

Karlsruhe Institut für Technologie
Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen

**Validierung und Optimierung einer praxisgerechten Methode zur
Quantifizierung der CO₂-Emissionen für eine Nachhaltigkeitsbewer-
tung von Bauprozessen**

Abschlussbericht
gefördert unter dem AZ: 33485 von der
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer & Dipl.-Ing. Isabelle Ays

Karlsruhe, April 2019

Bezugsquelle:

Karlsruhe Institut für Technologie
Institut für Fahrzeugsystemtechnik
Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen
Rintheimer Querallee 2
76131 Karlsruhe

Karlsruhe Institut für Technologie
Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen

Validierung und Optimierung einer praxisgerechten Methode zur Quantifizierung der CO₂-Emissionen für eine Nachhaltigkeitsbewer- tung von Bauprozessen

Abschlussbericht
gefördert unter dem AZ: 33485 von der
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer & Dipl.-Ing. Isabelle Ays

Karlsruhe, April 2019





Projektkennblatt
der **Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Az	33485	Referat	25	Fördersumme	123.500 €
Antragstitel	Validierung und Optimierung einer praxismgerechten Methode zur Quantifizierung der CO₂-Emissionen für eine Nachhaltigkeitsbewertung von Bauprozessen				
Stichworte	CO₂, CO₂e, Baumaschinen				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
1 Jahr und 6 Monate	01.11.2017	31.04.2019			
Zwischenberichte	2				
Bewilligungsempfänger	Karlsruher Institut für Technologie KIT Institut für Fahrzeugsystemtechnik FAST			Tel	0721/608-48601
	Rintheimer Querallee 2 76131 Karlsruhe			Fax	0721/608-48609
				Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
				Bearbeiter	Dipl.-Ing. Isabelle Ays
Kooperationspartner	Herrmann Paus Maschinenfabrik GmbH (Paus), Weisig Maschinenbau GmbH (Weisig), Schwenk GmbH & Co. KG (Schwenk), Walter Straßenbau KG (Walter), Atlas Weyhausen GmbH (weycor), Ammann Group, BAUER Maschinen GmbH, Bomag Fayat Group, CNH industrial, J C Bamford Excavators Ltd. (JCB), Liebherr Group, Volvo Construction Equipment, Wirtgen Group				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

CO₂-Emissionen sind nach aktuellem Stand des Wissens eine der Ursachen für eine globale Klimaerwärmung mit nicht absehbaren, negativen Folgen für die Menschheit. Heute besteht ein Defizit in der Quantifizierung des Einflusses von CO₂-Reduktionsmaßnahmen von mobilen Baumaschinen auf Basis einer gesamtheitlichen Betrachtung. Aktuelle Methoden sind nicht geeignet, Einflüsse von CO₂-Reduktionsmaßnahmen auf eine Verbesserung des Weltklimas aufzuzeigen. Es wurde daher eine Methode entwickelt, die auf der einen Seite eine ganzheitliche Bilanzierung modellhaft zulässt, auf der anderen Seite aber auch detailliert genug ist, einzelne Einflüsse zu berücksichtigen. Eine Validierung der entwickelten Methode ist bisher nicht erfolgt und wird im beantragten Projekt für ausgewählte Baumaschinenapplikationen durchgeführt

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Motiviert durch den Klimawandel ist es wichtig zu verstehen, welche Quellen und durch welche Einflüsse Treibhausgasemissionen entstehen. Verschiedene Industriebereiche haben bereits eine CO₂e Quantifizierungsmethode entwickelt, wie zum Beispiel das Vecto Tool für LKWs. Eine belastbare CO₂e Quantifizierungsmethode für Baumaschinen in ihren Bauprozessen, welche es ermöglicht den Effekt von Recycling Material, Maschineneffizienzen, Prozesseffizienzen, Betriebseffizienzen und nachhaltigen Kraftstoffen in der CO₂e Bilanz zu sehen, wurde im Rahmen dieses Projektes entwickelt. Dabei wird die Bauanwendung in Teilprozesse zerlegt. Bei jedem Teilprozess werden die CO₂e Emissionen quantifiziert und die Summe ergibt die gesamten CO₂e Emissionen. Bei der CO₂e Quantifizierung der Teilprozesse wurden Einflussfaktoren, kategorisiert nach dem 4 - Säulen Modell der CECE (Committee for European Construction Equipment). Diese Faktoren wurden über die Literaturrecherche und Experten-Umfrage nach der Delphi Methode verifiziert und ein Wertebereich konnte dafür definiert werden. Am Beispiel eines Baggers konnte im Anschluss gezeigt werden, wie die Faktoren sich auf die Menge an emittierenden Treibhausgasemissionen auswirkt (Faktoren-Einflussanalyse). Die CO₂e Quantifizierungsmethode konnte dann mithilfe von Messungen auf Baustellen validiert werden. Die CO₂e Quantifizierungsmethode wurde im Rahmen dieses Projektes verifiziert und validiert. Parallel dazu wurde ein begleitendes Tool in Python entwickelt, welches es ermöglicht die CO₂e Emissionen von jedem beliebigen Teilprozess zu quantifizieren.

