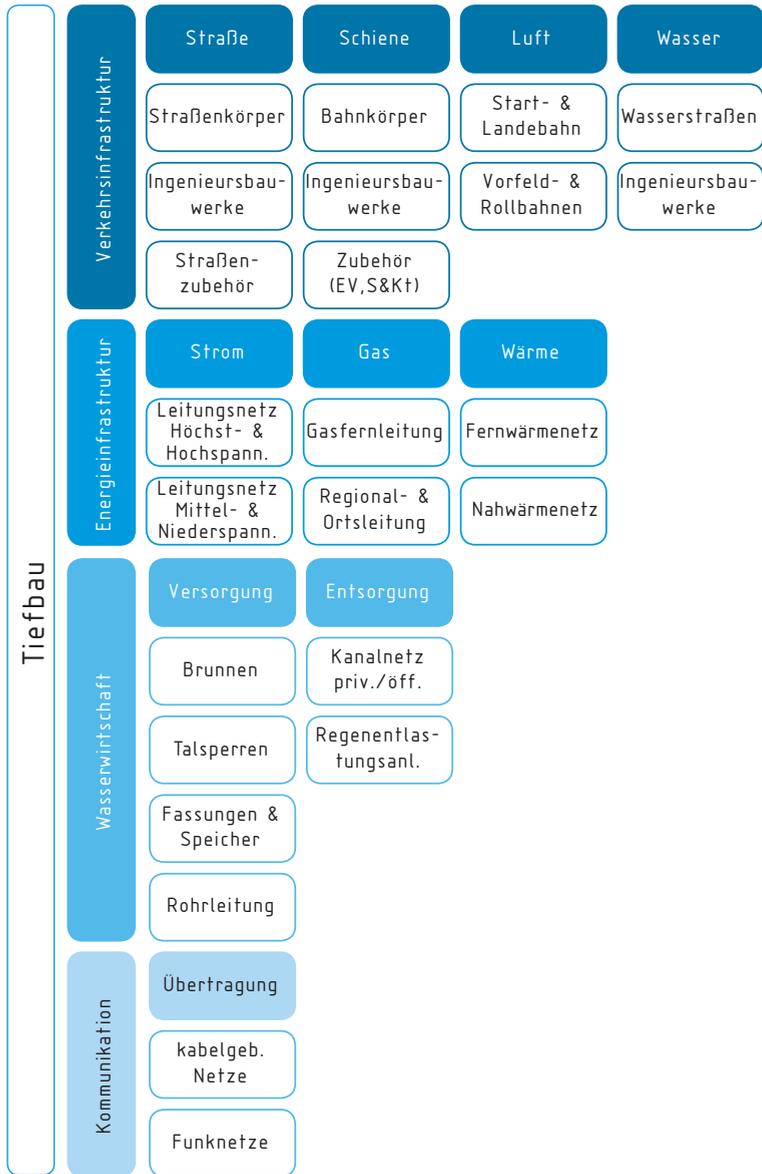


Abbildung 2: Systemgrenze Tiefbau und betrachtete Teilsektoren, eigene Darstellung

### 2.1.1 Systemgrenzen Verkehrsinfrastrukturen

Der Verkehrssektor wird in die Teilsysteme Straße, Schiene, Wasser und Luft unterteilt. Hier gilt der gleiche Grundsatz wie bei den anderen Infrastruktursystemen: Es werden Gebäude kategorisch von der Betrachtung ausgeschlossen, ebenso mobile Elemente. Ansonsten wird sich eng an die Betrachtungsgrenzen von Destatis<sup>11</sup> gehalten.

Für den **Straßenverkehr** werden in die Betrachtung eingeschlossen:

- Straßenbau aufgefächert nach
  - Neu-/Ausbau von Autobahnen, Bundesstraßen, Landstraßen, Kreisstraßen und Gemeindestraßen
  - Instandhaltung/Sanierung in gleicher Differenzierung
- Brücken- und Tunnelbau (Ingenieurbauwerke)
  - Jeweils differenziert nach den Straßenkategorien
- Markierung von Straßen (Straßenzubehör)
  - Leitplanken, Verkehrszeichen, u. ä. an Straßen

Für den **Schieneverkehr** werden in die Betrachtung eingeschlossen:

- Bau von Bahnverkehrsstrecken
  - Differenziert nach eingleisigen und zweigleisigen Strecken
- Brücken und Tunnel (Ingenieurbauwerke)
  - Jeweils differenziert nach eingleisigen und zweigleisigen Strecken
- Energieversorgung der elektrifizierten Strecken (Schienezubehör)
  - Differenziert in Unterwerke und Oberleitungen sowie Hochgeschwindigkeits-, Ausbau- und anderen Strecken

Unter den **Infrastrukturen des Luftverkehrs** werden berücksichtigt:

- Start- und Landebahnen sowie versiegelte Schultern
- Vorfelder und Rollbahnen

<sup>11</sup> Statistisches Bundesamt (2012)

Im **Wasserverkehrsbereich** sind in die Betrachtung eingeschlossen:

- Wasserstraßen
  - Uferbefestigungen an natürlichen Wasserstraßen und Häfen, Kanäle
- Bauwerke
  - Schleusen, Wehre, Kanalbrücken

Folgende wichtige Festlegungen wurden für den Verkehrssektor getroffen:

- Fernleitungen (Gas und Öl) werden der Energieversorgung zugeschrieben
- Straßeninfrastruktur (unberücksichtigte Elemente)
  - Planum
  - Das Wegenetz (z. B. Wirtschaftswege wie Feld- und Waldwege) wird nicht in die Betrachtung eingeschlossen, da sich hier noch wesentlich größere Unsicherheiten bezüglich Länge und Aufbau ergeben als für den Rest der Straßeninfrastruktur
  - Straßenbeleuchtung und elektrische Signalanlagen der Straßen sind nicht berücksichtigt, diese sind nach der Klassifizierung von Destatis explizit vom Tiefbau ausgegrenzt
  - Private Verkehrsinfrastruktur bleibt beim Straßenverkehr unberücksichtigt
  - Maßnahmen des aktiven Schallschutzes wie Schallschutzwälle, -wände oder Einhausungen bleiben aufgrund mangelnder Daten unberücksichtigt (siehe Kapitel 4.1.2; gilt auch für den Bereich Schiene)
- Schieneninfrastruktur (unberücksichtigte Elemente):
  - Nicht berücksichtigt werden einige Steuereinrichtungen (Gleisbremsen usw.), Straßen zur Wartung, Zäune, Kanalisation, Dämme
  - Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Signal- und Kommunikationstechnik (ausgeschlossen nach Destatis)

- Luftverkehrsinfrastruktur (unberücksichtigte Elemente):
  - Planum, Enteisierung, Flugsicherung auf externem Gelände
- Binnenschifffahrtsinfrastruktur (unberücksichtigte Elemente):
  - Hochwasserschutz

### 2.1.2 Systemgrenzen der Energieversorgungsinfrastruktur

Die Energieversorgungsinfrastrukturen werden im Rahmen der Studie in die Teilsysteme der Strom-, Wärme- und Gasversorgung gegliedert.

Der Bezugsraum der Bilanzgrenzen ist Deutschland. Die erfassten Systemkomponenten halten sich, mit Ausnahme von Gebäuden, an die Systembetrachtung des Tiefbaus nach Destatis.<sup>12</sup> In die Betrachtung eingeschlossen sind Stromleitungsnetze innerstädtisch und über Land. Diese sind im Rahmen der Untersuchung weiter differenziert in Freileitungen und Erdkabel sowie nach den Netzebenen Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetz. Das Erdgas-Netz ist unterteilt in Gasfernleitungsnetz nach den Nenndurchmesserklassen A ( $DN > 1000$  mm) - G ( $DN \leq 110$  mm) sowie das Regional- und Ortsnetz nach Hoch- ( $> 1000$  mbar), Mittel- (101 - 1000 mbar) und Niederdrucknetz ( $\leq 100$  mbar). Die Unterteilung des Wärmenetzes erfolgt nach Fernleitungen mit Wasser und Dampf getriebener Wärmeübertragung, dem Nahwärmenetz. Kältenetze sind eine verhältnismäßig junge Erscheinung und in ihrer Anwendung speziell. Daher erweisen sich die Netzlängen im Verhältnis als unbedeutend und werden in dieser Studie nicht separat berücksichtigt.

Im Speziellen nicht betrachtet werden: Kraftwerksparks, Speicher und Umspannwerke, Transformatoren, Verdichter. Unberücksichtigt bleibt weiterhin die Haustechnik (Sicherungen, Kabel, Heizungen usw.).

Die Elektrizitätsinfrastruktur im Verkehr (Fernbahn, ÖPNV) wird dem Verkehrssystem zugeschlagen.

<sup>12</sup> Statistisches Bundesamt (2012)

### 2.1.3 Systemgrenzen der Wasserwirtschaft

Der Sektor der Wasserwirtschaft wird hier in die Teilsysteme Wasserver- und Abwasserentsorgung unterteilt. Es gilt ebenso wie bei den anderen Infrastrukturen die Prämisse, dass Gebäude von der Betrachtung ausgeschlossen werden.

In den Betrachtungen der **Wasserversorgungsinfrastruktur** sind somit eingeschlossen:

- Brunnen, differenziert nach Vertikal- und Horizontalbrunnen
- Talsperren
- Quellwasserfassungen
- Wasserleitungen, differenziert nach der Nennweite der Rohre

Bei den **Abwasserentsorgungsinfrastrukturen** werden betrachtet:

- Öffentliche Kanalnetze, differenziert nach Regenwasser-, Schmutzwasser- und Mischwasserkanälen
- Kanalnetze auf privaten Grundstücken ohne weitere Differenzierung
- Regenentlastungsanlagen

Folgende wichtige weitere Festlegungen wurden für die Definition der Systemgrenzen der Siedlungswasserwirtschaft im Vorhaben getroffen:

- Die Eigengewinnung und -nutzung von Wasser für Produktionszwecke (Industrie) oder Kühlwasser in der Energieversorgung fällt heraus. Die Siedlungswasserwirtschaft organisiert den Umgang mit Trinkwasser, Betriebswasser, Abwasser und Niederschlagswasser im räumlichen Kontext von Siedlungen
- Anlagen und Netze der nicht öffentlichen Wasserversorgung (Eigengewinnung von Wasser für Produktionszwecke, Landwirtschaft, Kühlwasser usw.) werden im Vorhaben auch mangels Datengrundlage nicht untersucht
- Wasserkraftanlagen werden nicht erfasst, Hochwasserschutzanlagen können aufgrund mangelhafter Datenlage nicht berücksichtigt werden, obwohl diese in der

Klassifizierung nach Destatis<sup>13</sup> enthalten sind

- Abwasserbehandlungsanlagen werden, wie andere Gebäude, nicht in die Systemgrenzen des Tiefbaus eingeschlossen
- Zur Erfassung der Abwassernetze wird nicht wie üblich die Grundstücksgrenze angenommen, sondern der Austritt des Abwasserrohres aus dem Haus

#### 2.1.4 Systemgrenzen der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)

Folgende wichtige Festlegungen wurden für den IKT-Sektor getroffen. Betrachtet werden:

- Kabelgebundene Netze, differenziert nach Kupfer- und Glasfasernetzen
- Funknetze

Außerhalb der Bilanzgrenzen liegen:

- Endgeräte; Bilanzgrenze ist der Netzübergabepunkt „vor dem Haus“ bzw. die Mobilfunkantenne des Anbieters.
- Gebäudeinfrastruktur, die über die hausinterne Energieversorgung hinausgeht, d. h., Wasser/Abwasser, Straßenanbindung liegen bei den anderen Infrastrukturbereichen
- Herstellungsaufwand für eingesetzte Geräte (Elektronik) und Materialien: reine Massenbilanz

## 2.2 Grundlagen und Berechnungsprinzipien der Stoffstromanalyse

Die Stoffstromanalyse dient dazu, den Ressourcenbedarf durch Instandhaltung (= jährlicher Erneuerungsbedarf) und die damit verbundenen Umweltauswirkungen abzubilden und ist Grundlage für die im Weiteren durchgeführten Szenarioanalysen mit einem Zeithorizont bis 2030.

Grundlegend fußt der Ansatz zur Erfassung der Stoffströme auf der Studie „Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge

<sup>13</sup> Statistisches Bundesamt (2012)

des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland“ des Öko-Instituts.<sup>14</sup> In der Studie wurden die Treibhausgas-Emissionen der Verkehrsinfrastrukturen abgeschätzt.

Bei einer Stoffstromanalyse handelt es sich um eine systemanalytische Methode, die der Quantifizierung von Stoff- und Materialströmen eines definierten Systems dient. Sie ähnelt einer Ökobilanz. Diese untersucht allerdings in der Regel einzelne Produkte und stellt diese einander gegenüber. In Abgrenzung zu einer Ökobilanz endet die Systembeschreibung einer Stoffstromanalyse nicht unmittelbar bei der Bereitstellung von Produkten oder Dienstleistungen. Das System wird mit einem stärkeren Fokus auf räumliche und zeitliche Grenzen abgesteckt. Die räumliche und zeitliche Dimensionierung bringt auch die Betrachtung der dem System innewohnenden Stoff- und Materiallager mit sich.

Im Rahmen dieser Arbeit werden darüber hinaus auch die mit den Stoffströmen verbundenen Umweltauswirkungen betrachtet. Zur Erfassung der Umweltwirkungen wird den elementaren Flüssen (z. B. CO<sub>2</sub>-Emissionen oder Stickoxiden), die das beschriebene System verlassen, über einen Charakterisierungsfaktor eine Wirkung in Wirkungskategorien zugeordnet. Konkret betrachtet wurden die Umweltwirkungen Treibhausgaseffekt, kumulierter Energieaufwand, kumulierter Rohstoffaufwand und Flächenverbrauch.

Grundlage für die Stoffstromanalyse bildet die Berechnung des **Materialbestands** der Infrastrukturen des Tiefbaus. Für alle in Kapitel 2.1 definierten Basisinfrastrukturen und betrachteten Infrastrukturteilsysteme wird ein Mengengerüst der eingesetzten Materialien im **Bottom-up-Verfahren** berechnet. Konkret bedeutet dies, dass für jeden in Abbildung 2 dargestellten Bereich Kennwerte zum Bestand (Anzahl, Länge etc.) sowie zum spezifischen Materialeinsatz definiert werden.

#### Formel 1: Definition Materialbestand

$$\text{Materialbestand} = \text{spez. Materialeinsatz} * \text{Bestandsgerüst}$$

<sup>14</sup> Mottschall und Bergmann (2013)

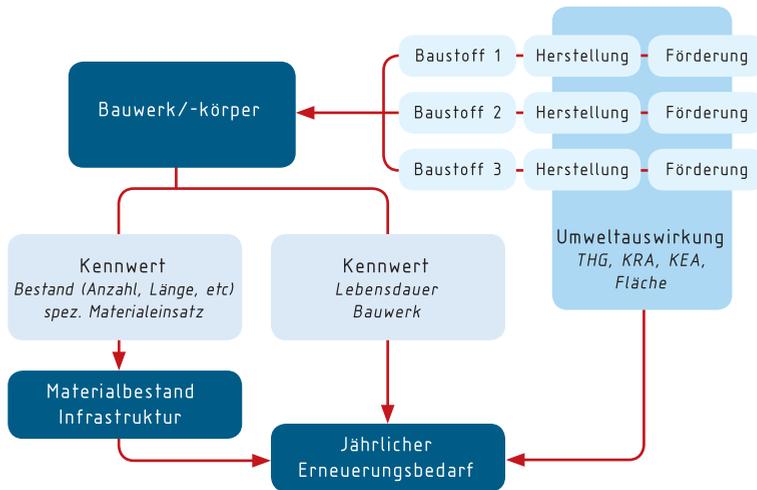
Eine zentrale Größe der Stoffstromanalyse ist der **jährliche Erneuerungsbedarf**. Abgeleitet wird dieser über die Setzung von Lebensdauern für jedes Bauwerk oder - wo sinnvoll - jedes Teilsystem eines Bauwerks. Hat ein Bauwerk oder ein Teilsystem eines Bauwerks eine Lebensdauer von x Jahren, beträgt der jährliche Erneuerungsbedarf (und die damit verbundenen Umweltwirkungen)  $1/x$  der gesamten Materialaufwendungen (Umweltwirkungen).

**Formel 2: Definition jährlicher Erneuerungsbedarf**

$$\text{jährlicher Erneuerungsbedarf} = \frac{\text{Materialbestand}}{\text{Lebensdauer}}$$

Die Baukörper der Infrastrukturen werden hierbei, soweit für die Erfassung sinnvoll, in verschiedene Komponenten unterteilt, um die unterschiedlichen Lebensdauern einzelner Komponenten berücksichtigen zu können. Die Setzung der Lebensdauern erfolgte durch Expertenbefragungen. Eine Liste der definierten Lebensdauern findet sich im Anhang. Der jährliche Erneuerungsbedarf drückt nur den zur Instandhaltung der bestehenden Infrastruktur notwendigen Baustoffbedarf aus. Der durch Neubauaktivitäten entstehende Materialbedarf bleibt unberücksichtigt. Im Rahmen der Vertiefung von zwei Teil-Sektoren wird der Neu- und Ausbaubedarf zusätzlich berechnet (siehe Kapitel 4).

Durch den jährlichen Erneuerungsbedarf lassen sich jährliche Materialmengen und Umweltwirkungen direkt dem Betrachtungsjahr zuordnen.



**Abbildung 3: Schematische Herleitung der Modellgrößen Materialbestand und jährlicher Erneuerungsbedarf, eigene Darstellung**

Die Berechnung der Umweltwirkungen für den Bau und die jährliche Erneuerung der Infrastruktur erfolgt **auf Basis der eingesetzten Materialmengen**. Hierbei werden die Umweltauswirkungen berücksichtigt, die bei der Gewinnung der Rohstoffe sowie deren Transport und deren Verarbeitung zu den Grundmaterialien (wie z. B. Beton, Stahl, Kupfer) entstehen. Nicht berücksichtigt werden die Umweltauswirkungen, welche sich bei der Verarbeitung der Grundmaterialien zu den Endprodukten ergeben. Aufgrund der vielfältigen Endprodukte ist dies nicht leistbar und mit zu großen Unsicherheiten verbunden.

Die Umweltwirkungen der Materialien, die bereits vor Jahren in den Infrastrukturen verbaut wurden, werden in dieser Studie mit den heutigen Faktoren bewertet. Dies stellt eine notwendige Vereinfachung dar, auch wenn heute oftmals neue Technologien zur Herstellung der Materialien zum Einsatz kommen, die früher noch nicht verfügbar waren oder die Emissionen der zur Herstellung verwendeten Hilfsenergie (z. B. Strom) und Hilfsprozesse (z. B. Transporte) von damals nicht mit heute vergleichbar sind. Diese Vorgehensweise wird in der Regel auch von den bisher publizierten Studien in diesem Bereich angewandt.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Maibach et al. 1999; Spielmann et al. 1996; Köser et al. 2002; Frischknecht/Stucki 2009; UIC 2009; Schmied/Mottschall 2013

Für den aktuellen und zukünftigen Neubau von Infrastrukturen ist dieser Ansatz in der Form nicht möglich. Baustoffmengen der zu erwartenden Neubaumaßnahmen werden bis zum Zieljahr 2030 ermittelt und gleichmäßig auf die Einzeljahre bis 2030 aufgeteilt (siehe Kapitel 4 und 5).

### **Recycling und Abfallentsorgung**

Recyclingmaterialien werden **auf der Inputseite** berücksichtigt, jedoch ohne Betrachtung der Umweltauswirkungen aus früheren Lebenszyklen. Damit werden auf der Output-Seite keine Gutschriften für das Recycling von Abfällen bzw. Reststoffen angerechnet (sogenannte Cut-off-Methode); Recyclinggutschriften werden nur auf der Input-Seite vergeben. Konkret bedeutet dies, dass im Regelfall mit typischen Produktmischen aus Primär- und Sekundärmaterialien gerechnet wird, da für die meisten konkret eingesetzten Materialien die Recyclinganteile nicht bekannt sind. Liegen aber entsprechende Informationen vor, werden diese berücksichtigt (siehe Kapitel 4.2).

### **Abschneidekriterien**

Prozesse und Aktivitäten, die zusammen nicht mehr als 1 % zu den Gesamtumweltauswirkungen beitragen, können vernachlässigt werden. Diese Regel wird im Rahmen der Stoffstromanalyse auf die Teilsysteme bezogen, um ihre genaue Beschreibung zu gewährleisten. Wenn keine Umweltauswirkungen bekannt sind, kann die 1 %-Regel auch auf die eingesetzten Materialmengen bezogen werden.

In dieser Studie kommt die Regel bei den berücksichtigten Materialien zum Tragen.

### **2.3 Auswahl von Wirkungskategorien und deren Normierung**

Um die Ergebnisdarstellung zu fokussieren und den Rahmen der Studie nicht zu sprengen, wird nur eine Auswahl der denkbaren Wirkungskategorien bilanziert und diskutiert. Der Forschungsschwerpunkt der Arbeit liegt in der Erfassung und Darstellung der eingesetzten Rohstoffe, insbesondere

des mineralischen Rohstoffaufwandes. Um andererseits die Szenarien auch hinsichtlich des Energieaufwandes bzw. der CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen und etwaige gegenläufige Effekte in den Szenarien einschätzen zu können, wird der Rohstoffaufwand durch den Energieaufwand und die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen komplementiert. Zusätzlich wird die direkte Flächeninanspruchnahme der verschiedenen Teilsektoren erfasst. Die betrachteten Wirkungskategorien umfassen daher:

- den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA),
- den kumulierten Energieaufwand (KEA),
- die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen inklusive Vorleistung (THG),
- Flächeninanspruchnahme.

Die Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) bzw. CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen beschreiben die Emissionen an Kyoto-Gasen (CO<sub>2</sub>, Methan, Lachgas, teil- und perfluorierte Kohlenwasserstoffe (H-FKW, FKW) sowie SF<sub>6</sub>) über den Lebensweg.<sup>16</sup> Die einzelnen Gase werden anhand ihres Treibhauspotenzials über einen Zeithorizont von 100 Jahren im Vergleich zu CO<sub>2</sub> addiert und als CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>-Äq.) ausgewiesen.

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) addiert die energetischen Aufwände über den Lebenszyklus unabhängig von ihrem Entstehungsort und der Art der Energiedarstellung.<sup>17</sup> Er umfasst die klassischen fossilen Energieträger, nukleare sowie erneuerbare Energie.

Die verbauten Materialien wie metallische und nichtmetallische Mineralien und die bei ihrer Herstellung eingesetzten Rohstoffe inklusive ihrer Vorkette werden analog zum kumulierten Rohstoffaufwand (KRA analog zu VDI 4800, Blatt 2, in Vorbereitung) bilanziert. Es werden folgende einzelne KRA-Untergruppen erfasst:

- Energierohstoffe (kg)
- Metallrohstoffe (kg)
- Steine und Erden (kg)
- Sonstige mineralische Rohstoffe (kg)
- Biotische Rohstoffe (kg)

<sup>16</sup> Umweltbundesamt (2013)

<sup>17</sup> VDI 4600 (2012)

Um in den Szenarien sekundäre Rohstoffe aus Recycling nachweisen zu können, werden für mineralische Rohstoffe der  $KRA_{\text{sek}}$  und für Stoffe mit Energieinhalt der  $KEA_{\text{sek}}$  zusätzlich angegeben. Werden also mineralische Rohstoffe mit einem Recyclinganteil von 70 % eingebaut, werden 30 % primäre Rohstoffe unter der  $KRA$  und 70 % unter  $KRA_{\text{sek}}$  aufgeführt.

Die betrachteten Teilsektoren weisen eine sehr spezifische Flächeninanspruchnahme auf. Neben der sichtbaren und direkten Flächeninanspruchnahme, z. B. Versiegelung der Straße, bestehen auch unterirdische Infrastrukturbauten, die zwar keine Versiegelung aufweisen, aber dennoch zu einer eingeschränkten Nutzung führen können. Als Beispiel hierfür können Ferngasleitungen genannt werden, bei denen die Vegetation entsprechend den Anforderungen bewirtschaftet werden muss. Dies gilt mit der einhergehenden Nutzungseinschränkung auch für Oberleitungstrassen. Eine weitere, deutlich schwächere Form der eingeschränkten Nutzung liegt bei der Wasserförderung hinsichtlich Trinkwasserschutzgebieten vor. Innerhalb dieser Studie wird daher die Flächeninanspruchnahme in drei Formen unterschieden:

- Direkte Flächeninanspruchnahme (Versiegelung)
- Flächeninanspruchnahme mit stark eingeschränkter Nutzung
- Flächeninanspruchnahme mit gering eingeschränkter Nutzung

Für den Abbau von Rohstoffen wird keine Flächeninanspruchnahme bilanziert.

### Normierung

Das Ergebnis der Berechnung wird für die Wirkungskategorien dargestellt. Die Normierung gibt dem Leser Hinweise, wie das einzelne Ergebnis einzuordnen ist und wie dieses dabei unabhängig von der Zahl und Einheit wird. In dem Normierungsschritt wird das Verhältnis des Ergebnisses zu einer Bezugsgröße gebildet. In unserem Fall wird als Bezugsgröße Deutschland, bzw. die Emission, der Rohstoffaufwand oder die versiegelte Fläche in Deutschland ausgewählt. Die Bezugsgröße ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 2: Normierungsgrößen für Deutschland 2013**

| Gewichtung von Wirkungskategorien durch Normierung |   | Größe  | Einheit         | Quelle          |
|--|---|--------|-----------------|-----------------|
| Treibhausgase (THG)                                | Emissionen aller THG in Deutschland (D)               | 951    | Mio. Tonnen     | (UBA 2013c)     |
| Kumulierter Energiebedarf (KEA)                    | Verbrauch aller Energieträger in D                    | 13.828 | PJ              | (BMWi 2013)     |
| Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)                  | Verbrauch aller mineralischen Rohstoffe und Erze in D | 1.312  | Mio. Tonnen     | (Eurostat 2014) |
| Flächeninanspruchnahme                             | Versiegelte Fläche in D                               | 48 225 | km <sup>2</sup> | (UBA 2014)      |

## 2.4 Datenquellen

Zur Durchführung der Stoffstromanalyse werden folgende Daten benötigt:

- Mengengerüst (z. B. Länge des Straßennetzes in Deutschland)
- Spezifischer Materialbestand der Infrastrukturbestandteile (z. B. Menge Asphalt pro km Autobahn; Gusseisen pro m Rohrleitung)
- Lebensdauer einzelner Infrastrukturbestandteile

Werden diese Daten verknüpft, zeigen sich die jährlich eingesetzten Materialmengen. Diese werden mit generischen Daten (Emissionsfaktoren) belegt, woraus sich dann die Gesamtwirkung der verschiedenen Wirkungskategorien je Infrastruktureilsystem ergibt.

Die generischen Daten und Charakterisierungsfaktoren wurden für die Berechnungen vom ifeu-Institut zur Verfügung gestellt.<sup>18</sup> Speziell im Rahmen der Studie entwickelte Charakterisierungsfaktoren sind im Anhang in Tabelle A. 2, Tabelle A. 3 und Tabelle A. 4 aufgeführt.

Einige der wichtigsten Referenzen zur Beschreibung der Infrastruktureilsysteme (Mengengerüst, spezifische Materialmengen usw.) sind im Folgenden aufgeführt:

<sup>18</sup> Lauwigi (2013)

## Verkehr

- Mottschall, Bergmann (2013): Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland, Freiburg
- Knappe et al. (in Bearbeitung): Substitution von Primärrohstoffen im Straßen und Wegebau
- Steger et al. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Meilensteinbericht MaRes 2.3. Wuppertal.
- Spielmann et al. (2007): Life Cycle Inventories of Transport Services. Data v2.0. ecoinvent report No. 14. Villingen/Uster.
- BMVBS (Hrsg.): VIZ – Verkehr in Zahlen 2011
- Schmied, Mottschall (2010) – Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland, Berlin
- Google Maps, diverse Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichte

Für die restlichen Infrastrukturen wurde die im laufenden Projekt RELIS in Zusammenarbeit mit dem Difu<sup>19</sup> erarbeitete Datengrundlage genutzt, um die Materialströme der für diese Arbeit relevanten Baukörper für die erste orientierende Stoffstromanalyse abzuschätzen.

<sup>19</sup> Trapp et al. (laufend)

### 3 MATERIALBESTAND UND ERNEUERUNGSBEDARF IM TIEFBAU

Dieses Kapitel zeigt die erhobenen Materialbestände der betrachteten Infrastrukturteilsysteme des Tiefbaus auf. Weiterhin werden die jährlichen Erneuerungsaufwendungen über technische Lebensdauern, Expertenschätzungen usw., wie in Kapitel 2.2 erklärt, abgeleitet. Die Angaben zum jeweils ermittelten Mengengerüst sind im Anhang in Tabelle A. 5 (Verkehrsinfrastrukturen), Tabelle A. 6 (Energieversorgungsinfrastrukturen), Tabelle A. 7 (Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen) und Tabelle A. 8 (IKT-Infrastrukturen) zu finden. Das Ergebniskapitel beschäftigt sich mit der Betrachtung der Teilsektoren (Straßen- und Schieneninfrastruktur) über die Wirkungsindikatoren THG, KRA, KEA und dient darüber hinaus dazu, zwei Unterbranchen bzw. Teilsektoren zur vertieften Betrachtung im nächsten Kapitel auszuwählen.

#### 3.1 Materialbestand und Erneuerungsbedarf nach Unterbranchen

Die Datenherkunft und eine Übersicht über das Mengengerüst, den spezifischen Materialkoeffizienten und die Lebensdauern der Baukörper werden im Folgenden für jedes Infrastrukturteilsystem dargestellt. Über diese Parameter werden dann der gesamte Materialbestand und der über die Lebensdauern abgeleitete jährliche Erneuerungsbedarf berechnet. Eine Übersicht über alle angenommenen Lebensdauern findet sich im Anhang in Tabelle A. 9 und Tabelle A. 10.

##### 3.1.1 Straßenverkehrsinfrastruktur

Die Erhebung des Mengengerüsts der Straßenverkehrsinfrastruktur berücksichtigt das klassierte Straßennetz, Markierungen an Straßen und straßenführende Ingenieurbauwerke. Die insgesamt erfassten 690.000 km Straßen werden grundsätzlich nach der üblichen Unterteilung in Bundesautobahnen, Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen unterschieden. Die Daten zu den Längen

der Straßen und Ingenieurbauwerke kommen aus einem noch nicht abgeschlossenen Projekt, in dem eine umfassende Erhebung der Straßenstruktur Deutschlands vorgenommen wurde. Grundsätzlich sind die Flächen der Straßkörper und Ingenieurbauwerke aus dem Digitalen Basis-Landschaftsmodell (ATKIS-Basis-DLM) mit Stand Q1 2014 abgeleitet. Diese werden mit einer Auswertung der Straßeninformationsbanken (SIB) der Länder sowie einer Abfrage von rund 300 Kommunen zu Netz- und Strukturdaten der Straßeninfrastrukturen verknüpft.<sup>20</sup> Dadurch können Straßenflächen einerseits weiter differenziert werden, um präzisere Aussagen über den Aufbau der einzelnen Straßkörper zu treffen (getrennte Fahrbahnen, Innerortslage, Deckschichtmaterial usw.). Andererseits ist es somit möglich, regionale Spezifika der Bauweisen berücksichtigen zu können. Im Rahmen der Datenerhebung wurden 4.372 km Brücken und 407 km Tunnel erfasst, welche wiederum zu den differenzierten Straßkategorien zugeteilt werden können. Die Asphaltmengen auf Brücken und Tunneln sind den Straßen zugeordnet, daher fallen bei der Kategorie der Ingenieurbauwerke keine Asphaltmengen an. Das Mengengerüst der begleitenden Infrastruktur (Schutzplanken, Leitpfosten, Zeichen)<sup>21</sup> wird von Mottschall & Bergmann<sup>22</sup> übernommen. Für die Straßkörper werden die spezifischen Materialkoeffizienten von Knappe et al. verwendet, für Brücken und Tunnel sowie begleitende Infrastruktur werden die spezifischen Materialkoeffizienten ebenso von Mottschall & Bergmann benutzt. Die Lebensdauern der Straßen sind unterschieden nach Straßkategorie und Schichtenaufbau nach Knappe et al., für Ingenieurbauwerke und begleitende Infrastrukturen finden die Lebensdauern aus Mottschall & Bergmann Anwendung.

<sup>20</sup> Knappe et al. (laufend)

<sup>21</sup> nach Destatis als Markierungen an Straßen geführt

<sup>22</sup> Mottschall und Bergmann (2013)

Tabelle 3: Materialbestand der Straßenverkehrsinfrastruktur

|                                 | BAB    | Straßen |        |        |         | Brücken | Tunnel | begl. Infrastruktur | Summe   |
|---------------------------------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|---------------------|---------|
|                                 |        | B-Str.  | L-Str. | K-Str. | G-Str.  |         |        |                     |         |
| AlMg2                           | Mio. t | 0,0     | 0,0    | 0,0    | 0,0     | 0,0     | 0,0    | 0,0                 | 0,0     |
| Aluminium                       | Mio. t | 0,0     | 0,0    | 0,0    | 0,0     | 0,0     | 0,0    | 0,0                 | 0,0     |
| Asphalt                         | Mio. t | 179,8   | 194,3  | 167,1  | 852,9   | 0,0     | 0,0    | 0,0                 | 1.555,3 |
| Beton                           | Mio. t | 116,2   | 8,3    | 22,4   | 114,2   | 86,5    | 9,9    | 0,0                 | 363,4   |
| Pflaster                        | Mio. t | 0,2     | 0,3    | 14,4   | 73,1    | 0,0     | 0,0    | 0,0                 | 88,7    |
| PVC / PE                        | Mio. t | 0,0     | 0,0    | 0,0    | 0,0     | 0,0     | 0,0    | 0,0                 | 0,0     |
| ungebunden (Schofter/Kies/Sand) | Mio. t | 214,9   | 173,2  | 310,2  | 1.583,3 | 0,0     | 0,0    | 0,0                 | 2.544,2 |
| Stahl                           | Mio. t | 0,0     | 0,0    | 0,0    | 0,0     | 20,1    | 1,9    | 2,9                 | 25,0    |

Quellen: Knappe et al. (laufend); Mottschall & Bergmann 2013

Tabelle 4: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Straßenverkehrsinfrastruktur

|            | BAB | Straßen   |           |           |           |            | Brücken   | Tunnel  | begl. Infrastruktur | Summe      |
|------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|---------|---------------------|------------|
|            |     | B-Str.    | L-Str.    | K-Str.    | G-Str.    |            |           |         |                     |            |
| AlMg2      | t/a | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          | 0         | 0       | 1.136               | 1.136      |
| Aluminium  | t/a | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          | 0         | 0       | 204                 | 204        |
| Asphalt    | t/a | 7.032.847 | 6.627.382 | 5.935.419 | 4.963.930 | 8.528.781  | 0         | 0       | 0                   | 33.088.359 |
| Beton      | t/a | 5.453.621 | 119.619   | 92.314    | 687.043   | 1.142.114  | 1.081.183 | 123.491 | 0                   | 8.699.385  |
| Pflaster   | t/a | 8.973     | 19.408    | 4.540     | 58.974    | 731.093    | 0         | 0       | 0                   | 822.987    |
| PVC / PE   | t/a | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          | 0         | 0       | 911                 | 911        |
| ungebunden | t/a | 2.279.205 | 1.858.045 | 2.618.383 | 2.796.675 | 15.833.303 | 0         | 0       | 0                   | 25.385.611 |
| Stahl      | t/a | 0         | 0         | 0         | 0         | 0          | 251.792   | 23.906  | 137.172             | 412.870    |

Quellen: Knappe et al. (laufend); Mofittschall &amp; Bergmann 2013

### 3.1.2 Schienenverkehrsinfrastruktur

Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, werden Gleise, gleisführende Ingenieurbauwerke und Anlagen zur Energieversorgung für die Schieneninfrastruktur erfasst. Die in dieser Studie verwendete Bestandsauswertung von Schmied & Mottschall<sup>23</sup> basiert auf einem Datensatz der DB Netz AG mit Bezugsjahr 2008. Dieser ermöglichte eine detaillierte Auswertung des DB-Netzes. Von den rund 73.000 km Gleislänge (ohne S-Bahn Berlin und Hamburg sowie U- und Straßenbahn) waren für 87 % des Netzes Detailinformationen wie Elektrifizierung, Anzahl der Gleise, Schwellentyp, Schientyp, Bettung usw. für jeden Gleisabschnitt verfügbar. Diese Auswertung wurde dann auf die 11 % anderer öffentlicher Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und nicht bundeseigener Bahnen (NE-Bahnen) als auch die restlichen 2 % nicht öffentlicher Schienennetze übertragen. Da sich die Betriebslänge seit dem Berechnungszeitpunkt bis 2012 um weniger als 1 % verändert hat, ist davon auszugehen, dass die Erhebung trotz veralteter Daten repräsentativ ist. Die Ingenieurbauwerke sind weiter unterteilt in 645 km gleisführende Brücken und 855 km gleisführende Tunnel.

Für die Energieversorgung der Gleise sind insgesamt 52.451 km Oberleitungen erfasst. Diese werden weiter differenziert nach Oberleitungen an Hochgeschwindigkeitsstrecken (5.966 km), Ausbau- (15.068 km) und anderen Strecken (31.417 km). Die insgesamt 878 km elektrifizierten Tunnelabschnitte werden hierbei noch einmal separat betrachtet, da keine Masten zum Anbringen der Fahrdrähte benötigt werden. Die spezifischen Materialkoeffizienten und Lebensdauern der Baukörper werden aus Schmied & Mottschall übernommen.

<sup>23</sup> Schmied und Mottschall (2010)

Tabelle 5: Materialbestand der Schieneninfrastruktur

|                           |   | Gleise          |                 | Energie-<br>versor-<br>gung | Ingenieurbauwerke |             | Summe       |
|---------------------------|---|-----------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|-------------|-------------|
|                           |   | ein-<br>gleisig | zwei<br>gleisig |                             | Brücken           | Tunnel      |             |
| Alumi-<br>nium            | t | 0               | 0               | 176.303                     | 0                 | 0           | 176.303     |
| Bau-<br>stahl             | t | 0               | 0               | 0                           | 1.153.412         | 0           | 1.153.412   |
| Beton                     | t | 7.235.231       | 20.310.154      | 3.342.162                   | 28.399.691        | 112.427.507 | 171.714.745 |
| Beweh-<br>rungs-<br>stahl | t | 185.112         | 519.631         | 1.773.038                   | 1.405.728         | 4.738.141   | 8.621.649   |
| Bronze                    | t | 0               | 0               | 55.411                      | 0                 | 0           | 55.411      |
| Buchen-<br>holz           | t | 1.022.801       | 2.871.124       | 0                           | 0                 | 0           | 3.893.925   |
| Kupfer                    | t | 0               | 0               | 11.467                      | 0                 | 0           | 11.467      |
| Por-<br>zellan            | t | 0               | 0               | 54.804                      | 0                 | 0           | 54.804      |
| PVC /<br>PE               | t | 34.517          | 96.894          | 0                           | 0                 | 0           | 131.411     |
| Schotter                  | t | 72.558.947      | 243.328.003     | 0                           | 0                 | 0           | 315.886.950 |
| Stahl                     | t | 2.873.025       | 8.064.924       | 348.700                     | 0                 | 0           | 11.286.649  |
| Teeröl                    | t | 92.497          | 259.649         | 0                           | 0                 | 0           | 352.146     |

Quelle: Schmied &amp; Mottschall 2010

**Tabelle 6: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Schieneninfrastruktur**

|                  |     | Gleise      |              | Energieversorgung | Ingenieurbauwerke |           | Summe      |
|------------------|-----|-------------|--------------|-------------------|-------------------|-----------|------------|
|                  |     | ein-gleisig | zwei-gleisig | Oberleitung       | Brücken           | Tunnel    |            |
| Aluminium        | t/a | 0           | 0            | 2.938             | 0                 | 0         | 2.938      |
| Bau-stahl        | t/a | 0           | 0            | 0                 | 14.418            | 0         | 14.418     |
| Beton            | t/a | 241.174     | 677.005      | 55.703            | 354.996           | 1.405.344 | 2.734.222  |
| Bewehrungs-stahl | t/a | 6.170       | 17.321       | 29.551            | 17.572            | 59.227    | 129.840    |
| Bronze           | t/a | 0           | 0            | 924               | 0                 | 0         | 924        |
| Buchen-holz      | t/a | 34.093      | 95.704       | 0                 | 0                 | 0         | 129.797    |
| Kupfer           | t/a | 0           | 0            | 1.638             | 0                 | 0         | 1.638      |
| Por-zellan       | t/a | 0           | 0            | 913               | 0                 | 0         | 913        |
| PVC / PE         | t/a | 1.151       | 3.230        | 0                 | 0                 | 0         | 4.380      |
| Schotter         | t/a | 2.418.632   | 8.110.933    | 0                 | 0                 | 0         | 10.529.565 |
| Stahl            | t/a | 95.768      | 268.831      | 5.812             | 0                 | 0         | 370.410    |
| Teeröl           | t/a | 3.083       | 8.655        | 0                 | 0                 | 0         | 11.738     |

Quelle: Schmied & Mottschall 2010

### 3.1.3. Wasserverkehrsinfrastruktur

Nach der Logik der Systemgrenzen werden für die Wasserverkehrsinfrastruktur Wasserstraßen und Bauwerke der Wasserstraßen erfasst. Wasserstraßen gliedern sich weiterhin in ursprünglich natürliche Flussführungen und Kanäle. Bei den im weitesten Sinne natürlichen Wasserstraßen werden nach Mottschall & Bergmann<sup>24</sup> nur Uferbefestigungen in den Materialbestand eingerechnet. Nach der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes<sup>25</sup> gibt es 4.907 km Uferbefestigungen an Binnenschifffahrtsstraßen und 577 km an

<sup>24</sup> Mottschall und Bergmann (2013)

<sup>25</sup> Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (2014)

Seeschiffahrtsstraßen laut Bundeswasserstraßengesetz WaStrG. Kanäle werden mit einer Gesamtlänge von 1.753 km angegeben. Als Bauwerke der Schiffahrtsstraßen werden im Rahmen der Bestandserhebung 326 Schleusen und zehn Kanalbrücken erfasst. Die spezifischen Materialkennwerte zur Berechnung des Materialbestandes werden ebenso wie die Lebensdauer der verschiedenen Baukörper aus Mottschall & Bergmann entnommen.

