



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Entsorgung von teerhaltigem Straßenauf- bruch aus ökologischer Sicht

Florian Knappe und Joachim Reinhardt

Heidelberg, Mai 2017



Inhalt

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
1 Einleitung	6
2 Methodik	8
3 Betrachtete Systeme	10
3.1 Beseitigung auf der Deponie	10
3.2 Verwertung auf der Deponie	11
3.3 Thermische Behandlung	13
3.4 Weitere Behandlungsoptionen	17
3.5 Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs	17
4 Ökologische Bewertung	19
4.1 Betrachtete Wirkungskategorien	19
4.2 Ergebnisse ohne Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs	20
4.2.1 Sektorale Darstellung	20
4.2.2 Ergebnisse für die Wirkungskategorien	21
4.3 Interpretation der Ergebnisse ohne den Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs	31
4.3.1 Normierung und Rangbildung	31
4.3.2 Fazit zu den Ergebnissen ohne den Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs	32
4.4 Ergebnisse mit Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs	33
4.4.1 Ergebnisse für die Wirkungskategorien	33
4.4.2 Fazit zu den Ergebnissen inklusive Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs	40
4.4.3 Zusammenfassendes Fazit	43
Literaturverzeichnis	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Vorgehensweise bei einer Abfallökobilanz	8
Abbildung 3.1: Stoffdiagramm für die thermische Verwertung 1.000 kg pechhaltigen Straßenaufbruchs	15
Abbildung 3.2: Energiediagramm bezüglich einer Behandlung von 1.000 kg teerhaltigen Straßenaufbruchs über die verschiedenen Optimierungsvarianten der thermischen Verwertung	16
Abbildung 4.1: Ergebnisse für die Wirkungskategorie Treibhauseffekt	22
Abbildung 4.2: Ergebnisse für den Indikator fossiler kumulierter Energieaufwand (KEA fossil)	23
Abbildung 4.3: Ergebnisse für die Wirkungskategorie Versauerungspotenzial	24
Abbildung 4.4: Ergebnisse für die Wirkungskategorie terrestrisches Eutrophierungspotenzial	25
Abbildung 4.5: Ergebnisse für die Wirkungskategorie Krebsrisiko-Potenzial (Humantoxizität)	26
Abbildung 4.6: Ergebnisse für die Wirkungskategorie PM 2,5-Feinstaubpotenzial	27
Abbildung 4.7: Ergebnis für den Indikator mineralischer kumulierter Rohstoffaufwand (KRA mineralisch)	28
Abbildung 4.8: Ergebnisse für den Flächenverbrauch in der Kategorie Siedlungs- und Verkehrsfläche	29
Abbildung 4.9: Ergebnisse für die wasserseitigen PAK-Emissionen	30
Abbildung 4.10: Normierte Ergebnisse in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW)	32
Abbildung 4.11: Netto-Ergebnisse für den durch die thermische Behandlung verursachten Treibhauseffekt in Abhängigkeit von der Länge des Langstreckentransports zur thermischen Anlage; oben ungünstige Situation für thermische Behandlung, unten günstige Situation für thermische Behandlung.	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Energiebedarf für den Einbau und den Betrieb der Deponie	10
Tabelle 3.2: PAK-Gehalte und Elutionswerte aus der Datenbank ABANDA des LANUV NRW	11
Tabelle 3.3: Substitution von Baustoffen durch Verwertung auf der Deponie als Baumaterial	13
Tabelle 3.4: Kennzahlen für die verwendeten Transportmittel	17
Tabelle 3.5: Derzeitige Transportwege für das Beispiel nördliches Rheinland-Pfalz	18
Tabelle 4.1: Betrachtete Wirkungskategorien	20
Tabelle 4.2: Jährliche Pro-Kopf-Lasten, die durch einen Einwohner in Deutschland verursacht werden und ökologische Bedeutung der betrachteten Kategorien/Indikatoren	31
Tabelle 4.3: Treibhauseffekt: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag	36
Tabelle 4.4: KEA fossil: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag	37
Tabelle 4.5: Versauerungspotenzial: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag	37
Tabelle 4.6: Terrestrisches Eutrophierungspotenzial: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag	38
Tabelle 4.7: Krebsrisikopotenzial: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag	38
Tabelle 4.8: PM 2,5-Feinstaubpotenzial: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag	39

Tabelle 4.9: Abgeschätzte Break-Even-Transportentfernung zur thermischen Anlage im Vergleich zur Deponierung: Mittlerer Reihenwert aus Versauerungs-, terrestrischem Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial	41
Tabelle 4.10: Abgeschätzte Break-Even-Transportentfernung zur thermischen Anlage im Vergleich zur Verwertung auf der Deponie: Minimaler Reihenwert aus Versauerungs-, terrestrischem Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial	41

1 Einleitung

Bis vor einigen Jahrzehnten wurden in Deutschland im Straßenasphalt Kohlenteere als Bindemittel eingesetzt. Diese Teere sind entsprechend mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) belastet, von welchen einige kanzerogen sind. Mittlerweile wird im Asphalt nur noch das Bindemittel Bitumen verwendet.

Die alten Asphaltsschichten sind aber vielfach noch im Straßenkörper vorhanden. Gerade im kommunalen Straßennetz sind einige Straßen bis dato noch nicht grundhaft erneuert worden. Andererseits wurden außerorts Straßenkörper oftmals nur mit einem neuen Straßenkörper überbaut (Hocheinbau), oder das teerhaltige Material aufgenommen und in gebundener Form bspw. in Form einer hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT) wieder in den Straßenkörper eingebaut. Eine direkte Umweltbelastung ist damit quasi ausgeschlossen. Mit jeder weiteren Baumaßnahme ist man jedoch erneut mit diesem schadstoffbelasteten Material konfrontiert, was nicht nur zu entsprechenden Kosten führt. Das Belastungspotenzial bleibt bestehen, die schadstoffbelasteten Massen werden nicht aus dem Materialkreislauf entnommen.

Diese Rückführung des teerhaltigen Straßenaufbruchs in den Straßenkörper ist zunehmend nicht mehr gewollt. Vor allem bei Baumaßnahmen in Baulast des Bundes und der Länder sollen diese Massen zukünftig entnommen und entsorgt, das PAK-belastete Material soll aus dem Kreislauf ausgeschleust werden. Diese umweltpolitische Strategie dürfte sich mittelfristig auch im kommunalen Bereich durchsetzen.

Somit stellt sich die Frage, welche Entsorgungs- bzw. Verwertungsoptionen für diesen Abfallmassenstrom zur Verfügung stehen und wie diese aus ökologischer Sicht einzuordnen sind. Im Einzelfall wird dies immer auch in Abhängigkeit von regionalen Gegebenheiten und hier insbesondere Transportentfernungen zu beantworten sein.

Der Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. (BDE) hat das ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg mit einer Studie beauftragt, mit der die verschiedenen Entsorgungsoptionen zunächst unabhängig von Transportketten analysiert und bewertet werden sollen. Im zweiten Schritt lassen sich dann die spezifischen Vor- und Nachteile einzelner Optionen benennen und in Transportentfernungen beziffern, so dass ausschreibende Stellen in die Lage versetzt werden, die ökologisch günstigen Entsorgungswege unter den örtlichen Rahmenbedingungen identifizieren zu können.

Das Projekt wurde von einem Projektbeirat mit verschiedenen Vertretern aus Bund und Ländern kritisch begleitet, denen an dieser Stelle für Ihre Unterstützung gedankt sei:

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Herr Dr. Biedermann
- Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. (BDE) (Auftraggeber): Frau Giern

- Umweltbundesamt: Herr Dr. Engelmann
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz: Herr Dr. Nonte
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Frau Lange
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Herr Zinkler

2 Methodik

Für eine ökologische Bewertung dieser Art ist das Instrument der Abfallökobilanz zielführend. Auf der einen Seite werden die Betriebsmittel-, Energie- und Ressourcenverbräuche, die mit der Behandlung des teerhaltigen Straßenaufbruchs einhergehen, berücksichtigt (Abbildung 2.1). Der Verbrauch von Betriebsmitteln und Energie bedingt wiederum Emissionen und Ressourcenverbräuche, die bei deren Herstellung angefallen sind (Vorkette). Diese Inventardaten werden dann über wissenschaftlich abgeleitete Charakterisierungsfaktoren zu Wirkungskategorien zusammengefasst, welche die Umweltlasten der Entsorgung darstellen.

Auf der anderen Seite zielt die Abfallverwertung auf einen Nutzen. Je nach Verfahren werden Energie oder primäre Rohstoffe ersetzt, deren Herstellung wiederum mit Umweltlasten verbunden wäre, welche dem System gutgeschrieben werden. Die Umweltlasten werden dann mit dieser Umweltentlastung zu Nettoergebnissen verrechnet.

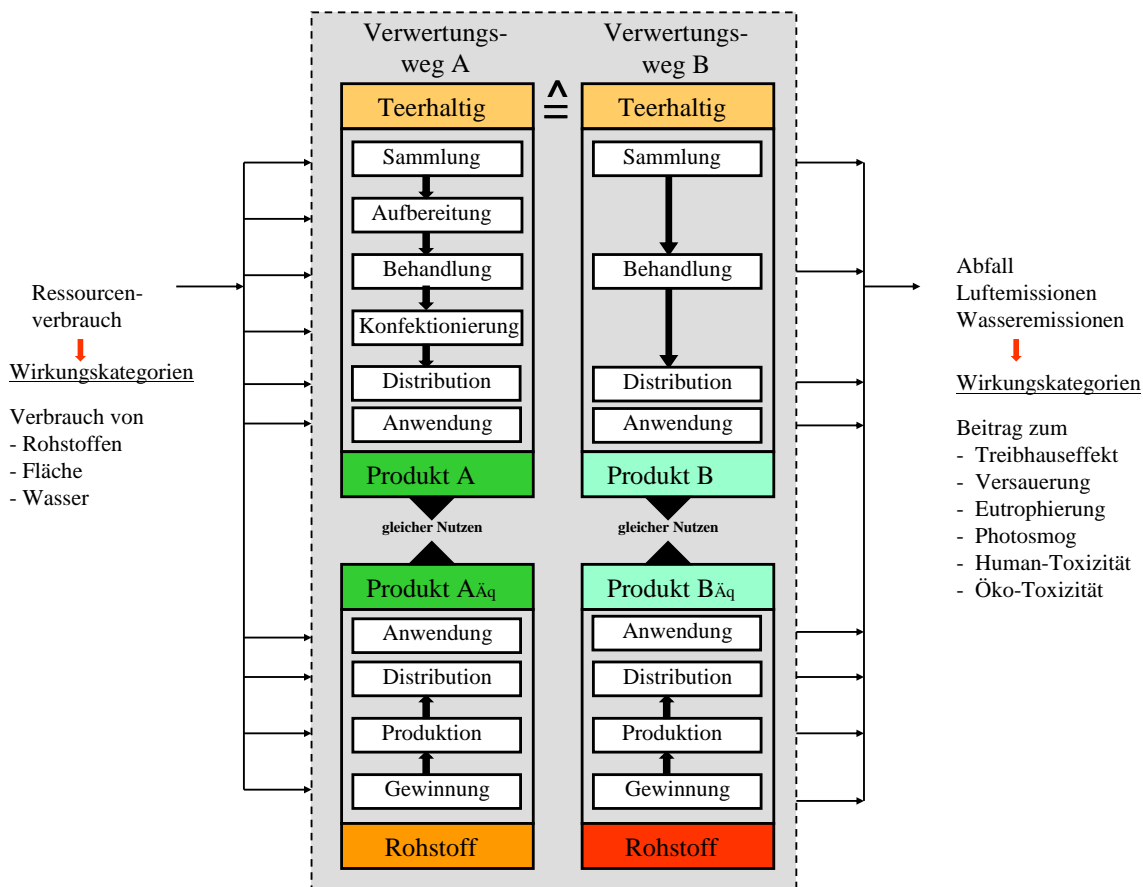


Abbildung 2.1: Vorgehensweise bei einer Abfallökobilanz

Durch die Berücksichtigung des Nutzens wird sichergestellt, dass Systeme miteinander verglichen werden, die denselben Nutzen haben (Nutzensgleichheit), weil darüber hinausgehender Nutzen entsprechend angerechnet wird.

Die Untersuchung kann auf erste Studien [SAM 2007] [LUWG 2009] aufbauen, die als Ökoeffizienzanalysen verschiedene Handlungsoptionen bewertet haben. Die zur Verfügung stehenden Entsorgungsoptionen haben sich seitdem verändert. Auf eine ökonomische Bewertung wurde im Rahmen der Studie für den BDE verzichtet. Die Kosten einer Entsorgung lassen sich nicht beziffern, in aller Regel werden nur Preise zugrunde gelegt. Diese sind sehr volatil, je nach Region unterschiedlich und müssen von den Akteuren vor Ort jeweils aktuell abgefragt werden. Mit der Verrechnung verschiedener Umweltwirkungen untereinander werden die Ergebnisse zudem intransparent.

3 Betrachtete Systeme

Als mögliche Entsorgungswege wurden die Beseitigung auf der Deponie, die Verwertung auf der Deponie und die thermische Behandlung identifiziert.

3.1 Beseitigung auf der Deponie

Die klassische Entsorgungslösung besteht in der Beseitigung des Materials auf der Deponie. Das Material kann ohne weitere Aufbereitung nach dem Ausbau aus dem Straßenkörper, d.h. auch in Form von Schollen, direkt abgelagert werden. Für diese Option ist ein Energieverbrauch für den Einbau und den Betrieb der Deponie während der Verfüllungsphase zu beachten. Dieser wird einem ifeu-Datensatz, der auf älteren Datenquellen beruht, entnommen (Tabelle 3.1). Eine Aktualisierung dieser Daten ist nicht nötig, weil sich an der Einbau- und Deponietechnik wenig geändert hat und zudem nicht ergebnisrelevant ist.

Tabelle 3.1: Energiebedarf für den Einbau und den Betrieb der Deponie

Energie mechanisch	7,7 MJ/Mg
Energie elektrisch	7,2 MJ/Mg
Energie thermisch	1,6 MJ/Mg

Quellen: [Weber 1990], [Eggels 1995], [BUWAL 1996], [Gibis 1997]

Es entstehen keine Deponiegase, das teerhaltige Material unterliegt keinem Abbau. Während der Verfüllungsphase und dem Eindringen von Niederschlägen in den Deponiekörper bildet sich Sickerwasser. Mit dem Sickerwasser werden Bestandteile des Teers eluiert und je nach Deponie entweder nach einer eigenen Aufbereitung direkt in die Oberflächengewässer eingeleitet oder einer Behandlung in einer kommunalen Kläranlage übergeben.

Eine Auswertung der Datenbank ABANDA des LANUV Nordrhein-Westfalens ergab die in Tabelle 3.2 aufgeführten PAK-Gehalte und Elutionswerte für die Abfallart kohlenteeerhaltige Bitumengemische. Die Konzentration im Sickerwasser der Deponie wird konservativ mit den hier aufgeführten Werten aus dem Elutionsverfahren angesetzt. Durch die Behandlung des Sickerwassers wird eine Abreinigung von 90 % unterstellt. Diese ist zum einen mit einem zusätzlichen Energieaufwand verbunden, der zum anderen jedoch den Eintrag von Schadstoffen in Gewässer verringert.

Tabelle 3.2: PAK-Gehalte und Elutionswerte aus der Datenbank ABANDA des LANUV NRW

Substanz / Verfahren	Feststoff (mg/kg)	El/S4 Dest (µg/L)
PAK-EPA (gesamt)	1.690	95,4
Naphthalin	45,9	23,1
Benzo(a)pyren	74,0	1,71

Quelle: Datenbank ABANDA des LANUV NRW: Mittelwerte für Abfallart 170301 kohlenteeerhaltige Bitumengemische; https://www.abfall-nrw.de/abanda/script/luas_db_portal.php?application=abanda&runmode=aida&initform=MK_Auswertemenue; abgerufen im März 2017

Die Beseitigung auf einer Deponie stellt eine „endgültige“ Ablagerung dar. Landfill Mining und damit der zukünftige Rückbau eines Deponiekörpers ist nach heutigem Kenntnisstand unwahrscheinlich, es sei denn, die Deponie ist technisch unzureichend gesichert und führt zu Schadstoffeinträgen in das Grundwasser oder sie konkurriert mit anderen Flächennutzungsansprüchen. Die Beseitigung auf einer Deponie ist mit keinem Substitutionserfolg verbunden, der Massenstrom wird aus dem Materialkreislauf entnommen.

Die Schadstoffe sind damit mit Ausnahme der o.g. Elution gesichert und dem Kreislauf entzogen, sie sind damit aber nicht beseitigt. Ein Restrisiko verbleibt. Die Größe des Restrisikos hängt auch vom Schutzniveau der beaufschlagten Deponie ab. So sind die Sicherungen für den in einer Deponie der Klasse III verbrachten Abfall größer als dies bei der Deponieklasse I der Fall ist.