Des Weiteren wurde im Rahmen dieses Projektes eine Formel entwickelt um die Treibhausgasemissionen durch Zerstörung von CO₂e Senken vor Beginn der Bauarbeiten zu quantifizieren. Es konnte am Beispiel einer BK10 Straße gezeigt werden, dass diese in der CO₂e Quantifizierungsmethode nicht fehlen dürfen.

Ergebnisse und Diskussion

Weiterentwicklung der CO_{2e} Quantifizierungsmethode

- Zerlegung der Bauanwendung in Teilprozesse
- Berücksichtigung der Treibhausgasemissionen von: CO_{2e} Senken Verluste durch Abholzung und Bodenbewegung vor Bauarbeiten und Quantifizierung der Effekte durch eine Wiederaufforstung nach Bauarbeiten, Baumaterialherstellung, Transport von Baumaterial, Baumaschinen
- Entwicklung der CO_{2e} Quantifizierungsformel für den Transport von Baumaterial
- Entwicklung der CO_{2e} Quantifizierungsformel für Baumaschinen
- Definition der Einflussfaktoren und ihre Wertebereiche für die Baumaschinen CO_{2e} Quantifizierungsformel
- Einflussanalyse dieser Faktoren am Beispiel eines Baggers. Dabei war zu sehen, dass das Wetter das größte Einflusspotenzial besitzt.
- Messungen, Beobachtung und Befragung auf den Beispielsbaustellen um die Methode zu validieren. CO_{2e} Quantifizierungsergebnisse ermittelt mit der Methode entsprechen den Ergebnissen ermittelt auf der Baustelle.
- Weiterentwicklung eines begleitenden Tools. Das Tool funktioniert unter der Annahme, dass der Toolnutzer keine Eingabefehler macht und die CO_{2e} Quantifizierungsmethode kennt. Am Tool sind weitere Entwicklungsschritte notwendig, sodass auch ein ungeübter Nutzer das Tool problemlos nutzen kann.
- Entwicklung der CO_{2e} Quantifizierungsformel für CO_{2e} Senken Verluste durch Abholzung und Bodenbewegung vor Bauarbeiten und Quantifizierung der Effekte durch eine Wiederaufforstung nach Bauarbeiten

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Der Zwischenstand und die Ergebnisse des Projektes wurden in 3 Workshops der Industrie am KIT, in Karlsruhe vorgestellt. Eine Zwischenergebnisvorstellung erfolgte vor der Universität in Braunschweig, welche ähnliche Themen für Landmaschinen bearbeiten.

Es ist vorgesehen, dass Teile dieses Projektes in einer Doktorarbeit veröffentlicht werden. Außerdem ist vorgesehen die Ergebnisse dieses Projekts bei Baumaschinen und Landmaschinen Treffen vorzustellen, wie in der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. (FVB), in der CECE (Committee for European Construction Equipment) Sitzung und im Verein MOBIMA e.V.

Fazit

Zusammenfassend wurde im Rahmen dieses Projekts die CO_{2e} Quantifizierungsmethode überarbeitet, verifiziert und validiert. Parallel wurde ein Tool entwickelt, welches bei der CO_{2e} Quantifizierung von Bauprozessen unterstützen soll.

In diesem Projekt konnte nur eine bestimmte Auswahl an Prozessen validiert werden. Der Bagger führt in der Realität durchaus mehr Prozesse aus als die beiden Prozesse, die untersucht und validiert worden sind. Die CO_{2e} Quantifizierungsmethode am Radlader konnte im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht und somit nicht validiert werden. In einem nächsten Schritt sollte die CO_{2e} Quantifizierungsmethode ebenfalls für den Steinbruch und Spezialtiefbau validiert werden.

Das begleitende CO_{2e} Quantifizierungstool „CO₂SimCo“ sollte weiterentwickelt werden, so dass alle Funktionen, die ein Nutzer benötigen kann, implementiert sind.

Inhalt

Projektkennblatt.....	5
Inhalt.....	7
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	10
Begriffe.....	12
Zusammenfassung.....	15
1 Einleitung.....	16
1.1 Motivation.....	16
1.2 Zielsetzung.....	16
1.3 Aufbau des Abschlussberichts.....	17
2 Methode.....	17
2.1 CO ₂ e Emissionen.....	17
2.2 Systemgrenzen.....	18
2.3 Quantifizierungsmethode.....	19
3 Verifizierung.....	22
3.1 Faktoren Verifizierung.....	23
3.2 Wertebereich der Faktoren.....	29
3.3 Einflussanalyse.....	29
4 Validierung.....	31
4.1 Maschineneffizienz.....	31
4.2 Prozesseffizienz und Betriebseffizienz.....	33
4.2.1 Prozesseffizienz.....	33
4.2.2 Beschreibung des Vorgehens.....	34
4.2.3 Ergebnisse.....	40
4.2.4 Fazit.....	53
4.3 Alternative Energieträger.....	53
5 Tool.....	54
5.1 Anforderung an das Tool.....	54
5.2 Aufbau des Tools.....	56
5.3 Weitere Schritte für das Tool.....	59
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	59
6.1 Zusammenfassung und allgemeiner Ausblick.....	59
6.2 Erweiterter Ausblick.....	61

