

Institut für Rohstoffgewinnung über Tage und Bohrtechnik  
der RWTH Aachen

**Identifizierung, Quantifizierung und Realisierung von Energieeinsparpotentialen  
innerhalb der übertägigen Gewinnung von Rohstoffen zur Verringerung  
der Freisetzung klimaschädlicher Gase und Ressourcenschonung**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 28821 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Thorsten Skrypzak M.Sc.

Aachen, Juli 2015

**RWTH Aachen**

**Lehrstuhl und Institut für Rohstoffgewinnung über Tage und Bohrtechnik**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Niemann-Delius

Lochnerstraße 4-20

52064 Aachen

Tel.: +49 (0)241 80 95683

Fax: +49 (0)241 80 92250

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

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>28821</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>120.000,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Identifizierung, Quantifizierung und Realisierung von Energieeinsparpotentialen innerhalb der übertägigen Gewinnung von Rohstoffen zur Verringerung der Freisetzung klimaschädlicher Gase und Ressourcenschonung</b>			
<b>Stichworte</b>		Energieeffizienz, Rohstoffgewinnung, Steine und Erden			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
<b>43 Monate</b>		<b>01.10.2011</b>		<b>30.04.2015</b>	
Projektphase(n)		<b>1</b>			
Zwischenberichte		15.04.2012		15.10.2012	
		15.10.2013		15.04.2014	
<b>Bewilligungsempfänger</b>		RWTH Aachen Lehrstuhl und Institut für Rohstoffgewinnung über Tage und Bohrtechnik Bergbaukunde III  Lochnerstraße 4-20 52064 Aachen			Tel 0241 / 80 95683 Fax 0241 / 80 92250
					Projektleitung Dr.-Ing. Alexander Hennig
					Bearbeiter Thorsten Skrypzak, M.Sc.
<b>Kooperationspartner</b>		Die am Projekt beteiligten Betriebe werden aus Gründen des Datenschutzes anonymisiert mit Tagebau 1 bis Tagebau 10 bezeichnet. Dies ist Bestandteil der Kooperationsvereinbarung.			

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Die Gewinnung von Rohstoffen der Steine und Erden im übertägigen Abbau zählt zu den energieintensivsten produzierenden Gewerben in der Bundesrepublik Deutschland. Dafür verantwortlich sind insbesondere energieaufwändige innerbetriebliche Transport- sowie Aufbereitungs- und Veredelungsprozesse. Die Optimierung des Zusammenwirkens der einzelnen tagebaulichen Betriebspunkte, Maschinen und Anlagen birgt Potentiale zur Energieeinsparung, die bisher nahezu unerschlossen geblieben sind. Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens besteht deshalb in der Entwicklung eines wissenschaftlichen und branchenweit anwendbaren Verfahrens zur rechnerischen Erfassung der energetisch relevanten Einflüsse innerhalb eines Tagebaubetriebs in einem Simulationsmodell. Dies soll die systematische Erkennung und Erschließung von Energieeinsparpotentialen in den Bereichen der bereits vorhandenen Gewinnungsausrüstung und Betriebsmittelkombinationen sowie des Betriebsmitteleinsatzes ermöglichen. Darüber hinaus sollen die Auswirkungen einzelner betrieblicher sowie durch die Lagerstätte vorgegebener Einflussparameter auf den energetischen Wirkungsgrad des Gewinnungsprozesses und ihre gegenseitige Beeinflussung ermittelt werden, um wirksame Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen ableiten zu können.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells diente eine im Rahmen von Betriebsbefahrungen erarbeitete Datenbasis, welche detaillierte Angaben über repräsentative Betriebe der Steine- und Erdenindustrie beinhaltet. Ermittelt wurden sowohl Betriebskennziffern als auch Parameter der jeweiligen Lagerstätten. Aufbauend auf einer zusätzlichen messtechnischen Erfassung des Energieeinsatzes in den verschiedenen Abbaubetrieben wurden Benchmarks für den Energiebedarf von Prozessen der übertägigen Rohstoffgewinnung definiert. Zur Messung des Energieverbrauchs wurden die dieselmotorischen Betriebsmittel mit einem Kraftstoffdurchflussmessgerät vom Typ AIC 6008 SWISSLINE des Herstellers AIC Systems ausgestattet. Daten zum Energieverbrauch der elektrischen Anlagen wurden aus dem Anlagensteuerungsprogramm eines Tagebaubetriebs ausgelesen. Auf Basis

der Tabellenkalkulationssoftware Excel wurden die tagebaulichen Hauptprozesse Lösen, Laden, Transportieren und Verkippen sowie die erste Aufbereitungsstufe und die Hilfsprozesse rechnerisch erfasst. Zunächst wurden die Einzelprozesse gesondert modelliert, um einen möglichst hohen Abstraktionsgrad zu erreichen. Dazu wurden Optionen bezüglich der Betriebsmittelauswahl und der Darstellung verschiedener Abbautechniken in das Modell eingearbeitet. Für die verschiedenen Eingabeoptionen (Maschinenparameter, Lagerstättegeologie und -geometrie, Betriebskennziffern, etc.) wurden Datensätze eingefügt, die auf Erfahrungswerten und Angaben der Maschinenhersteller sowie auf den in realen Gewinnungsbetrieben ermittelten Messdaten beruhen. Zur Verknüpfung und Auswertung der Eingaben wurden Berechnungsformeln, welche die Wirkungszusammenhänge zwischen den energetisch relevanten Einflussgrößen abbilden, hergeleitet und im Modell hinterlegt. Im weiteren Verlauf erfolgte die Verknüpfung der Teilmodelle zu einem Gesamtmodell, anhand dessen iterativ energetische Idealszenarien des Gewinnungsvorgangs für verschiedene Einsatzbedingungen entwickelt wurden. Es wurden Abbaubetriebe im Simulationsmodell abgebildet und hinsichtlich ihrer Energieeffizienz analysiert, was der Verifikation und Validierung des Modells diente. Zugleich konnten auf diese Weise die innerbetrieblichen Energieeinsparpotentiale durch einen Abgleich der Real- und Idealszenarien lokalisiert und quantifiziert werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte in einem weiteren Schritt die Entwicklung technischer, organisatorischer und bergbauplanerischer Maßnahmen, welche die Erschließung der identifizierten Energieeinsparpotentiale durch die Tagebaubetreiber aktiv fördern sollen.

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Innerhalb der Prozesse der Natursteingewinnung wurden systematisch Optimierungsmöglichkeiten des Energieeinsatzes quantifiziert und kategorisiert. Die größten Potentiale wurden im Bereich des Ladegeräteinsatzes festgestellt. Modellrechnungen ergaben einen Mindestenergiebedarf der Ladearbeit, der die in Betriebsprotokollen verzeichneten Verbrauchsmengen um durchschnittlich 44 % unterschritt. Im Fall des SKW-Einsatzes wurden theo. Einsparpotentiale bis zu 20 % bezogen auf den derzeitigen Energieverbrauch ermittelt. Dies bedeutet mögliche Energieeinsparungen von bis zu mehreren zehntausend Litern Dieselkraftstoff und Kilowattstunden elektrischer Energie je Betrieb. Es wurden überwiegend Potentiale festgestellt, die sich durch organisatorische und planerische Maßnahmen erschließen lassen. Ferner erfolgte anhand von Messungen und Modellrechnungen eine Evaluierung der Verhältnismäßigkeit von Fahrbahn Pflegemaßnahmen. Demnach ist die Herstellung bzw. Erhaltung einer Fahrbahnbeschaffenheit anzustreben, bei der maximale Reifeneindringungen im Bereich von 2 cm auftreten. Für den Betrieb der primären Zerkleinerungsstufe wurde durch Simulationen von Unter- und Überlastszenarien der Einfluss einer optimierten Beschickung auf den Energiebedarf analysiert. Die Untersuchungen ergaben, dass bei einer Vorbunkerkapazität, die ca. Dreivierteln vom Nenndurchsatz des Brechers entspricht, Schwankungen der Aufgabemenge zwischen 87,5 und 110 % ohne Mehrenergieverbrauch kompensierbar sind.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Die Inhalte und das Konzept des Forschungsvorhabens wurden im Oktober 2011 auf einer Tagung des Bundesverbands Mineralische Rohstoffe e.V. Vertretern der Steine- u. Erdenindustrie vorgestellt. Des Weiteren wurden Ergebnisse des Vorhabens im Rahmen der Tagungsveranstaltung ISCSM 2014 (International Symposium Continuous Surface Mining) in Aachen einem Fachpublikum aus Industrie- und Behördenvertretern präsentiert. Der zugehörige Fachartikel ist im Tagungsband des Springer-Verlags publiziert. Weitere Veröffentlichungen sind vorgesehen. Das Simulationsmodell wird über einen Server des Hochschulinstituts zum Download bereitgestellt. Die Zugriffsrechte werden auf Anfrage eingeräumt.

### ***Fazit***

Die identifizierten Energieeinsparpotentiale und die erarbeiteten Lösungsansätze können als Basis für eine Überprüfung der Prozesse in anderen Betrieben dienen. Die Größenordnungen möglicher Energieeinsparungen stellen sowohl in ökologischer als auch ökonomischer Hinsicht einen besonderen Anreiz dar. Dies ergibt sich aus einer überwiegend kurz- bis mittelfristigen Erschließbarkeit bei einem geringen Zusatzinvestitionsaufwand. Die durchgeführten Untersuchungen unterstreichen anhand konkreter Fallbeispiele die Signifikanz einer methodischen Effizienzanalyse und der vorhandenen Optimierungspotentiale in Natursteintagebauen. Gewonnene Erkenntnisse im Bereich der Maschineneinsatzplanung sind zu wesentlichen Teilen auf andere Branchen der Rohstoffindustrie übertragbar.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Projektkennblatt</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Begriffe und Abkürzungen</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>11</b>
<b>3 Methodik und Ergebnisse</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1 Datenerhebung in Natursteintagebauen</b> .....	<b>15</b>
3.1.1 Struktur- und Leistungsdaten der beteiligten Gewinnungsbetriebe .....	15
3.1.2 Stand der Datenerfassung in den Betrieben .....	18
<b>3.2 Vermessung innerbetrieblicher Transportstrecken</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3 Untersuchungen zum Energieverbrauch von Maschinen und Anlagen</b> .....	<b>23</b>
3.3.1 Konfiguration des Messsystems .....	23
3.3.2 Messung des Kraftstoffverbrauchs von Ladegeräten .....	27
3.3.2.1 Hydraulikbagger .....	29
3.3.2.2 Radlader.....	32
3.3.3 Messung des Kraftstoffverbrauchs von Transportfahrzeugen .....	36
3.3.4 Auswertung von Energie- und Leistungsdaten der Primärzerkleinerung .....	42
<b>3.4 Konzept und Anwendungsoptionen des entwickelten Simulationsmodells</b> .....	<b>45</b>
<b>3.5 Quantifizierung von Energieeinsparpotentialen durch Modellrechnungen</b> .....	<b>48</b>
3.5.1 Bohrprozess .....	48
3.5.2 Ladevorgang.....	49
3.5.3 Transportvorgang .....	50
3.5.4 Primärzerkleinerung.....	52
<b>3.6 Entwicklung und Evaluierung von Maßnahmen zur Energieeinsparung</b> .....	<b>54</b>
<b>4 Fazit</b> .....	<b>57</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>59</b>

## **Anhang**

<b>Anhang I</b>	Betriebsmitteleinsatz in den beteiligten Tagebauen .....	61
<b>Anhang II</b>	Vermessungsdaten der innerbetrieblichen Transportstrecken.....	62
<b>Anhang III</b>	Daten der Kraftstoffverbrauchsmessungen .....	63
<b>Anhang IV</b>	Energie- und Leistungsdaten Primärbrecher .....	78
<b>Anhang V</b>	Evaluierung der Prozessabläufe in den beteiligten Betrieben .....	79
<b>Anhang VI</b>	Maßnahmenkatalog.....	81

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil der Teilprozesse am gesamtbetrieblichen Kraftstoffverbrauch.....	16
Abbildung 2: Digitalisierter Verlauf einer Transportstrecke in einem CAD-Modell eines Tagebaus.....	21
Abbildung 3: Funktionsprinzip des Messgeräts vom Typ AIC 6008 SWISSLINE nach [AIC12].....	25
Abbildung 4: Hydraulikbagger während der Messungen bei der SKW-Beladung auf Zwischenstufe .....	29
Abbildung 5: Prozentualer Anteil der Arbeitsvorgänge am Gesamtverbrauch während der Messungen....	30
Abbildung 6: Spezifische Verbrauchswerte des Baggers während verschiedener Arbeitsvorgänge .....	32
Abbildung 7: Radlader während der Messungen bei der SKW-Beladung im V-Betrieb.....	33
Abbildung 8: Prozentualer Anteil der Arbeitsvorgänge am Gesamtverbrauch während der Messungen....	34
Abbildung 9: Spezifische Verbrauchswerte des Radladers während verschiedener Arbeitsvorgänge .....	35
Abbildung 10: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Fahrzeuggesamtgewichts .....	41
Abbildung 11: Durchsatzleistung des Primärbrechers .....	43
Abbildung 12: Energieverbrauch des Primärbrechers in Abhängigkeit der Durchsatzmenge .....	44
Abbildung 13: Modul Basisdaten des Simulationsmodells.....	47
Abbildung 14: Energiebedarf der Ladearbeit und theoretische Energieeinsparpotentiale .....	50
Abbildung 15: Energiebedarf des Transports und theoretische Einsparpotentiale .....	51
Abbildung 16: Einfluss der Bunkerkapazität auf den Gesamtenergieverbrauch.....	53

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	
Übersicht der am Projekt beteiligten Betriebe nach [Skr14] .....	16
Tabelle 2:	
Kraftstofftemperatur im Tank je nach Betriebszustand [eigene Messung] & [DWD14] .....	26
Tabelle 3:	
Prozessabhängige Einflussparameter beim Ladegeräteeinsatz.....	27
Tabelle 4:	
Fahrzeugeinsatz sowie Dauer und Tätigkeiten zwischen SKW-Beladungen.....	33
Tabelle 5:	
Prozessabhängige Einflussparameter beim Transportfahrzeugeinsatz.....	37
Tabelle 6:	
Energieverbrauch der Bohrgeräte in beteiligten Betrieben.....	48

## Begriffe und Abkürzungen

(Gewinnungs-)Sohle	Arbeitsebene im Tagebau
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
Haufwerksstückigkeit	Angabe zu den Abmessungen der Gesteinsstücke in einem Haufwerk. Bei einem Rohhaufwerk häufig als maximale Stückigkeit angegeben, da die Größenverteilung sehr inhomogen ausgeprägt sein kann.
Knäpper	Gesteinsstücke im Rohhaufwerk, die aufgrund ihrer Abmessungen vor der Verladung und der Aufgabe in den Primärbrecher eine Nachzerkleinerung erfordern.
Load & Carry	Einsatzvariante von Radladern, die eine Verknüpfung der Prozesse Laden und Transportieren darstellt. Der Radlader transportiert das Haufwerk in der Schaufel von der Lade- stelle zu einem Förderbezugspunkt.
Primärbrecher	Erste Prozessstufe bzw. Anlage zur Zerkleinerung des Rohhaufwerks im Produktionsprozess.
Rohhaufwerk	Aus dem Gebirgsverband (bei der Natursteingewinnung i.d.R. durch Sprengung) gelöstes Gesteinsmaterial.
SAE	Society of Automotive Engineers
SKW	Schwerlastkraftwagen (Starrrahmenmuldenkipper)
Trockenschnitt	Gewinnung von Kies und Sand oberhalb des Grundwasserspiegels
wirksame Steigung / wirksames Gefälle	Summenwirkung aus Steigungswiderstand bzw. Gefälleschub und Rollwiderstand (fahrzeuginterne Reibungsverluste bei der Kraftübertragung, Walkarbeit der Reifen, Reibung beim Abrollen der Reifen auf der Fahrbahnoberfläche)

# 1 Zusammenfassung

Bei der Gewinnung von Massenrohstoffen der Steine und Erden handelt es sich um energieintensive industrielle Produktionsprozesse. Dies gilt besonders für die Natursteingewinnung, bei der überwiegend dieselmotorische Betriebsmittel eingesetzt werden. Bisherige Konzepte zur Reduzierung des Energieverbrauchs fokussierten sich vorrangig auf Umstellungen der Maschinen- und Anlagentechnik bzw. Ersatzinvestitionen in Betriebsmittel mit niedrigeren Verbrauchswerten. Energieeinsparpotentiale, die sich aus einer Optimierung des Zusammenwirkens der Betriebspunkte, Maschinen und Anlagen im Tagebau ergeben, blieben hingegen bisher nahezu unerschlossen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden in zehn Natursteintagebauen Strukturdaten des Gewinnungsvorgangs erhoben. Diese umfassen Angaben zu Lagerstätteneigenschaften, Fördermengen, Tagebauzuschnitt und Abbauführung sowie Energie- und Leistungsdaten der eingesetzten Betriebsmittel. Im Zuge dessen war zu konstatieren, dass die Effizienz des Energieeinsatzes in den beteiligten Betrieben bislang überwiegend keiner systematischen Kontrolle unterlag. Die Datenbasis wurde in weiteren Arbeitsphasen durch Vermessungen der innerbetrieblichen Transportstrecken sowie durch Messungen des Kraftstoffverbrauchs dieselbetriebener Lade- und Transportgeräte erweitert.

Auf dieser Grundlage wurden Ansatzpunkte zur Energieeinsparung im Gewinnungsablauf erarbeitet. Dies umfasst sowohl Optimierungen als auch Substitutionen von Verfahrensabläufen und Varianten des Maschineneinsatzes, die als unverhältnismäßig energieaufwändig identifiziert wurden. Die Quantifizierung von Einsparpotentialen erfolgte anhand von Fallstudien und Modellrechnungen. Zu diesem Zweck wurde ein auf der Kalkulationssoftware Excel basierendes Simulationsmodell erstellt.

In Abhängigkeit des Betriebsmitteleinsatzes und der Fördermengen der Tagebaue erbrachten die Untersuchungen Energieeinsparpotentiale bis zu mehreren zehntausend Litern Dieselkraftstoff sowie Kilowattstunden elektrischer Energie pro Jahr. Die signifikantesten Potentiale wurden in den Bereichen des Lade- und Transportvorgangs festgesellt. Im Fall der Ladegeräte wurde der erforderliche Mindestenergiebedarf des Maschineneinsatzes durchschnittlich um etwa 44 % überschritten.

Es wurden Maßnahmen zur Reduzierung des Energieeinsatzes abgeleitet. Diese wurden hinsichtlich ihrer ökologischen Relevanz evaluiert, wobei die Höhe des Einsparpotentials und eine Einschätzung der grundsätzlichen Signifikanz für Natursteintagebaue als Kriterien angesetzt wurden. Die Ergebnisse wurden in einem Maßnahmenkatalog zusammengefasst. Dieser beinhaltet überwiegend organisatorische und planerische Maßnahmen. Die kurz- bis mittelfristige Erschließbarkeit der identifizierten Energieeinsparpotentiale stellt ein wesentliches Merkmal des vorliegenden Ansatzes dar. Im Hinblick auf die wirtschaftliche Komponente der Umsetzbarkeit ergibt sich somit ein besonderer wirtschaftlicher Anreiz für die Unternehmen der Branche.

Das generalistische Konzept des Projekts ermöglicht es, die erarbeiteten Lösungsansätze betriebsübergreifend zu übernehmen und mit Hilfe des Simulationsmodells an den standortspezifischen Gegebenheiten in einem Gewinnungsbetrieb zu spiegeln.

## 2 Einleitung

Angaben des Bundesverbands Mineralische Rohstoffe e.V. (MIRO) zufolge wurden in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2012 etwa 235 Mio. Tonnen Kies und Sand sowie 211 Mio. Tonnen Natursteinprodukte gewonnen. Die Gesamtförderung verteilte sich auf 2.235 Betriebe der Kies- und Sandindustrie sowie 910 Betriebe der Natursteinindustrie. [BMR13] Die Bereitstellung dieser gesamtwirtschaftlich bedeutsamen Rohstoffe, die überwiegend in der Bauindustrie eingesetzt werden, ist für eine funktionierende Volkswirtschaft zwingend notwendig. Deutschland ist diesbezüglich fast vollständig unabhängig von Importen.

Bezogen auf den Anteil des Energieverbrauchs am Bruttoproduktionswert zählt die Gewinnung von Steinen und Erden mit einem Wert von 10 % zu den energieintensivsten produzierenden Gewerben in Deutschland. [SB14] Insbesondere beim Abbau von Natursteinen werden für das Lösen und Laden sowie für den innerbetrieblichen Transport der Wertgesteins- und Abraummassen überwiegend Betriebsmittel eingesetzt, die sich durch eine diskontinuierliche Arbeitsweise auszeichnen. Die Bohr-, Lade- und Transportgeräte werden dieselmotorisch angetrieben. Hinzu kommt der elektrische Energiebedarf für nachgeschaltete Aufbereitungs- und Veredelungsprozesse. Es ergeben sich Verbrauchsmengen von bis zu zwei Litern Dieselkraftstoff und über sechs Kilowattstunden elektrischer Energie pro Tonne geförderten Materials.

Technische Innovationen und Weiterentwicklungen des Maschinen- und Anlagenbaus sind bereits seit etwa zwei Jahrzehnten auf die Konstruktion von kraftstoffsparenden Verbrennungsmotoren und Antrieben ausgerichtet. Bei diesen Querschnittstechnologien wird seitens der Maschinenhersteller und von Forschungseinrichtungen ein erheblicher Forschungsaufwand betrieben. Neben den ökonomischen Interessen, die sich mit niedrigen Verbrauchswerten verbinden, sind vor allem gesetzliche Vorgaben zu Abgasgrenzwerten dieselbetriebener Maschinen als ursächlich für die geschilderte Entwicklung zu nennen.

Eine weitere Option zur Verringerung des Energiebedarfs bei der Gewinnung von Festgesteinen stellen alternative Verfahren bzw. Systeme dar. Dies betrifft beispielsweise die Substitution des überwiegend automobilen Massentransports durch den Einsatz (semi-)mobiler Zerkleinerungsanlagen in Verbindung mit darauffolgendem Transport per Bandanlage. Letztere stellen aufgrund des besseren Verhältnisses von bewegter Eigenmasse und Nutzlast in der Regel die energetisch günstigere Transportvariante im Vergleich zu Transportfahrzeugen dar. Die Systemkombinationen aus (semi-)mobilen Brechern und Bandanlagen haben in den vergangenen Jahren ebenfalls eine erhebliche technische Entwicklung durchlaufen, was das Spektrum ihres Einsatzes erweitert hat. Allerdings ist dieser nach wie vor an bestimmte Bedingungen hinsichtlich der Abbauführung sowie an weitere technische und wirtschaftliche Parameter des Tagebaubetriebs gebunden, die nicht immer gegeben sind.

Vor allem bei flächen- und produktionsmäßig kleineren Mehrsohlentagebauen sowie Betrieben mit unregelmäßigem Tagebauzuschnitt besteht der Vorteil des Einsatzes von Transportfahrzeugen in der Flexibilität des Systems. Hinzu kommen, speziell im

Hinblick auf die Anforderungen der durch kleine und mittelständische Unternehmen geprägten Natursteinbranche, Fragestellungen der höheren Anlageninvestition und Transportkapazität. Die energetischen Vorteile sind daher nicht mit einer generellen wirtschaftlichen und technischen Substituierbarkeit des Fahrzeugeinsatzes durch Bandanlagen gleichzusetzen.

Signifikante betriebsübergreifende oder gar branchenweite Energieeinsparungen lassen sich durch eine Systemumstellung in bestehenden Betrieben zudem in der Regel nur langfristig erzielen. Ein kurzfristiger Austausch der gesamten Betriebsmittelausstattung ist aufgrund des hohen finanziellen Investitionsaufwands für die Betriebe nicht wirtschaftlich darstellbar. Es erfordert daher meist Jahrzehnte, bis sämtliche Gewinnungsgeräte in einem Tagebau infolge von Verschleiß bzw. Überalterung sukzessive durch neue Maschinen mit geringeren Verbrauchswerten ersetzt worden sind.

Verglichen mit dem Entwicklungsaufwand in den Bereichen des Maschinenbaus und alternativer Technologien bleiben Energieeinsparpotentiale, die sich aus einer Optimierung des Zusammenwirkens der einzelnen Betriebspunkte, Maschinen und Anlagen in einem Tagebau ergeben, bisher nahezu unerschlossen. Die Zielsetzung des vorliegenden Forschungsvorhabens bestand daher in der Entwicklung eines betriebsübergreifend anwendbaren Verfahrens, das die rechnerische Erfassung der für den Energiebedarf des Gewinnungsvorgangs relevanten Faktoren ermöglicht. Dies umfasst den Produktionsprozess bis zur ersten Aufbereitungsstufe in Form des Primärbrechers, welcher als Schnittstelle zwischen Gewinnungs- und Aufbereitungstechnik in die Untersuchungen einbezogen wurde.

Dazu wurde ein auf der Kalkulationssoftware Excel basierendes Simulationsmodell erstellt. Der Ansatz war auf die systematische Identifizierung und Erschließung von Energieeinsparpotentialen in den Bereichen der bereits vorhandenen Gewinnungsausrüstung und Betriebsmittelkombinationen sowie des Betriebsmitteleinsatzes ausgerichtet. Darüber hinaus sollen die Auswirkungen betrieblicher sowie durch die Lagerstätte vorgegebener Einflussparameter auf den energetischen Wirkungsgrad des Gewinnungsprozesses und ihre gegenseitige Beeinflussung quantifiziert werden.

Zur Ermittlung von Referenzdaten für die Erstellung und Validierung des Simulationsmodells sowie für die Modellrechnungen wurde in einer ersten Arbeitsphase eine Datenerhebung in zehn Natursteintagebauen durchgeführt. Erfasst wurden Struktur- und Leistungsdaten des Gewinnungsvorgangs sowie Angaben zum Energieverbrauch der eingesetzten Betriebsmittel. Im Zuge dessen wurden zugleich die Verfügbarkeit und Belastbarkeit der Informationen sowie der Stand der Erfassung von Energiedaten in den Betrieben evaluiert.

Zur Erweiterung der geschaffenen Datenbasis wurden darüber hinaus eigene Messkampagnen in den beteiligten Tagebauen vorgenommen. Diese umfassten Vermessungsarbeiten der innerbetrieblichen Transportstrecken. Dafür kamen mit dem 3D-Laserscanning und der Koordinatenerfassung mittels globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS) zwei technische Verfahren in Betracht. Diese wurden im Hinblick auf die projektbezogenen Anforderungen erprobt.

Die Daten der Streckenvermessung dienten als Grundlage für die Durchführung von Messungen des Kraftstoffverbrauchs von Transportfahrzeugen. Der Energiebedarf des innerbetrieblichen Massentransports wird durch die Eigenschaften einer Transportstrecke unmittelbar beeinflusst. Daher erforderten die Untersuchungen, neben den technischen Informationen zu den eingesetzten Betriebsmitteln, Kenntnisse des Streckenverlaufs und der Fahrbahnbeschaffenheit.

Für die Kraftstoffverbrauchsmessungen wurde ein Volumenstrommessgerät im Kraftstoffkreislauf der Fahrzeuge installiert. Das gleiche Verfahren wurde auch für Messungen an Ladegeräten genutzt. Die Versuche konzentrierten sich auf die in Natursteintagebauen überwiegend eingesetzten Betriebsmittelarten Hydraulikbagger und Radlader. Es wurden Daten zum Energieverbrauch in unterschiedlichen Einsatzszenarien und Betriebszuständen erfasst. Die Versuche wurden in den regulären Gewinnungsbetrieb in den Tagebauen integriert. Auf diese Weise konnten Optimierungspotentiale im Betriebsablauf ermittelt werden, die sich beispielsweise aus Wartezeiten oder dem Maschineneinsatz für Hilfsarbeiten ergeben. Der Kraftstoffverbrauch im Leerlauf wurde ergänzend in separaten Messreihen untersucht.

Die Untersuchungen zum Energiebedarf des Bohrprozesses und der Primärzerkleinerung stützten sich auf Daten, die von den Betrieben zur Verfügung gestellt wurden. Beim Bohren wird der Energieverbrauch übergeordnet von den Leistungsdaten des Bohrgeräts und dem erreichbaren Bohrfortschritt bestimmt, der maßgeblich aus lagerstätten- und gesteinspezifischen Parametern resultiert. Diese Faktoren sind prozessbedingt nicht beeinflussbar. Von der Durchführung von Kraftstoffverbrauchsmessungen an Bohrgeräten konnte daher abgesehen werden. Im Fall des elektrisch betriebenen Primärbrechers wurden Messdaten der Motorstromaufnahme aus dem Steuerungsprogramm einer Anlage ausgelesen, wodurch eine Korrelation mit Daten einer Bandwaage hergestellt und die Durchsatzmenge bestimmt werden konnte.

Die Mess- und Betriebsdaten dienten als Basis für Untersuchungen des Energiebedarfs und der Effizienz von Prozessabläufen in Gewinnungsbetrieben anhand realer Fallstudien. Durch die Identifizierung von Schwachstellen im Betriebsablauf wurden strukturelle Erkenntnisse zu Optimierungspotentialen abgeleitet. Diese wurden für die konkreten Fallbeispiele zugleich quantifiziert, um Aussagen zur Größenordnung der möglichen Energieeinsparungen treffen zu können.

Weiterführend wurden auf Grundlage der Daten Simulationsrechnungen mit dem entwickelten Excel-basierten Modell durchgeführt. Dieses wurde so konzipiert, dass es die variable Abbildung energetisch relevanter Einflussfaktoren gestattet. Das Modell wurde durch eine Verifizierung und Validierung geprüft. Dazu wurden betriebliche Prozessbeispiele im Modell abgebildet und die Ergebnisse der Berechnungen mit den realen Betriebsdaten verglichen.

Die Prozessbeispiele wurden im Zuge der Simulationsrechnungen durch die Variation von Einflussfaktoren modifiziert. Es wurde der Energiebedarf von Maschinen und Anlagen innerhalb der simulierten Idealszenarien berechnet. Auf diese Weise erfolgte eine kalkulatorische Bestimmung des minimalen Energieeinsatzes, der zur Erbrin-

gung einer Produktionsleistung unter den jeweiligen Einsatzbedingungen erforderlich ist. Durch Vergleiche mit den realen Betriebsdaten, die als Bewertungsmaßstab dienten, wurden die theoretischen Gesamtpotentiale der Energieeinsparungen beziffert.

Auf dieser Basis wurden Maßnahmen zur Erschließung der ermittelten Potentiale abgeleitet. Von Bedeutung war in diesem Zusammenhang nicht nur die technische Umsetzbarkeit, sondern auch die wirtschaftliche Komponente als Anreiz für die Gewinnungsbetriebe. Es handelt sich um Lösungsansätze technischer, organisatorischer und planerischer Art, die in einem Maßnahmenkatalog zusammengestellt wurden.

Der Gewinnung von Rohstoffen der Steine und Erden kommt auch künftig hohe Bedeutung zu. Speziell vor diesem Hintergrund ist eine systematische Steigerung der Energieeffizienz in dieser Industriebranche von ökologischer Relevanz und nachhaltigem Nutzen. Dies geht einher mit einer Minderung der Freisetzung klimaschädlicher Gase und trägt somit unmittelbar zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen bei. Zugleich werden durch die Senkung des Verbrauchs fossiler Energieträger die vorhandenen Reserven geschont.

## **3 Methodik und Ergebnisse**

### **3.1 Datenerhebung in Natursteintagebauen**

#### **3.1.1 Struktur- und Leistungsdaten der beteiligten Gewinnungsbetriebe**

Die Natursteinindustrie ist eine Branche, die überwiegend durch kleine und mittelständische Betriebe geprägt ist. Lediglich etwa ein Prozent der Unternehmen hat mehr als 100 Mitarbeiter. In etwa 43 % der Betriebe arbeiten weniger als zehn Beschäftigte. [Grö11]

Die durchschnittliche Produktionsleistung pro Werk lag im Jahr 2012 bei ca. 230.000 Tonnen. [BMR13] Die Bandbreite reicht von Tagebauen mit wenigen zehn- oder hunderttausend Tonnen pro Jahr bis zu einzelnen Großbetrieben mit jährlichen Fördermengen im Bereich von Millionen Tonnen. Jedoch weist der prinzipielle Ablauf des Gewinnungsvorgangs unabhängig von der Betriebsgröße in den meisten Tagebauen Gemeinsamkeiten auf. Dies betrifft nicht nur die Prozessstruktur mit den Teilschritten Abraumbeseitigung, Lösen, Laden, Transportieren und Hilfsprozessen sowie der nachfolgenden Aufbereitung des Gesteins, sondern auch die Art und Einsatzweise von Maschinen und Anlagen.

In die Untersuchungen wurden zehn Natursteintagebaue einbezogen. Die Auswahl der Tagebaue erfolgte auf Vorschlag der technischen Leitung von Unternehmen der Natursteinindustrie. Im Hinblick auf die Gesamtheit der ausgewählten Betriebe war gefordert, dass die Fördermengen einen repräsentativen Bereich des branchenüblichen Produktionsleistungsspektrums überstreichen sollten. Zudem waren die organisatorischen und technischen Möglichkeiten zur Durchführung von Kraftstoffverbrauchsmessungen an Lade- und Transportgeräten zu berücksichtigen.

Bei der Datenerhebung wurden neben maschinentechnischen, organisatorischen und planerischen Kriterien standortspezifische Merkmale berücksichtigt. Dabei handelt es sich um die Charakteristika einer Lagerstätte und Gesteinseigenschaften. Die Prozesse der Rohstoffgewinnung werden umfangreicher durch solche natürlich vorgegebenen Parameter beeinflusst als die meisten anderen industriellen Produktionsprozesse.