**Tabelle 7: Materialbestand der Wasserverkehrsinfrastruktur**

|                       |                | Bauwerke     |            | Wasserstraßen |                   | Summe      |
|-----------------------|----------------|--------------|------------|---------------|-------------------|------------|
|                       |                | Kanalbrücken | Schleusen  | Kanäle        | Uferbefestigungen |            |
| Asphalt               | t              | 0            | 0          | 333.140       | 1.153.136         | 1.486.277  |
| Baustahl              | t              | 74.303       | 607.077    | 0             | 0                 | 681.380    |
| Beton                 | t              | 493.834      | 45.904.422 | 0             | 303.200           | 46.701.456 |
| Bewehrungsstahl       | t              | 31.521       | 4.951.578  | 0             | 0                 | 4.983.099  |
| Bitumensand           | t              | 0            | 0          | 0             | 219.086           | 219.086    |
| Geotextilien          | m <sup>2</sup> | 0            | 0          | 0             | 10.940.614        | 10.940.614 |
| Kies/Sand             | t              | 0            | 0          | 433.484       | 5.730.472         | 6.163.956  |
| Schlacke, Grandgeröll | t              | 0            | 0          | 2.254.717     | 482.185           | 2.736.902  |
| Schotter              | t              | 0            | 0          | 732.507       | 5.840.015         | 6.572.522  |
| Stahl                 | t              | 0            | 0          | 1.295.434     | 2.171.300         | 3.466.734  |
| Steinzeug             | t              | 0            | 0          | 4.064.913     | 17.548.409        | 21.613.322 |

Quelle: Mottschall & Bergmann 2013

**Tabelle 8: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Wasserverkehrsinfrastruktur**

|                       |                   | Bauwerke     |           | Wasserstraßen |                   | Summe   |
|-----------------------|-------------------|--------------|-----------|---------------|-------------------|---------|
|                       |                   | Kanalbrücken | Schleusen | Kanäle        | Uferbefestigungen |         |
| Asphalt               | t/a               | 0            | 0         | 5.552         | 19.219            | 24.771  |
| Baustahl              | t/a               | 1.238        | 10.118    | 0             | 0                 | 11.356  |
| Beton                 | t/a               | 8.231        | 765.074   | 0             | 5.053             | 778.358 |
| Bewehrungsstahl       | t/a               | 525          | 82.526    | 0             | 0                 | 83.052  |
| Bitumensand           | t/a               | 0            | 0         | 0             | 3.651             | 3.651   |
| Geotextilien          | m <sup>2</sup> /a | 0            | 0         | 0             | 182.344           | 182.344 |
| Kies/Sand             | t/a               | 0            | 0         | 7.225         | 95.508            | 102.733 |
| Schlacke, Grandgeröll | t/a               | 0            | 0         | 37.579        | 8.036             | 45.615  |
| Schotter              | t/a               | 0            | 0         | 12.208        | 97.334            | 109.542 |
| Stahl                 | t/a               | 0            | 0         | 21.591        | 36.188            | 57.779  |
| Steinzeug             | t/a               | 0            | 0         | 67.749        | 292.473           | 360.222 |

Quelle: Mottschall & Bergmann 2013

### 3.1.4 Luftverkehrsinfrastruktur

Da Gebäude in der Erhebung keine Berücksichtigung finden, werden für die Luftverkehrsinfrastruktur Start- und Landebahnen inklusive versiegelter Schulterflächen, Vorfelder und Rollbahnen erfasst. Die Start- und Landebahnen sowie Vorfelder und Rollbahnen werden unterschieden nach Beton- und Asphaltbauweise. Für die an die Start- und Landebahn anschließenden versiegelten Lande- und Rollbahnschultern wird von einer Asphaltbauweise ausgegangen. Das Mengengerüst sowie spezifische Materialkennwerte und Lebensdauern werden aus Mottschall & Bergmann<sup>26</sup> übernommen.

<sup>26</sup> Mottschall und Bergmann (2013)

**Tabelle 9: Materialbestand der Luftverkehrsinfrastruktur**

|           |   | Start- und Landebahn | versiegelte Schultern | Vorfelder und Rollbahnen | Summe      |
|-----------|---|----------------------|-----------------------|--------------------------|------------|
| Asphalt   | t | 3.866.931            | 717.875               | 3.597.595                | 8.182.400  |
| Beton     | t | 7.989.865            | 0                     | 25.338.098               | 33.327.963 |
| Kies/Sand | t | 3.022.064            | 3.741.152             | 23.053.585               | 29.816.801 |

Quelle: Mottschall &amp; Bergmann 2013

**Tabelle 10: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Luftverkehrsinfrastruktur**

|           |     | Start- und Landebahn | versiegelte Schultern | Vorfelder und Rollbahnen | Summe     |
|-----------|-----|----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------|
| Asphalt   | t/a | 115.543              | 23.075                | 125.916                  | 264.533   |
| Beton     | t/a | 246.757              | 0                     | 1.003.668                | 1.250.425 |
| Kies/Sand | t/a | 75.552               | 93.529                | 576.340                  | 745.420   |

Quelle: Mottschall &amp; Bergmann 2013

### 3.1.5 Stromleitungsnetze

Die deutschen Stromleitungsnetze werden im Sinne der Bestandserhebung nach ihrer Funktion bzw. den Spannungsebenen gegliedert. Weiter unterschieden werden die Leitungen nach oberirdischen Freileitungen und unterirdisch verlegten Erdkabeln. Das Übertragungs- oder Höchstspannungsnetz dient einerseits der Verteilung der Energie direkt von den Kraftwerken aus zu Verbrauchsschwerpunkten, andererseits als Anbindung zum internationalen Verbundnetz. In Deutschland werden diese mit 380 kV oder 220 kV betrieben. Höchstspannungsleitungen werden grundsätzlich als Freileitungen verbaut. Von den 35.100 km sind lediglich 100 km als Erdkabel unterirdisch gelegt. Das Verteil- bzw. Hochspannungsnetz ist für die grobe Verteilung zuständig. Es werden insbesondere lokale Stromversorger, Industrie und größere Gewerbebetriebe angebunden. In Deutschland umfasst das mit 110 kV geführte Netz 74.500 km Freileitung und 5.000 km Erdkabel. Über das Mittelspannungsnetz wird die elektrische Energie an regionale Verteilnetze oder einzelne größere Einrichtungen übergeben. Das Mittelspannungsnetz wird mit 10 - 30 kV betrieben. Es beinhaltet knapp 160.000 km Freileitungen und 355.000 km Erdkabel. Die

tiefste Ebene des Stromnetzes, das Niederspannungsnetz, ist für die Feinverteilung verantwortlich. Alles, was nicht über die anderen Netzebenen direkt versorgt wird, findet über das Niederspannungsnetz meist mit 230 V oder 400 V, aber maximal bis 1 kV, Anschluss. 232.000 km Freileitungen und 928.000 km Erdkabel sind auf dieser Spannungsebene erfasst. Die Längen der Leitungen sind aus Destatis<sup>27</sup> bezogen, die Verteilung nach ober- und unterirdischen Leitungen nach Steger et al. aus dem Projekt Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRes).<sup>28</sup> Die spezifischen Materialkoeffizienten für die jeweiligen Leitungstypen wurden ebenso aus MaRes übernommen. Hierbei werden die Freileitungen weiter in die Komponenten Freileitungsdraht, Freileitungsmast und Erdungsleiter unterteilt. Die Lebensdauer für Masten wird auf 80 Jahre angesetzt, Freileitungskabel werden über die Lebensdauer einmal getauscht, also mit 40 Jahren gerechnet.<sup>29</sup> Bei erdverlegten Kabeln wird ebenso von einer Lebensdauer von 40 Jahren ausgegangen.<sup>30</sup>

**Tabelle 11: Materialbestand im Stromnetz 2012**

|               |            | Höchstspannung | Hochspannung | Mittelspannung | Niederspannung | Summe      |
|---------------|------------|----------------|--------------|----------------|----------------|------------|
|               |            | t              | t            | t              | t              | t          |
| Erdkabel      | Aluminium  | 0              | 0            | 141.864        | 1.577.600      | 1.719.464  |
|               | Blei       | 200            | 10.000       | 283.728        | 278.400        | 572.328    |
|               | Isolieröl  | 100            | 5.000        | 53.199         | 92.800         | 151.099    |
|               | Kupfer     | 680            | 34.000       | 709.320        | 2.041.600      | 2.785.600  |
|               | PE         | 100            | 5.000        | 212.796        | 92.800         | 310.696    |
|               | PVC        | 100            | 5.000        | 212.796        | 835.200        | 1.053.096  |
|               | Stahlblech | 0              | 0            | 35.466         | 92.800         | 128.266    |
|               | Stahlrohr  | 200            | 10.000       | 354.660        | 278.400        | 643.260    |
| Freileitungen | Aluminium  | 194.033        | 67.189       | 120.739        | 171.393        | 553.354    |
|               | Beton      | 6.125.000      | 13.037.500   | 1.147.248      | 1.322.400      | 21.632.148 |
|               | Holz       | 0              | 0            | 350.548        | 434.304        | 784.852    |
|               | Kupfer     | 0              | 0            | 696.573        | 444.023        | 1.140.596  |
|               | PE         | 0              | 0            | 46.438         | 88.805         | 135.243    |
|               | Stahl      | 947.329        | 1.887.546    | 57.119         | 0              | 2.891.993  |
|               | Stahlrohr  | 0              | 0            | 4.206.576      | 445.440        | 4.652.016  |

Quelle: Steger et al. 2011; Statistisches Bundesamt 2014a; eigene Berechnungen

<sup>27</sup> Statistisches Bundesamt (2014)

<sup>28</sup> Steger et al. (2011)

<sup>29</sup> Brakelmann (2004); Niedersächsische Staatskanzlei (2007)

<sup>30</sup> Niedersächsische Staatskanzlei (2007); Vattenfall (2011)

Tabelle 12: Jährlicher Erneuerungsbedarf im Stromnetz 2012

|                    |            | Höchst<br>spannung | Hoch<br>spannung | Mittel<br>spannung | Nieder<br>spannung | Summe   |
|--------------------|------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|---------|
|                    |            | t/a                | t/a              | t/a                | t/a                | t/a     |
| Erdkabel           | Aluminium  | 0                  | 0                | 3.547              | 39.440             | 42.987  |
|                    | Blei       | 5                  | 250              | 7.093              | 6.960              | 14.308  |
|                    | Isolieröl  | 3                  | 125              | 1.330              | 2.320              | 3.777   |
|                    | Kupfer     | 17                 | 850              | 17.733             | 51.040             | 69.640  |
|                    | PE         | 3                  | 125              | 5.320              | 2.320              | 7.767   |
|                    | PVC        | 3                  | 125              | 5.320              | 20.880             | 26.327  |
|                    | Stahlblech | 0                  | 0                | 887                | 2.320              | 3.207   |
|                    | Stahlrohr  | 5                  | 250              | 8.867              | 6.960              | 16.082  |
| Frei-<br>leitungen | Aluminium  | 4.851              | 1.680            | 3.018              | 4.285              | 13.834  |
|                    | Beton      | 45.938             | 97.781           | 8.365              | 12.180             | 164.264 |
|                    | Holz       | 0                  | 0                | 3.386              | 4.733              | 8.119   |
|                    | Kupfer     | 0                  | 0                | 17.414             | 11.101             | 28.515  |
|                    | PE         | 0                  | 0                | 1.161              | 2.220              | 3.381   |
|                    | Stahl      | 8.371              | 14.595           | 1.428              | 0                  | 24.394  |
|                    | Stahlrohr  | 0                  | 0                | 44.615             | 3.248              | 47.863  |

Quelle: eigene Berechnungen

### 3.1.6 Gasleitungsnetze

Die Gasleitungsnetze werden im Sinne dieser Untersuchung in zwei Kategorien unterteilt, zum einen das Fernleitungsnetz und zum anderen die Regional- und Ortsnetze, welche aufgrund schlechter Differenzierung über die Datenlage, aber auch sehr ähnliche Bauweisen, zusammengefasst werden. Fernleitungsnetze dienen der Überlandverteilung von Erdgas über große Strecken. Sie weisen unterschiedliche Durchmesser auf und sind über den Regeldruck von ungefähr 84 bar massiver zu konzipieren als die anderen Netze.

Die Berechnung unterscheidet weiterhin in unterschiedliche Klassen nach den Nenndurchmessern der Rohre. Nach der Bundesnetzagentur wird von einer Gesamtlänge von 37.695 km Gasfernleitungsnetz ausgegangen.<sup>31</sup> Die Aufteilung auf die Klassen der Nenndurchmesser erfolgt über eine Abschätzung

<sup>31</sup> Bundesnetzagentur (2014)

nach Steger et al.<sup>32</sup>, welche sich auf eine Auswertung von 70 % des Fernleitungsnetzes aus 2007 stützt. Das Regional- und Ortsnetz wird für die Bestandserhebung weiter unterteilt in drei Druckbereiche nach Niederdrucknetz ( $\leq 0,1$  bar) mit 154.505 km, Mitteldrucknetz ( $> 0,1 - 1$  bar) mit 223.075 km und Hochdrucknetz ( $> 1$  bar) mit 92.853 km laut Bundesnetzagentur. Weiterhin werden alle Leitungen nach eingesetztem Material unterschieden. Die Lebensdauern werden nach der AfA-Tabelle (Absetzung für Abnutzung) „Energie- und Wasserversorgung“ übertragen und betragen somit im Detail für Hochdruckrohrleitungen (Gasfernleitungsnetz) 25 Jahre, gusseiserne Leitungen 40 Jahre und Stahlleitungen 30 Jahre. Für PE-Leitungen gibt es keine Angaben in den AfA-Tabellen. PE-Rohre bieten im Vergleich zu Stahl- und Gusseisenrohren daher eine höhere Lebensdauer. Konservativ wird von einer Lebensdauer von 50 Jahren ausgegangen, obwohl diese auf 100 und mehr angegeben wird.<sup>33</sup>

<sup>32</sup> Steger et al. (2011)

<sup>33</sup> AGRU Kunststofftechnik (2013)

Tabelle 13: Materialbestand im Erdgasnetz 2012

|                                | Armierter Beton |         | Beton   |           | Bitumen |         | Gusseisen |             | PE        |           | Sand        |            | Stahl     |           | Zement     |  |
|--------------------------------|-----------------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|------------|--|
|                                | t               |         | t       |           | t       |         | t         |             | t         |           | t           |            | t         |           | t          |  |
| Gasfern-<br>leitungs-<br>netz  | A >1000 mm      | 0       | 0       | 12.173    | 0       | 24.347  | 0         | 11.937.705  | 2.748.814 |           |             |            |           |           |            |  |
|                                | B 700 - 1000 mm | 0       | 0       | 16.257    | 0       | 32.515  | 0         | 15.942.723  | 2.440.355 |           |             |            |           |           |            |  |
|                                | C 500 - 700 mm  | 0       | 0       | 16.458    | 0       | 32.092  | 0         | 18.761.706  | 1.892.628 |           |             |            |           |           |            |  |
|                                | D 350 - 500 mm  | 0       | 0       | 8.732     | 0       | 16.373  | 0         | 9.460.126   | 557.905   |           |             |            |           |           |            |  |
|                                | E 225 - 350 mm  | 0       | 0       | 9.966     | 0       | 18.399  | 0         | 11.959.304  | 438.508   |           |             |            |           |           |            |  |
|                                | F 110 - 225 mm  | 0       | 0       | 7.417     | 0       | 16.182  | 0         | 10.518.601  | 253.525   |           |             |            |           |           |            |  |
|                                | G <110 mm       | 0       | 0       | 1.074     | 0       | 1.934   | 0         | 1.675.920   | 19.080    |           |             |            |           |           |            |  |
| Regional-<br>und Orts-<br>netz | 185.706         | 446.150 | 371.412 | 892.300   | 0       | 288.176 | 489.500   | 60.874.427  | 387.200   | 698.480   | 146.247.970 | 6.054.048  | 387.200   | 5.799.950 | 2.414.178  |  |
| Niederdrucknetz                | 309.010         | 940.866 | 618.020 | 1.881.732 | 0       | 356.351 | 888.443   | 101.293.478 | 1.308.890 | 1.484.849 | 388.671.960 | 16.100.953 | 1.308.890 | 4.017.130 | 12.231.258 |  |
| Summe                          |                 |         |         |           | 72.078  |         |           |             |           |           |             |            |           |           |            |  |

Quelle: Bundesnetzagentur 2014; Steger et al. 2011; eigene Berechnungen

Tabelle 14: Jährlicher Erneuerungsbedarf im Erdgasnetz 2012

|                        | Armierter Betonstrukturführen | Betonmantelrohre | Bitumen | Gusseisen | PE     | Sand       | Stahl   | Zement   |
|------------------------|-------------------------------|------------------|---------|-----------|--------|------------|---------|----------|
|                        | t/a                           | t/a              | t/a     | t/a       | t/a    | t/a        | t/a     | t/a      |
| Gasfernleitungsnetz    | A >1000mm                     | 0                | 487     | 0         | 974    | 477.508    | 109.953 | 0        |
|                        | B 700 - 1000 mm               | 0                | 650     | 0         | 1.301  | 637.709    | 97.614  | 0        |
|                        | C 500 - 700 mm                | 0                | 658     | 0         | 1.284  | 750.468    | 75.705  | 0        |
|                        | D 350 - 500 mm                | 0                | 349     | 0         | 655    | 378.405    | 22.316  | 0        |
|                        | E 225 - 350 mm                | 0                | 399     | 0         | 736    | 478.372    | 17.540  | 0        |
|                        | F 110 - 225 mm                | 0                | 297     | 0         | 647    | 420.744    | 10.141  | 0        |
|                        | G <110 mm                     | 0                | 43      | 0         | 77     | 67.037     | 763     | 0        |
| Regional- und Ortsnetz | Hochdrucknetz                 | 6.190            | 12.380  | 0         | 9.606  | 2.029.148  | 201.802 | 80.473   |
|                        | Mitteldrucknetz               | 14.872           | 29.743  | 0         | 16.317 | 4.874.932  | 12.907  | 193.332  |
|                        | Niederdrucknetz               | 10.300           | 20.601  | 0         | 13.298 | 3.376.449  | 4.3630  | 133.904  |
| Summe                  | 31.362                        | 62.724           | 2.883   | 29.615    | 50.441 | 13.490.773 | 592.371 | 4.07.709 |

Quelle: eigene Berechnung

### 3.1.7 Wärmeleitungsnetze

Das Wärmenetz wird in Fernleitungen mit Wasser und Dampf getriebener Wärmeübertragung, Kältenetz und Nahwärmenetz untergliedert. Das Fernwärmenetz wird hierbei nach Bauarten differenziert. Die Gesamtlänge des erfassten Bestandes aus dem Jahr 2012 von 19.647 km<sup>34</sup> bezieht sich auf abgefragte Unternehmen. Da es keine bundesweit einheitliche Erfassung der Netzlängen gibt, handelt es sich hierbei nicht um das komplette Bestandsnetz, aber um die beste verfügbare Näherung. Hiervon sind 19.026 km wasserleitende Rohre und 624 km dampfleitend. Die Netzlänge wird nach einer abschätzenden Verteilung der verschiedenen Bauweisen von Steger et al.<sup>35</sup> umgelegt. Die Bestandsdaten zum Nahwärmenetz werden aufgrund des Mangels an Detailinformationen von Schätzungen aus Steger et al. übernommen (siehe Tabelle 15). Die Netzlänge wird auf 75.000 km geschätzt. Für bauliche Ausführungen, die auch bei Erdgasrohren vorkommen, werden für diese Ausführungen die gleichen Lebensdauern verwendet. Für andere Bauarten richten sich die Berechnungen nach den AfA-Tabellen für „Energie- und Wasserversorgung“. So haben kanalverlegte Rohre eine Lebensdauer von 25 Jahren und andere erdverlegte sowie Freileitungen von 20 Jahren.<sup>36</sup>

<sup>34</sup> Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK (AGFW) (2013)

<sup>35</sup> Steger et al. (2011)

<sup>36</sup> BMF (1995)

Tabelle 15: Materialbestand im Wärmenetz 2012

|                   | Beton      |  | Bifumen |  | Gusseisen |  | Mineralwolle |  | PE      |  | PUR- Hartschaum |  | Sand       |  | Stahl     |  | Zement  |  |       |
|-------------------|------------|--|---------|--|-----------|--|--------------|--|---------|--|-----------------|--|------------|--|-----------|--|---------|--|-------|
|                   | t          |  | t       |  | t         |  | t            |  | t       |  | t               |  | t          |  | t         |  | t       |  |       |
| Faserzementmantel | 0          |  | 0       |  | 0         |  | 0            |  | 0       |  | 0               |  | 0          |  | 0         |  | 7.271   |  | 8.798 |
| Frei-/Hausleitung | 0          |  | 1.167   |  | 4.278     |  | 17.889       |  | 1.945   |  | 0               |  | 0          |  | 0         |  | 63.002  |  | 0     |
| kanalverlegt      | 10.031,735 |  | 1.812   |  | 24.457    |  | 39.629       |  | 2.717   |  | 0               |  | 0          |  | 0         |  | 464.675 |  | 0     |
| Kunststoffmantel  | 0          |  | 0       |  | 16.325    |  | 0            |  | 46.007  |  | 62.332          |  | 9.379,512  |  | 0         |  | 237.456 |  | 0     |
| Stahlmantel       | 0          |  | 339     |  | 3.164     |  | 3.955        |  | 565     |  | 0               |  | 699,583    |  | 0         |  | 60.907  |  | 0     |
| Kunststoffmantel  | 0          |  | 0       |  | 0         |  | 0            |  | 150.000 |  | 200.000         |  | 0          |  | 0         |  | 650.000 |  | 0     |
| Summe             | 10.031,735 |  | 3.317   |  | 48.224    |  | 61.473       |  | 201.234 |  | 262.332         |  | 10.079,095 |  | 1.483.311 |  | 8.798   |  | 8.798 |

Quelle: Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK (2013); Steger et al. 2011; eigene Berechnungen

Tabelle 16: Erneuerungsbedarf im Wärmenetz 2012

|                   | Bitumen | Gusseisen | Mineralwolle | PE     | PUR-Hartschaum | Sand    | Stahl  | Zement |
|-------------------|---------|-----------|--------------|--------|----------------|---------|--------|--------|
|                   | t/a     | t/a       | t/a          | t/a    | t/a            | t/a     | t/a    | t/a    |
| Fernwärmenetz     | 0       | 0         | 0            | 0      | 0              | 0       | 364    | 440    |
| Frei-/Hausleitung | 0       | 58        | 894          | 97     | 0              | 0       | 3.150  | 0      |
| kanalverlegt      | 501.587 | 91        | 1.981        | 136    | 0              | 0       | 23.234 | 0      |
| Kunststoffmantel  | 0       | 0         | 0            | 2.300  | 3.117          | 468.976 | 11.873 | 0      |
| Stahlmantel       | 0       | 17        | 198          | 28     | 0              | 34.979  | 3.045  | 0      |
| Nahwärmenetz      | 0       | 0         | 0            | 7.500  | 10.000         | 0       | 32.500 | 0      |
| Summe             | 501.587 | 166       | 3.074        | 10.062 | 13.117         | 503.955 | 74.166 | 440    |

Quelle: eigene Berechnungen

### 3.1.8 Wasserversorgung

Die Wasserversorgung wird im Rahmen der Bestandserhebung und weiteren Betrachtungen strukturiert in Brunnen, Quellwasserfassungen, Talsperren und Rohrleitungen unterteilt. Laut Destatis<sup>37</sup> gibt es in Deutschland 185.358 Quellen, aus denen Trinkwasser gewonnen wird. Hier sind auch z. B. Hausbrunnen eingeschlossen, so dass die Materialbestandserhebung als überschätzt anzunehmen ist. Die spezifischen Materialkennwerte stammen aus einer Erhebung der Stadtwerke Düsseldorf und stellen somit tendenziell große Brunnen dar. Auch die Aufteilung der Wasserquellen in Brunnen und Quellwasserfassungen sowie die Differenzierung der Brunnen nach ihrer Bauart sind geprägt von Annahmen und Hochrechnungen, so dass für diesen Bereich mit starken Unsicherheiten der Bestandserhebung zu rechnen ist. Die Verteilung auf Brunnen und Quellwasserfassungen erfolgt auf Grundlage der Verteilung der Trinkwassergewinnung in Bayern jeweils zu 50 %.<sup>38</sup> Bei den Brunnen wird von einem Anteil von 2 % Horizontalbrunnen ausgegangen. Vertikalbrunnen sind die gebräuchlichere Form. Es ist davon auszugehen, dass die relevanten Materialmengen von Quellwasser über die Baumaterialien der Brunnenstuben zu erfassen sind. Zu Größe, Aufbau oder verwendetem Material pro Brunnenstube ließen sich aber keine Daten finden, so dass diese in der Bestandserhebung nicht berücksichtigt werden können.

Die Bestandsaufnahme erfasst die nach den Kriterien der ICOLD (International Commission on Large Dams) 311 „großen“ Talsperren.<sup>39</sup> Das Trinkwassernetz wird ohne Hausanschlussleitungen auf 530.000 km geschätzt.<sup>40</sup> Das Rohrnetz wird weiter unterteilt in fünf Größenkategorien nach durchschnittlicher Nennweite (DN 100, 150, 200, 400, 800). Die Aufteilung findet über ermittelte Verteilungskoeffizienten von Steger et al. (2011) statt. Die spezifischen Materialkoeffizienten werden ebenso übernommen. Die Lebensdauer der Brunnen wird über die zugehörige AfA-Tabelle mit 62,5 Jahren angesetzt. Bei Talsperren werden Lebensdauern zwischen 80 und 100 Jahren

<sup>37</sup> Statistisches Bundesamt (2004)

<sup>38</sup> Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2010)

<sup>39</sup> Deutsches TalsperrenKomitee (2001)

<sup>40</sup> Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren et al. (2011)

zugrunde gelegt, wobei die Lebensdauer durch entsprechende Sanierung stark verlängert werden kann, ohne einen Neubau zu erzwingen.<sup>41</sup> Daher wird in den Berechnungen der Studie von einer Lebensdauer von 100 Jahren ausgegangen. Zu den Lebensdauern des Trinkwassernetzes fanden sich widersprüchliche Aussagen. Steger et al. (2011) zeigen Netzerneuerungsraten zwischen 0,4 und 1,3 % über verschiedene Regionen und Zeiträume. Für die Trinkwassernetze wird eine Lebensdauer von 100 Jahren angenommen.

<sup>41</sup> DTK (2003)

Tabelle 17: Materialbestand der Trinkwasserversorgungsinfrastruktur

|              | Brunnen    |          | Rohrleitungen |            |            |            |            | Talsperren  | Summe       |
|--------------|------------|----------|---------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
|              | horizontal | vertikal | DN 100        | DN 150     | DN 200     | DN 400     | DN 800     |             |             |
| Beton        | f          | 196.535  | 0             | 0          | 0          | 0          | 0          | 9.437.917   | 9.634.452   |
| Gusseisen    | f          | 0        | 1.287.900     | 1.130.760  | 529.200    | 1.062.720  | 766.800    | 0           | 4.777.380   |
| Faserzement  | f          | 0        | 0             | 296.460    | 308.880    | 587.520    | 0          | 0           | 1.192.860   |
| Grauguss     | f          | 0        | 1.431.000     | 1.004.400  | 469.800    | 946.080    | 0          | 0           | 3.851.280   |
| Kies/Sand    | f          | 0        | 0             | 0          | 0          | 0          | 0          | 118.309.065 | 118.309.065 |
| Kupfer       | f          | 12.382   | 0             | 0          | 0          | 0          | 0          | 0           | 12.382      |
| Naturstein   | f          | 0        | 0             | 0          | 0          | 0          | 0          | 55.998.038  | 55.998.038  |
| PE           | f          | 0        | 0             | 8.586      | 5.400      | 14.040     | 25.920     | 0           | 53.946      |
| PE-HD        | f          | 0        | 58.320        | 84.240     | 29.160     | 90.720     | 0          | 0           | 262.440     |
| PVC-U        | f          | 0        | 251.640       | 179.820    | 59.400     | 187.920    | 0          | 0           | 678.780     |
| Sand         | f          | 0        | 130.680.000   | 92.340.000 | 35.478.000 | 44.452.800 | 28.022.760 | 0           | 330.973.560 |
| Spannbeton   | f          | 0        | 0             | 0          | 0          | 0          | 705.240    | 0           | 705.240     |
| Stahl        | f          | 0        | 65.394        | 239.760    | 157.680    | 436.320    | 932.040    | 0           | 1.831.194   |
| Zementmörtel | f          | 0        | 103.680       | 14.2560    | 81.000     | 185.760    | 230.040    | 0           | 743.040     |
| Zink         | f          | 0        | 3.240         | 2.106      | 1.080      | 2.160      | 1.080      | 0           | 9.666       |

Quelle: Statistisches Bundesamt 2004; DTK 2001; ATT et al. 2011; Steger et al. 2011; eigene Berechnungen

**Tabelle 18: Erneuerungsbedarf der Trinkwasserversorgungsinfrastruktur**

|              | Brunnen    |          | Rohrleitungen |           |         |         |         | Talsperren | Summe     |
|--------------|------------|----------|---------------|-----------|---------|---------|---------|------------|-----------|
|              | horizontal | vertikal | DN 100        | DN 150    | DN 200  | DN 400  | DN 800  |            |           |
|              | t/a        | t/a      | t/a           | t/a       | t/a     | t/a     | t/a     |            |           |
| Beton        | 3.145      | 0        | 0             | 0         | 0       | 0       | 0       | 104.866    | 108.010   |
| Gusseisen    | 0          | 0        | 16.099        | 14.135    | 6.615   | 13.284  | 9.585   | 0          | 59.717    |
| Faserzement  | 0          | 0        | 0             | 3.706     | 3.861   | 7.344   | 0       | 0          | 14.911    |
| Grauguss     | 0          | 0        | 17.888        | 12.555    | 5.873   | 11.826  | 0       | 0          | 48.141    |
| Kies/Sand    | 0          | 0        | 0             | 0         | 0       | 0       | 0       | 1.314,545  | 1.314,545 |
| Kupfer       | 198        | 0        | 0             | 0         | 0       | 0       | 0       | 0          | 198       |
| Naturstein   | 0          | 0        | 0             | 0         | 0       | 0       | 0       | 622.200    | 622.200   |
| PE           | 0          | 0        | 0             | 107       | 68      | 176     | 324     | 0          | 674       |
| PE-HD        | 0          | 0        | 729           | 1.053     | 365     | 1.134   | 0       | 0          | 3.281     |
| PVC-U        | 0          | 0        | 3.146         | 2.248     | 743     | 2.349   | 0       | 0          | 8.485     |
| Sand         | 0          | 0        | 1.633,500     | 1.154,250 | 443,475 | 555,660 | 350,285 | 0          | 4.137,170 |
| Spannbeton   | 0          | 0        | 0             | 0         | 0       | 0       | 8.816   | 0          | 8.816     |
| Stahl        | 0          | 1.046    | 0             | 2.997     | 1.971   | 5.454   | 11.651  | 0          | 23.119    |
| Zementmörtel | 0          | 0        | 1.296         | 1.782     | 1.013   | 2.322   | 2.876   | 0          | 9.288     |
| Zink         | 0          | 0        | 41            | 26        | 14      | 27      | 14      | 0          | 121       |

Quelle: eigene Berechnungen

### 3.1.9 Abwasserentsorgung

Bezüglich des Tiefbaus werden der Abwasserentsorgungsinfrastruktur Kanalnetze und Regenentlastungsanlagen zugerechnet. Die Kanalnetze werden dabei weiter in öffentliche und private differenziert. Das öffentliche Kanalnetz umfasst insgesamt 561.581 km und kann in der Funktionalität in Regen- (120.937 km), Schmutz- (199.631 km) und Mischwasserkanäle (241.013 km) aufgeteilt werden.<sup>42</sup> Für die privaten Netze ist die gleiche Verteilung aufgrund fehlender Datenerfassung nicht möglich. Die Länge der privaten Entwässerungsnetze schätzen Berger & Lohaus über eine Auswertung von 124 Kommunen auf das Doppelte der damaligen Netzlänge mit 900.000 km.<sup>43</sup> Die Verteilung von Größe, Querschnitt und Bauform erfolgt nach Schätzungen aus dem Forschungsprojekt MaRes im Auftrag des Bundesumweltministeriums und des Umweltbundesamtes.<sup>44</sup> Die benötigten Kanalschächte als Zugangspunkte zu den Netzen werden miterfasst. Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) hat einen Gesamtbestand in Deutschland von rund 13,5 Mio. Schächten errechnet.<sup>45</sup> Kanalschächte werden für die Bestandserhebung nach ihrer Bauart in Beton, Mauerwerk und Kunststoffschächte nach MaRes verteilt. Die 68.777 Regenentlastungsanlagen können nach Destatis weiter untergliedert werden in 23.880 Regenüberlaufbecken, 21.099 Regenüberläufe ohne Becken, 20.481 Regenrückhaltebecken und 3.317 Regenklärbecken. Im Sinne der Bestandserhebung werden diese aber nur nach Regenentlastungsanlagen mit und ohne Becken unterschieden, da keine detailliertere Erfassung der spezifischen Materialkoeffizienten möglich war. Für die Kanalnetze wird unabhängig von der Funktionalität oder Widmung durchgängig eine Lebensdauer von 100 Jahren angenommen. Für Regenentlastungsanlagen wird eine Lebensdauer von 35 Jahren zugrunde gelegt. Die Lebensdauer der Schächte im Kanalnetz wird für Mauerwerk und Beton auf 50 Jahre und für Kunststoffschächte auf 100 Jahre nach Steger et al. (2011) eingeschätzt.

<sup>42</sup> Statistisches Bundesamt (2010)

<sup>43</sup> Berger und Lohaus (2003)

<sup>44</sup> Steger et al. (2011)

<sup>45</sup> Berger und Falk (2011)

Tabelle 19: Materialbestand der Abwasserentsorgungsinfrastruktur

|                            | Kanalnetz                     |               |             |               |               | Kanalschacht       |                |               | Regenlastungsanlagen                    |               | Summe |
|----------------------------|-------------------------------|---------------|-------------|---------------|---------------|--------------------|----------------|---------------|---|---------------|-------|
|                            | Kanalnetz private Grundstücke | Mischwasser   | Regenwasser | Schmutzwasser | Beton-Schacht | Kunststoff-Schacht | Ziegel-Schacht | Regenüberlauf | Regenüberlaufbecken und Regenklärbecken |               |       |
| Beton                      | t/a                           | 0             | 0           | 0             | 4.271.902     | 10.948             | 559.169        | 4.662.879     | 4.871.188                               | 97.823.086    |       |
| Beton/Stahlbeton           | t/a                           | 187.182.000   | 50.125.884  | 25.152.477    | 4.151.255     | 0                  | 0              | 0             | 0                                       | 303.979.616   |       |
| Betonstahl                 | t/a                           | 0             | 0           | 0             | 0             | 0                  | 0              | 194.111       | 1.020.309                               | 1.214.420     |       |
| Bewehrungsstahl<br>BST 500 | t/a                           | 3.660.750     | 980.320     | 4.91.911      | 811.999       | 0                  | 0              | 0             | 0                                       | 5.944.981     |       |
| Grauguss                   | t/a                           | 0             | 0           | 0             | 0             | 0                  | 0              | 0             | 1.764                                   | 1.764         |       |
| Gusseisen                  | t/a                           | 0             | 0           | 0             | 0             | 331.668            | 136.860        | 0             | 0                                       | 469.985       |       |
| Kanalklinker               | t/a                           | 19.566.000    | 5.239.623   | 2.629.170     | 4.339.978     | 0                  | 0              | 0             | 0                                       | 31.774.771    |       |
| Klinker                    | t/a                           | 0             | 0           | 0             | 0             | 0                  | 10.682.874     | 0             | 0                                       | 10.682.874    |       |
| Kunststoff                 | t/a                           | 902.880       | 241.784     | 121.324       | 200.270       | 0                  | 0              | 0             | 0                                       | 1.466.258     |       |
| Kupfer 60:40               | t/a                           | 0             | 0           | 0             | 0             | 0                  | 0              | 0             | 3.624                                   | 3.624         |       |
| PE-HD, PUR, PVC, PP        | t/a                           | 0             | 0           | 0             | 0             | 8.159              | 0              | 0             | 0                                       | 8.159         |       |
| Sand/Kies                  | t/a                           | 1.223.298.000 | 327.589.690 | 164.379.989   | 271.342.448   | 0                  | 0              | 0             | 0                                       | 1.986.610.127 |       |
| Stahl V4A                  | t/a                           | 0             | 0           | 0             | 0             | 0                  | 0              | 0             | 4.7.678                                 | 4.7.678       |       |
| Steinzeug                  | t/a                           | 30.443.400    | 8.152.506   | 4.090.815     | 6.752.718     | 0                  | 0              | 0             | 118.241                                 | 49.557.680    |       |
| Zementmörtel               | t/a                           | 5.439.600     | 1.456.683   | 730.943       | 1.206.570     | 0                  | 2.971.810      | 0             | 0                                       | 11.805.605    |       |

Quelle: Steger et al. 2011, Destatis 2010, Berger &amp; Falk 2011, Berger &amp; Lohaus 2003

Tabelle 20: Jährlicher Erneuerungsbedarf der Abwasserentsorgung

|                            | Kanalnetz                           |                  |                  |                    |                   | Kanalschacht                |                    |                    | Regenentlastungsanlagen                           |           | Summe      |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------|------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|---|-----------|------------|
|                            | Kanalnetz<br>private<br>Grundstücke | Misch-<br>wasser | Regen-<br>wasser | Schmutz-<br>wasser | Beton-<br>Schacht | Kunst-<br>stoff-<br>Schacht | Ziegel-<br>Schacht | Regen-<br>überlauf | Regenüberlauf-<br>becken und Re-<br>genklärbecken |           |            |
| Beton                      | t/a                                 | 0                | 0                | 0                  | 0                 | 854.378                     | 219                | 11.183             | 133.225   | 1.424.891 | 2.423.897  |
| Beton/Stahlbeton           | t/a                                 | 1.871.820        | 501.259          | 251.525            | 415.193           | 0                           | 0                  | 0                  | 0   | 0         | 3.039.796  |
| Betonstahl                 | t/a                                 | 0                | 0                | 0                  | 0                 | 0                           | 0                  | 0                  | 5.546   | 29.152    | 34.698     |
| Bewehrungsstahl<br>BST 500 | t/a                                 | 36.608           | 9.803            | 4.919              | 8.120             | 0                           | 0                  | 0                  | 0   | 0         | 59.450     |
| Grauguss                   | t/a                                 | 0                | 0                | 0                  | 0                 | 0                           | 0                  | 0                  | 0   | 0         | 50         |
| Gusseisen                  | t/a                                 | 0                | 0                | 0                  | 0                 | 6.633                       | 29                 | 2.737              | 0   | 0         | 9.400      |
| Kanalklinker               | t/a                                 | 195.660          | 52.396           | 26.292             | 43.400            | 0                           | 0                  | 0                  | 0   | 0         | 317.748    |
| Klinker                    | t/a                                 | 0                | 0                | 0                  | 0                 | 0                           | 0                  | 213.657            | 0   | 0         | 213.657    |
| Kunststoff                 | t/a                                 | 9.029            | 2.418            | 1.213              | 2.003             | 0                           | 0                  | 0                  | 0   | 0         | 14.663     |
| Kupfer 60:40               | t/a                                 | 0                | 0                | 0                  | 0                 | 0                           | 0                  | 0                  | 0   | 104       | 104        |
| PE-HD, PUR, PVC, PP        | t/a                                 | 0                | 0                | 0                  | 0                 | 0                           | 163                | 0                  | 0   | 0         | 163        |
| Sand/Kies                  | t/a                                 | 12.232.980       | 3.275.897        | 1.643.800          | 2.713.424         | 0                           | 0                  | 0                  | 0   | 0         | 19.866.101 |
| Stahl V4A                  | t/a                                 | 0                | 0                | 0                  | 0                 | 0                           | 0                  | 0                  | 0   | 1.362     | 1.362      |
| Steinzeug                  | t/a                                 | 304.434          | 81.525           | 40.908             | 67.527            | 0                           | 0                  | 0                  | 0   | 3.378     | 497.773    |
| Zementmörtel               | t/a                                 | 54.396           | 14.567           | 7.309              | 12.066            | 0                           | 0                  | 59.436             | 0   | 0         | 147.774    |

Quelle: eigene Berechnungen

### 3.1.10 Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)

Der Sektor der Informations- und Kommunikationstechnik umfasst nach den Systemgrenzen der Untersuchung das Kommunikationsleitungsnetz sowie die Mobilfunkstationen des Funknetzes. Es existieren wenige Studien, die sich mit der Strukturdatenerhebung des IKT-Sektors befassen. Dementsprechend ungenau ist die Bestandsaufnahme. Die aktuellsten Daten zu Netzlängen stammen aus einem Bericht der Telekom und geben für das Jahr 2006 Längen von rund 1,48 Mio. km Kupfernetz und 206.300 km Glasfasernetz an.<sup>46</sup> Seit 2006 ist die Anzahl der DSL-Anschlüsse von 14,4 Mio. deutschlandweit auf 23,3 Mio. in 2012 angestiegen.<sup>47</sup> Es ist also davon auszugehen, dass seitdem ein starker Ausbau der IKT-Infrastrukturen stattgefunden hat. Dies impliziert unterschätzte Leitungslängen für die Bestandserhebung. In 2012 wurde die Anzahl der Mobilfunkstationen in Deutschland auf ungefähr 123.000 Stück geschätzt.<sup>48</sup> Die spezifischen Materialkoeffizienten sind von Scharp<sup>49</sup> übernommen. Lebensdauern sind auf 30 Jahre für die Leitungen und 15 Jahre für Mobilfunkstationen geschätzt.

**Tabelle 21: Materialbestand der IKT-Infrastrukturen**

|            |   | Kupferkabel | Mobilfunkstationen | Summe     |
|------------|---|-------------|--------------------|-----------|
| Aluminium  | t | 0           | 7.531              | 7.531     |
| Elektronik | t | 0           | 11.547             | 11.547    |
| Kupfer     | t | 2.627.000   | 20.709             | 2.647.709 |
| Stahl      | t | 0           | 80.076             | 80.076    |

Quelle: Deutsche Telekom 2007, Bundesnetzagentur 2013, Uzun et al. 2012, Scharp 2011

**Tabelle 22: Jährlicher Erneuerungsbedarf der IKT-Infrastrukturen**

|            |     | Kupferkabel | Mobilfunkstationen | Summe  |
|------------|-----|-------------|--------------------|--------|
| Aluminium  | t/a | 0           | 502                | 502    |
| Elektronik | t/a | 0           | 770                | 770    |
| Kupfer     | t/a | 87.567      | 1.381              | 88.947 |
| Stahl      | t/a | 0           | 5.338              | 5.338  |

Quelle: eigene Berechnungen

<sup>46</sup> Deutsche Telekom (2007)

<sup>47</sup> Bundesnetzagentur (2013)

<sup>48</sup> Uzun et al. (2012)

<sup>49</sup> Scharp (2011)

### 3.2 Gesamtergebnisse jährlicher Erneuerungsbedarf

An dieser Stelle werden die Ergebnisse aus den Teilsektoren kumuliert dargestellt.