6.3	Simulation: Quantifizierung der CO _{2e} Emissionen durch die Zerstörung und neue Entstehung von CO _{2e} Senken am Beispiel einer BK10 Straße.....	68
6.4	Fazit	70
7	Literaturverzeichnis	71
8	Anhang.....	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der CO ₂ e-Quantifizierungsmethode	20
Abbildung 2: Arbeitsleistung und die dabei emittierende CO ₂ e Menge von unterschiedlichen Größen an Radladern für eine selbe Aufgabe.	25
Abbildung 3: Leistungsangebot des Fahrers einer mobilen Arbeitsmaschine [basiert auf 62]	27
Abbildung 4: Schematische Darstellung einer möglichen Prozesseffizienzsteigerung durch Änderung der eingesetzten Baumaschinen und des Bauverfahrens	33
Abbildung 5 : Bagger im Einsatz in Ludwigsburg.....	34
Abbildung 6 : Anbaugeräte des Baggers in Ludwigsburg	35
Abbildung 7 : Erdbauwalze in Ludwigsburg	36
Abbildung 8 : <i>Baumaschinen im Einsatz in Mannheim</i>	37
Abbildung 9: Vorgehensweise bei der Messung der Sicht bei mobilen Arbeitsmaschinen [51].....	39
Abbildung 10: Darstellung, wie in Ludwigsburg und Mannheim die Sichtqualität erfasst worden ist	40
Abbildung 11: Beispielhaftes Ergebnis der Sichtbedingungsbewertung um den Bagger.....	40
Abbildung 12: Schematischer Aufbau des Tools	56
Abbildung 13: Tool Hauptseite.....	57
Abbildung 14: Tool- Neues Projekt	57
Abbildung 15: Parametereingabe des neuen Projekts.....	58
Abbildung 16: 6 Datenbanken: Projekt-, Prozess-, Maschinen-, Material-, Betriebsbedingungen- und Kraftstoff- Datenbanken.....	58
Abbildung 17: Treibhausgasemissionen beim Bau einer BK10 Straße	69
Abbildung 18: Treibhausgasemissionen beim Bau einer BK10 Straße für die Betrachtungsgrenze von 30 Jahren.....	70
Abbildung 19: Vergleich zwischen der Verlustauswirkung der Ökodisruption und des Kompensationseffekt der Wiederherstellung am Beispiel einer BK1070	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug der GWP-Werte aus dem 5. Assessment-Bericht [8]	18
Tabelle 2: Zu verifizierende Faktoren aus Formeln (4) bis (7)	23
Tabelle 3: Treibhausgasemissionen von flüssigen alternativen Energieträgern [65–71]	28
Tabelle 4: Wertebereich der Faktoren	29
Tabelle 5: Baggerdaten für die Einflussanalyse.....	30
Tabelle 6: Ergebnisse der Einflussanalyse am Beispiel eines Baggers.....	31
Tabelle 7: Effizienzverbesserung durch veränderte Motorentechnologie	32
Tabelle 8: Effizienzverbesserung durch das Arbeiten im Eco-Modus.....	32
Tabelle 9: Effizienzverbesserung durch technologische Verbesserungen.....	33
Tabelle 10: Vorgehensweise zur Ermittlung der Faktoren auf beiden Baustellen für die jeweiligen Faktoren	37
Tabelle 11: Notizen der Arbeitsprozesse des Baggers am 14.12.2018	40
Tabelle 12: Zusammenfassung der Kraftstoffverbräuche des Baggers in seinen fünf Prozessen.....	43
Tabelle 13: Grundleistungsberechnung des Baggers am 14.12.2018	43
Tabelle 14: Faktorenwerte für den Bagger in Ludwigsburg	44
Tabelle 15: Kraftstoffverbräuche bzw. Treibhausgasemissionen für die Prozesse Graben und Füllen.....	44
Tabelle 16:Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis	45
Tabelle 17: Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 27.11.2018 ..	45
Tabelle 18: Notizen über die Arbeitsprozesse der Walze am 27.11.2018	46
Tabelle 19: Grundleistungsberechnung des dynamischen Verdichtens eines Bodens der Bodenklasse 4.....	47
Tabelle 20: Definition der Faktoren in Ludwigsburg für die Walze.....	47
Tabelle 21: Kraftstoffverbräuche bzw. Treibhausgasemissionen für die Prozesse Graben und Füllen.....	48
Tabelle 22:Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 27.11.2018 ...	48
Tabelle 23:Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 14.12.2018 ...	48
Tabelle 24: Menge an Treibhausgasemissionen der Straßenfertiger beim Prozess „Fahren“	49
Tabelle 25: Grundleistungsberechnung des „Asphalt legen“ für den Straßenfertiger 1 und 2.....	50
Tabelle 26: Definition der Faktoren in Mannheim für den Straßenfertiger 1	50
Tabelle 27: Definition der Faktoren in Mannheim für den Straßenfertiger 2	51
Tabelle 28: Kraftstoffverbräuche bzw. Treibhausgasemissionen für die Prozesse „Asphalt legen“ der beiden Straßenfertiger.....	52
Tabelle 29: Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 27.11.2018 ..	52
Tabelle 30: Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 27.11.2018 ..	53
Tabelle 31: Funktionelle Anforderungen [basiert auf 77]	54
Tabelle 32: Technische Anforderungen [basiert auf 77]	55
Tabelle 33: Jährliche CO ₂ -Sequestrierungswerte der Vegetation [79].....	63
Tabelle 34: Jährliche CO ₂ -Sequestrierungswerte für den Boden [80].....	64