Die jährlichen Produktionsleistungen der am Projekt beteiligten Tagebaue liegen zwischen 190.000 und 760.000 Tonnen (vgl. Tabelle 1). Bei den hergestellten Gesteinsprodukten handelt es sich vorrangig um Einfach- und Edelsplitte, (Gleis-)Schotter sowie Mineralstoffgemische verschiedenster Körnungen.

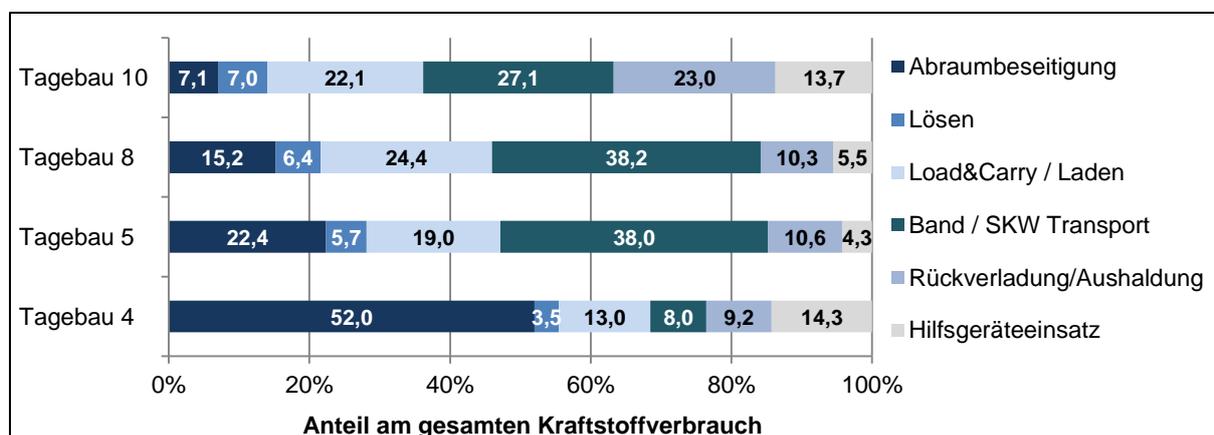
Der spezifische Gesamtenergieverbrauch je geförderter Tonne Wertgestein variiert zwischen 0,4 und 2,0 Litern Dieselkraftstoff. Zum elektrischen Energieverbrauch lagen in drei Betrieben keine Angaben (k.A.) vor. In den übrigen Tagebauen betragen die Verbrauchsmengen ca. 2,7 bis 6,3 kWh pro Tonne. Im Durchschnitt verbraucht jeder Betrieb etwa 340.000 Liter Dieselkraftstoff und ca. 2.350 MWh elektrische Energie pro Jahr.

**Tabelle 1:** Übersicht der am Projekt beteiligten Betriebe nach [Skr14]

Betrieb	Förderung [Tonnen/a]	Gesteinsart	spez. Energieverbrauch	
			Diesel [Liter/Tonne]	el. Energie [kWh/Tonne]
Tagebau 1	190.000	Kalkstein, Dolomit	1,95	6,29
Tagebau 2	200.000	Grauwacke	0,58	k.A.
Tagebau 3	220.000	Basalt	0,49	k.A.
Tagebau 4	400.000	Kalkstein	0,77	2,71
Tagebau 5	520.000	Mikrodiorit	1,01	3,85
Tagebau 6	575.000	Diabas	0,41	6,14
Tagebau 7	600.000	Syenit	0,48	k.A.
Tagebau 8	750.000	Mikrodiorit	0,75	4,20
Tagebau 9	760.000	Rhyolit	0,64	3,16
Tagebau 10	760.000	Basalt	0,53	3,95

Die Verbrauchszahlen in den beteiligten Betrieben geben Aufschluss über die Größenordnung der Energienutzung im Bereich der Natursteingewinnung. Der durchschnittliche Dieserverbrauch beträgt demnach ca. 0,75 Liter pro Tonne Förderung. Bezogen auf eine Jahresförderung von insgesamt 211 Mio. Tonnen entspricht dies einem Verbrauch von ca. 158 Mio. Litern Kraftstoff. Die Verbrennung von einem Liter Diesel erzeugt etwa 2,65 kg CO<sub>2</sub>. [Bas12] Dies bedeutet jährliche Emissionen von etwa 420.000 Tonnen CO<sub>2</sub>.

Mit einer Ausnahme kommt in den Betrieben im Löse-, Lade- und Transportprozess ausschließlich diskontinuierliche Technik zum Einsatz. Lediglich in Tagebau 4 wird beim Transport des Wertgesteins für einen Teil der Strecke kontinuierliche Technik in Form einer Gurtbandanlage eingesetzt. Die folgende Abbildung veranschaulicht am Beispiel von vier Betrieben, in denen hinreichend detaillierte Tankprotokolle vorlagen, wie sich der Gesamtenergieverbrauch auf die Teilprozesse des Gewinnungsvorgangs verteilt. Im Fall von Tagebau 4 wurde zur Herstellung der Vergleichbarkeit der elektrische Energiebedarf für den Bandtransport in die äquivalente Dieserverbrauchsmenge umgerechnet. Unter typischen Bedingungen kann für Dieserkraftstoff ein Energieinhalt von ca. 9,9 kWh pro Liter angenommen werden. [AF15]



**Abbildung 1:** Anteil der Teilprozesse am gesamtbetrieblichen Kraftstoffverbrauch

Die Verteilung zeigt die Bedeutung automobiler Transportprozesse für den Gesamtenergieverbrauch. Im Fall von Tagebau 4 ist der Transport des Wertgesteins als Kombination aus Bandtransport und einem Radlader, der im Load & Carry-Verfahren arbeitet, zu betrachten. Zudem ist in diesem Betrieb der vergleichsweise hohe Energiebedarf der Abraumbeseitigung hervorzuheben. Letztere erfolgt auf zwei Sohlen mit Hydraulikbaggern und Transportfahrzeugen.

Die Betriebe besaßen zum Zeitpunkt der Datenaufnahme bis zu vier aktive Gewinnungssohlen mit Mächtigkeiten zwischen 10 und 30 m. Die Gesamtanzahl der Sohlen (inklusive Abraum) lag zwischen drei und sieben, wobei die Tagebauteufen 30 bis 120 m betragen. In der Hälfte der Betriebe war der Aufschluss von bis zu zwei weiteren Sohlen vorgesehen, was Endteufen bis zu 150 m bedeuten würde. Die Zunahme der Teufe geht einher mit einem steigenden Energiebedarf des Transportvorgangs. Aus den genannten Gründen stellten Analysen des Transportvorgangs einen Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen dar.

Anhang I beinhaltet technische Daten der eingesetzten Maschinen und Anlagen. Die Transportfahrzeuge lassen sich in zwei Klassen von SKW mit Nutzlasten von 36 bis 40 Tonnen sowie 60 bis 65 Tonnen einteilen. Es kommen maximal bis zu drei Fahrzeuge parallel zum Einsatz. Als Hauptladegerät nutzen sieben Betriebe einen Hydraulikbagger (drei Ladeschaufel- und vier Tieflöffelbagger). In drei Tagebauen kommt ein Radlader als Hauptladegerät zum Einsatz. Dies spiegelt die branchenübliche Verteilung der unterschiedlichen Betriebsmittelarten wider.

Die erhobenen Daten zeigen Größenordnungen des Energiebedarfs in Abhängigkeit der Maschinenleistungsklassen. Betriebsspezifische Unterschiede sind auf verschiedenartige Faktoren aus den Bereichen der Maschinenteknik und der Einsatzbedingungen zurückzuführen (vgl. Kapitel 3.3).

Zusätzlich werden dieselbetriebene Maschinen für die Abraumbeseitigung, für die Auslagerung der Produktkörnungen auf Halden und die Rückverladung auf Kundenfahrzeuge sowie für die Fahrbahnpflege und weitere Hilfsarbeiten eingesetzt. Dabei handelt es sich vorwiegend um Radlader mit Dienstgewichten bis ca. 30 Tonnen und knickgelenkte Muldenkipper. In den beteiligten Betrieben summiert sich die Gesamtzahl der Lade- und Transportgeräte auf bis zu 15 Maschinen.

Die Nennleistungen der Primärbrecher betragen 90 bis 250 kW. Es handelt sich überwiegend um stationäre Anlagen. Gemäß den betrieblichen Angaben werden effektive Durchsatzleistungen zwischen 100 und 500 Tonnen pro Stunde erreicht (vgl. Anhang I). Die Bunkerkapazitäten in den beteiligten Betrieben entsprechen maximal drei Fahrzeugladungen der SKWs. In der Hälfte der beteiligten Betriebe existiert zusätzlich ein Zwischenlagerplatz in der Nähe des Primärbrechers, auf dem die SKWs das Gestein bei hohem Bunkerfüllstand abkippen, um Wartezeiten zu begrenzen.

Durch die Datenerhebung wurde eine Basis geschaffen, von der ausgehend die Energieeffizienz von Prozessabläufen anhand von Fallbeispielen untersucht wurde. Überdies stellten die ermittelten Angaben ein Kriterium für die Auswahl von Lade- und Transportgeräten zur Durchführung der Kraftstoffverbrauchsmessungen dar.

### 3.1.2 Stand der Datenerfassung in den Betrieben

Die Verfügbarkeit projektrelevanter Daten gestaltete sich in den beteiligten Betrieben sehr unterschiedlich. Dies betraf sowohl die Art der vorliegenden Informationen als auch den Detailgrad ihrer Erfassung. Letzteres nimmt Bezug darauf, ob Angaben zum Energieverbrauch und Leistungsdaten auf gesamtbetrieblicher Ebene, für Prozesse oder für einzelne Maschinen bzw. Anlagen vorlagen.

Hinsichtlich der Betriebsmitteldimensionierung sowie im Bereich der Sprengtechnik bestand eine überwiegend hohe Informationsdichte. Hingegen lagen für den erreichbaren Bohrfortschritt und die Nebenzeiten beim Bohrgeräteinsatz nur wenige Angaben vor. Für die Lade- und Transportgeräte waren nur in einzelnen Betrieben Daten zu Arbeitszyklus- und Wartezeiten sowie Angaben zum Zeitaufwand für Hilfsarbeiten verfügbar. Gleiches gilt für die Last- und Leerlaufphasen des Primärbrechers, die im Hinblick auf Schwankungen der Anlagenauslastung nicht überwacht wurden.

Es handelt sich um Parameter, die sowohl den Betrieb der einzelnen Maschinen und Anlagen als auch die Abstimmung der Teilprozesse des Gewinnungsvorgangs maßgeblich beeinflussen. In der Regel konnten zu diesen Fragestellungen von den Betrieben jedoch keine verifizierbaren Daten, sondern lediglich Schätzwerte angegeben werden. [Skr14] Die Massenbewegungen im Tagebau waren unzureichend dokumentiert, um Mengenanteile der Gesamtförderung und Energieverbrauchswerte unterschiedlichen Betriebspunkten bzw. Gewinnungsstellen zuzuordnen. Darüber hinaus hielten Teile der von den Betrieben zur Verfügung gestellten Daten den im Rahmen des Projekts durchgeführten Konsistenzprüfungen nicht oder nur bedingt stand. Dies betraf Datensätze aus der Anlagensteuerung eines Betriebs sowie Daten fahrzeuginterner Wiegesysteme. Die Ermittlung belastbarer Referenzdaten für Analysen der Energieeffizienz war aus den genannten Gründen gegenüber der ursprünglichen Arbeits- und Zeitplanung mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden.

Es ist hervorzuheben, dass selbst grundlegende Daten zum Teil nicht erfasst wurden bzw. unter technischen Gesichtspunkten keiner Kontrolle unterlagen. Dies zeigt sich besonders am Beispiel des elektrischen Energieverbrauchs, zu dem in drei beteiligten Betrieben keine Informationen vorlagen (vgl. Tabelle 1). Es ist davon auszugehen, dass die Effizienz der elektrischen Anlagen in diesen Tagebauen bislang nicht systematisch geprüft wird.

Tankbücher wurden zum Zeitpunkt der Datenerhebung zwar in sechs Tagebauen geführt, jedoch nicht im Hinblick auf eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs ausgewertet. Zudem waren die Informationen unterschiedlich detailliert aufgeschlüsselt. In zwei Betrieben waren beispielsweise keine Angaben zu den Einsatzbereichen der Maschinen (Gewinnung, Abraumbeseitigung, etc.) vorhanden. Es handelte sich lediglich um eine Auflistung der Tankmengen, die durch weitere Informationen zu ergänzen wäre. Dazu zählen neben der Lade- bzw. Transportleistung z.B. Wartezeiten an der Lade- und Entladestelle sowie eine Differenzierung nach unterschiedlichen Gewinnungsstellen in einem Tagebau. [Skr14]

Die Datenverfügbarkeit war ausschlaggebend dafür, dass die Untersuchungen nicht in jedem Betrieb für sämtliche Prozesse nach der gleichen Methodik durchgeführt werden konnten. Daher wurde der Fokus der weiterführenden Untersuchungen fall-spezifisch auf die Betriebe gelegt, in denen hinreichende Informationen für belastbare Analysen zur Verfügung standen.

Der Umstand, dass bislang überwiegend keine systematische Überwachung der Energieeffizienz in den beteiligten Betrieben stattfand, ist vor dem Hintergrund der Energieintensität der Natursteingewinnung besonders zu betonen. Betriebliche Erfahrungswerte liefern zwar teils verhältnismäßig exakte Anhaltspunkte, sie stellen jedoch aufgrund mangelnder Überprüfbarkeit keine hinreichende Basis für eine systematische Optimierung der Energienutzung dar. Betreffende Projektinhalte wurden in Kombination mit Lösungsansätzen für eine Optimierung des Energieeinsatzes in Festgesteinsbetrieben mit konventioneller Gewinnungstechnik im Rahmen der Fachtagung ISCSM 2014 (International Symposium Continuous Surface Mining) einem Publikum aus Industrie- und Behördenvertretern präsentiert. [Skr14]

Es ist davon auszugehen, dass die sukzessiv erfolgende Einführung von Energiemanagementsystemen künftig zur Verbesserung der Datenverfügbarkeit in Natursteinbetrieben beitragen wird. Angestoßen wurde diese Entwicklung durch das Energiekonzept der Bundesregierung, welches im September 2010 beschlossen wurde. Es umfasst u.a. die Einleitung von Maßnahmen zur Erschließung energetischer Effizienzpotentiale. Beispielsweise können Vergünstigungen bei der Energiesteuer von Betrieben des produzierenden Gewerbes in Deutschland seit dem Antragsjahr 2013 nur noch in Anspruch genommen werden, wenn diese im Gegenzug nachweislich einen Beitrag zu Energieeinsparungen leisten. [Skr14] Dieser Nachweis kann z.B. in Form eines zertifizierten Energiemanagementsystems nach DIN 50001 oder alternativ durch gleichwertige Systeme anderer Art erbracht werden. [BMW10]

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die erarbeitete Datenbasis zum Energieverbrauch von Maschinen und Anlagen in weiteren Arbeitsschritten durch eigene Messungen des Kraftstoffverbrauchs von dieselmotorischen Lade- und Transportgeräten erweitert. Zusätzlich wurden Vermessungen innerbetrieblicher Transportwege durchgeführt, anhand derer ebenfalls Erkenntnisse zu möglichen Energieeinsparungen im Bereich des Transportprozesses abgeleitet wurden.

### 3.2 Vermessung innerbetrieblicher Transportstrecken

Die Untersuchungen zum Energiebedarf des Transportvorgangs erforderten neben den technischen Daten der eingesetzten Fahrzeuge detaillierte Kenntnisse des Verlaufs und der Beschaffenheit der Transportstrecken. Dies umfasst

- die zu überwindende Entfernung und Höhendifferenz,
- die Länge und Neigung von Steigungs- und Gefälleabschnitten,
- die Kurvenanzahl und -radien,
- die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche sowie
- Streckenabschnitte mit reduzierter Fahrwegbreite und Raum für Rangiervorgänge im Bereich der Lade- und Entladestellen.

Zunächst wurden Risswerke der Tagebaue ausgewertet, denen jedoch nur Teile der benötigten Informationen entnommen werden konnten. Das Messraster zur Erfassung der Geländehöhen war im Bereich der Fahrwege nicht ausreichend verdichtet. Problematisch gestaltete sich auch die Aktualität der Risswerke. Ergänzend wurden daher eigene Aufmaße der Transportstrecken angefertigt.

Mit der Oberflächenabtastung per Laserscan und der Positionsbestimmung mittels globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS) kamen zwei technische Verfahren in Betracht. Beide Arten von Messsystemen wurden in mehreren Tagebauen im Hinblick auf die Projektanforderungen erprobt. Das Erreichen einer für die Projektziele hinreichenden Messgenauigkeit in Kombination mit dem organisatorischen Aufwand der Vermessung stellten die maßgeblichen Auswahlkriterien dar.

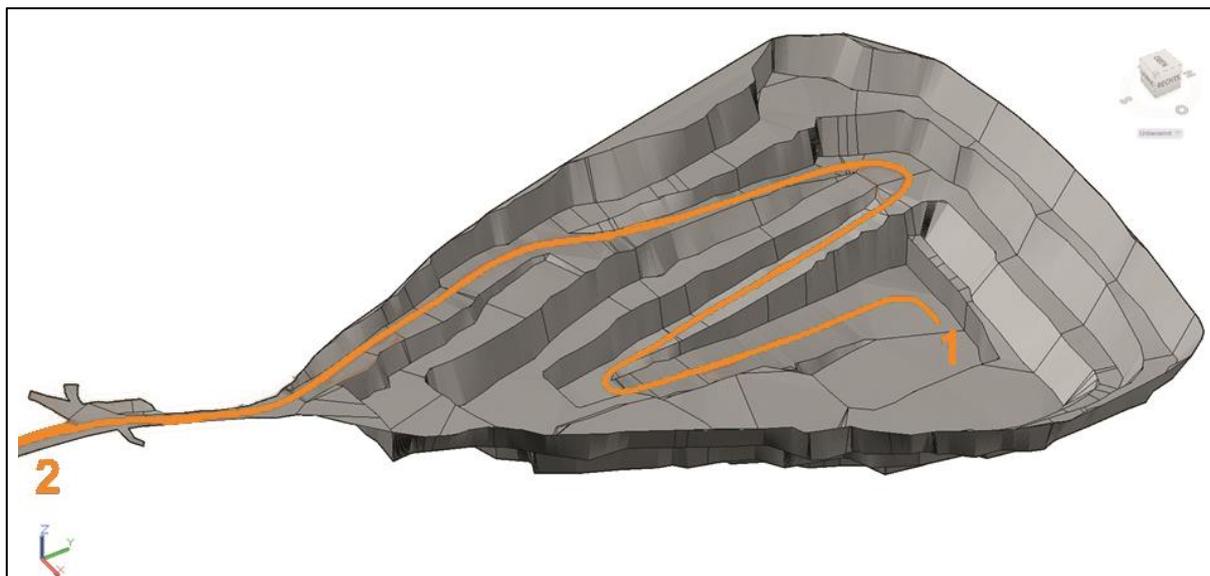
Das Laserscanning ermöglicht die hochpräzise Erfassung von Objekten. Aus den erzeugten dreidimensionalen Modellen der Tagebaue konnten der Verlauf der Transportstrecken und weitere Informationen zur Tagebaugeometrie extrahiert werden. Das Verfahren erwies sich aufgrund der begrenzten Reichweite und des dadurch erforderlichen mehrfachen Umsetzens des Scanners insbesondere bei langen und kurvenreichen Streckenverläufen jedoch als unverhältnismäßig zeitaufwändig.

Durch die Vermessung per GNSS konnte der Zeitbedarf der Arbeiten erheblich reduziert werden. Zugleich ließ sich durch die Verwendung eines differentiellen Messsystems bestehend aus einer Basisstation und einem mobilen Empfänger eine den Projektanforderungen entsprechende Messgenauigkeit erzielen. Dies gilt auch für die Höhengenaugigkeit, die bei der Positionierung mittels GNSS generell die kritischere Größe darstellt. [Man10] Die Höhengenaugigkeit war im vorliegenden Anwendungsfall angesichts der Nutzung der Daten zur Erstellung von Höhenplänen und zur Ermittlung der Fahrbahnneigung von besonderer Bedeutung.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass dieses Verfahren auch von Vermessungsbüros zur Erstellung der Risswerke von Tagebauen eingesetzt wird. Durch zusätzliche Messpunkte entlang der Transportstrecken ließen sich folglich mit vergleichsweise geringem Aufwand Datensätze für die Eingabe in das Simulationsmodell erzeugen.

Im Vorfeld der Messungen des Kraftstoffverbrauchs erfolgten in allen beteiligten Tagebauen Erstvermessungen der Transportstrecken. Diese lieferten dreidimensionale Einzelpunktkoordinaten entlang der Mittelachsen der Streckenverläufe. Die Koordinaten wurden in die Software AutoCAD Civil 3D importiert, welche u.a. für die Planung von Verkehrsinfrastruktur konzipiert ist.

Basierend auf den Vermessungspunkten wurden die Streckenverläufe digitalisiert (vgl. Abbildung 2) und Höhenpläne erstellt. Den Höhenplänen konnten die 2D-Distanzen sowie die Steigung bzw. das Gefälle zwischen den Messpunkten entnommen werden. Daraus wurden die 3D-Distanzen zwischen den Punkten berechnet.



**Abbildung 2:** Digitalisierter Verlauf einer Transportstrecke in einem CAD-Modell eines Tagebaus

Die Streckenverläufe wurden hinsichtlich ihrer Eignung für die Messungen des Kraftstoffverbrauchs von Transportfahrzeugen bewertet. Dies erfolgte unter Berücksichtigung der Erfordernisse der Messmethodik, des Verfahrens zur Auswertung der Verbrauchsdaten sowie im Hinblick auf die spätere Abbildung der Strecken im Simulationsmodell. Unter diesen Gesichtspunkten wurde eine zweckmäßige Festlegung der Abschnittsgrenzen vorgenommen, die sich neben der Streckenneigung insbesondere an Kurvenverläufen orientierte. Eine Übersicht der Vermessungsergebnisse beinhaltet Anhang II. Die Angaben zu Steigung bzw. Gefälle und zu den Höhendifferenzen beziehen sich auf eine Betrachtung, die jeweils ausgehend vom Abbaubereich in Richtung des Förderbezugspunkts erfolgt.

Es ist grundsätzlich auffällig, dass fast alle Streckenverläufe Abschnitte mit einer Neigung von über 10 % beinhalten. Dieser Wert wird in Teilen der Fachliteratur als Größenordnung für die maximale Rampensteigung angegeben, da sich die erreichbare Geschwindigkeit der Fahrzeuge mit zunehmender Neigung reduziert. [Eym06] Den Vermessungsdaten zufolge sind die Rampen in Natursteintagebauen jedoch häufig deutlich steiler ausgeführt, was u.a. auf die geringe Ausdehnung der Betriebe zurückzuführen ist.

Für die Durchführung von Messungen des Kraftstoffverbrauchs von Transportfahrzeugen wurden Strecken als geeignet erachtet, die folgende Eigenschaften besitzen:

- Die Gesamtstreckenlänge, d.h. die Transportentfernung zwischen Ladestelle und Vorbrecher, sollte mindestens 1.000 m betragen.
- Der Streckenverlauf sollte durch das Vorhandensein unterschiedlich stark geneigter Steigungs- und Gefälleabschnitte gekennzeichnet sein.
- Streckenabschnitte, innerhalb derer Steigung bzw. Gefälle in hinreichender Näherung als konstant betrachtet werden können, sollten eine Mindestlänge von 50 m nur in Einzelfällen unterschreiten. Solche Ausnahmen können beispielsweise Verbindungsrampen zwischen zwei Gewinnungssohlen darstellen.
- Der Streckenverlauf sollte Kurven unterschiedlicher Radien beinhalten, die Einfluss auf die Fahrgeschwindigkeit der Transportfahrzeuge nehmen. Diesbezüglich wurde festgelegt, dass solche Kurvenläufe in die Betrachtung einbezogen werden, deren Radius weniger als 100 m beträgt.
- Optional sollte der Streckenverlauf weitere Gestaltungsmerkmale enthalten, die besonderen Einfluss auf den Transportprozess nehmen. Als solche wurden Abschnitte definiert, in denen die Breite des Transportwegs reduziert ist. An diesen Stellen können bei Gegenverkehr Wartezeiten entstehen. Ein weiteres Beispiel stellen geringe Kurvenradien dar, die über eine Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit hinaus u.U. Rangiervorgänge erfordern.

Für die Durchführung der Messungen wurden Tagebau 5 und Tagebau 8 ausgewählt. Die betreffenden Streckenverläufe sind in Anhang II farblich hervorgehoben. Ergänzend zu den Streckenmerkmalen waren organisatorische und maschinentechnische Kriterien ausschlaggebend (vgl. Kapitel 3.3).

Bedingt durch den Abbaufortschritt sind die Lage und die Gestaltung der Gewinnungsstellen im Tagebau Ortsveränderungen unterworfen. Daher wurden die Daten der Strecken im Bereich der Abbaustellen zum Zeitpunkt der Kraftstoffverbrauchsmessungen grundsätzlich aktualisiert. Zudem wurden die Rangiermanöver erfasst, welche die Fahrzeuge an den Lade- und Entladestellen ausführten.

### **3.3 Untersuchungen zum Energieverbrauch von Maschinen und Anlagen**

#### **3.3.1 Konfiguration des Messsystems**

Die Auswahl der Betriebe bzw. Maschinen für die Kraftstoffverbrauchsmessungen orientierte sich an einer für die Natursteingewinnung repräsentativen Größen- und Leistungsklasse der Betriebsmittel. Als Maßstab wurden SKWs mit Nutzlasten von 36 bis 65 Tonnen sowie in Kombination mit dieser Klasse von Fahrzeugen eingesetzte Hydraulikbagger und Radlader definiert (vgl. Kapitel 3.1.1).

Weitere Kriterien betrafen die strukturellen Gegebenheiten in den Betrieben. Für den Einbau des Messgeräts in den Kraftstoffkreislauf der Maschinen bedurfte es vor Ort der Unterstützung durch fachkundiges Personal. Die jeweils erforderliche Anpassung der Kraftstoffzuleitungen an die Anschlüsse eines Motors bedingte einen erhöhten technischen Installationsaufwand. Während der Einbauphase, welche einen Zeitraum von drei bis vier Stunden in Anspruch nahm, musste überdies ein Ersatzladegerät bzw. -transportgerät zur Verfügung stehen. Diese Anforderungen an die Ausstattung und den Maschinenpark schränkten die Anzahl der geeigneten Betriebe ein.

Des Weiteren war die Kompatibilität der Messtechnik mit den Motoren der Maschinen sicherzustellen. Dies machte im Vorfeld einer Messkampagne eine intensive Vorprüfung für jeden Motorentyp erforderlich. Normen zur Reduzierung von Abgasemissionen und wachsende Leistungsanforderungen haben in den vergangenen Jahren zu einer signifikanten Steigerung der Einspritzdrücke und der Kraftstoffzirkulationsraten bei Dieselmotoren beigetragen. Die technischen Systeme weisen eine große konstruktive Vielfalt auf. Im industriellen Anwendungsbereich kommen überwiegend Direkteinspritzverfahren in Form von Einzelzylinder-Einspritzsystemen und Common-Rail-Systemen zum Einsatz. [Rei10] Die Kühlung und Schmierung von Motorelementen wie Hochdruckpumpen und Einspritzdüsen wird durch zirkulierenden Kraftstoff realisiert, der nicht unmittelbar der Verbrennung zugeführt wird. Dadurch entstehen unterschiedliche Temperaturniveaus im Kraftstoffkreislauf. [Kur06]

Es war zu gewährleisten, dass die Kraftstoffzirkulationsraten auch bei hohen Motorlasten nicht zu Überschreitungen der maximalen Durchflusskapazität des Messgeräts führen. Dies galt sowohl zur Vermeidung von Beschädigungen der Messtechnik als auch im Hinblick auf Sicherheitsrisiken beim Maschinenbetrieb durch Motorabschaltungen. Überdies mussten durch die Kraftstofftemperatur bedingte Beeinträchtigungen der Messergebnisse ausgeschlossen werden. Die Klärung der genannten Fragestellungen hatte wesentlichen Einfluss auf die Planung und Durchführung der Messkampagnen. Es ergab sich folgendes Anforderungsprofil des Messsystems:

- Eine technische Einzellösung für einen speziellen Motorentyp oder eine bestimmte Maschine war in Anbetracht der Projektziele keine Option. Die vorgesehenen Messungen an Hydraulikbagger, Radlader und SKW erforderten ein System, welches mit Dieselmotoren unterschiedlicher Bauart sowie eines Leistungsspektrums bis etwa 700 kW Antriebsleistung kompatibel ist.

- Zu gewährleisten waren die hinreichende Genauigkeit und Belastbarkeit der Messwerte, die überwiegend während des Einsatzes der Maschinen im Gewinnungsbetrieb aufgezeichnet werden sollten. Dies galt in Anbetracht unterschiedlicher technischer Spezifikationen von Motoren sowie unter Berücksichtigung variierender Betriebszustände und Einsatzbedingungen.
- Der Projektablauf erforderte die Verhältnismäßigkeit des technischen und organisatorischen Aufwands für die Installation und Inbetriebnahme der Messtechnik an einer Maschine hinsichtlich einer geplanten Dauer von zwei bis drei Tagen je Messkampagne bzw. Maschine in einem Tagebau.
- Die Zuordnung der Messwerte zu einzelnen Arbeitsabläufen, Betriebs- und Lastzuständen sowie zu Betriebspunkten, an denen eine Maschine eingesetzt wurde, verlangte eine hohe zeitliche Auflösung der Einzelwerte. Diese sollte optional bis hin zu Intervallen im Sekundenbereich einstellbar sein. Dessen bedurfte es z.B. zur Korrelation der Verbrauchsdaten mit dem Verlauf einer Transportstrecke. Die gängige Ausgabe eines Tages- oder Stundenmittelwertes des Kraftstoffverbrauchs war diesbezüglich unzureichend.
- Erforderlich war die Option zur Datenspeicherung über ausreichend lange Messzeiträume von mindestens einer vollständigen Schicht (acht bis zehn Betriebsstunden) auch bei hoher zeitlicher Auflösung der Einzelwerte bis hin zu Sekundenintervallen.
- Unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen im Tagebau waren die Widerstandsfähigkeit und Unempfindlichkeit des Messsystems gegenüber Vibrationen und Erschütterungen, Feuchtigkeit sowie Staub und sonstigen Verunreinigungen sicherzustellen.

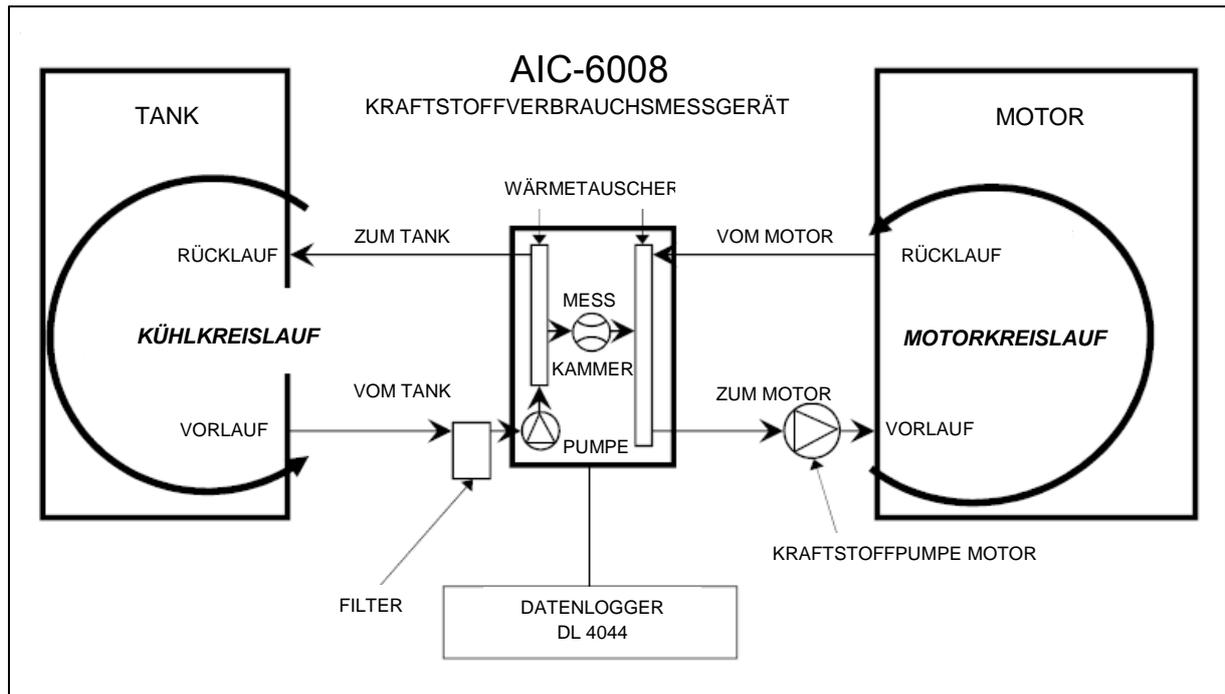
Trotz umfangreicher Literaturrecherchen sowie Anfragen bei Motorenherstellern und Serviceniederlassungen war es nicht möglich, quantitative Angaben zu den maximalen Vorlauf- und Rücklaufzeiten der betreffenden Motoren zu erhalten. Ursächlich ist die wirtschaftliche Sensibilität dieser technischen Informationen, über welche nur sehr eingeschränkt Auskunft erteilt wird.

Im Hinblick auf die Kompatibilität mit Kraftstoffversorgungs- und Einspritzsystemen moderner Dieselmotoren eines großen Leistungsspektrums wurde gegenüber dem im Antrag angeführten Messgerät ein erweitertes System gewählt. Dieses beinhaltete auch zusätzliche Optionen zur Datenspeicherung und Auswertung über einen Datenlogger, um die erforderliche Informationsdichte bzgl. des in unterschiedlichen Lastfällen entstehenden Energiebedarfs der Maschinen zu generieren.