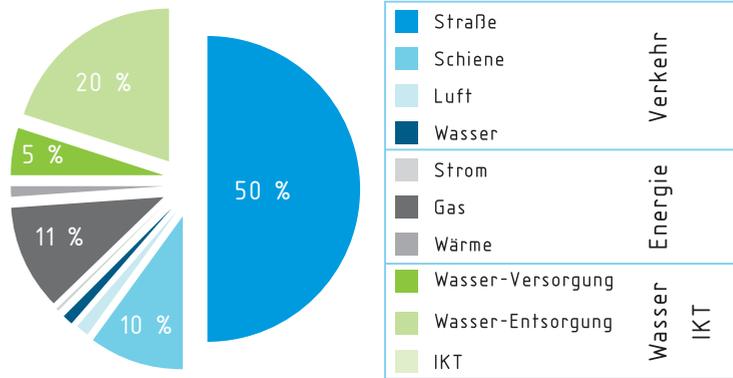


Abbildung 4: Jährlicher Erneuerungsbedarf gesamt nach Teilsektoren, eigene Darstellung

Für die jährliche Erneuerung der bestehenden Infrastruktur sind rund 135,6 Millionen Tonnen Baustoffe erforderlich. Mit einem Baustoffeinsatz von rund 50 % nimmt der Teilsektor Straße die wichtigste Stellung ein. Es folgen der Teilsektor Wasser-Entsorgung mit 20 % und die Teilsektoren Gas und Schiene mit Anteilen von 11 % und 10 %.

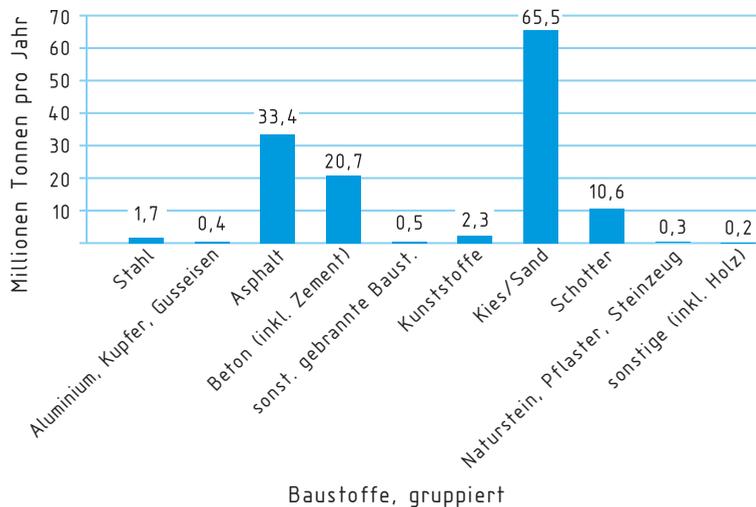


Abbildung 5: Jährlicher Erneuerungsbedarf gesamt nach Baustoffen, eigene Darstellung

Bezogen auf die eingesetzten Baustoffe, dominiert die Kategorie Kies/Sand mit rund 65 Millionen Tonnen pro Jahr. Asphalt wird mit 33,4 Millionen Tonnen und Beton mit 20,7 Mio. Tonnen eingesetzt.

### 3.3 Vergleich des Bottom-up- mit dem Top-down-Ansatz

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse basieren auf einem Bottom-up-Ansatz. Pro Teilsektor wurden Festlegungen zu dem Infrastruktur-Bestand und damit dem Mengengerüst getroffen. Der jährliche Erneuerungsbedarf stellt eine Rechengröße dar, die den jährlichen Materialbedarf zur Instandhaltung der bestehenden Infrastruktur über die Lebensdauer beschreibt. Die getroffenen Annahmen zu Mengengerüst und Lebensdauer ergeben relevante Stellgrößen im Modell. Das Mengengerüst versucht anhand von Vorgaben in Baustandards, die bauliche Realität des Bestands möglichst präzise abzubilden. Aus den Ausführungen zu den Berechnungsgrundsätzen der Teilsektoren wird deutlich, dass einige Baumaßnahmen (z. B. Lärmschutzwälle) nicht über den Bottom-up-Ansatz berechnet werden können (vgl. Kapitel 2.1).

Zur Einordnung der Bottom-up-Ergebnisse wird eine Top-down-Betrachtung jährlich nachgefragter Baustoffe anhand von Literaturangaben<sup>50</sup> durchgeführt. Dabei wird insbesondere auf die relevantesten Baustoffe, ungebundenes Material (Kies/Sand, Schotter etc.), Asphalt und Beton, fokussiert.

Wichtigste Datenquelle für den Top-down-Ansatz ist eine Studie des Dachverbands der Baustoff-, Steine- und Erden-Industrie.<sup>51</sup> Im ersten Schritt wurden alle direkt dem Tiefbau zugeordneten Baustoffmengen erfasst. Dies betrifft insbesondere die ungebundenen Materialien Kies/Sand, Naturstein etc. Die Menge ungebundener Materialien wurde um die Angabe zu eingesetzten Recyclingbaustoffen im Straßenbau (RC-Baustoffe) ergänzt<sup>52</sup>. Vereinfachend wurde angenommen, dass alle produzierten RC-Baustoffe im Tiefbau als Gesteinskörnung in ungebundenen Schichten eingesetzt werden. Weiterhin wurden die Massen

<sup>50</sup> Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden (2013); Verein Deutscher Zementwerke (2014b); European Asphalt Pavement Association (2013); Kreislaufwirtschaft Bau (2013)

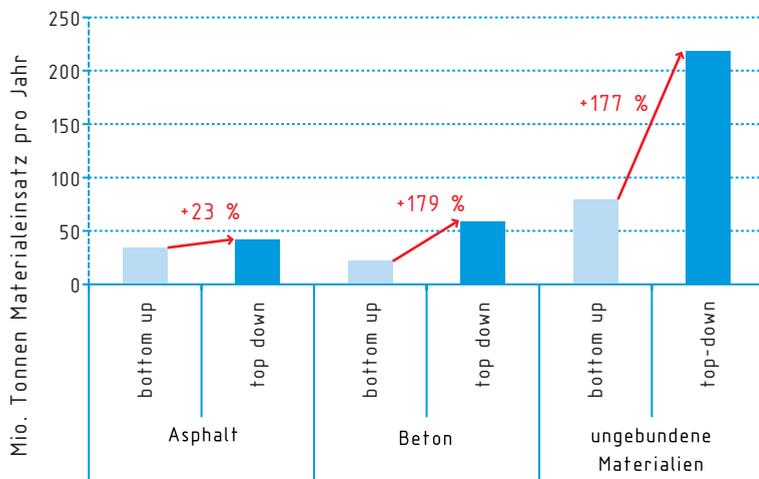
<sup>51</sup> Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden (2013)

<sup>52</sup> Kreislaufwirtschaft Bau (2013)

erfasst, die als Gesteinskörnung in der Betonproduktion eingesetzt wurden. Ergänzt um die Information, welche Mengen an Bindemittel (Zement) verwendet wurden<sup>53</sup>, ergibt sich die Gesamtmenge produzierten Betons. Dieselbe Quelle gibt an, in welchem Verhältnis das produzierte Bindemittel Zement in den Bereichen Hoch- und Tiefbau eingesetzt wurde. Dieses Verhältnis (rund zwei zu eins) wird auch für den gesamten Beton herangezogen. Damit ergibt sich eine Gesamtmenge Beton im Tiefbau. Für Asphalt wurde auf eine Quelle des europäischen Asphaltverbands zurückgegriffen, die die Asphaltherstellung in Deutschland darstellt.<sup>54</sup>

Über den beschriebenen Top-down-Ansatz lassen sich jährlich eingesetzte Baustoffmengen darstellen. Es konnte dabei nicht geprüft werden, wie der Sektor Tiefbau in den zitierten Quellen abgegrenzt ist und ob diese Abgrenzung mit der in der Studie vorgenommenen Systemgrenze übereinstimmt.

Eine grundsätzliche Einschränkung in der Interpretation der Top-down-Betrachtung ergibt sich dadurch, dass im Gegensatz zum Bottom-up-Ansatz auch Materialbedarfe für Neu- und Ausbaumaßnahmen Berücksichtigung finden.



**Abbildung 6: Vergleich der berechneten Ergebnisse (bottom up) zu statistischen Angaben (top down) für die relevantesten Baustoffe im Tiefbau, eigene Darstellung**

<sup>53</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2014b)

<sup>54</sup> European Asphalt Pavement Association (2013)

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis des Bottom-up- und Top-down-Ansatzes. Für den Baustoff Asphalt ergibt sich eine Differenz von 23 %, d. h., die über den Bottom-up-Ansatz ermittelten jährlichen Materialmengen des Erneuerungsbedarfs weisen eine ähnliche Größenordnung auf wie die Gesamtnachfrage aus Erneuerung, Aus- und Neubau (top down). In Kapitel 4.3 wird der Aus- und Neubau für die Teil-Sektoren Straße und Schiene ermittelt. Es zeigt sich, dass die um diese Angaben erweiterten Materialmengen noch besser zu den Materialmengen des Top-down-Ansatzes passen.

Für die Baustoffe Beton und ungebundene Materialien liegen die Ergebnisse aus dem Bottom-up- und Top-down-Ansatz dagegen deutlich auseinander. Gründe hierfür finden sich insbesondere in dem Berechnungsansatz und den nicht berücksichtigten Bereichen des Bottom-up-Verfahrens. Dies wird am Beispiel Straßen erläutert: Straßenkörper werden idealtypisch aus Unter- und Oberbau mit unterschiedlichen Schichtstärken und -breiten beschrieben. Baumaßnahmen in Straßenrandbereichen wie Bankette, Schallschutzwälle und Verfüllungen werden nicht betrachtet. Außerdem wird der gesamte Bereich der Wirtschaftswege nicht berücksichtigt. Es ist anzunehmen, dass die dem Top-down-Ansatz zugrunde liegenden Angaben diese Bereiche berücksichtigen und hierfür signifikante Baustoffmengen verwendet werden.

Tabelle 23 zeigt eine Gegenüberstellung der im Bottom-up- und Top-down-Ansatz verwendeten Baustoff-Kategorien. Im Bottom-up-Ansatz stellt die Kategorie Kies/Sand mit einem jährlichen Erneuerungsbedarf von rund 65 Millionen Tonnen die größte Einzelkategorie dar. Im Top-down-Ansatz ist die Kategorie Naturstein mit 105 Millionen Tonnen am größten. Die Kategorie Kies/Sand ergibt dagegen einen ähnlichen Wert wie im Bottom-up-Ansatz. Auffällig ist der Einsatz von 35 Millionen Tonnen RC-Baustoffen, der drittgrößten Kategorie des Top-down-Ansatzes. Alleine die Baustoff-Menge dieser Kategorie entspricht fast 50 % des über den Bottom-up-Ansatz ermittelten gesamten jährlichen Erneuerungsbedarfs!

**Tabelle 23: Vergleich der im Bottom-up- und Top-down-Ansatz berücksichtigten Baustoff-Kategorien und resultierenden Mengen**

| Ungebundene Materialien         |          |                         |          |
|---------------------------------|----------|-------------------------|----------|
| Bottom-up-Ansatz                |          | Top-down-Ansatz         |          |
| Baustoff Kategorie              | Mio. t/a | Baustoff Kategorie      | Mio. t/a |
| Kies/Sand                       | 65,5     | Naturstein              | 105,4    |
| Schotter                        | 10,6     | Kies/Sand               | 69,2     |
| Naturstein, Pflaster, Steinzeug | 2,3      | RC-Baustoffe            | 35,1     |
|                                 |          | Stahlwerk-Schlacken     | 4,0      |
|                                 |          | Müllverbrennungsgaschen | 2,5      |
|                                 |          | Hochofen-Schlacken      | 1,3      |
|                                 |          | Steinkohleflugaschen    | 0,1      |
|                                 |          | Naturwerkstein          | 0,1      |
| Summe                           | 78       | Summe                   | 218      |

Insgesamt zeigt der Vergleich zwischen bottom up und top down deutlich die methodischen Unterschiede der Bilanzierung. Während der Baustoff Asphalt hinreichend gut abgebildet werden kann, ergeben sich deutliche Unterschiede bei Beton und ungebundenen Materialien. Hieraus leitet sich ein zukünftiger Forschungsbedarf ab, um z. B. die genaue Verwendung von RC-Baustoffen im Tiefbau näher zu erläutern.

### 3.4 Ergebnisse Umweltwirkung

Im Folgenden wird die Umweltwirkung durch den ermittelten jährlichen Erneuerungsbedarf erläutert. Für die Darstellung der Ergebnisse werden die in Kapitel 2.3 beschriebenen und ausgewählten Wirkungsindikatoren THG, KRA und KEA für die verschiedenen Teilsektoren betrachtet.

Für die Berechnung der Wirkungsindikatoren werden die in Kapitel 3.1 erhobenen Materialmengen des jährlichen Erneuerungsbedarfes mit den materialspezifischen Charakterisierungsfaktoren (siehe Anhang) multipliziert. Somit ergibt sich für jeden Materialstrom ein Ergebnis für den jeweiligen Wirkungsindikator. Die Ergebnisse der Materialströme werden dann für jeden Bereich aufsummiert

und bilden die bereichsspezifischen Ergebnisse aus Tabelle 24. Bei der Zuordnung der Charakterisierungsfaktoren musste teilweise eine Clusterung ähnlicher Materialien stattfinden. Zum Beispiel sind die verschiedenen Arten von Polyethylen HDPE und LDPE nicht differenziert und werden als PE charakterisiert.

In der nachfolgenden Tabelle 24 und Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Bilanzierung aufgeführt. Die Teilsektoren Straßen, Gasnetze, Abwassernetze und Gleise haben die höchsten Treibhausgas-Emissionen. Für den KRA werden in den Teilsektoren Straßen, Abwasserkanalnetz, Gleise und Gasnetz die höchsten Aufwände verbucht. Der KEA weist für die Straßen, Wasserstraßen und Gleise die höchsten Beträge auf.

Neben den Teilsektoren werden auch die Ergebnisse für die einzelnen Bereiche wiedergegeben. Für Straßen zeigt sich die Dominanz des Straßenbaus. Die Bereiche Ingenieurbauwerke und begleitende Infrastruktur weisen ebenfalls hohe Beträge auf, die jedoch gegenüber dem Straßenbau von untergeordneter Bedeutung sind. Dies spiegelt sich neben dem Straßenbau auch in den Ergebnissen der anderen Teilsektoren wider.

**Tabelle 24: Ergebnisdarstellung aus dem jährlichen Erneuerungsbedarf für die Materialmengen und Wirkungsindikatoren nach Teilsektor und Bereich**

| Teilsektor | Bereich                  | $\Sigma$ Material<br>t/a | $\Sigma$ THG<br>t CO <sub>2</sub> e/a | $\Sigma$ KRA<br>t KRA/a | $\Sigma$ KEA<br>GJ KEA/a |
|------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Straße     | Straßen                  | 66.791.668               | 7.519.372                             | 71.520.719              | 217.002.735              |
|            | Ingenieurbauwerke        | 1.480.372                | 601.075                               | 4.004.136               | 7.677.018                |
|            | begl. Infrastruktur      | 139.423                  | 248.174                               | 1.387.940               | 3.694.131                |
| Schiene    | Gleise                   | 11.981.750               | 797.315                               | 15.827.214              | 13.020.008               |
|            | Ingenieurbauwerke        | 1.851.556                | 335.649                               | 2.299.059               | 2.935.007                |
|            | Energieversorgung        | 97.478                   | 96.966                                | 659.602                 | 1.254.144                |
| Wasser     | Bauwerke                 | 867.712                  | 234.638                               | 1.281.546               | 2.472.275                |
|            | Wasserstraßen            | 891.710                  | 555.156                               | 1.662.038               | 16.976.364               |
| Luft       | SLB                      | 554.455                  | 54.089                                | 581.386                 | 1.007.435                |
|            | Vorfelder und Rollbahnen | 1.705.923                | 133.345                               | 1.769.592               | 1.342.628                |
| Strom      | Erdkabel                 | 290.369                  | 339.281                               | 3.634.407               | 4.828.305                |
|            | Freileitungen            | 184.095                  | 673.556                               | 7.101.703               | 10.274.295               |
| Gas        | Gasfernleitungsnetz      | 3.552.833                | 589.120                               | 6.705.460               | 9.126.724                |
|            | Regional- und Ortsnetz   | 11.115.044               | 907.141                               | 14.194.316              | 11.500.758               |
| Wärme      | Fernwärmenetz            | 1.058.976                | 144.953                               | 1.482.108               | 1.888.102                |
|            | Nahwärmenetz             | 50.000                   | 91.263                                | 356.686                 | 1.987.776                |
| Wasser     | Brunnen                  | 4.389                    | 2.628                                 | 31.930                  | 36.754                   |
|            | Rohrleitungen            | 4.303.859                | 242.545                               | 5.028.955               | 3.769.856                |
|            | Talsperren               | 2.050.427                | 120.702                               | 2.380.290               | 3.268.354                |
| Abwasser   | Kanalnetz                | 23.880.490               | 762.869                               | 25.673.943              | 10.582.392               |
|            | Kanalschacht             | 1.148.437                | 148.578                               | 1.301.067               | 1.765.314                |
|            | Regenentlastungsanlagen  | 1.597.708                | 225.452                               | 1.785.910               | 1.617.433                |
| IKT        | Kupferkabel              | 87.567                   | 220.793                               | 8.045.336               | 3.698.706                |
|            | Mobilfunkstationen       | 7.991                    | 34.091                                | 268.074                 | 527.669                  |
|            | Summe                    | 135.694.234              | 15.078.753                            | 178.983.415             | 332.254.184              |

In der folgenden Abbildung ist die prozentuale Aufteilung der einzelnen Wirkungskategorien dargestellt. Augenfällig ist die Dominanz der Verkehrsinfrastruktur (dunkelblau).

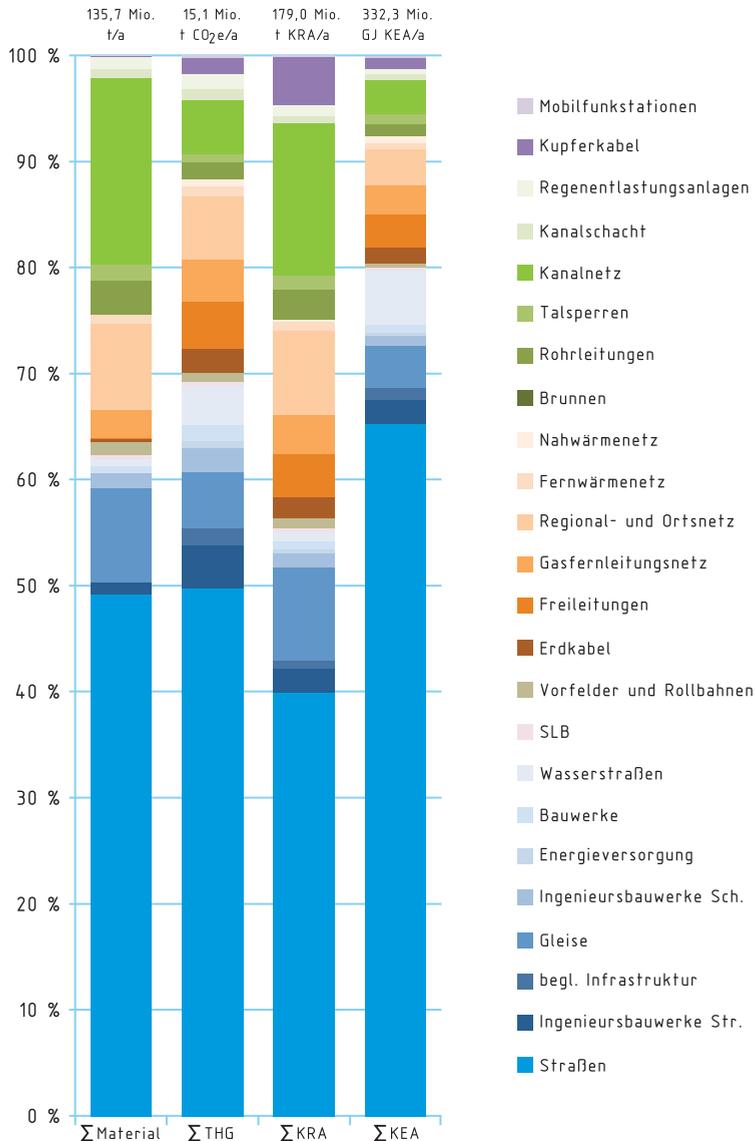
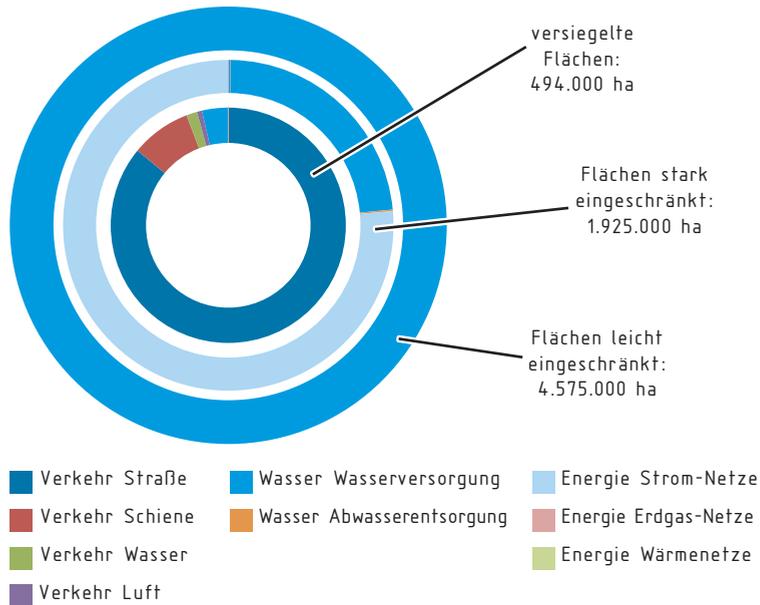


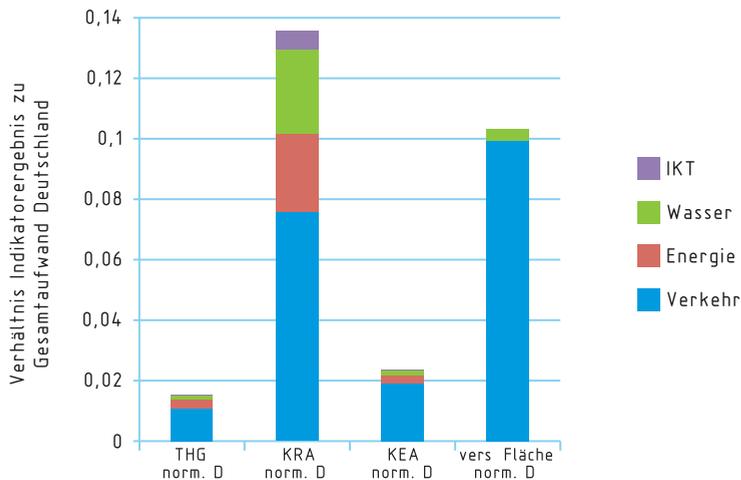
Abbildung 7: Prozentuale Verteilung der Bereiche nach Materialmengen und Wirkungsindikatoren, eigene Darstellung



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung der Flächeninanspruchnahme nach den drei verschiedenen Klassen: versiegelt, stark eingeschränkt, leicht eingeschränkt. Die Fläche der Ringe ist nicht proportional zu der angegebenen Flächeninanspruchnahme, eigene Darstellung

Die obige Abbildung zeigt die Zuweisung nach den verschiedenen Flächennutzungsklassen für die Teilsektoren. Die Zuweisung ist exklusiv, d. h., es tauchen keine Flächen in mehreren Nutzungsklassen auf. Die versiegelte Fläche wird durch den inneren Kreis dargestellt. Der innere Kreis wird durch den Teilsektor Straße, gefolgt von der Schiene, klar dominiert. Die anderen Teilsektoren spielen für die versiegelte Fläche nur eine untergeordnete Rolle.

Die Flächeninanspruchnahme für Flächen mit stark eingeschränkter Nutzung wird nahezu ausschließlich den Stromnetzen und der Wasserversorgung zugeordnet. Flächen mit leicht eingeschränkter Nutzung werden nur für die Wasserversorgung ausgewiesen. Diese beiden Nutzungstypen werden in der weiteren Diskussion nicht betrachtet.



**Abbildung 9: Normierung der Wirkungsindikatorergebnisse des Tiefbaus auf Deutschland, eigene Darstellung**

Bei der Normierung der Ergebnisse der Teilsektoren bezogen auf Deutschland (vgl. Abbildung 9) zeigt sich der hohe Einfluss des Bilanzergebnisses auf die insgesamt versiegelte Fläche mit einem Anteil von mehr als 10 %. Ein ebenfalls hoher Einfluss ist für den KRA zu beobachten. Dagegen bleibt der Anteil aller Teilsektoren auf den THG und den KEA mit durchschnittlich 2 % von untergeordneter Bedeutung.

In der politischen als auch der gesellschaftlichen Diskussion wird den THG und damit indirekt verbunden dem KEA allerdings eine weit höhere Bedeutung zugemessen als dem KRA.

In dieser Studie liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung technischer Minderungsstrategien. Die Treiber der Entwicklung, wie der Neubau von Straßen oder anderer Infrastrukturen, werden dabei nicht hinterfragt. Da sich diese Treiber direkt in der Flächeninanspruchnahme niederschlagen und sich eine technische Minderung für Fläche somit nicht realisieren lässt, entfällt diese Wirkungskategorie als Kriterium für die Auswahl eines vertieft zu betrachteten Teilsektors.

Tabelle 25 zeigt die Anteile der Teilsektoren an der Gesamtsumme für die drei Wirkungskategorien THG, KRA und KEA. In der Tabelle werden nur die Gesamtergebnisse der Teilsektoren aufgeführt, um deren jeweiligen Unterschiede näher zu beleuchten und die Diskussion zu fokussieren.

**Tabelle 25: Prozentuale Anteile der Teilsektoren am Gesamtergebnis für THG, KRA und KEA sowie die Summe ihrer Anteile**

| Teilsektor    | $\Sigma$ THG (%) | $\Sigma$ KRA (%) | $\Sigma$ KEA (%) | Summe der Anteile |
|---------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Straße        | 55               | 43               | 69               | 167               |
| Schiene       | 8                | 10               | 5                | 24                |
| Wasserstraßen | 5                | 2                | 6                | 13                |
| Luftverkehr   | 1                | 1                | 1                | 3                 |
| Strom         | 7                | 6                | 5                | 17                |
| Gas           | 10               | 12               | 6                | 28                |
| Wärme         | 2                | 1                | 1                | 4                 |
| Wasser        | 2                | 4                | 2                | 9                 |
| Abwasser      | 8                | 16               | 4                | 28                |
| IKT           | 2                | 5                | 1                | 8                 |
| Summe         | 100              | 100              | 100              | 300               |

Durch den Vergleich entlang den Spalten, also den Wirkungskategorien, kann die Relevanz der Teilsektoren einfach identifiziert werden. Ein Vergleich der Anteile in den Spalten zeigt, welche Wirkungskategorien für den betrachteten Teilsektor von besonderer Bedeutung sind. So beträgt der Anteil des Teilsektors Straße an dem Treibhausgaspotenzial 55 %, am KRA 43 % und am KEA 69 %. Die Verteilung zwischen den Wirkungskategorien deutet darauf hin, dass in der Straße, relativ zu den anderen Teilsektoren, ein hoher Anteil an Energie oder aus Energierohstoffen hergestellten Produkten eingesetzt wird (KEA). Auf den hohen Energieeinsatz weist ebenso der hohe Anteil am THG hin. Deutlich unterdurchschnittlich fällt hingegen der Anteil am KRA aus. Der überproportionale Anteil an KEA und THG und der unterproportionale Anteil an KRA können als Indiz gewertet werden, dass im Straßenbau, relativ zu den anderen Teilsektoren, Baumaterialien mit erhöhtem Energieeinsatz und Treibhausgas-Emissionen eingesetzt werden.

Ein gegensätzliches Indiz kann im Teilsektor Schiene beobachtet werden. Der KRA ist mit 10 % deutlich höher als das THG mit 8 % und der KEA mit 5 %. Ebenso weist der KRA eine deutlich höhere absolute wie relative Relevanz in den Teilsektoren Abwasser und Gas aus.

Ein einfacher Ansatz, um aus den Teilsektoren den Teilsektor mit hoher relativer Relevanz zu ermitteln, besteht in der Addition der Anteile für die drei Wirkungskategorien. Aus der Tabelle 25 ist ersichtlich, dass der Teilsektor Straße in allen drei Wirkungskategorien die höchste Relevanz aufweist. Der Teilsektor Abwasser zeigt mit 28 %, der Teilsektor Gas mit 28 % und der Teilsektor Schiene mit 24 % den höchsten kumulierten Anteil.

Die Teilsektoren Strom und IKT, deren Ausbau zurzeit in der Politik diskutiert wird, machen entsprechend unserer Bilanz nur einen geringen Anteil sowohl an den Wirkungskategorien THG und KEA als auch am KRA aus. Selbst bei einer Verdoppelung der bisherigen Infrastruktur bleibt ihre jeweilige Relevanz deutlich gegenüber dem Teilsektor Straße zurück.

Für den Teilsektor IKT muss eingewendet werden, dass dessen Erfassung im Rahmen unserer Untersuchung unterschätzt wird. Während die Einsatzmengen in anderen Teilsektoren gut dokumentiert werden und die Baustoffe hinsichtlich ihrer Auswirkung hinlänglich gut beschrieben sind, sind für den Teilsektor IKT nur einfache Mengengerüste verfügbar. Der Einfluss von z. B. Elektronik auf das Ergebnis wird nur rudimentär abgebildet. Eine weitere detailliertere Erfassung der IKT ist allerdings aufgrund der fehlenden Grunddaten sowie der fehlenden Beschreibung zur Umweltwirkung der Bauteile im Rahmen dieses Projektes nicht leistbar. Auch eine vertiefte Betrachtung dieses Teilsektors würde an diesem Sachverhalt nichts ändern.

Die Gasinfrastruktur stellt insgesamt den zweitwichtigsten Teilsektor dar. In der Detailanalyse zeigt sich jedoch, dass die Umweltwirkungen hauptsächlich auf dem Einsatz von Sand und Stahl basieren. Zudem ist das technische Änderungspotenzial beschränkt. Daher wird dieser Sektor nicht zur Vertiefung herangezogen.

Für die vertiefte Betrachtung wird stattdessen die Verkehrsinfrastruktur, Straße und Schiene, ausgewählt. Zusammen weisen sie einen relativen Anteil von 64 % der THG-Emissionen, 53 % des kumulierten Rohstoffaufwandes und 74 % des kumulierten Energieaufwandes, jeweils in Relation zum Gesamtsektor, auf. Damit werden zwei Teilsektoren ausgewählt, die den Sektor Tiefbau in allen drei Wirkungskategorien bestimmen.

#### 4 VERTIEFUNG STRASSEN- UND SCHIENENINFRASTRUKTUR

Im Rahmen dieses Kapitels wird eine Vertiefung der ausgewählten Teilsektoren Straße und Schiene vorgenommen. Dazu werden zunächst allgemeine Trends und Rahmenbedingungen vorgestellt, die die Teilsektoren betreffen und denen ein Einfluss auf den Ressourcenverbrauch unterstellt wird (Kapitel 4.1). Im Kapitel 4.2 werden die heutige Situation bezüglich der Verwendung von Recyclingmaterial sowie absehbare technische Entwicklungen dargestellt. Der geplante absehbare Neu- und Ausbaubedarf der Infrastrukturen wird in Kapitel 4.3 erhoben. Abschließend werden alle identifizierten und für die Teilsektoren relevanten Ressourceneffizienzpotenziale vorgestellt (Kapitel 4.4 und 4.5) und bezüglich einer Implementierung in der Szenariobetrachtung von Kapitel 5 bewertet.

##### 4.1 Trends und Rahmenbedingungen

Die für eine vertiefte Betrachtung ausgewählten Bereiche Straße und Schiene unterliegen einem starken Nutzungsdruck, der auch in der Zukunft weiter zunehmen wird. Prognosen, wie die im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastrukturerstellte Verkehrsverflechtungsprognose, berechnen eine Zunahme der Verkehrsleistung in Personenkilometern (Pkm) des motorisierten Individualverkehrs (MIV) bis zum Jahr 2030 um 9,9 %. Gleichzeitig wird erwartet, dass auch die Verkehrsleistung des Öffentlichen Straßenpersonenverkehrs (ÖSPV) im selben Zeitraum um 6 % zunimmt. Die bis zum Jahr 2030 erwartete Zunahme der Verkehrsleistung im Eisenbahnverkehr liegt bei 19,2 %.<sup>55</sup>

Der hohe Nutzungsdruck bewirkt eine stärkere Belastung und damit einerseits einen höheren Instandhaltungsbedarf der bestehenden Straßen- und Schieneninfrastruktur. Gleichzeitig ergibt sich der Bedarf einer Kapazitätserweiterung (Neu- bzw. Ausbau). In Kapitel 4.3 werden die amtlichen Planungen zum Neu- und Ausbau hinsichtlich der zu erwartenden Ressourceninanspruchnahme untersucht und in das Stoffstrommodell aufgenommen.

<sup>55</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014a)

Im Rahmen dieses Kapitels werden Trends und rechtliche Rahmenbedingungen aufgezeigt, die weitgehend unabhängig vom prognostizierten Verkehrsaufkommen stattfinden, aber ebenfalls einen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch der Bereiche Straße und Schiene ausüben können.

Allen Trends und rechtlichen Rahmenbedingungen gemeinsam ist, dass die möglichen Auswirkungen an dieser Stelle beschrieben, aber nicht quantitativ in das Ressourcenmodell aufgenommen werden. In der Regel ist die Datenlage hierfür nicht ausreichend.

#### 4.1.1 Trends Verkehrsentwicklung

##### Lang-Lkw

Zur Förderung des Logistikstandorts Deutschland und zur Bewältigung der zunehmenden Gütertransporte hat das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung den „Aktionsplan Güterverkehr und Logistik veröffentlicht.<sup>56</sup> Darin vorgesehen ist ein Feldversuch mit sog. Lang-Lkws. Ein Lang-Lkw bzw. „EuroCombi“ ist ein Fahrzeug bzw. eine Fahrzeugkombination, die im Vergleich zu einem konventionellen Lkw einerseits länger ist und grundsätzlich auch ein höheres Gesamtgewicht aufweist. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigten, dass aufgrund des höheren Gesamtgewichts und der damit höheren Achslast die Straßeninfrastruktur und insbesondere Brückenbauwerke nicht für derartige Lasten ausgelegt sind. Infolgedessen wurde der Feldversuch auf die auch heute schon geltenden 40 t beziehungsweise 44 t Gesamtgewicht beschränkt. Aufgrund dieser Einschränkung bzgl. des zulässigen Gesamtgewichts konnte durch die wissenschaftliche Begleitung des Feldversuchs keine Aussage hinsichtlich eines grundsätzlich höheren Belastungsniveaus durch die beim Feldversuch am häufigsten eingesetzten Lang-Lkw-Modelle auf den Straßenoberbau festgestellt werden. Es wird aber die Frage offen gelassen, wie sich einzelne Modelle, die im Feldversuch nicht zum Einsatz kamen, sowie eine mögliche Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts auf die Belastung des Straßenkörpers auswirken.<sup>57</sup>

<sup>56</sup> Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010a)

<sup>57</sup> Bundesanstalt für Straßenwesen (BAS) (2015)

## Feste Fahrbahn

Auf Schnellfahrstrecken entstehen im Schienenverkehr ab einer Geschwindigkeit von etwa 250 Stundenkilometern physikalische Belastungen, für die ein Schottergleisbett nicht mehr ausgelegt werden kann. Der zentrale Lösungsansatz besteht in der Konstruktion eines festen Fahrbahnsegments, i. d. R. aus Beton (= „Feste Fahrbahn“ oder auch „schotterloses Gleis“). Entweder verfügt das Fahrbahnsegment über einen Sockel zur Aufnahme der Schiene oder diese wird direkt auf dem Fahrbahnsegment angebracht. Zwar sind die Fertigung und Montage fester Fahrbahnen im Vergleich zum konventionellen Schottergleisbett mit höheren Investitionen verbunden, aufgrund einer längeren Lebensdauer ergeben sich aber deutliche Kosteneinsparungen bezogen auf die gesamte Lebensdauer. Feste Fahrbahnen bilden heute den Standard-Schienenoberbau bei Neubaustrecken.<sup>58</sup>

Aus Lärmgesichtspunkten ist allerdings zu beachten, dass die Betonsegmente der festen Fahrbahn im Vergleich zum klassischen Schotterbett weniger Schall absorbieren und daher höhere Schallpegel von auf festen Fahrbahnen fahrenden Zügen resultieren (ca. +5 db(A) ggü. Schotterbettung<sup>59</sup>). Um den Schallpegel fester Fahrbahnen zu reduzieren, haben Hersteller technische Lösungen entwickelt, die eine kontinuierlich-elastische Lagerung der Gleisschienen in/auf einem Kunststoffgemisch beinhalten.

Bezogen auf die Stoffstrommodellierung der Schieneninfrastruktur muss für feste Fahrbahnen festgehalten werden, dass die Herstellung im Vergleich zum Schotteroberbau mit einem höheren Ressourcenaufwand verbunden ist (Beton gegenüber Schotter). Inwieweit sich die Ressourcenintensität aufgrund einer längeren Lebensdauer im Vergleich zum Schotteroberbau wieder angleicht, konnte im Rahmen der Studie nicht untersucht werden. Aufgrund unzureichender Datenlage hinsichtlich des Bestands und Ausbaus fester Fahrbahnen konnte diese Bauform nicht im Stoffstrommodell abgebildet werden.

<sup>58</sup> Müller (2012)

<sup>59</sup> Buchmann (2005)

#### 4.1.2 Rechtlicher Rahmen

##### **Ersatzbaustoffverordnung**

Die Bewertung der Schadlosigkeit mineralischer Ersatzbaustoffe (MEB) und damit die Verwertungsmöglichkeit in Bauwerken ist bislang nicht bundesweit einheitlich geregelt. Zur Harmonisierung der Verwertung von MEB in technischen Bauwerken ist die Einführung der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) durch das Bundesumweltministerium geplant. Die EBV ist Teil der Mantelverordnung, die eine Novellierung der Grundwasser-, Deponie- und Bodenschutzverordnung vor dem Hintergrund einer harmonisierten MEB-Verwertung beinhaltet. Seit Oktober 2012 liegt ein zweiter Arbeitsentwurf vor.<sup>60</sup> Dieser bringt grundlegende Änderungen bzgl. der Bewertung und Regelungen zur Verwertung von MEB mit sich, die auch die Verwertungspraxis von MEB in Deutschland beeinflussen wird. Eine besondere Rolle spielt hier die grundwasserfreie Sickerstrecke, die den Abstand zwischen dem unteren Einbauhorizont des mineralischen Ersatzbaustoffs und dem höchsten zu erwartenden Grundwasserstand beschreibt. Aus Gründen des vorsorgenden Grundwasserschutzes dürfen schadstoffhaltige MEB nur bei entsprechend großer Sickerstrecke eingebaut werden. Daraus ergeben sich Unterschiede zwischen Nord- und Süddeutschland, da in Norddeutschland tendenziell mit einem höheren Grundwasserstand und damit größeren Einbaubeschränkungen zu rechnen ist. Im Falle eines In-situ-Wiedereinsatzes von Baustoffen fallen diese nicht unter das Abfallregime und nicht unter die Regelung der EBV. Während Vertreter von Recycling- und Bauindustrie durch die EBV Einschränkungen in der Verwendung von MEB in weiten Teilen Deutschlands befürchten<sup>61</sup>, zeigen erste Studien, dass nicht für alle Bundesländer mit Einschränkungen hinsichtlich einzelner Sekundärrohstoffe zu rechnen ist.<sup>62</sup>

Zum aktuellen Zeitpunkt ist nicht absehbar, ob und in welcher Form es zu einer Neuregelung im Umgang mit mineralischen Ersatzbaustoffen kommt. Aufgrund der großen Mengen von Sekundärrohstoffen, die aktuell insbesondere im Straßen- und

<sup>60</sup> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2012b)

<sup>61</sup> Wollenweber (2013)

<sup>62</sup> Dehoust et al. (2014)

Wegebau eingesetzt werden (siehe Kapitel 3.2), ist die Entwicklung in diesem Bereich von hoher Relevanz.

### **Novellierung Gewerbeabfallverordnung**

Im Juni 2014 kündigte das Bundesumweltministerium eine Novellierung der Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV – an.<sup>63</sup> Die Novellierung wird erforderlich, um die europaweit geltende fünfstufige Abfallhierarchie auch im Bereich des Gewerbeabfalls anzuwenden. Teile der Novellierung sollen sich auf gewerbliche Bau- und Abbruchabfälle und damit potenzielle Sekundärrohstoffe für den Straßen- und Wegebau beziehen. Durch die Planungen würden eine Schadstoffentfrachtung vor dem Abbruch, selektive Rückbauverfahren und Getrennthaltung von Bau- und Abbruchabfällen stärker betont. In der Folge wäre eine Steigerung hinsichtlich Anzahl und Qualität der zur Verfügung stehenden Recyclingbaustoffe zu erwarten.

Die vorhandene Datenlage bezüglich des Anteils an Bau- und Abbruchabfällen innerhalb der Gesamtmenge der Gewerbeabfälle ist allerdings ungenügend, so dass eine Abschätzung des Effekts einer Novellierung der GewAbfV auf die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen für den Tiefbau an dieser Stelle nicht erfolgen kann.