Tabelle 35: CO ₂ -Sequestrierung während der schnellen Wachstumsphase [79]	66
Tabelle 36: Gewählte Daten für die Simulation.....	68
Tabelle 37: Ergebnisse der Simulationen mit Ursprungsvegetation für Simulation 1 eine Wiese und für Simulation 2 ein Wald	69

Begriffe

Abkürzung	Name	Einheit
$(m_{CO_2e})_{Baumaschine}$	Masse an emittierten Treibhausgasemissionen von Baumaschinen	kg CO ₂ e
$(m_{CO_2e})_{Transport}$	Masse an emittierten Treibhausgasemissionen von Lastkraftwagen	kg CO ₂ e
$\Delta_{C,s}$	jährliche CO ₂ -Sequestrierung des Bodens	kg m ⁻² yr ⁻¹
$\Delta_{C,v}$	jährliche CO ₂ -Sequestrierung der dominierten Vegetation	kg m ⁻² yr ⁻¹
$\Delta_{C,v1}$	jährliche CO ₂ -Sequestrierung der neuen bepflanzten dominierten Vegetation auf lange Dauer	kg m ⁻² yr ⁻¹
$\Delta_{C,v2}$	CO ₂ -Sequestrierung während der schnellen Wachstumsphase	kg m ⁻² yr ⁻¹
A	Stirnfläche des Fahrzeugs	-
A_{con}	gesamte betroffene Fläche durch den Bau	m ²
$A_{Material}$	Menge an Material	-
A_{res}	Restaurierungsbereich mit Vegetation	-
A_{ser}	belegte Fläche durch das Bauprodukt über seine Lebensdauer	m ²
b	mittleren spezifischen Kraftstoffverbrauch des Nutzfahrzeugs	g/ kWh
b_{eff}	Effektive Arbeitsbreite	m
B_{idle}	gesamten Kraftstoffverbrauch der Maschine im Leerlauf	-
b_{idle}	mittlere Kraftstoffverbrauch der Baumaschine im Leerlauf	l/h
BK10	Straßentyp für z.B. Hauptgeschäftstraßen, ausgelegt nach der Belastungsklasse 10. Dies entspricht einer Beanspruchung von über 3,2 bis 10 Mio. 10t-Achsübergänge	-
b_m	mittleren Kraftstoffverbrauch einer Baumaschine des gleichen Typs aus dem Jahr 1990 beim Arbeiten	l/h
$B_{working}$	gesamten Kraftstoffverbrauch der Maschinen beim Arbeiten	l
C ₂ F ₆	Hexafluorethane	-
CECE	Committee for European Construction Equipment	-
CO ₂ SimCo	das begleitende CO ₂ e Quantifizierungstool	-
CF ₄	Tetrafluormethan	-
CH ₄	Methan	-
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	-
CO ₂ e	Carbon dioxide equivalent	-
c_w	Luftwiderstandsbeiwert	-
DME	Dimethylether	-
E_{CH_4}	Menge an jährlichen emittierende Fluxen an CH ₄	kg(m ² *year)
E_{CO_2}	Menge an jährlichen emittierende Fluxen an CO ₂	kg(m ² *year)
E_{N_2O}	Menge an jährlichen emittierende Fluxen an N ₂ O	kg(m ² *year)
f	Abminderungsfaktor	-
f_1	Berücksichtigung des Schwenkwinkels	-
f_2	Berücksichtigung der Grabtiefe bzw.-höhe	-
f_3	Berücksichtigung der Entleerung	-
f_4	Berücksichtigung der Einsatzart	-
F_A	Luftwiderstandskraft	N
f_{age}	Alter der Maschine	-
$f_{construction\ complexity}$	Baustellenkomplexität	-
$f_{construction\ time}$	Einfluss durch die verfügbare Bauzeit	-