3.2 Verwertung auf der Deponie

Teerhaltiger Straßenaufbruch wird auf Deponien auch verwertet. Aus Sicht einer ökologischen Bewertung bzw. Ökobilanz ist der Übergang zur Beseitigung auf der Deponie fließend. Die Abfallmassen werden hierzu nicht gezielt aufbereitet. Die Einstufung der Ablagerung als Verwertung erweitert die Spielräume der Deponiebetreiber in der Akquisition von Abfallmassen.

Auf der Deponie wird teerhaltiger Straßenaufbruch hauptsächlich zur Modellierung des Deponiekörpers, der Ausgestaltung der endgültigen Kubatur und nur sehr untergeordnet auch als Baustoff bspw. für den Wegebau verwendet. Im Gegensatz zu Zeiten der Ablagerung von Hausmüll ist die Verwertung von teerhaltigem Straßenaufbruch als Wegebauaterial auf den heutigen Inertdeponien kaum noch notwendig. Weiterhin wird teerhaltiger Straßenaufbruch auch aufbereitet und im Deponiebau BQS-geprüft (bundeseinheitlicher Qualitätsstandard) als Schutzlage auf Kunststoff-Dichtungsbahnen, in der Sickerwasserschicht oder als filterstabile Schicht auf der Sickerwasserschicht verwendet. In Abgrenzung zur Beseitigung auf der Deponie muss die Verwertung per se mit einem Nutzen verbunden sein. Dieser besteht im Einsatz als Baustoff und verlangt von den Massen spezifische wertgebende Eigenschaften.

Die Option Verwertung auf der Deponie unterstellt, dass dies mit einem Nutzen verbunden ist und Massen substituiert werden können, die auch außerhalb der Deponie bspw. als Straßen- und Wegebauaterial verwendet werden können.

Für diesen Anwendungszweck werden in der Praxis grundsätzlich Abfallmassen eingesetzt. Während jedoch für pechhaltiges Material eine stoffliche Verwertung nur auf dem Deponiekörper möglich ist, muss dies für die ansonsten alternativ für den Wegebau zur Verfügung stehenden Abfallmassen nicht der Fall sein. Eine Verwertung außerhalb des Deponiekörpers wäre – nach einer entsprechenden Aufbereitung bspw. bei einem Bauschuttrecycler – mit einem Einsatz als bspw. gütegesicherter Baustoff für den Straßen- und Wegebau oder Erdbaumaterial und damit mit einer Substitution primärer Rohstoffe verbunden. „In Summe“ führt die Verwertung von teerhaltigem Straßenaufbruch zu Bauzwecken auf der Deponie zu einer Substitution konventioneller, auf primärer Rohstoffbasis hergestellter Baustoffe, welche in Form von Herstellung im Steinbruch gutgeschrieben werden (Tabelle 3.3). Der substituierte Transport der alternativen Baustoffe zur Deponie wird mit 50 km per LKW angesetzt (

Tabelle 3.4). Die Gutschrift als nicht gebrochener Kalkstein trägt dem Aspekt Rechnung, dass keine Aufbereitung des teerhaltigen Straßenaufbruchs angelastet wird, obwohl dies für den Einsatz als Baumaterial teilweise nötig ist. Das fehlende Brechen in Last- und Gutschrift hebt sich gegenseitig auf.

Für den Einbau und Betrieb wird im Gegensatz zur Deponierung (= Beseitigung auf der Deponie) hier kein Energieverbrauch angelastet, weil der Einbau aus bautechnischen Gründen sowieso erfolgen muss und daher nicht dem dafür verwendeten teerhaltigen Straßenaufbruch anzulasten ist. Wie bei der Deponierung ist mit dem Austrag von Schadstoffen über das Sickerwasser zu rechnen. Die Lasten für die Sickerwasserbehandlung werden hingegen dem Baumaterial nicht angerechnet. Auch bleibt ein Restrisiko bestehen, weil die Schadstoffe nur gesichert, nicht aber beseitigt sind.

Tabelle 3.3: Substitution von Baustoffen durch Verwertung auf der Deponie als Baumaterial

Substituiertes Material	Menge	Zugehöriger Datensatz
Baumaterial	1 kg/kg	Kalkstein, ab Abbruch (Ecoinvent)

3.3 Thermische Behandlung

Für die thermische Behandlung muss das Material in einer Korngröße von kleiner 45-60 mm vorliegen, so dass die teerhaltige Oberfläche entsprechend aufgeschlossen ist, um in der thermischen Behandlung zerstört zu werden. In einigen Fällen erfolgt der Ausbau der teerhaltigen Schicht durch Fräsen, so dass das Material in bereits ausreichend zerkleinerter Form anfällt. Im kommunalen Bereich und kleinen Straßenbauprojekten wird das Material dagegen zumeist in Schollen rückgebaut, so wie bspw. auch dann, wenn ein Leitungsgraben gezogen werden muss. In diesen Fällen ist ein zusätzliches Vorbrechen des ausgebauten teerhaltigen Straßenaufbruchs unter Energieeinsatz nötig. Es wird angenommen, dass in Summe maximal 50 % des anfallenden teerhaltigen Straßenaufbruchs über einen Vorbrecher behandelt werden muss, bei Reko wird bspw. schon 95 % des Aufbruchs als Fräsgut angeliefert.

Das Material wird auf dem Gelände der Anlage zwischengelagert und von dort mittels Radlader sukzessive auf die Anlage aufgegeben. Die organischen Schadstoffe werden dann unter Zufuhr von Erdgas in der Verbrennungstrommel und der anschließenden Nachverbrennung weitgehend zerstört. Dabei wird der Kohlenstoff im Teer wie auch der Kohlenstoff aus dem verfeuerten Erdgas in Form fossilen Kohlendioxids emittiert. Die CO₂-Emissionen sind abfallbedingt und können durch die Anlage nicht gesteuert werden. Angesetzt ist ein Teergehalt im Abfall von 4 %, wobei der Teer zu 92 % aus Kohlenstoff besteht, so dass die in Abbildung 3.1 genannte Menge CO₂ resultiert. Die aus dem Teer und Erdgas gewonnene Energie wird über eine Dampfturbine teilweise in Strom gewandelt und kann zudem grundsätzlich als Fernwärme abgegeben werden. In beiden Fällen wird entsprechende Energie aus dem jeweiligen regionalen Energieträgermix substituiert.

Wird teerhaltiger Straßenaufbruch als Monofraktion verbrannt, verbleiben als feste „Verbrennungsrückstände“ im Ansatz die mineralischen Rohstoffe, die ursprünglich zur Herstellung des Asphalttes eingesetzt wurden. Im Output der Anlage liegen für diese die PAK-Gehalte unter der Bestimmungsgrenze. Diese Materialien lassen sich als Zuschlag in die

Asphaltproduktion zurückführen oder auch in Konkurrenz zu Primärrohstoffen anderweitig hochwertig verwerten.

Weiterhin wird dann über die Filter der Rauchgasreinigung das Material abgeschieden, das als Asphaltfüllstoff verwendet wurde und analog wieder als Substitut von Gesteinsmehl bzw. gelöschtem Kalk eingesetzt werden kann. Der Asphaltfüllstoff kann aus beiden Komponenten bestehen und damit auch zementartige Eigenschaften aufweisen. Gelöschter Kalk wirkt verfestigend und adsorptiv bindend um die Gesteinshülle sowie auch im Verbund mit dem Bitumen, reines Gesteinsmehl nicht. Nach mündlicher Aussage des deutschen Asphaltverbandes ist der Füller aus der thermischen Behandlung auch in Deutschland in Asphaltwerken einsetzbar. Die asphalttechnologische Sinnhaftigkeit bleibt aber fraglich, weil über das Fräsgut schon ein Überangebot an Füller in das Asphaltwerk eingebracht wird, so dass der zusätzlich von extern zugeführte Füller sehr hochwertig sein sollte (Kalksteinmehl, gelöschter Kalk). Daher wird in dieser Studie eine Spannweite aus der Substitution von gemahlenem Kalkstein ohne größere Umweltbedeutung und gelöschtem Kalk mit größerer Umweltbedeutung dargelegt. Die für das substituierte Material herangezogenen Datensätze sind in Abbildung 3.1 aufgeführt.

Andererseits hat das Filtermaterial die Eigenschaften einer kalkhaltigen Flugasche und kann somit in Betonwerken zum Einsatz kommen und dort Zement substituieren. Nach mündlicher Aussage von Reko geht 90 % dieses Materials in die Beton- und nur 10 % in die Asphaltindustrie. Die spezifische Gutschrift für den angesetzten gelöschten Kalk fällt im Treibhauseffekt etwa gleich groß aus wie für Zement, in den anderen Wirkungskategorien beträgt sie 30-60 % der Zementgutschrift. Je nachdem, ob Flugasche Zement im Verhältnis 1:1 oder zu einem geringeren Anteil substituieren kann, approximiert die Gutschrift für gelöschten Kalk auch den Einsatz als Zementsubstitut hinreichend. In der Praxis wird daher eher die Gutschrift für gelöschten Kalk erreicht und nicht nur die von Gesteinsmehl. Bei der Rauchgaswäsche entsteht zudem REA-Gips als Substitut für Natursteingips.

Es handelt sich bislang um eine überregionale Entsorgungslösung, derartige Anlagen stehen in Deutschland noch nicht zur Verfügung. Die Bilanzierung dieser Entsorgungsoption erfolgt anhand des Praxisbeispiels REKO aus Rotterdam.

Die substituierten primären mineralischen Rohstoffe müssten je nach Region aus unterschiedlicher Entfernung antransportiert werden. Mit der Entfernung zu den Mittelgebirgen steigt die Transportaufwendung für Steine, Gesteinsmehl und Gips vom Gewinnungsort zum Weiterverarbeiter (bspw. Asphaltwerk), die substituiert werden. Die Bewertung der thermischen Behandlung ist damit im Gegensatz zur Entsorgung auf Deponien regionsspezifisch. Für das Praxisbeispiel ergeben sich die in Abbildung 3.1 aufgeführten Transportentfernungen von den Mittelgebirgen in die Niederlande, die anhand der Entfernung der Niederlande von den Mittelgebirgen abgeschätzt wurden. Diese regionalen Abhängigkeiten werden über ein Szenario analysiert, in welchem die thermische Behandlung in Nähe der deutschen Mittelgebirge erfolgt, so dass für den Transport der substituierten mineralischen Primärmaterialien wie für den Sand im Falle der Niederlande noch eine anzurechnende Strecke von 50 km per LKW angesetzt wird. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die neu zu errichtende thermische Behandlungsanlage direkt und damit näher beim Abnehmer (bspw. Asphaltwerk) platziert werden kann als der Gewinnungsort für das Primärmaterial. Weitere Angaben zu den Verkehrsmitteln finden sich in Tabelle 3.4.

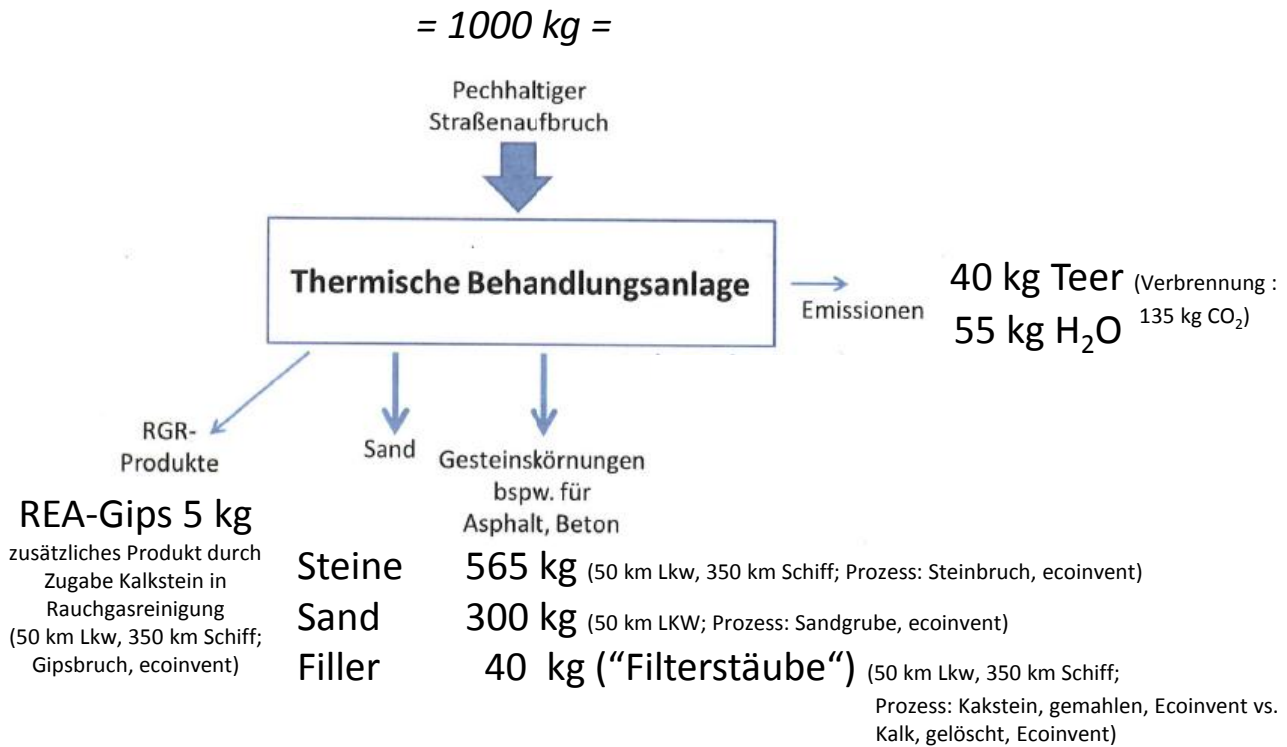


Abbildung 3.1: Stoffdiagramm für die thermische Verwertung 1.000 kg pechhaltigen Straßenaufbruchs; Transportstrecken sind abgeschätzt und können jeweils etwas größer oder kleiner ausfallen

Der energetische Wirkungsgrad einer thermischen Behandlung kann sehr unterschiedlich ausfallen. Zum einen ergeben sich die Wärmenutzung und damit der Substitutionserfolg aus den standörtlichen Rahmenbedingungen und der Anschlussmöglichkeit an ein Fernwärmenetz oder einen industriellen Abnehmer. Zum anderen lassen sich derartige Anlagen auch mit unterschiedlichen Energieeffizienzen und Wirkungsgraden in der Energieausbeute verwirklichen. Um diesem Aspekt gerecht zu werden, wurde die mögliche Spannweite der thermischen Behandlung über drei Szenarien abgebildet (Abbildung 3.2), wie sie aus technischer Sicht möglich sind.

- Nur Stromauskopplung mit geringem Wirkungsgrad (Szenario **Thermik I oder Thermik Basis**)
→ Status-Quo
- Auskopplung von Strom und Fernwärme (Szenario **Thermik II**)
→ teilloptimierte energetische Nutzung
- Steigerung des Stromwirkungsgrades und weitgehende Auskopplung und Nutzung als Fernwärme (Szenario **Thermik III**)
→ volloptimierte energetische Nutzung,

Das Szenario Thermik III stellt eine technisch sehr ambitionierte Variante dar. Hiermit werden im Hinblick auf die energetischen Wirkungsgrade Zielwerte beschrieben, die nur mit hohem (finanziellen) Aufwand realisierbar wären. Während Thermik I und II jederzeit realisiert werden können bzw. realisiert wurden, ist Thermik III nur dann zu erwarten, wenn den hohen finanziellen Aufwendungen auch entsprechende Erlöse aus der Energiebereitstellung entgegenstehen.