### **Neuausrichtung europäischer Abfallgesetzgebung**

Im Sommer 2014 legte die EU-Kommission mit dem so genannten Kreislaufwirtschaftspaket Zielvorschläge für Recycling, Abfallvermeidung und Ressourceneffizienz sowie für Deponierungsverbote vor. Im Mittelpunkt des Pakets stand die Anhebung der Recyclingquoten für kommunale Abfälle. Dennoch benannte der Vorschlag auch weitere zu regelnde Bereiche, die Einfluss auf die Ressourceneffizienz im Tiefbau nehmen könnten. Insbesondere Verfüllungen sollten demnach nicht mehr als Verwertung zählen. Davon ausgenommen waren aber im ursprünglichen Entwurf Bau- und Abbruchabfälle.

Im Januar 2015 zog die EU-Kommission den eigenen Vorschlag

<sup>63</sup> RecyclingNews (2014)

überraschend zugunsten eines ambitionierteren Vorschlags zurück. Der neue Entwurf soll im Laufe des Jahres 2015 vorliegen. Es bleibt damit abzuwarten, ob die Novellierung der europäischen Abfallgesetzgebung Einfluss auf die Ressourceneffizienz im Tiefbau ausüben wird.

### **Schutz vor Verkehrslärm**

Mit Inkrafttreten des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) am 1. April 1974 wurde eine Regelung geschaffen, durch die u. a. definiert wird, welche verkehrslärmbedingten Emissionen als unzulässig angesehen werden. In der Folge wurden Verordnungen erlassen, die den Schutz der Bevölkerung vor Verkehrslärm durch Maßnahmen des aktiven und passiven Schallschutzes regeln. Aktive Schallschutzmaßnahmen beinhalten die Errichtung von Lärmschutzwänden oder -wällen, Einschnitts- und Troglagen, Teil- und Vollabdeckungen sowie Einhausungen. Hergestellt werden können Schallschutzwände aus einer Vielzahl von Materialien wie z. B. Beton, Metall, Glas, Kunststoff oder als Gabionen (mit Steinen gefüllter Drahtkorb). Lärmschutzwälle werden durch das Aufschütten von Erdreich errichtet. Eine weitere Maßnahme des aktiven Schallschutzes besteht in der Verwendung offenporigen Asphalt, der aufgrund höherer Hohlraumgehalte eine lärmabsorbierende Wirkung aufweist. Die generell kürzere Lebensdauer der lärmindernden Asphaltdeckschichten führt allerdings zu erhöhtem Ressourcenverbrauch und steigenden Lebenszykluskosten.

Während das BImSchG beim Lärmschutz nur auf neue Anlagen und Vorhaben („Lärmvorsorge“) abzielt, erfolgt eine Lärmsanierung bestehender Verkehrsstrecken auf freiwilliger Basis. So existieren verschiedene Lärmsanierungsprogramme des Bundes, der Länder und Kommunen.

Entlang von Bundesfernstraßen werden pro Jahr etwa 180 km Lärmschutzeinrichtungen errichtet.<sup>64</sup> Etwa 70 % davon sind Lärmschutzwände und 30 % Lärmschutzwälle (Steilwälle und Lärmschutzfenster beruhen auf untergeordneten Maßnahmen). Bis einschließlich des Jahres 2010 waren rund 3.400 km

<sup>64</sup> Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010b)

Lärmschutzeinrichtungen entlang von Bundesfernstraßen errichtet. Dies entspricht einem Anteil von rund 6,5% des gesamten Streckennetzes der Bundesfernstraßen. Auch wenn nicht bekannt ist, über welche Gesamtlänge Lärmsanierungsmaßnahmen an Bundesfernstraßen erforderlich sind, so beabsichtigt die Bundesregierung, die Lärmsanierung an Bundesfernstraßen weiter voranzubringen und stellt dafür jährlich rund 50 Mio. Euro zur Verfügung.

Weiterhin existiert seit 1999 ein freiwilliges Lärmsanierungsprogramm für Schienenstrecken. Mit Stand 31.10.2012 wird davon ausgegangen, dass rund 3.700 km des Schienennetzes aus Lärmgesichtspunkten als sanierungsbedürftig einzustufen sind. Davon waren (zum selben Stichtag) rund 30 % lärmsaniert.<sup>65</sup>

Die Lärmschutzgesetzgebung nimmt damit direkten Einfluss auf den Materialverbrauch der betrachteten Sub-Branchen Straße und Schiene. Aufgrund mangelnder Datenlage (Lärmschutzeinrichtungen nach Straßenklasse) sind existierende und geplante Schallschutzmaßnahmen nicht Teil des in diesem Bericht vorgestellten Modells.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass der Ressourceneinsatz für Lärmschutzmaßnahmen in den Bereichen Straße und Schiene auch in Zukunft weiter anhalten wird. Eine Quantifizierung dessen ist aber im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

### **Natur- und Artenschutz**

Das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) enthält den Natur- und Artenschutz betreffende Vorgaben (z. B. FFH- und Vogelschutzrichtlinie, Natura 2000), die den Bau von Querungshilfen für Wildtiere an Straßen zur Folge haben können. Bezüglich der Frage des Ressourcenverbrauchs des Tiefbaus stellt dabei die Errichtung von Grünbrücken die vermutlich ressourcenintensivste Einzelmaßnahme dar. Grünbrücken dienen der Vernetzung von Habitaten und werden in der Regel aus Stahlbeton errichtet. Grünbrücken, die z. B. eine Bundesautobahn

<sup>65</sup> Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2013)

überspannen, können eine Fundamentlänge von 78 m und eine Scheitelbreite von 52 m erreichen.<sup>66</sup> Es liegen keine Daten zum konkreten Ressourcenverbrauch einzelner Bauwerke vor. Aufgrund geringer Belastungsanforderungen dürfte dieser im Vergleich zu z. B. Straßenbrücken deutlich geringer ausfallen. Da für die Planung und Realisierung von Wildquerungen die Landes- und Kommunalverwaltungen zuständig sind, bestehen darüber hinaus keine bundesweiten Angaben zum zukünftigen Ausbau von Wildbrücken. Die Arbeit von Hänel & Reck<sup>67</sup> stellt eine Priorisierung der zur Lebensraumvernetzung erforderlichen Maßnahmen auf nationaler Ebene dar. Dabei wird eine Vielzahl von Konfliktstellen mit hoher und mittlerer Priorität identifiziert.

Es ist also davon auszugehen, dass aus dem Bau von Querungshilfen für Wildtiere ein zusätzlicher Ressourcenverbrauch resultiert, der allerdings zum jetzigen Zeitpunkt nicht näher quantifiziert werden kann. Im Vergleich zum Ressourcenverbrauch durch Bau und Instandhaltung des gesamten Straßenkörpers dürfte dieser allerdings verhältnismäßig gering ausfallen.

## Verkehrssicherheit

Die EU-Richtlinie 2008/96/EG über ein Sicherheitsmanagement für die Straßenverkehrsinfrastruktur befasst sich mit der Verkehrspolitik in der Europäischen Union mit dem Ziel, die Unfallzahlen im Straßenverkehr zu senken. Dabei wird nicht nur auf den Neubau von Straßen abgezielt, sondern auch die Verbesserung der Verkehrssicherheit an bestehenden Straßen angestrebt.

In der Umsetzung dieser politischen Vorgabe ergeben sich unter anderem auch Forderungen nach baulichen Veränderungen der Straßeninfrastruktur, die mit einem zusätzlichen Einsatz von Baustoffen und damit Ressourcenverbräuchen verbunden sind. Solche Maßnahmen können beispielsweise die Intensivierung der Schutzplanken hin zu Beton- statt Stahlplanken, die Verbreiterung der Fahrbahnrandstreifen oder die abschnittsweise Fahrbahnerweiterung umfassen.<sup>68</sup>

<sup>66</sup> Skrabania (2009)

<sup>67</sup> Hänel, K., Reck, H. (2010)

<sup>68</sup> DEKRA (2013)

Gleichzeitig wird im Zuge der Debatte um die Steigerung der Verkehrssicherheit auch der positive Effekt von Geschwindigkeitsbegrenzungen genannt. Im Vergleich zur baulichen Erweiterung der Straßeninfrastruktur wirkt sich diese Maßnahme positiv auf den Ressourcenverbrauch aus, da die Straßenbelastung und die damit einhergehende -abnutzung bei geringeren Geschwindigkeiten abnimmt. Insgesamt kann der Ressourceneffekt im Zuge der Umsetzung der EU-Richtlinie 2008/96/EG aber im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht quantifiziert werden.

**Tabelle 26: Übersicht hinsichtlich Trends und Rahmenbedingungen mit Einfluss auf den Ressourcenverbrauch der Bereiche Straße und Schiene**

| Ebene              | Bereich         | Bezeichnung                                   | möglicher Effekt                                       |
|--------------------|-----------------|---|--|
| Trends             | Straße          | Lang-Lkw                                      | höherer Ressourcenbedarf                               |
|                    | Schiene         | Feste Fahrbahn                                | höherer Ressourcenbedarf                               |
| Rechtlicher Rahmen | Straße, Schiene | Ersatzbaustoffverordnung                      | Einschränkung/Steigerung verfügbarer Sekundärrohstoffe |
|                    |                 | Novellierung Gewerbeabfallverordnung          | Steigerung verfügbarer Sekundärrohstoffe               |
|                    | Straße, Schiene | Neuausrichtung europäische Abfallgesetzgebung | Steigerung verfügbarer Sekundärrohstoffe               |
|                    |                 | Straße, Schiene                               | Schutz vor Verkehrslärm                                |
|                    | Straße          | Natur- und Artenschutz                        | höherer Ressourcenbedarf                               |
|                    | Straße          | Verkehrssicherheit                            | höherer Ressourcenbedarf                               |

Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 26 stellt die betrachteten Trends und Rahmenbedingungen für die Teilsektoren Straße und Schiene dar. Ferner wird zusammenfassend wiedergegeben, mit welchen möglichen Effekten bezüglich des Ressourceneinsatzes in den Teilsektoren

zu rechnen ist. Da diese Effekte nicht quantifiziert werden können, finden die Trends und Rahmenbedingungen keinen Eingang in die Szenariobetrachtung in Kapitel 5.

## 4.2 Modelloptimierung hinsichtlich Recyclingmaterial

Die bisherigen Berechnungen und Ergebnisse des Stoffstrommodells spiegeln den Neuaufwand der gebauten Infrastruktur wider. Die Umweltwirkungen der im Modell abgebildeten Baustoffe sind über den Primärrohstoffbezug berechnet, da – per Definition – zur Bauzeit kein geeignetes Sekundärmaterial zur Verfügung stand.

De facto wird heute sowohl der **Erneuerungsaufwand** als auch der Sanierungsaufwand von Recyclingbaustoffen deutlich beeinflusst. Dabei werden Recyclingbaustoffe insbesondere in situ gewonnen, d. h., die Erneuerung basiert auf der Aufbereitung der ausgebauten Baustoffe, die vor Ort aufbereitet und nach Ersetzen der Verluste wieder eingebaut werden. Im Rahmen dieses Arbeitsschritts erfolgt eine Anpassung der verwendeten Modellparameter, bezogen auf aktuelle Recyclingaktivitäten.

Beim **Neubau** der zugebauten Infrastruktur werden auch nach heutigem Maßstab bevorzugt primäre Baustoffe eingesetzt, da kein Rückbau der Infrastruktur stattfindet und demnach auch kein Netto-Sekundärmaterial zur Verfügung steht. Die zur Berechnung verwendeten Baustoffmodule müssen demgemäß aufgespalten und je nach Verwendungszweck neu berechnet werden.

Der Einsatz von Recyclingmaterial findet im Wesentlichen bei den Baustoffen Asphalt und Baukies statt.

### Asphalt

Der Aufbau der Asphaltsschichten wird entsprechend nach König<sup>69</sup> bilanziert. Die Bitumengehalte der Deckschicht (DE), der Binderschicht (BI) sowie der Tragschicht sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

<sup>69</sup> König (2014)

**Tabelle 27: Asphalttypen und ihr Bitumengehalt**

| Asphalttyp           | typischer Bitumengehalt | in diesem Szenario verwendet |
|----------------------|-------------------------|------------------------------|
| Asphaltdeckschicht   | 5,0 bis 8,0 %           | 6,5 %                        |
| Asphaltbinderschicht | 4,0 bis 6,0 %           | 5,0 %                        |
| Asphalttragschicht   | 3,3 bis 3,4 %           | 3,4 %                        |

Die Asphaltwirtschaft erzeugt eine jährliche Menge von ca. 43 Mio. t Asphalt. In diesem Asphalt werden ca. 10 Mio. t Altasphalt verarbeitet.<sup>70</sup> Die Angabe zum jährlichen Asphaltverbrauch aller Wirtschaftsbereiche deckt sich in der Größenordnung gut mit dem im Stoffstrommodell berechneten Asphaltbedarf aufgrund von Erneuerungsbau und Instandhaltung (vgl. Kapitel 3.1).

Das durch den Ausbau von Altasphalt gewonnene Asphaltgranulat kann nicht für alle gebundenen Schichten des Straßenoberbaus eingesetzt werden. Insbesondere bestehen Unterschiede zwischen Guss- und Walzasphalt in der Form, dass Asphaltgranulat aus Walzasphalt nicht für die Herstellung von Gussasphalt verwendet werden kann. Ferner kann Asphaltgranulat aus Walzasphalt nicht in jede der gebundenen Schichten wieder eingebaut werden. Grundsätzlich gilt: Für Deckschichten kann nur hochwertiges Asphaltgranulat, idealerweise aus Deckschichtmaterial, verwendet werden. Die Anforderungen an das Asphaltgranulat zum Einsatz in Binder- und Tragschichten fallen entsprechend geringer aus.<sup>71</sup>

Im Rahmen dieser Arbeit wird pauschal derselbe Anteil Recyclingasphalt für alle gebundenen Schichten des Straßenoberbaus angesetzt. Gemäß den genannten Daten zum Asphaltverbrauch wird durch die Modelloptimierung des Bereichs Asphalt für Neubau, Instandhaltung sowie Sanierung im Status quo pauschal für alle gebundenen Schichten ein Anteil von 77 % Primärasphalt und 23 % Recyclingasphalt<sup>72</sup> (hergestellt aus Altasphalt) zugrunde gelegt.

Für die im Weiteren herausgearbeiteten Szenarien mit einem Betrachtungshorizont bis zum Jahr 2030 wird das Verhältnis von Primär- zu Sekundärasphalt allerdings nicht statisch festgesetzt. Vielmehr findet eine Rückkopplung insofern statt, als dass

<sup>70</sup> European Asphalt Pavement Association (2013)

<sup>71</sup> Deutscher Asphaltverband (2014)

<sup>72</sup> Deutscher Asphaltverband (2014)

der aufgrund von Erneuerungsbaumaßnahmen „freigesetzte“ Ausbauasphalt zur Verwendung als Recyclingasphalt als Inputgröße berücksichtigt wird.

Die Datensätze sind im Anhang aufgeführt.

### **Baukies/Bausand in ungebundenen Schichten**

Für den Neubau von Straßen wird der Einsatz von Primärmaterial unterstellt, da kaum existierende Straßen abgebaut werden und daher kein Recyclingmaterial aus dieser Quelle zur Verfügung steht.

Für die Erneuerung des Straßenkörpers der verschiedenen Straßen werden unterschiedliche Recyclinganteile beobachtet:

- Für Bundesautobahnen (BAB) und Fernstraßen wird eine teilweise In-situ-Aufbereitung unterstellt. Diese Form der Aufbereitung weist große Vorteile insbesondere bei der Logistik auf, es bedarf jedoch auch eines entsprechenden Platzangebots, um die notwendigen Maschinen vor Ort aufzustellen. Da die Materialien den Bauplatz nicht verlassen, werden sie nicht als Abfall erfasst. Es ist damit zu rechnen, dass bei BAB ein deutlich höheres In-situ- Recycling stattfindet als bei untergeordneten Straßen. Daher wird für BABs eine Recyclingquote von 50 % abgeschätzt.
- Für untergeordnete Straßen wird eine deutlich geringere Recyclingquote angenommen. Hier besteht nur in seltenen Fällen ein entsprechendes Platzangebot. Die ausgebauten Materialien werden zum Recycling Dritten zur Verfügung gestellt und als Recyclingmaterial unterschiedlicher Provenienz von Dritten bezogen.

Die technischen Regelwerke lassen grundsätzlich RC-Baustoffe (i. d. R. aus Bauabfällen) im Straßenneubau zu. In der Praxis bestehen aber deutliche Einschränkungen, insbesondere auf Seiten öffentlicher Auftraggeber (Befürchtungen vor Schadstoffbelastung). Bauabfälle werden daher als Sekundärbaustoff vorrangig im Erdbau verwendet (insb. Verfüllung von Aufgrabung).<sup>73</sup> Da der Erdbau nicht über das Modell abgebildet wird, können diese Stoffströme nicht dargestellt werden.

<sup>73</sup> Schmidmeyer (2014)

Schlacken aus Verbrennungsprozessen können unter bestimmten technischen Voraussetzungen ebenfalls im Straßenunterbau eingebracht werden. Wie bei RC-Baustoffen aus Bauabfällen bestehen bei öffentlichen Auftraggebern allerdings oft Vorbehalte. Zudem fallen die jährlich produzierten Tonnagen im Vergleich zu Bauabfällen gering aus.

Weiterhin ist anzunehmen, dass ältere untergeordnete Straßen in ihrem Aufbau nicht dem heutigen Standard entsprechen. Zum einen sind die Baustoffe von geringerer Qualität und zum anderen finden sich Aufbauten mit z. B. Kopfsteinpflaster.

DiefürdieSzenarienangenommenenEinsätzevonRecyclingmaterial für verschiedene Straßentypen sind in Tabelle 28 aufgeführt.

**Tabelle 28: In-situ-Recycling und Gesamtrecycling der verschiedenen Straßentypen**

| Baukies/-sand/-schotter für... | In-situ-Recycling | Gesamtrecyclingmaterial |
|--------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Bundesautobahnen               | 50 %              | 50 %                    |
| Bundesstraße                   | 20 %              | 30 %                    |
| Landesstraße                   | 10 %              | 25 %                    |
| Kreisstraße                    | 0 %               | 15 %                    |
| Gemeindestraße                 | 0 %               | 15 %                    |

Das In-situ-Recycling auf der Baustelle nimmt mit der Straßengröße ab. Für BAB wird mit einem Anteil von 50 % gerechnet. Für Straßen niedriger Ordnung wird eine geringere Quote angesetzt. Gleichzeitig wird ein Ansteigen des externen Recyclings unterstellt.

### Gleisschotter

Das Recycling von Gleisschotter findet auf zwei Weisen statt. Beim In-situ-Recycling wird Gleisschotter entnommen, mobil aufgearbeitet und direkt wieder eingebaut. Alternativ wird Gleisschotter entnommen, durch Dritte zu Recyclingbaustoffen aufgearbeitet und (an anderer Stelle) wieder ins Gleisbett eingebracht. Basierend auf unterschiedlichen Quellen wird für beide Verfahren in Summe eine Recyclingquote von 50 % angesetzt.<sup>74</sup>

<sup>74</sup> Deutsche Bahn AG (2013, 2014a, b), Reinisch (2014)

Die ausformulierten Datensätze für Baukies und Schotter sind im Anhang in Tabelle A. 2 aufgeführt.

### **Schrittweise Abschaffung der Holzschwelle**

Gleisschwellen aus Holz müssen zum Schutz vor Witterungseinflüssen imprägniert werden. Das hierfür gebräuchlichste Konservierungsmittel Kreosot besteht allerdings unter anderem aus polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), die nachweislich krebserregend sind und in der Umwelt nicht oder nur sehr schlecht abgebaut werden können (persistent).<sup>75</sup> Das Mittel ist bereits vom Endverbrauchermarkt verbannt und soll ab 2018 auch für industrielle Anwendungen verboten werden.

Aufgrund längerer Haltbarkeit (und damit Kostengründen) werden Holzschwellen bereits seit geraumer Zeit durch Betonschwellen ersetzt, so dass schon heute rund 72 % aller Gleisschwellen im Bestand aus Beton hergestellt sind.<sup>76</sup> Im Bereich von Weichen, Brückenbauwerken oder in Rangierbereichen kommen Betonschwellen allerdings nicht als Alternative für Holzschwellen in Frage. Hier müssen Eisenbahnunternehmen auf Alternativen ausweichen. Im Fokus stehen dabei Gleisschwellen aus Kunststoff. Viele Anbieter arbeiten dabei mit dem Kunststoff Polyethylen, der zu 100 % aus Recyclinggranulat besteht. Kunststoffschwellen sollen gegenüber Holzschwellen außerdem Vorteile hinsichtlich höherer Lebensdauer, Verarbeitbarkeit, Beständigkeit, Schallminderung und mechanischer Eigenschaften mit sich bringen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann kein detaillierter ökologischer Vergleich zwischen Holz-, Kunststoff- und Betonschwelle erfolgen. Auf einige Aspekte soll allerdings hingewiesen werden:

- In Bereichen, in denen als Alternative zur Holzschwelle nur Kunststoffschwellen in Frage kommen, stellt die Verwendung von Kunststoffschwellen aus Sekundärmaterial ein hochwertiges Recycling dar. Das bedeutet aber nicht automatisch, dass Kunststoff- gegenüber Betonschwellen per se ökologisch vorteilhafter sind. Ein Vergleich von Kunststoff-

<sup>75</sup> Deutscher Naturschutzring (2011)

<sup>76</sup> Ergebnis des in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Stoffstrommodells für die Schieneninfrastruktur

vs. Betonschwelle sollte nicht ausschließlich auf Produktebene erfolgen, sondern auch mögliche Wechselwirkungen im erweiterten Betrachtungsraum sowie Kaskadeneffekte beinhalten.

- Je nach ökologischem Bilanzierungsansatz kann der durch die Herstellung des Sekundärprodukts Kunststoffschwelle resultierende Umweltvorteil (Schonung fossiler Rohstoffe) dem Primär- oder Sekundärprodukt zugerechnet werden. Hier gilt es, Doppelzählungen zu vermeiden.
- Alte Holzschwellen müssen - aufgrund des Imprägnierungsmittels - entsorgt, d. h. thermisch verwertet werden. Bezogen auf eine Entsorgung in Deutschland wird bei einer Altholzverbrennung i. d. R. Strom erzeugt. Aus ökobilanzieller Sicht ergeben sich dabei Gutschriften, die der Holzschwelle anzurechnen sind. Aus Recyclinggranulat bestehende Kunststoffschwellen lassen sich am Lebensende entweder thermisch oder stofflich verwerten. Je nach Bilanzierungsansatz ergeben sich daraus Gutschriften, die der Kunststoffschwelle zuzurechnen sind.

Das Verbot von Kreosot<sup>77</sup> ab 2018 und die zu erwartenden Änderungen in Bezug auf den Einsatz von Holzschwellen werden in die Modellberechnung des zukünftigen Ressourcenbedarfs im Tiefbau aufgenommen (vgl. Kapitel 5). Für die Status-quo-Betrachtung bis zum Jahr 2030 wurde unterstellt, dass 1 % aller Holzschwellen, die gem. Modell ab 2018 erneuert werden müssen (Instandhaltungsbedarf), durch Kunststoffschwellen aus 100 % Recyclinggranulat ersetzt werden. Weitere 99 % der auszutauschenden Holzschwellen werden durch Betonschwellen substituiert.

Der Austausch der Holzschwellen durch Kunststoffschwellen erfolgt auf Basis des Volumens, wobei Holzschwellen mit einer Dichte von 690 m<sup>3</sup> durch das gleiche Volumen von Kunststoffschwellen mit einer Dichte von 950 kg/m<sup>3</sup> ersetzt werden. Es werden also 1,38 kg Kunststoff für 1 kg Holz benötigt.

Die ausgebauten Holzschwellen werden energetisch verwertet. Zusammen mit dem Teeröl ergibt sich ein kalkulatorischer

<sup>77</sup> Kreosot wird als Holzschutzmittel eingesetzt und ist seit 2003 in privater Anwendung verboten. Die Nutzung bei industriellen Verfahren, wie auch bei Holzschwellen, ist derzeit noch erlaubt. Auch die industrielle Nutzung untersteht seit 2013 jedoch einem Genehmigungsverfahren.

Heizwert von 19,6 MJ/kg, welcher bei einem Stromwirkungsgrad von 25 % eine Energiegutschrift von 4,9 MJ Strom pro kg erzielt.

Die Kunststoffschwellen werden aus nicht bewertetem Kunststoffrecyclat, also ohne Vorkette, im Spritzgussverfahren mit einem Energieaufwand von 2,7 MJ Strom pro kg<sup>78</sup> hergestellt.

Hierbei ist der Strombedarf bzw. die -erzeugung nicht mit dem Wirkungsindikator KEA zu verwechseln (siehe Kapitel 2.3). Die resultierenden Charakterisierungsfaktoren werden über Multiplikation des Strombedarfs bzw. der -erzeugung und den Charakterisierungsfaktoren für den Strommix Deutschlands (Quelle: Ecoinvent 2015) errechnet.

Die Charakterisierungsfaktoren beider Datensätze sind im Anhang in Tabelle A.4 aufgeführt.

### Auswirkungen auf die Indikatorergebnisse des Erneuerungsbedarfs

Die Auswirkungen der getroffenen Präzisierung der Charakterisierungsfaktoren zeigt Tabelle 29 am Beispiel der Treibhausgas-Emissionen. Es wird deutlich, dass die bereits heute durchgeführten Recyclingaktivitäten zu einer deutlichen Reduktion der Treibhausgas-Emissionen führen. Die Minderung (-60 %) ist vor allem im Straßenbau durch das Recycling von Asphalt und Baukies sehr ausgeprägt.

**Tabelle 29: Vergleich der THG-Emissionen mit alten und neuen Charakterisierungsfaktoren bei gleichem Materialbedarf**

|         |                     | Basis                   | Neue Charakterisierung  |
|---------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
|         |                     | † CO <sub>2</sub> -Äq/a | † CO <sub>2</sub> -Äq/a |
| Straße  | Straßen             | 7.519.372               | 3.003.653               |
|         | Ingenieurbauwerke   | 601.075                 | 601.075                 |
|         | begl. Infrastruktur | 248.174                 | 248.174                 |
| Schiene | Gleise              | 797.315                 | 671.887                 |
|         | Ingenieurbauwerke   | 335.649                 | 335.649                 |
|         | Energieversorgung   | 96.966                  | 96.966                  |

<sup>78</sup> Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2015)

Die in Tabelle 28 dargestellten Recyclingmaßnahmen für den Erneuerungsaufwand, differenziert nach Straßenkategorie, führen zu einer Reduktion des Einsatzes von Primärmaterial. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für den Erneuerungs- und Neubau der Straßen dargestellt.

**Tabelle 30: In-situ-Recycling, Recycling und Einsatz von Primärmaterialien für die Straßenerneuerung und den Neubau**

|                | Material<br>einsatz<br>gesamt | In-situ-<br>Recycling | Externes<br>Recycling<br>material | Primär-<br>material |
|----------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|
|                | 1000<br>t/a                   | 1000<br>t/a           | 1000<br>t/a                       | 1000<br>t/a         |
| BAB            | 3.549                         | 1.053                 | 0                                 | 2.496               |
| Bundesstraße   | 3.111                         | 364                   | 182                               | 2.565               |
| Landstraße     | 3.644                         | 257                   | 385                               | 3.002               |
| Kreisstraße    | 4.147                         | 0                     | 420                               | 3.728               |
| Gemeindestraße | 22.788                        | 0                     | 2.375                             | 20.413              |
| Summe          | 37.240                        | 1.674                 | 3.362                             | 32.204              |

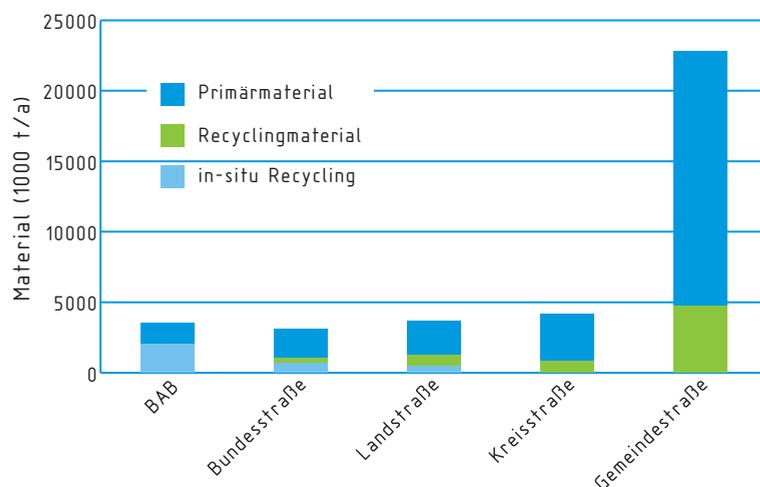
Der Materialeinsatz beträgt für den Erneuerungsaufwand 25 Mio. t/a (67 %) und für den Neubau 12 Mio. t/a (33 %), insgesamt 37 Mio. t/a. Aus der Tabelle wird deutlich, dass die Gemeindestraßen den hauptsächlichen Treiber für den Materialeinsatz darstellen. Da für die Gemeindestraßen der geringste Recyclinganteil (in situ oder extern) angenommen wird, verringert sich der Einsatz von Primärmaterialien nur geringfügig. Insgesamt reduziert sich der Einsatz von Primärmaterial lediglich um 1,6 Mio. t/a In-situ-Recyclingmaterial (4,5 %) und um 3,4 Mio. t/a externes Recyclingmaterial (9 %). Wird nur die Erneuerung betrachtet, so beträgt der Recyclinganteil 20 % oder 6,7 % für das In-situ-Recycling und 13,4 % für das externe Recycling.

Würden die Recyclingquoten für den ungebundenen Straßenunterbau aus Tabelle 28 sowohl für das In-situ-Recycling als auch das externe Recycling verdoppelt werden, so würde sich der Einsatz von Primärmaterialien von 32 Mio. t/a (Tabelle 30) auf 27,2 Mio. t/a verringern. Das mit Abstand größte Recyclingpotenzial ist in den Gemeindestraßen zu finden, das allerdings nur schwer zugänglich ist. Zum einen findet sich unter den Gemeindestraßen

ein sehr heterogener Untergrund von Sand oder Granit. Zum anderen entspricht der historische Unterbau, z. B. Kopfsteinpflaster, von Gemeindestraßen nicht mehr den heutigen Anforderungen, so dass sich insgesamt ein Recycling schwierig gestaltet.

Die Verteilung der Materialherkunft bei einer Verdopplung des Recyclinganteils ist in Abbildung 10 dargestellt.

**Abbildung 10: Verteilung von In-situ-Recycling, externem Recycling und Primärmaterial auf die Straßentypen für Erneuerungsaufwand und Neubau nach Verdoppelung der Recyclingquoten aus Tabelle 28, eigene Darstellung**



### 4.3 Detailanalyse zu Neu- und Ausbau bis 2030

Dieses Kapitel konkretisiert die angenommenen Neu- und Ausbaumaßnahmen der Straßen- und Schieneninfrastruktur bis 2030 in Kapitel 4.3.1. Darauf aufbauend können über die Informationen zu neu- und ausgebauten Netzlängen die zu erwartenden Materialströme abgeschätzt werden. Auch wird der Instandhaltungsaufwand bis 2030 abgeschätzt.

#### 4.3.1 Neu- und Ausbau der Straßen- und Schieneninfrastruktur bis 2030

Die Bauaufwendungen aus Neu- und Ausbau werden insgesamt bis 2030 erhoben. Um eine einheitliche Größe mit den

Erneuerungsaufwendungen zu erzeugen, wird der gesamte Materialbedarf von Neu- und Ausbau durch die Prognosedauer in Jahren geteilt, um den Materialbedarf von Neu- und Ausbau pro Jahr ausdrücken zu können. Die Planung der Bauprojekte im Straßen- sowie Schienennetz reicht bestenfalls bis 2020 und erfahrungsgemäß kommt es auch bei geplanten und zeitlich determinierten Projekten zu teils weitläufigen Verschiebungen. Daher wurde davon abgesehen, den Materialbedarf jahresscharf an konkreten Projekten zu orientieren. Der gewählte Ansatz zur linearen Interpolation bis zur Erreichung des Zielnetzes kann nur begrenzt belastbare Aussagen zu den Materialbedarfen zwischen Ausgangs- und Prognosejahr treffen.

#### 4.3.1.1 Straßeninfrastruktur

Die Modellierung zum Ausbau bezieht sich auf den geplanten Ausbau gemäß Bundesverkehrswegeplan (BVWP) sowie auf Annahmen zu zukünftigen Siedlungs- und Verkehrsflächen. Die amtliche Planung der Bundesfernstraßen erfolgt über den Bedarfsplan als Bestandteil des Bundesverkehrswegeplans. Weiterhin findet eine Überprüfung dieses Bedarfsplanes statt.

### **Bundesfernstraßen**

Für Bundesfernstraßen, also Bundesautobahnen und Bundesstraßen, findet die Prognose über grundlegende Angaben nach dem Bundesverkehrswegeplan 2003 statt, welche auch von der Bedarfsplanüberprüfung 2010 getragen werden. Da Planung und Umsetzung der Bauprojekte hier in starkem Verzug sind, geht zum Beispiel die aktuelle Verkehrsverflechtungsprognose 2030 für die Verkehrsmodellierung nur von einer Umsetzung aller Projekte im vordringlichen Bedarf des BVWP 2003 aus und betrachtet selbst die Umsetzung dieser Projekte bis 2030 kritisch.<sup>79</sup> Dies hängt vordergründig mit dem erkannten Investitionsrückstand in Ersatz-, Erhaltungs- und Modernisierungsmaßnahmen zusammen. Mit dem BVWP 2015 soll ein stärkerer Fokus auf das Bestandsnetz gelegt werden. Vier der sechs übergeordneten Ziele für den BVWP 2015 verfolgen als ein grundlegendes abgeleitetes Ziel die Erhaltung und

<sup>79</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014a)

Modernisierung der Substanz.<sup>80</sup> Daraus lässt sich schlussfolgern, dass einer der zwölf Kernpunkte der Grundkonzeption zum BVWP 2015 die vor Neu- und Ausbau vorrangigen Erhaltungsinvestitionen betrifft, womit bei gleichem Investitionsvolumen die Kapazitäten für Neu- und Ausbauprojekte zurückgehen. Eine bedeutende Erhöhung der zur Verfügung stehenden Mittel ist vor dem Hintergrund der Haushaltskonsolidierung nur über eine stärkere Nutzerfinanzierung zu erreichen und somit zumindest mittelfristig nicht zu erwarten.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Punkte richtet sich diese Studie für die Neu- und Ausbauprognose der Bundesfernstraßen nach dem vordringlichen Bedarf des BVWP 2003 und dem bekannten Grad der Fertigstellung der dort geplanten Projekte. Der Bedarfsplan 2004 sah den Neubau von 1.900 km sowie den Ausbau von 2.200 km Bundesautobahnen und den Neu- und Ausbau von insgesamt 5.500 km Bundesstraßen vor. Im Zeitraum von 2001 bis 2013 wurden rund 1.243 km Autobahnen neu gebaut und 1006 km ausgebaut. Des Weiteren wurden 1.873 km Bundesstraßen aus- oder neu gebaut.<sup>81</sup> Für die Bundesautobahnen wurde eine Liste der geplanten Neu- und Ausbauprojekte<sup>82</sup> mit ähnlich aktuellem Stand Q1 2014 der Straßendaten aus ATKIS ausgewertet. Über die Projektliste wurden für den Neubau an Bundesautobahnen Projekte mit einer Gesamtlänge von 969 km sowie 1.300 km für den Ausbau erfasst. Eine Unterscheidung über den Bautyp der Projekte gibt Tabelle 31.

Der angenommene Aufbau neu gebauter Strecken richtet sich nach den „Richtlinien für die Anlage von Straßen – Querschnitt“ (RAS-Q). Für den zweistreifigen Neubau wird der leistungsfähigste zweistreifige „Regelquerschnitt“ (RQ) 10,5 unterstellt. Der 4-streifige Neubau wird als RQ 29,5 angesetzt, der Standardquerschnitt für Autobahnen mit vier Streifen. Für den 6-streifigen Neubau wird konservativ der etwas mächtigere RQ 35,5 verwendet. Für sämtliche Ausbaumaßnahmen wird angenommen, dass jede Fahrbahn um einen Streifen erweitert wird. Nach den Richtlinien für die Anlage von Straßen – Querschnitt wird dabei von einer schwer belasteten Autobahn ausgegangen, wo der äußere Fahrstreifen eine Breite von 3,75 Metern aufweist. Da für die Bundesstraßen keine Projektliste der

<sup>80</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014b)

<sup>81</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014c)

<sup>82</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014d)

schon umgesetzten oder noch ausstehenden Projekte verfügbar war, wird über die bereitstehenden Informationen ein geplanter Neu- und Ausbaubedarf von insgesamt 3.623 km festgelegt. Dies spiegelt die geplanten Längen im BVWP 2003 abzüglich der seit 2001 umgesetzten Projekte wider. Grundsätzlich wird für Neu- und Ausbaumaßnahmen die Herstellung von zwei zusätzlichen Fahrbahnen mit einer Breite von je 3,5 m mit 0,25 m befestigtem Überstand angenommen. Der Sowohl der in der Regel für Bundesstraßen verwendete RQ 10,5 als auch der RQ 26 für gering belastete 4-streifige Strecken gehen von diesen Breiten der Fahrstreifen aus.

Der Schichtenaufbau wird für Bundesautobahnen als Bk100 und für die Bundesstraßen als Bk32 nach den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) 12 angenommen. Auch wenn die RStO 12 Asphaltbindeschichten nicht mehr separat ausweist, findet dennoch eine Unterscheidung dieser Schichten statt. Dimensioniert werden diese nun u. a. aus den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt“ (ZTV Asphalt-StB) bestimmt. Eine Differenzierung der Schichten ist daher von Relevanz, weil die funktionelle Unterscheidung der Schichten Unterschiede für die Körnung und vor allem den Bitumenanteil bedeutet. Diese werden nach den „Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen“ (TL Asphalt StB 07/13) festgelegt. Die Deckschichtverteilung der Neu- und Ausbaustrecken wird über die SIB-Datenauswertung von Knappe et al.<sup>83</sup> ermittelt.

Für Ingenieurbauwerke und begleitende Infrastruktur an Bundesfernstraßen werden Neubaulängen über das Verhältnis dieser zu den Straßenkategorien und den Zuwachs bis 2030 linear extrapoliert.

<sup>83</sup> Knappe et al. (laufend)

**Tabelle 31: Ermittelte Längen der geplanten Bauvorhaben ab 2014 für Bundesautobahnen nach Bedarfsplanüberprüfung 2010**

|        | Bautyp               | Länge in km |
|--------|----------------------|-------------|
| Neubau | 2. Richtungsfahrbahn | 57          |
|        | 2-streifiger Neubau  | 32          |
|        | 4-streifiger Neubau  | 849         |
|        | 6-streifiger Neubau  | 31          |
|        | Summe                | 969         |
| Ausbau | 6-streifig           | 1.207       |
|        | 8-streifig           | 90          |
|        | Summe                | 1.300       |

Quellen: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014d)

### Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen

Die geplanten Neubauaktivitäten auf Landes-, Kreis- und Gemeindeebene, analog zum Vorgehen bei den Bundesfernstraßen, über Pläne der Gebietskörperschaften zu erfassen und auszuwerten ist aufgrund der Feingliedrigkeit und fehlenden zentralen Erfassung nicht möglich. Im Rahmen der Untersuchung „Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub“ haben Knappe et al.<sup>84</sup> daher ein Landnutzungsszenario des BBSR aus dem Projekt „Climate Change – Land Use Strategies Deutschland“ (CC-LandStraD) für das Jahr 2030 ausgewertet. Die Flächennutzungsprognose beruht auf sozio-ökonomischen Prognosen aus Panta-Rhei-Regio<sup>85</sup> auf Kreisebene und bestimmt über die dort prognostizierten Rahmenbedingungen die wahrscheinliche Entwicklung der Flächennutzung ebenfalls auf Kreisebene. Über die Entwicklung der Gebäude- und Freiflächen (GFF) im Verhältnis zum Ausgangsszenario 2009 wird für jeden Kreis ein Faktor ermittelt, welcher die Entwicklung neuer GFF verhältnismäßig zum Ausgangsszenario beschreibt. Dieser wird über das Straßeninfrastrukturmodell von Knappe et al. auf Kreisebene auf die existierenden Straßeninfrastrukturen in Landes-, Kreis- und Gemeindebaulast angewendet. Somit wird den neu ausgewiesenen GFF das gleiche Maß an benötigter Straßeninfrastruktur unterstellt, wie es das existierende Netz bereits aufweist. Über diesen Ansatz

<sup>84</sup> Knappe et al. (laufend)

<sup>85</sup> Distelkamp et al. (2009)

können auch regionale Spezifika, wie besondere Topografien und ein demnach z. B. erhöhter Bedarf an Brücken oder Tunneln pro Straßenkilometer, abgebildet werden.

Eine detaillierte Beschreibung des zugrunde liegenden Straßeninfrastrukturmodells und des Prognoseansatzes wird in von Knappe et al. in der Studie von ifeu und Öko-Institut zu „Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub“ zu finden sein.

### **Ergebnis der Prognose für den Straßenbau**

Die resultierenden Längen des Ausgangsnetzes des Straßeninfrastrukturmodells sowie die prognostizierte Entwicklung der Straßenlängen bis 2030 für die verschiedenen Straßenkategorien zeigt Tabelle 32. Neben den schon ausgeführten Neubaulängen der Bundesfernstraßen ergibt die Prognose einen Neubau von rund 5.700 km Landesstraßen, 6.400 km Kreisstraßen und 32.000 km Gemeindestraßen. Diese Zahlen wirken gerade vor dem Hintergrund der offiziellen statistischen Netzentwicklung seit der letzten Dekade sehr hoch, können aber dennoch plausibilisiert werden. Zwischen 2000 und 2012 gab es über die Gesamtlänge von Bundesautobahnen, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen keinen – jedenfalls keinen statistisch gesehenen – Zuwachs. In den öffentlichen Statistiken findet ein genereller Schwund der ausgewiesenen Straßenlängen durch Umwidmung der Baulasten statt. Wird eine Bundesstraße zur Landesstraße umgewidmet, eine Landes- zur Kreisstraße und letztlich eine Kreisstraße zu einer Gemeindestraße, wird in den Statistiken ein Rückgang der Straßenlängen auffallen, da Gemeindestraßen nicht offiziell erfasst werden. Die Länge der Bundesstraßen z. B. hat in der Zeitspanne von 2000 – 2012 um 1.500 km abgenommen, obwohl ein Zubau stattfand und ein Rückbau nur in seltensten Fällen vollzogen wird und daher vernachlässigbar ist. Somit fallen Straßen aus der Statistik heraus und die tatsächlich neu gebauten Straßenlängen werden durch diesen Effekt nicht offensichtlich nachvollziehbar. Des Weiteren zeigt auch eine grobe Abschätzung über die Flächenentwicklungsprognose des BBSR einen Flächenzuwachs von rund 27.500 ha Straßen mit Neuerschließungsfunktion. Dieser

Wert errechnet sich über den Neubau von Erschließungsstraßen (ca. 5 ha/d), welcher sich aus 12 % des Zuwachses von den GFF ergibt.<sup>86</sup> Dies resultiert in rund 40.000 km Straßenlänge, wenn man eine durchschnittliche Straßenbreite von 7 m unterstellt.