Das Kraftstoffverbrauchsmessgerät vom Typ AIC 6008 SWISLINE des Herstellers AIC Systems nutzt das Prinzip der unmittelbaren Volumenstrommessung mittels Verdrängerzähler. Der Hersteller gibt die Messabweichung mit +/- 1 % vom gemessenen Wert an. Die Wiederholbarkeit der Messungen wird auf +/- 0,2 % beziffert. Die Angaben gelten für einen Messbereich von 4 bis 200 Liter/h. [AIC12] Kurzfristige

Unter- oder Überschreitungen des Messbereichs sind hinsichtlich der Genauigkeit des Messergebnisses unkritisch. Dies kann bezogen auf die Projektanforderungen beispielsweise für die Schubabschaltung beim Befahren von Gefällestrrecken oder für Beschleunigungsvorgänge auf Rampen im Tagebau von Bedeutung sein.

Der Einbau des Messgeräts erfolgt im Niederdrucksystem der Kraftstoffversorgung durch Trennung der Vor- und Rücklaufleitungen zwischen Tank und Motor. Es entstehen praktisch zwei Kraftstoffkreisläufe zwischen Fahrzeugtank und Motor, die über die Messkammer miteinander verbunden sind (vgl. Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Funktionsprinzip des Messgeräts vom Typ AIC 6008 SWISSLINE nach [AIC12]

Der Kühlkreislauf wird von der Förderpumpe im Messgerät angetrieben, die Kraftstoff aus dem Tank über eine vorgeschaltete Filterpatrone ansaugt und kontinuierlich durch den Wärmetauscher pumpt. Dies dient der Wärmeabfuhr aus dem Rücklauf des Motors, welcher ebenfalls den Rekuperator durchströmt. Sofern der Rücklauf vom Motor die Durchflussrate des Wärmetauschers übersteigt, wirkt das Messgerät wie ein Begrenzer im Kraftstoffkreislauf. In diesem Fall wäre eine ausreichende Kraftstoffversorgung des Motors nicht mehr gegeben.

Zudem kann die Durchflussrate der Messkammer in der Anlaufphase des Motors nach dem Einbau des Messgeräts kritisch sein, wenn der Kraftstoffkreislauf noch nicht vollständig entlüftet ist. In dieser Phase kann es zu Kavitation in der Messkammer kommen. Das Messgerät wurde daher in Kooperation mit dem Hersteller AIC mit einer Bypass-Lösung ausgestattet. Diese diente bei Bedarf zur

1. Teilentlastung der Messkammer in der Anlauf- bzw. Entlüftungsphase nach dem Einbau, sofern in dieser Phase Durchflussraten > 220 Liter/h im Leerlauf auftraten, um einem Strömungsabriss durch Kavitation vorzubeugen.

2. Teilentlastung des Wärmetauschers in allen Betriebsphasen, sofern der Rücklauf vom Motor die maximale Durchflussrate des Wärmetauschers überstieg.

Die maximale Temperatur des Kraftstoffs im Tank beziffert der Hersteller AIC Systems beim Betrieb des Messgeräts in Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen mit etwa 40 °C. [AIC14] Dies wurde durch eigene Messungen an einem Hydraulikbagger bestätigt (vgl. Tabelle 2). Diese Betriebsmittelart wurde aufgrund ihrer stationären Arbeitsweise einer besonderen Überprüfung unterzogen. Anders als bei SKWs oder auch bei Radladern ergeben sich keine Kühleffekte der Antriebseinheit durch Fahrtwind. Somit war davon auszugehen, dass eine für die Messungen kritische Wärmeentwicklung am ehesten im Kraftstoffkreislauf von Hydraulikbaggern vorläge.

Zusätzlich sind in der Tabelle die zu den Messzeitpunkten herrschenden Umgebungstemperaturen angegeben. Dabei handelt es sich um Daten des Deutschen Wetterdienstes, die von Messstationen im Umfeld des Tagebaus aufgezeichnet wurden.

**Tabelle 2:** Kraftstofftemperatur im Tank je nach Betriebszustand [eigene Messung] & [DWD14]

Starten des Motors		Nach Leerlaufphase		betriebswarmer Zustand	
Kraftstofftemperatur [°C]	Außen-temperatur [°C]	Kraftstofftemperatur [°C]	Außen-temperatur [°C]	Kraftstofftemperatur [°C]	Außen-temperatur [°C]
27,0	26,0	27,3	26,0	-	-
23,6	16,0	-	-	41,6	25,0

Die festgestellten Temperaturerhöhungen sind als unkritisch zu betrachten. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Dichte von Dieselmotorkraftstoff gemäß der Norm DIN EN 590 bei einer Temperatur von 15 °C zwischen 820 und 845 g/Liter betragen darf. Zugleich wird die Änderung der Dichte je Grad Celsius Temperaturdifferenz mit etwa 0,7 g/Liter angegeben. [ARA 2014] Der Toleranzbereich der Norm von 25 g/Liter entspräche somit umgerechnet einer Temperaturdifferenz von:

$$\frac{25 \text{ g/Liter}}{0,7 \frac{\text{g/Liter}}{^{\circ}\text{C}}} \approx 36 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Messkampagnen sollten ursprünglich in einer sechsmonatigen Arbeitsphase zu Beginn des Projekts erfolgen. Dies war jedoch organisatorisch nicht durchführbar, da die Prüfung technischer Fragestellungen und die Anpassung eines Messsystems an die Projektanforderungen mehr Zeit als geplant in Anspruch nahmen. Es kam hinzu, dass die Integration der Versuche in den laufenden Gewinnungsbetrieb eine längerfristige Terminabstimmung mit den Betrieben erforderte. In den Wintermonaten waren aufgrund der saisonal bedingten und witterungsabhängigen Betriebsruhe in Natursteintagebauen keine Messungen möglich. Teile der Referenzdaten für die Untersuchungen mit dem Simulationsmodell standen infolgedessen erst später als in der Arbeitsplanung vorgesehen zur Verfügung. Mehrere Arbeitsphasen wurden daher parallel durchgeführt.

### 3.3.2 Messung des Kraftstoffverbrauchs von Ladegeräten

Der Kraftstoffverbrauch einer Maschine mit Verbrennungsmotor ist von verschiedenartigen Faktoren abhängig, die in unterschiedlichem Maße beeinflussbar sind. Diesbezüglich kann grundsätzlich zwischen betriebsmittelabhängigen und prozessabhängigen Einflussfaktoren differenziert werden.

Zu den betriebsmittelabhängigen Einflussgrößen werden nachfolgend konstruktive Merkmale der Antriebseinheit gezählt. Diese sind nach Abschluss der Fertigung überwiegend nicht mehr oder nur noch geringfügig beeinflussbar. Ein Vergleich des Energiebedarfs und der Effizienz unterschiedlicher Motorenbauweisen oder Antriebskonzepte sowie eine Gegenüberstellung von Maschinen verschiedener Hersteller wurden im Zuge des Projekts explizit nicht angestrebt.

Die Messungen konzentrierten sich auf die Gruppe der prozessabhängigen Einflussgrößen. Als solche werden Faktoren eingestuft, die mit der Einsatzumgebung, unterschiedlichen Betriebszuständen und der Einsatzweise einer Maschine in Verbindung stehen. Veränderungen in den genannten Bereichen können auf den Energieverbrauch von Lade- und Transportgeräten unmittelbare und mittelbare Auswirkungen haben. Letztere äußern sich in Form einer Beeinflussung des Zeitbedarfs von Arbeitsvorgängen. Für den Einsatz von Ladegeräten sind die prozessabhängigen Einflüsse in nachfolgender Tabelle kategorisiert.

**Tabelle 3:** Prozessabhängige Einflussparameter beim Ladegeräteeinsatz

<p><b>Qualität des Sprengergebnisses</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Stückigkeit des Rohaufwerks</li><li>- Geometrie des Abschlags</li><li>- Knäpperanteil im Rohaufwerk</li><li>- Sohlenzustand nach der Sprengung</li></ul> <p><b>Prozessorganisation und -koordination</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Gerätedimensionierung</li><li>- Abstimmung auf die Transporteinheiten</li><li>- Unproduktive Zeiträume infolge der Disposition von Transporteinheiten</li><li>- Standebene bzw. Positionierung des Ladegeräts relativ zum Transportfahrzeug</li><li>- Umsetzhäufigkeit</li><li>- Zurückzulegende Entfernung beim Wechsel der Ladestelle</li><li>- Einsatzzeit für Hilfsarbeiten (z.B. Knäpperzerkleinerung, Sohlenpflege, Wandberäumung)</li></ul> <p><b>Ladeschaufel</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Erreichbarer Füllungsgrad</li><li>- Gewichtserhöhung bzw. Volumenreduzierung durch Verschleißschutzmaßnahmen</li></ul> <p><b>Instandhaltungsmaßnahmen</b></p> <p>Häufigkeit und Qualität von Inspektion, Wartung und Instandsetzung (z.B. Einfluss des Abnutzungsgrads von Schaufelzähnen oder der Kettenvorspannung)</p> <p><b>Fahr- bzw. Bedienverhalten</b></p> <p>des Maschinenbedieners basierend auf Fähigkeiten und Erfahrungswerten</p>
---

Die verschiedenen Faktoren stellen unterschiedliche Anforderungen bzw. besitzen unterschiedliche Voraussetzungen hinsichtlich einer Erfassung ihrer Einflussnahme auf den Kraftstoffverbrauch. Dies gilt auch für ihre Eignung zur Ableitung von Berechnungsgrundlagen.

So lässt sich insbesondere das Fahr- bzw. Bedienverhalten aussagekräftiger in Relation zum Zeitbedarf betrachten, den Fahrmanöver oder Arbeitsvorgänge in Anspruch nehmen, als bezogen auf den absoluten Kraftstoffverbrauch.

Um den Einfluss von Instandhaltungsmaßnahmen und die Auswirkungen von Verschleißzuständen zu untersuchen, wären wiederholte Messungen über Zeitperioden von Wochen bzw. Monaten in einzelnen Betrieben erforderlich gewesen. Dies war in Anbetracht der zur Verfügung stehenden Versuchszeiträume nicht darstellbar. Sofern verfügbar, wurden allerdings Informationen zu Kontrollintervallen dokumentiert und der Status quo an den Versuchstagen protokolliert, um diese Angaben in die Gesamtbetrachtung einfließen zu lassen.

Die Auswirkungen einzelner Faktoren auf den Kraftstoffverbrauch von Hydraulikbaggern und Radladern sollten anhand der Messungen idealerweise separat quantifiziert werden. Dies ist in der Realität jedoch nur eingeschränkt umsetzbar, da die Faktoren grundsätzlich in Wechselwirkung zueinander stehen. Diese Komplexität ergibt sich auch infolge der Integration der Messungen in den laufenden Gewinnungsbetrieb. Der Vorteil gegenüber separaten Versuchsanordnungen bestand jedoch darin, neben dem Kraftstoffverbrauch bei der Beladung von Transportfahrzeugen den Energie- und Zeitbedarf weiterer Arbeitsabläufe zu erfassen. Dazu zählten:

- das Umsetzen des Baggers / Radladers zur Ladestelle
- die Ausführung von Sohlen- oder Fahrbahn Pflegemaßnahmen
- die Herrichtung der Ladestelle für die Fahrzeugbeladung
- Hilfsarbeiten wie Wandberäumung, Vergleichmäßigung des zu ladenden Haufwerks und die Nachbehandlung von Knäppern
- Wartezeiten zwischen den Fahrzeugbeladungen

Die Arbeitsabläufe wurden fotografisch im Sekundentakt durch eine Kamera aufgezeichnet, die in der Fahrerkabine installiert und an denselben Laptop wie der Datenlogger des Verbrauchsmessgeräts angeschlossen war. Auf diese Weise ließen sich Informationen zur Anzahl der Ladespiele und den Schwenkwinkeln gewinnen. Über die Systemzeit des Laptops wurden die Verbrauchs- und die Bilddaten synchronisiert.

Darüber hinaus wurde der Sohlenzustand im Bereich der Ladestelle protokolliert, wobei u.a. witterungsbedingte Einflüsse von Bedeutung waren. Weitere Bestandteile des Protokolls stellten die Eigenschaften des Haufwerks dar. Anhand der Haufwerkslage und -stückigkeit wurde qualitativ die Ladefähigkeit bewertet. Zudem wurden der Anteil und die Größe von Knäppern dokumentiert.

### 3.3.2.1 Hydraulikbagger

Das Messgerät wurde an einen Tieflöffelhydraulikbagger vom Typ Komatsu PC750 SE angeschlossen. Dieser besitzt eine Motorleistung von ca. 340 kW und ein Dienstgewicht von 80 Tonnen. Das Fassungsvermögen der Felsschaufel beträgt ca. 5 m<sup>3</sup>. [KOM02] Die Versuchsdurchführung erfolgte in Tagebau 10 in zwei Messkampagnen und erstreckte sich insgesamt über einen Zeitraum von vier Tagen. Im Zuge dessen wurde der Bagger an zwei verschiedenen Ladestellen eingesetzt, die im Folgenden mit A und B bezeichnet werden. Der Bagger arbeitete ausgehend von einer Zwischenstufe (Abbildung 4). Bei diesem gängigen Einsatzverfahren ist das Ladegerät auf dem Haufwerk positioniert, wodurch sich die erreichbare Abtragshöhe steigert und zugleich die Hubhöhe der gefüllten Ladeschaufel reduziert wird.



**Abbildung 4:** Hydraulikbagger während der Messungen bei der SKW-Beladung auf Zwischenstufe

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messkampagnen vorgestellt. Ferner wird auf die für die Modellrechnungen abgeleiteten Erkenntnisse zum Energiebedarf und zur Effizienz von Arbeitsvorgängen und Einsatzverfahren eingegangen. Dies erfolgt anhand einer Untersuchung der Einflussnahme unterschiedlicher Faktoren, wobei auch auf bestehende Wechselwirkungen eingegangen wird. Eine Übersicht der aufbereiteten Messdatensätze beinhaltet Anhang III-3 und III-4.

#### Haufwerksbeschaffenheit

Bei gleicher Arbeitsweise wurden an Ladestelle B im Vergleich zu Ladestelle A durchschnittlich 20 % längere Ladespielzeiten gemessen. Dies ist vorrangig auf eine Einflussnahme der Haufwerksbeschaffenheit zurückzuführen. An Ladestelle A enthielt das Haufwerk nur wenig Material > 0,5 m, wobei die maximale Kantenlänge einzelner Gesteinsbrocken ca. 0,8 m betrug. Verglichen damit war das Haufwerk an Ladestelle B von ungleichmäßiger Beschaffenheit. Es beinhaltete einen höheren Anteil von Material mit einer Stückigkeit > 0,5 m. Zudem waren einzelne Knäpper mit Kantenlängen von 1,5 bis 2,5 m enthalten

### Schwenkwinkel

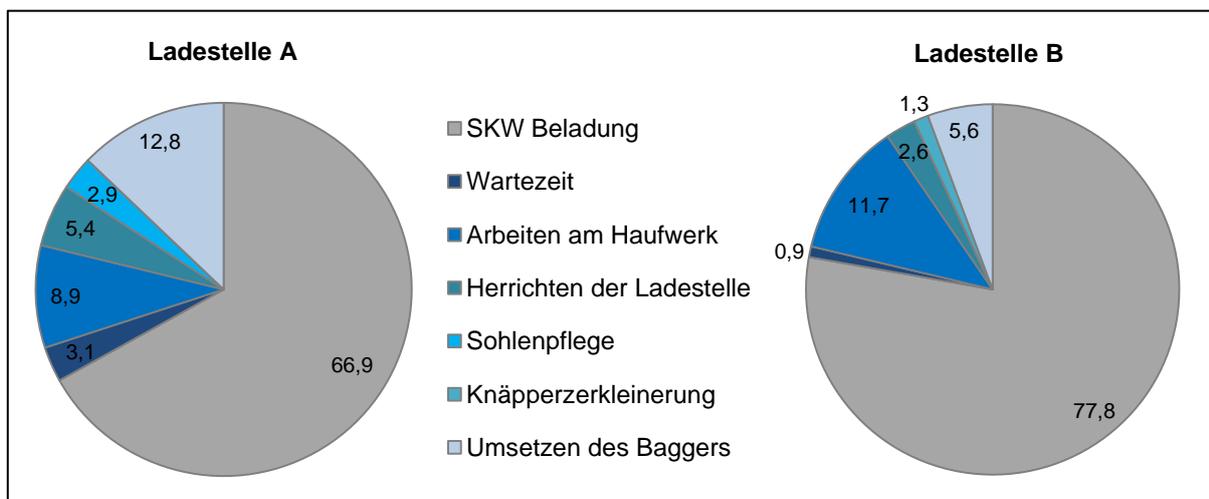
Die Messungen der Ladespielzeiten ergaben eine Reduzierung des Zeitbedarfs um durchschnittlich 6 %, wenn der Schwenkwinkel um etwa 90° verringert wurde. Dies deckt sich mit Angaben des Maschinenherstellers Komatsu, denen zufolge ein um 60° geringerer Schwenkwinkel zu einer um 4 % reduzierten Ladespielzeit führt. Im Dauereinsatz ist dies gleichbedeutend mit einer um 4 % gesteigerten Produktionsleistung. Pro Liter Kraftstoffeinsatz konnte während Tests von Komatsu etwa 3 % mehr Material verladen werden. [KOM14]

Zwar ist dies von spezifischen Faktoren abhängig. Es ist jedoch abzuleiten, dass über den Schwenkwinkel eine Beeinflussung des spezifischen Energiebedarfs der Ladespiele im einstelligen Prozentbereich realisierbar ist.

### Wartezeiten

An Ladestelle A wurden lediglich während 50 % der Einsatzzeit SKWs beladen. An Ladestelle B lag der Anteil der Ladezeit bei 71 %. Ursächlich ist insbesondere die Kopplung des Ladeprozesses an den Transportvorgang. Der Abbaufortschritt bzw. Wechsel der Abbaustelle führen zu Änderungen von Prozessparametern. Infolgedessen lässt sich grundsätzlich keine gleichbleibende und zumeist auch keine optimale Synchronisation des Lade- und Transportvorgangs im Regelbetrieb erzielen.

Einen Teil der Wartezeiten bis zum Eintreffen der nächsten Transporteinheit wurde der Bagger im Leerlauf betrieben. Im Leerlauf wurde während separater Messungen ein Kraftstoffverbrauch von 4 bis 4,5 Litern/h festgestellt. Während der Wartezeiten an den Ladestellen wurden um 60 % höhere Verbrauchswerte gemessen, sofern die automatische Drehzahlrückstellung nicht aktiviert wurde. Auf die Wartezeiten im Leerlauf entfielen während der Messungen ca. 1 bis 3 % des Gesamtenergieverbrauchs (vgl. Abbildung 5). Dies entspricht gemessen am Jahresverbrauch des Baggers von ca. 38.000 Litern etwa 400 bis 1.200 Litern Kraftstoff.



**Abbildung 5:** Prozentualer Anteil der Arbeitsvorgänge am Gesamtverbrauch während der Messungen

### Arbeiten am Haufwerk

In den Phasen, in denen kein SKW zur Beladung bereitstand, waren neben den Wartezeiten im Leerlauf umfangreiche Arbeiten am Haufwerk zu verzeichnen, was häufig in Betrieben festzustellen ist. Dabei wird Gesteinsmaterial mit der Schaufel aufgenommen und wieder auf dem Haufwerk abgeladen. Bei schwer zu ladendem Gestein soll dadurch eine Auflockerung und Vergleichmäßigung erreicht werden, um die Ladefähigkeit zu verbessern und die Dauer der Fahrzeugbeladungen zu verkürzen.

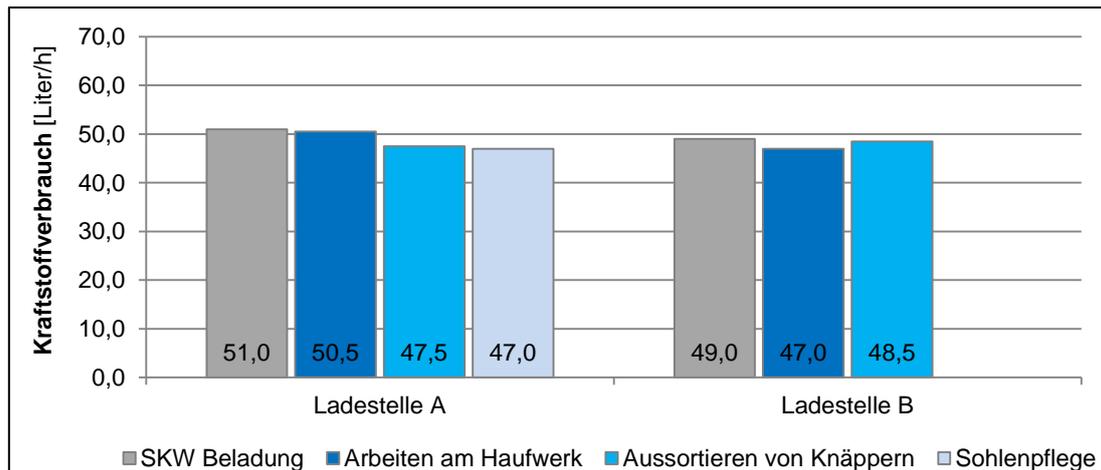
Im Hinblick auf den Maschineneinsatz und Betriebsablauf in Natursteintagebauen ist diese Vorgehensweise unverhältnismäßig. Der Kraftstoffverbrauch während des Arbeitens am Haufwerk entsprach mit etwa 50 Litern/h den Werten, die im Durchschnitt bei der Beladung der SKWs gemessen wurden. Der erhebliche Energieeinsatz leistet jedoch keinen unmittelbaren Beitrag dazu, das Gestein zum Primärbrecher zu befördern. Es war ebenfalls nicht festzustellen, dass sich der Kraftstoffverbrauch des Baggers bei der anschließenden Verladung des Gesteins durch die vorbereitenden Arbeiten reduzierte. Bezogen auf die jährliche Verbrauchsmenge des Baggers in Tagebau 10 wären bei einer angepassten Maschinenbedienung während der Wartezeiten Kraftstoffeinsparungen bis zu 4.000 Litern Dieselkraftstoff zu erwarten.

Eine mögliche Verkürzung der Beladedauer von wenigen Sekunden wurde zudem egalisiert, da nicht kontinuierlich Transportfahrzeuge zur Beladung bereitstanden. Dies war durch die geringere Anzahl an Transportfahrzeugen bedingt und ist auf die meisten Natursteintagebaue übertragbar. Obwohl in der Regel mehrere Fahrzeuge vorgehalten werden, sind üblicherweise nur ein bis zwei SKWs gleichzeitig im Einsatz, wie die Datenerhebung in Gewinnungsbetrieben ergab.

Aus dem gleichen Grund ist es energetisch ineffizient mit befüllter und angehobener Ladeschaufel auf das Eintreffen eines SKW zu warten. Dabei verbraucht der Bagger aufgrund der Beanspruchung der hydraulischen Systeme und einer erhöhten Drehzahl mehr Kraftstoff. Grundsätzlich lässt sich auf diese Weise zwar der Zeitbedarf des ersten Ladespiels verkürzen. Auch hier ist jedoch die permanente Verfügbarkeit von Transporteinheiten Voraussetzung dafür, dass der Zeitgewinn nicht durch Wartezeiten egalisiert wird. Es handelt sich um eine Vorgehensweise, die aus Großtagebauen übernommen wurde. Für Natursteintagebaue ist sie jedoch als unverhältnismäßig einzustufen. Das Füllen der Ladeschaufel sollte hier erst beim Eintreffen eines Transportfahrzeugs erfolgen.

### Energieintensität von Hilfs- und Nebentätigkeiten

Das Personal ist verstärkt auf die Energieintensität des Maschineneinsatzes und insbesondere bestimmter Arbeitsvorgänge hinzuweisen. Die Messergebnisse zeigen, dass sich Arbeiten wie das Herrichten der Ladestelle oder die Sohlenpflege mit dem Hauptladergerät nahezu gleich energieintensiv gestalten, wie die Beladung der Transportfahrzeuge (vgl. Abbildung 6). Insbesondere für die Sohlenpflege, Wandberäumung und die Nachbearbeitung von Knäppern sollten daher ausschließlich Hilfsgeräte eingesetzt werden, die geringere Stundenverbrauchswerte besitzen. Es war zudem festzustellen, dass mit zunehmender Wartezeit umfangreichere Hilfsarbeiten ausgeführt wurden. Diese gingen meist über das erforderliche Maß hinaus.



**Abbildung 6:** Spezifische Verbrauchswerte des Baggers während verschiedener Arbeitsvorgänge

### Nachbehandlung von Knäppern

Der Einfluss des Sprengergebnisses auf den Ladeprozess äußert sich neben der Schaufelfüllung auch durch die Anzahl von Knäppern im Rohhaufwerk bzw. durch den Arbeitsaufwand für deren Nachzerkleinerung. Die Entnahme eines Knäppers aus dem Haufwerk und die Zertrümmerung durch Schläge mit der Baggerschaufel verursachen einen Kraftstoffverbrauch von ca. 3 Litern. Angaben des Betriebs zufolge fallen je Sprengung etwa 10 bis 15 Knäpper an, die einer gesonderten Nachzerkleinerung bedürfen. Es werden 30 bis 40 Sprengungen pro Jahr vorgenommen. Werden die gemessenen Verbrauchswerte zu Grunde gelegt, so ergibt sich ein jährlicher Energiebedarf zwischen 900 und 1.800 Litern Kraftstoff für die Nachbehandlung der Knäpper, die durch ein verbessertes Sprengergebnis vermeidbar wären.

### **3.3.2.2 Radlader**

Die Versuchsdurchführung in Tagebau 6 erstreckte sich über einen Zeitraum von drei Tagen (vgl. Anhang III-5 bis III-7). Zum Einsatz kam ein Radlader vom Typ Komatsu WA600-6 (vgl. Abbildung 7). Gemäß Herstellerangaben besitzt die Maschine eine Motorleistung von etwa 400 kW bei einem Dienstgewicht von 53 Tonnen. Das Fassungsvermögen der Ladeschaufel beträgt 7 m<sup>3</sup>. [KOM 2009b, S. 3] Die Arbeitsweise des Radladers wird angelehnt an die Fahrmanöver während der Beladung von Fahrzeugen als V-Betrieb bezeichnet. Der Radlader pendelt durch Vor- und Zurücksetzen bei jedem Ladespiel zwischen Haufwerk und Transportfahrzeug.

### Einsatzbedingungen und Maschinenbedienung

Der Radlader wurde an allen Messtagen an derselben Ladestelle eingesetzt. Allerdings erfolgte die Bedienung am ersten Versuchstag durch einen anderen Fahrer als an den Folgetagen. Es waren Unterschiede bezüglich der Maschinenbedienung und des Energieverbrauchs festzustellen. Während am ersten Tag ein Durchschnittsver-



**Abbildung 7:** Radlader während der Messungen bei der SKW-Beladung im V-Betrieb

brauch von etwa 40 Liter/h entstand, war am zweiten und dritten Tag ein Energiebedarf von 52,5 bzw. 53,5 Liter/h zu verzeichnen. Dies ist jedoch nicht ausschließlich auf die individuellen Fähigkeiten der Fahrer zurückzuführen. Bedingt durch den Abbaufortschritt ergaben sich Veränderungen der Einsatzbedingungen. Das gesprengte Haufwerk wies einen Schüttwinkel von ca. 20° auf. Je länger die Ladetätigkeit andauerte, desto höher war das abzutragende Gestein aufgeschichtet und umso aufwändiger gestaltete sich das Füllen der Schaufel. Am zweiten und dritten Tag musste zunehmend stärker verkeiltes Haufwerk an der Frontseite des Abschlags geladen werden, da umgebende Bruchwände ein seitliches Laden behinderten.

### Wartezeiten

An allen Versuchstagen nahmen die Wartezeiten den zweitgrößten Anteil der Einsatzzeit ein. Auf diese Phasen entfielen bis zu 13,5 % des Kraftstoffverbrauchs (vgl. Abbildung 8). Der Energiebedarf des Radladers im Leerlauf wurde durch eine separate Messung über einen Zeitraum von einer Stunde auf 11 bis 12 Liter/h beziffert. Während der Wartezeiten an der Ladestelle wurden in der Regel erhöhte Werte gemessen. Die Leerlaufdrehzahl und der entsprechende Kraftstoffverbrauch stellten sich hier erst nach einer gewissen Zeit ein. Die Zeitdauer zwischen zwei Fahrzeugbeladungen unterschied sich an den Versuchstagen, da der Transportfahrzeugeinsatz variierte (vgl. Tabelle 4).

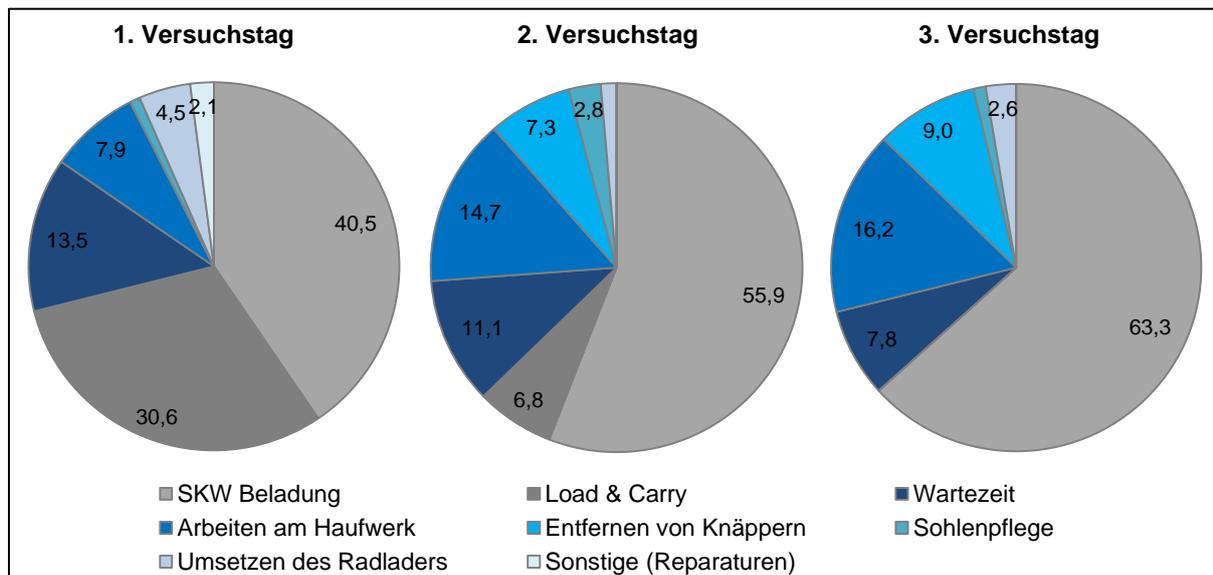
**Tabelle 4:** Fahrzeugeinsatz sowie Dauer und Tätigkeiten zwischen SKW-Beladungen

	<b>Versuchstag 1</b> Fahrer A	<b>Versuchstag 2</b> Fahrer B	<b>Versuchstag 3</b> Fahrer B
<b>Anzahl der Transportfahrzeuge</b>	1	1 ( <i>phasenweise 2</i> )	2 ( <i>phasenweise 1</i> )
<b>Ø Dauer zwischen Beladungen [min]</b>	3,8	3,7	2,5
<b>davon Wartezeit [%]</b>	66,0	51,5	40,0
<b>davon Hilfsarbeiten [%]</b>	34,0	48,5	60,0

In den Phasen zwischen zwei SKW-Beladungen wurde der Radlader auch für Hilfsarbeiten eingesetzt. Davon sind aufgrund des Umfangs hervorzuheben:

- Das Zurechtschieben und Auflockern des Haufwerks (Arbeiten am Haufwerk).
- Das Entfernen von Knäppern/Gesteinsbrocken, die vom Bediener des Ladegeräts als hinderlich für die Verladung bzw. zu groß für den Vorbrecher eingestuft wurden.

Die Zeitanteile der Hilfsarbeiten sind ebenfalls in Tabelle 4 eingetragen. Die Anteile des Kraftstoffverbrauchs, die auf die Ausführung der Tätigkeiten entfielen, sind nachfolgender Abbildung zu entnehmen.



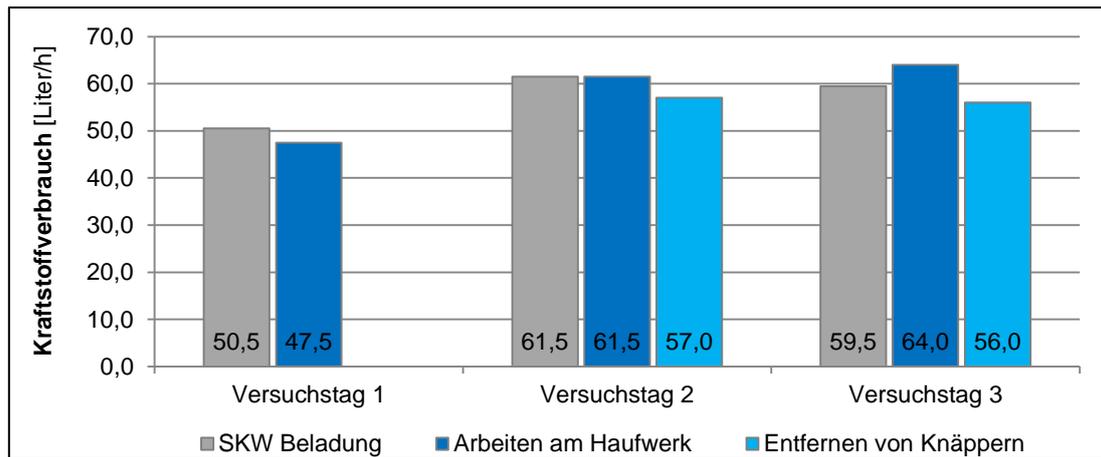
**Abbildung 8:** Prozentualer Anteil der Arbeitsvorgänge am Gesamtverbrauch während der Messungen

### Nachbehandlung von Knäppern

Erkennbar ist, dass sich der Umfang der Ausführung von Hilfsarbeiten sukzessive erhöhte. Am zweiten und dritten Versuchstag verursachte das Entfernen von Knäppern aus dem Haufwerk 7,3 bzw. 9 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs (vgl. Abbildung 8). Es handelte sich um insgesamt 60 Einzelvorgänge.