f_{diesel/CO_2e}	Konvertierungsfaktor von Diesel in CO _{2e} Emissionen	kg CO _{2e} /l Diesel
f_{driver}	Einfluss des Fahrers	-
f_{eco}	eingeschalteten Ecomodus	-
$f_{energy\ carrier/CO_2e}$	Umwandlungsfaktor vom Energieträger in CO _{2e} Emissionen	-
f_{engine}	Effekt aus dem Einfluss des Primärenergiewandlers (heute ist das der Dieselmotor)	-
f_F	Füllungsfaktor des Löffels	-
$f_{idle\ unavoidable}$	unvermeidliche Leerlaufzeiten der Baumaschine	-
$f_{knowledge\&\ skills}$	Einflüsse durch die Ausbildung, die Erfahrung und das Training bzw. Schulungen des Fahrers	-
f_L	Ladefaktor	-
$f_{machine\ technology}$	Einfluss durch die Maschinen Technologie	-
$f_{physical\&\ mental\ state}$	Geschlecht, Alter, Stimmungslage, Einstellung zur Arbeit, Soziale Umgebung, Tagesrhythmik, körperliches Befinden	-
$f_{process\ assistant}$	Einfluss der in der Baumaschine eingebauten Prozessassistentsysteme	-
F_R	Rollwiderstandskraft	N
f_R	Rollwiderstandsbeiwert	-
f_S	Auflockerungsfaktor des Bodens	-
$f_{service\ regularity}$	Einfluss durch die Instandhaltung der Maschine	-
$f_{significant\ improvement}$	Einfluss durch signifikanten technologischen Verbesserungen	-
$f_{site\ freedom}$	Einfluss durch den verfügbaren Baufreiraum	-
$f_{site\ orga.}$	Einfluss durch die Berücksichtigung der Baustellenorganisation	-
$f_{stop\&\ go}$	Verhalten des Fahrers während der Bauzeit, ob er den Motor nach jeder Bauarbeit ausschaltet	-
f_{ui}	Einfluss durch unvorhersehbare Ereignisse	-
$f_{weather}$	Einfluss des Wetters	-
$f_{workplace\&\ working\ environment}$	Einflüsse vom Arbeitsplatz wie die Arbeitsplatzergonomie und Sichtqualität aus der Kabine sowie von der Arbeitsumgebung wie das Klima, der Lärm, die Vibrationen und die Belichtung, die den Fahrer beansprucht	-
G_{after}	Wiederaufstellen von CO _{2e} Senken durch Aufforstung, wieder Bepflanzung oder wieder Begrünung nach den Bauarbeiten	kg CO _{2e}
$G_{potential}$	Gewinn durch wieder Aufstellen von CO _{2e} Senken über die Lebensdauer des Bauprodukts	kg CO _{2e}
G_{rapid}	Vegetationseffekt in den ersten Jahren	kg CO _{2e}
GWP	Global warming potential	-
$GWP_{Material}$	GWP-Wert des Materials	-
h	Schichthöhe des verdichteten Materials	m
HFC	Fluorkohlenwasserstoffen	-
H-FKW	Teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen	-
H_u	unterer Heizwert	MJ/kg
IPCC	the Intergovernmental Panel on Climate Change	-
L_{before}	Verlust an CO _{2e} Senken durch Entwaldung, Rodung, Entfernung von Grünflächen oder Mutterböden	kg CO _{2e}
LBG	Flüssiges Biogas (Methan)	-
$L_{CO_2\ e}$	Verlust an CO _{2e} Senken und damit die erhöhten entstehenden Treibhausgasemissionen	kg CO _{2e}
L_{con}	Verlust an CO _{2e} Senken während den Bauzeiten	kg CO _{2e}
$L_{con,s}$	Verluste an CO _{2e} Senken durch die Bodenbewegung von Mutterböden	kg CO _{2e}
$L_{con,v}$	Verluste an CO _{2e} Senken durch die Entfernung der Vegetation	kg CO _{2e}
$L_{con,v}$	Verluste an CO _{2e} Senken durch die Bodenbewegung von Mutterböden	kg CO _{2e}

L_{flux}	Zusatz Emissionen der Böden, die in den ersten 2-3 Jahren vom Boden ausgestoßen werden durch die Entfernung der Vegetation	kg CO _{2e}
L_{flux}	Treibhausgasereffekt von Fluxen	kg CO _{2e}
LNG	Flüssigerdgas (liquefied natural gas)	-
L_{ser}	Verlust an CO _{2e} Senken während der Instandhaltung bzw. Lebensdauer des Bauprodukts	kg CO _{2e}
$L_{ser,v}$	Verluste an CO _{2e} Senken durch die Entfernung der Vegetation	kg CO _{2e}
m_{CO_2e}	Treibhausgasemission	kg CO _{2e}
m_L	Masse der transportierten Last	kg
m_V	Masse des Fahrzeugs	kg
n	Spielzeit	1/s
n	Empfohlene Übergänge	-
N ₂	Stickstoff	-
N ₂ O	Distickstoffmonoxid	-
NO ₃ ⁻	Nitrat	-
OME ₅	Oxymethylenether Generation 5	-
OME ₅₋₆	Oxymethylenether Generation 5 bis 6	-
P_{engine}	Leistung des Motors	kW
$P_{engine, idle}$	Motorleistung im Leerlauf	kW
$P_{engine, empty}$	benötigte Motorleistung bei leer geladenem Fahrzeug (Rückfahrt)	kW
$P_{engine, full loaded}$	benötigte Motorleistung bei vollgeladenem Fahrzeug (Hinfahrt)	kW
Q_B	Grundleistung der Maschine	m ³ /h
Q_E	Effektive Arbeitsleistung der Maschine	m ³ /h
SF ₆	Schwefelhexafluorid	-
t_{con}	Bauzeit	year
t_E	Entleerungszeit	s
t_{empty}	Zeit, bei dem das Nutzfahrzeug leer geladen ist	s
t_F	Füllzeit	s
t_{FA}	Fahrzeit	s
t_{full}	Zeit, bei dem das Nutzfahrzeug vollgeladen ist	s
t_H	Hauptzeit	s
t_{idle}	Zeit, bei dem das Nutzfahrzeug im Leerlauf ist	s
t_{rapid}	Zeit der schnellen Wachstumsphase der neu bepflanzen Vegetation	year
t_{ser}	Lebensdauer des Bauprodukts	year
t_{total}	Gesamte Zeit	s
t_{work}	Arbeitszeit	s
v	Durchschnittsgeschwindigkeit	km/h oder m/h
VECTO-Tool	Tool zur CO ₂ Quantifizierung von schweren Nutzfahrzeuge	-
$V_{material}$	Volumen an Material	m ³
V_R	Löffelinhalt	m ³
WTW	Well-to-Wheel	-
z	Anzahl an Übergänge	-
η_g	Getriebewirkungsgrad	-
ρ_{Diesel}	Dieseldichte	kg/m ³
ρ_L	Luftdichte	kg/m ³