Obwohl der Rückbau von Straßen derzeit eine absolut vernachlässigbare Größe darstellt, ist ein weiterer Effekt zu erwähnen, welcher Auswirkungen auf die angenommenen Materialmengen haben kann. Es ist durchaus Praxis, dass Gemeinden Straßen entwidmen, wodurch die Zuständigkeit zur Erhaltung aufgegeben wird oder in private Hand fällt. Wird eine Straße dadurch nicht mehr erhalten, entfallen auch die in dem Modell berücksichtigten Aufwendungen zur Erneuerung. Wie groß dieser Effekt ist bzw. ob relevante Auswirkungen festzustellen wären, ist nicht abschätzbar.

**Tabelle 32: Längen der Straßen nach Straßenkategorien von Ausgangs- und Zielnetz**

|                  | Ausgangsnetz in km | Zielnetz 2030 in km |
|------------------|--------------------|---------------------|
| Bundesautobahnen | 12.932             | 13.812              |
| Äste der BAB     | 5.470              | 5.559               |
| Bundesstraßen    | 41.481             | 45.104              |
| Landesstraßen    | 87.325             | 93.067              |
| Kreisstraßen     | 91.877             | 98.262              |
| Gemeindestraßen  | 450.770            | 482.925             |

Die darüber ermittelten Materialbedarfe für die Erneuerung und den Neu- sowie Ausbau lassen erkennen, dass der Großteil der Materialbedarfe über die Erneuerungsbedarfe entsteht. Für Asphalt wird ein jährlicher Erneuerungsbedarf von 33 Mio. t errechnet. Demgegenüber stehen 7,9 Mio. t Asphalt pro Jahr für den Neu- und Ausbau, wenn die benötigten Materialmengen zum Bau des Zielnetzes in 2030, wie vorhergehend beschrieben, auf Jahresscheiben linear interpoliert werden. Eine detaillierte Gegenüberstellung der pro Jahr ermittelten Materialbedarfe ist in Tabelle 33 dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass die Asphaltarbeiten auf Brücken und Tunneln der Kategorie Straße angerechnet wurden. Daher sind Asphaltmengen für die Ingenieurbauwerke mit Null versehen.

<sup>86</sup> Distelkamp et al. (2009)



Die insgesamt ermittelten Materialbedarfe erscheinen sehr plausibel. Die über das Straßenmodell berechnete jährlich eingesetzte Menge an Asphalt zum Beispiel (40,9 Mio. t) unterschätzt den vom Deutschen Asphaltverband (DAV) angegebenen jährlichen Asphalteininsatz von rund 43 Mio. t etwas, kommt dem aber verhältnismäßig nah.<sup>87</sup> Vor dem Hintergrund, dass das Straßenmodell keine alleinstehenden Parkflächen und Radwege erfasst, erscheint es plausibel, dass die errechneten Mengen leicht unter den tatsächlich verwendeten liegen sollten.

#### 4.3.1.2 Schieneninfrastruktur

Die Schienenwege des öffentlichen Verkehrs können über Zuständigkeiten nach Bundesschienenwegen und Schienenwegen nicht bundeseigener Betreiber differenziert werden. Die Planung der regionalen Angebote erfolgt durch die einzelnen Baulastträger in Abhängigkeit der von Kommunen und Ländern nachgefragten Leistung. Die Finanzierung von Neu- und Ausbau ist über das Bundesschienenwegeausbaugesetz (BSchWAG) geregelt. Hier ist auch die Planung von Ersatz-, Neu- und Ausbaumaßnahmen an Bundesschienenwegen festgelegt. Diese erfolgt in Abstimmung mit der DB AG und den Ländern über den Bedarfsplan als Teil des BVWP. Der Bedarfsplan ist daher für die Prognose der Schienenverkehrsinfrastruktur grundlegend und wird als Referenz für die Entwicklung der Bundesschienenwege genutzt. Da der Bedarfsplan als Bestandteil des neuen Bundesverkehrswegeplans 2015 noch nicht finalisiert ist, bezieht sich die Prognose auf den alten Bedarfsplan aus dem BVWP 2003 bzw. konkreter und aktueller auf die 2010 veröffentlichte Überprüfung des Bedarfsplans.<sup>88</sup> Die Überprüfung hat zur Aufgabe, alle nicht in Kürze fertiggestellten Projekte des ursprünglichen Bedarfsplans aufgrund aktueller Verkehrsverflechtungsprognosen auf ihr Nutzen-Kosten-Verhältnis zu überprüfen und ggf. anzupassen oder aus dem Bedarfsplan zu streichen.

Die Verkehrsverflechtungsprognose und somit auch das von der Bedarfsplanüberprüfung festgelegte Zielnetz haben als Bezugsjahr 2025. Dieses weicht um fünf Jahre von dem in dieser

<sup>87</sup> Deutscher Asphaltverband (2014)

<sup>88</sup> Beratergruppe Verkehr + Umwelt; Intraplan Consult (2010)

Studie betrachteten Prognosejahr 2030 ab. Trotzdem scheint es eine gute Grundlage zu bieten, um ein Zielnetz für das Jahr 2030 zu generieren. Die Verkehrsverflechtungsprognose und damit die Bedarfsplanüberprüfung setzt einen Bezugsfall für die Prognosen des aktuellen Bestands voraus, der nicht dem aktuellen Umsetzungsgrad der Projekte entspricht. Er bietet lediglich die Ausgangsbasis für die Bewertung der Maßnahmen des Bedarfsplans.

Der Bezugsfall für die Bedarfsplanüberprüfung enthält alle zum Zeitpunkt der Überprüfung (2009) bereits realisierten bzw. im Bau befindlichen sowie alle als realisiert unterstellten Maßnahmen des Bedarfsplans für die Bundesschienenwege, soweit sie bereits im Vorlauf zur Bedarfsplanüberprüfung positiv bewertet wurden und ihre Bewertung weniger als fünf Jahre zurückliegt. Somit ergibt sich per se ein baulicher und auch investiver Rückstand für die Prognosen.

Die Daten zu Neu- und Ausbauprojekten wurden aus dem Bezugsfall B0 und dem Zielnetz für 2025 aus den zugehörigen Projektbeschreibungen der Überprüfung des Bedarfsplans und aus den Projektbeschreibungen des Verkehrsinvestitionsberichtes 2012<sup>89</sup> zusammengetragen. Hierbei wurden alle Projekte mit Baubeginn ab 2009 erfasst, da die Bestandserhebung von Schmied und Mottschall<sup>90</sup> das Schienennetz mit Stand 2008 erhoben hat. Insgesamt wurde eine Neubauplanung von 883 Gleiskilometern ermittelt. Die Ausbauplanung sieht 3244 Gleiskilometer vor. Zur nachträglichen Elektrifizierung bestehender Strecken sind insgesamt 847 Streckenkilometer geplant. Eine detailliertere Übersicht, differenziert nach der Anzahl der Gleise, gibt Tabelle 34.

<sup>89</sup> Deutscher Bundestag (2014)

<sup>90</sup> Schmied und Mottschall (2010)

**Tabelle 34: Ermittelte Längen der geplanten Bauvorhaben für die Bundesschienenwege nach Bedarfsplanüberprüfung 2010**

|                  | Anzahl Gleise | Länge in km |
|------------------|---------------|-------------|
| Neubau           | 1             | 163         |
|                  | 2             | 360         |
| Ausbau           | 1             | 18          |
|                  | 2             | 805         |
|                  | 3             | 332         |
|                  | 4             | 155         |
| Elektrifizierung | 1             | 250         |
|                  | 2             | 597         |

Quellen: BPÜ-S 2010, VIB 2012

Aufgrund der unsicheren Finanzierungssituation der Schienenwege des ÖPNV werden diese als konstant im Bestand angenommen. Der Fortbestand der Regionalisierungsmittel über das RegG, welche nach aktuellem Stand mit 1,5 % dynamisiert, aber nicht grundlegend dem Bedarf<sup>91</sup> angepasst werden, sowie die Unsicherheiten um Höhe, Zweckbindung und grundlegenden Fortbestand der Mittel aus dem Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) veranlassen die Autoren zu dieser Entscheidung.

Mit der Unterzeichnung der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung II (LuFV II) von Bund und DB ist die Finanzierungsbasis für Ersatz, Erhalt und Modernisierung des Bestandsnetzes der Bundesschienenwege einschließlich Verkehrsstationen bis 2019 festgesetzt. Das verfügbare Budget wurde im Vergleich zum LuFV um 22 % erhöht. Insgesamt ist eine Erneuerung von 17.000 km Schienen, 8.700 km Weichen und 875 Brücken geplant.<sup>92</sup>

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Verschlechterung des Infrastrukturzustandes ist dies eine wünschenswerte Entwicklung, veranlasst aber nicht dazu, die bis 2030 ermittelten Erneuerungsbedarfe anzupassen. Hierfür können hauptsächlich zwei Gründe angeführt werden. Einerseits soll Konsistenz in den Berechnungsverfahren gewahrt werden.

<sup>91</sup> Daehre (2012); Intraplan Consult GmbH und VWI (2009)

<sup>92</sup> DB (2014)

Würde ein mittelfristig genauerer Plan zu Erneuerungsaktivitäten für die Schieneninfrastruktur angesetzt werden, aber nicht für die Strecken der Bundesfernstraßen oder Straßen in weitergehender Baulast bzw. dem Streckennetz der SSUs, ergibt sich ein methodischer Bruch in der Berechnung, welcher bei Vergleich und Gegenüberstellung der Sektoren zu großen Diskrepanzen führen kann.

Weiterhin basiert der gewählte Ansatz für Erneuerungszyklen auf den technischen Lebensdauern der Schieneninfrastruktur und repräsentiert damit ein statistisches Mittel der Erneuerungsraten. Wird Infrastruktur auf Verschleiß gefahren, ist auch von einem temporär erhöhten Erneuerungsbedarf auszugehen. Diese Schwankungen werden über den gewählten statistischen Ansatz nicht erfasst und führen langfristig zu einer potenziell genaueren Bedarfsprognose. Für Ingenieurbauwerke an Bundesschienenwegen werden Neubaulängen über das Verhältnis dieser zu den bestehenden Schienennetzen und den Zuwachs bis 2030 linear extrapoliert. Für Neubaustrecken wird zudem durchgehend von elektrifizierten Strecken ausgegangen.

Die ermittelten jährlichen Materialströme von Neu- und Ausbau sowie der Erneuerungsbedarf nach Materialien und Bereichen des Sektors sind in Tabelle 35 zu finden. Deutlich erkennbar ist, dass der Materialaufwand für die Erneuerung wesentlich höher liegt als der für Neu- und Ausbau.

Sowohl der Rückbau als auch die Stilllegung von Streckenabschnitten sind für den Schienenverkehr wesentlich relevanter als im Straßenbau. Da die Verwaltungsstrukturen im Schienenverkehr überschaubarer sind, können beide Effekte gut über Statistiken erfasst werden, so dass die unterhaltene Nettolänge der Strecken adäquate Berücksichtigung findet. Nicht gut abgebildet werden können zum einen über den Rückbau verfügbar werdende Materialien, welche im Neubau Verwendung finden können. Zum anderen wird es Abweichungen im gesamten gebundenen Materialbedarf geben. Für den jährlich ausgewiesenen Erneuerungs- und Neubaubedarf ist dies jedoch nicht von Relevanz.

Tabelle 35: Materialströme über Erneuerungs- und Neu- sowie Ausbaubedarf der Schienenverkehrsinfrastruktur

|                       | Erneuerung         |                               |                     |                    | Neu- und Ausbau    |                               |                     |                    |
|-----------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------|
|                       | Gleise<br>1000 t/a | Energieversorgung<br>1000 t/a | Brücken<br>1000 t/a | Tunnel<br>1000 t/a | Gleise<br>1000 t/a | Energieversorgung<br>1000 t/a | Brücken<br>1000 t/a | Tunnel<br>1000 t/a |
| Schotter              | 10.530             | 0                             | 0                   | 0                  | 723                | 0                             | 0                   | 0                  |
| Beton                 | 918                | 56                            | 355                 | 1.405              | 74                 | 14                            | 68                  | 271                |
| Stahl                 | 365                | 6                             | 14                  | 0                  | 119                | 1                             | 3                   | 0                  |
| Aluminiummix          | 0                  | 3                             | 0                   | 0                  | 0                  | 1                             | 0                   | 0                  |
| Konverterstahl        | 23                 | 30                            | 18                  | 59                 | 3                  | 7                             | 3                   | 11                 |
| Bronze                | 0                  | 1                             | 0                   | 0                  | 0                  | 0                             | 0                   | 0                  |
| Holzschwellen ersetzt | 130                | 0                             | 0                   | 0                  | 9                  | 0                             | 0                   | 0                  |
| Kupfer-Mix            | 0                  | 2                             | 0                   | 0                  | 0                  | 0                             | 0                   | 0                  |
| Keramik               | 0                  | 1                             | 0                   | 0                  | 0                  | 0                             | 0                   | 0                  |
| PVC                   | 4                  | 0                             | 0                   | 0                  | 0                  | 0                             | 0                   | 0                  |

#### 4.4 Potenzielle Ressourceneffizienzmaßnahmen

Im Folgenden werden Maßnahmen vorgestellt, die ein Potenzial zur effizienteren Ressourcenverwendung in den Bereichen Straßen und Schiene aufweisen. Sie wurden im Rahmen eines umfassenden Maßnahmenscreenings als besonders relevant ausgewählt.

##### 4.4.1 Baustoffe & Herstellungsverfahren

###### **Elektrodynamische Fragmentierung**

Die elektrodynamische Fragmentierung beschreibt ein Verfahren zur Zerkleinerung von Verbundmaterialien auf Basis elektrisch erzeugter Entladungsimpulse. Das zu zerkleinernde Material wird dabei in einem mit Wasser befüllten Behälter elektrischen Impulsen ausgesetzt. Der elektrische Durchschlag verläuft entlang den Grenzflächen des gebundenen Materials und bewirkt eine Trennung/Aufschlüsselung der Einzelkomponenten entlang den Grenzflächen.<sup>93</sup> Ein möglicher Einsatzbereich der elektrodynamischen Fragmentierung, der auch für den Tiefbau relevant ist, betrifft die Zerkleinerung von gebundenem Bauschutt, insbesondere Betonbruch.

Klassische Aufbereitungstechniken von Bauschutt basieren auf der mechanischen Zerkleinerung mithilfe von Backen- und Prallbrechern und anschließender Klassierung/Sortierung. Ziel ist die Herstellung störstofffreier und schadstoffarmer Fraktionen unterschiedlicher Korngrößenklassen. Für die Betonproduktion hergestellte Recyclingbaustoffe (RC-Baustoffe) aus aufgearbeitetem Bauschutt unterliegen höheren Qualitätsanforderungen als RC-Baustoffe für ungebundene Schichten im Straßenbau. In der Regel werden nur RC-Baustoffe aus Altbeton (Betonbruch) für die Herstellung von neuem Beton verwendet. Die Aufarbeitung von Altbeton erfolgt mit dem Ziel, die enthaltene Gesteinskörnung von der Zementmatrix zu trennen.

Durch eine elektrodynamische Fragmentierung lassen sich sehr gute Ergebnisse in der Aufschlüsselung von Gesteinskörnung und Zementmatrix erreichen. Defragmentierter Altbeton ergibt drei verwertbare Outputfraktionen: Die aus der ursprünglichen Gesteinskörnung bestehende Grobfraction liegt ohne weitere

<sup>93</sup> Fraunhofer-Institut für Bauphysik (2015); Thome (2012)

Zementanhaftungen vor und ist in der Materialeigenschaft als gleichwertig mit dem Primärmaterial anzusehen. Die mittlere Fraktion besteht aus Sand und Zementstein. Die hierfür identifizierte Verwertungsform wurde bislang nicht publiziert. Das aus dem Prozesswasser gewonnene Filtrat (Feinfraktion) kann in der Zementherstellung als Ersatz von Sand verwendet werden.<sup>94</sup> Bislang wurden vorher eigens hergestellte Betone mit bekannter Zusammensetzung fragmentiert. Gemischte Altbetonfraktionen unterschiedlicher Herkunft sollen erst in einem weiteren Projekt untersucht werden.

Das Verfahren ist, bezogen auf eine labortechnische Anlagengröße, ausgereift. Der Bau einer großtechnischen Anlage befindet sich derzeit in Planung. Der Energiebedarf konnte über zehn Jahre kontinuierlich von 10 kWh/t Inputmaterial auf 3 - 4 kWh/t reduziert werden. Es wird vermutet, dass sich durch weitere Effizienzsteigerungen ein Stromverbrauch von 2 - 3 kWh/t Inputmaterial realisieren lässt.<sup>95</sup>

Von ökonomischem Interesse ist auch die Fragmentierung von Schlacken aus der Müllverbrennung. Die aufgeschlüsselten Fraktionen, insbesondere Metalle, erzielen einen hohen Marktwert. Zudem sind Aufarbeitsverfahren für Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen (MVA) vergleichsweise selten.

**Fazit: Die Maßnahme ist perspektivisch von Interesse, insbesondere für die Verarbeitung von MVA-Schlacken. Die Vermarktung von sekundärer Gesteinskörnung als Zuschlagsstoff in der Betonherstellung dürfte am ehesten im Hochbau erfolgreich sein. Hier wird aufgrund von Green-Building-Zertifizierungen ein Markt für höherpreisige Recyclingbaustoffe gesehen. Die durch elektrodynamische Fragmentierung hergestellte Gesteinskörnung dürfte in ungebundenen Schichten des Straßenbaus dagegen kaum zur Anwendung kommen. Die Förderung von primärer Gesteinskörnung erfolgt aufgrund der günstigen Vorkommen in Deutschland zu vergleichsweise niedrigen Kosten. Zudem besteht in diesem Bereich die Konkurrenz zur etablierten Sekundärbaustoffindustrie, die mit oben erwähnten Verfahren ebenfalls RC-Baustoffe für ungebundene Schichten herstellt.**

<sup>94</sup> Thome (2014)

<sup>95</sup> Thome (2014)

### Temperaturabgesenkter Asphalt

Der im Straßenbau gängigste Walzasphalt wird bei Temperaturen von 160 – 180 °C hergestellt und – je nach Einsatzbereich im Straßenoberbau – bei Temperaturen von min. 130 – 180 °C eingebaut.<sup>96</sup> Gussasphalt, der als Deckschicht insbesondere bei Bundesautobahnen zum Einsatz kommt, wird bei deutlich höheren Temperaturen hergestellt und verarbeitet.

Die hohen Einbautemperaturen führen zur Entstehung von Dämpfen und Aerosolen, die aus der Perspektive des Arbeits- und Gesundheitsschutzes kritisch gesehen werden<sup>97</sup>. Durch viskositätsverändernde Zusätze oder Bindemittel lässt sich das Asphaltmischgut auch bei niedrigeren Temperaturen verarbeiten. Dadurch kommt es einerseits zu einer verringerten Dampf- und Aerosolentwicklung und andererseits zu einem geringeren Energieverbrauch bei der Herstellung des Asphaltmischguts. Ab einer Temperaturabsenkung um 30 °C gegenüber einem konventionell hergestellten Asphaltmischgut wird von einem „temperaturabgesenkten Asphalt“ gesprochen. Hergestellt werden solche speziellen Asphaltarten unter Beimischung viskositätsverändernder Zusätze bzw. Bindemittel. Die Zusätze können entweder organischen oder mineralischen Ursprungs sein. Es zeigt sich aber auch, dass die Möglichkeiten einer Temperaturabsenkung des Asphaltmischgutes von der Außentemperatur abhängig sind. Generell gilt, je höher die Außentemperatur, desto größer kann eine Temperaturabsenkung gegenüber konventionellem Asphalt erfolgen<sup>98</sup>.

Eine Temperaturabsenkung um 30 °C bewirkt eine Einsparung in der Asphaltproduktion von 9 kWh Energie pro Tonne Asphaltmischgut<sup>94</sup>. Umgerechnet bedeutet dies eine Einsparung von 0,9 Liter Heizöl und damit rund 2,9 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Tonne Asphaltmischgut. Bezogen auf die Treibhausgas-Emissionen der Asphaltherstellung von rund 23 kg CO<sub>2</sub>-Äq./t ergeben sich durch die Temperaturabsenkung um 30 °C Einsparungen der Treibhausgas-Emissionen von mehr als 10 %.

<sup>96</sup> Ulrich et al. (2013)

<sup>97</sup> Radenberg (2003)

<sup>98</sup> Deutscher Asphaltverband (2009)

Neben den Vorteilen temperaturabgesenkter Asphalte im Bereich von Energieeinsatz und Arbeitssicherheit werden zudem Vorteile bzgl. der technischen Eigenschaften genannt. Diese reichen von einer verbesserten Verdichtbarkeit des Asphalts beim Einbau<sup>99</sup> über Bauzeitverkürzungen bis zur Verringerung der thermischen Alterung des Bindemittels Bitumen.<sup>100</sup> Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der erforderlichen Zusätze temperaturabgesenkte Asphalte in der Herstellung kostenintensiver als konventionelle Asphalte sind. Die Mehrkosten belaufen sich auf 3 – 6 Euro pro Tonne.<sup>101</sup> Für die Gesamtkosten der Asphaltherstellung und -verarbeitung wurde eine Preisspanne von 70 – 80 Euro pro Tonne angenommen. Die genannten Mehrkosten würden demnach einen Anteil von 4 – 8 % ausmachen.

**Fazit: Im Hinblick auf die potenzielle Energieeinsparung bei der Herstellung stellen temperaturabgesenkte Asphalte grundsätzlich eine interessante Option zur Erhöhung der Ressourceneffizienz dar.<sup>102</sup> Grundvoraussetzung für die Umsetzung dieser Maßnahme ist der Einsatz isolierter Transportbehälter für Asphaltgut (siehe Kapitel 4.4.3). Allerdings sind noch nicht alle Aspekte von temperaturabgesenkten Asphalten abschließend erforscht. So finden sich keine Angaben zur allgemeinen Schadlosigkeit der verwendeten Zusätze wie auch zu deren Energie- und Materialaufwendungen bei der Herstellung. Weiterhin gibt es wenige Erkenntnisse zur Wiederverwendung von Asphaltgranulat mit viskositätsverändernden Zusätzen. Dies gilt insbesondere auch für die Frage der Wiederverwendung, wenn unterschiedliche viskositätsveränderte Produkte und höhere Anteile Asphaltgranulat miteinander gemischt werden.<sup>103</sup>**

### Energieeffizienz von Asphaltmischanlagen

In Asphaltmischanlagen wird Bitumen mit Gesteinskörnung heiß vermischt, zum Einsatzort heiß transportiert und dort eingebaut. Die verschiedene Gesteinskörnung wird hierzu häufig noch offen

<sup>99</sup> Mansfeld (2006)

<sup>100</sup> Hinrichs (2012); Radenberg und Gehrke (2010)

<sup>101</sup> Gerhard (200

<sup>102</sup> Dies wurde auch von einigen Teilnehmern der BAST-Veranstaltung „Die nachhaltige Straße“ (November 2014) so beurteilt.

<sup>103</sup> Bundesanstalt für Straßenwesen (2015)

gelagert, zum Einsatz in der Trommel vorgemischt und in die Trommel gegeben. Dann wird die vorerhitzte Gesteinsmischung mit dem heißen Bitumen vermischt und bei Erreichen der erforderlichen Temperatur (ca. 250 °C) zum Einbauort transportiert.

Ein einfaches Verfahren, Energie einzusparen, ist dabei die Einbringung relativ trockener statt feuchter Gesteinsmischungen. Durch einfache geschützte Lagerung, z. B. einfache vor Regen schützende Überdachungen, lässt sich so der Wassergehalt der Körnung um 2 bis 4 % Wasser vermindern.<sup>104</sup> Die Reduktion des Wassergehaltes vermindert den energetischen Aufwand zur Verdampfung des Wassers. Eine offene Lagerung der Zuschläge ist immer noch bei einigen Anlagen anzutreffen.<sup>105</sup>

In der folgenden Tabelle wird die Ersparnis bei vermiedenem zusätzlichem Wassergehalt dargestellt. Als rechnerischer Basiswert für trockene Gesteinskörnung wird 1 % Feuchte unterstellt.

**Tabelle 36: Zusätzliche Wassergehalte und Energieverluste bei der Asphaltherstellung**

| zusätzlicher Wassergehalt |  | Energieverlust |
|---------------------------|--|----------------|
| %                         |  | MJ/t Asphalt   |
| 1                         |  | 25             |
| 3                         |  | 75             |

In der Beispielrechnung wird ein Energiebedarf der Asphaltherwärmung von 250 MJ/t in der Basisvariante zugrunde gelegt.<sup>106</sup>

<sup>104</sup> Ruthenberg (2013)

<sup>105</sup> König (2014)

<sup>106</sup> Holldorb und Mayer (2010)

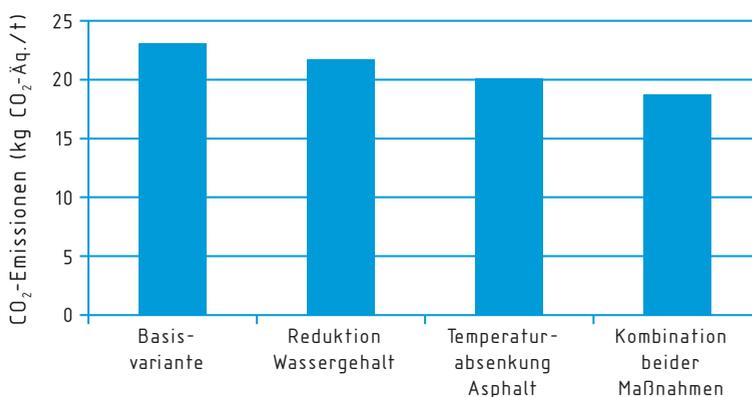
**Tabelle 37: Wärmebedarf und CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen in der Asphaltherstellung**

|                           | Wärmebedarf<br>in MJ/t | CO <sub>2</sub> Emission in<br>kg CO <sub>2</sub> -Äq./t | Minderung<br>in % |
|---------------------------|------------------------|--|-------------------|
| Basisvariante             | 250                    | 23,1   | 0                 |
| Einsparung bei 1 % Wasser | 225                    | 20,8   | 10                |
| Einsparung bei 3 % Wasser | 175                    | 16,2   | 30                |

Bei Minderung des Wassereintrages um 10 kg/t (1 %), vermindern sich die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen in der Asphaltherstellung um mehr als 10 %. Kann der Eintrag von Wasser über die Gesteinsmischungen um mehr als 30 kg/t Asphalt vermindert werden, reduzieren sich die Emissionen um mehr als 30 %.

Es wird angenommen, dass es bei 30 % der Anlagen noch Einsparmöglichkeiten hinsichtlich des Eintrages über Wasser gibt. Der durchschnittliche Wassereintrag soll für diese Betriebe bei ca. 2 % Wasser liegen. Damit ergeben sich Einsparmöglichkeiten bezogen auf die Gesamtheit der Betriebe von 30 % x 50 MJ/t, also 15 MJ/t.

Die nachfolgende Grafik zeigt die kumulierten Einsparpotenziale der Temperaturabsenkung und des reduzierten Wassereintrags. Das Ergebnis ist insgesamt eine Reduktion auf 18,7 kg CO<sub>2</sub>-Äq./t oder 19 %.



**Abbildung 11: Spezifische CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der Basisvariante Herstellung Asphaltmischgut, der Variante mit Reduktion des Wassergehaltes, der Temperaturabsenkung Asphalt und der Kombination aus beiden, eigene Darstellung**

**Fazit: Die Maßnahme zur Reduktion des Wassergehaltes ist bei vielen Asphaltmischanlagen schon Standard und wird sich zukünftig auch bei den anderen Anlagen durchsetzen. Die Maßnahme zur Temperaturabsenkung des Asphalts weist neben der Energieeinsparung auch Vorteile hinsichtlich der Verarbeitung auf. Hinsichtlich der Arbeitssicherheit wird sie positiv bewerten. Insgesamt werden daher beide Optionen empfohlen.**

### **Beton im Tiefbau (allgemein)**

Die hohe Treibhauswirkung von Beton basiert auf der energieintensiven Herstellung des Bindemittels Zement. Die Ansätze der Zementindustrie, die Auswirkungen der Zementherstellung auf Umwelt und Klima zu reduzieren, gehen in zwei Richtungen. Zum einen werden die zum Brennen des Zementklinkers notwendigen fossilen Energieträger durch sekundäre Brennstoffe ersetzt. Über die mengenmäßig höchsten Anteile alternativer Brennstoffe in der Zementherstellung verfügen Gewerbeabfälle, aufgearbeitete Fraktionen aus Siedlungsabfall, Klärschlamm und Altreifen.<sup>107</sup> Vor allem durch diese Umstellung der eingesetzten Energieträger konnten die spezifischen Treibhausgas-Emissionen pro Tonne Zement seit dem Jahr 2000 um 20 % reduziert werden.<sup>108</sup>

Weiterhin wird der Ansatz verfolgt, durch die Verwendung von Sekundärmaterialien den Klinkeranteil im Zement zu reduzieren. Die mengenmäßig relevantesten Ersatzstoffe sind Kalksteinmehl aus der Baustoffindustrie und Hüttensande aus der Stahlindustrie. Die Ansätze zur Substitution von Zement werden allerdings durch ein geringeres reaktives Potenzial, geringere Festigkeitswerte der Substitute sowie deren Marktverfügbarkeit limitiert. Die Herstellung von Zementarten mit hohen Hüttensandanteilen führt zu deutlich geringeren Treibhausgas-Emissionen als durch die Herstellung reiner Portlandzementklinker. Entsprechend den Datensätzen aus der Datenbank EcoInvent verursacht die Produktion der Zementsorte CEM III A mit 35 - 60 % Hüttensandanteil gegenüber einem klassischen Portlandzementklinker CEM I um 14 % geringere Treibhausgas-Emissionen.<sup>109</sup>

<sup>107</sup> Euwid (2014), S. 5

<sup>108</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2014a)

<sup>109</sup> Zementsorten mit noch höheren Hüttensandanteilen (bis 95 %) führen zu bis zu 28 % geringeren Treibhausgasemissionen, diese kommen für den Einsatz im Tiefbau allerdings nicht mehr in Frage.

**Fazit:** Während Zementsorten mit Sekundäranteilen hinsichtlich der Materialanforderungen grundsätzlich geeignet sind für Anwendungen im Tiefbau, z. B. Betonfahrbahnen, Fertigbauteile für Tunnelverschalung oder Gleisschwellen, werden diese in der Praxis kaum verwendet.<sup>110</sup> Dies liegt insbesondere an längeren Aushärtungszeiten von Betonen mit Zementsorten mit hohen Sekundäranteilen. Bei der Produktion von Fertigbetonteilen, z. B. Betongleisschwellen, sind längere Verschalungsfristen für die Produktion unrentabel, hier wird Wert auf hohe Frühfestigkeitswerte gelegt. Auch in Bezug auf Betonfahrbahnen wirken sich längere Ausschulfristen nachteilig aus, da eine zügige Befahrbarkeit für den Baulastträger von hoher Priorität ist. Zum anderen sind Betone aus Portlandzementklinker robuster und in der Verarbeitung weniger fehleranfällig als Betone mit z. B. Hüttensandzement. Um eventuelle Mängel und damit die Notwendigkeit für deren Beseitigung auszuschließen, verwenden Straßenbauunternehmen daher vorzugsweise Betone aus Portlandzementklinker.

### Neue Betonrezepturen/Ökobeton

Im Rahmen aktueller Forschungsvorhaben werden neue Betonrezepturen mit dem Ziel entwickelt, den Zementgehalt durch einen optimierten Einsatz von Wasser, den Einsatz von Zusatzstoffen und Hochleistungsfließstoffen sowie die Anpassung der Korngrößenverteilung zu reduzieren. Diese sog. Ökobetone sind auf die jeweilige Anwendung im Innen- und Außenbereich optimiert und weisen gegenüber herkömmlich hergestelltem Betonen ein um ca. 30 % verringertes Treibhausgaspotenzial bei gleichbleibenden Materialkosten auf.<sup>111</sup>

**Fazit:** Ökobetone befinden sich noch in der Erforschungsphase, eine großtechnische Herstellung kann zurzeit nicht erfolgen und mögliche Akzeptanzfragen können zum aktuellen Zeitpunkt nicht beantwortet werden. Die aktuellen Forschungsergebnisse weisen allerdings auf mögliche Anwendungen im Hochbau hin.

<sup>110</sup> Eickschen (2014)

<sup>111</sup> Proske et al. (2013)

### **Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung**

Neben dem Bindemittel Zement setzt sich der Baustoff Beton zu hohen Anteilen aus Gesteinskörnung (Kies und Sand) zusammen. Hier besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die aus Naturstein bestehende Gesteinskörnung durch sekundäres Material, insbesondere Betonbruch, zu ersetzen. Mit rezyklierter Gesteinskörnung hergestellter Beton wird als RC-Beton bezeichnet.

Allerdings wird in der Praxis derzeit nur ein sehr geringer Anteil des anfallenden Betonbruchs als rezyklierte Gesteinskörnung in der Betonproduktion und dem Betonbau verwendet.<sup>112</sup> Gleichwohl lassen die bau- und materialtechnischen Anforderungen die Verwendung von entsprechend aufgearbeiteten rezyklierten Gesteinskörnungen zu. So ist die Herstellung von RC-Betonen bis zu einer Druckfestigkeitsklasse C30/37 möglich. Für die Herstellung von Spann- und Leichtbetonen sind rezyklierte Gesteinskörnungen jedoch nicht zugelassen.<sup>113</sup> Bezogen auf den Tiefbau bedeutet dies, dass Anwendungen, wie z. B. bei Stell- und Parkplatzflächen, Straßenrandbereichen, Einfassungen wie Bordsteinkanten, aber auch Betonfahrbahnen, möglich sind, während Brückenbauwerke nicht mit RC-Beton errichtet werden können. Um RC-Beton in Deutschland noch stärker auf dem Markt zu etablieren, empfiehlt es sich, Architekten und Bauingenieure stärker für diese Material und seine Vorteile zu sensibilisieren.<sup>114</sup>

In den letzten 20 Jahren wurden zahlreiche Studien und Ökobilanzen zu den ökologischen Effekten der Herstellung von RC-Beton erstellt.<sup>115</sup> In der ökobilanziellen Gesamtbetrachtung schneidet RC-Beton im Vergleich zu Konstruktionsbeton ohne Recyclinganteil in fast allen Wirkungskategorien ähnlich bis leicht günstiger ab. Allerdings erweist sich RC-Beton bezüglich der Wirkungskategorie Flächenverbrauch bzw. Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung als deutlich besser als Frischbeton. Eine Studie erklärt den geringen Unterschied in den resultierenden Treibhausgas-Emissionen von RC-Beton gegenüber konventionellem Beton in einem um 5 % höheren

<sup>112</sup> Schmidmeyer (2014)

<sup>113</sup> Schmidmeyer (2014)

<sup>114</sup> VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2014)

<sup>115</sup> Umweltbundesamt (2013a)

Bindemittelbedarf bei der Herstellung von RC-Beton.<sup>116</sup> Als Grund dafür wird die höhere Kapillarporosität der rezyklierten Gesteinskörnung im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung genannt. Aus den Studien wird ersichtlich, dass die Entfernung des zu transportierenden Materials (insb. der Gesteinskörnung) eine relevante Stellgröße bei der ökologischen Bewertung darstellt. Die Transportdistanz ist darüber hinaus auch in der ökonomischen Bewertung bedeutsam.

**Fazit: Alle genannten Aspekte führen zu der Einschätzung, dass der Einsatz von RC-Beton im Tiefbau machbar ist. Die Ressourceneffizienzpotenziale werden aktuell aber noch zu wenig ausgeschöpft.**

#### 4.4.2 Ebene Bauteile

##### **Korrosionsgeschützter Stahl**

Der wichtigste Werkstoff beim Bau von Brücken ist Stahl. Wird konventioneller Stahl allerdings ohne Korrosionsschutz verwendet, reduziert sich die Lebensdauer aufgrund korrosiver Schäden (Rost). Als Korrosionsschutz kommen grundsätzlich Feuerverzinken oder Spritzverzinken in Frage, wobei Letzteres vor allem bei der Bestandssanierung angewendet werden kann. Spritzverzinken bedeutet das thermische Aufsprühen einer Zinkschicht zwischen 100 und 150 Mikrometer Zink.

Beim Brückenneubau gibt es darüber hinaus die Möglichkeit, wetterfesten Baustahl (WT-Stahl) zu verwenden. Dabei handelt es sich um niedriglegierten Stahl mit geringen Zusätzen an Chrom und Kupfer, teilweise auch mit erhöhtem Phosphorgehalt und Zusätzen an Nickel. Unter dem Einfluss der Verwitterung bildet sich auf der Oberfläche eine stabile oxidische Deckschicht (Sperrschicht), die sich ständig erneuert und so den Widerstand gegen atmosphärische Korrosion herstellt. Bezüglich der Verwendung von WT-Stahl beim Brückenbau gilt es, einige Anwendungskriterien zu berücksichtigen. Dies sind vor allem Mindestabstände zu Boden, Vegetation und Gewässer, um ein dauerhaft feuchtes Klima auszuschließen.<sup>117</sup>

<sup>116</sup> Holcim (2011)

<sup>117</sup> Hemmert-Halswick (2014)

Die Anzahl der aus WT-Stahl errichteten Brücken in Deutschland liegt bei rund 150.<sup>118</sup>

Vielversprechende Ergebnisse zeigen aus WT-Stahl errichtete Bauwerke bezüglich der Lebenszykluskosten. Am Beispiel einer Brücke ergeben sich zwar um 10 - 15 % höhere Materialkosten bei der Errichtung, aufgrund nicht notwendiger Korrosionsschutzmaßnahmen kommt es aber beim betrachteten Beispiel in der Gesamtbetrachtung zu rund 17 % geringeren Lebenszykluskosten im Vergleich zu einer aus konventionellem Stahl errichteten Brücke.<sup>119</sup>

**Fazit: Die Verwendung von WT-Stahl für den Brückenbau ist aus wirtschaftlicher Sicht überaus vielversprechend. Dass vergleichsweise wenige Brücken aus dem Material hergestellt werden, wird im Wesentlichen auf ästhetische Gründe zurückgeführt, da die oxidative Sperrschicht als Mangel empfunden wird.<sup>120</sup> Zu berücksichtigen ist allerdings auch die gängige Vergabepaxis, die sich in erster Linie an den einmaligen Investitionskosten orientiert. Wird nur dieser Beurteilungsmaßstab angelegt, haben Brücken aus WT-Stahl einen Wettbewerbsnachteil gegenüber Brücken aus konventionellem Stahl.**

Bezogen auf die Frage möglicher Ressourceneffizienzpotenziale wirkt sich einschränkend aus, dass WT-Stahl nur beim Brückenneubau verwendet werden kann und bislang keine Beispiele für Sanierungsmaßnahmen mit WT-Stahl vorliegen. Bezogen auf den Ressourcenverbrauch von konventionellem Stahl gegenüber WT-Stahl liegen ebenfalls keine Untersuchungen vor. Inwieweit die Chrom und Kupfer enthaltende Legierung des WT-Stahls zu höheren Umweltauswirkungen als bei konventionellem Stahl führt, kann nicht beantwortet werden.

<sup>118</sup> Fischer (2012)

<sup>119</sup> Fischer (2012)

<sup>120</sup> Fischer (2012)

### Adaptive Brückenbauweise

Die adaptive Brückenbauweise beschreibt den Ansatz, Brückenbauwerke modular aufzubauen und dadurch die Möglichkeit zu erhalten, das Bauwerk bei sich ändernden Randbedingungen modular erweitern zu können. Dem Ansatz liegt die Erfahrung zugrunde, dass Straßenbauwerke mit langer Lebensdauer sich ändernden Nutzungsanforderungen unterliegen. Speziell bei Brückenbauwerken ergeben sich durch eine Verkehrszunahme, insbesondere des Schwerlastverkehrs, aufwändige Sanierungsmaßnahmen, die Nutzungseinschränkungen für den Verkehr bedeuten.

Hier setzt das Forschungsprojekt „Adaptive Tube-in-Tube Brücken“ an, das am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Fachgebiet Massivbau, der TU Braunschweig in Kooperation mit HOCHTIEF Consult entwickelt wurde. Es wurden Brückenkonzepte aus einem primären Brückenelement entwickelt, an das nachträglich ergänzende Elemente angebracht werden können, um so sich ändernden Nutzungsanforderungen gerecht zu werden.<sup>121</sup>

**Fazit: Zum jetzigen Zeitpunkt kann noch keine Aussage bezüglich möglicher Ressourceneffizienzpotenziale eines solchen Ansatzes getroffen werden.**

#### 4.4.3 Ebene Bauverfahren

##### Isolierte Fahrzeuge für Asphaltmischgut

Die Dauerhaftigkeit von Asphaltstraßen wird im Wesentlichen durch den Hohlraumgehalt bedingt. Verbleiben im ausgebrachten Straßenasphalt zu große Hohlräume, kann Wasser eindringen und durch Frostsprengung zu Schäden und vorzeitiger Alterung führen. Die Voraussetzung für eine Verarbeitung mit geringem Hohlraumgehalt ist eine optimale und gleichmäßige Mischguttemperatur bei der Anlieferung und Übergabe an den Fertiger. Es existieren daher in den Regelwerken (ZTV Asphalt-StB 07) verbindliche Mindesttemperaturen, die Asphaltmischgut bei der Anlieferung aufweisen muss (rund 150 °C).

<sup>121</sup> Empelmann et al. (2012)

Insbesondere dem Transport des Mischguts zwischen Asphaltmischwerk und Baustelle kommt besondere Bedeutung zu, da es durch äußere Einflüsse wie z. B. Fahrtgeschwindigkeit, mangelnde Abdeckung oder verkehrsbedingte Verzögerungen in der Anlieferung zu deutlichen Wärmeverlusten des Mischguts kommen kann. Untersuchungen haben gezeigt, dass in Lkws mit thermischer Isolierung transportiertes Asphaltmischgut deutlich weniger Wärmeverluste erfährt als in konventionellen Transportbehältnissen.