Anhand von Bildauswertungen wurde die Größe der Gesteinsbrocken untersucht. Es war festzustellen, dass davon 80 % Kantenlängen von lediglich einem Meter oder weniger aufwiesen, was keine gesonderte Nachzerkleinerung vor der Aufgabe in den Brecher erforderte. Lediglich 5 % des Materials waren tatsächlich als Knäpper einzustufen. In den übrigen Fällen bestanden Unsicherheiten bei der Bemessung. Festzuhalten ist, dass beim Großteil des Materials auf die energieaufwändige Entnahme aus dem Haufwerk hätte verzichtet werden können. Allein an den beiden Versuchstagen hätte sich daraus eine Energieeinsparung von etwa 40 Litern Kraftstoff ergeben.

Aufgrund der Energieintensität der Nachbehandlung von Knäppern ist eine übervorsichtige Vorgehensweise zu vermeiden. Es wurden vergleichbare oder sogar höhere Verbrauchswerte gemessen als bei der Beladung der SKWs (Abbildung 9).



**Abbildung 9:** Spezifische Verbrauchswerte des Radladers während verschiedener Arbeitsvorgänge

Aufzeichnungen zufolge mussten im Jahr 2011 in Tagebau 6 etwa 13.850 Knäpper nachzerkleinert werden. Beim Entfernen eines Knäppers aus dem Haufwerk wurden Verbrauchsmengen von 0,8 bis 2 Liter Kraftstoff gemessen. Bei der o.g. Anzahl von Knäppern wäre somit allein für die Entnahme aus dem Haufwerk ein Verbrauch von über 11.000 Litern Diesel zu veranschlagen. Hinzu kommen der Energiebedarf für die Nachzerkleinerung und die erneute Aufnahme des Gesteins bei der späteren Verladung. Durch Veränderungen im Bereich der Sprengtechnik konnte die Anzahl der Knäpper in diesem Betrieb auf ca. 150 bis 200 Stück pro Jahr reduziert werden. Dies veranschaulicht, wie maßgeblich der Energiebedarf der nachfolgenden Prozesse bereits durch das Sprengergebnis beeinflusst wird.

#### Arbeiten am Haufwerk

Im Hinblick auf den Beitrag beim Transport des Gesteins zum Primärbrecher ist ausschließlich die Beladung der SKWs als produktive Tätigkeit einzustufen. Die Hilfsarbeiten leisten hierzu hingegen keinen unmittelbaren Beitrag. Dies betrifft besonders die wiederholte Aufnahme und Umlagerung von Haufwerk durch den Radlader zwischen den Fahrzeugbeladungen. Auf diese Tätigkeit entfielen an den Versuchstagen 7,9 bis 16,2 % des Gesamtenergieverbrauchs (vgl. Abbildung 8).

Wie beim Baggereinsatz gilt, dass weder eine Verringerung der Ladespielzeiten noch eine Reduzierung der Verbrauchswerte bei der anschließenden Verladung des Gesteins festgestellt wurden. Es handelt sich somit um einen unverhältnismäßigen Kraftstoffmeherverbrauch.

#### Sohlen- und Fahrbahnpflegemaßnahmen

Der Radlader wurde mehrfach für Maßnahmen der Sohlen- und Fahrbahnpflege eingesetzt. Beispielsweise erforderte das Einebnen von Sohlenunebenheiten an der Ladestelle je Vorgang einen Energieeinsatz von 2 bis 2,5 Litern Kraftstoff. Beräumvorgänge zur Beseitigung von Gestein, das bei der Beladung vom SKW gefallen war, verursachten jeweils einen Mehrverbrauch bis zu einem Liter Kraftstoff. Der erforderliche Umfang dieser Arbeiten lässt sich durch eine angepasste Maschinenbedienung bei der Verladung des Haufwerks reduzieren.

### Load & Carry

In fünf der beteiligten Betriebe waren in unterschiedlichen Entfernungen zum Primärbrecher Zwischenlager vorzufinden. Diese sollen bei Stillständen des Brechers oder vollständig gefülltem Kippbunker eine alternative Entlademöglichkeit für die Transportfahrzeuge bieten. Es wird als vorteilhaft angesehen, dass sich auf diese Weise Wartezeiten der SKWs reduzieren lassen. Nachteilig ist allerdings, dass das Haufwerk in der Transportkette ein zusätzliches Mal umgeschlagen werden muss. Hierzu werden Radlader eingesetzt, die das Gestein im Load & Carry-Betrieb in den Brecher laden. Dadurch entsteht im Vergleich zu einer direkten Entladung der SKWs ein signifikanter Mehrverbrauch an Energie.

Die Messungen ergaben, dass jede Schaufelfüllung, die vom Zwischenlager aufgenommen und in den Brecher geladen wurde, einen Kraftstoffverbrauch zwischen 1 und 1,5 Litern Diesel verursachte. Dies entspricht ca. dem anderthalb- bis zweifachen des Energiebedarfs, der pro Ladespiel bei der Beladung der SKWs gemessen wurde. Demgegenüber ist die Kraftstoffersparnis, die aus der Verkürzung der Wartezeiten der SKWs resultiert, gering. Bezogen auf den Leerlaufverbrauch eines 60-Tonnen-SKW würde sich die Zwischenlagerung im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch erst nach einer Wartezeit von ungefähr einer Stunde auszahlen.

Den Vorgängen an den Versuchstagen und betrieblichen Protokollen ist zu entnehmen, dass fünf bis zehn Prozent der Fördermenge über das Zwischenlager umgeschlagen werden. Bei einer Jahresförderung von ca. 575.000 Tonnen bedeutet dies pro Jahr einen Zusatzverbrauch von ca. 3.000 bis 6.000 Litern Dieseldieselkraftstoff.

Diese Ergebnisse belegen, dass dies hinsichtlich der Energiebilanz kein zweckmäßiges Verfahren darstellt. Eine Substitution der vielerorts durchgeführten Zwischenlagerung durch eine Vergrößerung der Vorbunkerkapazität stellt eine ökologisch und ökonomisch vielversprechende Alternative dar. Dies ist insbesondere bei der Neuplanung von Anlagen zu berücksichtigen.

### **3.3.3 Messung des Kraftstoffverbrauchs von Transportfahrzeugen**

Die Messungen an Transportfahrzeugen konzentrierten sich auf SKWs mit Starrrahmenbauweise, die in Festgesteinstagebauen überwiegend zum Transport des Rohaufwerks eingesetzt werden. Aufgrund der übereinstimmenden Einsatzweise sind die identifizierten prinzipiellen Wirkungszusammenhänge (z.B. die Auswirkungen von Steigung/Gefälle, Kurven, Gestaltung von Entladestellen, etc.) auf andere Fahrzeugarten wie z.B. knickgelenkte Muldenkipper übertragbar.

Es wurden Messungen an zwei SKWs vom Typ 775E des Herstellers Caterpillar durchgeführt. Zur Verfügung stand ein Versuchszeitraum von sechs Tagen. Diese verteilten sich auf zwei Messkampagnen in Tagebau 5 und Tagebau 8. Die SKWs besitzen laut Herstellerangaben eine Motorleistung von ca. 545 kW und sind mit La-

demulden ausgestattet, die ein Fassungsvermögen von etwa 41 m<sup>3</sup> (gemäß SAE 2:1) aufweisen. Die Nutzlast beträgt ausrüstungsabhängig 63 Tonnen bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 108 Tonnen. [Cat04]

Die Messdaten (vgl. Anhang III-1 bis III-2) wurden, wie bei den Ladegeräten, überwiegend während des Einsatzes im Gewinnungsbetrieb aufgezeichnet. Auf diese Weise wurden über die Ein- und Ausbauphase des Messgeräts hinausgehende Beeinträchtigungen des Produktionsablaufs minimiert. Darüber hinaus konnten Optimierungspotentiale im Betriebsablauf, wie z.B. Wartezeiten an den Lade- und Entladestellen sowie Rangiervorgänge, direkt erfasst werden. Tabelle 5 beinhaltet eine Übersicht der als prozessabhängig einzustufenden Faktoren, die den Energiebedarf des Transportvorgangs beeinflussen.

**Tabelle 5:** Prozessabhängige Einflussparameter beim Transportfahrzeugeinsatz

**Fahrwiderstände resultierend aus**

- Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche
- Fahrgeschwindigkeit
- Steigungswiderstand bzw. Gefälleschub
- Walkarbeit der Reifen

**Prozessorganisation und -koordination**

- Dauer des Be- und Entladevorgangs
- Wartezeiten an der Be- und Entladestelle
- Wartezeiten auf der Transportstrecke

**Merkmale der Streckenführung**

- Kurvenanzahl und -radien
- Fahrbahnbreite bzw. einspurige Streckenabschnitte
- Aus der Streckenführung resultierende Anzahl und Intensität von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen
- Erforderliche Rangiermanöver an Be- und Entladestelle(n)

**Zuladung**

im Hinblick auf betriebsbedingte Abweichungen von der maximalen Nutzlastkapazität sowie die Relation von Nutzlast und Eigengewicht

**Instandhaltungsmaßnahmen**

Häufigkeit und Qualität von Inspektion, Wartung und Instandsetzung (z.B. Einfluss des Verschleißzustands von Reifen oder des Reifendrucks)

**Fahr- bzw. Bedienverhalten**

des Maschinenbedieners basierend auf Fähigkeiten und Erfahrungswerten

Die Fahrzeuge absolvierten Transportfahrten zwischen Ladestelle und Vorbrecher mit unterschiedlichen Zuladungen. Dazu wurde die Arbeitsspielzahl der Ladegeräte zwischen der betriebsüblichen Anzahl und null variiert. Untersucht wurden die erreichbare Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Nutzlast und der Anteil des Kraftstoffverbrauchs, der auf das Fahrzeugeigengewicht entfällt. Daten des Kraftstoffver-

brauchs im Leerlauf wurden während der Wartezeiten an den Lade- und Entladestellen aufgezeichnet. Ergänzend wurden separate Einzelmessungen über Zeiträume von 30 bis 60 Minuten vorgenommen.

Zur Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit wurden im Zeitintervall von einer Sekunde Bilder von der Geschwindigkeitsanzeige aufgezeichnet. Da die SKWs über eine digitale Geschwindigkeitsanzeige verfügten, konnten überdies die Schaltvorgänge erfasst werden. Kamera und Datenlogger bzw. Messgerät wurden an denselben Laptop angeschlossen, um die Daten anhand der Systemzeit zu synchronisieren. Anhand der Geschwindigkeitsmesswerte wurde ausgehend von eingemessenen Start- und Zielpunkten die zurückgelegte Fahrstrecke bestimmt. Für jeden beliebigen Zeitpunkt einer Testfahrt konnte so die Position des Testfahrzeugs ermittelt werden.

Im Rahmen der Auswertung wurden die Messdaten im gesamtbetrieblichen Kontext analysiert. Dazu wurden an den Versuchstagen ergänzende Informationen protokolliert, welche die Abstimmung mit vor- und nachgeschalteten Prozessabläufen betrafen. Dazu zählten u.a. Arbeitstaktzeiten der Ladegeräte, die Gleichmäßigkeit der Beschickung des Vorbrechers und die Bereitstellung von Transportfahrzeugen an der Ladestelle. Des Weiteren wurde die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche in den unterschiedlichen Abschnitten der Transportstrecken dokumentiert.

#### Kriterien für die Planung von Steigungs- und Gefällestrecken

Die Geschwindigkeit der Transportfahrzeuge ist ein maßgeblicher Faktor für die Leistungsfähigkeit des Transportsystems. Übereinstimmungen der gemessenen Höchstgeschwindigkeiten und der Herstellerangaben zur erreichbaren Fahrgeschwindigkeit zeigten sich tendenziell im Bereich höherer wirksamer Steigungen bzw. Gefälle. Je größer die Fahrbahnneigung, desto entscheidender ist ihr limitierender Einfluss auf die erreichbare Geschwindigkeit in Relation zu anderen Faktoren, wie z.B. Kurvenverläufen oder auch individuellem Fahrverhalten.

Während der Messungen waren grundsätzlich nur vereinzelt Momentangeschwindigkeiten über 40 km/h festzustellen. Aus den Ergebnissen ist abzuleiten, dass SKWs in Natursteintagebauen in der Regel keine Geschwindigkeiten über 45 km/h erreichen. Die in den einzelnen Streckenabschnitten gemessenen Durchschnittsgeschwindigkeiten lagen überwiegend sogar unter 30 km/h. Tagebauzuschnitt und Streckenführung nehmen diesbezüglich wesentlichen Einfluss. Charakteristisch für Natursteinbetriebe ist, dass sich die Transportstrecken durch geringe Kurvenradien und häufige Neigungswechsel auszeichnen.

Im Hinblick auf eine Maximierung der Transportleistung bei einer gleichzeitigen Minimierung des Energieeinsatzes empfiehlt es sich, Steigungsstrecken mit Neigungen zwischen 8 und 10 % auszuführen. Unterhalb von 8 % Steigung kommt es aufgrund der zunehmenden Rampenlänge zu einem überproportionalen Anstieg der Fahrzeit. Bei höheren Steigungen wiederum erhöht sich der Energieaufwand, der am Ende der Rampe zum Wiedererreichen der Ausgangsgeschwindigkeit erforderlich ist. Des Weiteren ist zu beachten, über die maximal mögliche Länge von Steigungs- bzw. Gefälleabschnitten eine konstante Fahrbahnneigung einzuhalten, um Motorlastwechsel zu

reduzieren. Aufgrund der vielfach geringen Ausdehnung der Tagebaue und der damit verbundenen Streckengestaltung (vgl. Anhang II) befinden sich die Fahrzeuge fast permanent in Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen. Diese Effekte gilt es mit Blick auf den Kraftstoffverbrauch durch planerische Maßnahmen zu minimieren.

#### Mehrverbrauch infolge geringer Streckenbreite und Kurvenradien

Vor schlecht einsehbaren Kurvenverläufen und in Streckenabschnitten mit reduzierter Fahrbahnbreite, in denen eine ungehinderte Vorbeifahrt zweier Transportfahrzeuge nicht möglich ist, können Zwischenstopps erforderlich sein. Dadurch entsteht ein erheblicher Mehrverbrauch an Kraftstoff infolge der Schaltvorgänge und des höheren Energieaufwands für das Wiederbeschleunigen. Verglichen mit dem Energiebedarf beim ungehinderten Durchfahren eines Streckenabschnitts stieg bereits bei einem unbeladenen SKW vom Typ 775E die verbrauchte Kraftstoffmenge auf das Dreifache, wenn dieser aufgrund von Gegenverkehr anhalten musste.

Einen weiteren Aspekt stellt die Bemessung von Kurvenradien dar. Letztere sind so zu gestalten, dass ein Fahrzeug eine Kurve in einem Zug durchfahren kann. Zudem ist zu beachten, dass die erforderliche Geschwindigkeitsreduzierung so gering wie möglich ausfällt. Dies ist beispielsweise bei der Anordnung von Rampen im Tagebau relevant. In Tagebau 5 war das Einbiegen auf eine Rampe nur möglich, indem die SKWs anhielten und ca. 5 m zurücksetzten. Dies hatte verglichen mit einer ungehinderten Kurvendurchfahrt den vier- bis fünffachen Kraftstoffverbrauch zur Folge.

In Tagebau 8 erfolgte die Förderung über ein Rampensystem, das zwei Kehren mit Richtungsänderungen von ca. 170° enthielt. Die Verlangsamung der Geschwindigkeit bei bergauf und bergab gerichteter Fahrt verursachte einen Kraftstoffmehrverbrauch von 0,1 bis 0,25 Liter Dieselkraftstoff je Fahrt. Bei einer Jahresförderung von 750.000 Tonnen und einer durchschnittlichen Nutzlast von 60 Tonnen je Transportfahrt summiert sich der Verbrauch auf etwa 1.250 bis 3.100 Liter Diesel. Diese Menge ließe sich durch Veränderungen der Kurvenführung wesentlich reduzieren.

Sofern auf geneigten Strecken ein Anhalten oder Ausweichen bedingt durch Gegenverkehr erforderlich ist, sollte dem bergauffahrenden SKW grundsätzlich Vorfahrt gewährt werden. Stattdessen gilt in vielen Betrieben die Anweisung, dass der Produktion Vorrang einzuräumen ist. Dies hatte beispielsweise in Tagebau 5 zur Folge, dass ein unbeladen bergauffahrender SKW anhielt, um das beladen bergabfahrende Fahrzeug passieren zu lassen. Das Wiederbeschleunigen bei einer Steigung von 13,5 % bedeutete einen erheblichen Kraftstoffmehrverbrauch ohne nennenswerten Vorteil für die Produktionsleistung.

#### Auswirkungen von Steigungs- / Gefälleübergängen im Streckenverlauf

In Tagebau 5 führte ein Steigungsübergang von 4,5 auf 12 % innerhalb von etwa zehn Sekunden zu einer Halbierung der Fahrgeschwindigkeit. Diese reduzierte sich in von ca. 27 auf 14 km/h. In den folgenden Streckenabschnitten konnte die Geschwindigkeit zwar wieder sukzessive gesteigert werden. Allerdings musste der beladene SKW unter Vollast bei Steigungen von bis zu 9 % beschleunigen.

Verglichen mit einer gleichbleibenden Steigung von 4,5 % entstand durch die Änderungen der Fahrbahnneigung von 4,5 auf 12 % und schließlich auf 9 % ein Kraftstoffmeherverbrauch von etwa 0,1 Liter pro Fahrt auf einem nur 70 m langen Teilstück der Transportstrecke. Dies erscheint zunächst gering, bedeutet gemessen an der Gesamtförderleistung des Tagebaus von 520.000 Tonnen und einer transportierten Nutzlast von durchschnittlich 55 Tonnen pro Fahrt jedoch einen Mehrverbrauch von ca. 950 Litern Kraftstoff pro Jahr allein in diesem Streckenabschnitt.

Insbesondere bei den Hauptstrecken zum Vorbrecher, die vielfach über einen Zeitraum von mehreren Jahren genutzt werden, sollte auf die Steigung- bzw. das Gefälle der Strecke besonderes Augenmerk gelegt werden.

#### Wartezeiten an der Lade- und Entladestelle

Sofern es an Lade- und Entladestelle zu regelmäßigen Wartezeiten kommt, kann der Energiebedarf der SKWs durch eine Geschwindigkeitsverringerung reduziert werden, ohne dass Leistungseinbußen im Transportprozess entstehen. Die Last- und Leerfahrten werden im Regelfall mit möglichst hoher Geschwindigkeit absolviert, um die Fahrzeit zu minimieren. Dies wirkt sich jedoch nur dann tatsächlich positiv auf die Transportleistung aus, wenn die Zeitersparnis nicht durch Wartezeiten egalisiert wird. In diesen Fällen führt eine hohe Fahrgeschwindigkeit lediglich zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch.

Sofern vor allem Wartezeiten am Primärbrecher auftreten, stellt die Schaffung von Pufferkapazitäten eine Option zur Optimierung des Transportvorgangs dar. Die Messungen ergaben, dass beim Betrieb des Motors eines SKW vom Typ 775E im Leerlauf pro Minute ca. 0,1 bis 0,15 Liter Kraftstoff verbraucht werden. Wird eine mittlere Wartezeit von anderthalb Minuten wie am Vorbrecher in Tagebau 5 zu Grunde gelegt, so bedeutet dies bei rund 9.500 Transportzyklen pro Jahr einen Verbrauch von 1.400 bis 2.100 Litern Kraftstoff. Durch eine Verkürzung der Wartezeiten am Brecher ließen sich zugleich Energieeinsparungen beim Betrieb des Ladegeräts erzielen. Dieser Synergieeffekt sich infolge einer verbesserten zeitlichen Auslastung durch die höhere Verfügbarkeit von Transporteinheiten.

#### Gestaltung von Entladestellen

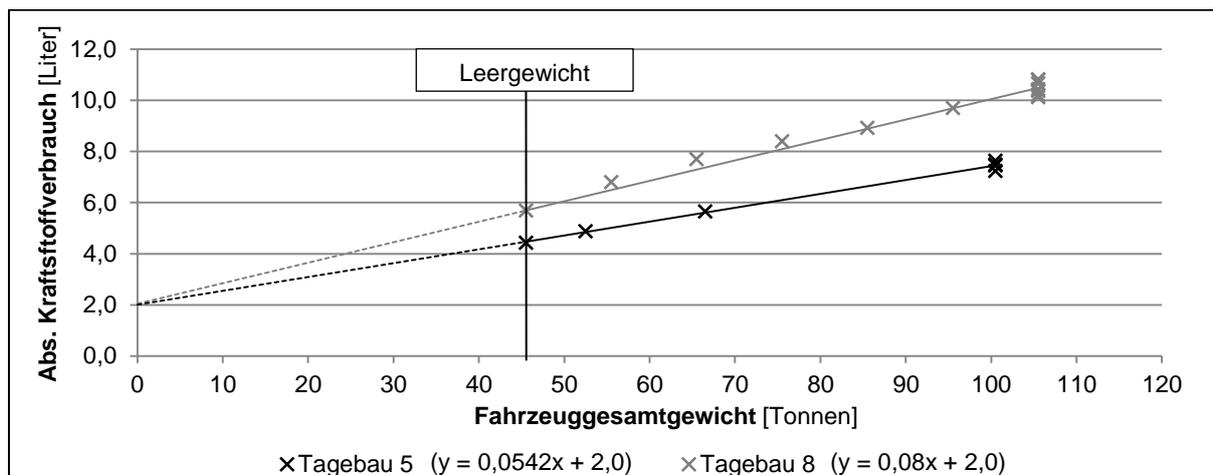
Beim Rangieren an der Entladestelle, die als ebene Fläche ausgeführt war, entstand in Tagebau 5 ein durchschnittlicher Verbrauch von 0,1 Liter Kraftstoff. Demgegenüber wurde in Tagebau 8 eine durchschnittliche Verbrauchsmenge von 0,35 Litern Diesel gemessen. Diese Unterschiede sind maßgeblich auf das Vorhandensein einer 15 m langen Auffahrt mit 8 % Steigung vor der Kippstelle zurückzuführen. Der Vorbunker überragte das umgebende Geländeniveau um bis zu zwei Meter, was auch in drei weiteren beteiligten Tagebauen festzustellen war.

Die Messergebnisse zeigen, dass durch die Auffahrt in Tagebau 8 bei ca. 12.500 Transportfahrten pro Jahr ein Kraftstoffmeherverbrauch der SKWs von ca. 2.500 Litern zu verzeichnen ist. Bereits bei der Planung einer Vorbrecheranlage ist daher das Volumen des Kippbunkers mit ausreichender Sicherheit zu dimensionieren. Es ist zu

vermeiden, dass der Bunkereinlauf für eine nachträgliche Kapazitätssteigerung über das Geländeniveau anzuheben ist, so dass die SKWs zum Erreichen der Entlade-position eine Rampe hinauffahren müssen. Dies lässt sich auf Kippstellen von Rad-ladern übertragen, an denen häufig solche Rampenschüttungen vorzufinden sind.

### Beladung der Transportfahrzeuge

In beiden Tagebauen wurden Transportfahrten mit unterschiedlichen Zuladungs-mengen sowie eine Leerfahrt von der Ladestelle zum Vorbrecher durchgeführt. In Abbildung 10 ist der absolute Energieverbrauch je Transportvorgang in Abhängigkeit des jeweiligen Fahrzeugesamtgewichts dargestellt.



**Abbildung 10:** Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit des Fahrzeugesamtgewichts

In Tagebau 5 unterschreitet die mittlere Zuladung der SKWs mit ca. 55 Tonnen den Nennwert der Fahrzeugnutzlast um 8 Tonnen. Die permanente Unterladung der SKWs ist auf die geringe Schüttdichte des Gesteins zurückzuführen. In solchen Fällen besteht die Option, das nutzbare Muldenvolumen durch den Anbau einer Bordwanderhöhung oder Heckklappe zu vergrößern. Letztere wirkt sich insbesondere auf Steigungsstrecken vorteilhaft aus, da die Gefahr verringert wird, dass Material rückwärtig von der Ladefläche fällt.

Bereits eine Erhöhung der durchschnittlichen Zuladung von 55 auf 60 Tonnen würde bedeuten, dass sich die Zahl der jährlich erforderlichen Transportfahrten in Tagebau 5 um etwa 8 % verringert. Bislang beträgt der Dieserverbrauch der SKWs in Summe etwa 160.000 Liter pro Jahr.

Bei der Bezifferung des Einsparpotentials ist zu berücksichtigen, dass bei einer höheren Zuladungsmenge auch der Energiebedarf je Transportfahrt ansteigt. Es wurde die Verbrauchsentwicklung zu Grunde gelegt, die anhand der Messungen ermittelt wurde (vgl. Abbildung 10). Bei einer verbesserten Ausladung der SKWs ergibt sich demnach ein Energieeinsparpotential von 5 %. Dieser relative Anteil am Gesamtverbrauch der Transportfahrzeuge entspricht einer Einsparung von etwa 8.000 Litern Dieselkraftstoff pro Jahr.

### 3.3.4 Auswertung von Energie- und Leistungsdaten der Primärzerkleinerung

Für den Einsatz in der primären Zerkleinerungsstufe eignen sich vorrangig Backenbrecher, Kreiselbrecher und Prallbrecher. Die Auswahl des Brechers für einen konkreten Einsatzfall orientiert sich an verschiedenen Eigenschaften des Aufgabeguts. Dazu zählen insbesondere die Aufgabegröße und die Abrasivität des zu zerkleinerten Materials. Darüber hinaus haben die Kornform und die Konsistenz des Aufgabeguts Auswirkungen auf die Effizienz des Brechvorgangs. Weiteren Einfluss nehmen betriebliche Parameter in Form der erforderlichen Durchsatzleistung sowie der Anforderungen, die an das Brechprodukt gestellt werden. [Met07]

Am häufigsten werden in Natursteintagebauen stationäre Backenbrecher eingesetzt. Es wurden Energie- und Leistungsdaten einer Anlage ausgewertet, die in Tagebau 10 zum Einsatz kommt. Der Brecher besitzt eine Nennleistung von 200 kW sowie einen Nenndurchsatz von 625 Tonnen pro Stunde. Vom Steuerungsprogramm der Aufbereitungsanlage werden Betriebsdaten im Zeitintervall von fünf Sekunden aufgezeichnet. Als Grundlage für die Untersuchungen standen Daten zu folgenden Messgrößen zur Verfügung:

- Motorstromaufnahme des Primärbrechers [A]
- Geschwindigkeit des Schubwagens [% vom Sollwert]
- Bandwaage Vorabsiebung [t/h]
- Bandwaage Primärbrecher [t/h]

Die Datensätze bilden einen Zeitraum von 21 Produktionstagen ab. Diese verteilen sich auf zwei Zeiträume von je zwei Wochen. Die tägliche Betriebszeit des Brechers variierte zwischen viereinhalb und zehneinhalb Stunden. Die Anlage wurde mit 2.125 bis 4.450 Tonnen Gestein pro Tag beschickt.

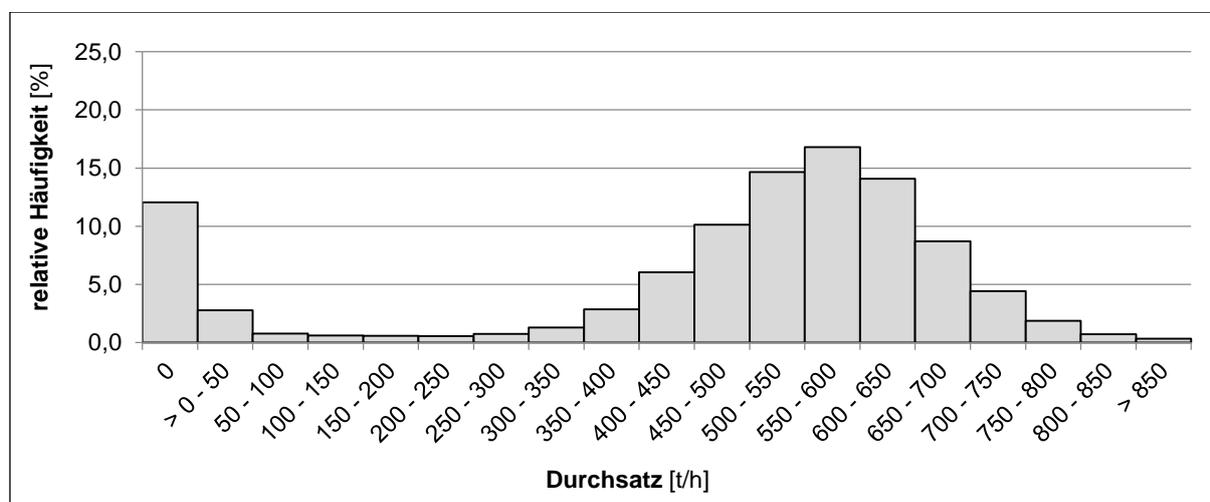
Die Auswertung von Daten der Bandwaagen an der Vorabsiebung und am Brecherlauf ergab, dass grundsätzlich ca. 95 % des aufgegebenen Materials den Brecher durchliefen (vgl. Anhang IV-1 und IV-2). Dies unterstreicht die strukturelle Bedeutung der primären Zerkleinerungsstufe innerhalb des Produktionsprozesses. Es handelt sich um das verbindende Element zwischen Gewinnungs- und Aufbereitungstechnik, welches nahezu den gesamten Fördermassenstrom in einem Tagebau bewältigen muss. Der Primärbrecher ist daher auf die maximale Förderleistung des Betriebs ausulegen, wobei die Nutzungsdauer nicht selten mehrere Jahrzehnte beträgt.

Beim Einsatz von Transportfahrzeugen entsteht kein kontinuierlicher Fördermassenstrom zwischen Gewinnungsstelle und Aufbereitungsanlage, sondern es werden diskrete Mengeneinheiten Gesteinsmaterial transportiert. Änderungen der Transportumlaufdauer oder unterschiedliche Zuladungsmengen der SKWs bedingen somit unregelmäßige zeitliche bzw. quantitative Schwankungen des Materialflusses. Dies impliziert, dass der Primärbrecher in der Regel nur phasenweise in einem Zustand betrieben wird, der im Hinblick auf seine Dimensionierung als optimal anzusehen ist.

Der spezifische Energiebedarf der Primärzerkleinerung lag im ersten Untersuchungszeitraum zwischen 0,25 und 0,35 kWh pro Tonne. Im zweiten Untersuchungszeitraum betragen die Verbrauchswerte 0,32 bis 0,37 kWh pro Tonne. Ursächlich war neben den Eigenschaften des Aufgabeguts vor allem die Gleichmäßigkeit der Materialaufgabe bzw. der Materialfüllstand in der Brechkammer. Bei unregelmäßiger Beschickung ergeben sich im ungünstigsten Fall Leerlaufzeiten des Brechers, der wie sämtliche elektrischen Aufbereitungsanlagen durchgängig betrieben wird.

An den einzelnen Produktionstagen der beiden Untersuchungszeiträume waren signifikante Schwankungen der stündlichen Durchsatzmengen festzustellen, die zwischen 220 und 700 Tonnen betragen (vgl. Anhang IV-1 und IV-2). Bezogen auf den Nenndurchsatz variierte die Auslastung damit zwischen 35 und 110 %.

In Abbildung 11 ist dargestellt, welche Durchsatzleistungen in den Untersuchungszeiträumen mit welcher Häufigkeit gemessen wurden. Es handelt sich um Kurzzeitwerte, so dass auch Leistungsspitzen weit oberhalb des Nenndurchsatzes auftreten. Es wurden Leistungsklassen mit einer Bandbreite von 50 Tonnen pro Stunde definiert, denen die Einzelwerte zugeordnet wurden. Dargestellt ist die relative Häufigkeit bezogen auf die Gesamtbetriebszeit des Brechers. An den einzelnen Tagen betrug der Anteil der Leerlaufzeit bis zu 35 %. Durchschnittlich waren 12 % Leerlaufzeit zu verzeichnen. Dies bedeutete eine unproduktive Betriebszeit des Brechers von etwa 50 Minuten pro Tag.