Der durch die bereitgestellte Energie substituierbare Energieträgermix ergibt sich aus den regionalen und standörtlichen Bedingungen. Strom basiert wie Wärme von Land zu Land auf einem unterschiedlichen Energieträgermix. Als Grundlage für die Untersuchung zum Einfluss dieses Aspekts und der Transportwege der substituierten Primärmaterialien auf die ökologische Bewertung wurde das Szenario Thermik II ausgewählt, weil es sich hierbei um eine Variante handelt, die mit dem Aufbau einer neuen Anlage relativ sicher verwirklicht werden würde. Im Szenario thermische Behandlung in Nähe der deutschen Mittelgebirge (Szenario **Thermik II_D**) ändert sich insgesamt Folgendes:

- Strommix: Deutschland anstatt Niederlande
- Wärmemix: 50 % Erdöl und 50 % Erdgas anstatt 100 % Erdgas
- Antransport für Primärmaterialien: 50 km LKW

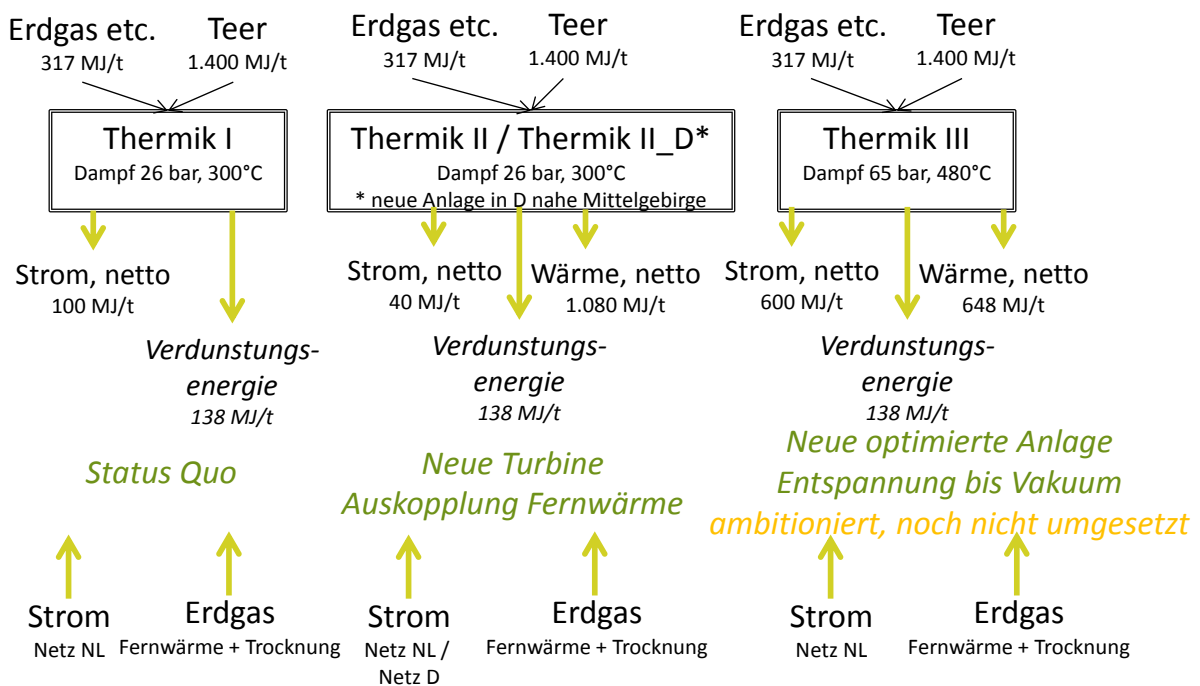


Abbildung 3.2: Energiediagramm bezüglich einer Behandlung von 1.000 kg teerhaltigen Straßenaufbruchs über die verschiedenen Optimierungsvarianten der thermischen Verwertung

Tabelle 3.4: Kennzahlen für die verwendeten Transportmittel

Verkehrsmittel	Auslastung/Typ/Strecke
LKW Kurzstrecke (50 km)	Auslastung 100 % hin, 0 % zurück; Solo-LKW; Anteile Autobahn/Landstraße/Innerorts 51 %/30 %/19 %
LKW Langstrecke	Auslastung 100 % hin, 0 % zurück; Solo-LKW; Anteile Autobahn/Landstraße/Innerorts 80 %/15 %/5 %
Schiff	Auslastung im Mittel aus Hin- und Rückfahrt ca. 60 %; Binnenschiff
Durchschnittszug	Auslastung 60 %; Leerfahrtenanteil 50 %

Die Auslastungsgrade beziehen sich bei Schiff und Zug auf Durchschnittswerte. Da diese Auslastungsgrade sowohl für die substituierten Primärprodukte als auch für Bestimmung der im Vergleich zur Deponie zusätzlichen Break-Even-Transporte angenommen werden, wird dieser Aspekt entschärft.

3.4 Weitere Behandlungsoptionen

In Deutschland findet bereits eine energetische Verwertung von teerhaltigem Straßenaufbruch statt. Im Zementwerk Rüdersdorf wird das Material zusammen mit anderen Abfällen in der Wirbelschichtverbrennung eingesetzt. Da die dorthin verbrachten Mengen verhältnismäßig gering sind und es sich beim Zementwerk Rüdersdorf um einen Sonderfall handelt, wird auf eine Betrachtung in dieser Studie verzichtet. Es erfolgt eine Fokussierung auf die beiden Optionen, die eine Verarbeitung des zukünftig anfallenden teerhaltigen Straßenaufbruchs gewährleisten können.

3.5 Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs

Vor jeder Entsorgung muss der teerhaltige Straßenaufbruch zur Deponie oder thermischen Behandlungsanlage transportiert werden. Der Antransport unterscheidet sich dabei sowohl hinsichtlich der Transportentfernung als auch der Verkehrsmittel sowie der Notwendigkeit von Zwischenlagerung und Umschlag.

Deponien sind flächendeckend vorhanden, so dass der Antransport unabhängig vom Anfallort grundsätzlich über kürzere Distanzen erfolgen kann als dies für die Entsorgungsalternative thermische Behandlung derzeit möglich ist. Derartige Behandlungsanlagen existieren bislang nur in den Niederlanden und werden auch als Neuanlagen sehr wahrscheinlich als Anlagen mit großem Durchsatz errichtet werden, so dass der zurückzulegende Transportweg hier stark vom Anfallort des Abfalls und damit der Distanz zum Verwertungsort abhängt.

Der Transport zur Deponie erfolgt per LKW. Eine Zwischenlagerung mit Umschlag ist in der Regel nicht nötig. Bei der thermischen Verwertung wäre ein ähnliches Logistiksystem nur im Falle eines genauso engmaschigen Netzes entsprechender Anlagen bzw. im Falle einer geringen Entfernung vom Anfallort zur Anlage zielführend. Je nach Anfallort lohnt sich aufgrund der weiteren Distanz ein Transport per Schiff oder Bahn, wobei der Transport zum Hafen bzw. Bahnhof jeweils straßengebunden erfolgen muss. Bei einem Wechsel auf Schiff oder Bahn bzw. bei einem Transport per LKW über weitere Strecken muss eine Zwi-

schenlagerung erfolgen, um die für eine gute Auslastung der Verkehrsmittel benötigten Massen zusammenzutragen. Eine Zwischenlagerung ist mit einem Umschlag vom Ersttransport über Lager zum Zweittransport durch Baumaschinen mit einem entsprechenden Energieverbrauch verbunden. Für die Entladung von Schiff oder Bahn zur Zwischenlagerung auf dem Gelände der Anlage ist dann nochmals ein Umschlag erforderlich, wohingegen der Langstrecken-LKW das Material ohne Umschlag direkt am gewünschten Ort abladen kann. In Tabelle 3.5 sind beispielhaft die derzeitigen Transportwege für einen teerhaltigen Straßenaufbruch, der in Rheinland-Pfalz anfällt, skizziert.

Tabelle 3.5: Derzeitige Transportwege für das Beispiel nördliches Rheinland-Pfalz

	Deponierung	Thermische Behandlung
LKW Kurzstrecke	50 km	50 km
Umschlag	-	
LKW Langstrecke +	-	350 km
Umschlag	-	
Und Bahn/Schiff +	-	350 km
Umschlag	-	

Eine pauschale Bewertung des Aufwands für Antransport und Logistik für die verschiedenen Optionen ignoriert die aufgezeigte Abhängigkeit vom jeweiligen Anfallort und greift daher zu kurz. Dieser muss für jeden Anfallort über Kennzahlen zum Transport mit den jeweiligen Verkehrsmitteln unter Berücksichtigung von Auslastung und Art der Transportwege sowie zum Umschlag im Einzelfall bestimmt werden.

Die Bewertung der Optionen erfolgt zunächst ohne Berücksichtigung des Transports des teerhaltigen Straßenaufbruchs. Der erste Kurz-Transportschritt per LKW wird für alle Optionen ähnlich ausfallen, kann aber auch kleiner oder größer sein. In einem nächsten Schritt wird deshalb aufgezeigt, wie weit ein zusätzlicher Langstreckentransport (Differenz zur Entfernung zur Deponie) mit verschiedenen Verkehrsmitteln zur thermischen Behandlung in Bezug auf verschiedene Wirkungskategorien ausfallen könnte, um die Unterschiede zwischen thermischer Behandlung und Deponierung zu nivellieren. Die nivellierende Gesamtstrecke zur thermischen Behandlung wäre hingegen von der Entfernung zur alternativen Deponie abhängig und wächst mit dieser, wobei ggf. auch Differenzen in den LKW-Transportstrecken mit höheren spezifischen Lasten zu berücksichtigen sind. Zur Berechnung werden außerdem die Lasten für die Umschläge zur thermischen Behandlung berücksichtigt, indem sie zuvor auf das Netto-Ergebnis der thermischen Behandlung aufgeschlagen werden.

Jeder Akteur in Deutschland kann damit über die spezifischen Lasten je Tonnenkilometer Transport mit verschiedenen Verkehrsmitteln für jeden Anfallort in Summe aus Behandlung und Transport die beste Alternative ableiten. Hierzu muss lediglich bekannt sein, wie weit die Entfernung zur nächsten thermischen Behandlungsanlage bzw. Deponie ist und welche Verkehrsmittel verwendet werden können. Die spezifischen Lasten werden in Kapitel 4.4.1 angegeben.

4 Ökologische Bewertung

4.1 Betrachtete Wirkungskategorien

Es werden die Wirkungskategorien betrachtet, die durch die Deponierungsprozesse oder thermische Behandlung hauptsächlich zu erwartenden Emissionen und Ressourcenverbräuche umfassen (Tabelle 4.1). Neben den energiebedingten Emissionen (Verbrennungsprozesse, Vorkette Brennstoffe) und dem Verbrauch von Energierohstoffen ist die Einsparung von mineralischen Rohstoffen durch die Verwertung des teerhaltigen Straßenaufbruchs zu erwarten.

Der Verbrauch mineralischer Rohstoffe wird durch den mineralischen kumulierten Rohstoffaufwand (KRA mineralisch) adressiert, welcher die Massen der verarbeiteten Rohstoffe aufsummiert. Staubemissionen, die bei der Verarbeitung von teerhaltigem Straßenaufbruch und der Gewinnung von Primärmaterialien anfallen, werden über die Wirkungskategorie PM 2,5 berücksichtigt.

Weiterhin haben die Optionen unterschiedlichen Flächenbedarf. Der Flächenbedarf wird in Kategorien, die sich an der Naturferne der jeweils belegten Fläche orientieren, dargestellt. Hier wird zunächst die Kategorie des naturfernen Flächentyps Siedlungs- und Verkehrsfläche gezeigt, in welche auch die bei der Primärmaterialgewinnung und im Zuge der Deponierung beanspruchten Flächen zunächst fallen, da es sich um einen großen Eingriff in die Natur handelt. Dem steht allerdings die u.U. erfolgende Ausbildung besonderer Ökosysteme auf diesen derart genutzten Flächen gegenüber, die aus Sicht des Naturschutzes einen hohen Wert aufweisen können. Im Vergleich werden deshalb die Unterschiede über die Summe des Verbrauchs aller Flächenkategorien qualitativ dargestellt. Diese umfassen dann naturnahe Flächen wie naturnahe Forstwirtschaft, Forst, naturnahe Landwirtschaft und naturferne Landwirtschaft.

Weiterhin fallen Emissionen während der Einbauphase der Deponie über den Wasserpfad an. Die Summe der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) dient als ein Vertreter für die Elution möglicher ökotoxisch wirkender Schadstoffe aus dem deponierten teerhaltigen Straßenaufbruch während der Einbauphase. Als verhältnismäßig leicht lösliches PAK wird zusätzlich zum Summenparameter das Naphthalin und als kanzerogene PAK-Leitsubstanz das Benzo(a)pyren mit betrachtet. Als weitere zu beachtende Schadstoffe im Teer sind bspw. BTEX und NSO-Heterocyclen zu nennen, deren Eintrag ins Grundwasser aus ökotoxischer Sicht kritisch zu sehen ist.

Tabelle 4.1: Betrachtete Wirkungskategorien

Wirkungskategorie / Indikator	Enthaltene Emissionen
Treibhauseffekt	v.a. CO ₂ (fossil), CH ₄ , N ₂ O
Ressourcenbeanspruchung - fossil: kumulierter Energieaufwand (KEA fossil) - mineralisch: kumulierter Rohstoffaufwand (KRA mineralisch)	- Erdöl, Erdgas, Kohle - Masse, verarbeitet
Versauerungspotenzial	SO ₂ , NO _x , NH ₃ , HCl, HF, H ₂ S
Terrestrisches Eutrophierungspotenzial	NO _x , NH ₃
Humantoxizität: - Krebsrisikopotenzial - Feinstaubpotenzial (PM 2,5)	- Schwermetalle, POP - Staub, SO ₂ , NO _x , NH ₃ , NMVOC
Ökotox: - PAK	- PAK-Elution in Wasser als ein Vertreter
Naturraumbeanspruchung	Flächeninanspruchnahme in Relation zur Naturferne

4.2 Ergebnisse ohne Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs

4.2.1 Sektorale Darstellung

Jedes des in Kapitel 3 beschriebenen Systems/Szenarios wird in den Diagrammen im Folgekapiel über zwei Balken abgebildet. Die Lasten aus der Deponierung bzw. thermischen Behandlung werden im jeweils linken Balken nach oben in verschiedene Prozesse unterschieden, um die Bedeutung bestimmter Prozesse identifizieren zu können. Die Sickerwasserbehandlung auf den Deponien ist optional und kann je nach Kategorie sowohl eine Last als auch eine Gutschrift darstellen.

- Vorbehandlung: Energieverbrauch des Vorbrechens für 50 % des Materialstroms vor der thermischen Behandlung
- Behandlung: Deponierung bzw. thermische Behandlung inklusive Vorketten
- Erdgas: Erdgasvorkette und CO₂-Emissionen aus der Erdgasverbrennung
- Sickerwasserbehandlung: Aufwand und Nutzen für die Behandlung des Sickerwassers auf der Deponie

Ebenso werden die erzielten Gutschriften im jeweils linken Balken nach unten separat nach den substituierten Primärprodukten dargestellt. Die Gutschrift für den substituierten Füller wird in Min- und Max-Werte aufgeteilt, um den Unterschied zwischen substituierten Füllstoffen mit Gesteinsmehleigenschaften und denjenigen mit Eigenschaften von gelöschtem Kalk (zementartig) zu beleuchten.

- GS Transport: Eingesparte Transportlasten aus dem entfallenden Antransport der substituierten Primärprodukte
- GS Steine: Substituierte Primärgesteinskörnung bei Verwertung auf der Deponie oder durch Nutzung der groben Körnung nach der thermischen Behandlung
- GS Sand: Substituierte Körnung <2 mm durch Nutzung der feinen Körnung nach der thermischen Behandlung
- GS Gips: Durch den REA-Gips aus der thermischen Behandlung substituiertes Primärgips
- GS Filler min: Durch die Filterstäube aus der thermischen Behandlung (= ursprüngliches Bindemittel) substituiertes Gesteinsmehl
- GS Filler max: Durch die Filterstäube aus der thermischen Behandlung substituiertes Kalkhydrat → zementartige Eigenschaften durch gelöschten Kalk im ursprünglichen Bindemittel; ist aufgrund des Einsatzes in der Betonindustrie als realistischer einzustufen als nur GS Filler min
- GS Strom: Durch Energiegewinnung im Zuge der thermischen Behandlung substituiertes nationaler Strommix
- GS Wärme: Durch Energiegewinnung im Zuge der thermischen Behandlung substituiertes nationaler Wärmemix

Im jeweils rechten Balken sind die Lasten und Gutschriften zum Netto-Ergebnis verrechnet. Das Netto-Ergebnis besteht ebenso aus zwei Teilen, einem absoluten Minimal- (Netto 1) und Maximalwert (Netto 2). Dieser resultiert aus der Differenz durch die Substitutionseffekte von Gesteinsmehl bzw. gelöschtem Kalk durch den Füller.

4.2.2 Ergebnisse für die Wirkungskategorien

Es gilt zu berücksichtigen, dass in diesem Kapitel nur **die Ergebnisse** für die Systeme **ohne den Antransport des teerhaltigen Straßenaufbruchs** dargestellt sind. Die Lasten für den Antransport des Straßenaufbruchs werden in Kapitel 4.4.1 gezeigt.