Im Sinne einer Qualitätssicherung von Asphaltmischgut hat das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) im Oktober 2013 alle obersten Straßenbaubehörden der Länder angewiesen, schrittweise strengere vertragliche Vorgaben beim Transport von Asphaltmischgut vorzunehmen. In der ersten Umsetzungsstufe soll ab 2015 bei Straßenbaumaßnahmen mit einer Einbaufläche zwischen 18.000 m<sup>2</sup> bis 60.000 m<sup>2</sup> nur in thermoisolierten Behältnissen transportiertes Asphaltmischgut verwendet werden. Durch weitere Umsetzungsschritte sollen thermoisolierte Transportbehältnisse ab 2017 bei allen Asphaltflächen ab 18.000 m<sup>2</sup> und ab 2019 bei grundsätzlich allen herzustellenden Asphaltflächen zum Einsatz kommen.<sup>122</sup>

**Fazit:** Die Maßnahme dient primär der Steigerung der Qualität im Asphaltstraßenbau. Durch die Verarbeitung von Mischgut mit gleichmäßig hoher Mischguttemperatur lassen sich Asphaltsschichten mit höherer Lebensdauer herstellen, die damit ressourceneffizienter sind als Schichten mit kürzerer Gebrauchsdauer. Zur Herstellung der benötigten thermoisolierten Transportbehältnisse ist zunächst ein erhöhter Ressourceneinsatz (energetisch und stofflich) notwendig. Zu erwarten ist darüber hinaus ein mittelfristiger Effekt: Nach Umrüstung eines Großteils der Transportfahrzeugflotte die Abgabetemperatur des Mischguts ab Asphaltmischwerk gesenkt werden. Damit lassen sich energetische Rohstoffe bei der Herstellung des Asphaltmischgutes einsparen.

Bislang liegen allerdings weder Informationen bezüglich des Ressourcenaufwands zur Herstellung

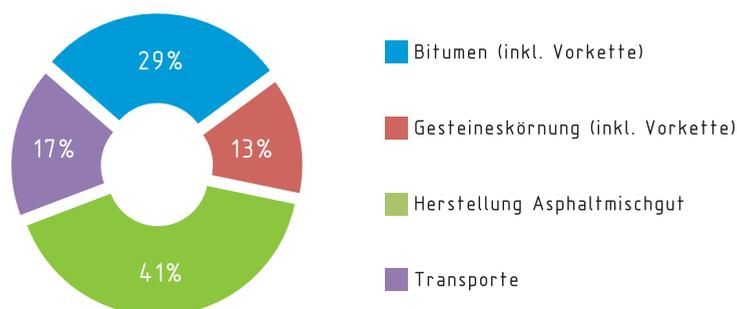
<sup>122</sup> Fliegl (2014); Ulrich et al. (2013)

isolierter Transportbehältnisse noch zu möglichen Einsparungen im Asphaltmischwerk aufgrund abgesenkter Abgabetemperaturen vor.

#### 4.4.4 Ebene Recyclingverfahren Asphalt

Dem Recycling der gebundenen Schichten kommt im Hinblick auf das Bindemittel Bitumen eine besondere Bedeutung zu. Bitumen ist ein Produkt aus der Erdölraffinierung und damit ein fossiler Rohstoff. Die Förderung und Herstellung von Bitumen führt zur Emission von 144 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Tonne.<sup>123</sup> Zwar liegt der Bitumengehalt in den Schichten des Straßenoberbaus lediglich zwischen 3 – 8 % (vgl. Tabelle 27), bezogen auf die Treibhausgas-Emissionen der gesamten Asphaltherstellung, inklusive Vorketten für Bitumen und Gesteinskörnung, Mischgutherstellung und Transport, nimmt die Bitumenherstellung eine herausgehobene Stellung ein.

Abbildung 12 zeigt am Beispiel einer Asphaltbinderschicht mit einem Bitumengehalt von 4,3 % die anteiligen Treibhausgas-Emissionen der gesamten Asphaltherstellung. An den Gesamt-Emissionen von rund 64 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Tonne Asphalt hat die Herstellung mit 41 % den größten Anteil, gefolgt von der Bereitstellung von Bitumen mit rund 29 %. Die Transporte (insb. vom Asphaltmischwerk zur Baustelle) sowie die Bereitstellung der Gesteinskörnung nehmen einen vergleichsweise geringen Anteil an den Gesamtemissionen ein.<sup>124</sup>



**Abbildung 12: Anteile an Treibhausgas-Emissionen durch die Herstellung einer Asphaltbinderschicht, eigene Darstellung**

<sup>123</sup> Blomberg et al. (2012)

<sup>124</sup> Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2015)

**Fazit:** Werden gebundene Schichten wiederverwendet, entstehen Treibhausgas-Emissionen durch den Ausbau der Schichten, den Transport sowie die erneute Mischgutherstellung. Der Energieverbrauch zur Herstellung von Recyclingasphalt unterscheidet sich nicht grundlegend von der Herstellung von Primärasphalt. Aus Abbildung 12 wird aber auch deutlich, dass durch die Wiedernutzung der Gesteinskörnung und insbesondere des Bitumens ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz geleistet wird.

Während Kapitel 4.2 generelle Aussagen zum Asphaltrecycling und dessen Adaption im Stoffstrommodell trifft, werden im Folgenden einzelne Verfahren zum Asphaltrecycling vorgestellt und hinsichtlich des Ressourceneffizienzpotenzials diskutiert.

### **In-situ-Kaltrecycling**

Kaltrecycling (KRC) bezeichnet eine besondere Form der Straßenerneuerung, die zum Ziel hat, sämtliche im Straßenkörper befindliche Materialien direkt vor Ort zu erneuern und so gemäß den Vorgaben des Abfall-/Kreislaufwirtschaftsgesetzes eine umfassende Wiederverwendung des auszutauschenden Materials zu erreichen.

Bei dem Verfahren werden die zu erneuernden gebundenen oder ungebundenen Schichten ausgebaut (durch Fräsen und Brechen), mit zusätzlichem Bindemittel (Zement oder Schaumbitumen) versetzt und als gebundene Schichten wieder eingebaut und verdichtet. Da die so hergestellte Schicht die Eigenschaft einer Asphalttragschicht aufweist, muss zusätzlich eine Asphaltdeckschicht aufgebracht werden. Damit führt die Zugabe von Bindemittel und abschließender Deckschicht zu einer Netto-Zunahme des Straßenbaumaterials, auch wenn keine höhere Straßenbauklasse aufgrund geänderter Fahrbahnanforderungen erforderlich wird. Als Bindemittel können entweder durch Zusätze modifizierter Bitumen, Zement oder so genannter Schaumbitumen verwendet werden. Auch die Kombination der genannten Bindemittel wird angewendet.

Schaumbitumen ist eine Verbindung, die durch Aufsprühen von Wasser auf einen heißen Bitumenstrahl (rund 180 °C) entsteht.

Dabei verdampft das Wasser und wird vom Bitumen umschlossen. Die Eigenschaften des so entstehenden Bitumenschaums beinhalten eine niedrige Viskosität, die Erhöhung der Oberfläche und die Veränderung der Oberflächenspannung. Bei Abkühlung kondensiert das Wasser und führt zu einem Zusammenfall des Schaums. Im Zuge eines BMBF-Forschungsprojekts von Hähn et al. (2004) wurde ein Kaltrecycling mit Schaumbitumen und Zement erforscht. Bei unterschiedlichen Testverfahren wurden Bitumen in einem Umfang von 3 - 5 % und ein Wasseranteil von 2,4 - 3,6 % zugesetzt. Hinzu kamen 1 - 2 % Zement zur Festigkeitsverbesserung und um einen zügigen Weiterbau und eine Verkehrsfreigabe zu erreichen. Nach Montepara et al.<sup>125</sup> handelt es sich bei dem im Kaltrecycling verwendeten Zement um Portlandzement und damit nicht um Zement mit Sekundäranteilen (vgl. Kapitel 4.4.1).

Das Kaltrecyclingverfahren bringt mehrere Vorteile mit sich, die von den Anbietern vor allem hinsichtlich des Aspekts der Kosteneinsparung dargestellt werden:<sup>126</sup>

- Transporte werden um 90% reduziert, da außer dem zugesetzten Wasser und Bindemittel sowie Deckschichtmaterial keine weiteren Materialien an- und abtransportiert werden müssen. Durch eine Reduktion der Transporte ergibt sich auch der ökologische Nutzen in Form von vermiedenen Emissionen.
- Bei dem Verfahren werden auch teerhaltige Ausgangsmaterialien aufgearbeitet und wieder mit eingebaut. Damit entfallen die Kosten einer Entsorgung oder Aufarbeitung.
- Geringere Bauzeit und damit frühere Verkehrsfreigabe

Die konkreten Kostenvorteile ergeben sich je nach Anforderung an den erneuerten Fahrbahnaufbau. Gegenüber einer konventionellen Fahrbahnerneuerung wurden 30 % Kosteneinsparung für den Fall errechnet, dass die Fahrbahnanforderungen nicht steigen und (neben der Deckschicht) keine zusätzlichen Fahrbahnschichten benötigt werden. Müssen aufgrund der Fahrbahnanforderung neben Kaltrecyclingschichten auch konventionelle hydraulisch

<sup>125</sup> Montepara et al. (2004)

<sup>126</sup> Hähn et al. (2004)

gebundene Schichten eingebaut werden, fällt der Kostenvorteil geringer aus (rund 13 % Einsparung gegenüber konventionellem Verfahren).

Das Kaltrecycling stellt in Deutschland keine Regelbauweise dar. Allerdings berichten sowohl Straßenbaubehörden als auch Straßenbauunternehmen von einer steigenden Nachfrage nach einem kostengünstigen Kaltrecyclingverfahren.

**Fazit: Hinsichtlich der Ressourceneffizienzpotenziale ist das Kaltrecycling von großem Interesse, insbesondere weil das gesamte Straßenmaterial verwertet werden kann. Gleichzeitig bleibt die Frage ungeklärt, ob der Wiedereinbau von Schadstoffen wie teerhaltigen Substanzen aus Umweltgesichtspunkten als vollständig unproblematisch zu bewerten ist. Außerdem ist es aufgrund fehlender Forschungsergebnisse nicht möglich, ein Kaltrecycling- und ein konventionelles Verfahren ökobilanziell zu vergleichen. Es ist aber zu vermuten, dass trotz der zusätzlichen Zugabe von Bindemitteln die Energie- und Materialaufwendungen beim Kaltrecycling geringer sind als beim konventionellen Verfahren.**

### **Vermeidung Hocheinbau**

Bei der Sanierung von schadhaftem Straßenoberbau ergeben sich die beiden Vorgehensweisen Hoch- und Tiefeinbau. Beim Tiefeinbau wird zunächst durch Probebohrungen ermittelt, welche Schichten des Straßenaufbaus schadhaft und daher zu ersetzen sind. Anschließend werden alle schadhaften Schichten entnommen und durch neue ersetzt. Wenn kein veränderter Straßenaufbau aufgrund höherer Verkehrsbelastung erforderlich ist, bleibt die Menge der verbauten Baustoffe identisch zum Ursprungszustand. Beim Hocheinbau wird nicht zwingend die vollständige Entnahme aller schadhaften Schichten angestrebt. Vielmehr reicht es aus, wenn nur die Deckschicht und ein Teil der darunter liegenden Schicht entnommen werden. Auf der Unterlage aus alten Schichten wird ein vollständig neuer Straßenoberbau gemäß den bautechnischen Anforderungen der Straßenklasse aufgebracht. Da nicht alle Schichten des (alten) Oberbaus

vollständig ausgebaut werden, erfolgt eine Netto-Zunahme der eingebrachten Straßenbaumaterialien. Durch die Netto-Zunahme des Hocheinbaus kommt es zu einer Erhöhung des Straßenkörpers. Daher findet ein Hocheinbau in der Regel im außerörtlichen Bereich statt, da entstehende Geländeunterschiede zu den umliegenden Bereichen keine Auswirkung haben. Weiterhin ist der Hocheinbau nur für Straßen niederer Belastungsklassen zu empfehlen. Im innerörtlichen Bereich ist ein Hocheinbau in der Regel nicht möglich, da keine Erhöhung des Straßenkörpers, z. B. wegen der Gehwege, erfolgen darf. Eine Übersicht über die Straßen, bei denen Hocheinbaumaßnahmen nach Knappe et al. grundsätzlich unterstellt werden, findet sich im Anhang in Tabelle A. 9.

Der Hocheinbau bildet die gängige Praxis im Straßenbau und begründet sich in erster Linie durch geringere Kosten gegenüber dem Tiefeinbau (Einsparung Transport- und Verwertungskosten). Daher wird der Hocheinbau als besonders kostenbewusste Bauweise z. T. von den obersten Straßenbauämtern empfohlen.<sup>127</sup> Auch im innerörtlichen Bereich, wenn Bürger und Anwohner aufgrund von Gemeindecapital an den Kosten von Straßenbaumaßnahmen beteiligt werden, kann eine Ausführung in Hochbauweise gefordert werden.

**Fazit: Unter Ressourcengesichtspunkten ist der Hocheinbau aufgrund ungenutzter Altschichten als nachteilig gegenüber dem Tiefeinbau anzusehen. Potenzielle Sekundärrohstoffe, insbesondere bitumengebundene Schichten des Oberbaus, können nicht vollständig genutzt werden. Es ist zu erwarten, dass durch die Vermeidung von Hocheinbaumaßnahmen die Menge der verfügbaren bitumengebundenen Schichten gesteigert werden kann.**

### Schichtgenaues Abfräsen

Die Wiederverwendung von Asphalt, d. h. die Zugabe von sekundärem Asphalt in der Mischgutproduktion, hängt von der Qualität des ausgebauten Materials ab. Generell gilt: Asphaltsschichten müssen möglichst schichtgenau entnommen werden (Asphaltgranulat). Kommt es zu einer Vermischung des

<sup>127</sup> Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (2012)

Materials durch einen unpräzisen Ausbau (Asphaltbruch), können daraus keine hochwertigen Asphaltsschichten hergestellt werden. Der Recyclingasphalt kann zudem nur in tieferen Schichten eingesetzt werden.<sup>128</sup> Wird Asphaltbruch lediglich in ungebundene Schichten des Unterbaus eingebracht und substituiert damit ungebundenes Material wie Kies oder Schotter, so muss dies als down-cycling, d. h. minderwertiges Recycling, bezeichnet werden. Aus rohstofflicher Sicht kann nur durch ein schichtgenaues Abfräsen von Altasphalt dieser als Sekundärrohstoff in gleichwertige Schichten eingebracht werden. Inwieweit ein schichtgenaues Abfräsen im Vergleich zum Aufbrechen zu einem höheren Treibstoff der Baumaschinen und damit höheren ökologischen Belastungen führt, konnte nicht geklärt werden. Bezogen auf eine ökonomische Betrachtung, entstehen durch ein schichtgenaues Abfräsen deutlich höhere Kosten als beim Aufbrechen. Ein Kostenunterschied um den Faktor 6 wird für das Jahr 2004/2005 genannt.<sup>129</sup>

**Fazit: Da schichtgenaues Abfräsen aufwändiger ist als der Ausbau durch Asphaltbruch, hat das schichtgenaue Abfräsen einen Kostennachteil bei der Auftragsvergabe. Empfohlen wird daher, die Rahmenbedingungen zu schaffen, damit der Auftraggeber günstigere Nebenangebote nicht bevorzugt und dadurch ein höherwertiges Recycling verhindert.<sup>130</sup>**

### Steigerung Sekundärmaterial

Wie in Tabelle 30 dargestellt, wird das Potenzial zum Einsatz von Recyclingmaterialien nicht ausgeschöpft. Insbesondere auf Ebene der Gemeindestraßen, aber auch bei Land- und Kreisstraßen zögern öffentliche Auftraggeber bisher, das Risiko des Einsatzes von RC-Materialien zu übernehmen. Hierfür werden häufig schlechte Erfahrungen in der Vergangenheit angeführt. RC-Materialien weisen im Gegensatz zu Primärmaterialien eine größere Heterogenität auf, daher ist eine Güte- und Qualitätssicherung notwendig. Auf Seiten der Nachfrager fehlt es allerdings auch an politischem Willen, dem Einsatz von RC-Materialien Chancen einzuräumen. Während der Bund als Auftraggeber eine Vorschrift zur diskriminierungsfreien

<sup>128</sup> Deutscher Asphaltverband (2014); Täube (2013)

<sup>129</sup> Landesumweltamt NRW (2005)

<sup>130</sup> Deutscher Asphaltverband (2014); Täube (2013)

Ausschreibung bezüglich der Sekundärrohstoffe erlassen hat, ist diese häufig auf Länder- und Gemeindeebene nicht zu finden.

**Fazit: Ein höherer Einsatz von RC-Materialien ist wünschenswert. Hierzu wäre auf der Angebotsseite die Durchsetzung einer Güte- und Qualitätssicherung erforderlich. Bei der Auftragsvergabe ist hierfür eine diskriminierungsfreie Ausschreibung vorteilhaft, ähnlich den Vorschriften bei Bundesbauvorhaben.**

### Maximalrecycling Asphalt

Das Land Baden-Württemberg fördert mehrere Straßensanierungsvorhaben mit dem Ziel, einen maximalen Anteil an Recyclingasphalt zu verwenden. Da die Regelwerke mit qualitätsbedingten Anforderungen nur Recyclinganteile von 20 - 60 Masseprozent (Ma%) je nach Asphaltsschicht zulassen, gleichzeitig aber aufgrund der zunehmenden Relevanz von Erhaltungsmaßnahmen die Verwendung von Asphaltgranulat an Bedeutung gewinnt, werden Verfahren mit höheren Recyclinganteilen erforscht. Um hohe Quoten an Recyclingasphalt zu erreichen, kommt dem zusätzlich beigemischten Bindemittel eine hohe Bedeutung zu.<sup>131</sup> Das beigemischte Bindemittel hat in erster Linie die Aufgabe, Alterungsprozesse des rezyklierten Bindemittels im Ausbaupasphalt auszugleichen.

Insgesamt wurden bislang fünf Pilotstrecken mit einem Recyclinganteil von 70 Ma% und 90 Ma% (Maximalrecycling) realisiert. Aufgrund des neuen Verfahrens wurden in Abstimmung mit der Bauindustrie deutlich kürzere Gewährleistungsfristen für die errichteten Fahrbahnschichten vereinbart.

**Fazit: Da die Pilotstrecken in den Jahren 2011 und 2012 umgesetzt wurden, kann noch keine abschließende Bewertung der Dauerhaftigkeit von Fahrbahnschichten mit hohem Recyclinganteil durchgeführt werden. Die bisherigen Erfahrungen, sowohl hinsichtlich der Herstellung und Verarbeitung als auch bezüglich der Haltbarkeit, werden allerdings als positiv bewertet.<sup>132</sup>**

<sup>131</sup> Hollatz und Uhlmann (2013)

<sup>132</sup> Hollatz und Uhlmann (2013)

#### 4.5 Auswahlverfahren zur Szenariobetrachtung von Ressourceneffizienzmaßnahmen

Im vorangegangenen Kapitel 4.1 wurden aktuelle Trends und Rahmenbedingungen für den Tiefbau beschrieben und herausgearbeitet, welche Effekte in der Tendenz dadurch auf den Ressourcenverbrauch erwartet werden können. Es zeigt sich, dass der Tiefbau durch unterschiedliche Entwicklungen betroffen ist, die mehrheitlich zu einer Zunahme des Ressourcenverbrauchs führen dürften. Gleichzeitig wird erkennbar, dass eine Quantifizierung des möglichen Ressourcenverbrauchs nicht machbar ist. Zum einen üben manche der beschriebenen Rahmenbedingungen Einfluss auf eine zukünftige Entwicklung aus (insbesondere rechtliche Rahmenbedingungen wie Ersatzbaustoffverordnung), zum anderen können mögliche Effekte bereits wirksamer Rahmenbedingungen aufgrund unzureichender Daten (z. B. Umsetzung von Schallschutzmaßnahmen) nicht quantifiziert werden.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die in Kapitel 4.4 vorgestellten Ressourceneffizienzmaßnahmen. Zwar lässt sich eine Vielzahl von Maßnahmen feststellen, die an unterschiedlichen Ebenen des Neu- und Ersatzbaus von Straßen- und Schieneninfrastruktur ansetzen. Eine Quantifizierung der erreichbaren Ressourceneinsparungen und damit eine Integration der Maßnahmen in die in Kapitel 5 durchgeführte Szenariobetrachtung ist nicht immer möglich.

**Tabelle 38: Überblick der betrachteten Ressourceneffizienzmaßnahmen und Integration in die Szenariobetrachtung**

|                                   | Maßnahme  | (möglicher) Effekt Ressourceneinsatz/verbrauch  | Kommentar   | im Szenario |
|-----------------------------------|---|---|---|-------------|
| Baustoffe & Herstellungsverfahren |   |   |   |             |
| 1                                 | Elektrodynamische Fragmentierung                          | Erhöhung Qualität Recyclingmaterialien  | Nicht im großtechnischen Maßstab anwendbar. Konkurrenzfähigkeit zu konv. Bauschuffaufbereitung oder Verfüllungen aufgrund Energieaufwendungen eingeschränkt   | nein        |
| 2                                 | Temperaturabgesenkter Asphalt                             | Energieeinsparung durch Temperaturabsenkung bei Mischgutherstellung durch Zusätze               | Positive Auswirkungen auf Arbeitsschutz. Minderung Treibhausgas-Emissionen von ca. 10 % erreichbar. Höhere Kosten ggü. konventioneller Asphaltherstellung. Aspekte bzgl. genereller Schadlosigkeit und Herstellung Zusätze nicht vollständig bekannt. | ja          |
| 3                                 | Energieeffizienz Asphaltmischanlage                       | Energieeinsparung durch geschützte Lagerung des Mischguts                                       | Annahme bzgl. Lagermanagement bestehender Asphaltmischanlagen muss getroffen werden.  | ja          |
| 4                                 | Zement zur Betonherstellung mit Anteilen Sekundärmaterial | Energieeinsparung durch Beimischung von Sekundärmaterial  | Wenig Akzeptanz aufgrund längerer Aushärtzeiten und Gewährleistung. Verfügbarkeit Sekundärmaterial begrenzt (Verdrängungssituation)   | nein        |
| 5                                 | Neue Betonrezepturen                                      | Reduktion Treibhausgas-Emissionen durch Optimierung der Einsatzstoffe und Mischungsverhältnisse | Forschungsstadium, großtechnische Anwendung noch nicht absehbar. Anwendungsbereiche deuten auf Einsatz im Hochbau hin.  | nein        |

Tabelle 38 Fortsetzung

|   | Maßnahme   | (möglicher) Effekt<br>Ressourceneinsatz/<br>verbrauch                                | Kommentar  | im<br>Szenario |
|---|--|--|--|----------------|
| Baustoffe & Herstellungsverfahren (Fortsetzung) |  |  |  |                |
| 6   | RC-Beton   | Reduktion Energie-<br>einsatz und Schonung<br>natürlicher Ressourcen                 | Materialtechnische An-<br>forderungen ermögli-<br>chen Anwendung nur in<br>Einzelanwendungen des<br>Straßen- und Schie-<br>nenbaus. Maßnahme<br>adressiert stärker den<br>Hochbau. Studien zur<br>Umweltwirkung fallen un-<br>terschiedlich aus, Effekt<br>bzgl. Treibhausgasminde-<br>rung u.U. nur gering                                      | nein           |
| Bauteil   |  |  |  |                |
| 7   | Korrosions-<br>geschützter,<br>wetterfester<br>Stahl | Reduktion Lebens-<br>zykluskosten durch<br>entfallende Korrosions-<br>schutzmaßnahme | Höhere Materialkosten<br>bei der Errichtung<br>werden durch geringe<br>Wartungsaufwendungen<br>kompensiert. Der Zusam-<br>menhang kann bei Investi-<br>tionsentscheidungen aber<br>unberücksichtigt bleiben.<br>Maßnahme bislang nur<br>für Brückenneubau,<br>nicht für Instandhaltung.<br>Akzeptanzprobleme<br>aufgrund ästhetischer<br>Aspekte | nein           |
| 8   | Adaptive,<br>modulare<br>Brücken-<br>bauweise        | Noch offen   | Verkürzung von Nut-<br>zungseinschränkung<br>während Sanierungsmaß-<br>nahme, Forschungssta-<br>dium auf Konzeptebene,<br>Praxisbeispiele liegen<br>bislang nicht vor  | nein           |

|                                   | Maßnahme                                | (möglicher) Effekt Ressourceneinsatz/verbrauch   | Kommentar   | im Szenario   |
|-----------------------------------|---|--|---|---------------|
| <b>Bauverfahren</b>               |   |  |   |               |
| 9                                 | Isolierte Fahrzeuge für Asphaltmischgut | Verlängerung Lebensdauer durch Qualitätssteigerung, Reduktion Energieverbrauch Herstellung Asphaltmischgut | Vorgabe zur Umstellung auf isolierte Transportfahrzeuge wird schrittweise seit 2015 eingeführt. Überprüfung der Effekte daher nur einzelfallbezogen. Umrüstung der Fahrzeugflotte ist selbst mit erhöhtem Ressourceneinsatz verbunden.  | nein          |
| <b>Recyclingverfahren Asphalt</b> |   |  |   |               |
| 10                                | In situ-Kaltrecycling                   | Reduktion Ressourcenverbrauch Asphaltherstellung durch Wiederverwendung des gesamten Straßenmaterials      | Trotz Beimischung von zusätzlichem Bindemittel ist mit einer Einsparung eingesetzter Ressourcen zu rechnen. Insb. Abtransport von ausgebautem Material entfällt komplett. Schadstoffe wie Teer werden wieder eingebaut (ökologische Unbedenklichkeit nicht vollständig geklärt/dokumentiert). Maßnahme führt zu deutlichen Kosteneinsparungen | nein          |
| 11                                | Vermeidung Hocheinbau                   | Steigerung Verfügbarkeit Recyclingmaterial   | Hocheinbau, d. h. nicht vollständige Entnahme alter Straßenschichten reduziert verfügbares Recyclingmaterial, bedeutet allerdings Kostenvorteil (Bauzeit & Transporte)  | ja            |
| 12                                | Schichtgenaues Abfräsen                 | Steigerung qualitativ hochwertiger Recyclingmaterialien  | Schichtgenaues Abfräsen von Asphalt ist kostentensiver als Aufbrechen von Asphaltsschichten.  | ja (implizit) |

Tabelle 38 Fortsetzung

|  | Maßnahme              | (möglicher) Effekt<br>Ressourceneinsatz/<br>verbrauch                         | Kommentar   | im<br>Szenario |
|--|-----------------------|---|---|----------------|
| Recyclingverfahren Asphalt (Fortsetzung) |                       |   |   |                |
| 13                                       | Maximal-<br>recycling | Schonung natürlicher<br>und fossiler Ressourcen<br>(Asphaltbestand-<br>teile) | Verfahren befinden sich<br>in Pilotstadium, dadurch<br>kürzere Gewährleistungs-<br>fristen. Eingesetzte<br>Recyclinganteile über-<br>steigen Richtgrößen aus<br>Regelwerken. Fragen<br>der Langlebigkeit noch<br>nicht abschließend<br>beantwortet. | ja             |

## 5 SZENARIOANALYSE

Die Szenarioanalyse sieht die Betrachtung von zwei Grundszenarien vor. Das erste ist das über den materialeitigen Erneuerungsbedarf aus Kapitel 3 und die benötigten Materialien für Neu- und Ausbau aus Kapitel 4.3 gespannte „Business as usual“-Szenario (BAU). Für die Berechnung der Wirkungsindikatoren werden hier auch die Modelloptimierungen hinsichtlich RC-Materialien aus Kapitel 4.2 berücksichtigt. Das zweite Szenario nimmt als Grundlage das BAU-Szenario und spannt sich dann über die in Kapitel 4.5 ausgewählten quantifizierbaren Effizienzmaßnahmen auf. Es wird jeweils von dem nach heutigem Kenntnisstand technisch maximal möglichen Effizienzpotenzial ausgegangen, um Möglichkeitsräume bis 2030 darzustellen.

### 5.1 „BAU“-Szenario

Das BAU-Szenario beschreibt die Materialaufwendungen bis 2030 für einen business-as-usual Pfad. Der gemittelte Materialaufwand pro Jahr wird einerseits über den aktuellen Stand der Erhaltungsarbeiten ermittelt. Andererseits wird der Bedarf an neuer Infrastruktur über die Neu- und Ausbauplanung des Bundes und die Flächenentwicklungsprognosen bestimmt, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben. Für die drei Wirkungsindikatoren THG-Emissionen, KRA und KEA werden die Ergebnisse für die vertiefend betrachteten Sektoren Straßen- und Schienenverkehrsinfrastruktur dargestellt.

Die Straßenverkehrsinfrastrukturen werden im Sinne der Ergebnisdarstellung weiter gegliedert in Straßen, Brücken, Tunnel und begleitende Infrastrukturen. Die Schienenverkehrsinfrastrukturen in Gleise, Anlagen zur Energieversorgung, Brücken und Tunnel, so dass die Relevanz einzelner Bereiche gegenüber anderen, aber auch dem Gesamtaufwand, deutlich wird. Die Ergebnisse für die Materialmengen insgesamt und die Wirkungsindikatoren differenziert nach Erneuerungs- sowie Neu- und Ausbaufwand pro Jahr finden sich in Tabelle 39. Hierbei ist anzumerken, dass die Indikatorergebnisse des Erneuerungsaufwandes von denen in Kapitel 3.2 abweichen, da, wie in Kapitel 4.2 beschrieben,

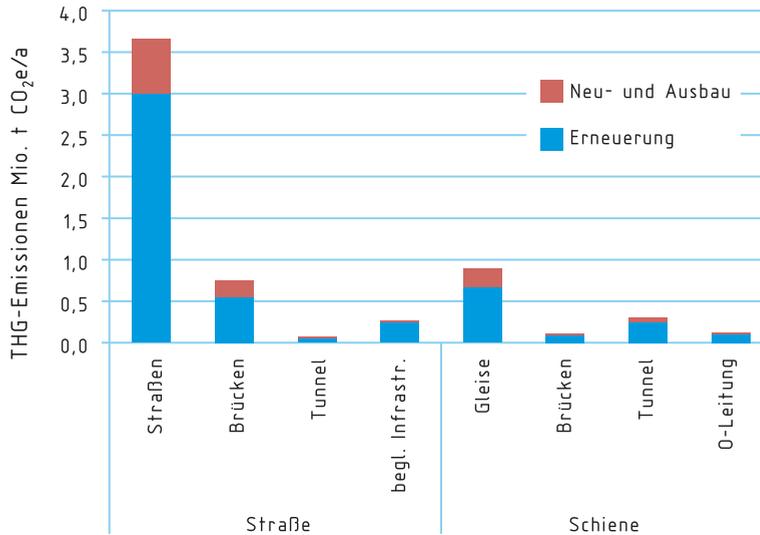
neue Charakterisierungsfaktoren für bestimmte Materialien Verwendung finden.

Die jährlichen Materialaufwendungen werden durch Straßenkörper dominiert. 83,5 % der errechneten Materialmengen von 87,8 Mio. t pro Jahr fließen in die Erneuerung sowie den Neu- und Ausbau, und dies in einem ungefähren Verhältnis von 3 : 1. Für alle anderen Bereiche sind Neu- und Ausbau noch weniger relevant im Vergleich zum Erneuerungsaufwand. Bei den Straßenverkehrsinfrastrukturen stechen besonders die straßenbegleitenden Infrastrukturen im Verhältnis von Erneuerungs- und Neubaufwand heraus. Einerseits ist dies dadurch zu begründen, dass nicht alle Straßen mit dem gleichen Maß an begleitender Infrastruktur ausgestattet werden. Gemeindestraßen zum Beispiel werden komplett ohne Leitplanken oder -pfosten angenommen. Andererseits werden den begleitenden Infrastrukturen geringere Lebensdauern unterstellt. Für die Schienenverkehrsinfrastruktur ist der Erneuerungsaufwand tendenziell noch stärker ausgeprägt. Dies liegt vor allem an den geringeren Neu- und Ausbauraten im Vergleich zum Straßenverkehr. Während für die Straßen ein Neubau von rund 10 % der aktuellen Streckenlängen geplant bzw. prognostiziert ist, ergibt die ausgewertete Netzausbauplanung der Schienen einen Zubau von knapp 2 % Streckenlänge bis 2030 bezogen auf das aktuelle Netz.

Die Ergebnisse der Wirkungsindikatoren sind in den folgenden Abbildungen für ein besseres visuelles Verständnis der Verhältnisse dargestellt. Abbildung 13 zeigt die prognostizierten Treibhausgas-Emissionen in Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr. Mit 59,5 % oder 3,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr der insgesamt 6,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr stellt auch bei Berechnung der Treibhausgas-Emissionen der Straßenbau den dominierenden Bereich dar, allerdings nicht ganz so stark wie bei den Materialmengen. Dafür haben Straßenbrücken mit 12,2 % und Gleise mit 14,4 % einen weitaus größeren Anteil an den ermittelten Gesamtemissionen. Neben den Straßenbrücken ist im Vergleich zu den Anteilen der Materialmenge auch die begleitende Straßeninfrastruktur mit einem Anteil von 4,3 % an den Gesamtemissionen und 0,1 % der Materialmenge auffallend. Für den Straßenbau fällt der Anteil für den Erneuerungsaufwand zu dem Neu- und Ausbau höher aus als bei den Materialmengen, für die Gleise gilt dies analog umgekehrt.

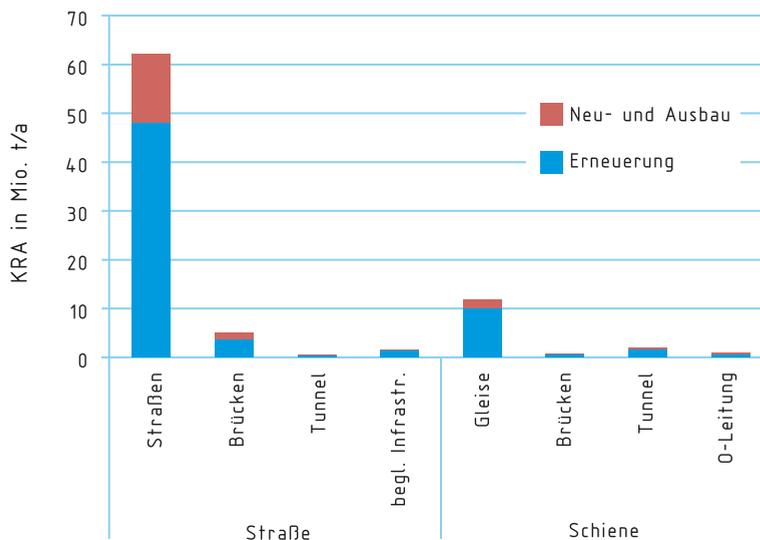
Tabelle 39: Ergebnisse für das BAU-Szenario für Materialmengen, THG, KRA und KEA nach Teilbereichen pro Jahr

|                                | Einheit  | Straße      |           |         |                 | Schiene    |           |           |           | Summe       |
|--------------------------------|----------|-------------|-----------|---------|-----------------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
|                                |          | Straßen     | Brücken   | Tunnel  | begl. Infrastr. | Gleise     | Brücken   | Tunnel    | 0-Leitung |             |
| Materialmenge Erneuerung       | 1000 t/a | 66.452      | 1.333     | 147     | 139             | 11.970     | 387       | 1.465     | 97        | 81.991      |
| Materialmenge Neu- und Ausbau  | 1000 t/a | 21.341      | 502       | 54      | 8               | 928        | 75        | 283       | 23        | 23.213      |
| Summe Materialmengen           | 1000 t/a | 87.793      | 1.835     | 201     | 147             | 12.898     | 462       | 1.747     | 121       | 105.204     |
| THG-Emissionen Erneuerung      | t/a      | 3.003.653   | 546.917   | 54.158  | 248.174         | 671.887    | 90.716    | 244.933   | 96.966    | 4.957.405   |
| THG-Emissionen Neu- und Ausbau | t/a      | 660.733     | 205.453   | 19.778  | 14.230          | 218.715    | 17.502    | 47.255    | 22.323    | 1.205.989   |
| Summe THG-Emissionen           | t/a      | 3.664.385   | 752.369   | 73.937  | 262.404         | 890.603    | 108.218   | 292.188   | 119.289   | 6.163.393   |
| KRA Erneuerung                 | t/a      | 48.084.059  | 3.637.366 | 366.770 | 1.387.940       | 10.144.364 | 588.442   | 1.710.617 | 659.602   | 66.579.159  |
| KRA Neu- und Ausbau            | t/a      | 14.074.307  | 1.367.138 | 133.943 | 78.283          | 1.663.078  | 113.529   | 330.030   | 186.017   | 17.946.325  |
| Summe KRA                      | t/a      | 62.158.365  | 5.004.505 | 500.713 | 1.466.223       | 11.807.442 | 701.971   | 2.040.647 | 845.618   | 84.525.484  |
| KEA Erneuerung                 | GJ/a     | 92.568.480  | 7.001.348 | 675.669 | 3.694.131       | 8.778.563  | 930.556   | 2.004.451 | 1.254.144 | 116.907.344 |
| KEA Neu- und Ausbau            | GJ/a     | 21.911.766  | 2.628.121 | 246.752 | 211.917         | 3.186.100  | 179.533   | 386.720   | 288.739   | 29.039.648  |
| Summe KEA                      | GJ/a     | 114.480.246 | 9.629.469 | 922.422 | 3.906.048       | 11.964.663 | 1.110.089 | 2.391.171 | 1.542.884 | 145.946.992 |



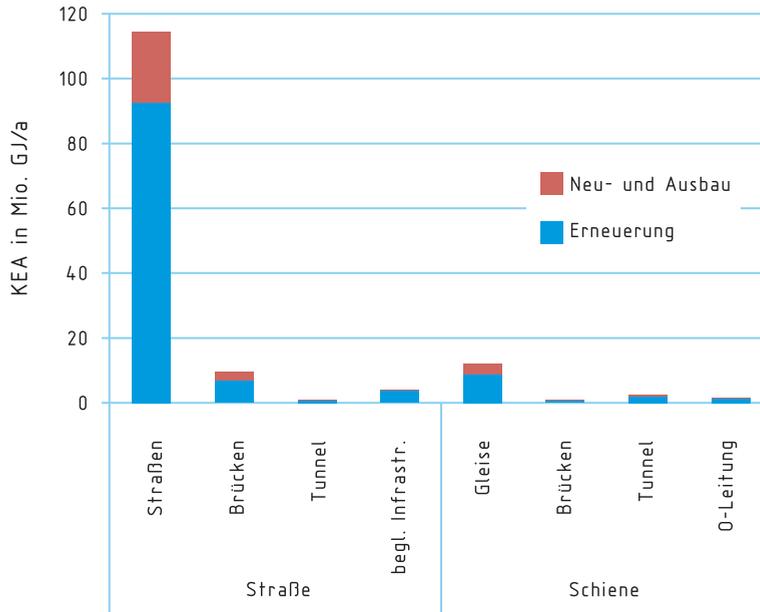
**Abbildung 13: Prognostizierte Treibhausgas-Emissionen durch Erneuerungsbedarf sowie Neu- und Ausbau pro Jahr bis 2030, eigene Darstellung**

Die prognostizierten Aufwände, ausgedrückt über den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA), sind in Abbildung 14 dargestellt. Der Bereich Straßen ist für diesen Wirkungsindikator noch vorherrschender. 76,3 Mio. t der insgesamt 98,7 Mio. t KRA/a oder 77,3 % fallen hier an. Die Gleise haben mit 12 % des Gesamtanteils ebenso eine herausgestellte Bedeutung, gefolgt von den Straßenbrücken mit 5,1 %. Im Vergleich zu den Treibhausgas-Emissionen ist der Neu- und Ausbauaufwand der Straßen anteilig am Erneuerungsaufwand, aber auch an den gesamten Aufwendungen (24,6 %), deutlich höher. Der Erneuerungsaufwand der Gleise fällt mit 83,8 % im Vergleich zu dem Neu- und Ausbauaufwand vergleichsweise hoch aus.



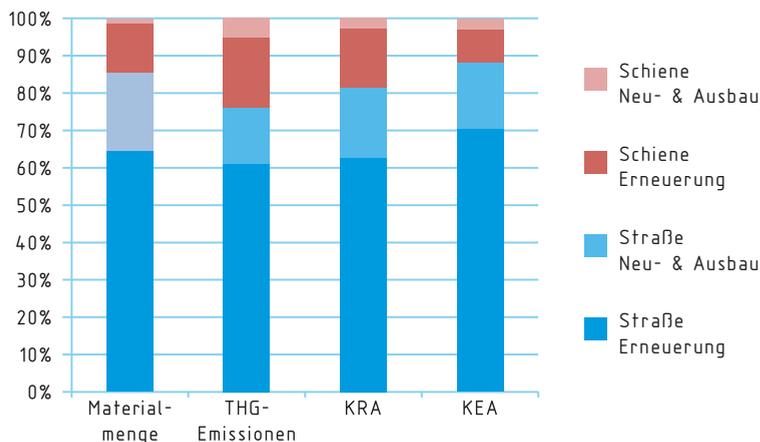
**Abbildung 14: Prognostizierter kumulierter Rohstoffaufwand durch Erneuerungsbedarf sowie Neu- und Ausbau pro Jahr bis 2030, eigene Darstellung**

Der in Abbildung 15 über die Bereiche dargestellte kumulierte Energieaufwand (KEA) weist in Summe 146,5 Mio. GJ/a auf. Davon entfallen 78,5 % bzw. 115,1 Mio. GJ/a auf die Straßenkörper, wobei das Verhältnis zwischen Erneuerung und Neu- und Ausbau rund 4 : 1 beträgt. Damit sind die Straßenkörper bei Betrachtung dieses Wirkungsindikators im Vergleich mit THG und KRA von höchster Relevanz. Gleise und Straßenbrücken sind mit Anteilen von 8,2 % und 6,6 % nicht sonderlich gewichtig. Straßenbegleitende Infrastrukturen und Gleistunnel spielen mit 2,7 % und 1,6 % eine untergeordnete Rolle, die anderen Bereiche haben jeweils einen Anteil kleiner 1 %.