**Abbildung 11:** Durchsatzleistung des Primärbrechers

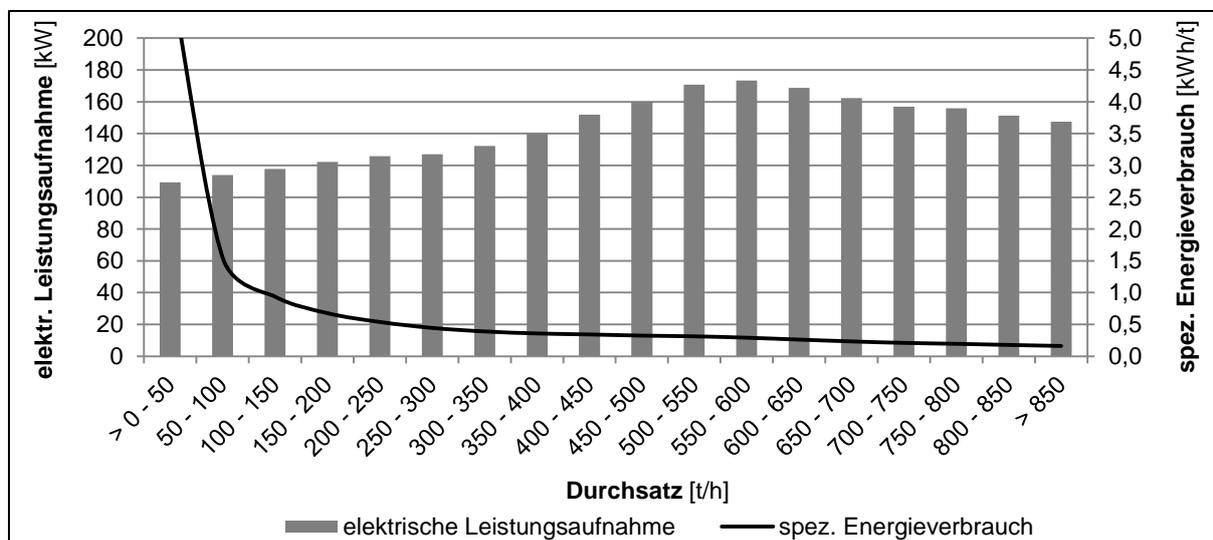
Im Leerlauf lag die Stromaufnahme des Asynchronmotors bei 175 bis 180 A. Daraus ergibt sich bei einer Spannungsversorgung von 400 V und einem Wirkleistungsfaktor von 0,84 eine elektrische Leistungsaufnahme von etwa 103 kW gemäß [Bol12]

$$P_{el} = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \quad (\text{Gl. 2})$$

Auf eine durchschnittliche Leerlaufzeit von etwa 50 Minuten pro Tag entfällt demnach ein Energieverbrauch von ca. 86 kWh. Bei 220 Produktionstagen bedeutet dies eine jährliche Verbrauchsmenge von etwa 18.900 kWh elektrischer Energie.

Die folgende Abbildung veranschaulicht, welcher Energieverbrauch sich abhängig vom Materialdurchsatz einstellte. Bei einer Durchsatzmenge von 550 bis 600 Tonnen wurde die maximale elektrische Leistungsaufnahme von etwa 175 kW erreicht.

Bei darüber hinausgehenden Durchsatzmengen verringerte sich die Leistungsaufnahme wieder geringfügig. Steigende Aufgabemengen führen in der Regel dazu, dass zunehmend Anteile feinstückigen Gesteins in den Primärbrecher gelangen, da die Vorabsiebung das Material nicht mehr hinreichend trennen kann. Das feinstückige Haufwerk durchläuft den Brecher praktisch ohne eine Zerkleinerung zu erfahren. Es wirkt sich dadurch nur geringfügig auf die Leistungsaufnahme aus. Infolge der hohen Tonnage ergibt sich rechnerisch sogar eine Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs. Durch den unerwünschten hohen Anteil an Feinmaterial gestaltet sich der Zerkleinerungsprozess jedoch tatsächlich ineffektiver.



**Abbildung 12:** Energieverbrauch des Primärbrechers in Abhängigkeit der Durchsatzmenge

Bei einer minimalen und maximalen stündlichen Durchsatzleistung von 220 bzw. 700 Tonnen wurden spezifische Energieverbräuche von 0,63 bzw. 0,22 kWh/t gemessen (vgl. Abbildung 12). Diese Differenz entspricht bezogen auf die Jahresförderung von 760.000 Tonnen in Tagebau 10 einem Verbrauchsunterschied von über 310.000 kWh elektrischer Energie. Zwar ist zusätzlich der Einfluss unterschiedlicher Gesteinseigenschaften auf den Energiebedarf zu berücksichtigen. Dennoch lässt sich anhand des Beispiels die Bedeutung eines optimierten Fördermassenstroms ermessen.

Umso bemerkenswerter erscheint es, dass dem Primärbrecher in den meisten beteiligten Betrieben zur Entkopplung von den nachfolgenden Aufbereitungsanlagen ein größerer Zwischenbunker nachgeschaltet war. Das vorgeschaltete Bunkervolumen war im Vergleich dazu grundsätzlich gering dimensioniert. Energieeinsparpotentiale, die mit der Dimensionierung des Bunkervolumens in Verbindung stehen, betreffen auch den vorgeschalteten Transportvorgang. Diese Sachverhalte waren Gegenstand von Modellrechnungen. In diese weiterführenden Untersuchungen wurden die im Rahmen der Datenerhebung und den Messungen gewonnenen Erkenntnisse überführt, worauf im Folgenden eingegangen wird.

### 3.4 Konzept und Anwendungsoptionen des entwickelten Simulationsmodells

Das Simulationsmodell wurde auf Basis der Tabellenkalkulationssoftware Microsoft Excel erstellt, so dass keine Spezialsoftware für die Nutzung erforderlich ist. Darüber hinaus sollte durch die Verwendung einer Tabellenkalkulation eine hohe Transparenz und gute Nachvollziehbarkeit der Berechnungen erreicht werden. Im Gegensatz dazu lassen sich die hinterlegten Formeln bzw. Algorithmen und Programmbefehle bei anderweitigen Softwarelösungen nicht oder nur schwer nachverfolgen.

Im Simulationsmodell wurde die Anzahl automatischer Verknüpfungen von aufeinanderfolgenden Rechenoperationen gering gehalten. Die Ausgabe von Zwischenergebnissen einzelner Berechnungsschritte unterstützt die Bestimmung prozessinterner sowie -übergreifender Beeinflussungen des Energiebedarfs. Die Zwischenergebnisse bedürfen zur Fortführung der Berechnungen jeweils einer Bestätigung. Dies hat zwar einen erhöhten Aufwand bei der Dateneingabe zur Folge. Im Gegenzug bedeutet es jedoch, verglichen mit einem dynamischen Simulationsprogramm, eine verbesserte Überprüfbarkeit der Wirkungszusammenhänge.

Auf numerische Dateneingaben über Auswahlfelder oder -listen wurde verzichtet, da dies Einschränkungen der möglichen Eingangsparameter beinhaltet. Es stand im Vordergrund, dass sich auch betriebspezifische Besonderheiten und Konstellationen unabhängig von Voreinstellungen im Modell darstellen lassen. Die Excel-Basis bietet dem Nutzer in diesem Zusammenhang auch die Möglichkeit, das Modell betriebspezifisch zu editieren.

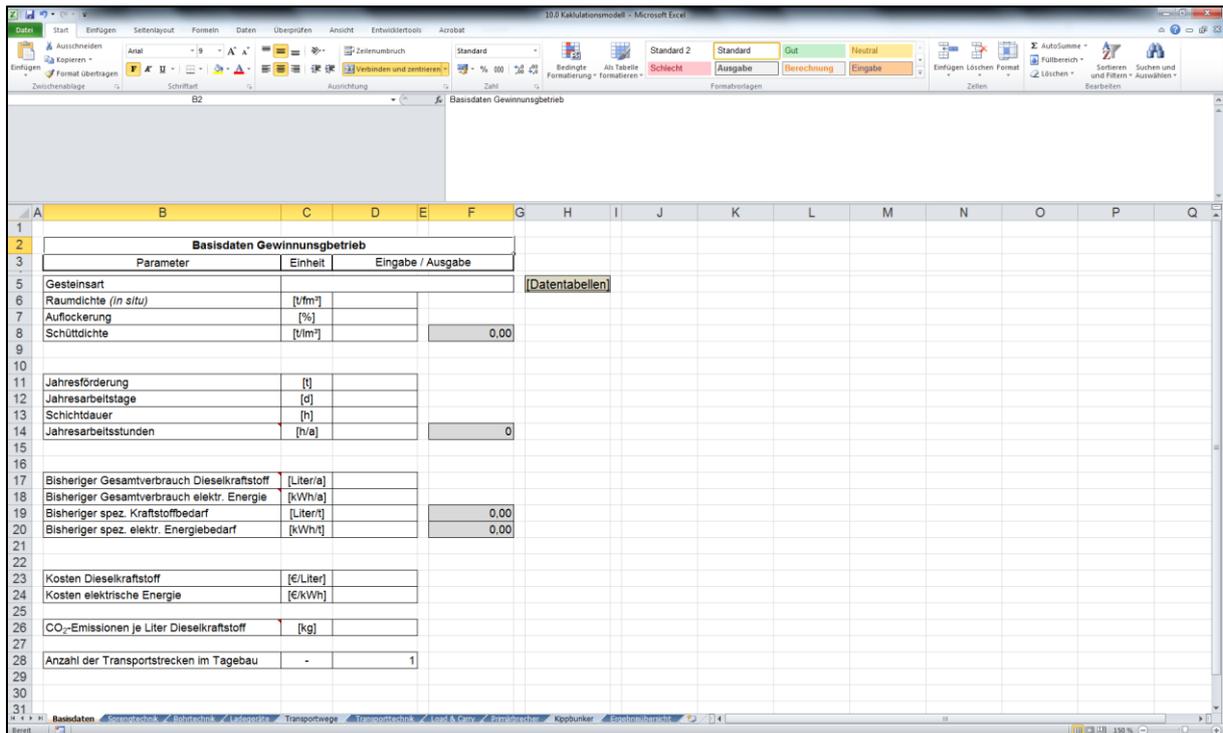
Um die in einem Gewinnungsbetrieb verfügbaren Daten bei Bedarf ergänzen zu können, wurden Tabellen mit Angaben zu bergbau- und maschinentechnischen Parametern sowie Gesteinseigenschaften angefertigt und in einer Datenbank hinterlegt. Die Informationen wurden im Rahmen von Literaturrecherchen aus Fach- und Handbüchern von Maschinenherstellern sowie basierend auf den im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnissen zusammengestellt.

Zur Abbildung von Betriebsstrukturen unterschiedlicher Komplexität wurde das Modell modular konzipiert. Der Aufbau orientiert sich an der Abfolge der Teilprozesse der tagebaulichen Rohstoffgewinnung und beinhaltet die folgenden Module:

- Basisdaten  
Als Basisdaten wurden Parameter zusammengefasst, die als direkte Eingaben für Rechenoperationen in mehreren Teilprozessen bzw. Modulen des Modells Verwendung finden (Angaben zum Fördermineral, zu Produktionszeiträumen und -mengen, aktuelle Energieverbrauchsmengen)
- Sprengtechnik  
Die Integration sprengtechnischer Parameter in das Modell ist auf die Sprenganlagegeometrie ausgerichtet. Diese nimmt wesentlichen Einfluss auf den Zeit- und Energiebedarf des Bohrvorgangs und wird daher in der Reihenfolge der Betrachtung der Bohrtechnik vorangestellt. Für eine Evaluierung des Sprengstoff- und Zündmitteleinsatzes zur Optimierung des Sprengergebnisses wird auf Spezialsoftware wie z.B. QuarryX oder BlastMetriX3D verwiesen.

- Bohrtechnik  
Der Energiebedarf des Bohrprozesses wird bezogen auf eine im vorhergehenden Modul definierte Sprenganlagengeometrie bestimmt. Den Ausgangspunkt bildet der Bohrfortschritt unter Berücksichtigung von Nebenzeiten, die sich aus maschinentechnischen Spezifikationen sowie betriebsorganisatorischen und planerischen Faktoren ergeben.
- Ladegeräte  
Analyse des Einsatzes von Radladern und Hydraulikbaggern (inkl. reißender Gewinnung, wobei eine erfolgte Evaluierung der Reißbarkeit eines Gesteins und Kenntnisse der erreichbaren Reißleistung vorausgesetzt werden). Dies beinhaltet die Bestimmung der Energie- und Leistungsdaten eines Baggers oder Radladers auf Betriebsmittelebene sowie im Rahmen des Einsatzes in einem Gewinnungssystem (Lade- und Transportmittelkombination).
- Transportwege  
Die Daten der Transportwege bilden die Basis zur Berechnung der Dauer der Last- und Leerfahrten. Dazu werden abhängig von Länge und Steigung bzw. Gefälle von Strecken(-abschnitten), Kurven sowie je nach Oberflächenbeschaffenheit der Fahrbahn die Fahrwiderstände bestimmt. Diese dienen als Grundlage zur Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit, die ein Fahrzeug bei den vorliegenden Streckenverhältnissen erreichen kann.
- Transporttechnik  
Das Modul bildet die technischen Parameter der eingesetzten automobilen Transportfahrzeuge ab. Es umfasst Eingabeoptionen, um Energie- und Leistungsdaten von bis zu neun Transportfahrzeugen zu vergleichen oder den simultanen Einsatz mehrerer Fahrzeuge zu untersuchen. Dazu zählt auch der Fahrzeugeinsatz bei der Abraumbeseitigung oder für Hilfsprozesse.
- Load & Carry  
Simulation des Einsatzes eines Radladers im Load & Carry-Verfahren, z.B. zur Beschickung eines mobilen oder semi-mobilen Brechers. Einen weiteren Anwendungsfall stellen die Wiederaufnahme von Rohaufwerk von einem Zwischenlagerplatz und der Weitertransport bis zum Primärbrecher dar. Dieser (Hilfs-)prozess wird erfahrungsgemäß vielfach in Betrieben angewandt.
- Primärbrecher  
Der Betrieb des Primärbrechers ist in Abhängigkeit der umgebenden Gesamtanlagenstruktur und in Kombination mit weiteren Anlagenelementen zu betrachten. Die Last- und Leerlaufphasen des Primärbrechers werden abhängig von der Beschickung durch den vorgeschalteten Transportprozess ermittelt. Das Volumen eines Vorbunkers bzw. dessen Speicherkapazität in Tonnen können beliebig definiert werden. Gleiches gilt für den Bunkerfüllstand zu Beginn eines Untersuchungszeitraums.

Nachfolgend ist exemplarisch das Tabellenblatt zur Dateneingabe im Modul Basisdaten abgebildet.



**Abbildung 13:** Modul Basisdaten des Simulationsmodells

Durch die schrittweise Variation von Eingabeparametern lassen sich der Einfluss unterschiedlicher Faktoren sowie die Auswirkungen konkreter Maßnahmen auf den Energiebedarf von Prozessen, Maschinen und Anlagen vergleichen. Für einen Tagebau können auf diese Weise verschiedene Szenarien des Gewinnungsablaufs im Hinblick auf den erforderlichen Energieeinsatz untersucht und schrittweise optimiert werden. Folgende Untersuchungsaspekte waren in diesem Zusammenhang von übergeordnetem Interesse und mitbestimmend für die Gestaltung des Modells:

- Der Energiebedarf von Maschinen bzw. Anlagen in einem Tagebau unter spezifischen Einsatzbedingungen.
- Die Betriebszustände der Maschinen bzw. Anlagen hinsichtlich des Grades ihrer Auslastung.
- Der Anteil einzelner Maschinen bzw. Anlagen am Gesamtenergieverbrauch eines Tagebaus.
- Der Einfluss von Änderungen der Betriebszustände einzelner Maschinen bzw. Anlagen auf den gesamtbetrieblichen Prozessablauf und Energieverbrauch.
- Die Optimierungspotentiale des Energieeinsatzes auf Maschinen- und Anlagenebene, in den Teilprozessen des Gewinnungsvorgangs und auf gesamtbetrieblicher Ebene.

### 3.5 Quantifizierung von Energieeinsparpotentialen durch Modellrechnungen

#### 3.5.1 Bohrprozess

Daten zum Energieverbrauch und zur Leistung der Bohrgeräte lagen in den beteiligten Betrieben nur teilweise vor. Diesbezüglich wirkte sich u.a. die in der Natursteinbranche verbreitete Fremdvergabe von Bohrarbeiten an Kontraktoren aus. Im Hinblick auf die Durchführung von Modellrechnungen gestalteten sich insbesondere unzureichende Angaben zum erreichbaren Bohrfortschritt problematisch. Dennoch konnten am Beispiel von vier Betrieben Untersuchungen vorgenommen werden.

Dazu wurde im Modell je eine Sprenganlage basierend auf den betrieblichen Angaben abgebildet. Das Ausbruchsvolumen orientierte sich an der mittleren Löseleistung je Sprengung im jeweiligen Tagebau. Die erforderlichen Bohrmeter pro Tonne Gestein entsprachen bezogen auf die Jahresförderung der von der Betriebsleitung bezifferten Gesamtbohrmeterzahl. Für das Umsetzen des Bohrgeräts zwischen zwei Sprenganlagen wurde eine mittlere Entfernung entsprechend den Gegebenheiten im jeweiligen Tagebau veranschlagt.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die kalkulierten Gesamtverbrauchsmengen liegen im Bereich der betrieblichen Angaben. Die geringen Unterschiede legen nahe, dass beim Bohren im Vergleich zu anderen Prozessen tendenziell geringe Energieeinsparpotentiale bestehen. Dies ist auch auf die zeitliche Auslastung der Bohrgeräte zurückzuführen, die gemessen an anderen Maschinen und Anlagen in einem Tagebau niedrig ist. Anhand der in den Betrieben vorliegenden Daten ließ sich nicht feststellen, inwieweit im Fall der Untersuchungsbetriebe Nebenzeiten Einfluss auf den Bohrfortschritt nahmen und ob damit ggf. Möglichkeiten zur Verringerung des Gesamtenergieverbrauchs verbunden sind.

**Tabelle 6:** Energieverbrauch der Bohrgeräte in beteiligten Betrieben

Betrieb	Betriebsangaben			Kalkulation [Liter/Jahr]	Zeitgrad [%]
	[Bohrmeter/Jahr]	[Liter/Jahr]	[Bohrmeter/Stunde]		
Tagebau 4	12.265	11.570	30	11.100	26,0
Tagebau 6	17.500	22.500	28	21.900	39,0
Tagebau 7	25.000	40.000	18	40.100	46,0
Tagebau 8	22.000	34.360	25	34.500	48,0

Zwischen dem Energiebedarf beim Bohren und in sonstigen Betriebsphasen (Anfahrt zum Einsatzort, Rüsten und Einrichten, Verlängern bzw. Ziehen von Bohrgestänge, etc.) ist zu differenzieren. Beim Umsetzen und Einrichten der Geräte ist gemäß Herstellerangaben von einer Motorlast von 40 bis 45 % auszugehen. Beim Bohren kann die Motorlast durch den Antrieb des Bohrhammers und vor allem abhängig von der Druckerzeugung des Kompressors auf über 95 % steigen. Die Motorlastbereiche lassen auf die Verbrauchswerte in den unterschiedlichen Betriebszuständen schließen.

Gegenüber den Energieeinsparungen, die sich ggf. beim Betrieb eines Bohrgeräts erzielen lassen, sind die Auswirkungen eines ungünstigen Bohr- und Sprengergebnisses auf den Energiebedarf nachgeschalteter Prozesse um ein Vielfaches größer. Dies betrifft beispielsweise die Ladefähigkeit des Haufwerks und speziell den Anteil von Knäppern. Ein weiteres Beispiel stellt der Sohlenzustand nach der Sprengung dar, der den Transportvorgang beeinträchtigen und zusätzliche Sohlenpflegemaßnahmen erfordern kann.

### **3.5.2 Ladevorgang**

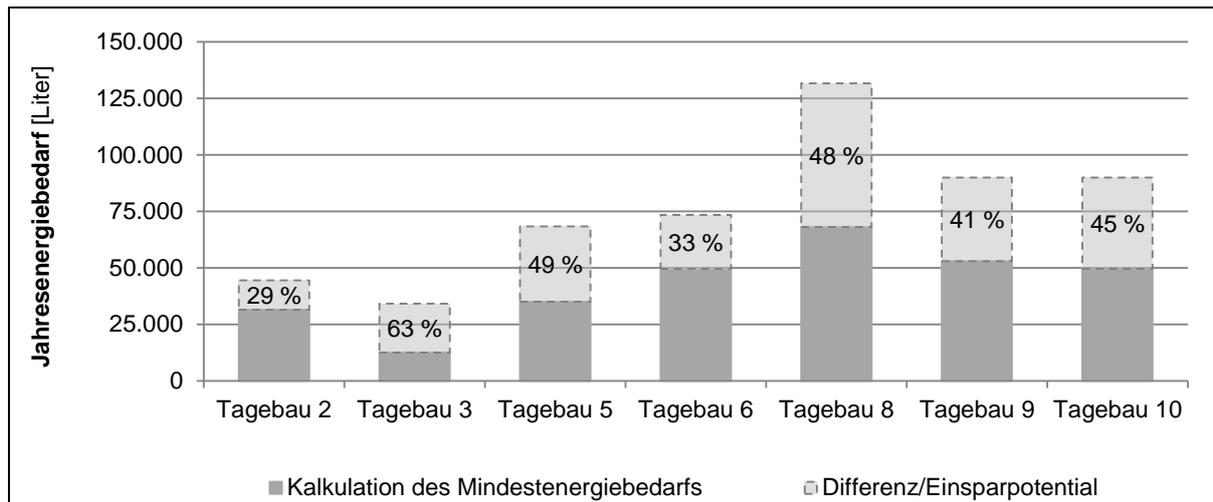
Anhand von Modellrechnungen wurde der Energieeinsatz kalkuliert, der zur Erbringung der vorgegebenen Ladeleistungen in Untersuchungsbetrieben mindestens erforderlich ist. Dies beinhaltet den Energiebedarf für die Verladung des Haufwerks sowie für das Umsetzen der Ladegeräte zu den Ladestellen.

Die Berechnungen basieren auf gemessenen und im Rahmen der durchgeführten Datenerhebung dokumentierten Ladespielzeiten. Der Kraftstoffverbrauch der Ladegeräte wurde Herstellerangaben und eigenen Messdaten entnommen. Es wurden grundsätzlich die höchsten spezifischen Verbrauchswerte angesetzt, um das Ergebnis nicht durch eine zu günstige Bewertung der Einsatzbedingungen bzw. einen zu niedrig angesetzten Maschinenlastfaktor zu beeinträchtigen.

Die Messungen lieferten des Weiteren Erkenntnisse bzgl. des zeitlichen Umfangs, in dem die Maschinen neben der Ladetätigkeit für sonstige Aufgaben bzw. Hilfsarbeiten eingesetzt werden. Ferner wurde festgestellt, dass Maßnahmen wie Sohlenpflege oder die Behandlung von Knäppern im Vergleich zur eigentlichen Ladearbeit die gleiche oder eine sogar noch höhere Energieintensität aufweisen (vgl. Kapitel 3.3.2). Diese Ergebnisse wurden ebenfalls in die Modellrechnungen einbezogen.

Beim Einsatz der Hauptladegeräte wurden betriebsübergreifend die größten Energieeinsparpotentiale an Einzelverbrauchern innerhalb des Gewinnungsvorgangs identifiziert. Im Fall der Untersuchungsbetriebe wurde ermittelt, dass der für die zu erbringende Ladeleistung erforderliche Mindestenergieeinsatz durchschnittlich um 44 % überschritten wird (vgl. Abbildung 14).

Der erschließbare Anteil dieses theoretischen Potentials kann sich in Abhängigkeit nicht beeinflussbarer Faktoren in einem Betrieb reduzieren. Grundsätzlich ist jedoch hervorzuheben, dass je nach spezifischem Energiebedarf und Förderleistung der Ladegeräte ein Energieeinsatz von mehreren zehntausend Litern Kraftstoff pro Jahr vorliegt, dessen Verhältnismäßigkeit zu überprüfen ist. Bereits eine teilweise Erschließung der theoretischen Potentiale würde erhebliche Energie- und Kosteneinsparungen bedeuten.



**Abbildung 14:** Energiebedarf der Ladearbeit und theoretische Energieeinsparpotentiale

Es ist zu berücksichtigen, dass auf die Ausführung von Hilfsarbeiten an einer Ladestelle nicht vollständig verzichtet werden kann. Ebenso lassen sich Wartezeiten nicht gänzlich vermeiden. Dadurch sind die tatsächlich erzielbaren Energieeinsparungen niedriger einzustufen als das ermittelte theoretische Potential.

Der erforderliche Umfang von Hilfsarbeiten ist zwar abhängig von den jeweiligen Einsatzbedingungen zu bewerten und kann nicht pauschal definiert werden. Er wurde in den Untersuchungsbetrieben jedoch überwiegend deutlich überschritten, wie die Versuchsergebnisse belegen. Ursächlich dafür ist, dass der Anteil der eigentlichen Ladearbeit an der Gesamteinsatzzeit bei nur ein oder zwei Transportfahrzeugen pro Betrieb gering ausfällt. Zwischenzeitlich werden häufig Arbeiten ausgeführt, die nicht erforderlich sind oder über das erforderliche Maß hinausgehen.

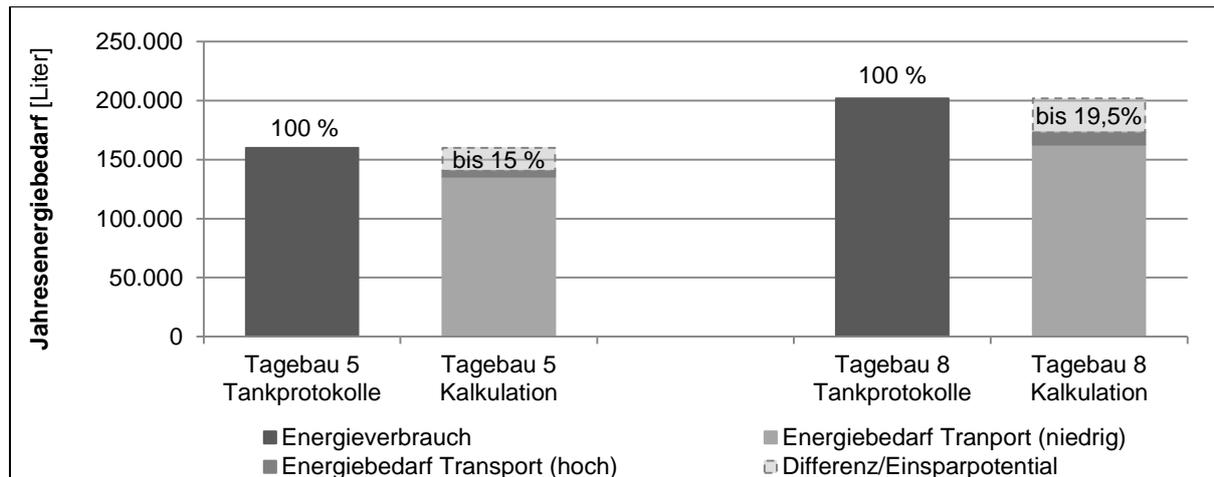
### 3.5.3 Transportvorgang

Neben dem Ladegeräteeinsatz wurden im Bereich des innerbetrieblichen Massentransports besonders relevante Potentiale zur Energieeinsparung festgestellt. Für die Transportprozesse in Tagebau 5 und Tagebau 8 wurde ausgehend von den gemessenen Verbrauchswerten und Fahrgeschwindigkeiten der SKWs untersucht, welcher Energieeinsatz zur Erbringung der Jahresfördermengen mindestens erforderlich ist. Letztere belaufen sich auf etwa 520.000 und 750.000 Tonnen.

im Fall von Tagebau 8 für die gesamte Fördermenge der Energiebedarf des Transports ausgehend von der tiefsten Sohle kalkuliert. In Tagebau 5, wo die Sohlen geringere Mächtigkeiten aufweisen, wurde die weiteste Transportentfernung als Grundlage der Berechnungen gewählt. Durch diese Annahmen sollte ausgeschlossen werden, dass eine mit Ungenauigkeiten behaftete Zuordnung von Fördermengen zu einzelnen Abbaustellen das Ergebnis der Berechnungen bevorteilt. Verlauf und Be-

schaffenheit der Strecken wurden entsprechend den während der Messungen dokumentierten Bedingungen modelliert.

Es wurde angenommen, dass weder Wartezeiten der Fahrzeuge an der Lade- und Entladestelle entstehen noch sonstige Störungen den Transportprozess beeinträchtigen. Die Berechnungen wurden jeweils basierend auf den höchsten und niedrigsten gemessenen Verbrauchswerten der SKWs bei Last- und Leerfahrt durchgeführt. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Abbildung dem von den Betrieben angegebenen Energiebedarf der Prozesse gegenübergestellt.



**Abbildung 15:** Energiebedarf des Transports und theoretische Einsparpotentiale

Im Fall von Tagebau 5 ergab der Vergleich des minimal erforderlichen Energieeinsatzes mit der Verbrauchsmenge ein theoretisches Einsparpotential zwischen 12 und 15 %. Für Tagebau 8 wurde das Potential auf 14,5 bis 19,5 % beziffert. Dies entspricht Mengen zwischen 19.500 und 39.500 Litern Dieselmotorkraftstoff.

Analog zu den Ladegeräten ist im Hinblick auf den erschließbaren Anteil der Gesamtpotentiale zu berücksichtigen, dass Wartezeiten nicht gänzlich vermieden werden können. Zudem führen witterungsbedingte Einflüsse über längere Betrachtungszeiträume zu Änderungen des Fahrbahnzustands, für den bei den Berechnungen ein mittlerer Wert angenommen wurde. Trotz dieser Unwägbarkeiten kommt den Potentialen selbst im Fall einer nur teilweisen Erschließbarkeit erhebliche Bedeutung zu.

Zur Evaluierung der Verhältnismäßigkeit von Fahrbahn Pflegemaßnahmen wurden weitere Modellrechnungen vorgenommen. Diese bilden die Entwicklung des Energieverbrauchs bei unterschiedlichen Fahrbahnbelägen und -widerständen ab. Angaben zu diesen Parametern wurden aus Fachliteratur entnommen. Als Basisfall mit dem Index 1,0 wurde eine befestigte Fahrbahn mit Schotter- oder Erddecke (Reifeneindringung ca. 2 cm) definiert, wie sie während der Messungen in Tagebau 5 und Tagebau 8 angetroffen wurde.

Bei einer angenommenen Asphaltierung oder Betonierung der Gesamtstrecke reduzierte sich der Verbrauchsindex in beiden Betrieben lediglich auf einen Wert von 0,97. Dies würde bezogen auf den Gesamtverbrauch der Fahrzeuge Einsparungen

von 4.250 bis 4.700 Litern bedeuten. Zu berücksichtigen sind jedoch die Streckenlängen von 1,5 bis 2,5 km, sodass der Energie- und Kostenaufwand für eine Asphaltierung oder Betonierung entsprechend hoch wären und die Einsparungen mit hoher Wahrscheinlichkeit überkompensieren würden.

Hingegen zeigte sich bereits bei einer Zunahme der Fahrwiderstände, die einer um 2,5 cm erhöhten Reifeneindringung entspricht, ein Anstieg des Verbrauchsindex auf bis zu 1,12. Es ist abzuleiten, dass im Sinne der Verhältnismäßigkeit die Herstellung bzw. Erhaltung einer Fahrbahnbeschaffenheit anzustreben ist, bei der maximale Reifeneindringungen im Bereich von 2 cm auftreten.

### **3.5.4 Primärzerkleinerung**

Die Modellrechnungen zum Energiebedarf umfassten ferner die primäre Zerkleinerungsstufe, die prozesstechnisch die Schnittstelle zur Aufbereitungstechnik repräsentiert. Untersucht wurden die Auswirkungen auf den Energiebedarf, die sich aus der Kopplung der Primärzerkleinerung und den Lade- und Transportvorgang ergeben. In diesem Zusammenhang wurden auf Basis der in den Betrieben erhobenen Anlagen- und Berechnungen zur Energieverbrauchsentwicklung infolge von Unter- und Überlastzuständen quantifiziert.

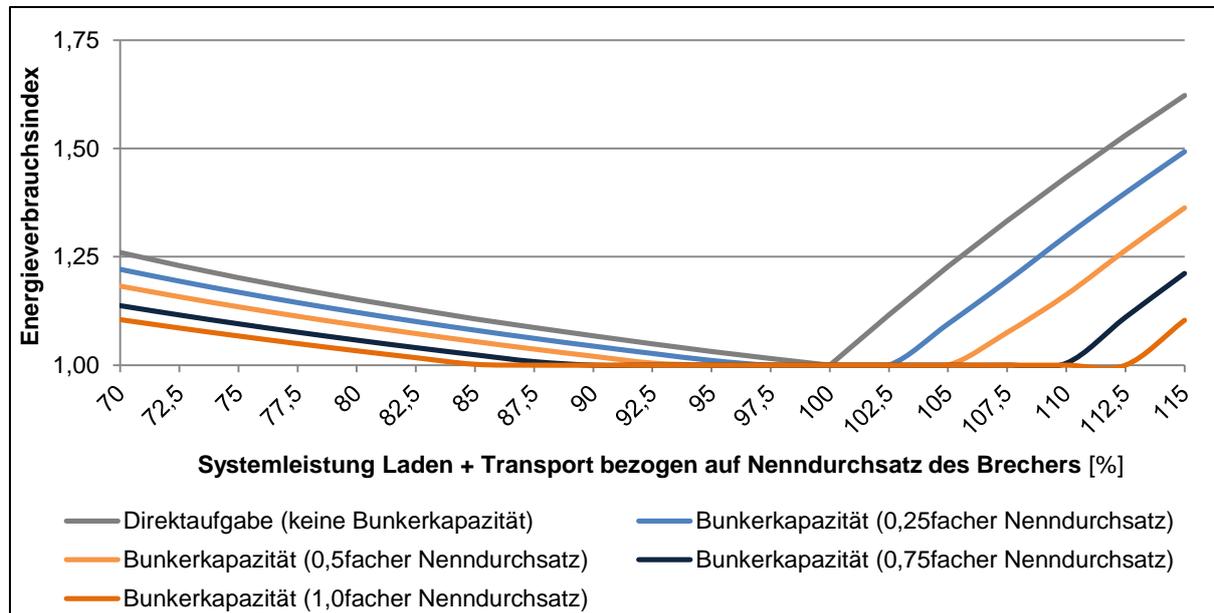
Im Modell wurde, angelehnt an die Größe der Vorbrecher in den beteiligten Tagebauen, der Betrieb einer Zerkleinerungsanlage mit einer Durchsatzleistung von 600 t/h über eine Schichtdauer von acht Stunden simuliert. Den Berechnungen des Energieverbrauchs wurden die Messwerte der elektrischen Leistungsaufnahme des Vorbrechers in Tagebau 10 zu Grunde gelegt.