Treibhauseffekt

Das Ergebnis für den Treibhauseffekt ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die durch die Deposition bedingten Lasten beschränken sich auf die Bereitstellung der Energie für den Einbau und den Betrieb der Deponie. Die zusätzlichen Lasten für die Sickerwasserbehandlung sind klein. Diese Lasten entfallen für die Verwertung auf der Deponie. Bei der thermischen Behandlung fallen große Lasten an, die v.a. durch die Kohlendioxidemissionen im Rahmen der Teerverbrennung bedingt sind und sich nicht verringern lassen. Darüber hinaus ist hier die Verbrennung des verfeuerten Erdgases sichtbar, was aber im Vergleich zu den Emissionen aus dem Teer nur relativ geringe Treibhausgasemissionen bewirkt.

Die größten Substitutionseffekte und damit die höchsten Gutschriften werden durch die produzierte Energie aus der thermischen Behandlung erzielt, insofern eine Teiloptimierung der energetischen Verwertung auf der Anlage erfolgt ist. Dies ist im Status Quo der thermischen Behandlung nicht der Fall. Die Lasten für die Gewinnung der substituierten Primärprodukte fallen demgegenüber gering aus und ebenso diejenigen für ihren Transport. Wenn durch den Staub aus der Rauchgasreinigung Kalkhydrat substituiert wird, lässt sich auch hierüber eine relativ große Gutschrift erzielen, weil die Herstellung von gelöschtem

Kalk wie im Falle von Zementklinker mit energetisch bedingten und v.a. auch geogenen CO₂-Emissionen verbunden ist. Für die Errichtung einer Anlage in Deutschland mit teiloptimierter energetischer Nutzung sind die Rahmenbedingungen in Bezug auf die Gutschriften im Treibhauseffekt etwas besser als in den Niederlanden, weil hier durch die abgegebene Fernwärme ein Wärmemix mit hohem Erdölanteil ersetzt würde. Dasselbe gilt für Strom aufgrund des in Deutschland kohlelastigeren Strommixes, was aber erst im volloptimierten System mit entsprechender Stromauskopplung deutlich würde.

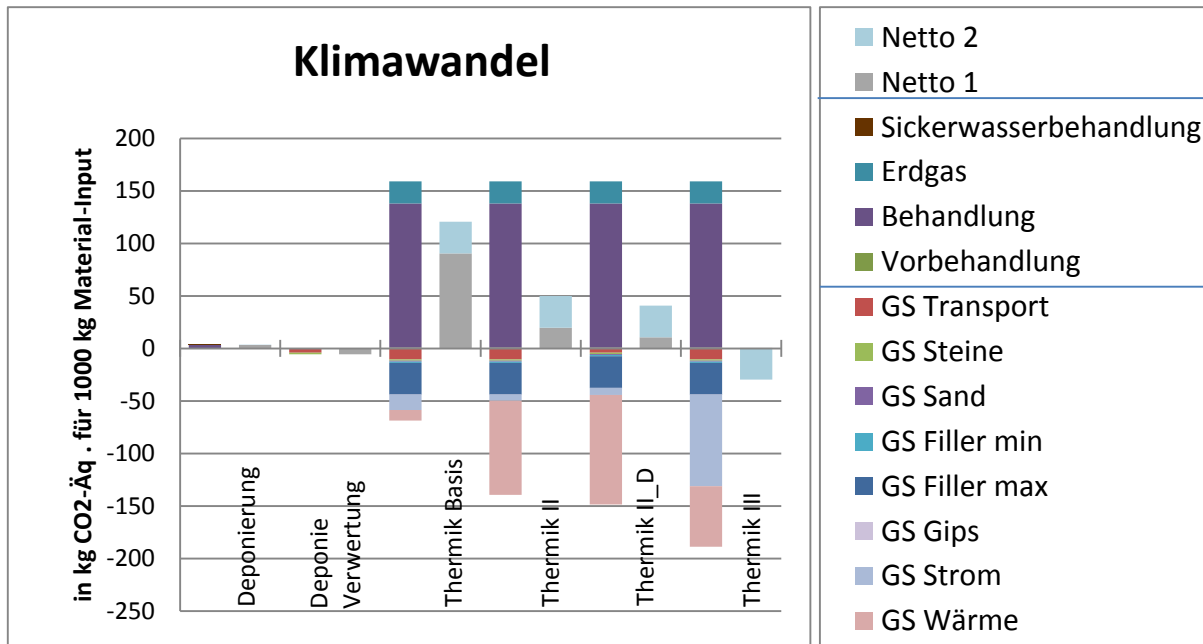


Abbildung 4.1: Ergebnisse für die Wirkungskategorie Treibhauseffekt

In Summe ergibt sich für die Deponierung eine relativ neutrale Bewertung bezüglich des Treibhauseffekts und für die Verwertung auf der Deponie eine (sehr geringe) Entlastung aufgrund der geringen Gutschriften für die Primärmaterialien. Mit der thermischen Behandlung im Status-Quo sind hingegen Lasten zu verzeichnen, die mit einer energetischen Teiloptimierung schon deutlich verringert werden können, weil dann den Lasten ebenso bedeutende Gutschriften für die gewonnene Energie entgegenstehen. Mit der als ambitioniert anzusehenden vollständigen energetischen Optimierung könnte ein ebenso neutrales Abschneiden erreicht werden, wobei hier im Falle der Substitution von Kalkhydrat durch den Staub aus der Rauchgasabscheidung sogar eine Entlastung erzielt würde. Die Verbesserung durch eine Substitution des Erdgases über eine Nutzung von Altholz würde nur gering ausfallen.

Fossiler kumulierter Energieaufwand (KEA fossil)

Der Primärenergieeinsatz ist bei der Deponierung relativ klein und bei den thermischen Systemen durch den Erdgaseinsatz bzw. entgangenen Nutzen durch den Altholzeinsatz etwas größer (Abbildung 4.2). Dementgegen wird über die thermische Behandlung der Energieträger Teer zur Energiegewinnung genutzt, der sonst deponiert würde. Dies führt zu entsprechenden Gutschriften, die mit der Optimierung der thermischen Behandlung zunehmen und hier nicht wie beim Treibhauseffekt mit entgegen gerichteten Lasten verbunden sind. Für den Fall einer Substitution von gelöschtem Kalk durch den Filterstaub lässt sich auch der mit der Kalzinierung des Kalksteins verbundene Energieeinsatz einspa-

ren. Der Aufbau einer Anlage in Deutschland in Nähe zu den Mittelgebirgen anstatt den Niederlanden hätte in diesem Indikator keinen Vorteil. Im Gegenteil würde durch den kürzeren Transport der substituierten Primärmaterialien in Mittelgebirgsnähe die Primärenergieeinsparung in diesem Sektor gegenüber einer Anlage in den Niederlanden sinken. Um das Umfeld der Anlage in den Niederlanden alternativ mit Primärgesteinen zu versorgen, wäre der Transport aus weiter Entfernung nötig. Dem steht wiederum der größere Aufwand für den Antransport des teerhaltigen Straßenaufbruchs entgegen (s. Kapitel 4.4.1).

Das Netto-Ergebnis weist bezüglich des fossilen Primärenergieaufwandes eine deutlich größere Einsparung für die thermischen Systeme aus.

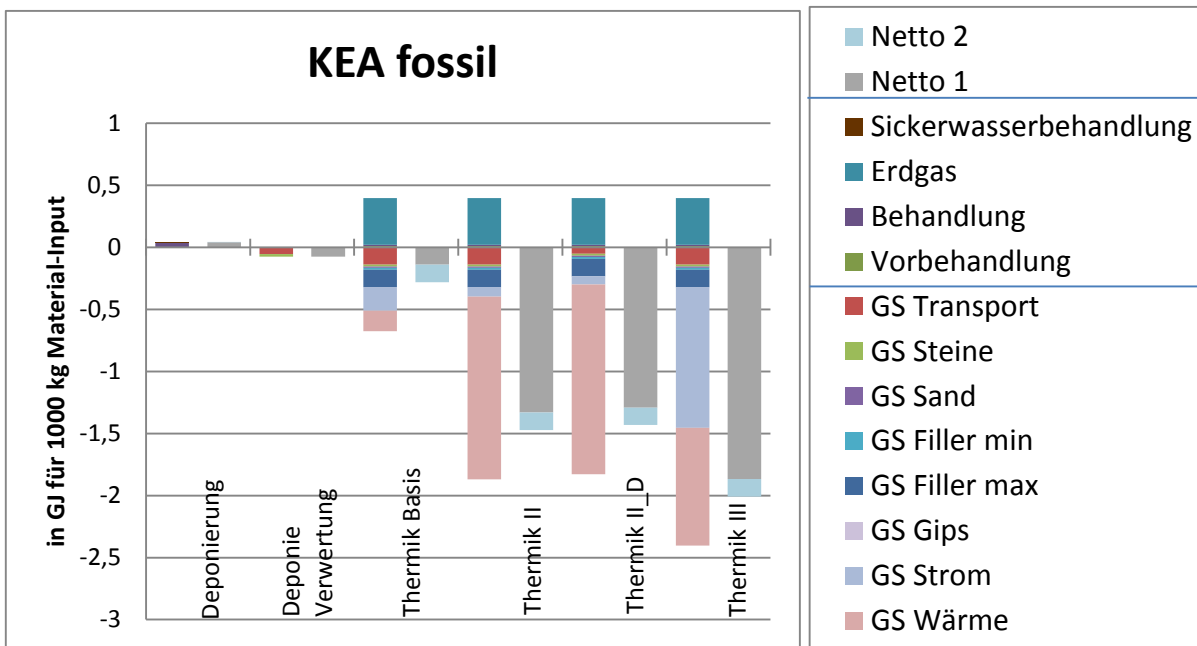


Abbildung 4.2: Ergebnisse für den Indikator fossiler kumulierter Energieaufwand (KEA fossil)

Versauerungspotenzial

Die versauernden Emissionen entstehen durch Freisetzung aus den Brennstoffgehalten und dem Verbrennungsprozess selbst. Die hier auftretenden Lasten sind aufgrund der guten Abgasreinigung nach der thermischen Behandlung relativ gering (Abbildung 4.3). In den Gutschriften sind deutliche Einsparungen für die produzierte Energie erkennbar, wenn die energetische Nutzung aus der Anlage entsprechend optimiert ist, weil dadurch die Herstellung des Energiemixes mit entsprechenden Emissionen aus herkömmlichen Anlagen substituiert wird. Sehr deutlich treten auch die Gutschriften für die mit den substituierten Primärmaterialien verbundenen Transporte in die Niederlande zutage. Transport ist mit SO_2 - und NO_x -Emissionen verbunden. Dies relativiert sich je nach Anfallort unter Einbeziehung des Antransports des Straßenaufbruchs wieder (s. Kapitel 4.4.1). In dieser Kategorie auch deutlicher erkennbar sind die substituierten Herstellungslasten der Primärmaterialien und dabei insbesondere die Sprengung von Steinen. Eine Anlage in Deutschland hätte aufgrund des dort substituierten ölhaltigen Wärmemixes deutliche Vorteile gegenüber den Niederlanden trotz der aufgrund der Nähe zu den Mittelgebirgen auch deutlich geringeren Transportgutschriften für substituierte Primärmaterialien.

Im Netto-Ergebnis zeigt sich eine höhere Einsparung für die thermische Behandlung, welche mit der energetischen Optimierung steigt, aber deutlich vom Transport des substituierten Primärmaterials beeinflusst wird. Im Status Quo schneidet die thermische Behandlung nur ein wenig besser ab als eine Verwertung auf der Deponie, welche wie die thermische Behandlung auch in dieser Kategorie von der Substitution der Primärmaterialien profitiert.

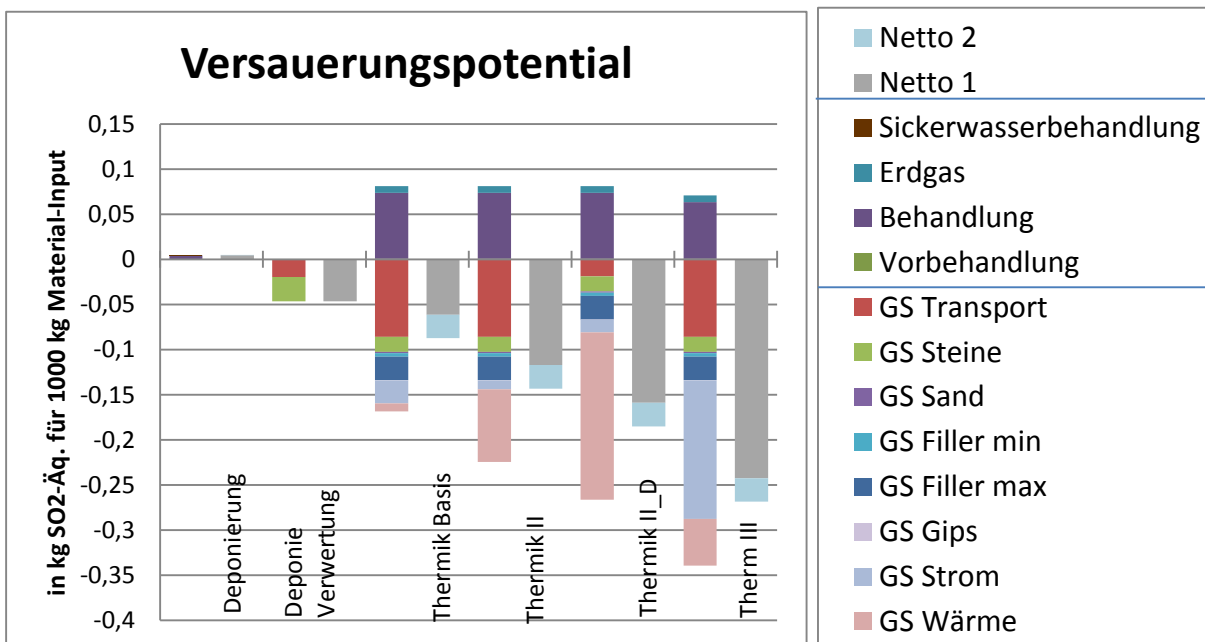


Abbildung 4.3: Ergebnisse für die Wirkungskategorie Versauerungspotenzial

Terrestrisches Eutrophierungspotenzial

Das Ergebnismuster im terrestrischen Eutrophierungspotenzial ist ähnlich dem des Versauerungspotenzials (Abbildung 4.4). Bei den Gutschriften nimmt die Bedeutung der Transporte der substituierten Primärmaterialien gegenüber der gewonnenen Energie weiter zu. Eine Anlage in Deutschland in Mittelgebirgsnähe wäre bezüglich dieser Wirkungskategorie folgerichtig im Nachteil gegenüber einer Anlage in den Niederlanden. Aufgrund der Bedeutung der Transporte in diesem Bewertungsergebnis ist die Betrachtung der Antransporte des Straßenaufbruchs zur abschließenden regionspezifischen Bewertung hier besonders wichtig (s. Kapitel 4.4.1). Das Netto-Ergebnis zeigt ähnlich dem Versauerungspotenzial mit Ausnahme des Status-Quo Vorteile für die thermische Behandlung, die sehr stark vom Transport des substituierten Primärmaterials abhängen.