Zusammenfassung

Motiviert durch den Klimawandel ist es wichtig zu verstehen, welche Quellen und durch welche Einflüsse Treibhausgasemissionen entstehen. Es stellt sich die Frage wie die Treibhausgasemissionen von mobilen Baumaschinen entstehen und wovon diese beeinflusst werden. Um den Effekt von Recycling Material, Maschineneffizienzen, Prozesseffizienzen, Betriebseffizienzen und nachhaltigen Kraftstoffen in der CO_{2e} Bilanz zu sehen, müssen diese berücksichtigt werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine CO_{2e} Quantifizierungsmethode weiterentwickelt, die eine Bauanwendung in Teilprozesse zerlegt. Bei jedem Teilprozess werden die CO_{2e} Emissionen quantifiziert, die Summe über alle Teilprozesse ergibt die gesamten CO_{2e} Emissionen. Bei der CO_{2e} Quantifizierung der Teilprozesse wurden Einflussfaktoren, kategorisiert nach dem 4 - Säulen Modell der CECE, definiert [1]. Diese Faktoren wurden über die Literatur und Experten-Umfragen verifiziert und ein Wertebereich konnte dafür definiert werden. Am Beispiel eines Baggers konnte im Anschluss gezeigt werden, wie die Faktoren sich auf die Menge an emittierenden Treibhausgasemissionen auswirkt. Des Weiteren wurde im Rahmen dieses Projektes eine Formel entwickelt, um die Treibhausgasemissionen durch Zerstörung von CO_{2e} Senken vor Beginn der Bauarbeiten zu quantifizieren. Am Beispiel eines BK10 Straßenbaus konnte gezeigt werden, dass diese in der CO_{2e} Quantifizierungsmethode relevant sind und daher nicht fehlen dürfen.

Die CO_{2e} Quantifizierungsmethode wurde im Rahmen dieses Projektes verifiziert und validiert. Parallel dazu wurde ein begleitendes Tool entwickelt, welches es ermöglicht die CO_{2e} Emissionen von jedem beliebigen Teilprozess zu quantifizieren.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Treibhauseffekt kann auf natürliche Weise oder durch den Menschen entstehen. Als natürlicher Treibhauseffekt wird das Strahlungsgleichgewicht der Erde verstanden. Der vom Menschen verursachte (anthropogene) Treibhauseffekt entsteht durch die Aktivitäten des Menschen, wodurch die Konzentration der vorhandenen Spurengase zunimmt und somit die Temperatur der Erdoberfläche erhöht wird, der Weltmeerespiegel ansteigt und der Einfluss auf die Flora zunimmt. [2; 3]

Im Jahr 2015 haben 195 Länder der Welt das Pariser Übereinkommen unterschrieben [4]. Damit verpflichten sich diese Länder, die Erderwärmung auf unter 2°C gegenüber 1990 zu begrenzen [4]. Die aktuellen europäischen CO_{2e} Reduzierungsziele bestehen darin, die Treibhausgasemissionen (CO_{2e}) im Vergleich zu 1990 bis 2050 um mindestens 80 % zu reduzieren [5]. Die Bundesregierung Deutschland strebt die Treibhausgasemissionen um 80 bis 95% zu reduzieren [6].

1.2 Zielsetzung

Nun stellt sich die Frage, welche Quellen und durch welche Einflüsse Treibhausgasemissionen bei mobilen Baumaschinen entstehen.

Mobile Arbeitsmaschinen, wie z.B. Land- und Baumaschinen, besitzen aufgrund ihrer hohen spezifischen Leistung einen Kraftstoffverbrauch¹, der sich signifikant auf die Betriebskosten der Maschinen auswirkt. Eine CO_{2e}-Reduktion der Maschinen ist daher für die Unternehmen von wirtschaftlichem Interesse als auch für die Umwelt vorteilhaft. Beim Kraftstoffverbrauch muss die gesamte Wirkkette von der Gewinnung und Bereitstellung eines Treibstoffs bzw. Energieträgers bis hin zur Umwandlung in Bewegungsenergie betrachtet werden. Nur so kann der Effekt durch den Einsatz von nachhaltigem Kraftstoff sich positiv auf die CO_{2e} Bilanz auswirken.