Als Basisszenario wurde angenommen, dass die Stundenleistung des Lade- und Transportsystems dem Nenndurchsatz des Brechers entspricht. Vereinfachend wurde festgelegt, dass die gesamte Materialmenge den Brecher durchläuft. In diesem Betriebszustand wäre der Brecher hinsichtlich der Dimensionierung optimal ausgelastet.

Bei Unterlast entstehen Leerlaufzeiten bzw. Phasen verminderter Durchsatzleistung des Primärbrechers, die einen Mehrenergieverbrauch zur Folge haben. Ein solcher ist auch zu verzeichnen, wenn bei Überlastzuständen Gestein auf einem Zwischenlager abgekippt werden muss, was eine spätere Wiederaufnahme des Materials durch ein Ladegerät (üblicherweise Load & Carry per Radlader) erfordert.

Untersucht wurde, wie sich die Entwicklung des Energieverbrauchs bei Schwankungen der Förderleistung sowie abhängig von der Kapazität eines Vorbunkers darstellt. Letztere wurde im Zuge der modellierten Szenarien auf 0, 25, 50, 75 und 100 % des stündlichen Nenndurchsatzes des Brechers ausgelegt. Es wurde jeweils ein spezifischer Energieverbrauch je Tonne Förderung ermittelt. Für den ggf. erforderlichen Materialumschlag im Load & Carry wurden die Verbrauchswerte angesetzt, die durch

Messungen in Tagebau 6 bestimmt wurden. Der Kraftstoffverbrauch des Radladers wurde zur besseren Vergleichbarkeit in die äquivalente Menge elektrischer Energie unter Annahme eines Energieinhalts von 9,9 kWh pro Liter Diesel umgerechnet.



**Abbildung 16:** Einfluss der Bunkerkapazität auf den Gesamtenergieverbrauch

Die Modellrechnungen ergaben, dass mit einer Bunkerkapazität, die etwa Dreivierteln vom Nenndurchsatz des Brechers entspricht, Schwankungen der Aufgabemenge zwischen 87,5 und 110 % ohne Mehrenergieverbrauch kompensiert werden können. Dies deckt insbesondere die energieintensiven Überlastungen ab, indem auf den Betrieb eines Zwischenlagers nahezu vollständig verzichtet werden kann. Bei einer Bunkerkapazität, die dem halben Nenndurchsatz des Brechers entspricht, beträgt der Kompensationsbereich immerhin noch 92,5 bis 105 %. Abhängig von der Materialmenge bedeutet dies Energieeinsparungen von bis zu mehreren 10.000 kWh pro Jahr durch eine gleichmäßigere Beschickung sowie von mehreren 1.000 bis 10.000 Litern Kraftstoff durch eine Substitution des Umschlags über ein Zwischenlager.

### 3.6 Entwicklung und Evaluierung von Maßnahmen zur Energieeinsparung

Die Messungen und Modellrechnungen ergaben für die Untersuchungsbetriebe prozessinterne sowie -übergreifende Energieeinsparpotentiale unterschiedlicher Quantität. Letztere ist grundsätzlich abhängig von betriebsspezifischen Parametern. Dies ergibt sich bereits aus den Charakteristika einer Lagerstätte, die den Ausgangspunkt der bergbaulichen Tätigkeit darstellen. Die bezifferten absoluten und spezifischen Verbrauchsmengen sind infolgedessen nicht uneingeschränkt auf andere Natursteintagebaue übertragbar. Allerdings waren im Hinblick auf Gegebenheiten, Verfahrenstechniken und Handlungsweisen, die sich nachteilig auf die Energieeffizienz von Prozessen auswirken, betriebsübergreifende Übereinstimmungen festzustellen. Dies zeigt eine Evaluation der Abläufe in den Untersuchungsbetrieben (vgl. Anhang V).

Strukturelle Ähnlichkeiten der Prozessabläufe bei der Natursteingewinnung erlauben es, anhand der Fallbeispiele betriebsübergreifende Rückschlüsse auf Ansatzpunkte für Energieeinsparungen zu ziehen. Es wurden Maßnahmen für deren Erschließung abgeleitet. Diesbezüglich erfolgte eine Unterscheidung in:

- Organisatorische Maßnahmen
- Technische Maßnahmen
- Planerische Maßnahmen

Die Ansatzpunkte und die damit verbundenen Potentiale wurden in einem Maßnahmenkatalog (Anhang VI) erfasst und unterschiedlichen Teilbereichen des Produktionsablaufs zugeordnet. Dabei handelt es sich um den Ladegeräteinsatz, den Transportfahrzeugeinsatz, die Gestaltung innerbetrieblicher Fahrwege und die Verknüpfung der Gewinnungstechnik mit der primären Zerkleinerungsstufe. Die Reihenfolge, in der die einzelnen Potentiale gelistet sind, beinhaltet eine Einstufung der Bedeutung, die ihrer Erschließung zukommt. Diese basiert neben der Höhe der jeweiligen Energieeinsparung auf einer Einschätzung der grundsätzlichen Signifikanz für Natursteintagebaue.

Hervorzuheben sind insbesondere die Verfahrensabläufe bzw. Maschineneinsatzvarianten, die im Zuge der Untersuchungen als unverhältnismäßig energieaufwändig und substituierbar identifiziert wurden. Dazu zählen:

1. Die Ausführung von Arbeiten am Rohaufwerk mit einem Ladegerät außerhalb der Beladung von Transportfahrzeugen. Weder beim Bagger- noch beim Radladereinsatz ergaben sich durch die Umlagerung oder Vergleichmäßigung des Haufwerks im Vorfeld der Verladung zeitliche oder energetische Vorteile.
2. Der Betrieb eines Zwischenlagers in der Nähe des Vorbrechers als alternative Entlademöglichkeit für die Transportfahrzeuge, um Wartezeiten bei Störungen oder hohen Füllständen des Brechers zu verkürzen. Dies stellt jedoch aufgrund des erheblichen zusätzlichen Energieaufwands, den die spätere Wiederaufnahme des Haufwerks durch ein Ladegerät mit sich bringt, ein unverhältnismäßiges Verfahren im Hinblick auf die Energiebilanz dar.

3. Das Warten mit gefüllter und angehobener Ladeschaufel auf das Eintreffen der nächsten Transporteinheit. Da in Natursteintagebauen überwiegend nur ein bis zwei SKWs parallel eingesetzt werden, lässt sich durch diese Vorgehensweise kein wirksamer Zeitgewinn bei der Fahrzeugbeladung erzielen. Durch Wartezeiten an Lade- oder Entladestelle wird der marginale Zeitgewinn in der Regel überkompensiert, sodass letztlich nur ein zusätzlicher Energieaufwand zu konstatieren ist.
4. Das mehrmalige Füllen und Leeren der Bagger- oder Radladerschaufel zur Erhöhung des Füllungsgrads. Meist ergibt sich dadurch nur eine geringfügig verbesserte Schaufelfüllung, wobei jedes Mal ein Energieverbrauch in der Größenordnung eines Ladespiels entsteht.

Der Erschließungsaufwand der unterschiedlichen Energieeinsparpotentiale wurde anhand der zeitlichen Komponente der Umsetzung einer Maßnahme bewertet. Dabei wurden die Kategorien kurz-, mittel- und langfristig differenziert (vgl. Anhang VI). Es ist hervorzuheben, dass im Rahmen des Forschungsvorhabens überwiegend organisatorische und planerische Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs abgeleitet wurden. Diese zeichnen sich durch eine kurz- bis mittelfristige Umsetzbarkeit aus. Die Realisierung geht überwiegend mit einem unmittelbaren Energieeinspareffekt einher. Überdies sind insbesondere die organisatorischen Maßnahmen mit einem geringen oder keinerlei zusätzlichem Investitionsaufwand verbunden.

Zur Erschließung von Einsparpotentialen, die z.B. mit der Entwicklung des Tagebauszuschnitts sowie der Streckenführung von Transportwegen verbunden sind, bedarf es eines vorausschauenden planerischen Konzepts. Vor allem in kleineren Natursteintagebauen ist es allerdings gängige Praxis, die Planungen ausschließlich kurzfristig, z.B. an Produktionszielen, an der Qualitätssteuerung oder ähnlichen Erfordernissen auszurichten. Der Energieverbrauch ist daher generell verstärkt als Aspekt der Abbauplanung und Tagebauentwicklung im Bereich der Natursteingewinnung zu etablieren.

Im Hinblick auf die Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz können neben der Wirtschaftlichkeit weitere Hemmnisse bestehen. Dies betrifft u.a. mangelnde Information durch die Nichterfassung oder die nicht erfolgende Auswertung von Daten des Energieverbrauchs. [Bau14] In dieser Hinsicht zeigte sich im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen flächendeckend ein deutlicher Verbesserungsbedarf in den beteiligten Gewinnungsbetrieben.

Ein weiteres grundsätzliches Hemmnis bei der Erschließung von Effizienzpotentialen stellen unzureichende Kenntnisse über die Wirksamkeit von Maßnahmen dar. [Fle13] Dies gilt insbesondere bei komplexen Einflüssen sowie im Fall von Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen oder Prozessen, wie sie bei der Rohstoffgewinnung auftreten. Auch diesbezüglich können die Projektergebnisse durch die Verknüpfung von Maßnahmen mit einer Quantifizierung der zugehörigen Einsparpotentiale einen wesentlichen Beitrag zur Information und zum Abbau von Hemmnissen leisten.

Wechselwirkungen bestehen auch im Hinblick auf Aspekte der Energieeffizienz und des Umweltschutzes. Relevant für die Projektinhalte ist diesbezüglich die Entwicklung von Systemen zur Abgasnachbehandlung von Dieselmotoren. Gesetzliche Vorgaben schreiben die Reduzierung der Schadstoffemissionen von dieselbetriebenen mobilen Arbeitsmaschinen im nicht straßengebundenen Einsatz vor, die in den USA und Europa schrittweise seit 1996 bzw. 1998 vollzogen wird. [Del14] Die Einhaltung von Grenzwerten für Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und den Partikelaustritt (PM) erfordert technische Systeme wie Katalysatoren und Partikelfilter. Diese wirken sich auf die Effizienz des Verbrennungsprozesses und den Energiebedarf aus. Bei neuen Maschinen ist daher häufig ein Anstieg der Verbrauchswerte gegenüber vorhergehenden Baureihen festzustellen. Dies wurde exemplarisch für SKWs der 60-Tonnen-Klasse untersucht.

Die Umsetzung der Abgasnormen der Stufe I (EU) /Tier 1 (USA) bis zur Norm Tier 4 Final [Del14] bewirkte eine Senkung der Grenzwerte des Kohlenwasserstoff- und Partikelaustrittes um 85 % bzw. 92,5 %. Gegenläufig ist die Entwicklung des Dieselverbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Eine Zunahme der vom Hersteller angegebenen Verbrauchswerte um bis zu 5 Liter/h je nach Einsatzfall bedeutet eine erhebliche Steigerung des Ressourcenverbrauchs bei den neuesten Maschinengenerationen.

Eine belastbare Effizienzbewertung muss innerhalb konkreter Einsatz- und Prozessgrenzen erfolgen. Eine Effizienzbewertung kann bei der Rohstoffgewinnung nicht statisch für einen Tagebaubetrieb, sondern lediglich für einen Einsatzfall vorgenommen werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Einflüsse unterschiedlicher Art (u.a. geologisch, technisch, organisatorisch und planerisch) Veränderungen der Einsatzbedingungen verursachen. Diese können sowohl vorherbestimmbar als auch nicht zu determinieren sein. Veränderungen der Einsatzbedingungen ergeben sich mindestens bei jedem Wechsel der Ladestelle bzw. des Betriebspunkts im Tagebau. Sie können darüber hinaus spontan, z.B. hervorgerufen durch Witterungseinflüsse oder das Verhalten eines Maschinenbedieners, auftreten. Die vorherrschenden Einsatzbedingungen wurden daher jeweils ergänzend zur Bemessung der Einsparpotentiale definiert und in die Ableitung von Maßnahmen einbezogen.

Die angegebenen Energieeinsparungen, die teils weniger als einen Liter Diesel oder wenige Kilowattstunden je Arbeitsvorgang betragen, mögen isoliert betrachtet vergleichsweise gering erscheinen. Jedoch ist es bei der Ermittlung des ökonomischen und ökologischen Potentials elementar, den Betrachtungszeitraum und die Systemgrenzen verhältnismäßig zu bemessen. Diesbezüglich ist zu bedenken, wie häufig die untersuchten Arbeitsvorgänge in einem Betrieb pro Schicht oder Jahr von mehreren Maschinen ausgeführt werden. In der Konsequenz beinhaltet der Maßnahmenkatalog ein erhebliches sowie zeitnah erschließbares Potential zur Energieeinsparung für die Branche.

## 4 Fazit

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden signifikante Energieeinsparpotentiale innerhalb der Prozesse der Natursteingewinnung identifiziert und systematisch durch Messungen sowie Modellrechnungen quantifiziert. Die Größenordnungen möglicher Energieeinsparungen von bis zu mehreren zehntausend Litern Dieselkraftstoff und Kilowattstunden elektrischer Energie je Betrieb stellen sowohl in ökologischer als auch ökonomischer Hinsicht einen besonderen Anreiz dar.

Die größten Potentiale wurden in den Bereichen des Lade- und Transportgeräteinsatzes sowie bei der Gestaltung innerbetrieblicher Transportstrecken festgestellt. Untersuchungen des Bohrergeräteinsatzes ergaben lediglich geringe Energieeinsparmöglichkeiten innerhalb dieses Teilprozesses. Die Güte des Sprengergebnisses nimmt allerdings umso bedeutenderen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch sämtlicher nachfolgender Arbeitsschritte. Darüber hinaus wurde die primäre Zerkleinerungsstufe in die Untersuchungen einbezogen, welche als Schnittstelle zwischen Gewinnungs- und Aufbereitungstechnik eine strukturell bedeutende Position innerhalb der Prozesskette einnimmt. Hier wurden erhebliche Energieeinsparpotentiale aus Maßnahmen abgeleitet, die bei einer optimierten Kopplung des Vorbrechers an den Transportvorgang ansetzen.

Aufgrund der Anzahl von Faktoren und der Komplexität der Wechselwirkungen konnten nicht alle Einzelparameter durch Messungen untersucht werden. Dies betrifft vor allem langfristige Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen, die Langzeitdaten erfordern. Solche Untersuchungen waren im Rahmen der Messkampagnen, die in den laufenden Gewinnungsbetrieb eingegliedert wurden und sich auf Zeiträume von jeweils einigen Tagen konzentrierten, nicht darstellbar. Zu diesen Sachverhalten sind weiterführende Untersuchungen in Form von Langzeitmessungen anzuregen.

Die Effizienzbewertungen von Maschineneinsätzen wurden grundsätzlich innerhalb konkret umrissener Einsatz- und Prozessgrenzen vorgenommen. Die Ergebnisse der Messungen und Modellrechnungen sind generell vor diesem Hintergrund zu interpretieren. Eine statische Bewertung der Energienutzung in einem Tagebaubetrieb ist ebenso wie Betriebsvergleiche nicht aussagekräftig. Aufgrund des fortschreitenden Abbaus stellt der Gewinnungsablauf in einem Tagebaubetrieb ein dynamisches System dar. Dies bedingt, dass der Energiebedarf der Prozesse infolge kurz-, mittel- und langfristiger Änderungen von Einflussfaktoren Schwankungen unterworfen ist.

Wenngleich die Quantität der Energieeinsparpotentiale generell betriebsspezifisch zu ermitteln ist, so sind die erarbeiteten Lösungsansätze aufgrund charakteristischer Betriebsstrukturen auf andere Natursteintagebaue übertragbar. Die Übertragbarkeit von Erkenntnissen zur Effizienz des Einsatzes von Lade- und Transportgeräten erstreckt sich auch auf andere Branchen, wobei die mengenmäßig bedeutende Gewinnung von Kies und Sand im Trockenschnitt hervorzuheben ist.

Auf Basis der Kalkulationssoftware Excel wurde ein Simulationsmodell erstellt, mit dessen Hilfe Berechnungen des Mindestenergiebedarfs von Maschineneinsätzen in

Tagebaubetrieben durchführbar sind. Die Bereitstellung belastbarer Energieverbrauchs- und Leistungsdaten von einzelnen Maschinen in Form von verifizierbaren Messwerten in einem zu evaluierenden Gewinnungsbetrieb ist dafür unabdingbare Voraussetzung. Es ist zu konstatieren, dass in keinem der beteiligten Betriebe zum Zeitpunkt der Untersuchungen eine vollständige und systematische Überwachung des Energieeinsatzes stattfand. Teils wurden lediglich einzelne Maschinen und Anlagen überwacht. Mehrfach konnte selbst über grundlegende Verbrauchsdaten keine Auskunft erteilt werden. Dies erschwerte die Schaffung einer für die Untersuchungen hinreichend belastbaren Datenbasis erheblich. Infolge des Mehraufwands für Messungen und Auswertungen konnte die Umsetzung der erarbeiteten Maßnahmen in den Gewinnungsbetrieben nicht mehr im Rahmen des Projekts begleitet werden. Insbesondere Umgestaltungen der Transportstrecken waren im verbleibenden Zeitraum nicht durchführbar.

Als Grundlage für eine systematische Effizienzanalyse in anderen Betrieben wurden die erarbeitenden Ansätze und damit verbundenen Potentiale in einem Maßnahmenkatalog zusammengefasst. Die abgeleiteten Maßnahmen sind technischer sowie überwiegend planerischer und organisatorischer Art. Deren Umsetzung erfordert einen erheblich geringeren finanziellen Aufwand als Ersatzinvestitionen in Maschinen und Anlagen oder gar technische Systemumstellungen. Dies leistet in Kombination mit einer mehrheitlich kurz- bis mittelfristigen Realisierbarkeit einen wesentlichen Beitrag zum Abbau von Hemmnissen gegenüber der Erschließung von Energieeinsparpotentialen, die häufig auf wirtschaftlicher Ebene argumentiert werden.

Darüber hinaus lieferte die exemplarische Quantifizierung von Größenordnungen der erzielbaren Energieeinsparungen im Bereich der Natursteingewinnung wesentliche Informationen zur Verhältnismäßigkeit von Maschineneinsatzvarianten und zur Gestaltung von Transportwegen. Im Zuge dessen wurden u.a. gängige Verfahrenstechniken und Handlungsweisen als substituierbar identifiziert und generell die Energieintensität von Arbeitsvorgängen quantifiziert. Dies trägt dazu bei, den Aufwand und Nutzen von Energieeinsparmaßnahmen besser beziffern zu können.

Die sukzessiv erfolgende Einführung von Energiemanagementsystemen wird künftig zur Verbesserung der Datenverfügbarkeit in Gewinnungsbetrieben beitragen. Darauf aufbauend besteht ein Untersuchungsaspekt für künftige Forschungsarbeiten in einer verbesserten Korrelation zwischen Energie- und Umweltschutzmanagementsystemen, beispielsweise im Bereich der Regulierung von Emissionen.

## Literaturverzeichnis

- [AF15] Aral Forschung, FAQs – Kraftstoffe allgemein, Bochum  
Datum: 17.6.2015 (<http://www.aral.de/de/forschung/faq/faqs.html>)
- [AIC14] AIC Systems AG, technische Information zum Funktionsprinzip des Messgeräts UniflowMaster 6008, mündliche Mitteilungen vom 14.3.2014 und 4.4.2014 durch Herrn M. Reichardt (*nicht veröffentlichte Quelle*)
- [AIC12] AIC Systems AG, Betriebsanleitung zu Kraftstoffverbrauchsmessgeräten der Serien AIC 6004 / 6008 SWISSLINE, Allschwil (Schweiz), S. 10
- [Bas12] Van Basshuysen, R. & Schäfer, F. (Hrsg.), Handbuch Verbrennungsmotor (6. Auflage), Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012, S. 1017
- [Bau14] Bauerhansl, T. (Hrsg.), Energieeffizienz in Deutschland – eine Meta-studie, Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, 2014, S. 24f
- [BMR13] Bundesverband Mineralische Rohstoffe e.V. (MIRO), Bericht der Geschäftsführung 2012/2013, Duisburg, 2013. S. 10f
- [BMW10] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin, 2010, S. 12
- [Cat04] Caterpillar Inc., Technische Daten Muldenkipper 775E, Peoria (Illinois/USA), 2004, S. 17f
- [Del14] Delphi Automotive LLP, Worldwide Emissions Standards 2013/2014 – Heavy Duty and Off-Highway Vehicles, Troy (Michigan/USA), S. 65ff, Download des Dokuments von der Internetpräsenz im März 2014 (<http://www.delphi.com>)
- [DWD14] Deutscher Wetterdienst, Wetterdaten von Messstationen im Umkreis der beteiligten Tagebaue, Download der Datensätze von der Internetpräsenz im Februar und Juni 2014 (<http://www.dwd.de>)
- [Eym06] Eymer, W. et al. (Hrsg.), Grundlagen der Erdbewegung (2. Auflage), Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn, 2006, S. 120

- [Fle13] Fleiter, T., Schlomann, B. & Eichhammer, W. (Hrsg.), Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2013, S. 75
- [Grö11] Grömling, M., Volkswirtschaftliches Portrait der deutschen Baustoffindustrie, Berlin, 2011, S. 29
- [KOM14] Komatsu Australia Pty. Ltd., Fuel Saving Operation Guide, Fairfield East (NSW/Australien), Download des Dokuments von der Internetpräsenz im November 2014 (<http://www.komatsu.com.au>)
- [KOM02] Komatsu Europe International N.V., Technische Daten Hydraulikbagger PC750 SE/LC6, Vilvoorde (Belgien), 2002, S. 9
- [Kur06] Kurek, R., Nutzfahrzeugdieselmotoren, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2006, S. 122ff
- [Man10] Mansfeld, W., Satellitenortung und Navigation (3. Auflage), Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010, S. 186ff
- [Met07] Metso Minerals Construction, Handbuch der Brech- und Siebtechnik, Tampere (Finnland), 2007, S. 3-1ff
- [Rei10] Reif, K. (Hrsg.), Moderne Diesel-Einspritzsysteme (1. Auflage), Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010, S. 70ff
- [SB14] Statistisches Bundesamt, Produzierendes Gewerbe - Kostenstruktur der Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2012, Fachserie 4, Reihe 4.3, Wiesbaden, 2014, S. 282
- [Skr14] Skrypzak, T., Hennig, A. & Niemann-Delius, C., Research on Energy Consumption in Open Pits of the German Quarry Industry, aus: Proceedings of the 12th International Symposium Continuous Surface Mining – Aachen 2014, Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, S. 503 - 510

## Anhang I Betriebsmitteleinsatz in den beteiligten Tagebauen

### Anhang I-1: Daten der Hauptladegeräte

Betrieb	Ladegerät (Schaufelvolumen, Dienstgewicht, Durchschnittsverbrauch)		
	Ladeschaufelbagger	Tieföffelbagger	Radlader
Tagebau 1		3,0 m <sup>3</sup> / 50 Tonnen 42 Liter/h	
Tagebau 2	2,5 m <sup>3</sup> / 55 Tonnen 27 Liter/h		
Tagebau 3		2,0 m <sup>3</sup> / 43 Tonnen 27 Liter/h	
Tagebau 4			7,7 m <sup>3</sup> / 50 Tonnen 45 Liter/h
Tagebau 5			7,0 m <sup>3</sup> / 52 Tonnen 43 Liter/h
Tagebau 6		5,0 m <sup>3</sup> / 75 Tonnen 53 Liter/h	7,0 m <sup>3</sup> / 52 Tonnen 48 Liter/h
Tagebau 7		5,6 m <sup>3</sup> / 90 Tonnen 65 Liter/h	
Tagebau 8	7,0 m <sup>3</sup> / 125 Tonnen 72 Liter/h		
Tagebau 9	7,0 m <sup>3</sup> / 115 Tonnen 65 Liter/h		
Tagebau 10		5,0 m <sup>3</sup> / 80 Tonnen 55 Liter/h	6,5 m <sup>3</sup> / 52 Tonnen 50 Liter/h

■ Hauptladegerät

▣ Ladegerät mit geringfügig niedrigerer Betriebsstundenzahl pro Jahr

### Anhang I-2: Daten der Transportgeräte

Betrieb	Transportgeräte			Kraftstoffverbrauch [Liter/h]
	Anzahl	Nutzlastklasse(n)	parallel im Einsatz	
Tagebau 1	1	40,0 t	1	30 bis 40
Tagebau 2	1	40,0 t	1	~ 25
Tagebau 3	2	36,0 t	1	25 bis 32
Tagebau 4	Radlader im Load & Carry (u. Bandanlage ca. 130 kW)			45
Tagebau 5	4	63,0 bis 65,0 t	2 bis 3	40 bis 47
Tagebau 6	2	40,0 und 63,0 t	1 bis 2	~ 25 bzw. ~ 40
Tagebau 7	2	60,0 und 63,0 t	1 bis 2	30 bis 35
Tagebau 8	4	63,0 bis 65,0 t	2 bis 3	50 bis 57
Tagebau 9	2	63,0 t	2	~ 40
Tagebau 10	2	63,0 t	2	40 bis 45

### Anhang I-3: Daten der primären Zerkleinerungsstufe

Betrieb	Bauart	Leistung [kW]	Durchsatz		Pufferkapazität [t]
			Nenn. [t/h]	eff. [t/h]	
Tagebau 1	Backenbrecher, mobil	160	250	200	-
	Backenbrecher, stationär	90	120	100	Kipptrichter, 50 t
Tagebau 2	Backenbrecher, stationär	160	350	120	Kipptrichter, 40 t
Tagebau 3	Backenbrecher, stationär	130	300	160	Kipptrichter, 100 t
Tagebau 4	Walzenbrecher, semi-mobil	250	400	300	-
Tagebau 5	Steilkegelbrecher, stationär	250	600	400	Kipptrichter, 100 t
Tagebau 6	Backenbrecher, stationär	200	400	300	Kippbunker, 150 t
Tagebau 7	Backenbrecher, stationär	160	600	400	Kippbunker, 150 t
Tagebau 8	Backenbrecher, stationär	200	600	400	Kippbunker, 180 t
Tagebau 9	Backenbrecher, stationär	190	600	400	Kippbunker, 150 t
Tagebau 10	Backenbrecher, stationär	200	625	500	Kipptrichter, 100 t

## Anhang II Vermessungsdaten der innerbetrieblichen Transportstrecken

	Bezeichnung	Länge [m]	Abschnitte	Abschnittslänge [m]		max. Neigung [%]		Höhenmeter [m]		Kurvenanzahl	Besonderheiten
				min.	max.	Steigung	Gefälle	bergauf	bergab		
<b>Tgb. 1</b>	1. Sohle Mobilbrecher	199,0	4	10,0	77,0	17,0	-4,5	1,5	3,5	2	max. Steigung d. Förderrampe max. Steigung d. Förderrampe
	1. Sohle stat. Brecher	719,0	8	29,0	304,0	10,5	-8,0	13,0	8,0	6	
	2. Sohle Mobilbrecher	157,0	5	10,0	53,0	19,0	-1,5	8,0	1,0	3	
	2. Sohle stat. Brecher	676,0	9	20,0	275,0	19,0	-8,0	19,5	5,5	7	
	Tiefsohle Mobilbrecher	354,0	11	5,0	141,0	40,0	-10,0	30,0	3,0	3	
	Tiefsohle stat. Brecher	874,0	15	5,0	278,0	40,0	-10,0	41,5	7,5	8	
<b>Tgb. 2</b>	1. Sohle	425,0	6	26,0	102,0	1,5	-12,5	13,5	1,5	4	Kurve mit Radius $\approx$ 9,0 m
	Tiefsohle	304,0	4	30,0	203,0	15,5		10,0	0,0	6	
<b>Tgb. 3</b>	1. Sohle	759,0	5	37,0	327,0	8,0	-0,5	7,5	0,5	10	
	2. Sohle	738,0	7	37,0	208,0	13,5	-0,5	21,5	0,5	8	
	3. Sohle	685,0	5	37,0	211,0	14,0	-0,5	33,5	0,5	8	
	Tiefsohle	744,0	7	37,0	208,0	19,0	-0,5	44,0	0,5	9	
	Nebenbereich	1.823,0	13	23,0	370,0	8,0	-16,5	5,0	72,0	13	
<b>Tgb. 4</b>	Gewinnungssohle	217,0	5	8,0	114,0	23,5	-2,5	5,0	3,5	3	
<b>Tgb. 5</b>	1. Sohle	2.589,0	17	53,0	762,0	12,0	-16,5	69,5	105,5	5	Engstelle + Kehre mit Radius $\approx$ 7,5 m Engstelle Engstelle
	2. Sohle	2.479,0	14	57,0	762,0	12,0	-15,5	69,5	95,5	5	
	Tiefsohle	2.538,0	15	17,0	762,0	19,5	-15,5	83,5	94,0	6	
<b>Tgb. 6</b>	1. Sohle	1.033,0	10	25,0	223,0	6,5	-15,0	1,5	71,0	4	
	2. Sohle, Ost	880,0	9	36,0	223,0		-14,0	0,0	44,0	4	
	2. Sohle, West	341,0	6	34,0	109,0		-18,0	0,0	37,0	4	
	3. Sohle	1.192,0	12	36,0	223,0	17,5	-14,0	31,0	44,5	7	
	4. Sohle, Ost	695,0	11	18,0	162,0	13,0	-5,0	19,0	3,5	0	
	4. Sohle, West	552,0	9	18,0	155,0	12,5	-5,0	19,0	3,0	1	
	Tiefsohle	679,0	12	18,0	101,0	20,5	-5,0	38,5	3,0	1	
<b>Tgb. 7</b>	4. Sohle, Ost	255,0	5	18,0	139,0	11,0		7,0	0,0	2	
	4. Sohle, West	360,0	5	20,0	103,0	9,5	-1,5	8,5	1,5	2	
	Tiefsohle	265,0	6	20,0	79,0	18,5	-1,0	21,5	0,5	3	
<b>Tgb. 8</b>	4. Sohle	1.514,0	10	40,0	600,0	12,5	-1,5	48,0	9,5	6	Rampe mit 1 Kehre von ca. 170 Grad Rampe mit 1 Kehre von ca. 170 Grad Rampe mit 2 Kehren von ca. 170 Grad
	5. Sohle	1.488,0	12	34,0	600,0	12,5	-1,5	68,5	9,0	7	
	Tiefsohle	1.716,0	14	34,0	600,0	12,5	-1,5	87,5	9,0	8	
<b>Tgb. 9</b>	1. Sohle	575,0	4	30,0	337,0	10,5	-2,0	20,0	1,0	3	
	2. Sohle	910,0	9	31,0	278,0	12,5	-4,5	32,5	2,5	7	
	3. Sohle	968,0	10	25,0	385,0	17,5	-2,0	42,0	1,0	4	
	Tiefsohle	816,0	12	25,0	188,0	17,5	-2,0	51,5	0,5	2	
<b>Tgb. 10</b>	1. Sohle, Nord	955,0	8	37,0	319,0	8,0	-10,5	25,5	23,0	4	Engstelle wg. Tunneldurchfahrt Engstelle wg. Tunneldurchfahrt
	1. Sohle, Süd	955,0	9	34,0	285,0	8,0	-10,5	27,0	23,5	3	
	2. Sohle	1.119,0	8	50,0	451,0	7,5		28,5	0,0	4	
	3. Sohle	935,0	7	54,0	263,0	14,5	-4,5	45,0	2,5	7	
	4. Sohle	814,0	9	28,0	285,0	12,5	-4,5	44,5	1,5	6	
	Tiefsohle	898,0	7	28,0	285,0	11,0	-4,5	57,5	1,5	6	

## Anhang III Daten der Kraftstoffverbrauchsmessungen

Anhang III-1: Dauer und Energiebedarf unterschiedlicher Phasen der Transportfahrten von SKWs in Tagebau 5

Vorgang	Messung 1		Messung 2		Messung 3		Messung 4		Messung 5		Messung 6		Messung 7	
	Zeit [Sek.]	Verbr. [Liter]												
Beladung	415		427		385		434		271		182		n.v.	n.v.
Wartezeit / Ausweichen bei Lastfahrt	n.v.	n.v.												
Lastfahrt (ohne Rangieren am Vorbrecher)	474	7,65	469	7,50	467	7,25	471	7,45	425	5,65	402	4,90	346	4,45
Wartezeit am Vorbrecher	154	0,25	59	0,15	26	0,10	168	0,25	133	0,25	39	0,10	n.v.	n.v.
Rangiervorgang am Vorbrecher	24	0,10	20	0,10	22	0,10	22	0,10	20	0,10	21	0,10	10	0,05
Entladung	60	0,30	61	0,30	62	0,30	57	0,30	45	0,20	33	0,15	40	0,10
Wartezeit / Ausweichen bei Leerfahrt	n.v.	n.v.	11	0,05	n.v.	n.v.								
Leerfahrt (ohne Rangieren an der Ladestelle)	338	4,95	347	5,00	338	4,95	330	4,90	335	4,90	345	5,05	330	4,85
Wartezeit an der Lade- stelle														
Rangiervorgang an der Ladestelle														
Gesamt	1050	13,25	955	13,05	915	12,70	1.050	13,00	960	11,10	850	10,35	725	9,45