**Abbildung 15: Prognostizierter kumulierter Energieaufwand durch Erneuerungsbedarf sowie Neu- und Ausbau pro Jahr bis 2030, eigene Darstellung**

Eine vergleichende Darstellung der Anteile von Erneuerungs- sowie Neu- und Ausbauaufwand der untersuchten Straßen- und Schienenverkehrsinfrastrukturen über die Materialmenge als auch die Wirkungsindikatoren bietet Abbildung 16. Wird das Verhältnis der Straßen- und Schieneninfrastrukturen nach den Wirkungsindikatoren herangezogen, haben die Straßenverkehrsinfrastrukturen mit 88 % insgesamt den höchsten Anteil bei Betrachtung des KEA. Die Schienenverkehrsinfrastruktur fällt bei der Berechnung der Treibhausgas-Emissionen mit insgesamt 23 % gegenüber der Straße am bedeutendsten aus. Wird das Verhältnis von Erneuerung und Neu- und Ausbau verglichen, ist der Neu- und Ausbauaufwand, über den KRA betrachtet, mit 24,6 % am höchsten.



**Abbildung 16: Vergleich der prozentualen Verteilung über Materialmengen sowie THG, KRA und KEA pro Jahr nach Erneuerung und Ausbau für Straßen- und Schieneninfrastruktur bis 2030, eigene Darstellung**

## 5.2 Szenario „Ressourceneffizienz“

Ausgehend von dem vorhergehend beschriebenen BAU-Szenario, werden für das Szenario „Ressourceneffizienz“ aus heutiger Sicht technisch mögliche und in ihrem Umfang quantifizierbare Potenziale ausgewählter Maßnahmen beschrieben. Dabei beinhaltet das Szenario im Wesentlichen drei Maßnahmen, für die das Effizienzpotenzial bis 2030 erfasst wird. Das Potenzial wird hierbei für die drei Wirkungsindikatoren THG-Emissionen, KRA und KEA in der jeweils maximalen Ausprägung ermittelt. Das heißt, jeder Effizienzmaßnahme wird aus heutiger Sicht das technisch maximal erreichbare Potenzial zugeschrieben. Die einzelnen Maßnahmen werden als unterscheidbare Szenaretten geführt, um das Potenzial jeder Maßnahme ersichtlich zu machen.

Die erste Szenarette „kein Hocheinbau“ beschreibt eine bundesweite Erneuerungsweise, bei der kein Hocheinbau mehr stattfindet. Dies hat einerseits Implikationen auf die insgesamt jährlich verbauten Mengen an Asphalt, andererseits werden aber auch, wie im Maßnahmenkapitel beschrieben, weitere Potenziale zur Sekundärrohstoffnutzung frei. Die Änderungen der jährlich verbauten Mengen Asphalt über diese Szenarette sind in Tabelle 40 in der mittleren Spalte aufgelistet. Zum Vergleich finden sich in

der gleichen Tabelle in der Spalte „BAU“ die Mengen des Baseline-Szenarios. Die Modellberechnungen zeigen, dass sich durch eine Vermeidung des Hocheinbaus der gesamte jährliche Asphaltbedarf im Straßenbau von 40,9 Mio. t auf 38,4 Mio. t reduziert. Gleichzeitig erhöht sich die Menge an Schichten, welche ausgetauscht werden, um 1,3 Mio. t von 29,2 auf 30,5 Mio. t. Wird für diese Zahlen das heutige Verhältnis von potenziell zur Verfügung stehendem RC-Asphalt (29,2 Mio. t) zu tatsächlich eingesetztem (10,3 Mio. t) angesetzt, ergibt sich bei gleichem Recyclingverhalten eine Recyclingquote von 28 %.

Die zweite Szenarette beschreibt, aufbauend auf dem Grundsatz der Erneuerung durch Tiefeinbau, die Hebung des maximalen Recyclingpotenzials aus den erneuerten Asphaltmengen. Nach den in Kapitel 4.4 beschriebenen Best-Practice-Beispielen zum Maximalrecycling wird hier von einem Recyclinggrad von 90 % der erneuerten Asphaltmengen ausgegangen. Mit einem absoluten Aufkommen von 27,4 Mio. t RC-Asphalt jährlich steigt die Quote von eingesetztem Sekundärmaterial auf 71% an.

Die Szenarette zu „effektiver Asphaltverarbeitung“ umschließt die in Kapitel 4.4.1 beschriebenen Maßnahmen zu energieeffizienten Asphaltmischanlagen und Kaltmischverfahren für Asphalt. Hier gibt es keine direkten Auswirkungen auf die benötigten Materialmengen oder deren Zusammensetzung. Der Energiebedarf bei der Herstellung und Verarbeitung wird gesenkt, was sich über die Lebenswegbetrachtung in den Charakterisierungsfaktoren der Wirkungsindikatoren niederschlägt.

Die Szenaretten bauen aufeinander auf, so dass die Auswirkungen der ersten Maßnahme auf den Materialaufwand auf die zweiten und dritten Szenarette übertragen werden. Gleiches gilt für die Auswirkungen der zweiten Szenarette und den Übertrag auf die dritte. Aufgrund der aufeinander aufbauenden Gestaltung gibt es Interdependenzen zwischen den Szenaretten. Alleinstehend weisen die Szenaretten „max. Recycling“ und „effektive Asphaltverarbeitung“ daher andere Potenziale auf als hier in Verbindung mit den jeweils vorhergehenden aufgeführt sind. Für die Szenarette des maximalen Recyclings z. B. ergeben sich mit dem Hocheinbau andere Asphaltmengen im Gesamteinsatz als auch andere für das Recycling verfügbare Mengen.

**Tabelle 40: Jährliche Asphaltmengen der einzelnen Szenaretten**

|                      | BAU      | kein Hochbau | kein Hochbau, max Recycling |
|----------------------|----------|--------------|-----------------------------|
|                      | 1000 t/a | 1000 t/a     | 1000 t/a                    |
| Asphalt-DE           | 11.222   | 11.223       | 11.223                      |
| Asphalt-BI           | 6.337    | 6.830        | 6.830                       |
| Asphalt-TR           | 11.649   | 12.429       | 12.429                      |
| TR Hocheinbau        | 3.801    | 0            | 0                           |
| Summe Erneuerung     | 33.009   | 30.483       | 30.483                      |
| Neubaubedarf         | 7.900    | 7.900        | 7.900                       |
| Summe Gesamt         | 40.909   | 38.383       | 38.383                      |
| Asphalt sek. absolut | 10.300   | 10.749       | 27.434                      |
| Asphalt sek. relativ | 25%      | 28%          | 71%                         |

In Tabelle 41 sind die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Wirkungsindikatoren THG-Emissionen, KRA und KEA differenziert nach den drei Szenaretten dargestellt. Die Spalten ermöglichen die Unterscheidungen in die Sektoren Straßen- und Schienenverkehrsinfrastruktur als auch eine weitere Unterteilung in die Bereiche. So werden die Straßenverkehrsinfrastrukturen weiter gegliedert in Straßen, Brücken, Tunnel und begleitende Infrastrukturen. Die Schienenverkehrsinfrastrukturen werden ihrerseits in Gleise, Anlagen zur Energieversorgung, Brücken und Tunnel unterteilt. So lässt sich für die drei Effizienzschritte in jedem der erfassten Bereiche die Reduktion der Indikatorergebnisse erfassen. Da die ausgewählten Effizienzmaßnahmen ausschließlich den Straßenbau betreffen, sind die anderen Bereiche von den Szenaretten nicht betroffen.

Bezüglich der THG-Emissionen zeigt sich ein maximales Reduktionspotenzial von 18,1 % bezogen auf die jährlichen 3,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen des Straßenbaus. Hiervon tragen die Effizienzmaßnahme „kein Hocheinbau“ 4,5 %, das „maximale Asphaltrecycling“ 9,3 % und die „effektive Asphaltverarbeitung“ weitere 4,4 %. Bezogen auf die insgesamt für den Straßen- und Schienenverkehr erhobenen Indikatorergebnisse wird eine Minderung um maximal 10,8 % von 6,2 auf 5,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen pro Jahr berechnet.

Die Ergebnisse der Effizienzmaßnahmen bezogen auf den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA) zeigen im Verhältnis zu

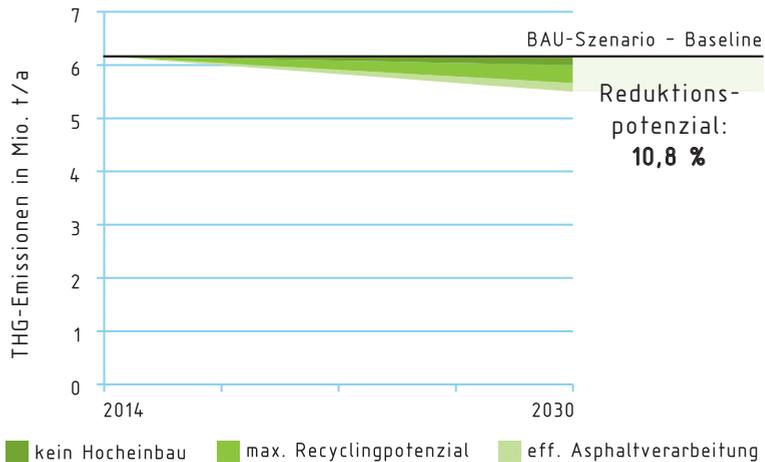
den Treibhausgas-Emissionen eine höhere Wirkmächtigkeit. Hinsichtlich des Straßenbaus ist eine maximale Reduktion der 76,3 Mio. t KRA pro Jahr um 26,8 % ermittelt worden, wobei das Verhältnis der Beiträge zwischen den Szenaretten mit 22,6 % durch das max. Asphaltrecycling dominiert wird. Die Vermeidung von Hocheinbau führt zu einer möglichen Minderung um 4,1 %. Die effiziente Asphaltverarbeitung trägt einen vernachlässigbaren Anteil von 0,1 %. Für die Summe der Indikatorergebnisse des KRA lässt sich eine maximale Senkung von 98,7 auf 78,2 Mio. t KRA pro Jahr um 20,7 % feststellen.

Die Potenziale des kumulierten Energieaufwandes (KEA) zeigen ähnliche Spannweiten wie die des KRA auf, obwohl gemeinhin eher eine Korrelation mit den THG-Emissionen zu erwarten wäre. Wird nur der Straßenbau betrachtet, so lässt sich über die drei Szenaretten eine Reduktion der 115,1 Mio. GJ pro Jahr um 44,4 % aufzeigen. Die Vermeidung von Hocheinbau kann dabei in einem ersten Schritt eine Minderung von 6,7 % erreichen. Das maximale Asphaltrecycling überwiegt auch hier mit 35,7 %, die effektive Asphaltverarbeitung steuert einen kleineren Teil mit 2 % des Reduktionspotenzials bei. Die für Straßen- und Schienenverkehrsinfrastruktur insgesamt ermittelten 146,5 Mio. GJ pro Jahr gehen bei Erschließung der theoretischen Potenziale um 34,9 % zurück auf 95,5 Mio. GJ pro Jahr.

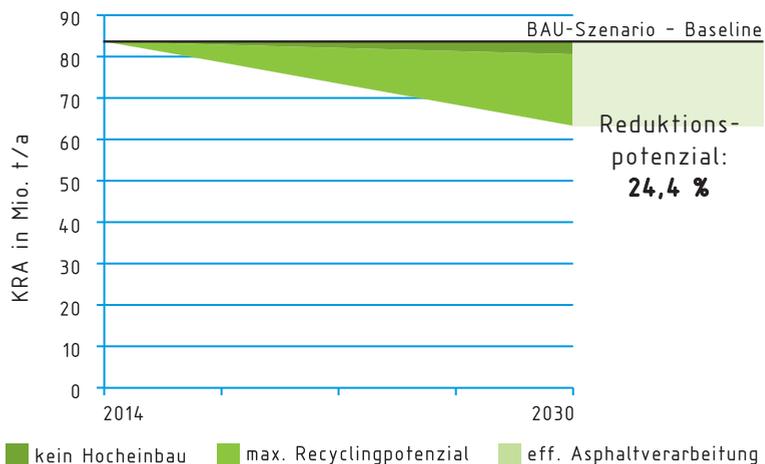
**Tabelle 41: Ergebnisse der verschiedenen Effizienzmaßnahmen über die Wirkungsindikatoren, differenziert nach Bereichen der Infrastrukturen**

|                | Einheit                  | Straßen     |           |         |                 | Schienen   |                   |           |           | Summe       |
|----------------|--------------------------|-------------|-----------|---------|-----------------|------------|-------------------|-----------|-----------|-------------|
|                |                          | Straßen     | Brücken   | Tunnel  | begl. Infrastr. | Gleise     | Energieversorgung | Brücken   | Tunnel    |             |
| THG-Emissionen | BAU                      | 3.664.385   | 752.369   | 73.937  | 262.404         | 890.603    | 119.289           | 108.218   | 292.188   | 6.163.393   |
|                | kein Hocheinbau          | 3.500.962   | 752.369   | 73.937  | 262.404         | 890.603    | 119.289           | 108.218   | 292.188   | 5.999.970   |
|                | max. Asphalt-recycling   | 3.158.902   | 752.369   | 73.937  | 262.404         | 890.603    | 119.289           | 108.218   | 292.188   | 5.657.910   |
| KRA            | eff. Asphaltverarbeitung | 2.999.113   | 752.369   | 73.937  | 262.404         | 890.603    | 119.289           | 108.218   | 292.188   | 5.498.121   |
|                | BAU                      | 62.158.365  | 5.004.505 | 500.713 | 1.466.223       | 11.807.442 | 701.971           | 2.040.647 | 845.618   | 83.679.866  |
|                | kein Hocheinbau          | 59.040.421  | 5.004.505 | 500.713 | 1.466.223       | 11.807.442 | 701.971           | 2.040.647 | 845.618   | 80.561.921  |
| KEA            | max. Asphalt-recycling   | 41.774.070  | 5.004.505 | 500.713 | 1.466.223       | 11.807.442 | 701.971           | 2.040.647 | 845.618   | 63.295.571  |
|                | eff. Asphaltverarbeitung | 41.722.340  | 5.004.505 | 500.713 | 1.466.223       | 11.807.442 | 701.971           | 2.040.647 | 845.618   | 63.243.841  |
|                | BAU                      | 114.480.246 | 9.629.469 | 922.422 | 3.906.048       | 11.964.663 | 1.542.884         | 1.110.089 | 2.391.171 | 145.946.992 |
| KEA            | kein Hocheinbau          | 106.779.437 | 9.629.469 | 922.422 | 3.906.048       | 11.964.663 | 1.542.884         | 1.110.089 | 2.391.171 | 138.246.183 |
|                | max. Asphalt-recycling   | 65.756.558  | 9.629.469 | 922.422 | 3.906.048       | 11.964.663 | 1.542.884         | 1.110.089 | 2.391.171 | 97.223.304  |
|                | eff. Asphaltverarbeitung | 63.405.966  | 9.629.469 | 922.422 | 3.906.048       | 11.964.663 | 1.542.884         | 1.110.089 | 2.391.171 | 94.872.712  |

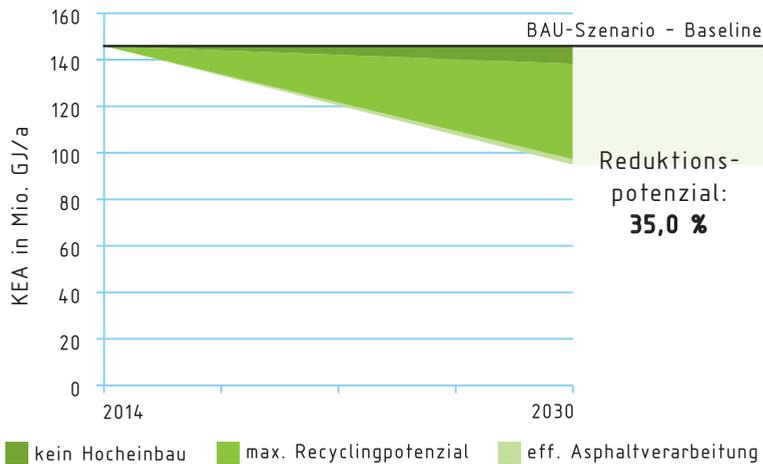
Die folgenden Abbildungen dienen der Veranschaulichung des Reduktionspotenzials bis 2030 über die drei Szenaretten. Dabei wird das theoretisch maximal mögliche Ressourceneffizienzpotenzial bis 2030 abgebildet und über die Zeit linear interpoliert. Somit kann einerseits veranschaulicht werden, dass die Umsetzung der Maßnahmen nur schrittweise erfolgen kann. Andererseits werden die maximal möglichen Reduktionspotenziale, für die einzelnen Maßnahmen und insgesamt, veranschaulicht.



**Abbildung 17: Reduktionspotenzial der THG-Emissionen durch Effizienzmaßnahmen bis 2030 bei maximaler Umsetzung, eigene Darstellung**



**Abbildung 18: Reduktionspotenzial des KRA durch Effizienzmaßnahmen bis 2030 bei maximaler Umsetzung, eigene Darstellung**



**Abbildung 19: Reduktionspotenzial des KEA durch Effizienzmaßnahmen bis 2030 bei maximaler Umsetzung, eigene Darstellung**

### 5.2.1 Ergebnisdiskussion

Das Szenario „Ressourceneffizienz“ spannt über drei aufeinander aufbauende Maßnahmen ein theoretisches, aus heutiger Sicht technisch leistbares, maximales Ressourceneffizienzscenario für diese Maßnahmen auf. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf einer mengenmäßigen und damit ökologischen Betrachtung. Ökonomische Effekte werden im Rahmen der Maßnahmenbeschreibungen in Kapitel 4.4 dargestellt. Die folgende Diskussion soll für die Maßnahmen „Vermeidung Hocheinbau“ und „Maximalrecycling“ aufzeigen, wie sich das theoretische Potenzial zur Praxis verhält und in welchem Möglichkeitsraum sich die Umsetzung der Potenziale bewegt.

Die Auswertung des Ressourceneffizienzscenario zeigt, dass sich durch eine Vermeidung von Hocheinbau die Gesamtnachfrage von Asphalt reduzieren lässt. Dass dies bei der Betrachtung von Ressourceneffizienz durchweg positiv zu betrachten ist, bedarf keiner weiteren Erklärung. Bei der Maßnahmenbeschreibung in Kapitel 4.4 wurde jedoch bereits darauf hingewiesen, dass diese Art der Erneuerung die zurzeit prominente ist, soweit die örtlichen Gegebenheiten nicht dagegen sprechen – vor allem, da sie wirtschaftlicher ist als der Tiefenbau. Mit der RStO 12 wurde nicht nur die offizielle Bezeichnung zu „Erneuerung auf

vorhandener Befestigung“ gewechselt, es werden auch neue Anforderungen gestellt.

Grundsätzlich soll eine fundierte Bewertung der vorhandenen Bausubstanz erfolgen, bevor eine Erneuerung auf vorhandener Befestigung stattfindet. Gegebenenfalls ist dann eine Dimensionierung der aufzutragenden Schichtdicken nach den „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht“ (RDO-Asphalt) erforderlich. Auch gilt es, die neuen „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen - Asphaltbauweisen“ (ZTV BEA-StB 09/13) zu berücksichtigen. Daraus wird geschlossen, dass damit dem Hocheinbau als einfache und pauschale Erneuerungsmaßnahme nicht vollständig entsprochen und eine bedarfsgerechtere Erneuerung gefordert wird. Vor allem vor dem Hintergrund der geringeren Kosten im Vergleich zum Tiefeinbau ist mittelfristig und auch bis 2030 nicht zu erwarten, dass der Hocheinbau eine untergeordnete Rolle bei der Erneuerung spielen wird, wenn nicht zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, um diesen Wandel aktiv zu gestalten. Wird der Hocheinbau vermieden oder vermindert, ändert sich damit auch automatisch die theoretisch zur Verfügung stehende Menge an Straßenaufbruch zur Herstellung von Sekundärrohstoffen.

Das größte Potenzial weist das Maximalrecycling auf. Das aufgezeigte Reduktionspotenzial muss jedoch zweigeteilt diskutiert werden. Zum einen besteht der Effekt der Maßnahme an sich, dass 90 % des Straßenaufbruchs eine gleichwertige Wiederverwendung finden. Auch wenn die Recyclingquote nach offiziellen Zahlen bereits bei knapp 90 % liegt, findet dabei meist eine seichte Art von down-cycling statt, wobei der gewonnene Straßenaufbruch aus den oberen (qualitativ hochwertigeren) Schichten meist in den Tragschichten mit verbaut wird. Bei einem drastischen Anstieg des verfügbaren RC-Materials muss aber auch Sekundärmaterial in der Binde- und Tragschicht mit hohen Anteilen Anwendung finden können. Dem entgegen stehen Regelwerke, welche qualitätsbedingt Maximalanteile zwischen 20 % und 60 % für Sekundärmaterialien in den verschiedenen Asphaltsschichten vorschreiben. Bei einem theoretischen Sekundärmix von über 70 %, wie er in dem

Ressourceneffizienzscenario aufgezeigt wird, könnte dieser über die bestehenden Regelwerke also nicht in dem verfügbaren Maß Anwendung finden. Des Weiteren bleibt zu beobachten, wie die Performance der Pilotstrecken auf mittlere und lange Sicht aussieht.

Der zweite Aspekt betrifft die Hebung und das Verfügbarmachen von Straßenaufbruch zum Recycling. Nach den Modellrechnungen entsteht schon heute mit bestehendem Hocheinbau ein Bedarf an 29 Mio. t Asphalt pro Jahr über die Erneuerung von Deck-, Binde- und Tragschichten des Straßenbestands (siehe Tabelle 40). Die nach offiziellen Statistiken erfassten Mengen an Asphalt belaufen sich auf 11,5 Mio. t pro Jahr. Hier besteht offensichtlich eine große Diskrepanz zwischen dem erfassten Material und dem potenziell verfügbaren.

Die großen Potenziale der Maßnahme lassen sich zum Großteil auf die Schließung dieser Lücke zurückführen, da die offiziellen Recyclingquoten schon bei knapp 90 % liegen. Wie diese Diskrepanz auch mit Berücksichtigung des Hocheinbaus zu Stande kommt, bleibt zu klären. Eine These wäre, dass der Hocheinbau in deutlich größerem Maße stattfindet, als über das Modell dargestellt. Dies erscheint eher unplausibel, weil die Erneuerungsmaßnahmen im Hocheinbau bereits sehr umfangreich abgeschätzt wurden. Eine alternative These lautet, dass eine erhebliche Menge des ausgebauten Asphalts vor Ort verbleibt und in Form eines klassischen down-cyclings in ungebundene Schichten eingebracht und so nicht über Statistiken erfasst wird.

Grundsätzlich wird noch erwähnt, dass sich sämtliche Berechnungen nur auf die Herstellung und Verarbeitung der Materialien beziehen und zum Beispiel keine Transporte erfasst wurden.

## 6 DISKUSSION VON EFFIZIENZPOTENZIALEN IN DEN TEILSEKTOREN STRASSE UND SCHIENE

Das BAU-Szenario für die Teilsektoren Straße und Schiene hat gegenüber der Inventarisierung des Tiefbaus im Bestand (Kapitel 3) gezeigt, dass viele Recyclingaktivitäten bereits heute durchgeführt werden. Historisch gesehen ist die erste Ausstattung der Infrastruktur aus Primärmaterial erfolgt. Inzwischen ist die Erweiterung der Infrastruktur gegenüber der Instandhaltung von geringer Bedeutung. Damit besteht die Möglichkeit, bei Instandhaltungsmaßnahmen das existierende Primärlager zu nutzen. Da der Aufwand zur Instandhaltung in Relation zum Neubau in Zukunft stetig steigen wird, wird die Nutzung von Sekundärmaterialien bzw. das Recycling wachsen.

Dies bedeutet, dass leicht erschließbare Effizienzpotenziale („low hanging fruits“) bereits realisiert wurden oder aktuell noch werden. Im Sinne der Ressourcenschonung empfiehlt es sich, das bestehende Recyclingniveau zu halten. Die schichtgenaue Entnahme von Altasphalt und damit die Vermeidung von downcyclings sind Beispiele hierfür. Weiterhin gilt es, das Recyclingniveau weiter zu steigern und verbleibende Effizienzpotenziale zu erschließen. Mit steigendem Recyclingniveau ergeben sich allerdings auch Zielkonflikte zwischen Ökonomie und Ökologie. Anschauliches Beispiel ist die beschriebene Maßnahme „Vermeidung Hocheinbau“. Während aus Ressourcensicht die vollständige Entnahme des Straßenkörpers vorzuziehen ist, sind aus Kostengründen der Hocheinbau und damit die nur teilweise Entnahme der Schichten von Vorteil.

Darüberhinaus liegt es nahe, eine Steigerung des Recyclingniveaus durch eine Änderung und Weiterentwicklung der technischen Regelwerke zu begleiten. Dazu gehören u. a. vorausschauende Forschung, die Förderung von Pilotvorhaben sowie deren wissenschaftliche Begleitung sowohl in der Erstellungsphase als auch durch ein anschließendes Monitoring. Als Beispiel hierzu seien die Pilotvorhaben zum Maximalrecycling genannt. Darüber hinaus sind die Diskussion und Dissemination der Ergebnisse wichtige Schritte, um die beteiligten Akteure zu sensibilisieren.

Die **Öffentliche Hand** ist auf den verschiedenen Ebenen **Hauptnachfrager** (direkt oder indirekt durch Public Private

Partnership) von Verkehrsinfrastruktur und damit gleichzeitig maßgeblicher Hauptakteur. Maßnahmen, die schon in der Ausschreibung berücksichtigt werden sollten, betreffen allgemeine Vorgaben zum Einsatz von Recyclingmaterial ebenso wie ein präziser, d. h. schichtgenauer Ausbau von Altasphalt. Insofern ist es grundlegend, alle beteiligten Akteure und Entscheidungsträger für die Bedeutung der Thematik Ressourceneffizienz zu sensibilisieren.

Grundlegende Prämisse bei Ausschreibungen ist die Finanzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Sind ressourcenschonende Bauweisen, wie zum Beispiel das schichtgenaue Abfräsen und Transportieren der einzelnen Asphaltsschichten, um ein hochwertiges Recycling zu garantieren, unwirtschaftlicher als ein verhältnismäßig ressourcenintensiver Hocheinbau, wird meist die kostengünstigere Alternative gewählt. Kommunen und Landkreise haben jedoch die Möglichkeit, Fördermittel für Straßenbaumaßnahmen aus Bundeshand zu erhalten. Rechtliche Grundlagen dafür sind z.B. das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz bzw. das Entflechtungsgesetz. Ein Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz wäre es, die Mittelvergabe hierüber nur für ressourcenschonende Bauweisen zu ermöglichen.

Insgesamt sollte die **Akzeptanz von Recyclingmaterial** gesteigert werden. Da der Preis von Recyclingmaterial gegenüber Primärmaterial nur geringe Unterschiede aufweist, ist dieser allein nichtausschlaggebend bei der Entscheidung für Recyclingbaustoffe. Die aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz indirekt hervorgehende Prämisse, dass frei verfügbares Recyclingmaterial gegenüber Primärmaterial vom Anwender bevorzugt wird, kann daher für Massenbaustoffe nicht vorausgesetzt werden. Um die Verwendung von Recyclingmaterial zu fördern, empfiehlt es sich, die Vorteile dieser Baustoffe deutlicher herauszustellen.

Die bisher aufgeführten Beispiele haben gezeigt, dass Recycling immer dann von Vorteil ist, wenn Einsparungen bei logistischen Aufwendungen zusätzliche Belastungen überwiegen. Dies wird am Beispiel des hohen Anteils des In-situ-Recyclings ungebundener Schichten bei der Sanierung von Bundesautobahnen ebenso deutlich wie bei der Anwendung des Kaltrecyclings.

Trotz der grundsätzlichen Hervorhebung der Vorteile von Recyclingmaterial dürfen allgemeine Regeln des Umweltschutzes (z. B. Gewässerschutz) nicht vernachlässigt werden. Dazu zählt auch, das abfallwirtschaftliche Prinzip, Vermischungen zu vermeiden, nicht aufzuweichen. Es bedarf einer regelmäßigen Diskussion existierender Regelwerke.

Grundsätzlich ist die Bewertung des Recyclings eines Materials fallabhängig. Es wird dabei immer angestrebt, ein möglichst hochwertiges Recycling zu erzielen („Gleiches zu Gleichem“). Statt der ausschließlichen Fokussierung auf den fallspezifischen Ansatz ist es empfehlenswert, auch eine Nutzung von Recyclingmaterial **im erweiterten Betrachtungsraum** als Lösungsansatz heranzuziehen. Damit ist beispielsweise die Einbeziehung des gesamten Bausektors aus Hoch- und Tiefbau gemeint.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

AGRU Kunststofftechnik GmbH (2013). AgruLine - piping systems for natural gas, water and sewage, Bad Hall. Verfügbar unter [https://web.archive.org/web/20131203063033/http://www.agru.at/uploads/tx\\_bfbrochures/AgruLine\\_en\\_Ansicht.pdf](https://web.archive.org/web/20131203063033/http://www.agru.at/uploads/tx_bfbrochures/AgruLine_en_Ansicht.pdf), zuletzt abgerufen am 28.01.2015.

Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren (ATT); Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW); Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft (DBVW); Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA); Verband kommunaler Unternehmen (VKU) (2011). Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2011. Bonn: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft. Verfügbar unter [http://de.dwa.de/tl\\_files/\\_media/content/PDFs/Abteilung\\_AuG/WEB-Branchenbild-dt-wasserwirtschaft-2011.pdf](http://de.dwa.de/tl_files/_media/content/PDFs/Abteilung_AuG/WEB-Branchenbild-dt-wasserwirtschaft-2011.pdf), zuletzt abgerufen am 29.01.2015.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2010). Öffentliche Trinkwasserversorgung - Trinkwasserherkunft. Verfügbar unter [www.lfu.bayern.de/wasser/trinkwasserversorgung\\_oeffentlich/trinkwasserherkunft/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/wasser/trinkwasserversorgung_oeffentlich/trinkwasserherkunft/index.htm), zuletzt abgerufen am 28.01.2015.

Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden e.V. (2013). Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2030 in Deutschland. Berlin.

Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH; Intraplan Consult GmbH ((2010). Überprüfung des Bedarfsplans für die Bundesschienenwege. Verfügbar unter [www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Internetredaktion/schlussbericht-schienen-de.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Internetredaktion/schlussbericht-schienen-de.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt abgerufen am 05.02.2015.

Berger, C. & Falk, C. (2011). Zustand der Kanalisation in Deutschland. Ergebnisse der DWA-Umfrage 2009. Korrespondenz Abwasser, Abfall (KA) (1), S. 26 - 41. Verfügbar unter [http://de.dwa.de/tl\\_files/\\_media/content/PDFs/Abteilung\\_AuG/Zustand-der-Kanalisation-in-Deutschland-2009.pdf](http://de.dwa.de/tl_files/_media/content/PDFs/Abteilung_AuG/Zustand-der-Kanalisation-in-Deutschland-2009.pdf), zuletzt abgerufen am 29.01.2015.

Berger, C. & Lohaus, J. (2003). Zustand der Kanalisation in Deutschland. ATV-DVWK. Hennef.

Blomberg, T.; Barnes, J.; Bernard, F.; Dewez, P.; Le Clerc, S.; Pfitzmann, M.; Porot, L.; Southern, M. & Taylor, R. (2012). LIFE CYCLE INVENTORY: BITUMEN. European Bitumen Association (Hrsg.). Brüssel, Belgien: Total; Eurobitume; Shell; BP; Petroplus.

Brakelmann, H. (2004). Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel? (Universität Duisburg-Essen, Hrsg.), Rheinberg. Verfügbar unter [www.ets.uni-duisburg-essen.de/download/public/Freileitung\\_Kabel.pdf](http://www.ets.uni-duisburg-essen.de/download/public/Freileitung_Kabel.pdf), zuletzt abgerufen am 27.01.2015.

- Buchmann, A. (2005). Feste Fahrbahn und Lärm - Gibt es hier Lösungen? Verfügbar unter [www.dlr.de/ts/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/Vortrag\\_Buchmann\\_051006.pdf](http://www.dlr.de/ts/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/Vortrag_Buchmann_051006.pdf), zuletzt abgerufen am 05.02.2015.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014). Deutschland - Rohstoffsituation 2013, Hannover.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2014). Feldversuch mit Lang-Lkw. Zwischenbericht, Bergisch Gladbach.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2015). Fachthema: Wiederverwendung von Asphaltbefestigungen, BASt. Verfügbar unter <http://www.bast.de/DE/FB-S/Fachthemen/s3-wiederverwendung/s3-wiederverwendung.html?nn=605006>, zuletzt abgerufen am 10.02.2015.
- Bundesministerium der Finanzen (1995). AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Energie- und Wasserversorgung". Verfügbar unter [www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Stuern/Weitere\\_Steuertemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/1995-01-24-afa-24.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Stuern/Weitere_Steuertemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/1995-01-24-afa-24.pdf?__blob=publicationFile&v=1), zuletzt abgerufen am 28.01.2015.
- Bundesministerium des Innern (2009). Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen. KRITIS Strategie. Verfügbar unter [www.bmi.bund.de/cae/servlet/contentblob/544770/publicationFile/27031/kritis.pdf](http://www.bmi.bund.de/cae/servlet/contentblob/544770/publicationFile/27031/kritis.pdf), zuletzt abgerufen am 14.01.2015.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2012a). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Verfügbar unter [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/progress\\_broschuere\\_de\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf), zuletzt abgerufen am 27.01.2015.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2012b). Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material, Entwurf 31.10.2012.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010a). Aktionsplan Güterverkehr und Logistik. Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010b). Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2010. Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2013). Maßnahmen zur Lärmsanierung als Baustein der Lärminderung an bestehenden Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes. Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014a). Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014b). Grundkonzeption für den Bundesverkehrswegeplan 2015. bedarfsgerecht - transparent - herausfordernd, Bonn.

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014c). Investitionen in die Bundesfernstraßen. Verfügbar unter [www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrstraeger/Strasse/NeubauVonAutobahnen/neubau-von-autobahnen\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrstraeger/Strasse/NeubauVonAutobahnen/neubau-von-autobahnen_node.html), zuletzt abgerufen am 15.02.2015.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014d). Neubau und Erweiterung von Bundesautobahnen – Stand: 1. Januar 2014. gemäß Bedarfsplan für die Bundesfernstraßen. Verfügbar unter [www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/neubau-und-erweiterung-von-bundesautobahnen-karte-und-tabelle.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/neubau-und-erweiterung-von-bundesautobahnen-karte-und-tabelle.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt abgerufen am 15.02.2015.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2013). Primärenergieverbrauch in Deutschland 2013. Verfügbar unter [www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-energiegewinnung-energieverbrauch.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf](http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-energiegewinnung-energieverbrauch.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf), zuletzt abgerufen am 19.02.2015.
- Bundesnetzagentur (2013). Tätigkeitsbericht – Telekommunikation 2012/2013, zuletzt abgerufen am 02.02.2015.
- Bundesnetzagentur (2014). Monitoringbericht 2013, Bonn. Verfügbar unter [www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2013/131217\\_Monitoringbericht2013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=15](http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2013/131217_Monitoringbericht2013.pdf?__blob=publicationFile&v=15), zuletzt abgerufen am 01.10.2014.
- Bundesregierung (2002). Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung: Perspektiven für Deutschland. Verfügbar unter [http://www.bundesregierung.de/Content/DE/\\_Anlagen/2006-2007/perspektiven-fuer-deutschland-langfassung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2006-2007/perspektiven-fuer-deutschland-langfassung.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt aufgerufen am 27.01.2015.
- Daehre, K.-H. (Kommission “Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung”, Hrsg.) (2012). Bericht der Kommission “Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung”. Verfügbar unter [www.muenchen.ihk.de/de/standortpolitik/Anhaenge/abschlussbericht-daehre-kommission.pdf](http://www.muenchen.ihk.de/de/standortpolitik/Anhaenge/abschlussbericht-daehre-kommission.pdf), zuletzt abgerufen am 24.09.2014.
- Dehoust, G.; Bleher, D. & Bergmann, T. (2014). Recyclingbaustoffe in Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.). Öko-Institut e. V. Freiburg/Darmstadt/Berlin.
- DEKRA (2013). Verkehrssicherheitsreport 2013 Landstraßen – Broschüre. Strategien zur Unfallvermeidung auf den Straßen Europas, Stuttgart.
- Deutscher Asphaltverband e. V. (2009). Temperaturabgesenkte Asphalte.
- Deutscher Asphaltverband e. V.(2014). Wiederverwenden von Asphalt. Nachhaltigkeit auf höchstem Niveau. Überarbeitung 2014.
- Deutsche Bahn AG/DB Mobility Logistics (2013). Unterwegs ins Grüne. Die Deutsche Bahn wird bis 2020 Umwelt-Vorreiter und setzt sich dafür ehrgeizige Ziele: weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen, weniger Lärmbelastung und höhere Effizienz. Fakten. Informationen für Journalisten 11/2013.

- Deutsche Bahn AG (2014a). Geschäftsbericht 2013, Berlin.
- Deutsche Bahn AG (2014b). Bahn startet größtes Modernisierungsprogramm der Infrastruktur: 2015 fließen rund 5,3 Milliarden Euro ins bestehende Schienennetz, DB. Verfügbar unter [www.deutschebahn.com/de/presse/presseinformationen/pi\\_it/8577046/ubd20141208.html](http://www.deutschebahn.com/de/presse/presseinformationen/pi_it/8577046/ubd20141208.html), zu-letzt abgerufen am 14.02.2015.
- Deutsche Telekom AG (2007). Geschäftsbericht 2006, Bonn.
- Deutscher Bundestag (2014). Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2012. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Drucksache 18/580.
- Deutscher Naturschutzring EU-Koordination (2011). Schärfere Auflagen für das Biozid Kreosot. Verfügbar unter [www.eu-koordination.de/umweltnews/news/chemie/1005-schaerfere-auflagen-fuer-das-biozid-kreosot](http://www.eu-koordination.de/umweltnews/news/chemie/1005-schaerfere-auflagen-fuer-das-biozid-kreosot), zuletzt abgerufen am 09.02.2015.
- Deutsches TalsperrenKomitee (2001). Talsperren in der Welt. Verfügbar unter [www.talsperrenkomitee.de/interessantes\\_ueber\\_talsperren/talsperrenbestand\\_weltweit.htm](http://www.talsperrenkomitee.de/interessantes_ueber_talsperren/talsperrenbestand_weltweit.htm), zuletzt abgerufen am 29.01.2015.
- Deutsches TalsperrenKomitee (2003). Journalistenhandbuch zum Wasserbau. Verfügbar unter <http://talsperrenkomitee.de/pdf/allgemein/journalistenhandbuch.pdf>, zuletzt abgerufen am 29.01.2015.
- Distelkamp, M.; Großkamp, A.; Hohmann, F.; Lutz, C.; Ulrich, P. & Wolter, M. I. (2009). PANTA RHEI REGIO Ein Modellsystem zur Projektion der künftigen Flächeninanspruchnahme in Deutschland und zur Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen. Osnabrück: Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (gws).
- European Asphalt Pavement Association (ed.) (2013). Asphalt in figures 2012.
- Eickschen, E. (05.11.2014). Hüttensandzemente im Tiefbau (persönlich).
- Empelmann, M.; Busse, D.; Hamm, S.; Girmscheid, M. & Zedler, T. (2012). Strengthening of box girders using adaptive "tube-in-tube" concepts. 6th Conference on bridge maintenance, safety and management, Lake Como, Italy.
- Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK (2013). AGFW - Hauptbericht 2012, Frankfurt am Main. Verfügbar unter [www.agfw.de/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes\\_menu/zahlen\\_und\\_statistiken/Version\\_1\\_HB2012.pdf&t=1422546014&hash=859e5df7e95f93e707c1c0479ad2e6b79948420](http://www.agfw.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes_menu/zahlen_und_statistiken/Version_1_HB2012.pdf&t=1422546014&hash=859e5df7e95f93e707c1c0479ad2e6b79948420), zuletzt abgerufen am 28.01.2015.
- Euwid (2014). Zementindustrie: SBS-Einsatz 2013 nochmals gestiegen. EUWID Recycling und Entsorgung 40.2014.
- Fischer, M. (2012). Wetterfester Baustahl. Merkblatt 434 (Stahl-Informations-Zentrum, Hrsg.), Düsseldorf.
- Fliegl, H. (2014). Asphaltbau - aber richtig. Mit moderner Technik frühzeitige Straßenschäden bereits beim Asphalt-Einbau vermeiden. Weimarer Asphalttag. Verfügbar unter [www.hutschenreuther.de/PDF/Fliegl%20Asphaltau\\_Weimarer%20Asphalttag\\_96dpi.pdf](http://www.hutschenreuther.de/PDF/Fliegl%20Asphaltau_Weimarer%20Asphalttag_96dpi.pdf), zuletzt abgerufen am 10.02.2015.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) (2015). Elektrodynamische Fragmentierung.

Gerhard, H. (2009). Zusätze zu Asphalt. Möglichkeiten und Grenzen. Verfügbar unter [www.ifbgauer.de/global/gfx/file/RAS\\_2009\\_Gerhard.pdf](http://www.ifbgauer.de/global/gfx/file/RAS_2009_Gerhard.pdf), zuletzt abgerufen am 10.02.2015.

Hähn, G.; Krass, K.; Drewes, P. & Kirchknopf, H. (2004). Prozess- und Verfahrenstechnik für die umweltschonende Straßensanierung durch Kaltrecycling mit Schaumbitumen, gefördert durch Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Wirtgen GmbH, Ruhr Universität Bochum Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau, APS-GmbH Europäisches Zentrum für Mechatronik & SAT Straßensanierung GmbH, Hrsg.). Verfügbar unter [www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/0330256\\_-\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/0330256_-_Abschlussbericht.pdf), zuletzt abgerufen am 16.02.2015.

Hänel, K., Reck, H: (2010). Bundesweite Prioritäten zur Wiedervernetzung von Ökosystemen: Überwindung straßenbedingter Barrieren. Endbericht zum F+E-Vorhaben FKZ 3507 82 090. Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.).

Hemmert-Halswick, A. (2014). Expertengespräch Stahlbrückenbau. Brücken aus wetterfestem Stahl.

Hinrichs, B. (2012). Kosteneffiziente und innovative Bauweisen im kommunalen Straßenbau. Verfügbar unter [www.adac.de/\\_mmm/pdf/fv\\_expertenreihe2012\\_hinrichs\\_116271.pdf](http://www.adac.de/_mmm/pdf/fv_expertenreihe2012_hinrichs_116271.pdf), zuletzt abgerufen am 10.02.2015.

Holcim AG (2011). Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton. Zürich: Institut für Bau und Umwelt (HSR); E2 Management Consulting.