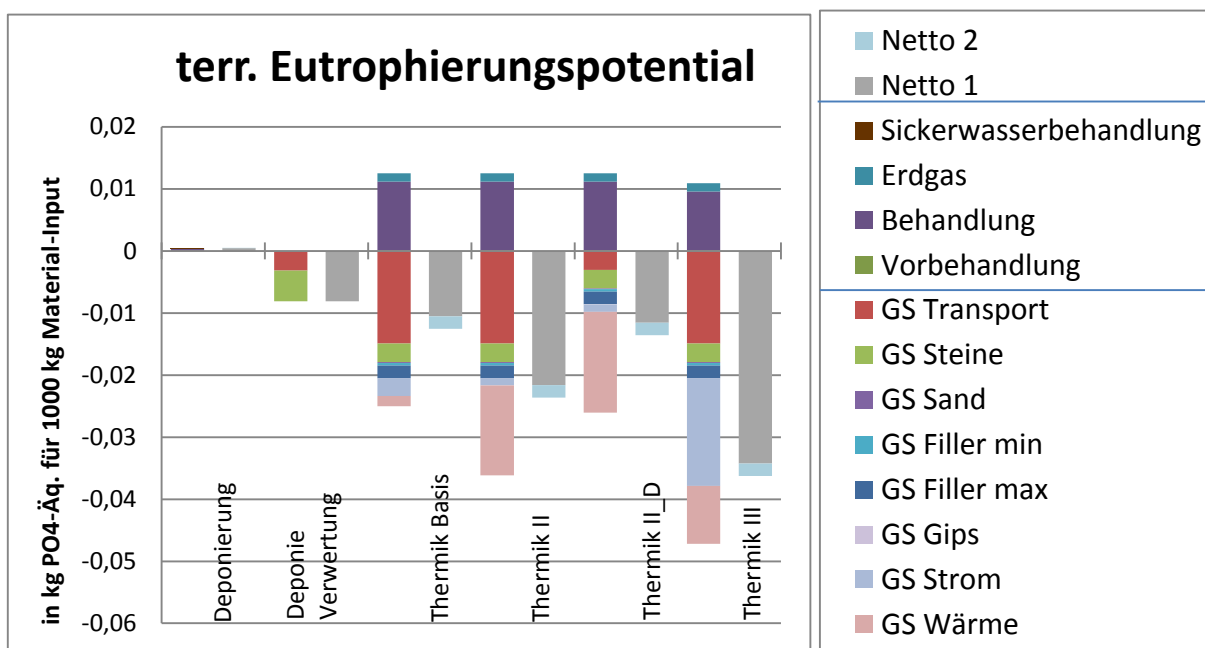


Abbildung 4.4: Ergebnisse für die Wirkungskategorie terrestrisches Eutrophierungspotenzial

Krebsrisiko-Potenzial

Lasten in dieser Wirkungskategorie stammen vor allem aus den Treibstoffvorketten (Diesel, schweres Heizöl). Die Lasten aus der thermischen Behandlung selbst wurden aus der Zusammensetzung teerhaltiger Bitumengemische (Datenbank ABANDA) und den Abreinigungserfolgen bzw. abgasspezifischen Emissionsfrachten in MVAs hohen Standards mit ähnlich guter Abgasreinigung abgeschätzt. Aufgrund der guten Abgasreinigung fallen diese aber nur eingeschränkt ins Gewicht. Bei den Gutschriften dominieren die Transporte, Kalkhydrat (falls Füller dies anstatt Gesteinsmehl substituiert), Wärme- und die Stromgutschriften für die thermische Behandlung mit volloptimierter energetischer Nutzung (Abbildung 4.5). Aufgrund der Vorketten für die Baumaschinen- und Sprengtätigkeit (Benzo(a)pyren) sind auch die Gutschriften für Sand und Steine deutlich zu sehen. Die Substitution des öllastigeren deutschen Wärmemixes bedingt deutlich höhere Gutschriften für Thermik II in deutscher Mittelgebirgsnähe.

Das Netto-Ergebnis zeigt Vorteile für die thermische Behandlung gegenüber der Deponierung, die sehr stark vom Transport des substituierten Primärmaterials abhängen und da-

her im Zusammenhang mit dem Antransport des Straßenaufbruchs gesehen werden müssen (Kapitel 4.4.1). Das zeigt sich bei einer Anlage in Deutschland in Mittelgebirgsnähe mit geringerem Antransport der substituierten Primärmaterialien. Eine Verwertung auf der Deponie schneidet je nach Substitutionseffekt des Füllers etwas besser oder schlechter als Thermik Basis ab, aber schlechter als die optimierten thermischen Optionen. Die Anlage in deutscher Mittelgebirgsnähe mit Teiloptimierung der energetischen Nutzung würde trotz der geringen Gutschriften für den Antransport aufgrund des substituierten deutschen Wärmemixes die höchste Netto-Einsparung erzielen, gefolgt von Thermik III mit den zweithöchsten Gutschriften über den substituierten Strom. Insgesamt sind die Ergebnisse zum Krebsrisiko-Potenzial kritisch zu hinterfragen, weil die zugrundeliegenden Emissionen nicht über alle Prozesse hinweg standardmäßig in die Datensätze aufgenommen werden, so dass Asymmetrien entstehen können. Außerdem variieren die ausgewiesenen Emissionen mit der Quelle des Datensatzes.

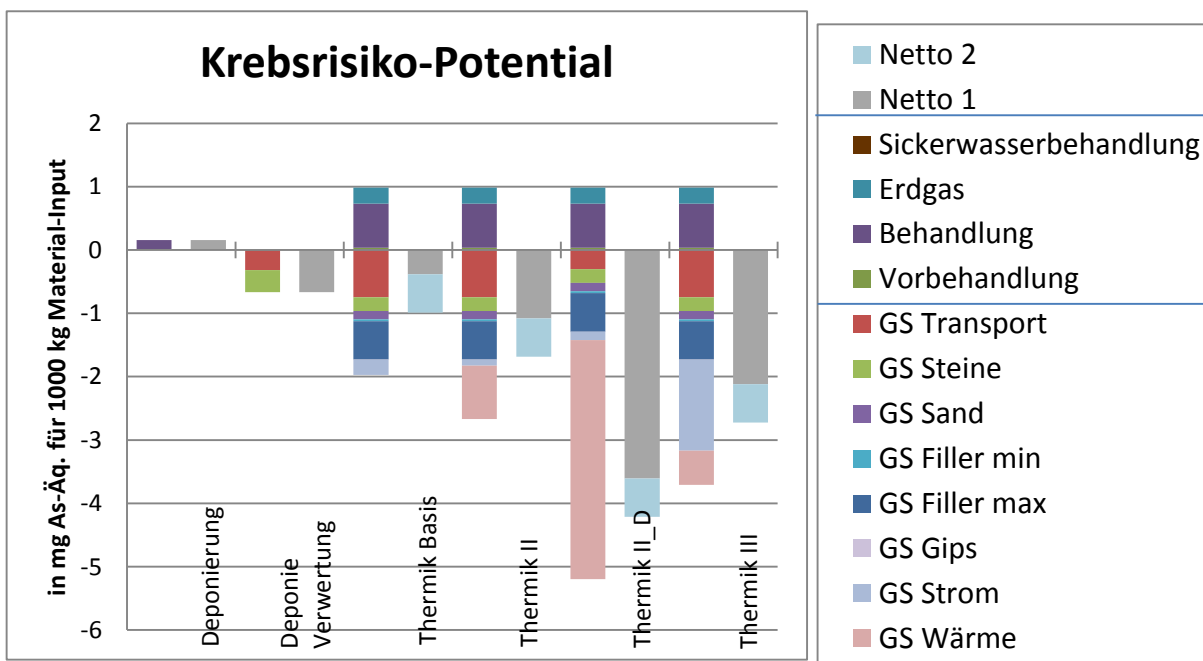


Abbildung 4.5: Ergebnisse für die Wirkungskategorie Krebsrisiko-Potenzial (Humantoxizität)

PM 2,5-Risikopotenzial (Feinstaub <2,5 µm)

Bei den Feinstaubemissionen treten die Gutschriften für die Primärgesteinsverarbeitung noch deutlicher zutage (Abbildung 4.6), wohingegen die Substitution von Kalkhydrat hier weniger stark ins Gewicht fällt, welche aufgrund des schweren Heizölbedarfs für die Kalzinerung beim Krebsrisikopotenzial höher ausfiel. Auch die substituierten Verbrennungsprozesse für die Gewinnung von Strom, Wärme und den Transport bedingen die Einsparung ausgestoßenen Feinstaubes. Eine Anlage in Deutschland in Mittelgebirgsnähe spart durch den anderen substituierten Wärmemix etwas mehr Feinstaub ein als eine in den Niederlanden, was sich durch den geringeren Antransport für die Primärmaterialien nivelliert. Das Netto-Ergebnis zeigt Vorteile für die thermische Behandlung, die stark vom Transport des substituierten Primärmaterials abhängen und daher unter Berücksichtigung des Antransportes des Straßenaufbruchs gesehen werden müssen (s. Kapitel 4.4.1). Durch die hohe Gutschrift für die Steinsubstitution schneidet die Verwertung auf der Deponie gleich gut wie die thermische Behandlung im Status-Quo ab.

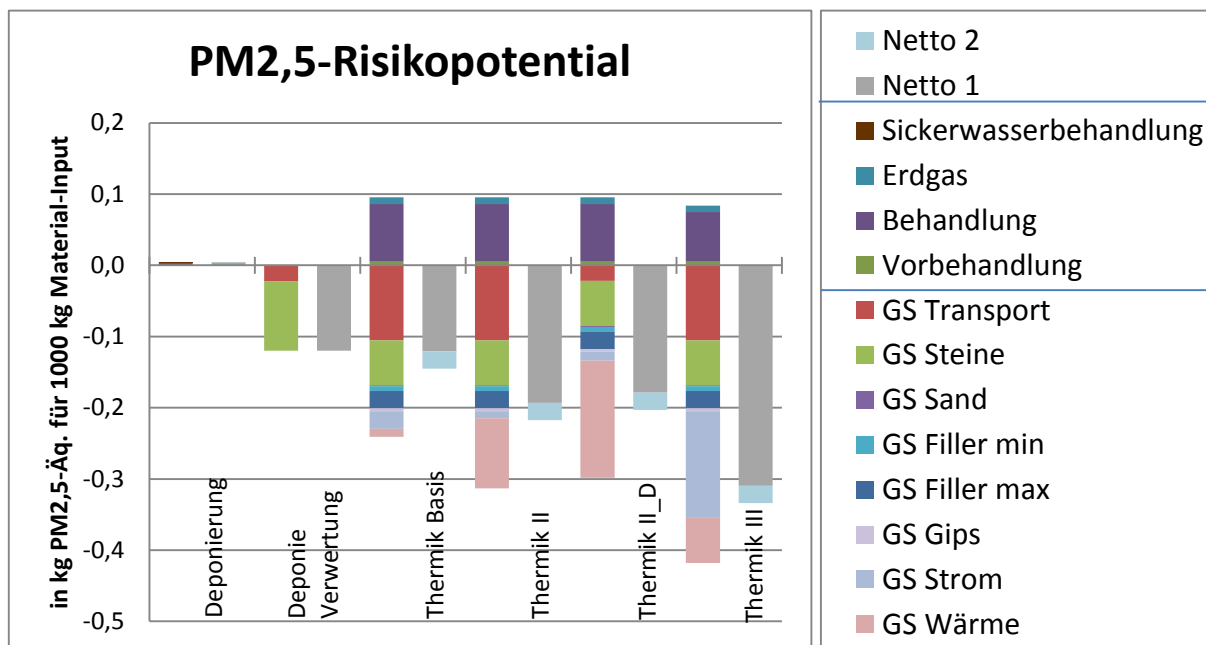


Abbildung 4.6: Ergebnisse für die Wirkungskategorie PM 2,5-Feinstaubpotenzial

Mineralischer kumulierter Rohstoffaufwand (KRA mineralisch)

Mineralische Ressourcen werden in allen Szenarien mit Ausnahme der Deponierung im selben Maße eingespart (Abbildung 4.7). Für die Verwertung auf der Deponie wird der teerhaltige Straßenaufbruch nicht weiter aufbereitet, so dass pauschal von einer Substitution von Steinen ausgegangen wird.

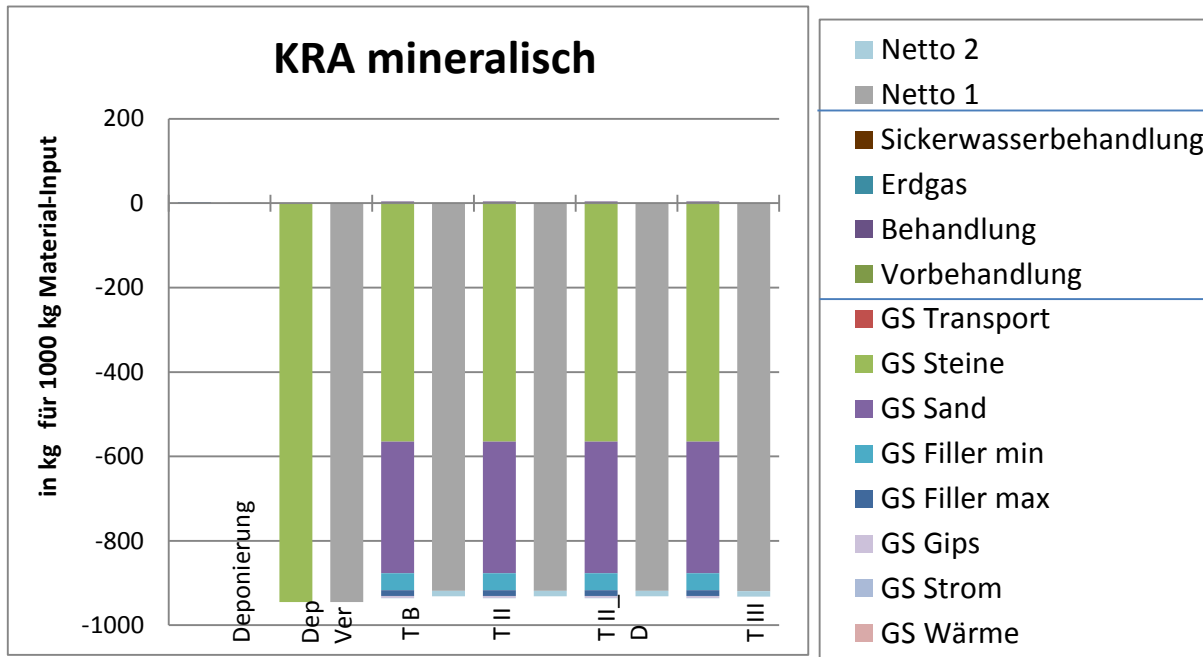


Abbildung 4.7: Ergebnis für den Indikator mineralischer kumulierter Rohstoffaufwand (KRA mineralisch)

Im Zuge der thermischen Behandlung wird der Straßenaufbruch in seine Anteile zerlegt, so dass sich die Gutschriften in die Substitution von Steinen, Sand und Füller aufteilen. Wenn der Füller statt Gesteinsmehl gelöschten Kalk ersetzt, fällt die Gutschrift nur ein bisschen höher aus, den Verlusten bei der Aufbereitung des Kalksteins und dem zusätzlich benötigten Input im Zuge der Transformation von Kalkstein zu Calciumoxid entsprechend. Die Einsparung durch die Substitution von Primärgips mit dem REA-Gips ist aufgrund der geringen Menge klein.

Siedlungs- und Verkehrsfläche

Mit der Deponierung wird eine Fläche als Siedlungs- und Verkehrsfläche beansprucht (Abbildung 4.8), die die höchste Naturferne aufweist. Für die Verwertung auf der Deponie wird dem als Baumaterial eingesetzten Straßenaufbruch hingegen kein Flächenverbrauch angelastet. Im Gegenteil wird durch die Substitution von Steinen Fläche für den Steinbruch eingespart. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass mangels weiterer Aufbereitung auf der Deponie der Straßenaufbruch pauschal Steine ersetzt. Mit der Aufteilung der Outputs aus der thermischen Behandlung auf die verschiedenen Produkte kommt der höhere spezifischere Flächenbedarf für den Sandabbau zum Tragen, so dass die Gutschrift höher ausfällt als bei derselben Menge substituierter Steine. Eine kleine Einsparung ergibt sich auch durch die stoffliche Verwertung des Füllers, wenn er Gesteinsmehl substituiert, die noch ein wenig steigt, wenn er gelöschten Kalk ersetzen kann. Mit der volloptimierten energetischen Nutzung aus der thermischen Behandlung würde eine größere Menge Strom er-

zeugt, so dass eine Einsparung für die mit der herkömmlichen Stromerzeugung in Anspruch genommene Siedlungs- und Verkehrsfläche resultiert.

Auch die thermische Behandlung hat aufgrund der Lagerflächen einen Bedarf an Siedlungs- und Verkehrsfläche, der jedoch geringer ausfällt, weil auf den Lagerflächen während der Anlagenlaufzeit eine große Menge teerhaltigen Straßenaufbruchs umgesetzt wird, so dass der einzelnen Charge nur ein geringer Anteil zuzurechnen ist. Dies ist hier vernachlässigt.

Es handelt sich hierbei um eine für die Deponie konservative Abschätzung der Siedlungs- und Verkehrsfläche, weil Deponie und Abbaustellen der Primärrohstoffe hier voll dieser naturfernen Flächenkategorie zugewiesen sind (vgl. Kapitel 4.1).