Der Kraftstoffverbrauch einer Maschine wird zwar durch den Verbrennungsmotor verursacht, die Bauanwendung und die dabei genutzten Bau-Methoden beeinflussen ihn jedoch signifikant. Das Ergebnis, wie z.B. der Bau einer neuen Straße, entsteht durch die Kombination von Arbeitsvorgängen unterschiedlicher Maschinen. Dies beinhaltet, das eingesetzte Verfahren, die am Prozess beteiligten Maschinen und die arbeitenden Personen die CO_{2e}-Emissionen in Bauprozessen beeinflussen. In einem Bauprozess gibt es neben den Maschinen weitere CO_{2e}-Quellen. Ein Beispiel ist die Produktion der verbauten Materialien. Wird zum Beispiel Recyclingmaterial verwendet, so sollte sich dies insgesamt positiv auf die CO_{2e} Bilanz auswirken.

Heute besteht ein Defizit in der Quantifizierung des Einflusses von CO_{2e}-Reduktionsmaßnahmen auf Basis einer gesamtheitlichen Betrachtung. Aktuelle Methoden sind

¹ An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Kraftstoffverbrauch bei verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen synonym für deren CO_{2e}-Emissionen verwendet werden kann. Die CO_{2e}-Emissionen lassen sich direkt über den Faktor 3,18 kg CO_{2e}/l Diesel berechnen (siehe Anhang).

nicht geeignet, Einflüsse von CO₂e-Reduktionsmaßnahmen auf eine Verbesserung des Weltklimas aufzuzeigen.

Im Rahmen dieses Projektes wird in Zusammenarbeit mit der Industrie am Teilinstitut Mobima (KIT) eine CO₂e Quantifizierungsmethode entwickelt, verifiziert und validiert. Die entwickelte Methode wird allgemeingültig sein und berücksichtigt unterschiedliche Einflüsse aus den Kategorien Maschineneffizienz, Prozesseffizienz, Betriebseffizienz und alternative Energiequellen. Dabei wird ein begleitendes CO₂e Quantifizierungstool weiterentwickelt.

1.3 Aufbau des Abschlussberichts

Nach der Motivation und der Beschreibung der Zielsetzung des Projekts werden in Kapitel 2 bis 5 die generierten Ergebnisse beschrieben. In Kapitel 2 wird die CO₂e Quantifizierungsmethode mit ihren Systemgrenzen erklärt. Kapitel 3 befasst sich mit der Verifizierung von den für die Methode ausgewählten Einflussfaktoren. Diese Verifizierung findet über eine Expertenbefragung nach der Delphi-Methode und eine Literaturrecherche statt. In Kapitel 4 wird die CO₂e Quantifizierungsmethode validiert. Dabei werden Daten genutzt, die durch Messungen auf den Baustellen generiert worden sind. In Kapitel 5 wird das parallel entwickelte Tool vorgestellt. Zunächst wird auf die Anforderungen näher eingegangen. Anschließend wird der Aufbau vorgestellt. Der Abschlussbericht endet schließlich mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick, in dem weitere Arbeitsschritte empfohlen werden.

2 Methode

2.1 CO₂e Emissionen

Unter dem Begriff Treibhausgasemissionen (CO₂e) verstehen die Europäische Union und die nationale Politik, Emissionen durch Gase, die direkten Einfluss auf den Treibhauseffekt nehmen. Somit wäre eigentlich der richtige Begriff „CO₂-Äquivalente“ (CO₂e). [3; 7]

Die CO₂e sind heutzutage Maßzahlen zum Vergleich einzelner Gase, die einen direkten Einfluss auf den Treibhauseffekt haben [3]. Die mittlere Erwärmungswirkung der einzelnen Gase wird über einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet [3]. Der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) hat diese Werte, auch GWP-Werte genannt, für die einzelnen betrachteten Gase in Abstimmung mit politischen Überlegungen bestimmt. Diese Werte sind als Auszug in Tabelle 1 dargestellt [8]. Ab 2014 sind die GWP-Werte des 5. Assessment-Berichts zu verwenden [8]. Aus Tabelle 1 geht hervor, dass nach der Emission von z.B. 1 kg Methan (CH₄) der Treibhauseffekt innerhalb der ersten 100 Jahre 28 Mal größer ist als der Treibhauseffekt, der durch 1 kg CO₂-Emissionen verursacht wird.