**Anhang III-2: Dauer und Energiebedarf unterschiedlicher Phasen der Transportfahrten von SKWs in Tagebau 8**

Vorgang	Messung 1		Messung 2		Messung 3		Messung 4		Messung 5		Messung 6		Messung 7	
	Zeit [Sek.]	Verbr. [Liter]												
Beladung	236	0,50	139	0,30	149	0,30	160	0,35	141	0,30	153	0,30	126	0,25
Wartezeit / Ausweichen bei Lastfahrt	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>												
Lastfahrt (ohne Rangieren am Vorbrecher)	327	10,45	334	10,80	326	10,10	333	10,65	326	10,20	332	10,35	312	9,70
Wartezeit am Vorbrecher	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	51	0,10										
Rangiervorgang am Vorbrecher	24	0,35	24	0,35	24	0,10	29	0,35	25	0,35	24	0,35	23	0,30
Entladung	28	0,20	27	0,15	29	0,15	26	0,20	32	0,20	28	0,20	27	0,15
Wartezeit / Ausweichen bei Leerfahrt	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>												
Leerfahrt (ohne Rangieren an der Ladestelle)	262	2,15	251	1,95	268	1,95	259	2,00	258	1,85	248	1,85	248	1,85
Wartezeit an der Lade- stelle	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	44	0,15	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
Rangiervorgang an der Ladestelle	52	0,35	25	0,10	34	0,10	26	0,10	37	0,10	22	0,05	28	0,10
Gesamt	929	14,00	800	13,65	830	12,70	877	13,80	819	13,00	807	13,10	815	12,45

Fortsetzung Anhang III-2

Vorgang	Messung 8		Messung 9		Messung 10		Messung 11		Messung 12		Messung13	
	Zeit [Sek]	Verbr. [Liter]										
Beladung	90	0,20	61	0,15	35	0,10	6	0,05	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	141	0,30
Wartezeit / Ausweichen bei Lastfahrt	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	101	0,20	7	0,05	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
Lastfahrt (ohne Rangieren am Vorbrecher)	301	8,90	288	8,40	285	7,75	270	6,85	239	5,70	339	10,80
Wartezeit am Vorbrecher	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	23	0,05	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
Rangiervorgang am Vorbrecher	27	0,30	29	0,30	29	0,25	21	0,20	27	0,25	39	0,40
Entladung	27	0,20	24	0,15	25	0,15	26	0,15	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	31	0,20
Wartezeit / Ausweichen bei Leerfahrt	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	12	0,05	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
Leerfahrt (ohne Rangieren an der Ladestelle)	261	2,00	264	1,95	259	1,85	255	2,00	260	1,95	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
Wartezeit an der Lade- stelle	14	0,05	18	0,05	102	0,20	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
Rangiervorgang an der Ladestelle	26	0,15	22	0,05	31	0,10	24	0,15	21	0,05	<i>n.v.</i>	<i>n.v.</i>
Gesamt	746	11,80	706	11,05	789	10,40	703	9,60	566	8,05	550	11,70

**Anhang III-3: Energiebedarf des Hydraulikbaggers in unterschiedlichen Arbeitsphasen an Ladestelle A**

Betrieb: <b>Tagebau 10</b>	Datum der Messung: <b>5.11.2013</b>
Ladegerät: <b>Komatsu PC750 SE</b>	

Vorgang Nr.		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Ø Schwenk- winkel [°]	Kraftstoffverbrauch	
						[Liter]	[Liter/h]
1	Anfahrt zur Ladestelle	26,1				18,52	
	Fahrzeit	21,7				18,10	50,2
	Wartezeit	4,4				0,41	5,5
2	Sohlenpflege	5,2				4,40	50,3
3	Herrichten der Ladestelle	9,5				7,30	45,9
4	Betankung (Motor Aus)	21,5				0,00	0,0
5	Warten auf SKW	14,9				0,52	
	Wartezeit	6,9				0,52	4,5
	Wartezeit (Motor Aus)	8,0				0,00	0,0
6	Beladung Cat 775F	5,1	9	25	45	3,76	44,5
7	Beladung Komatsu HD605	3,9	9	20	45	3,34	51,3
8	Warten auf SKW	5,1				0,40	4,8
9	Beladung Cat 775F	3,9	9	19	45	3,20	49,3
10	Warten auf SKW	1,8				0,14	4,7
11	Beladung Komatsu HD605	4,3	9	24	45	3,39	47,4
12	Arbeiten am Haufwerk	0,4				0,29	49,7
13	Warten auf SKW	3,1				0,23	4,3
14	Beladung Cat 775F	3,6	9	20	45	3,12	51,8
15	Sohlenpflege	0,7				0,51	44,3
16	Warten auf SKW	1,4				0,15	6,4
17	Beladung Komatsu HD605	3,7	9	20	45	3,20	52,7
18	Arbeiten am Haufwerk	0,8				0,68	52,5
19	Warten auf SKW	3,3				0,29	5,2
20	Beladung Cat 775F	3,4	9	20	45	3,01	53,9
21	Warten auf SKW	4,4				0,48	6,4
22	Beladung Komatsu HD605	4,1	9	22	45 - 90	3,37	49,6
23	Arbeiten am Haufwerk	1,6				1,26	49,1
24	Warten auf SKW	0,6				0,04	4,9
25	Beladung Cat 775F	3,8	9	21	45 - 90	3,19	51,0
26	Sohlenpflege	0,4				0,30	43,5
27	Herrichten der Ladestelle	4,0				2,51	37,8
28	Beladung Komatsu HD605	4,1	10	20	45	3,46	50,7
29	Warten auf SKW	2,2				0,16	4,5
30	Beladung Cat 775F	3,8	10	20	45	3,18	49,9
31	Herrichten der Ladestelle	0,4				0,36	52,6
32	Warten auf SKW	3,1				0,24	4,6
33	Beladung Komatsu HD605	4,5	10	22	45	3,70	49,5
34	Warten auf SKW	1,9				0,15	4,9
35	Beladung Cat 775F	4,4	10	21	45	3,70	50,4
36	Warten auf SKW	3,4				0,23	4,1
37	Beladung Komatsu HD605	3,9	9	20	45	3,39	51,9
38	Sohlenpflege	0,5				0,42	49,9
39	Herrichten der Ladestelle	0,3				0,29	54,3
40	Warten auf SKW	1,4				0,11	4,9
41	Beladung Cat 775F	3,7	9	21	45	3,09	50,6
42	Arbeiten am Haufwerk	0,5				0,40	49,7
43	Warten auf SKW	3,2				0,22	4,1
44	Beladung Komatsu HD605	3,6	9	19	45	3,01	50,7
45	Warten auf SKW	1,8				0,12	4,1
46	Beladung Cat 775F	4,1	9	22	45	3,53	51,4
47	Arbeiten am Haufwerk	1,4				1,08	47,6
48	Warten auf SKW	2,3				0,16	4,2
49	Beladung Komatsu HD605	3,9	9	22	45	3,36	51,7

Fortsetzung Anhang III-3

Vorgang		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Ø Schwenk- winkel [°]	Kraftstoffverbrauch	
Nr.						[Liter]	[Liter/h]
50	Arbeiten am Haufwerk	0,5				0,42	51,4
51	Warten auf SKW	1,9				0,13	4,3
52	Beladung Cat 775F	3,9	9	22	45	3,33	50,9
53	Arbeiten am Haufwerk	0,4				0,27	49,4
54	Warten auf SKW	3,3				0,22	4,1
55	Beladung Komatsu HD605	4,0	9	23	45	3,38	50,7
56	Arbeiten am Haufwerk	0,5				0,42	53,1
57	Warten auf SKW	1,7				0,12	4,3
58	Beladung Cat 775F	4,7	10	23	45	3,90	50,1
59	Arbeiten am Haufwerk	3,5				2,95	50,8
60	Beladung Komatsu HD605	4,2	10	21	0 - 45	3,70	53,0
61	Warten auf SKW	2,1				0,15	4,3
62	Beladung Cat 775F	4,5	10	23	0 - 45	3,92	52,0
63	Arbeiten am Haufwerk	0,6				0,47	47,0
64	Warten auf SKW	2,2				0,31	8,6
65	Beladung Komatsu HD605	4,0	9	24	45	3,53	53,5
66	Warten auf SKW	3,2				0,24	4,6
67	Beladung Cat 775F	5,0	10	23	45	4,31	51,8
68	Arbeiten am Haufwerk	2,8				2,48	53,0
69	Beladung Komatsu HD605	4,6	10	24	45	4,08	53,7
70	Arbeiten am Haufwerk	0,6				0,55	51,4
71	Warten auf SKW	1,4				0,10	4,4
72	Beladung Cat 775F	4,9	10	24	0 - 45	4,34	53,1
73	Arbeiten am Haufwerk	1,1				0,96	50,3
74	Warten auf SKW	0,8				0,11	8,9
75	Beladung Cat 775F	5,0	10	26	45	4,15	49,8
76	Beladung Komatsu HD605	5,3	10	27	0 - 45	4,44	50,6
77	Arbeiten am Haufwerk	1,5				1,31	51,5
78	Warten auf SKW	3,1				0,25	4,9
79	Beladung Cat 775F	5,1	10	25	0 - 45	4,37	51,2
80	Arbeiten am Haufwerk	0,4				0,27	45,4
81	Beladung Komatsu HD605	4,7	10	25	0 - 45	4,10	52,0
82	Arbeiten am Haufwerk	3,7				2,97	48,1
83	Warten auf SKW	0,5				0,08	8,9
84	Beladung Cat 775F	5,1	9	30	45	4,41	52,1
85	Warten auf SKW	3,1				0,21	4,1
86	Beladung Komatsu HD605	5,2	9	27	45	4,44	51,6
87	Warten auf SKW	2,0				0,16	4,7
88	Beladung Cat 775F	5,1	9	27	45	4,21	49,8
89	Arbeiten am Haufwerk	0,4				0,34	53,6
90	Warten auf SKW	1,6				0,17	6,4
91	Beladung Komatsu HD605	5,2	11	26	0 - 45	4,38	50,9
92	Verlassen der Ladestelle	7,5				6,24	49,9

**Anhang III-4: Energiebedarf des Hydraulikbaggers in unterschiedlichen Arbeitsphasen an Ladestelle B**

Betrieb: <b>Tagebau 10</b>	Datum der Messung: <b>21.5.2014</b>
Ladegerät: <b>Komatsu PC750 SE</b>	

Vorgang Nr.		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Ø Schwenk- winkel [°]	Kraftstoffverbrauch	
						[Liter]	[Liter/h]
1	Anfahrt zur Ladestelle	11,4				10,87	57,1
2	Herrichten der Ladestelle	6,2				5,26	51,4
3	Warten auf SKW	0,4				0,08	12,0
4	Beladung Cat 775F	3,3	8	25	90	2,96	53,8
5	Warten auf SKW	0,6				0,04	4,3
6	Beladung Komatsu HD605	3,4	8	26	90	2,89	51,1
7	Arbeiten am Haufwerk	1,1				0,87	46,6
8	Beladung Cat 775F	4,3	9	29	90	3,71	51,2
9	Beladung Komatsu HD605	3,9	9	26	45 - 90	3,28	50,3
10	Arbeiten am Haufwerk	1,5				1,19	48,7
11	Beladung Cat 775F	4,0	8	30	90	3,31	50,2
12	Arbeiten am Haufwerk	0,9				0,72	47,4
13	Warten auf SKW	0,6				0,04	4,2
14	Beladung Komatsu HD605	3,7	8	27	90 - 135	3,00	49,3
15	Arbeiten am Haufwerk	0,9				0,70	49,4
16	Warten auf SKW	1,5				0,09	3,8
17	Beladung Cat 775F	4,5	9	30	90 - 135	3,65	49,0
18	Arbeiten am Haufwerk	2,0				1,57	47,4
19	Warten auf SKW	0,6				0,04	4,0
20	Beladung Komatsu HD605	4,3	9	29	90 - 135	3,52	48,9
21	Beladung Cat 775F	4,7	9	31	135	3,79	48,4
22	Knäppern	1,7				1,26	44,3
23	Beladung Komatsu HD605	4,4	9	30	135	3,59	48,7
24	Arbeiten am Haufwerk	2,2				1,69	45,4
25	Beladung Cat 775F	4,1	9	27	135	3,39	50,0
26	Arbeiten am Haufwerk	1,7				1,36	48,1
27	Beladung Komatsu HD605	4,6	9	31	135 - 180	3,58	46,9
28	Arbeiten am Haufwerk	0,9				0,73	46,3
29	Beladung Cat 775F	5,2	10	31	135 - 180	4,23	49,0
30	Arbeiten am Haufwerk	1,2				0,96	46,6
31	Beladung Komatsu HD605	4,6	9	31	180	3,67	47,7
32	Arbeiten am Haufwerk	1,4				1,13	48,5
33	Beladung Cat 775F	5,5	10	33	135 - 180	4,38	48,0
34	Warten auf SKW	4,3				0,29	4,0
35	Arbeiten am Haufwerk	2,0				1,63	49,8
36	Beladung Komatsu HD605	4,4	9	29	135 - 180	3,61	49,5
37	Beladung Cat 775F	4,8	9	32	180	3,79	47,7
38	Arbeiten am Haufwerk	0,7				0,52	47,0
39	Beladung Komatsu HD605	4,0	8	30	180	3,34	49,5
40	Arbeiten am Haufwerk	0,6				0,45	44,4
41	Beladung Cat 775F	4,9	9	33	180	4,00	49,0
42	Arbeiten am Haufwerk	1,4				1,13	48,6
43	Beladung Komatsu HD605	3,6	8	27	90	2,94	49,7
44	Arbeiten am Haufwerk	0,6				0,41	41,7
45	Warten auf SKW	1,3				0,09	4,1
46	Beladung Cat 775F	3,7	9	25	90 - 135	3,15	51,4
47	Warten auf SKW	3,7				0,19	
	Wartezeit	1,6				0,19	4,1
	Wartezeit (Motor Aus)	2,2				0,00	0,0
48	Beladung Komatsu HD605	4,7	8	35	135	3,71	47,1
49	Arbeiten am Haufwerk	0,6				0,44	47,9
50	Beladung Cat 775F	4,3	9	29	135	3,56	49,6

Fortsetzung Anhang III-4

Vorgang		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Ø Schwenk- winkel [°]	Kraftstoffverbrauch	
Nr.						[Liter]	[Liter/h]
51	Beladung Komatsu HD605	4,6	9	30	90 - 135	3,62	47,8
52	Warten auf SKW	0,5				0,03	4,3
53	Beladung Cat 775F	4,9	9	32	90	4,02	49,7
54	Warten auf SKW	1,2				0,09	4,5
55	Beladung Komatsu HD605	4,6	9	31	135	3,89	50,3
56	Warten auf SKW	1,7				0,11	4,1
57	Beladung Cat 775F	3,9	8	29	135	3,35	51,7
58	Warten auf SKW	1,1				0,08	4,2
59	Beladung Komatsu HD605	4,2	9	28	90 - 135	3,37	48,4
60	Warten auf SKW	1,5				0,10	3,9
61	Beladung Cat 775F	4,6	9	30	135	3,83	50,4
62	Warten auf SKW	2,0				0,13	3,9
63	Beladung Komatsu HD605	5,4	9	36	180	4,20	47,1
64	Arbeiten am Haufwerk	0,7				0,48	43,7
65	Beladung Cat 775F	4,4	10	27	45	3,50	47,7
66	Knäppern	2,5				1,69	40,1
67	Beladung Komatsu HD605	4,2	10	25	45	3,46	49,1
68	Arbeiten am Haufwerk	2,5				2,00	47,5
69	Beladung Cat 775F	4,5	9	30	45 - 90	3,55	47,3
70	Beladung Komatsu HD605	4,4	9	30	90	3,71	50,4
71	Beladung Cat 775F	4,5	9	30	90 - 135	3,66	48,9
72	Reparatur Kraftstoffleitung	8,8				0,69	4,8
73	Warten auf SKW	0,8				0,18	14,7
74	Beladung Cat 775F	4,3	9	29	90	3,65	51,0
75	Herrichten der Ladestelle	0,5				0,34	44,6
76	Warten auf SKW	1,6				0,17	6,8
77	Beladung Komatsu HD605	4,3	9	29	90 - 135	3,52	49,4
78	Herrichten der Ladestelle	0,6				0,51	48,8
79	Beladung Cat 775F	4,2	9	28	90	3,43	49,3
80	Arbeiten am Haufwerk	1,3				1,10	52,9
81	Beladung Komatsu HD605	4,5	9	30	90	3,74	49,7
82	Warten auf SKW	0,6				0,07	6,3
83	Beladung Cat 775F	4,7	9	31	90 - 135	3,79	48,9
84	Warten auf SKW	2,2				0,14	3,8
85	Beladung Komatsu HD605	5,0	9	33	90 - 135	3,95	47,1
86	Beladung Cat 775F	4,7	9	31	90 - 135	3,89	49,4
87	Arbeiten am Haufwerk	2,6				2,02	46,8
88	Beladung Komatsu HD605	4,7	9	31	135	3,84	49,4
89	Arbeiten am Haufwerk	1,3				1,04	47,9
90	Beladung Cat 775F	4,2	9	28	90	3,30	46,9
91	Beladung Komatsu HD605	4,8	10	29	45 - 90	3,71	46,0
92	Warten auf SKW	0,3				0,03	6,4
93	Beladung Cat 775F	5,3	9	35	90	4,18	47,5
94	Arbeiten am Haufwerk	0,8				0,57	41,0
95	Beladung Komatsu HD605	4,7	9	31	90	3,70	47,4
96	Warten auf SKW	0,7				0,08	6,6
97	Beladung Cat 775F	5,3	10	32	90	4,27	48,1
98	Arbeiten am Haufwerk	0,8				0,63	49,4
99	Beladung Komatsu HD605	5,0	10	30	45	3,80	45,4
100	Arbeiten am Haufwerk	1,5				1,19	48,2
101	Beladung Cat 775F	4,8	9	32	90	3,79	47,4
102	Warten auf SKW	1,9				0,12	3,9
103	Arbeiten am Haufwerk	4,1				2,93	43,0
104	Verlassen der Ladestelle	3,2				2,30	42,7

**Anhang III-5: Energiebedarf des Radladers in unterschiedlichen Arbeitsphasen an Versuchstag 1**

Betrieb: <b>Tagebau 6</b>	Datum der Messung: <b>24.6.2014</b>
Ladegerät: <b>Komatsu WA600-6</b>	

Vorgang Nr.	Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Fahrstrecke [m]	Kraftstoffverbrauch	
					[Liter]	[Liter/h]
1	Umsetzen zur Ladestelle	2,5		776,8	2,30	55,7
2	Beladung Komatsu HD605	4,4	5	203,1	3,50	47,7
3	Wartezeit	2,3			0,79	20,3
4	Arbeiten am Haufwerk	0,4		22,5	0,19	32,5
5	Warten auf SKW	1,6			0,70	26,2
6	Beladung Komatsu HD605	3,9	5	242,2	3,27	50,1
7	Arbeiten am Haufwerk	0,5		26,5	0,37	44,4
8	Warten auf SKW	3,6			1,19	20,0
9	Beladung Komatsu HD605	2,8	5	181,7	2,43	53,6
	<i>Systemausfall</i>					
10	Warten auf SKW	1,7			0,35	12,3
11	Beladung Komatsu HD605	3,0	5	206,3	2,34	47,7
12	Arbeiten am Haufwerk	1,3		109,2	0,89	40,9
13	Warten auf SKW	2,7			0,92	20,2
14	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	243,1	3,07	49,1
15	Arbeiten am Haufwerk	0,8		70,0	0,60	41,8
16	Warten auf SKW	2,9			0,96	19,9
17	Beladung Komatsu HD605	3,7	5	273,6	3,03	49,7
18	Arbeiten am Haufwerk	0,4		26,7	0,34	49,8
19	Warten auf SKW	1,3			0,58	26,8
20	Verlassen der Ladestelle	0,5		54,7	0,15	18,2
21	Warten wg. Reparaturen	4,3			1,04	14,3
22	Rückfahrt zur Ladestelle	0,5		66,9	0,20	27,4
23	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	220,4	3,12	46,2
24	Arbeiten am Haufwerk	1,0		70,7	0,97	58,3
25	Warten auf SKW	2,7			0,88	19,9
26	Beladung Komatsu HD605	4,5	6	269,0	3,88	51,0
27	Arbeiten am Haufwerk	1,3		87,2	1,05	46,7
28	Warten auf SKW	2,6			0,90	21,1
29	Beladung Komatsu HD605	3,7	5	227,2	2,94	48,5
30	Verlassen der Ladestelle	0,4		65,0	0,40	56,3
31	Warten wg. Reparaturen	3,1			1,08	21,2
32	Rückfahrt zur Ladestelle	0,4		70,1	0,16	20,2
33	Warten auf SKW	0,4			0,25	40,2
34	Beladung Komatsu HD605	3,0	4	168,2	2,57	52,1
35	Arbeiten am Haufwerk	1,0		78,8	0,75	46,8
36	Warten auf SKW	3,1			1,00	19,2
37	Beladung Komatsu HD605	3,5	5	229,7	3,17	54,1
38	Arbeiten am Haufwerk	1,3		110,1	1,33	62,5
39	Warten auf SKW	2,7			0,97	21,7
40	Beladung Komatsu HD605	3,4	5	212,6	2,94	51,7
41	Arbeiten am Haufwerk	0,8		64,6	0,65	47,2
42	Warten auf SKW	3,2			0,97	18,5
43	Beladung Komatsu HD605	4,1	5	233,8	3,18	46,3
44	Arbeiten am Haufwerk	1,7		109,3	1,39	50,9
45	Warten auf SKW	2,1			0,75	21,5
46	Beladung Komatsu HD605	3,9	5	206,7	3,26	50,9
47	Arbeiten am Haufwerk	0,8		56,9	0,69	51,5
48	Warten auf SKW	3,2			1,01	18,9
49	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	214,9	3,15	50,0
50	Arbeiten am Haufwerk	1,8		63,3	1,07	35,8

Fortsetzung Anhang III-5

Vorgang		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Fahrstrecke [m]	Kraftstoffverbrauch	
Nr.						[Liter]	[Liter/h]
51	Warten auf SKW	2,4				0,72	18,5
52	Beladung Komatsu HD605	4,2	5	50	249,3	3,50	50,5
53	Arbeiten am Haufwerk	1,5			120,4	1,35	55,2
54	Warten auf SKW	3,0				0,91	18,3
55	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	46	211,4	3,24	51,0
56	Sohlenpflege an Ladestelle	1,4			142,1	0,97	41,0
57	Warten auf SKW	2,9				0,87	18,0
58	Beladung Komatsu HD605	3,6	5	43	223,2	3,24	54,2
59	Warten auf SKW	3,1				1,00	19,4
60	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	45	230,0	3,33	53,0
61	Umsetzen zur Werkstatt	0,8			206,0	0,87	66,8
62	Sohlenpflege auf Fahrweg	0,3			30,1	0,30	69,2
63	Umsetzen zur Werkstatt	2,1			540,3	3,23	93,0
64	Load & Carry zum Brecher	1,0			126,1	1,02	64,8
65	Umsetzen	0,4			37,4	0,21	33,2
66	Warten	4,0				0,93	14,9
67	Load & Carry zum Brecher	1,2			143,6	0,76	39,3
68	Load & Carry zum Brecher	0,9			120,6	0,98	64,4
69	Load & Carry zum Brecher	1,0			113,9	1,14	67,8
70	Load & Carry zum Brecher	1,1			128,1	1,04	59,8
71	Load & Carry zum Brecher	1,4			121,5	1,25	53,1
72	Load & Carry zum Brecher	1,1			128,9	1,09	60,8
73	Load & Carry zum Brecher	1,1			133,3	1,04	55,8
74	Load & Carry zum Brecher	1,2			122,4	1,10	57,2
75	Load & Carry zum Brecher	1,2			121,1	1,13	57,6
76	Load & Carry zum Brecher	1,2			125,7	0,97	50,0
77	Load & Carry zum Brecher	1,2			130,0	1,02	52,8
78	Load & Carry zum Brecher	1,2			136,3	1,06	54,3
79	Load & Carry zum Brecher	1,2			136,5	1,14	58,7
80	Load & Carry zum Brecher	1,5			112,8	1,37	53,3
81	Warten	10,2				2,32	13,5
82	Load & Carry zum Brecher	1,4			163,6	0,86	36,8
83	Load & Carry zum Brecher	1,2			148,5	1,08	55,2
84	Load & Carry zum Brecher	1,2			158,1	1,20	58,9
85	Load & Carry zum Brecher	1,4			163,9	1,27	56,8
86	Load & Carry zum Brecher	1,3			153,5	0,89	40,1
87	Warten	1,9				0,81	26,6
88	Load & Carry zum Brecher	1,4			167,5	1,02	42,5
89	Load & Carry zum Brecher	1,4			159,4	1,23	51,8
90	Load & Carry zum Brecher	1,5			156,5	1,16	47,4
91	Load & Carry zum Brecher	1,5			164,7	1,24	49,1
92	Load & Carry zum Brecher	1,5			165,8	1,23	48,2
93	Load & Carry zum Brecher	1,6			169,4	1,19	44,8
94	Load & Carry zum Brecher	1,5			167,9	1,22	48,8
95	Load & Carry zum Brecher	1,7			171,1	1,31	46,4
96	Load & Carry zum Brecher	1,5			178,9	1,27	50,3
97	Load & Carry zum Brecher	1,7			193,3	1,43	51,5
98	Load & Carry zum Brecher	1,6			189,9	1,24	45,3
99	Load & Carry zum Brecher	1,5			167,5	1,28	50,2
100	Load & Carry zum Brecher	1,5				1,26	51,3
101	Load & Carry zum Brecher	1,3				1,12	50,7
102	Load & Carry zum Brecher	1,8				1,27	42,9
103	Load & Carry zum Brecher	1,4				1,22	52,6
104	Load & Carry zum Brecher	1,7				1,36	48,8
105	Load & Carry zum Brecher	1,4				1,17	50,4
106	Load & Carry zum Brecher	1,4				1,14	46,8

**Anhang III-6: Energiebedarf des Radladers in unterschiedlichen Arbeitsphasen an Versuchstag 2**

Betrieb: <b>Tagebau 6</b>	Datum der Messung: <b>25.6.2014</b>
Ladegerät: <b>Komatsu WA600-6</b>	

Vorgang Nr.	Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Fahrstrecke [m]	Kraftstoffverbrauch		
					[Liter]	[Liter/h]	
1	Warten auf SKW	0,6			0,46	46,8	
2	Beladung Komatsu HD605	4,1	6	41	227,4	3,88	56,7
3	Sohlenpflege auf Fahrweg	4,6			977,7	5,22	
	Verlassen der Ladestelle	1,4			391,1	1,67	73,6
	Abschieben von Gestein	0,6			76,7	0,95	100,7
	Warten (Vorbeifahrt SKW)	0,5				0,48	58,4
	Rückfahrt zur Ladestelle	2,2			510,0	2,12	59,3
4	Arbeiten am Haufwerk	1,9			21,7	2,23	71,5
5	Beladung Komatsu HD605	4,6	6	46	234,0	5,35	70,0
6	Arbeiten am Haufwerk	2,4			156,0	2,83	71,2
7	Warten auf SKW	1,9				0,89	29,5
8	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	46	206,5	3,95	61,7
9	Arbeiten am Haufwerk	1,5			126,7	1,52	62,5
10	Warten auf SKW	4,0				1,36	20,2
11	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	231,1	3,77	56,3
12	Arbeiten am Haufwerk	3,8			318,6	3,95	62,1
13	Beladung Komatsu HD605	4,9	6	49	254,9	5,55	67,7
14	Arbeiten am Haufwerk	1,8			114,9	1,98	66,0
15	Entfernen Knäpper	1,0			86,9	1,08	66,5
16	Warten auf SKW	1,8				0,90	29,8
17	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	46	218,8	3,78	59,5
18	Arbeiten am Haufwerk	1,5			96,7	1,44	58,0
19	Entfernen Knäpper	1,3			88,6	1,28	59,4
20	Warten auf SKW	2,4				0,97	24,0
21	Beladung Komatsu HD605	4,2	5	50	232,2	4,05	58,1
22	Arbeiten am Haufwerk	1,4			110,6	1,24	53,4
23	Warten auf SKW	2,9				1,07	22,4
24	Beladung Komatsu HD605	4,1	5	49	218,5	3,83	55,7
	<i>Systemausfall</i>						
25	Warten auf SKW	2,2			0,8	0,46	12,2
26	Beladung Komatsu HD605	4,6	6	46	255,0	4,73	62,3
27	Sohlenpflege an Ladestelle	0,3			36,5	0,22	47,5
28	Warten auf SKW	0,4				0,40	55,5
29	Beladung Komatsu HD405	3,0	4	44	162,5	2,76	56,7
30	Sohlenpflege an Ladestelle	0,3			35,4	0,24	40,6
31	Arbeiten am Haufwerk	0,4			40,3	0,35	48,4
32	Warten auf SKW	0,4				0,36	59,2
33	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	45	209,6	4,05	64,3
34	Arbeiten am Haufwerk	1,1			86,8	1,18	62,8
35	Entfernen Knäpper	1,0			91,1	0,90	58,3
36	Warten auf SKW	0,4				0,36	61,1
37	Beladung Komatsu HD405	2,9	4	43	144,4	2,70	56,6
38	Beladung Komatsu HD605	3,9	5	47	195,0	4,03	62,0
39	Entfernen Knäpper	0,6			65,1	0,43	45,2
40	Arbeiten am Haufwerk	1,4			95,3	1,50	62,8
41	Warten auf SKW	0,4				0,36	62,3
42	Beladung Komatsu HD405	3,2	4	47	171,3	3,09	58,7
43	Arbeiten am Haufwerk	0,3			29,3	0,26	53,6
44	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	45	185,8	4,35	69,0
45	Arbeiten am Haufwerk	4,6			43,9	1,02	68,3
46	Entfernen Knäpper	0,5			56,7	0,51	59,0
47	Warten auf SKW	0,4				0,36	56,1
48	Beladung Komatsu HD405	3,0	4	44	182,5	2,87	58,5
49	Arbeiten am Haufwerk	0,5			45,7	0,42	53,0
50	Warten auf SKW	5,0				1,44	17,3

Fortsetzung Anhang III-6

Vorgang		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Fahrstrecke [m]	Kraftstoffverbrauch	
Nr.						[Liter]	[Liter/h]
51	Beladung Komatsu HD605	5,2	6	52	299,6	5,64	65,5
52	Arbeiten am Haufwerk	1,0			89,7	1,03	63,9
53	Entfernen Knäpper	1,5			153,8	1,49	60,8
54	Warten auf SKW	1,6				0,77	29,5
55	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	206,7	4,16	62,8
56	Entfernen Knäpper	1,0			100,1	0,90	55,9
57	Arbeiten am Haufwerk	2,0			158,2	2,19	66,3
58	Warten auf SKW	0,3				0,29	65,0
59	Beladung Komatsu HD405	3,1	4	46	173,2	3,16	61,6
60	Beladung Komatsu HD605	4,9			285,0	5,67	
	Ladezeit	4,5	6	45	241,0	5,26	70,8
	Entfernen Knäpper	0,5			44,0	0,41	53,6
61	Entfernen Knäpper	0,6			46,1	0,58	61,6
62	Arbeiten am Haufwerk	0,6			62,5	0,62	64,9
63	Warten auf SKW	0,4				0,44	63,8
64	Beladung Komatsu HD405	3,0	4	45	176,3	3,04	60,9
65	Arbeiten am Haufwerk	0,8			57,1	0,84	63,9
66	Entfernen Knäpper	1,9			175,6	2,05	65,9
67	Warten auf SKW	0,3				0,29	65,0
68	Beladung Komatsu HD605	5,2			249,0	5,22	
	Ladezeit	4,4	6	44	249,0	4,57	62,4
	Wartezeit	0,8				0,65	48,3
69	Arbeiten am Haufwerk	0,4			28,5	0,33	55,8
70	Warten auf SKW	0,4				0,36	61,5
71	Beladung Komatsu HD405	2,8	4	41	157,9	2,82	61,3
72	Arbeiten am Haufwerk	0,6			64,6	0,62	61,7
73	Entfernen Knäpper	0,7			71,8	0,81	65,8
74	Beladung Komatsu HD605	4,5	6	45	252,6	5,26	70,0
75	Entfernen Knäpper	0,6			64,7	0,52	55,6
76	Arbeiten am Haufwerk	0,5			61,1	0,52	60,4
77	Warten auf SKW	0,4				0,42	69,6
78	Beladung Komatsu HD405	3,8			131,7	3,21	
	Ladezeit	2,4	3	48	131,7	2,49	62,5
	Wartezeit	1,4				0,72	30,9
79	Beladung Komatsu HD605	4,4	5	53	253,3	4,57	62,3
80	Arbeiten am Haufwerk	0,4			35,4	0,39	58,3
81	Warten auf SKW	3,7				1,65	26,7
	<i>Systemausfall</i>						
82	Warten auf SKW	6,8				1,41	12,5
83	Beladung Komatsu HD605	4,4	6	44	256,9	4,52	61,5
84	Entfernen Knäpper	0,8			103,1	0,69	53,5
85	Arbeiten am Haufwerk	1,6			85,6	1,44	52,7
86	Warten auf SKW	1,7				0,77	27,7
87	Beladung Komatsu HD605	4,2	5	50	199,2	4,34	62,3
88	Arbeiten am Haufwerk	2,7			200,4	2,92	64,9
89	Entfernen Knäpper	0,7			67,1	0,66	58,0
90	Warten auf SKW	0,7				0,55	45,0
91	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	45	211,4	3,99	62,9
92	Arbeiten am Haufwerk	0,7			36,4	0,62	57,5
93	Entfernen Knäpper	1,6			140,4	1,62	60,0
94	Warten auf SKW	1,4				0,78	31,8
95	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	45	186,4	3,84	61,4
96	Arbeiten am Haufwerk	0,4			21,7	0,46	62,2
97	Entfernen Knäpper	1,7			155,1	1,81	62,6
98	Warten auf SKW	2,3				0,93	24,2
99	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	224,6	4,12	61,2
100	Warten auf SKW	4,6				1,43	18,6