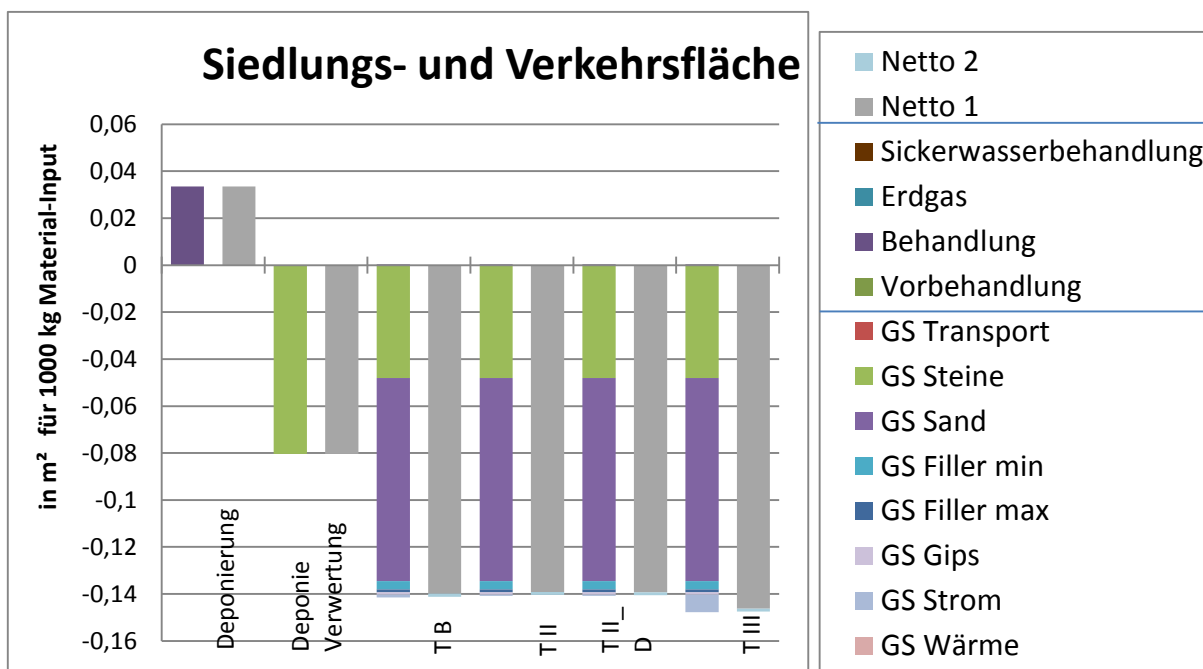


Abbildung 4.8: Ergebnisse für den Flächenverbrauch in der Kategorie Siedlungs- und Verkehrsfläche

Wird der gesamte Flächenverbrauch über alle Flächenkategorien (Forst, Landwirtschaft etc.) hinweg betrachtet, dominieren die Gutschriften für den mit der thermischen Behandlung substituierten Strom und dies etwas stärker für den niederländischen als den deutschen Strommix. In den Strommix gehen auch regenerative Energieträger in Form von Biomasse ein, die in der Flächenkategorie naturferner Forst bis hin zu Landwirtschaft angebaut wird, so dass die thermische Behandlung eine größere Einsparung erzielt.

PAK-Emissionen ins Wasser

Emissionen von PAK und weiteren ökotoxisch wirkenden Substanzen wie NSO-Heterocyclen ins Wasser treten in den Systemen Deponierung und Verwertung auf der Deponie während der Einbauphase im gleichen Maße auf (Abbildung 4.9). Es handelt sich hier um die potenzielle Elutionsfracht aus dem teerhaltigen Straßenaufbruch als gedankliche Monofraktion, wie sie im Elutionstest ermittelt wurde (Tabelle 3.2). Aufgrund von Sorptionseffekten im Deponiekörper kann die tatsächliche Emissionsfracht ins Grundwasser aus diesem Abfall anders sein und wird wahrscheinlich geringer ausfallen. Der Energie- und Betriebsmitteleinsatz für die Sickerwasserbehandlung verursacht hier keine Zusatzbe-

lastung wie in den anderen Kategorien/Indikatoren, sondern eine Entlastung. 90 % der PAK können dadurch zurückgehalten werden. Dies gilt in angepasster Form auch für die anderen ökotoxisch wirkenden Schadstoffe. Dadurch fällt die verbleibende Netto-Belastung der Beseitigung und Verwertung auf der Deponie mit Sickerwasserbehandlung deutlich geringer aus als dies ohne Sickerwasserbehandlung der Fall wäre (Netto 2). Beispielshalber sind in Abbildung 4.9 auch die Wasseremissionen für die etwas besser lösliche PAK-Einzelsubstanz Naphthalin und für die kanzerogene PAK-Leitsubstanz Benzo(a)pyren mit angegeben. Für NSO-Heterocyclen ist die Wasserlöslichkeit und damit die Eluierbarkeit größer.

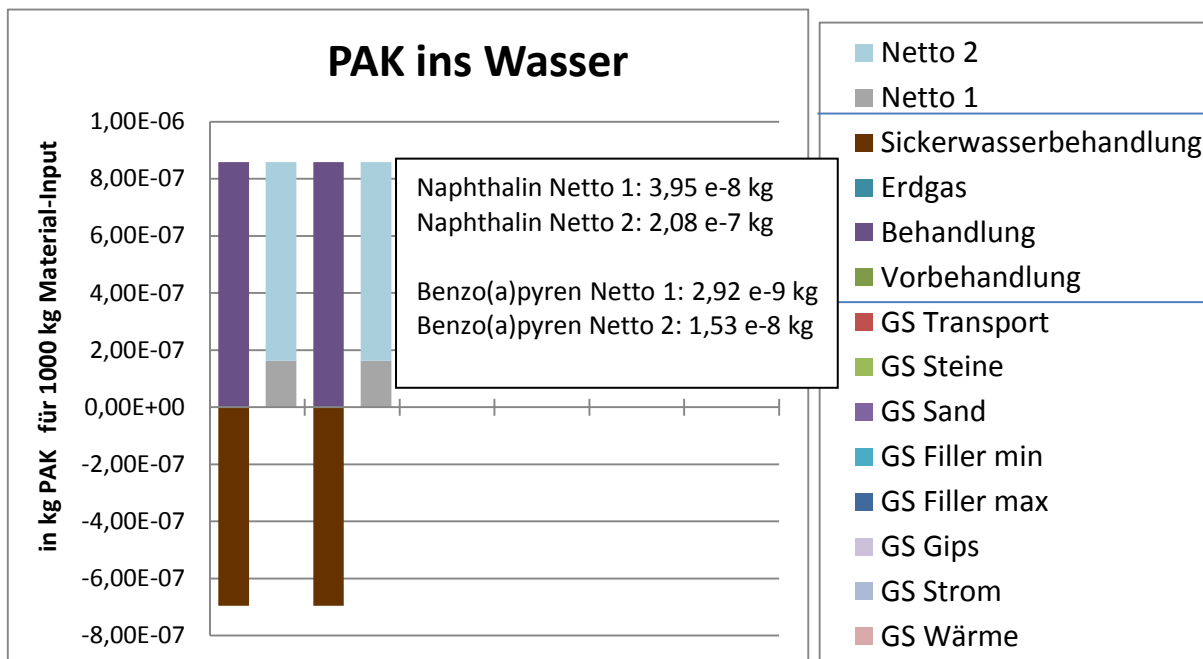


Abbildung 4.9: Ergebnisse für die wasserseitigen PAK-Emissionen

In dieser Kategorie spiegeln sich die Schadstoffe wider, welche im Deponiekörper verbleiben, wohingegen sie durch die thermische Behandlung zerstört werden. Eine Elution in die Umwelt ist nach Abschluss der Einbauphase zwar nicht mehr zu erwarten, aber ein sehr geringes Restrisiko verbleibt.

4.3 Interpretation der Ergebnisse ohne den Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs

4.3.1 Normierung und Rangbildung

Es zeigen sich zwischen den Wirkungskategorien teilweise gegenläufige Ergebnisse. Die Interpretation erfolgt auf verbal-argumentativer Basis, um möglichst transparente Aussagen zu ermöglichen.

Als Interpretationshilfe dient zum einen die quantitative Bedeutung der Unterschiede zwischen den Systemen in den einzelnen Wirkungskategorien. Hierzu können die Netto-Ergebnisse auf die jeweiligen Lasten, die ein Einwohner in Deutschland jährlich über die gesamte Volkswirtschaft hinweg verursacht, normiert werden: Netto-Ergebnis dividiert durch pro-Kopf-Last (Tabelle 4.2). Dadurch werden die Ergebnisse in allen Wirkungskategorien jeweils als Einwohnerdurchschnittswerte (EDW) dargestellt, so dass die quantitative Bedeutung verschiedener Wirkungskategorien miteinander verglichen werden kann.

Zum anderen hat das Umweltbundesamt den Wirkungskategorien/Indikatoren jeweils eine ökologische Bedeutung zugewiesen (Tabelle 4.2), die auf dem Stand der Wissenschaft, der Sensibilität von Öffentlichkeit und Politik und auch auf Abweichungen im Hinblick auf die politische Zielerreichung beruhen (UBA 1999).

Tabelle 4.2: Jährliche Pro-Kopf-Lasten, die durch einen Einwohner in Deutschland verursacht werden und ökologische Bedeutung der betrachteten Kategorien/Indikatoren

Wirkungskategorien	Jährliche Pro-Kopf-Lasten	Ökologische Bedeutung
Treibhauseffekt	11.776 kg CO ₂ -äq.	Sehr hoch
KEA fossil	134 GJ	Mittel
Versauerungspotenzial	31,5 kg SO ₂ -äq.	Hoch
Terr. Eutrophierungspotenzial	5,03 kg PO ₄ -äq.	Hoch
Krebsrisikopotenzial	8,63 g As-äq.	Sehr hoch
PM 2,5-Feinstaubpotenzial	23,9 kg PM 2,5-äq.	Hoch
KRA mineralisch	7.467 kg verwendete Entnahme	
Siedlungs- und Verkehrsfläche	596 m ²	Hoch

Quelle ökologische Bedeutung: [UBA 1999]; pro-Kopf-Lasten: [UBA 2013] [UBA 2011]

Basis sind die jeweils absolut höchsten Netto-Ergebnisse der einzelnen Szenarien, die je nach Substitution von Gesteinsmehl oder gelöschtem Kalk durch den Füller resultieren.

Es zeigt sich, dass die normierten Unterschiede zwischen den Systemen beim Krebsrisikopotenzial mit sehr hoher ökologischer Bedeutung und der Siedlungs- und Verkehrsfläche aufgrund der diesbezüglich geringen Bedeutung der Entsorgung teerhaltigen Straßenauf-

bruchs an der Volkswirtschaft irrelevant sind (Abbildung 4.10). Die Unterschiede zwischen den Systemen in den anderen betrachteten Kategorien/Indikatoren, die in ihrer Bedeutung zwischen sehr hoch bis mittel rangieren, sind ähnlich wenig relevant. Die Einsparungen beim mineralischen kumulierten Rohstoffaufwand sind aus quantitativer Sicht mit Abstand am relevantesten, die ökologische Bedeutung wird in (UBA 1999) über die Summe „Ressourceneinsparung“ als mittel bewertet, was sich aber auf die (knapperen) fossilen Rohstoffe bezieht. Die ökologische Bedeutung für die eher massenhaft verfügbaren mineralischen Rohstoffe ist als geringer einzustufen.

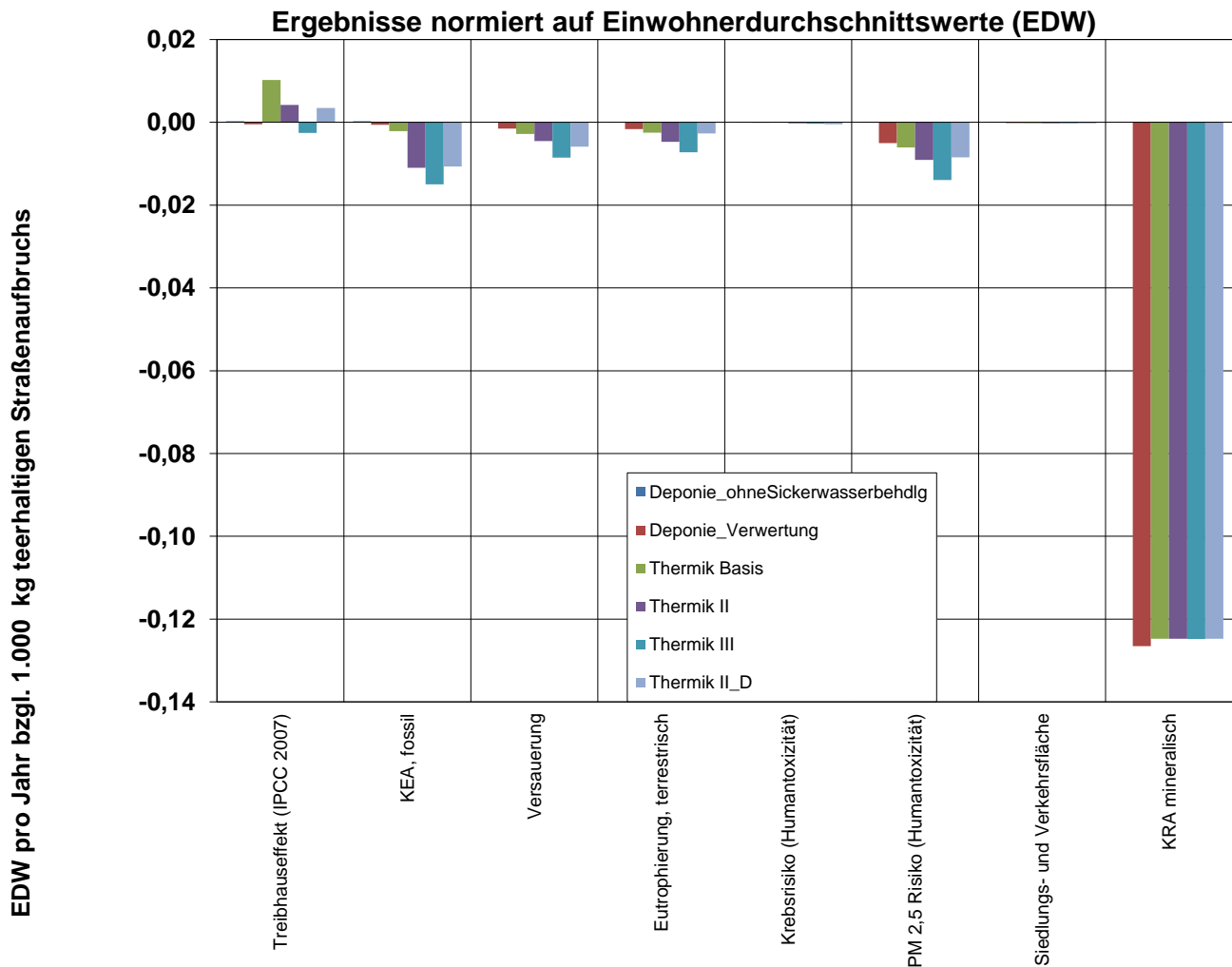


Abbildung 4.10: Normierte Ergebnisse in Einwohnerdurchschnittswerten (EDW)

4.3.2 Fazit zu den Ergebnissen ohne den Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs

Beim Treibhauseffekt hat die Deponierung Vorteile gegenüber dem Status-Quo der thermischen Behandlung. Auch gegenüber der in naher Zukunft als in der Praxis realistisch einzustufenden Teiloptimierung der energetischen Nutzung aus der thermischen Behandlung bestehen noch leichte Vorteile, die gegenüber einer Anlage in Deutschland aufgrund des dort substituierten, treibhauslastigeren Wärmemixes jedoch noch etwas geringer wären. Eine aus Sicht der energetischen Nutzung vollständig optimierte Anlage würde etwas

besser als eine Deponierung abschneiden, wenn durch den Füller gelöschter Kalk substituiert wird. Eine solche Anlage wird aber in naher Zukunft noch nicht zur Verfügung stehen.

Bei allen anderen Wirkungskategorien/Indikatoren zeigen sich Vorteile für den Status-Quo der thermischen Behandlung gegenüber einer Deponierung und häufig ein Patt zur Verwertung auf der Deponie. Mit einer teiloptimierten energetischen Nutzung aus der thermischen Behandlung bestehen deutlichere Vorteile. Beim Versauerungs-, terrestrischen Eutrophierungs-, Krebsrisiko- und PM 2,5-Feinstaubpotenzial sind aber deutliche Abhängigkeiten vom Transport gegeben, so dass der Antransport des teerhaltigen Straßenaufbruchs für eine ortsabhängige Bewertung hier unbedingt mit berücksichtigt werden muss (Kapitel 4.4.1). Eine Anlage in Deutschland nahe den Primärrohstoffquellen hätte neben dem Treibhauseffekt nur im Versauerungspotenzial eine bessere Ausgangslage als eine Anlage in den Niederlanden. Die höheren Substitutionseffekte durch die in Deutschland abgegebene Energie würden durch die geringere Einsparung von Primärrohstofftransporten konterkariert. Am günstigsten wäre demnach eine Anlage in Deutschland, die ähnlich weit von den Primärrohstoffquellen wie die Niederlande entfernt liegt.

Insgesamt beschränkt sich der Vorteil einer Deponierung im Anlagenvergleich ohne Berücksichtigung des Antransports des teerhaltigen Straßenaufbruchs auf den Treibhauseffekt. Dieser wird als sehr wichtig eingestuft, aber auch die Bedeutung der anderen Wirkungskategorien rangiert großteils im Bereich mittel bis hoch. Die quantitative Bedeutung der durch eine Verwertung eingesparten mineralischen Ressourcen spricht gegen eine reine Deponierung des Materials. Durch die thermische Behandlung wird das Schadenspotenzial beseitigt, durch eine Deponierung oder Verwertung auf der Deponie gesichert.