Hollatz, A. & Uhlmann, I. (2013). Maximalrecycling in der Praxis. Asphalt 8/2013.

Holldorb, C. & Mayer, T. (2010). Ökoprofil für Asphalt- und Betonpflasterbauweise (Deutscher Asphaltverband e. V. (Hrsg.). Hochschule Biberach.

Intraplan Consult GmbH & Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH (VWI) (2009). Finanzierungsbedarf des ÖPNV bis 2025. Untersuchung im Auftrag des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen, des Deutschen Städtetages und der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Berlin, Bremen, Hamburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, Hrsg.), Köln. Verfügbar unter [http://www.mobi-wissen.de/sites/default/files/studie\\_finanzierungsbedarf\\_öpnv\\_2025\\_0.pdf](http://www.mobi-wissen.de/sites/default/files/studie_finanzierungsbedarf_öpnv_2025_0.pdf), zuletzt abgerufen am 22.10.2014.

Knappe, F.; Bergmann, T. & Mottschall, M. (laufend). Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub. Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung, vorläufige Ergebnisse. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu); Öko-Institut.

- König, H. (2014). Maschinen im Baubetrieb. Grundlagen und Anwendung (Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft, 4., aktualisierte Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kreislaufwirtschaft Bau (2013). Mineralische Bauabfälle - Monitoring 2010. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010.
- Landesumweltamt NRW (2005). Leistungsbuch Altlastensanierung und Flächenentwicklung 2004/2005. Leistungsbereich 46 Rückbau von Verkehrsflächen und Tiefbauten. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz (MALBO), BAND 20.
- Lauwigi, C. (28.10.2013). Charakterisierungsfaktoren zu GWP, KRA und KEA aus Probas (E-Mail).
- Maibach et al. 1995 - Maibach, S.; Peter, D.; Seiler, B.: „Ökoinventar Transporte“. INFRAS 1995.
- Mansfeld, R. (2006). Niedrig-viskose Asphalte. Temperatur-Abgesenkte Asphalte. Praktische Erfahrungen bei Herstellung und dem Einbau von Walzasphalten. Verfügbar unter [www.ifbgauer.de/global/gfx/file/RAS\\_2006\\_Mansfeld.pdf](http://www.ifbgauer.de/global/gfx/file/RAS_2006_Mansfeld.pdf), zuletzt abgerufen am 10.02.2015.
- Montepara, A.; Giuliani, F. & Rastelli, S. (2004). Einige Hinweise zum Projekt "Kaltrecycling von Asphaltgranulat" stabilisiert mit bituminösen Emulsionen (3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Hrsg.). Vienna: Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura -Università di Parma. Verfügbar unter [www.unipr.it/arpa/dipcivil/felice\\_giuliani\\_files/articoli/Montepara-Giuliani&Rastelli\\_Vienna2004.pdf](http://www.unipr.it/arpa/dipcivil/felice_giuliani_files/articoli/Montepara-Giuliani&Rastelli_Vienna2004.pdf), zuletzt abgerufen am 16.02.2015.
- Mottschall, M. & Bergmann, T. (2013). Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland. (Arbeitspaket 4 des Projekts "Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewability") (Umweltbundesamt, Hrsg.) Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Nachhaltige Mobilität und Immissionsschutz, Freiburg.
- Müller, C. (2012). Thema Feste Fahrbahn. Rail Business (13/12), S. 9 - 12. Niedersächsische Staatskanzlei (Hrsg.) (2007). Fakten zum Netzausbau. Verfügbar unter [www.netzausbau-niedersachsen.de/downloads/faktenzumnetzausbau.pdf](http://www.netzausbau-niedersachsen.de/downloads/faktenzumnetzausbau.pdf), zuletzt abgerufen am 27.01.2015.
- Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (2012). Kostenbewusstes Planen und Bauen. Planungshilfen für den Umbau einbahniger, nicht oder unzureichend ausgebauter Straßen. Verfügbar unter [www.stmi.bayern.de/assets/stmi/vum/verkehrssicherheit/iid9\\_kostenbewusstes\\_bauen\\_201202.pdf](http://www.stmi.bayern.de/assets/stmi/vum/verkehrssicherheit/iid9_kostenbewusstes_bauen_201202.pdf), zuletzt abgerufen am 11.02.2015.
- Proske, T.; Hainer, S. & Graubner, C.-A. (2013). Klima- und ressourcenschonende Stahlbetonteile durch innovative Betontechnologie. 2. Darmstädter Ingenieurkongress Bau und Umwelt (S. 557 - 562).

- Radenberg, M. (2003). Herstellung und Einbau von Asphalt mit abgesenkter Temperatur. - Möglichkeiten und Grenzen -. Verfügbar unter [www.shm-asphalt.de/Vortrag\\_Temperatur.pdf](http://www.shm-asphalt.de/Vortrag_Temperatur.pdf), zuletzt abgerufen am 10.02.2015.
- Radenberg, M. & Gehrke, M. (2010). Nachuntersuchungen nach sechs Jahren Nutzungsdauer einer Gussasphaltdeckschicht mit viskositätsverändertem Bindemittel der Fa. Nynas. Bochum: Lehrstuhl für Verkehrswegebau an der Ruhr-Universität Bochum.
- RecyclingNews (Hrsg.) (2014). Gewerbeabfall-VO: Kommt die Getrennthaltepflcht? Verfügbar unter [www.recyclingnews.info/Neue\\_Regelungen\\_fuer\\_gewerbliche\\_Siedlungsabfaelle](http://www.recyclingnews.info/Neue_Regelungen_fuer_gewerbliche_Siedlungsabfaelle), zuletzt abgerufen am 05.02.2015.
- Reinisch (05.11.2014). Persönliche Mitteilung.
- Ruthenberg, R. (2013). Asphaltmischanlagen im Energieschongang. Steinbruch und Sandgrube (9/2013), S. 30 - 32.
- Scharp, M. (2011). Materialbestand und Materialfluesse der IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk. Meilen-steinbericht MaRes 2.3, Wuppertal. Verfügbar unter [http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRes\\_AP2\\_5.pdf](http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRes_AP2_5.pdf), zuletzt abgerufen am 29.01.2015.
- Schmidmeyer, S. (2014). Noch ausbaufähig. Der Markt für mineralische Recycling-Baustoffe verfügt noch über große Entwicklungsmöglichkeiten. ReSource (04/2014), S. 27 - 32.
- Schmied, M. & Mottschall, M. (2010). Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. Öko-Institut. Verfügbar unter [www.oeko.de/oekodoc/1852/2013-520-de.pdf](http://www.oeko.de/oekodoc/1852/2013-520-de.pdf), zuletzt abgerufen am 03.02.2015.
- Skrabania, U. (2009, März). Rechtliche Grundlagen für Wildquerungen an Straßen, Potsdam.
- Statistisches Bundesamt (2004). Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung (Fachserie 19 Reihe 2.1). Verfügbar unter [www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/WasserAbwasserOeffentlich2190210049004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/WasserAbwasserOeffentlich2190210049004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt abgerufen am 28.01.2015.
- Statistisches Bundesamt (2008). Klassifikation der Wirtschaftszweige. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (2010). Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung. Fachserie 19 Reihe 2.1.3 (Fachserie 19 Reihe 2.1.3). Verfügbar unter [www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Wasserwirtschaft2190213109004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Wasserwirtschaft2190213109004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt abgerufen am 29.01.2015.
- Statistisches Bundesamt (2012). Kostenstruktur der Unternehmen im Baugewerbe - Fachserie 4 Reihe 5.3. Statistisches Bundesamt. Verfügbar unter [www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bauen/BaugewerbeStruktur/KostenstrukturBaugewerbe2040530127004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bauen/BaugewerbeStruktur/KostenstrukturBaugewerbe2040530127004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt abgerufen am 21.01.2015.

Statistisches Bundesamt (2014a). Länge des Stromnetzes in Deutschland nach Spannungsebene im Jahresvergleich 2000 und 2012, Destatis. Verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/37962/umfrage/laenge-der-stromnetze-in-deutschland-in-1998-und-2008>, zuletzt abgerufen am 07.07.2014.

Statistisches Bundesamt (2014). Ausgewählte Zahlen für die Bauwirtschaft. Oktober 2014.

Steger, S.; Fekkak, M. & Bringezu, S. (2011). MaResS – Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaResS), Wuppertal.

Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hrsg.) (2015): ecoinvent. Ökobilanzdatenbank, Version 3.1. 2015.

Täube, A. (2013). Wiederverwendung von Asphalt gezielt fordern und fördern. Allgemeine Bauzeitung (29).

Thome, V. (2012, September). „Elektrodynamische Fragmentierung von Abfallstoffen am Beispiel von Altbeton und Müllverbrennungsschlacken“, Landeskongress Ressourceneffizienz, ZKM Karlsruhe 27. – 28.09. 2012.

Thome, V. (05.11.2014). Gesprächsnotiz (persönlich).

Trapp, J.; Schneider, S.; Arndt, W.-H.; Libbe, J.; Mottschall, M. & Bergmann, T. (laufend). Res-sourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest (RELIS), vorläufige Ergebnisse.

Ulrich, A.; Verges, G. & Raida, H.-J. (2013). Die Asphalteinbautemperatur – ein entscheidender Qualitätsfaktor im Straßenbau. Thermodynamische Untersuchung des Asphalttransports. Bau-Portal (9/2013).

Umweltbundesamt (2013a). Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Forschungskennzahl 3709 33 317. Verfügbar unter [www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4430.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4430.pdf), zuletzt abgerufen am 19.02.2015.

Umweltbundesamt (2013b). Entstehungsgeschichte und erste Verpflichtungsperiode. Verfügbar unter [www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/kyoto-protokoll](http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/kyoto-protokoll), zuletzt abgerufen am 16.02.2015.

Umweltbundesamt (2013c). Treibhausgasemissionen in Deutschland. Verfügbar unter [www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland](http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland), zuletzt abgerufen am 19.02.2015.

Umweltbundesamt (2014). Siedlungs- und Verkehrsfläche. Verfügbar unter [www.umweltbundesamt.de/daten/flaechennutzung/siedlungs-verkehrsflaeche](http://www.umweltbundesamt.de/daten/flaechennutzung/siedlungs-verkehrsflaeche), zuletzt abgerufen am 19.02.2015.

Uzun, A.; Göndör, S.; Bayer, N.; Kollecker, L. & Küppler, A. (2012). Visualizing the Effects of Power Management Algorithms for Mobile Networks under Realistic Conditions. In Proceedings of the Conference on Electronics Goes Green 2012+ (EGG 2012). Berlin: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Vattenfall (2011). Technische Daten Stromverteilnetz Berlin.

VDI 4600 (2012). Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden. Beuth Verlag GmbH, Berlin Januar 2012.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (2014). Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich. Berlin.

Verein Deutscher Zementwerke e. V. (2014a). Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2013. Düsseldorf.

Verein Deutscher Zementwerke e. V. (2014b). Zementversand und -verbrauch. Verfügbar unter [www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/c-zementabsatz-und-verbrauch/](http://www.vdz-online.de/publikationen/zahlen-und-daten/c-zementabsatz-und-verbrauch/), zuletzt abgerufen am 21.10.2014.

Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (2014). Längen der Hauptschiffahrtswege der Binnenwasserstraßen des Bundes. Verfügbar unter [www.wsv.de/wasserstrassen/gliederung\\_bundeswasserstrassen/Laengen\\_der\\_Bundeswasserstrassen/dokumente/Teil\\_4\\_Liste\\_3B.pdf](http://www.wsv.de/wasserstrassen/gliederung_bundeswasserstrassen/Laengen_der_Bundeswasserstrassen/dokumente/Teil_4_Liste_3B.pdf), zuletzt abgerufen am 30.09.2014.

Wollenweber, M. (2013). Tauziehen um Ersatzbaustoffverordnung. VDI Nachrichten Nr. 24. Verfügbar unter [www.ingenieur.de/Fachbereiche/Umwelt-Recyclingtechnik/Tauziehen-um-Ersatzbaustoffverordnung](http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Umwelt-Recyclingtechnik/Tauziehen-um-Ersatzbaustoffverordnung), zuletzt abgerufen am 05.02.2015.

## 8 ANHANG

## 8.1 Methodisches Vorgehen

Tabelle A. 1: Detaillierte Darstellung der betrachteten Bereiche und Baukörper

|                       | Straße   | Schiene  |
|-----------------------|--|--|
| Verkehrsinfrastruktur | Straßenkörper<br>Autobahn<br>Bundesstraße<br>Landesstraße<br>Kreisstraße<br>Gemeindestraße | Gleise<br>eingleisig<br>zweigleisig  |
|                       |  | Ingenieurbauwerke<br>Brücken<br>Tunnel   |
|                       | Ingenieurbauwerke<br>Brücken<br>Tunnel   | Energieversorgung<br>Unterwerke<br>Oberleitung HGS<br>Oberleitung HGS Tunnel<br>Oberleitung ABS<br>Oberleitung ABS Tunnel<br>Oberleitung andere<br>Oberleitung andere<br>Tunnel            |
|                       | Straßenzubehör<br>Leitplanken<br>Verkehrszeichen<br>Leitpfosten                            |  |
|                       | Strom  | Gas  |
| Energieinfrastruktur  | Freileitungen<br>Höchstspannung<br>Hochspannung<br>Mittelspannung<br>Niederspannung        | Gasfernleitungsnetz<br>Klasse A >1000 mm<br>Klasse B 700 - 1000 mm<br>Klasse C 500 - 700 mm<br>Klasse D 350 - 500 mm<br>Klasse E 225 - 350 mm<br>Klasse F 110 - 225 mm<br>Klasse G <110 mm |
|                       | Erdkabel<br>Höchstspannung<br>Hochspannung<br>Mittelspannung<br>Niederspannung             | Regional- und Ortsnetz<br>Hochdrucknetz (>1000 mbar)<br>Mitteldrucknetz (101 - 1000 mbar)<br>Verteilnetz   |
|                       | Versorgung   | Entsorgung   |
| Wasserwirtschaft      | Brunnen<br>Horizontalbrunnen<br>Vertikalbrunnen  | Kanalnetz öffentlich<br>Regenwasser<br>Schmutzwasser<br>Mischwasser<br>Regenentlastungsanlagen   |
|                       | Quellwasserfassungen   |  |
|                       | Talsperren   | Kanalnetz privat   |
|                       | Wasserleitungen<br>DN 100<br>DN 150<br>DN 200<br>DN 400<br>DN 800                          |  |

Tabelle A.1 Fortsetzung

|                       |   | Luft                   | Wasser   |
|-----------------------|---|------------------------|--|
| Verkehrsinfrastruktur | <b>Start- und Landebahn</b>               | Start- und Landebahnen | <b>Wasserstraßen</b> Uferbefestigungen<br>Kanäle   |
|                       |   | versiegelte Schultern  | <b>Bauwerke</b> Schleusen<br>Kanalbrücken<br>Wehre |
|                       | <b>Vorfelder und Rollbahnen</b>           |                        | <b>Binnenhäfen</b> Spundwandkai<br>sonst. Ufer     |
|                       | <b>Parkflächen, Zubringerstraßen etc.</b> |                        | <b>Seehäfen</b> Spundwandkai<br>sonst. Ufer        |
|                       |   | <b>Wärme</b>           |  |
| Energieinfrastruktur  | <b>Ferwärmenetze</b>                      | Wasser                 |  |
|                       |   | Dampf                  |  |
|                       | <b>Kältenetze</b>                         |                        |  |
|                       |   | <b>Nahwärmenetz</b>    |  |
|                       |   | <b>Übertragung</b>     |  |
| IKT                   | <b>kabelgeb. Netze</b>                    | Kupferkabel            |  |
|                       |   | Glasfaserkabel         |  |
|                       |   | <b>Funknetze</b>       | Mobilfunkstationen                                 |

Tabelle A. 2: Charakterisierungsfaktoren für neue Bauteile des Szenarios BAU

| Umweltprofile    | Treibhaus-<br>effekt      | Kumulierter<br>Rohstoff-<br>aufwand<br>(KRA) | KRA,<br>Energie-<br>rohstoffe | KRA,<br>Metall-<br>rohstoffe | KRA,<br>Steine<br>und Erden | KRA,<br>sonstige<br>mineral.<br>Rohstoffe | KRA-sek,<br>Steine und<br>Erden | Biofischer<br>Rohstoff<br>aufwand | Wasser-<br>bedarf | Kumulierter<br>Energie-<br>aufwand (KEA) | KEA-sek |
|------------------|---------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------|--|---------|
|                  | kg CO <sub>2</sub> -Äq./t | kg/t   | kg/t                          | kg/t                         | kg/t                        | kg/t                                      | kg/t                            | kg/t                              | L/t               | MJ/t                                     | MJ/t    |
| Asphalt-primär   | 73,8                      | 1055   | 92,0                          | 0,4                          | 962                         | 0,1                                       | 0                               | 4,2                               | 1413              | 3922                                     | 0       |
| Asphalt-DE-2013  | 67,4                      | 812  | 74,8                          | 0,3                          | 741                         | 0,1                                       | 221                             | 3,2                               | 1088              | 3020                                     | 902     |
| Asphalt-BI-2013  | 62,4                      | 810  | 61,4                          | 0,3                          | 753                         | 0,1                                       | 221                             | 3,2                               | 1088              | 2512                                     | 902     |
| Asphalt-TR-2013  | 57,2                      | 808  | 47,2                          | 0,3                          | 765                         | 0,1                                       | 221                             | 3,2                               | 1088              | 1970                                     | 902     |
| Baukies-primär   | 1,7                       | 1041   | 0,6                           | 0,2                          | 104,0                       | 0,0                                       | 0                               | 0,0                               | 1388              | 4,3                                      | 0       |
| Baukies-BAB-2013 | 1,6                       | 520  | 0,5                           | 0,1                          | 520                         | 0,0                                       | 500                             | 0,0                               | 694               | 21,6                                     | 0       |
| Baukies-BS-2013  | 1,6                       | 729  | 0,5                           | 0,1                          | 728                         | 0,0                                       | 700                             | 0,0                               | 971               | 30,2                                     | 0       |
| Baukies-LS-2013  | 1,6                       | 781  | 0,5                           | 0,0                          | 780                         | 0,0                                       | 750                             | 0,0                               | 1041              | 32,3                                     | 0       |
| Baukies-KS-2013  | 1,6                       | 885  | 0,5                           | 0,0                          | 884                         | 0,0                                       | 850                             | 0,0                               | 1179              | 36,6                                     | 0       |
| Baukies-GS-2013  | 1,6                       | 885  | 0,5                           | 0,0                          | 884                         | 0,0                                       | 850                             | 0,0                               | 1179              | 36,6                                     | 0       |
| Schotter 2013    | 1,7                       | 520  | 0,6                           | 0,1                          | 520                         | 0,0                                       | 500                             | 0,0                               | 694               | 4,3                                      | 0       |

Tabelle A. 3: Charakterisierungsfaktoren für neue Bauteile des Szenarios Ressourceneffizienz

| Bitumen-<br>gehalt | Umwelt-<br>profile                 | Treibhaus-<br>effekt          | Kumulierter<br>Rohstoff-<br>aufwand<br>(KRA) | KRA,<br>Energie-<br>rohstoffe | KRA,<br>Metall-<br>rohstoffe | KRA,<br>Steine<br>und Erden | KRA,<br>sonstige<br>mineral.<br>Rohstoffe | KRA-<br>sek,<br>Steine und<br>Erden | Biotischer<br>Rohstoff<br>aufwand | Wasser-<br>bedarf | Kumulierter<br>Energie<br>aufwand<br>(KEA) | KEA-<br>sek |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|--|-------------|
|                    |                                    | kg CO <sub>2</sub> -<br>Äq./t | kg/t   | kg/t                          | kg/t                         | kg/t                        | kg/t                                      | kg/t                                | kg/t                              | L/t               | MJ/t                                       | MJ/t        |
| 0,065              | Asphalt-DE-<br>primär              | 73,76                         | 1054,50                                      | 92,00                         | 0,35                         | 962                         | 0,10                                      | 0                                   | 4,15                              | 1413              | 3922                                       | 0           |
| 0,05               | Asphalt-BI-<br>primär              | 67,36                         | 1052,20                                      | 74,71                         | 0,35                         | 977                         | 0,10                                      | 0                                   | 4,15                              | 1413              | 3262                                       | 0           |
| 0,034              | Asphalt-TR-<br>primär              | 60,53                         | 1049,75                                      | 56,26                         | 0,35                         | 993                         | 0,10                                      | 0                                   | 4,15                              | 1413              | 2558                                       | 0           |
| 0,065              | Asphalt-DE-<br>sek                 | 46,01                         | 17,05  | 17,05                         | 0,00                         | 0                           | 0,00                                      | 962                                 | 0,00                              | 0                 | 716  | 3922        |
| 0,05               | Asphalt-BI-<br>sek                 | 46,01                         | 17,05  | 17,05                         | 0,00                         | 0                           | 0,00                                      | 977                                 | 0,00                              | 0                 | 716  | 3262        |
| 0,034              | Asphalt-TR-<br>sek                 | 46,01                         | 17,05  | 17,05                         | 0,00                         | 0                           | 0,00                                      | 993                                 | 0,00                              | 0                 | 716  | 2558        |
|                    | Abschlag<br>effizienz-<br>maßnahme | 4,16                          | 1,35   | 1,35                          | 0,00                         | 0                           | 0,00                                      | 0                                   | 0,00                              | 0                 | 61   | 0           |

Tabelle A. 4: Charakterisierungsfaktoren für Ersatz von Holz- durch Kunststoffschwellen im Szenario Ressourceneffizienz

| Umweltprofile   | Treibhaus-<br>effekt      | Kumulierter<br>Rohstoff-<br>aufwand<br>(KRA) | KRA,<br>Energie-<br>rohstoffe | KRA,<br>Metall-<br>rohstoffe | KRA,<br>Steine<br>und Erden | KRA,<br>sonstige<br>mineral.<br>Rohstoffe | KRA-sek,<br>Steine und<br>Erden | Biotischer<br>Rohstoff<br>aufwand | Wasser-<br>bedarf | Kumulierter<br>Energie-<br>aufwand<br>(KEA) | KEA-sek |
|---|---------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---|---------|
|   | kg CO <sub>2</sub> -Äq./t | kg/t   | kg/t                          | kg/t                         | kg/t                        | kg/t                                      | kg/t                            | kg/t                              | L/t               | MJ/t  | MJ/t    |
| Holz - energetische<br>Verwertung / Strom<br>inkl. Teeröl | -872                      | -384   | -384                          | 0                            | 0                           | 0   | 0                               | 0                                 | 0                 | -15352                                      | 0       |
| - Herstellung   | 474                       | 209  | 209                           | 0                            | 0                           | 0   | 0                               | 0                                 | 0                 | 8345  | 42000   |

## 8.2. Materialbestand und Erneuerungsbedarf im Tiefbau

Tabelle A. 5: Mengengerüst der Verkehrsinfrastrukturen

| Teilsektor                            | Bereich                 | Unterteilung                                   | Einheit           | Wert           |
|---------------------------------------|-------------------------|--|-------------------|----------------|
| Straßenverkehrs-<br>infrastruktur     | Straßenkörper           | BAB  | km                | 12.932         |
|                                       |                         | BAB Äste                                       | km                | 5.470          |
|                                       |                         | Bundesstraße                                   | km                | 41.481         |
|                                       |                         | Landesstraße                                   | km                | 87.325         |
|                                       |                         | Kreisstraße                                    | km                | 91.877         |
|                                       |                         | Gemeindestraße                                 | km                | 450.770        |
|                                       | Brücken                 | Bundesfernstraßen                              | m <sup>2</sup>    | 30.428.670     |
|                                       |                         | Tunnel   | Bundesfernstraßen | m <sup>2</sup> |
|                                       | Zubehör                 | Schutzplanken 2-seitig<br>mit Fahrbahntrennung | km                | 12.095         |
|                                       |                         | Schutzplanken 2-seitig                         | km                | 23.570         |
|                                       |                         | Schilderbrücken                                | Stück             | 22.833         |
|                                       |                         | Leitpfosten                                    | Stück             | 5.014.930      |
| Verkehrszeichen                       |                         | Stück  | 10.732.987        |                |
| Luftverkehrs-<br>infrastruktur        | Start- und Landebahn    | Beton  | m <sup>2</sup>    | 2.611.698      |
|                                       |                         | Asphalt  | m <sup>2</sup>    | 1.835.556      |
|                                       |                         | Asphalt / Beton                                | m <sup>2</sup>    | 680.421        |
|                                       | Vorfelder u. Rollbahnen | Beton  | m <sup>2</sup>    | 17.139.611     |
|                                       |                         | Asphalt  | m <sup>2</sup>    | 4.796.793      |
|                                       | versiegelte Schultern   | Asphalt  | m <sup>2</sup>    | 2.051.070      |
| sonst. Flächen                        |                         | m <sup>2</sup>                                 | 3.672.623         |                |
| Wasser-<br>verkehrs-<br>infrastruktur | Wasserstraßen           | Uferbefestigungen                              | km                | 5.484          |
|                                       |                         | Kanäle   | km                | 1.753          |
|                                       | Bauwerke                | Schleusen                                      | Stück             | 326            |
|                                       |                         | Kanalbrücken                                   | Stück             | 10             |
| Schienenverkehrs-<br>infrastruktur    | Gleise                  | ingleisig                                      | km                | 15.402         |
|                                       |                         | zweigleisig                                    | km                | 22.829         |
|                                       | Ingenieursbauwerke      | Brücken  | km                | 645            |
|                                       |                         | Tunnel   | km                | 855            |
|                                       | Energieversorgung       | Unterwerke                                     | Stück             | 183            |
|                                       |                         | Oberleitung HGS                                | km                | 5.460          |
|                                       |                         | Oberleitung HGS Tunnel                         | km                | 505            |
|                                       |                         | Oberleitung ABS                                | km                | 14.973         |
|                                       |                         | Oberleitung ABS Tunnel                         | km                | 96             |
|                                       |                         | Oberleitung andere                             | km                | 31.139         |
| Oberleitung andere<br>Tunnel          | km                      | 278  |                   |                |

**Tabelle A. 6: Mengengerüst der Energieversorgungsinfrastrukturen**

| Teilsektor       | Bereich                | Unterteilung                       | Einheit           | Wert    |
|------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------|---------|
| Stromnetze       | Freileitungen          | Höchstspannung (380/220 kV)        | km                | 35.000  |
|                  |                        | Hochspannung (110 kV)              | km                | 74.500  |
|                  |                        | Mittelspannung (10/20/30 kV)       | km                | 159.340 |
|                  |                        | Niederspannung (0,4 kV)            | km                | 232.000 |
|                  | Erdkabel               | Höchstspannung (380/220 kV)        | km                | 100     |
|                  |                        | Hochspannung (110 kV)              | km                | 5.000   |
|                  |                        | Mittelspannung (10/20/30 kV)       | km                | 354.660 |
|                  |                        | Niederspannung (0,4 kV)            | km                | 928.000 |
| Erdgasnetze      | Regional- und Ortsnetz | Niederdrucknetz ( $\leq 100$ mbar) | km                | 154.505 |
|                  |                        | Mitteldrucknetz (101 - 1000 mbar)  | km                | 223.075 |
|                  |                        | Hochdrucknetz ( $>1000$ mbar)      | km                | 92.853  |
|                  | Gasfernleitungsnetz    | Klasse A $>1000$ mm                | km                | 5.236   |
|                  |                        | Klasse B 700 - 1000mm              | km                | 6.992   |
|                  |                        | Klasse C 500 - 700mm               | km                | 8.229   |
|                  |                        | Klasse D 350 - 500mm               | km                | 4.851   |
|                  |                        | Klasse E 225 - 350mm               | km                | 6.133   |
|                  |                        | Klasse F 110 - 225mm               | km                | 5.394   |
|                  |                        | Klasse G $<110$ mm                 | km                | 859     |
|                  | Wärmenetze             | Wärmenetz                          | Wärmenetze Wasser | km      |
| Wärmenetze Dampf |                        |                                    | km                | 624     |
| Nahwärmenetz     |                        |                                    | km                | 75.000  |
| Kältenetz        |                        | Kältenetze                         | km                | 55      |

**Tabelle A. 7: Mengengerüst der Wasserver- & Abwasserentsorgungsinfrastrukturen**

| Teilsektor         | Bereich                       | Unterteilung            | Einheit | Wert       |
|--------------------|-------------------------------|-------------------------|---------|------------|
| Wasserversorgung   | Brunnen                       | Vertikalbrunnen         | Stück   | 90.825     |
|                    |                               | Horizontalbrunnen       | Stück   | 1.854      |
|                    | Quellwasserfassungen          |                         | Stück   | 92.679     |
|                    | Talsperren                    |                         | Stück   | 311        |
|                    | Rohrleitungskilometer         | DN 100                  | km      | 265.000    |
|                    |                               | DN 150                  | km      | 159.000    |
|                    |                               | DN 200                  | km      | 53.000     |
|                    |                               | DN 400                  | km      | 42.400     |
| DN 800             |                               | km                      | 10.600  |            |
| Abwasserentsorgung | Kanalnetz öffentlich          | Regenwasser             | km      | 120.937    |
|                    |                               | Schmutzwasser           | km      | 199.631    |
|                    |                               | Mischwasser             | km      | 241.013    |
|                    |                               | Regenentlastungsanlagen | Stück   | 68.777     |
|                    | Kanalnetz private Grundstücke |                         | km      | 900.000    |
|                    | Schächte im Kanalnetz         |                         | Stück   | 13.428.146 |
|                    | Regenentlastungsanlagen       |                         | Stück   | 47.678     |

**Tabelle A. 8: Mengengerüst der Informations- und Kommunikationstechnik Infrastrukturen**

| Teilsektor           | Bereich            | Einheit | Wert      |
|----------------------|--------------------|---------|-----------|
| Funktnetze           | Mobilfunkstationen | Stück   | 123.000   |
| kabelgebundene Netze | Kupferkabel        | km      | 1.480.000 |
|                      | Glasfaserkabel     | km      | 206.300   |

Tabelle A. 9: Lebensdauern der verschiedenen Straßenelemente nach Knappe et al. (laufend)

| Straßen-<br>kategorie | Ortstlage | Deckschicht<br>Material | Bauklasse | Lebensdauer<br>Deckschicht | Lebensdauer<br>Bindeschicht | Lebensdauer<br>Tragschicht | Lebensdauer<br>FSS | Hocheinbau |
|-----------------------|-----------|-------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|------------|
| BAB                   | -         | Asphalt                 | -         | 10                         | 20                          | 50                         | 100                | FALSCH     |
| BAB                   | -         | Beton                   | -         | 10                         | 20                          | 50                         | 100                | FALSCH     |
| BAB                   | -         | Pflaster                | -         | 10                         | 20                          | 50                         | 100                | FALSCH     |
| B                     | -         | Asphalt                 | -         | 10                         | 20                          | 50                         | 100                | FALSCH     |
| B                     | -         | Beton                   | -         | 10                         | 20                          | 50                         | 100                | FALSCH     |
| B                     | -         | Pflaster                | -         | 10                         | 20                          | 50                         | 100                | FALSCH     |
| B                     | WAHR      | Asphalt                 | -         | 10                         | 20                          | 50                         | 100                | FALSCH     |
| B                     | WAHR      | Beton                   | -         | 10                         | 20                          | 50                         | 100                | FALSCH     |
| B                     | WAHR      | Pflaster                | -         | 10                         | 20                          | 50                         | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Asphalt                 | SV        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Asphalt                 | I         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Asphalt                 | II        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Asphalt                 | III       | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Asphalt                 | IV        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Asphalt                 | V         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Asphalt                 | VI        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Beton                   | SV        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Beton                   | I         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Beton                   | II        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Beton                   | III       | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Beton                   | IV        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Beton                   | V         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -         | Beton                   | VI        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |

Tabelle A. 9 Fortsetzung

| Straßen-<br>kategorie | Ortslage | Deckschicht<br>Material | Bauklasse | Lebensdauer<br>Deckschicht | Lebensdauer<br>Bindeschicht | Lebensdauer<br>Tragschicht | Lebensdauer<br>FSS | Hocheinbau |
|-----------------------|----------|-------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|------------|
| G                     | -        | Pflaster                | SV        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -        | Pflaster                | I         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -        | Pflaster                | II        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -        | Pflaster                | III       | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -        | Pflaster                | IV        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -        | Pflaster                | V         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| G                     | -        | Pflaster                | VI        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | -        | Asphalt                 | III       | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Asphalt                 | IV        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Asphalt                 | V         | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Asphalt                 | VI        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Asphalt                 | SV        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Asphalt                 | I         | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Asphalt                 | II        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Beton                   | III       | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Beton                   | IV        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Beton                   | V         | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Beton                   | VI        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Beton                   | SV        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Beton                   | I         | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Beton                   | II        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Pflaster                | III       | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -        | Pflaster                | IV        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |

Tabelle A. 9 Fortsetzung

| Straßen-<br>kategorie | Ortstlage | Deckschicht<br>Material | Bauklasse | Lebensdauer<br>Deckschicht | Lebensdauer<br>Bindeschicht | Lebensdauer<br>Tragschicht | Lebensdauer<br>FSS | Hocheinbau |
|-----------------------|-----------|-------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|------------|
| K                     | -         | Pflaster                | V         | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -         | Pflaster                | VI        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -         | Pflaster                | SV        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -         | Pflaster                | I         | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | -         | Pflaster                | II        | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| K                     | WAHR      | Asphalt                 | III       | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Asphalt                 | IV        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Asphalt                 | V         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Asphalt                 | VI        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Asphalt                 | SV        | 15                         | 30                          | 60                         | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Asphalt                 | I         | 15                         | 30                          | 60                         | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Asphalt                 | II        | 15                         | 30                          | 60                         | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Beton                   | III       | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Beton                   | IV        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Beton                   | V         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Beton                   | VI        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Beton                   | SV        | 15                         | 30                          | 60                         | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Beton                   | I         | 15                         | 30                          | 60                         | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Beton                   | II        | 15                         | 30                          | 60                         | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Pflaster                | III       | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Pflaster                | IV        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Pflaster                | V         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR      | Pflaster                | VI        | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |

Tabelle A. 9 Fortsetzung

| Straßen-<br>kategorie | Ortslage | Deckschicht<br>Material | Bauklasse | Lebensdauer<br>Deckschicht | Lebensdauer<br>Bindeschicht | Lebensdauer<br>Tragschicht | Lebensdauer<br>FSS | Hocheinbau |
|-----------------------|----------|-------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|------------|
| K                     | WAHR     | Pflaster                | SV        | 15                         | 30                          | 60                         | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR     | Pflaster                | I         | 15                         | 30                          | 60                         | 100                | FALSCH     |
| K                     | WAHR     | Pflaster                | II        | 15                         | 30                          | 60                         | 100                | FALSCH     |
| L                     | -        | Asphalt                 | -         | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| L                     | -        | Beton                   | -         | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| L                     | -        | Pflaster                | -         | 15                         | 100                         | 100                        | 100                | WAHR       |
| L                     | WAHR     | Asphalt                 | -         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| L                     | WAHR     | Beton                   | -         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |
| L                     | WAHR     | Pflaster                | -         | 100                        | 100                         | 100                        | 100                | FALSCH     |

Tabelle A.10: Lebensdauern aller Baukörper und Elemente außer Straßen mit Quellenangabe

| Bereich                      | Komponenten                                 | Lebensdauer in Jahre | Quelle                    |
|------------------------------|---|----------------------|---------------------------|
| Straßenverkehrsinfrastruktur | Brücken an Bundesfernstraßen                | 80                   | Knappe et al. (laufend)   |
|                              | Brücken andere                              | 80                   | Knappe et al. (laufend)   |
|                              | Tunnel an Bundesfernstraßen                 | 80                   | Knappe et al. (laufend)   |
|                              | Tunnel andere                               | 80                   | Knappe et al. (laufend)   |
|                              | Schutzplanken 2-seitig mit Fahrbahntrennung | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Schutzplanken 2-seitig                      | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Schilderbrücken                             | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Leitpfosten                                 | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Verkehrszeichen                             | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Leuchten                                    | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Lichtzeichenanlagen                         | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
| Luftverkehrsinfrastruktur    | Beton SLB Deck                              | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Beton SLB Trag                              | 40                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Beton SLB FSS                               | 40                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Asphalt SLB Deck                            | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Asphalt SLB Trag                            | 40                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Asphalt SLB FSS                             | 40                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Asphalt/Beton SLB Deck                      | 20                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Asphalt/Beton SLB Trag                      | 40                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Asphalt/Beton SLB FSS                       | 40                   | Mottschall, Bergmann 2013 |
|                              | Start- und Landebahn (SLB)                  |                      |                           |

Tabelle A.10 Fortsetzung

| Bereich                                 | Komponenten                           | Lebensdauer in Jahre      | Quelle                    |
|---|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Luftverkehrsinfrastruktur (Fortsetzung) | Vorfelder und Rollbahnen              |                           |                           |
|   | Beton Vorfelder und Rollbahnen Deck   | 20                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | Beton Vorfelder und Rollbahnen Trag   | 40                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | Beton Vorfelder und Rollbahnen FSS    | 40                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | Asphalt Vorfelder und Rollbahnen Deck | 20                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | Asphalt Vorfelder und Rollbahnen Trag | 40                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | Asphalt Vorfelder und Rollbahnen FSS  | 40                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | versiegelte Schultern                 |                           |                           |
|   | versiegelte Schultern Deck            | 20                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | versiegelte Schultern Trag            | 40                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
| versiegelte Schultern FSS               | 40                                    | Mottschall, Bergmann 2013 |                           |
| Wasserverkehrsinfrastruktur             |                                       |                           |                           |
| Wasserstraßen                           | Uferbefestigungen                     | 60                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | Kanäle                                | 60                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | Schleusen                             | 60                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
|   | Kanalbrücken                          | 60                        | Mottschall, Bergmann 2013 |
| Schieneverkehrsinfrastruktur            |                                       |                           |                           |
| Gleise                                  | eingleisige Gleise                    | 30                        | Schmied, Mottschall 2010  |
|   | zweigleisige Gleise                   | 30                        | Schmied, Mottschall 2010  |
|   | Brücken                               | 80                        | Schmied, Mottschall 2010  |
|   | Tunnel                                | 80                        | Schmied, Mottschall 2010  |
| Ingenieurbauwerke                       | Unterwerke                            | 15                        | Schmied, Mottschall 2010  |
|   | Oberleitung                           | 60                        | Schmied, Mottschall 2010  |
|   | Oberleitung HGS                       | 7                         | Schmied, Mottschall 2010  |
| Energieversorgung                       |                                       |                           |                           |

Tabelle A.10 Fortsetzung

| Bereich  | Komponenten                       | Lebensdauer in Jahre             | Quelle                   |                        |
|--|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------------|
| Schienenverkehrsinfrastruktur (Fortsetzung)<br>Energieversorgung (Fortsetzung) | Oberleitung HGS Tunnel            | 7                                | Schmied, Mottschall 2010 |                        |
|  | Oberleitung ABS                   | 10                               | Schmied, Mottschall 2010 |                        |
|  | Oberleitung ABS Tunnel            | 10                               | Schmied, Mottschall 2010 |                        |
|  | Oberleitung andere                | 20                               | Schmied, Mottschall 2010 |                        |
|  | Oberleitung andere Tunnel         | 20                               | Schmied, Mottschall 2010 |                        |
|  | Hängung                           | 20                               | Schmied, Mottschall 2010 |                        |
|  | Tankstellen                       | 60                               | Schmied, Mottschall 2010 |                        |
|  | Tanks                             | 30                               | Schmied, Mottschall 2010 |                        |
|  | Stromleitungsnetze<br>Freileitung | Höchstspannung (380/220 kV) Mast | 80                       | Trapp et al. (laufend) |
|  |                                   | Hochspannung (110 kV) Mast       | 80                       | Trapp et al. (laufend) |
| Mittelspannung (10/20/30 kV) Mast  |                                   | 80                               | Trapp et al. (laufend)   |                        |
| Niederspannung (0,4 kV) Mast   |                                   | 80                               | Trapp et al. (laufend)   |                        |
| Leitungen  |                                   | 40                               | Trapp et al. (laufend)   |                        |
| Höchstspannung (380/220 kV)  |                                   | 40                               | Trapp et al. (laufend)   |                        |
| Hochspannung (110 kV)  |                                   | 40                               | Trapp et al. (laufend)   |                        |
| Mittelspannung (10/20/30 kV)   |                                   | 40                               | Trapp et al. (laufend)   |                        |
| Kabel  | Niederspannung (0,4 kV)           | 40                               | Trapp et al. (laufend)   |                        |

Tabelle A.10 Fortsetzung

| Bereich                                 | Komponenten                  | Lebensdauer in Jahre | Quelle                 |
|---|------------------------------|----------------------|------------------------|
| Gasleitungsnetze                        | Stahl-Transportleitungen     | 30                   | Trapp et al. (laufend) |
|   | Gusseisen-Transportleitungen | 40                   | Trapp et al. (laufend) |
|   | PE-Transportleitungen        | 50                   | Trapp et al. (laufend) |
|   | Hochdruckrohrleitung         | 25                   | Trapp et al. (laufend) |
|   | Verteilnetz                  | 20                   | Trapp et al. (laufend) |
| Wärmeleitungsnetze                      | Leitungen                    | 25                   | Trapp et al. (laufend) |
|   | Freileitung                  | 20                   | Trapp et al. (laufend) |
| Trinkwasserversorgungsinfrastruktur     | Brunnen                      | 62,5                 | Trapp et al. (laufend) |
|   | Trinkwasserrohre             | 100                  | Trapp et al. (laufend) |
| Abwasserentsorgungsinfrastruktur        | Regenwasser                  | 100                  | Trapp et al. (laufend) |
|   | Schmutzwasser                | 100                  | Trapp et al. (laufend) |
|   | Mischwasser                  | 100                  | Trapp et al. (laufend) |
|   | Regenentlastungsanlagen      | 35                   | Trapp et al. (laufend) |
|   | Beton                        | 50                   | Trapp et al. (laufend) |
| Schächte im Kanalnetz                   | Kunststoff                   | 100                  | Trapp et al. (laufend) |
|   |                              |                      |                        |
| Informations- und Kommunikationstechnik |                              |                      |                        |
|   |                              |                      |                        |
| Mobilfunkstationen                      |                              | 15                   | Trapp et al. (laufend) |
|   |                              | 30                   | Trapp et al. (laufend) |
| Kupferkabel                             |                              |                      |                        |





VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)  
Bertolt-Brecht-Platz 3  
10117 Berlin  
Tel. +49 30 27 59 506 0  
Fax +49 30 27 59 506 30  
zre-info@vdi.de  
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE  
**KLIMASCHUTZ**  
INITIATIVE