Fortsetzung Anhang III-6

Vorgang		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Fahrstrecke [m]	Kraftstoffverbrauch	
Nr.						[Liter]	[Liter/h]
101	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	214,7	4,05	61,3
102	Entfernen Knäpper	1,1			128,2	1,10	58,6
103	Arbeiten am Haufwerk	2,2			151,8	2,52	69,8
104	Warten auf SKW	1,0				0,68	40,1
105	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	209,3	4,19	62,7
106	Warten auf SKW	3,5				1,24	21,5
107	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	203,5	3,94	59,1
108	Arbeiten am Haufwerk	0,5			28,8	0,50	58,0
109	Warten auf SKW	6,0				1,74	17,4
110	Beladung Komatsu HD605	3,4	5	41	194,0	3,34	58,5
111	Arbeiten am Haufwerk	1,7			129,9	1,87	67,1
112	Entfernen Knäpper	0,5			48,9	0,47	59,6
113	Sohlenpflege an Ladestelle	2,1			192,2	2,33	68,3
114	Beladung Komatsu HD605	3,5	5	42	195,1	4,06	69,0
115	Arbeiten am Haufwerk	1,2			67,1	1,25	63,1
116	Entfernen Knäpper	2,3			223,9	2,28	60,8
117	Warten auf SKW	0,5				0,43	50,7
118	Beladung Komatsu HD605	4,1	5	49	212,6	4,17	61,8
119	Arbeiten am Haufwerk	1,0			91,3	1,04	59,8
120	Warten auf SKW	2,7				1,00	22,3
121	Beladung Komatsu HD605	3,9	5	47	203,2	3,99	61,7
122	Arbeiten am Haufwerk	2,6			169,2	2,64	61,7
123	Entfernen Knäpper	0,6			56,4	0,54	56,8
124	Warten auf SKW	1,0				0,60	36,7
125	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	45	213,6	3,88	61,2
126	Arbeiten am Haufwerk	1,8			136,3	1,99	65,4
127	Entfernen Knäpper	0,5			55,8	0,59	68,2
128	Warten auf SKW	8,7				2,26	15,5
129	Beladung Komatsu HD605	3,9	5	46	201,0	3,90	61,0
130	Entfernen Knäpper	0,5			52,8	0,36	46,5
131	Arbeiten am Haufwerk	1,1			80,7	1,19	65,9
132	Warten auf SKW	2,4				1,07	26,3
133	Beladung Komatsu HD605	3,6	5	44	186,7	3,60	59,8
134	Arbeiten am Haufwerk	1,2			80,0	1,21	58,8
135	Entfernen Knäpper	0,7			70,7	0,62	54,4
136	Warten auf SKW	2,4				0,94	24,1
137	Beladung Komatsu HD605	3,8	5	45	195,6	3,78	60,2
138	Arbeiten am Haufwerk	0,8			49,7	0,78	57,3
139	Entfernen Knäpper	1,9			179,2	1,78	57,4
140	Warten auf SKW	1,4				0,74	30,9
141	Beladung Komatsu HD605	3,7	5	44	205,6	3,69	60,2
142	Warten auf SKW	4,1				1,25	18,5
143	Beladung Komatsu HD605	3,9	5	46	214,7	3,76	58,0
144	Entfernen Knäpper	0,5			52,9	0,40	47,5
145	Sohlenpflege an Ladestelle	1,5			199,2	1,48	61,1
146	Warten auf SKW	2,0				1,00	29,3
147	Beladung Komatsu HD605	4,1	5	50	220,3	4,20	60,8
148	Arbeiten am Haufwerk	2,4			160,7	2,33	59,4
149	Entfernen Knäpper	0,8			79,9	0,68	54,0
150	Warten auf SKW	4,2				1,35	19,4
151	Beladung Komatsu HD605	3,7	5	44	203,5	3,70	60,6
152	Entfernen Knäpper	0,6			54,0	0,44	45,7
153	Arbeiten am Haufwerk	0,9			91,8	0,79	53,8
154	Warten auf SKW	2,2				0,85	23,4
155	Beladung Komatsu HD605	4,1	5	50	225,3	4,07	58,7
156	Warten	0,7				0,42	34,6
157	Umsetzen	0,5			37,1	0,26	32,6

Fortsetzung Anhang III-6

Vorgang		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Fahrstrecke [m]	Kraftstoffverbrauch	
Nr.						[Liter]	[Liter/h]
158	Entfernen Knäpper	1,2			130,0	0,82	42,5
159	Warten auf SKW	1,5				0,72	29,0
160	Beladung Komatsu HD605	3,6	5	43	209,2	3,45	58,1
161	Warten auf SKW	3,8				1,13	17,8
162	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	229,6	3,87	58,4
163	Arbeiten am Haufwerk	1,7			81,3	1,83	66,9
164	Warten auf SKW	0,7				0,52	43,6
165	Beladung Komatsu HD405	3,0	4	45	176,4	2,82	56,7
166	Umsetzen zur Werkstatt	0,6			100,0	0,52	55,1
167	Sohlenpflege auf Fahrweg	0,2			23,1	0,28	71,2
168	Umsetzen zur Werkstatt	3,0			716,5	4,04	80,0
169	Warten	0,5				0,47	54,2
170	Load & Carry zum Brecher	1,4			138,2	1,20	51,5
171	Load & Carry zum Brecher	1,0			111,5	1,07	63,9
172	Load & Carry zum Brecher	1,1			117,2	1,21	67,4
173	Load & Carry zum Brecher	1,0			112,1	1,05	63,3
174	Load & Carry zum Brecher	1,4			125,4	1,42	62,8
175	Load & Carry zum Brecher	1,1			128,1	1,06	60,8
176	Load & Carry zum Brecher	1,3			155,7	1,40	63,4
177	Load & Carry zum Brecher	1,2			137,4	1,32	64,6
178	Load & Carry zum Brecher	1,2			141,1	1,17	58,2
179	Load & Carry zum Brecher	1,2			134,3	1,23	61,8
180	Load & Carry zum Brecher	1,2			141,9	1,17	59,5
181	Load & Carry zum Brecher	1,2			154,7	1,25	62,6
182	Load & Carry zum Brecher	1,3			163,5	1,32	60,4
183	Load & Carry zum Brecher	1,3			163,6	1,29	59,4
184	Load & Carry zum Brecher	1,3			166,9	1,36	64,7
185	Load & Carry zum Brecher	1,4			168,8	1,39	61,7
186	Load & Carry zum Brecher	1,2			156,0	1,20	60,0
187	Load & Carry zum Brecher	1,3			180,4	1,38	63,1
188	Load & Carry zum Brecher	1,6			199,9	1,53	58,0

Anhang III-7: Energiebedarf des Radladers in unterschiedlichen Arbeitsphasen an Versuchstag 3

Betrieb: <b>Tagebau 6</b>	Datum der Messung: <b>26.6.2014</b>
Ladegerät: <b>Komatsu WA600-6</b>	

Vorgang		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Fahrstrecke [m]	Kraftstoffverbrauch	
Nr.						[Liter]	[Liter/h]
1	Umsetzen zur Ladestelle	3,0			780,4	2,00	40,5
2	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	47	229,3	4,72	72,2
3	Arbeiten am Haufwerk	2,3			164,4	2,59	66,5
4	Entfernen Knäpper	0,7			80,3	0,72	66,3
5	Warten auf SKW	1,5				0,93	37,2
6	Beladung Komatsu HD605	4,1	5	49	228,1	3,95	57,6
7	Warten auf SKW	0,3				0,28	59,6
8	Beladung Komatsu HD405	2,6	3	51	135,0	2,28	53,6
9	Entfernen Knäpper	0,8			76,0	0,65	51,1
10	Arbeiten am Haufwerk	1,0			86,0	1,09	62,6
11	Beladung Komatsu HD605	4,5	5	54	271,5	4,77	64,0
12	Arbeiten am Haufwerk	0,9			68,1	1,02	65,2
13	Warten auf SKW	0,4				0,44	59,2
14	Beladung Komatsu HD405	2,6	3	51	149,7	2,55	59,7
15	Warten auf SKW	1,0				0,72	42,8

Fortsetzung Anhang III-7

Vorgang		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Fahrstrecke [m]	Kraftstoffverbrauch	
Nr.						[Liter]	[Liter/h]
16	Beladung Komatsu HD605	4,4	5	53	251,7	4,16	56,7
17	Arbeiten am Haufwerk	1,3			112,1	1,31	60,9
18	Warten auf SKW	0,3				0,33	61,6
19	Beladung Komatsu HD405	3,3	3	65	177,9	3,28	60,5
20	Sohlenpflege an Ladestelle	1,7			155,6	2,08	74,1
21	Beladung Komatsu HD605 <i>Systemausfall</i>	1,5			67,9	1,90	74,2
22	Warten auf SKW	3,4				0,71	12,6
23	Beladung Komatsu HD605	4,2	5	50	222,2	3,91	55,9
24	Warten auf SKW	0,3				0,27	56,6
25	Beladung Komatsu HD405	2,7	3	53	148,6	2,50	56,7
26	Arbeiten am Haufwerk	1,0			61,3	0,97	61,7
27	Entfernen Knäpper	0,8			85,4	0,79	59,7
28	Warten auf SKW	0,3				0,33	60,5
29	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	47	214,7	3,89	59,3
30	Entfernen Knäpper	1,2			122,1	0,98	50,4
31	Arbeiten am Haufwerk	3,7			228,9	3,80	62,3
32	Beladung Komatsu HD605	4,2	5	51	223,9	4,41	62,5
33	Arbeiten am Haufwerk	1,4			92,6	1,34	60,0
34	Warten auf SKW	2,7				1,06	23,4
35	Beladung Komatsu HD605	4,1	5	49	202,5	3,82	56,5
36	Arbeiten am Haufwerk	1,6			82,8	1,74	67,2
37	Entfernen Knäpper	2,8			243,6	2,63	56,7
38	Warten auf SKW	0,3				0,33	62,5
39	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	47	230,0	4,04	61,4
40	Warten auf SKW	4,5				1,34	17,9
41	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	47	217,5	3,44	52,5
42	Arbeiten am Haufwerk	2,1			102,1	2,18	62,4
43	Entfernen Knäpper	0,9			92,8	0,73	47,4
44	Warten auf SKW	0,8				0,56	44,3
45	Beladung Komatsu HD405	2,3	3	46	129,9	1,95	50,7
46	Warten auf SKW	0,3				0,23	56,7
47	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	228,3	4,00	60,4
48	Arbeiten am Haufwerk	1,8			131,4	1,75	57,1
49	Warten auf SKW	0,6				0,47	51,3
50	Beladung Komatsu HD405	2,3	3	46	123,5	2,18	57,1
51	Warten auf SKW	0,2				0,25	62,2
52	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	224,7	4,19	62,8
53	Entfernen Knäpper	0,9			69,0	0,74	47,2
54	Arbeiten am Haufwerk	0,7			68,1	0,70	63,5
55	Warten auf SKW	0,3				0,30	56,9
56	Beladung Komatsu HD405	2,5	3	50	140,0	2,35	56,7
57	Entfernen Knäpper	0,7			67,9	0,56	50,6
58	Beladung Komatsu HD605	4,3	5	51	223,1	4,53	63,6
59	Warten auf SKW	1,3				0,67	29,6
60	Beladung Komatsu HD405	2,5	3	50	137,5	2,05	14,1
61	Arbeiten am Haufwerk	1,4			38,9	1,21	53,2
62	Beladung Komatsu HD605	4,5	5	54	231,4	4,75	63,0
63	Warten auf SKW	0,6				0,45	47,8
64	Beladung Komatsu HD405	3,3	4	49	154,3	3,19	58,3
65	Arbeiten am Haufwerk	1,3			105,3	1,29	60,6
66	Beladung Komatsu HD605	4,5	5	54	224,9	4,89	65,0
67	Arbeiten am Haufwerk	3,2			176,4	3,23	60,9
68	Entfernen Knäpper	2,4			246,8	2,40	61,4
69	Beladung Komatsu HD605	4,3	5	51	228,5	4,75	66,7
70	Warten auf SKW	6,8				1,80	15,8

Fortsetzung Anhang III-7

Vorgang		Dauer [min]	Lade- spiele	Ø Ladespiel- dauer [Sek]	Fahrstrecke [m]	Kraftstoffverbrauch	
Nr.						[Liter]	[Liter/h]
71	Beladung Komatsu HD605	4,1	5	49	226,5	3,83	55,7
72	Entfernen Knäpper	0,6			58,5	0,49	49,4
73	Arbeiten am Haufwerk	2,6			182,4	2,83	65,7
74	Warten auf SKW	1,3				0,72	34,1
75	Beladung Komatsu HD605	3,6	5	43	209,4	3,71	62,0
76	Sohlenpflege an Ladestelle	0,3			18,1	0,30	57,3
77	Warten auf SKW	3,5				1,15	19,7
78	Beladung Komatsu HD605	4,3	5	52	245,6	4,52	62,9
79	Arbeiten am Haufwerk	1,2			69,3	1,27	66,3
80	Entfernen Knäpper	2,7			246,9	2,49	55,4
81	Warten auf SKW	0,3				0,31	61,6
82	Beladung Komatsu HD605	3,7	5	45	206,1	4,19	67,6
83	Entfernen Knäpper	1,9			137,1	2,05	64,1
84	Warten auf SKW	0,3				0,30	63,3
85	Beladung Komatsu HD405	2,6	3	52	160,6	2,70	61,7
86	Arbeiten am Haufwerk	0,8			48,5	0,71	52,4
87	Beladung Komatsu HD605	4,4	5	53	249,6	4,75	64,3
88	Arbeiten am Haufwerk	0,9			75,8	1,09	72,4
89	Warten auf SKW	0,3				0,30	58,1
90	Beladung Komatsu HD405	2,4	3	47	129,0	2,48	63,2
91	Entfernen Knäpper	0,5			51,3	0,49	55,6
92	Arbeiten am Haufwerk	0,5			35,3	0,58	75,0
93	Beladung Komatsu HD605	4,1	5	49	229,0	4,72	69,5
94	Entfernen Knäpper	0,9			96,8	0,89	64,0
95	Warten auf SKW	0,4				0,36	61,0
96	Beladung Komatsu HD405	4,2			234,3	4,72	
	Ladezeit	3,3	4	49	180,3	3,50	64,4
	Arbeiten am Haufwerk	1,0			54,0	1,21	75,3
97	Warten auf SKW	0,3				0,28	67,4
98	Beladung Komatsu HD605	3,9	5	47	217,5	4,22	64,9
99	Arbeiten am Haufwerk	0,3			22,9	0,32	57,3
100	Warten auf SKW	2,0				0,97	29,9
101	Beladung Komatsu HD405	2,5	3	50	156,4	2,12	51,0
102	Arbeiten am Haufwerk	1,3			94,6	1,44	67,4
103	Beladung Komatsu HD605	4,0	5	48	214,6	4,40	65,7
104	Entfernen Knäpper	2,2			225,0	2,30	63,7
105	Arbeiten am Haufwerk	0,6			39,3	0,71	75,2
106	Warten auf SKW	4,9				1,49	18,3
107	Beladung Komatsu HD605	3,9	5	46	220,6	3,71	57,9
108	Arbeiten am Haufwerk	2,4			117,1	2,46	63,1
109	Entfernen Knäpper	1,5			164,6	1,47	57,1
110	Warten auf SKW	0,6				0,41	44,8
111	Beladung Komatsu HD605	4,2	5	51	231,3	4,40	62,6
112	Umsetzen zur Werkstatt	3,6			801,9	3,97	66,9

## Anhang IV Energie- und Leistungsdaten Primärbrecher

**Anhang IV-1:** Aufgabemengen sowie Durchsatz und Energieverbrauch des Primärbrechers an den Produktionstagen von Untersuchungszeitraum 1

	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 4	Tag 5	Tag 6	Tag 7	Tag 8	Tag 9	Tag 10	Tag 11
<b>Aufgabe (inkl. Vorabsiebung) [Tonnen]</b>	3.827	4.409	4.450	3.503	3.860	3.373	2.816	4.040	3.049	2.125	3.511
<b>Brecherdurchsatz [Tonnen]</b>	3.564	4.130	4.178	3.329	3.600	3.145	2.607	3.799	2.853	2.026	3.335
<b>Anteil Brecherdurchsatz (an Förderung) [%]</b>	93	94	94	95	93	93	93	94	94	95	95
<b>Betriebszeit [h]</b>	9,3	10,5	7,4	5,3	6,1	6,8	7,5	7,7	5,5	4,6	7,4
<b>Produktionszeit [h]</b>	6,6	8,1	7,0	5,2	5,9	5,7	4,9	6,8	5,0	3,9	6,2
<b>Durchsatzleistung [Tonnen/h]</b>	384,5	397,3	565,1	622,7	577,6	460,3	351,3	499,9	507,2	441,8	449,8
<b>Leerlaufzeit [h]</b>	2,7	2,4	0,4	0,1	0,2	1,1	2,6	0,9	0,5	0,7	1,2
<b>Anteil Leerlaufzeit (an Betriebszeit) [%]</b>	28,4	22,4	6,1	1,3	3,6	17,0	35,2	11,3	9,9	16,5	15,2
<b>Energieverbrauch [kWh]</b>	1.089	1.282	1.129	837	949	924	903	1.119	833	628	948
<b>spez. Energieverbrauch [kWh/Tonne]</b>	0,31	0,31	0,27	0,25	0,26	0,29	0,35	0,29	0,29	0,31	0,28

**Anhang IV-2:** Aufgabemengen sowie Durchsatz und Energieverbrauch des Primärbrechers an den Produktionstagen von Untersuchungszeitraum 2

	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 4	Tag 5	Tag 6	Tag 7	Tag 8	Tag 9	Tag 10
<b>Aufgabe (inkl. Vorabsiebung) [Tonnen]</b>	3.526	3.542	2.791	3.586	3.779	4.047	2.636	3.035	3.687	3.710
<b>Brecherdurchsatz [Tonnen]</b>	3.295	3.276	2.650	3.391	3.572	3.833	2.494	2.883	3.501	3.536
<b>Anteil Brecherdurchsatz (an Förderung) [%]</b>	93	93	95	95	95	95	95	95	95	95
<b>Betriebszeit [h]</b>	6,8	7,5	5,5	7,6	7,0	8,1	5,4	6,1	7,2	7,1
<b>Produktionszeit [h]</b>	6,7	7,2	5,2	6,6	6,8	7,5	4,8	5,8	6,7	6,5
<b>Durchsatzleistung [Tonnen/h]</b>	486,4	438,9	492,2	446,9	500,9	457,1	468,8	451,3	484,9	489,2
<b>Leerlaufzeit [h]</b>	0,1	0,3	0,3	1,0	0,2	0,6	0,6	0,3	0,5	0,6
<b>Anteil Leerlaufzeit (an Betriebszeit) [%]</b>	1,6	4,6	4,6	14,1	3,3	8,3	10,8	5,4	7,6	8,9
<b>Energieverbrauch [kWh]</b>	1.098	1.055	863	1.170	1.245	1.380	891	1.075	1.250	1.181
<b>spez. Energieverbrauch [kWh/Tonne]</b>	0,33	0,32	0,33	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,36	0,33

## Anhang V Evaluierung der Prozessabläufe in den beteiligten Betrieben

Ansatz	Tagebau 1	Tagebau 2	Tagebau 3	Tagebau 4	Tagebau 5	Tagebau 6	Tagebau 7	Tagebau 8	Tagebau 9	Tagebau 10
Umfangreicher Arbeitseinsatz des Ladegeräts am Haufwerk außerhalb der Beladezeiten	(x)	x	x		x	x	(x)	x	x	x
Hoher Arbeitsaufwand für das Entfernen (Radlader) bzw. Zerkleinern (Bagger) von Knäppern	x	x	x			(x)	x	x	x	(x)
Mehrmaliges Füllen u. Entleeren der Schaufel zur Steigerung des Füllungsgrads	x		x	x	x	x			x	x
Hoher Anteil der Einsatzzeiten des Hauptladegeräts für Hilfsarbeiten	(x)	(x)	x		(x)	(x)	x	x	(x)	(x)
Ladespiele mit halb gefüllter Schaufel gegen Ende einer SKW-Beladung (ggf. herabfallendes Gestein)	x		x		x	x	x			x
Modifikation der Ladeschaufel(n) durch aufgeschweißten Verschleißschutz			(x)				(x)			
Bordwanderhöhung an SKW-Mulden		x	x			(x)	(x)			
Warten auf Transportfahrzeuge mit gefüllter und angehobener Schaufel	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Aufwändiges Umsetzen des Ladegeräts (insb. beim Baggereinsatz) über mehrere Gewinnungssohlen	(x)	(x)	x		(x)	x		x	x	x
Verlassen des Gewinnungsbereichs für Betankung erforderlich		(x)		x						
Unregelmäßige Kontrollintervalle des Abnutzungszustands des Zahnsystems der Ladeschaufel(n)		x	x				x	(x)		
Unregelmäßige Kontrollintervalle von Reifendruck (SKW, Radlader) und Kettenspannung (Bagger)	(x)	x	x				x		x	
Aufwändige Rangiermanöver bedingt durch die Gestaltung der Lade-/ Entladestelle(n)	x		(x)		x		(x)		(x)	

x = zutreffend (x) = eingeschränkt zutreffend

Fortsetzung Anhang V

Ansatz	Tagebau 1	Tagebau 2	Tagebau 3	Tagebau 4	Tagebau 5	Tagebau 6	Tagebau 7	Tagebau 8	Tagebau 9	Tagebau 10
Unterschreitung der max. Nutzlast der SKWs (Bordwanderhöhung oder Heckklappe zu erwägen)	x				x			x		
Motorabschaltung aufgrund der Dauer der Wartezeiten an Lade-/ Entladestelle(n) zu erwägen		(x)	(x)		x		x			
Geschwindigkeitsreduzierung der SKWs infolge regelmäßiger Wartezeiten an Lade- und Entladestelle(n) zu erwägen					x		x			
Rampenneigung überwiegend außerhalb eines Bereichs von 8 bis 10 % Steigung/Gefälle	x		x	(x)	x	x	(x)	(x)	x	(x)
Steigungsübergänge bzw. -wechsel in Rampen(-systemen)	x	x	x		x	x		x	x	x
Verbesserungswürdiger Fahrbahnzustand bzw. unzureichende Sohlenpflegemaßnahmen	(x)	x	(x)			(x)	x			(x)
Vorfahrtregelung für bergauffahrende Transportfahrzeuge (unabhängig von Beladung) zu erwägen	x	x	x		x	x	x	x	x	x
Ausweichmanöver bedingt durch schlechte Einsehbarkeit des Streckenverlaufs					x	x		(x)		x
Erhöhte Intensität von Brems- und Beschleunigungsvorgängen (ggf. Rangiermanöver) bedingt durch geringe Kurvenradien	x		x		x	(x)		x		
Erhöhte Anzahl von Brems- und Beschleunigungsvorgängen infolge der Rampenanordnung			x		x	x		x	(x)	
Zwischenlagerung von Haufwerk auf einem Freilager	(x)					x	x	x	x	x
Rampenschüttungen vor Kipp- und Aufgabestellen (insbesondere am Vorbrecher)	x			x		x	x	x		x
Geringe Kapazität des Vorbunkers am Primärbrecher	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

x = zutreffend (x) = eingeschränkt zutreffend

## Anhang VI Maßnahmenkatalog

### Anhang VI-1: Maßnahmenkatalog (Teil A) - Ladevorgang

Ansatzpunkt	Maßnahme	Potential	Art d. Maßnahme / Erschließbarkeit
Arbeiten am Haufwerk (Auflockerung, Durchmischung) im Vorfeld der Verladung	Vermeiden	Je nach bisherigem Umfang (in beteiligten Betrieben 10 bis 15 % des Gesamtverbrauchs)	organisatorisch / kurzfristig
Entfernen (Radlader) bzw. Zerkleinern (Bagger) von Knäppern	Angepasstes Vorgehen (Nachbehandlung von Gestein nur wenn unbedingt erforderlich)	Bis zu 2 Liter Kraftstoffersparnis je vermiedenen Vorgang (u.U. mehrere 1.000 Liter/a)	organisatorisch / kurzfristig
Mehrmaliges Füllen u. Entleeren der Schaufel zur Steigerung des Füllungsgrads	Vermeiden	Jeweils Kraftstoffersparnis in der Größenordnung des Verbrauchs eines Ladespiels	organisatorisch / kurzfristig
Einsatz von Hauptladegeräten für Hilfsarbeiten	Einsatz von Maschinen geringerer Größe, Verbesserung der Kommunikation der Maschinenbediener	Hilfsarbeiten mit Hauptladegerät gleich energieintensiv wie Ladearbeit (u.U. mehrere 100 bis 1.000 Liter/a)	organisatorisch / kurzfristig
Herabfallendes Gestein von der Ladefläche, insb. gegen Ende einer SKW-Beladung	Umsichtige Arbeitsweise, keine Ausführung von "halben" Ladespielen	Je vermiedenem Beräumvorgang Kraftstoffersparnis bis zu 1 Liter	organisatorisch / kurzfristig
Schaufelausrüstung (aufgeschweißter Verschleißschutz)	Beachtung der Gewichtszunahme und Volmverringerung	vgl. Einfluss d. Füllungsgrads, spez. Verbrauchsunterschied pro Tonne Gestein bis 10 %	technisch / kurzfristig
Schaufelausrüstung (Zahnsystem)	Regelmäßige Überprüfung d. Abnutzungszustands	Bis zu 15 % weniger Verbrauch bei der Ladearbeit	technisch / kurzfristig
Aufsatzbleche an SKW-Mulden	Beachtung der Hubhöhe des Ladegeräts (nicht maximal ausreizen)	Beeinflussung des Verbrauchs je Ladespiel um 5 bis 10 %	technisch / kurzfristig
Warten auf SKW mit gefüllter u. angehobener Schaufel ohne Drehzahlrückstellung	Vermeiden Füllen der Schaufel erst bei Eintreffen eines SKW	Bis zu 35 % weniger Verbrauch während Wartezeiten	organisatorisch / kurzfristig
Fahrmanöver bei Ladespielen (Positionierung von Radlader u. SKW)	Minimierung der Fahrbewegungen bzw. der Fahrstrecke	Beeinflussung des Verbrauchs pro Tonne Gestein um bis zu 20%	organisatorisch / kurzfristig
Schwenkwinkel bei Ladespielen (Positionierung von Bagger und SKW)	Minimierung des Schwenkwinkels	Beeinflussung des Verbrauchs pro Tonne Gestein im niedrigen Prozentbereich	organisatorisch / kurzfristig
Umsetzen des Ladegeräts (insb. Bagger)	Reduzierung der Gesamtfahrstrecke pro Jahr durch Einsatzplanung	Abhängig von Ausdehnung des Tgb. und Zahl d. Ladestellenwechsel, einige 100 Liter/a	planerisch / langfristig

**Anhang VI-2: Maßnahmenkatalog (Teil B) - Transportvorgang (Fahrzeugeinsatz)**

<b>Ansatzpunkt</b>	<b>Maßnahme</b>	<b>Potential</b>	<b>Art d. Maßnahme / Erschließbarkeit</b>
Rangiervorgänge an Lade- und Entladestelle(n)	Minimierung der Fahrbewegungen Entsprechende Gestaltung der dauerhaft genutzten Entladestelle am Vorbrecher	Bis zu 70 % Kraftstoffersparnis vgl. mit unverhältnismäßig aufwändigen Fahrmanövern	organisatorisch / kurz-bis mittelfristig
Wartezeiten an Lade- und Entladestelle(n)	Motorabschaltung bei absehbaren Wartezeiten von mehreren Minuten (z.B. Brecherstillstand)	Bis zu mehrere 100 Liter/a Kraftstoffersparnis bei Senkung der Leerlaufzeit um 10 Min. pro Tag	organisatorisch / kurzfristig
Wartezeiten an Lade- und Entladestelle(n)	Fahrzeuggetriebe in Neutralstellung schalten	Bis zu 30 % Kraftstoffersparnis ggü. eingelegtem Gang	organisatorisch / kurzfristig
Ausladung der SKW (Ladevolumen und Nutzlast)	Erhöhung des Ladevolumens durch Bordwanderhöhung od. Heckklappe bei Unterschreitung der zulässigen Nutzlast	Verringerung des Gesamtenergiebedarfs des Transportvorgangs um bis zu 5 % bzw. bis zu 10.000 Liter/a	technisch / kurz-bis mittelfristig
Regelmäßige Wartezeiten an Lade- und Entladestelle(n)	Last- und Leerfahrten nicht mit max. sondern angepasster Geschwindigkeit absolvieren	Bis zu 15 % Verbrauchsenkung bei Reduzierung der Geschwindigkeit von 40 auf 30 km/h bezogen auf 100 m ebene Fahrstrecke	organisatorisch / kurzfristig

**Anhang VI-3: Maßnahmenkatalog (Teil C) - Transportvorgang (Fahrwege)**

<b>Ansatzpunkt</b>	<b>Maßnahme</b>	<b>Potential</b>	<b>Art d. Maßnahme / Erschließbarkeit</b>
Rampensteigung	Ausführung von Rampen mit einer Steigung von etwa 8 bis 10 %	Steigung < 8% Mehrverbrauch infolge überproportionaler Zunahme der Fahrzeit Steigung > 10% Mehrverbrauch durch intensiveres Beschleunigen am Rampenende (u.U. mehrere 1.000 Liter/a)	planerisch / mittel-bis langfristig
Steigungsübergänge bzw. -wechsel in Rampen(-systemen)	Einhaltung einer über die Gesamtlänge gleichbleibenden Steigung zur Vermeidung von Motorlastwechseln	~ 0,1 Liter pro Fahrt (bis zu 1.000 Liter/a) durch konst. Steigung ggü. Passage mit Steigungsänderung	planerisch / mittel-bis langfristig

Fortsetzung Anhang VI-3

Ansatzpunkt	Maßnahme	Potential	Art d. Maßnahme/ Erschließbarkeit
Fahrbahnbeschaffenheit bzw. Sohlenpflege	Herstellung u. Erhaltung von Fahrbahnzuständen mit max. 3% Rollwiderstand bzw. max. 2 cm Reifeneindringung (Sohle mit wenig Unebenheiten / befestigte Schotter- oder Erddecke)	Verglichen mit schlammigen Fahrwegen Kraftstoffersparnis bis zu 45% (u.U. mehrere 1.000 bis 10.000 Liter/a)  Weitere ~3% Kraftstoffersparnis durch Asphaltierung erreichbar	technisch / kurz- bis mittelfristig
Zwischenstopps infolge reduzierter Breite von Fahrwegen	Fahrweg verbreitern oder befestigte Ausweichstellen schaffen	Bis zu 60% Kraftstoffersparnis bei Vermeidung eines Stopps (unbeladen)	planerisch / mittel- bis langfristig
	<u>wenn technisch nicht umsetzbar</u> : Vorfahrtregelung für bergauf-fahrende Fahrzeuge	Bis zu 75% Kraftstoffersparnis bei Vermeidung eines Stopps (beladen oder auf Rampe)	organisatorisch / kurzfristig
Schlechte Einsehbarkeit von Fahrwegen, insb. Kurven	Entsprechende Planung der Streckenführung, um vorausschauendes Fahren zu ermöglichen	Bis zu 30% Kraftstoffersparnis bei konst. Geschwindigkeit vgl. mit Abbremsen u. Wiederbeschleunigen	planerisch / mittel- bis langfristig
Bemessung von Kurvenradien	Kurvenradien > Fahrzeugwendekreis, um ungehinderte Kurvendurchfahrt zu ermöglichen	Bis zu 75% Kraftstoffersparnis bei ungehinderter Kurvendurchfahrt ggü. Rangieren	planerisch / mittel- bis langfristig
180°-Kehren in Rampen(-systemen)	Vermeidung von Kehren auf Steigungs-/Gefälle-strecken, die eine Reduzierung der Geschwindigkeit erfordern	~ 0,1 bis 0,25 Liter pro Fahrt (u.U. mehrere 1.000 Liter/a) bei Fahrt mit konst. Geschwindigkeit ggü. Abbremsen u. Wiederbeschleunigen	planerisch / mittel- bis langfristig

**Anhang VI-4: Maßnahmenkatalog (Teil D) - Primäre Zerkleinerungsstufe**

<b>Ansatzpunkt</b>	<b>Maßnahme</b>	<b>Potential</b>	<b>Art d. Maßnahme / Erschließbarkeit</b>
Zwischenlagerung von Haufwerk auf einem Freilager	Vermeiden In gewissem Umfang Wartezeiten der SKWs in Kauf nehmen, darüber hinaus Möglichkeiten zur Kapazitätssteigerung des Vorbunkers erörtern	Bis zu 1,5 Liter Verbrauch je Schaufelfüllung bei Wiederaufnahme durch Radlader. Kraftstoffersparnis von mehreren 1.000 bis 10.000 Liter/a abhängig von Menge des Materialumschlags	organisatorisch / mittelfristig
Rampenschüttungen vor Kipp- und Aufgabestellen	Entladestelle am Vorbrecher als ebene Fläche ausführen, mobile Anlagen an mittel- bis langfristig genutzten Standorten ggf. absenken	Bis zu 70% weniger Verbrauch beim Rangieren von SKWs am Brecher. Kraftstoffersparnis bis zu mehrere 1.000 Liter/a	technisch / mittel- bis langfristig
Dimensionierung des Vorbunkers	Bunkerkapazität [t] mindestens auf 50 bis 75% des Stundendurchsatzes des Brechers auslegen	Reduzierung des elektr. Energiebedarfs u.U. um mehrere 10.000 kWh/a  Mehrere 100 Liter/a Kraftstoffersparnis durch Reduzierung von Wartezeiten sowie Beschleunigung des Entladevorgangs	planerisch / langfristig
Regelmäßige Leerlaufzeit des Vorbrechers infolge Minderleistung des Lade- und Transportsystems	Zeitversetzte Förderung (Laden + Transportieren) und Betrieb des Vorbrechers  Schaffung eines Materialpuffers im Vorbunker vor Brecherinbetriebnahme <i>(nur bei entsprechender Bunkerkapazität möglich)</i>	Abhängig von Leerlaufzeit und Energiebedarf der Anlage. Bei 200 kW Nennleistung bis zu 100 kWh Ersparnis je vermiedener Stunde Leerlauf	organisatorisch / kurz-bis mittelfristig