4.4 Ergebnisse mit Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs

4.4.1 Ergebnisse für die Wirkungskategorien

Mit diesem Kapitel wird eine Einordnung der vom Anfallort des teerhaltigen Straßenaufbruchs unabhängigen ökologischen Bewertung in den regionalen Kontext der jeweiligen Baustelle ermöglicht. Die thermische Behandlung wird auch mit der evtl. Errichtung weiterer Anlagen in Deutschland niemals so flächendeckend zur Verfügung stehen wie Deponien. Für beide Fälle kann ein gleicher Kurztransport per LKW unterstellt werden, der im einen Fall den teerhaltigen Straßenaufbruch von der Baustelle zur Deponie befördert und im anderen Fall zum Zwischenlager, von dem aus ein gebündelter Langstreckentransport per Schiff, Bahn oder weiterem LKW organisiert wird. Ggf. fällt der Transport zum Zwischenlager auch länger aus.

Die in Kapitel 4.2.2 gezeigte Differenz im Netto-Ergebnis aus thermischer Behandlung und Deponierung ohne den Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs wird im Folgenden in eine Strecke Weitstreckentransport mit verschiedenen Verkehrsmitteln umgerechnet, die zu eben diesen Lasten führt. Die so errechnete Entfernung gibt an, wie weit der im Vergleich zur Entfernung zur Deponie zusätzliche Langstreckentransport des teerhaltigen Straßenaufbruchs ausfallen dürfte/müsste, damit die thermische Behandlung in der betrachteten Kategorie genauso abschneidet wie die Beseitigung/Verwertung auf der Deponie (Break-Even-Transportstrecke). Hierbei berücksichtigt sind die Zusatzlasten für die Zwischenlagerung, was die mögliche Strecke zur thermischen Behandlung, die sich direkt

aus den Netto-Ergebnissen ohne Transport errechnet, schmälert. Minimale und maximale Transportstrecken ergeben sich hauptsächlich dadurch, dass der Füller aus der thermischen Behandlung Gesteinsmehl oder gelöschten Kalk ersetzen kann (s. Kapitel 4.2.2). Die für die thermische Behandlung ungünstigste Kombination führt zu den minimalen und die günstigste zu den maximalen Strecken:

- (min) Thermische Behandlung mit Substitution von Gesteinsmehl durch den Füller (maximaler Netto-Wert thermische Behandlung)
- (max) Thermische Behandlung mit Substitution von gelöschtem Kalk durch den Füller (minimaler Netto-wert thermische Behandlung). Diese sind durch die hauptsächliche Verwendung des Füllers im Betonbereich eher zutreffend.

Die Veränderung der Netto-Ergebnisse für den durch die thermische Behandlung verursachten Treibhauseffekt aus Kapitel 4.2.2 mit der Länge der im Vergleich zur Deponie zusätzlichen Transportstrecke (Differenz) des Straßenaufbruchs per Schiff zur thermischen Anlage wird in Abbildung 4.11 visualisiert. Oben ist die für die thermische Behandlung ungünstige und unten günstige Situation angegeben.

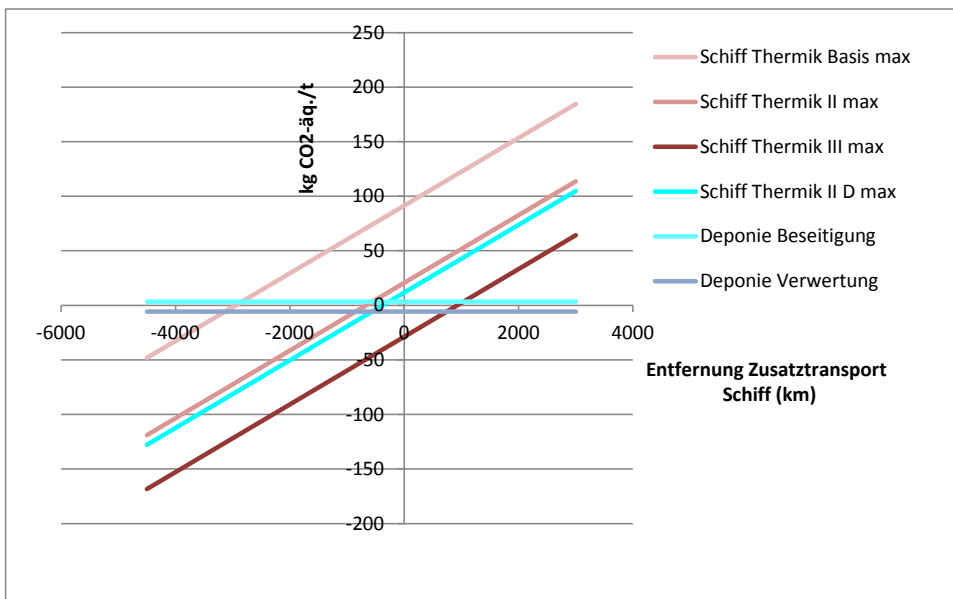
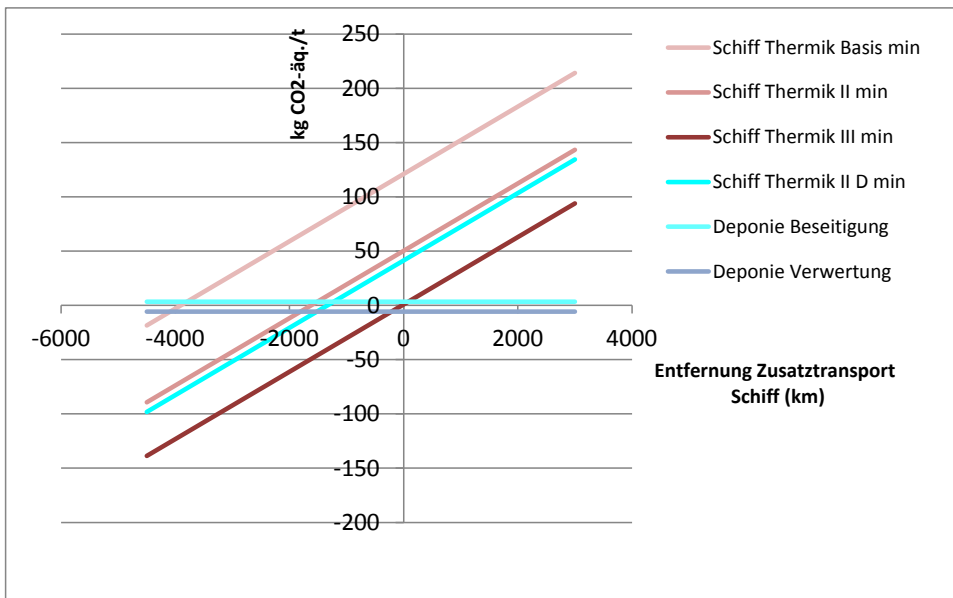


Abbildung 4.11: Netto-Ergebnisse für den durch die thermische Behandlung verursachten Treibhauseffekt in Abhängigkeit von der Länge des Langstreckentransports zur thermischen Anlage; oben ungünstige Situation für thermische Behandlung, unten günstige Situation für thermische Behandlung.

In Tabelle 4.3 bis Tabelle 4.8 sind die errechneten, im Vergleich zur Deponie zusätzlichen Break-Even-transportstrecken (Differenz) mit verschiedenen Verkehrsmitteln für die betrachteten Wirkungskategorien/Indikatoren aufgelistet, deren Ergebnis vom Transport abhängt. Die Werte in Tabelle 4.3 für das Schiff geben dabei die Schnittpunkte der Linien von Deponie Beseitigung/Verwertung Deponie mit thermischer Behandlungsoption in Abbildung 4.11 wieder.

Grob gesagt gilt: Liegt die tatsächliche zusätzliche Langstreckenentfernung (Differenz) zur thermischen Behandlung unterhalb der errechneten Entfernungsdifferenz, ist die thermi-

sche Behandlungsoption bezüglich dieser Kategorie im Vorteil. Falls die tatsächliche Entfernungsdifferenz größer ist oder die errechnete Entfernungsdifferenz schon einen negativen Wert aufweist, ist die Deponierung im Vorteil. Für den Fall, dass zur Deponie eine größere Strecke per LKW zurückzulegen ist als zum Umschlagsort vor dem Weitertransport zur thermischen Behandlung, sind die höheren spezifischen Lasten für den LKW-Transport zu berücksichtigen, so dass die zusätzliche Break-Even-Transportstrecke (Differenz) zur thermischen Anlage per Schiff noch größer ausfallen kann. Ganz unten in den Tabellen ist zur Orientierung jeweils angegeben, welche Lasten der Umschlag bedingt, welcher bei der Bestimmung der Transportstrecken mit eingegangen ist. Bei Langstreckentransport per Schiff und Bahn ist der Umschlag zweimal aufgeschlagen, im Falle des LKW nur einmal (s. Kapitel 3.5). Die Werte beziehen sich auf die Streckendifferenz zwischen Baustelle-thermische Anlage und Baustelle-Deponie. Die gesamte Break-Even-Transportstrecke zur thermischen Anlage hängt somit von der Entfernung zur Deponie ab und steigt mit dieser.

Als weiteres System wird hier auch eine auf Thermik II basierende Option der thermischen Verwertung in Deutschland in Mittelgebirgsferne angesetzt. Dafür ist angenommen, dass die durch den Output der Anlage substituierten Primärmaterialien mit Ausnahme von Sand sonst wie im Falle der Anlage in den Niederlanden 350 km weit in das Anlagenumfeld transportiert werden müssten (Thermik II_D gebirgsfern), bei Sand sind es 50 km (s. Abbildung 3.1). Im Unterschied zu den Niederlanden wird für eine gebirgsferne Anlage in Deutschland aber ein Transport per LKW über die 350 km Distanz unterstellt.

Tabelle 4.3: Treibhauseffekt: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag

Treibhauseffekt Vergleichsszenario	Thermik I	Thermik II	Thermik III	Thermik II_D	Thermik II_D gebirgsfern
Schiff Deponierung min (km)	-3812	-1529	64	-1242	-678
Max (km)	-2839	-555	1037	-269	296
Schiff Verwertung Deponie min (km)	-4106	-1823	-230	-1536	-972
Max (km)	-3133	-850	743	-563	1
Bahn Deponierung min (km)	-6154	-2468	104	-2005	-1094
Max (km)	-4583	-897	1675	-434	477
Bahn Verwertung Deponie min (km)	-6629	-2943	-372	-2480	-1569
Max (km)	-5058	-1372	1199	-909	2
LKW Deponierung min (km)	-1436	-572	31	-464	-250
Max (km)	-1068	-204	399	-95	118
LKW Verwertung Deponie min (km)	-1547	-683	-81	-575	-361
Max (km)	-1179	-315	287	-207	7
Einfacher Umschlag von 1.000 kg Straßenaufbruch (kg CO ₂ -äq.)	0,514 kg CO ₂ -äq./Mg				

Tabelle 4.4: KEA fossil: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag

KEA fossil Vergleichsszenario	Thermik I	Thermik II	Thermik III	Thermik II_D	Thermik II_D gebirgsfern
Schiff Deponierung min (km)	406	3312	4617	3213	3784
Max (km)	750	3656	4960	3557	4127
Schiff Verwertung Deponie min (km)	125	3031	4336	2932	3502
Max (km)	468	3374	4679	3275	3845
Bahn Deponierung min (km)	884	7210	10050	6995	8236
Max (km)	1632	7957	10798	7742	8983
Bahn Verwertung Deponie min (km)	271	6597	9437	6382	7623
Max (km)	1019	7344	10185	7129	8370
LKW Deponierung min (km)	158	1246	1735	1209	1423
Max (km)	287	1375	1864	1338	1551
LKW Verwertung Deponie min (km)	53	1141	1630	1104	1317
Max (km)	181	1269	1758	1232	1446
Einfacher Umschlag von 1.000 kg Straßenaufbruch (MJ)	6,71 MJ/Mg				

Tabelle 4.5: Versauerungspotenzial: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag

Versauerungspotenzial Vergleichsszenario	Thermik I	Thermik II	Thermik III	Thermik II_D	Thermik II_D gebirgsfern
Schiff Deponierung min (km)	207	384	784	517	770
Max (km)	290	467	867	600	853
Schiff Verwertung Deponie min (km)	44	221	620	354	607
Max (km)	127	304	703	437	690
Bahn Deponierung min (km)	1655	3076	6271	4140	6164
Max (km)	2320	3741	6936	4805	6829
Bahn Verwertung Deponie min (km)	348	1769	4964	2833	4857
Max (km)	1013	2434	5629	3498	5521
LKW Deponierung min (km)	176	326	663	438	652
Max (km)	246	396	733	508	722
LKW Verwertung Deponie min (km)	38	188	525	300	514
Max (km)	108	258	595	370	584
Einfacher Umschlag von 1.000 kg Straßenaufbruch (g SO ₂ -äq.)	0,502 g SO ₂ -äq./Mg				

Tabelle 4.6: Terrestrisches Eutrophierungspotenzial: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag

Eutrophierungspotenzial, terr. Vergleichsszenario	Thermik I	Thermik II	Thermik III	Thermik II_D	Thermik II_D gebirgsfern
Schiff Deponierung min (km)	195	395	622	214	443
Max (km)	231	431	658	250	480
Schiff Verwertung Deponie min (km)	42	242	469	61	290
Max (km)	78	278	505	97	326
Bahn Deponierung min (km)	3178	6432	10131	3484	7220
Max (km)	3767	7021	10720	4073	7809
Bahn Verwertung Deponie min (km)	680	3933	7633	986	4722
Max (km)	1268	4522	8222	1575	5311
LKW Deponierung min (km)	182	368	580	200	413
Max (km)	216	402	614	234	447
LKW Verwertung Deponie min (km)	40	226	437	57	271
Max (km)	73	259	471	91	304
Einfacher Umschlag von 1.000 kg Straßenaufbruch (g PO ₄ -äq.)	0,054 g PO ₄ -äq./Mg				

Tabelle 4.7: Krebsrisikopotenzial: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag

Krebsrisikopotenzial Vergleichsszenario	Thermik I	Thermik II	Thermik III	Thermik II_D	Thermik II_D gebirgsfern
Schiff Deponierung min (km)	227	563	1065	1784	2427
Max (km)	520	856	1358	2078	2720
Schiff Verwertung Deponie min (km)	-170	165	668	1387	2030
Max (km)	123	458	961	1680	2323
Bahn Deponierung min (km)	1271	3147	5958	9980	13574
Max (km)	2910	4786	7598	11620	15213
Bahn Verwertung Deponie min (km)	-951	924	3736	7758	11352
Max (km)	688	2564	5376	9398	12991
LKW Deponierung min (km)	81	192	359	598	812
Max (km)	178	290	457	696	909
LKW Verwertung Deponie min (km)	-51	60	227	466	680
Max (km)	46	158	325	564	777
Einfacher Umschlag von 1.000 kg Straßenaufbruch (mg As-äq.)	0,034 mg As-äq./Mg				

Tabelle 4.8: PM 2,5-Feinstaubpotenzial: Break-Even Transportentfernung zur thermischen Behandlung im Vergleich zum in der ersten Spalte genannten Vergleichsszenario mit dem ebenso in der ersten Spalte benannten Transportmittel; letzte Zeile: Lasten durch den Umschlag

PM 2,5-Feinstaubpotenzial Vergleichsszenario	Thermik I	Thermik II	Thermik III	Thermik II_D	Thermik II_D gebirgsfern
Schiff Deponierung min (km)	318	503	801	466	703
Max (km)	381	566	864	528	765
Schiff Verwertung Deponie min (km)	1	186	484	148	385
Max (km)	63	248	546	211	448
Bahn Deponierung min (km)	3482	5506	8769	5097	7690
Max (km)	4165	6189	9451	5780	8372
Bahn Verwertung Deponie min (km)	9	2033	5295	1623	4216
Max (km)	690	2715	5977	2305	4898
LKW Deponierung min (km)	288	455	723	421	634
Max (km)	344	511	779	477	691
LKW Verwertung Deponie min (km)	2	169	437	135	348
Max (km)	58	225	493	191	404
Einfacher Umschlag von 1.000 kg Straßenaufbruch (g PM2,5-äq.)	0,477 g PM2,5-äq./Mg				

Für das Beispiel **nördliches Rheinland-Pfalz** und thermische Behandlung in den Niederlanden mit einem angenommenen zusätzlichen Ferntransport (Differenz zur Entfernung zur Deponie) zur thermischen Anlage von 350 km per Schiff lässt sich nun Folgendes zur ortsabhängigen Bewertung **im Vergleich zur Deponierung** schließen; falls die Differenzentfernung geringer ausfällt, weil die Entfernung zur Deponie größer ist, ändert sich das u.g. Bild entsprechend:

- Treibhauseffekt: Nur im Falle einer Anlage mit einer volloptimierten energetischen Nutzung (aus heutiger Sicht in der Praxis nicht realistisch) wäre ein besseres Abschneiden der thermischen Behandlung gegenüber der Deponierung möglich → Nachteile thermische Behandlung
- Versauerungs- und terrestrisches Eutrophierungspotenzial: Die errechneten Entfernungen zur thermischen Behandlung, die zurückgelegt werden dürften, liegen im Falle des Status Quo leicht unterhalb der tatsächlichen Entfernung und im Falle einer teilloptimierten energetischen Nutzung leicht darüber → leichte Nachteile für thermische Behandlung im Status Quo, leichte Vorteile mit teilloptimierter energetischer Nutzung
- Fossiler kumulierter Energieaufwand, PM 2,5-Potenzial: Vorteile für thermische Behandlung
- Kumulierter mineralischer Rohstoffaufwand, PAK-Elution → Vorteile für thermische Behandlung unabhängig von Transportstrecke zur Anlage

Die Verbringung eines teerhaltigen Straßenaufbruchs zur thermischen Behandlung im Status Quo aus dem nördlichen Rheinland-Pfalz per Schiff in die Niederlande wäre daher **im Vergleich mit einer Deponierung** aus ökologischer Sicht eher nicht zu empfehlen. Im Falle einer teilloptimierten energetischen Nutzung ist diese Option aus ökologischer Sicht empfehlenswert. Der noch verbleibende Nachteil für die thermische Behandlung im

Treibhauseffekt ist dann schon deutlich geringer. Wenn der Füllstoff tatsächlich gelöschten Kalk ersetzen kann, verringert sich dieser nochmals.

Der **Vergleich mit dem System Verwertung auf der Deponie** fällt für die Verwertung auf der Deponie aus. Dies ändert sich im Falle einer vollständig optimierten energetischen Nutzung im Zuge der thermischen Behandlung. Eine solche vollständige Optimierung muss in der Praxis aber noch umgesetzt werden und ist aus heutiger Sicht realitätsfremd.

4.4.2 Fazit zu den Ergebnissen inklusive Transport des teerhaltigen Straßenaufbruchs

Im Treibhauseffekt schneiden die Deponierung und die Verwertung auf der Deponie auch ohne Zusatztransport zur thermischen Anlage besser ab als die thermische Behandlung. Umgekehrt ist die Deponierung unabhängig vom zusätzlichen Antransport zur thermischen Anlage in den Kategorien kumulierter mineralischer Rohstoffaufwand (KRA mineralisch), und ökotoxischen Schadstoffeinträgen ins Gewässer der thermischen Behandlung unterlegen, die Verwertung auf der Deponie nur in letzterer Kategorie. Flächenverbrauch und Krebsrisikopotenzial bleiben hier ausgeblendet.

Für die weiteren Kategorien, welche dadurch entscheidend sind, ist das Ergebnis vom Transport abhängig, wobei die thermische Behandlung gegenüber der Deponierung im Vorteil ist, wenn kein zusätzlicher Antransport (Differenz zur Entfernung zur Deponie) zur thermischen Anlage anfällt. Gegenüber der Verwertung auf der Deponie schneidet die thermische Behandlung im Status Quo in diesen Kategorien ähnlich ab, wenn im Vergleich zur Deponie keine Transportdifferenz auftritt bzw. besser, wenn eine teiloptimierte Nutzung der Energie durch Anschluss ans Fernwärmenetz vorliegt. Wenn im Vergleich zur Deponie keine höhere Transportlasten bestehen, fällt das Gesamtergebnis somit für die thermische Behandlung aus. Im Vergleich zur Verwertung auf der Deponie gilt dies erst dann, wenn die Anlage ans Fernwärmenetz angeschlossen ist, sonst besteht ein Patt.

Das Ergebnis bezüglich des terrestrischen Eutrophierungs-, Versauerungs- und Feinstaubpotenzials kippt ab den vergleichsweise kürzesten Strecken, die zur thermischen Anlage zusätzlich zurückzulegen sind, zugunsten der **Deponierung**. Da diese Streckenlängen bei den o.g. Kategorien in einem ähnlichen Bereich liegen, kippt auch das Gesamtergebnis ab dieser zugunsten der Deponierung, die dann der thermischen Behandlung aus ökologischer Sicht vorzuziehen ist. Vereinfachend kann daher die Gesamtentscheidung unter Berücksichtigung des jeweiligen zusätzlichen Antransports zur thermischen Anlage bspw. an derjenigen der o.g. Kategorien, die die zweit kürzeste Break-Even-Transportstrecke mit dem jeweils betrachteten Transportmittel für die Langstrecke aufweist, festgemacht werden. Ist die im Vergleich zur Deponie zusätzliche Transportstrecke zur thermischen Anlage dann größer, schneidet die Deponierung neben dem Treibhauseffekt in zwei weiteren Kategorien besser ab als die thermische Behandlung. Die daraus resultierenden Entfernungen sind in Tabelle 4.9 dargestellt. Aufgrund der Unsicherheiten zum Substitutionseffekt des Füllers aus der thermischen Behandlung ergeben sich Spannweiten. Wegen des Haupteinsatzes des Füllers in der Betonindustrie wird hier vorgeschlagen, eine mittlere Entfernung zu bilden, in welche die maximale zusätzliche Entfernung zu einem Faktor von 0,9 und die minimale zusätzliche Entfernung zu 0,1 eingeht. Liegt die zusätzliche Transportstrecke zur thermischen Anlage (Differenz zur Entfernung zur Deponie) aus der jeweiligen Region über der ausgewiesenen Break-Even-Transportentfernung, ist die Deponierung bzw. Verwertung auf der Deponie vorzuziehen.

Im Vergleich mit der **Verwertung auf der Deponie** kippt das Ergebnis noch schneller, weil hier die thermische Behandlung im mineralischen Rohstoffaufwand und Flächenverbrauch nicht besser abschneidet. Als Maßstab kann daher bspw. diejenige der o.g. Kriterien, die die kürzeste zusätzliche Break-Even-Transportstrecke mit dem jeweils betrachteten Transportmittel für die zusätzliche Langstrecke aufweist, dienen. Ist die zusätzliche Transportstrecke zur thermischen Anlage (Differenz zur Deponieentfernung) größer, dann schneidet die Verwertung auf der Deponie in mindestens zwei Kategorien besser ab als die thermische Behandlung und in einer weiteren Kategorie genauso gut und ist dann der thermischen Behandlung vorzuziehen. Die so resultierenden Differenzentfernungen sind in Tabelle 4.10 dargestellt.

Tabelle 4.9: Abgeschätzte Break-Even-Transportentfernung zur thermischen Anlage im Vergleich zur Deponierung: Mittlerer Reihenwert aus Versauerungs-, terrestrischem Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial

Gesamtergebnis Vergleichsszenario: Deponierung	Thermik I	Thermik II	Thermik II D mit- telgebirgsnah (50 km)	Thermik II_D mittelgebirgsfern (350 km)
Schiff Min (km)	207	395	466	703
Max (km)	290	467	528	765
Mittel (km)	282	460	522	759
Bahn Min (km)	3178	5506	4140	7220
Max (km)	3767	6189	4805	7809
Mittel (km)	3708	6121	4739	7750
LKW Min (km)	182	368	421	634
Max (km)	246	402	477	691
Mittel (km)	240	399	471	685

Tabelle 4.10: Abgeschätzte Break-Even-Transportentfernung zur thermischen Anlage im Vergleich zur Verwertung auf der Deponie: Minimaler Reihenwert aus Versauerungs-, terrestrischem Eutrophierungs- und PM 2,5-Potenzial

Gesamtergebnis Vergleichsszenario: Verwertung Depo- nie	Thermik I	Thermik II	Thermik II D mit- telgebirgsnah (50 km)	Thermik II_D mittelgebirgsfern (350 km)
Schiff Min (km)	1	186	61	290
Max (km)	63	248	97	326
Mittel (km)	57	242	93	323
Bahn Min (km)	9	1769	986	4216
Max (km)	690	2434	1575	4898
Mittel (km)	622	2367	1516	4830
LKW Min (km)	2	169	57	271
Max (km)	58	225	91	304
Mittel (km)	52	219	88	301

Somit schneidet grob zusammengefasst die **Deponierung** besser ab, wenn der zusätzliche Transport zur thermischen Anlage (Differenz zur Entfernung zur Deponie) im Status Quo in den Niederlanden gut 280 km per **Schiff** überschreitet. Nach einer teilweisen Optimierung der energetischen Nutzung aus der Behandlung müssten hierfür 460 km per Schiff über-

schritten werden. Wenn die Anlage mit teiloptimierter Nutzung der Energie in Deutschland in Mittelgebirgsnähe steht, wäre ein zusätzlicher Antransport per **LKW** von 470 km möglich, bei einem deutschen Standort in Mittelgebirgsferne knapp 690 km.

Die **Verwertung auf der Deponie** ist besser, wenn zur thermischen Anlage im Status Quo in den Niederlanden ein im Vergleich zur Entfernung zur Deponie zusätzlicher **Schiffsweg** von mehr als knapp 60 km zurückgelegt werden muss, welcher im Falle einer Anlage mit TeiLOPTimierung der energetischen Nutzung auf gut 240 km anwächst. Wenn letztere Anlage in deutscher Mittelgebirgsnähe/-ferne steht, müsste ein zusätzlicher Antransport per **LKW** von knapp 90/ gut 300 km überschritten werden.

Die hier genannten Zahlen haben nur indikativen Charakter. Da es sich um im Vergleich zur Deponie zusätzliche Break-Even-Transportstrecken zur thermischen Anlage handelt, ist die gesamte Transportstrecke zur thermischen Anlage direkt von der jeweiligen Strecke zur Deponie abhängig. Berücksichtigt werden müssen außerdem die unterschiedlichen spezifischen Lasten für unterschiedliche Transportstrecken mit verschiedenen Verkehrsmitteln. Deshalb gilt:

Wenn der erste Transportschritt per LKW zum Zwischenlager wesentlich kleiner oder größer ausfällt als derjenige zur Deponie, wird empfohlen, die mit dieser Zusatzstrecke verbundenen Lasten über die spezifischen Emissionen zum LKW (s. unten) für diese Kurzstrecke abzuschätzen. Diese Lasten können dann wiederum über die für das jeweils betrachtete Verkehrsmittel in der Langstrecke geltenden spezifischen Emissionen in der entscheidenden Kategorie in eine entsprechende Strecke umgerechnet werden, die der jeweiligen Break-Even-Zusatztransportentfernung aufzuschlagen bzw. abzuziehen ist. Alternativ können auch wie im Absatz darunter beschrieben die Transportlasten ausgerechnet und diese zusammen mit den Lasten für den Umschlag auf die Netto-Ergebnisse der Systeme ohne Antransport aufaddiert werden. Der Vergleich des so ermittelten Gesamtergebnisses in dieser Kategorie liefert dann die Entscheidung.

Über die spezifischen Transportlasten pro Tonnenkilometer können die gesamten Netto-Ergebnisse der einzelnen Systeme für eine einzelne Betrachtungsregion errechnet und miteinander verglichen werden. Dafür werden die Transportlasten, im ‚Falle der thermischen Behandlung zusammen mit den Lasten für den Umschlag (einfach für Transport per LKW, zweifach für Transport per Schiff/Schiene, s. Tabelle 4.3 bis Tabelle 4.8), auf die Netto-Ergebnisse aus Kapitel 4.2.1 aufgeschlagen. Die spezifischen Transportlasten über verschiedene Verkehrsträger können über folgendes Internet-Tool bestimmt werden: <http://www.ecotransit.org/calculation.de.html>. Dort werden Angaben zur Entfernung und Beladung gemacht, so dass die Emissionen auch auf Transportkilometer bezogen errechnet werden können.

Der Optimierung der energetischen Nutzung läuft die Energiewende entgegen. Je umweltfreundlicher Strom- und Wärmemix werden, desto geringer werden die Substitutionseffekte durch die im Zuge der thermischen Behandlung bereit gestellte Energie. Da ein Großteil des teerhaltigen Straßenaufbruchs aber in naher Zukunft anfallen wird, wirkt dieser Effekt begrenzt.

Insgesamt ergibt sich daraus die Empfehlung, den teerhaltigen Straßenaufbruch aus gut per Schienen- und Wasserweg erschlossenen Gebieten Nordwestdeutschlands neben der Deponierung und insbesondere Verwertung auf der Deponie auch in die thermische Be-

handlung bis in die Niederlande zu bringen. Voraussetzung ist, dass dort zumindest eine teiloptimierte energetische Nutzung angestrebt wird. In den weiter von den Niederlanden entfernten zentralen Gebieten Norddeutschlands sollte der Aufbau thermischer Behandlungsanlagen erfolgen und dies bevorzugt in Gebieten, die ähnlich wie die Niederlande weit entfernt von Primärrohstoffen liegen. Für periphere Gebiete Deutschlands, die nahe an Primärrohstoffquellen liegen, empfiehlt sich hingegen die Deponierung und dabei bevorzugt die Nutzung dort als Baustoffe. Auf eine ausreichende Sicherung des weiter bestehenden Gefahrenpotenzials ist dabei zu achten.

4.4.3 Zusammenfassendes Fazit

Wie oben herausgearbeitet, schneidet grob zusammen gefasst die Beseitigung auf der Deponie bzw. Verwertung auf Deponie gegenüber der thermischen Behandlung in den Niederlanden im Status Quo besser ab, wenn die Zusatztransportstrecke zur thermischen Behandlung im Vergleich zur Entfernung zur Deponie größer ist als:

- Gut 280 km (Beseitigung auf Deponie) bzw. knapp 60 km (Verwertung auf Deponie) per Schiff

Nach einer teilweisen Optimierung der energetischen Nutzung aus der thermischen Behandlung in den Niederlanden durch Anschluss an das Fernwärmenetz ist die Beseitigung bzw. Verwertung auf der Deponie erst ab folgenden Zusatztransportstrecken zur thermischen Anlage besser:

- 460 km (Beseitigung auf Deponie) bzw. gut 240 km (Verwertung auf Deponie) per Schiff

Würde eine solche thermische Anlage mit Anschluss ans Fernwärmenetz (teilweise Optimierung der energetischen Nutzung) in Deutschland in Mittelgebirgsnähe errichtet, so würde die Beseitigung bzw. Verwertung auf der Deponie besser abschneiden, wenn folgende Zusatztransportstrecken zur thermischen Anlage überschritten würden:

- 470 km (Beseitigung auf Deponie) bzw. knapp 90 km (Verwertung auf Deponie) per LKW

Mit der Errichtung derselben Anlage in Mittelgebirgsferne in Deutschland, würden die Zusatztransportstrecken wie folgt steigen, weil der Output aus der thermischen Anlage für Bauvorhaben im Anlagenumfeld dann Primärmaterialien ersetzen würde, die wie im Fall der Niederlande von weit antransportiert werden müssten:

- Knap 690 km (Beseitigung auf Deponie) bzw. 300 km (Verwertung auf Deponie) per LKW

Die o.g. Differenztransportstrecken zur thermischen Anlage haben nur einen indikativen, grob abschätzenden Charakter. Für jede Baustelle ist eine Einzelfallbetrachtung nötig. Unterscheiden sich beispielsweise die Transportstrecken per LKW zur Deponierung und zur Umladestation vor der Weiterfahrt zur thermischen Behandlung per Schiff, kann aufgrund der verschiedenen Verkehrsmittel die zusätzliche Transportstrecke zur thermischen Anlage anders ausfallen.

Literaturverzeichnis

[Ecotransit]: Daten aus www.ecotransit.org und HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport)

[LUWG 2009] Kleine A., Müller F.: Überbauen einer teerhaltigen Straße – Ökoeffizienzstudie – Zusatzauswertung; LUWG Rheinland Pfalz und MUEEF Rheinland-Pfalz (Hrsg.), TU Kaiserslautern; Mainz, 2009.

[SAM 2007] Kleine A., Weber V., Saling P., Weicht R.: Ökoeffizienz-Analyse zu Entsorgungsoptionen von pech-/teerhaltigem Straßenaufbruch; SAM Rheinland-Pfalz (Hrsg.), TU Kaiserslautern, BASF AG; Mainz, 2007.

[UBA 1999] Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043, Berlin (= UBA Texte 92/99).

[UBA 2011] Struktur der Flächennutzung; online abgerufen auf den Internetseiten des Umweltbundesamtes für das Bezugsjahr 2011 unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaechennutzung/struktur-der-flaechennutzung>.

[UBA 2013] Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen; Umweltbundesamt; Dessau, 2013 und 2014.