Tabelle 1: Auszug der GWP-Werte aus dem 5. Assessment-Bericht [8]

Name	Chemische Formel	GWP-Wert für eine Zeitschiene von 100 Jahren
		5. Assessment- Bericht (AR5)
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	1
Methan	CH ₄	28
Distickstoffmonoxid	N ₂ O	265
Schwefelhexafluorid	SF ₆	23.500
Fluorkohlenwasserstoffen / Teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen	HFC / H-FKW	4 - 12.400
Tetrafluormethan	CF ₄	6.630
Hexafluorethane	C ₂ F ₆	11.100

2.2 Systemgrenzen

Um zu verstehen woher die CO_{2e}-Emissionen auf der Baustelle entstehen und wovon diese beeinflusst werden, wird eine CO_{2e} Quantifizierungsmethode entwickelt. Die eingesetzten Typen mobiler Arbeitsmaschinen hängt stark von dem zu bauenden Produkt ab, wie beispielsweise einer Autobahn oder eine Brücke, etc.. Somit ist die Wahl der Arbeitsmaschinen stark von den Bauprozessen abhängig. Im Rahmen dieses Projekts werden die Baumaschinen in ihren Bauprozessen näher untersucht. Aus diesem Grund werden die Produktionsprozesse der primären Energieträger nicht näher betrachtet. Primäre Energieträger können in der Studie jedoch nicht vernachlässigt werden, da diese eine große Wirkung auf die CO_{2e}-Gesamtbilanz ausüben. Aus diesem Grunde erfolgt die Quantifizierung von CO_{2e}-Emissionen der primären Energieträger über Datenbanken und Publikationen.

Bei der Lebenszyklusanalyse von Fahrzeugen, durchgeführt an der Technischen Universität Braunschweig wurde bzgl. der CO_{2e}-Emissionen festgestellt, dass über 80% aller CO_{2e} -Emissionen bei mobilen Arbeitsmaschinen während Ihrer Nutzung freigesetzt werden. Lediglich 10% bis 14% CO_{2e} werden bei der Fertigung der Maschinen emittiert. Infolgedessen werden die CO_{2e}-Emissionen, die bei der Fertigung von mobilen Arbeitsmaschinen freigesetzt werden, nicht in dieser Methode berücksichtigt.

In dieser Studie werden die CO_{2e}-Emissionen, die sich beim Transport der mobilen Arbeitsmaschinen von und zur Baustelle ergeben, nicht berücksichtigt. Der Transport der Baumaschine wird als einmalig angenommen und ist für die Bauarbeiten notwendig. Daher werden keine Fahrten zum Baustellenort mit der Baumaschine, die nicht zum Arbeitsprozess gehören berücksichtigt.

Die CO_{2e}-Emissionen, die während der Nutzung des Endproduktes entstehen, werden nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass die CO_{2e}-Emissionen, die beispielweise durch den Verkehr auf einer Straße freigesetzt werden, nicht in der Quantifizierung berücksichtigt werden.

Die CO_{2e}-Emissionen bei der Herstellung von Baumaterial müssen erfasst werden und quantifiziert werden, um recyceltes Material in der Gesamtbilanz zu berücksichtigen. Da aber der Herstellungsprozess des Baumaterials nicht mehr zum Bauprozess gehört, wird dieser von einer zuverlässigen wissenschaftlichen anerkannten Datenbank wie Ökobaudat, Ecoinvent oder Probas quantifiziert [9–11].

Die mobilen Arbeitsmaschinen auf einer Baustelle können ihre Arbeit nicht erbringen, wenn das zur Erstellung des Endproduktes erforderliche Baumaterial nicht verfügbar ist. Zur Erstellung des Endproduktes erfolgen mehrere Transporte von Baumaterial von und zur Baustelle. Aus diesem Grund darf deren Einfluss bei der Quantifizierung der CO_{2e}-Emissionen eines Gesamtprozesses nicht fehlen.

Emissionen die während der globalen und lokalen Arbeitsvorbereitungen stattfinden, werden nicht berücksichtigt.

2.3 Quantifizierungsmethode

Die Methode ist so aufgebaut, dass ein Modellprozess, z. B. der Bau einer Straße, in Teilschritte zerlegt wird. Für diese Teilschritte können die CO_{2e}-Emissionen der beteiligten Maschinen und verwendeten Materialien berücksichtigt werden. Es ist insbesondere vorgesehen und möglich, dass die Teilschritte weiter untergliedert und die CO_{2e}-Emissionen der Teilschritte dann auch detaillierter berechnet werden können. So ist es beispielsweise möglich, neue Verfahren bei der Materialherstellung und deren Einfluss auf die CO_{2e}-Emissionen zu berücksichtigen. Je nach Baustellenorganisation können weitere Prozessschritte hinzugefügt bzw. gekürzt werden. Die schematische Darstellung der CO_{2e} Quantifizierungsmethode wird in Abbildung 1 dargestellt.

Dabei werden die CO_{2e}-Emissionen der einzelnen Teilschritte quantifiziert. Die Summe dieser ergibt die gesamten Emissionen für die Bauanwendung. Die Quantifizierung der CO_{2e}-Emissionen der einzelnen Teilschritte erfolgt unterschiedlich für die Materialherstellung, den Transport von Baumaterial und für die Baumaschinen.

Die CO_{2e} Emissionen, die bei der Materialherstellung entstehen, werden mithilfe des GWP²-Wertes aus Datenbanken berechnet. Dabei wird der GWP-Wert des Materials mit der Menge an Material ($A_{Material}$) zusammen multipliziert, siehe Formel (1).

$$(m_{CO_2e})_{Material} = GWP_{Material} \times A_{Material} \quad (1)$$

² GWP steht für „Global Warming Potential“ und entspricht dem Treibhausgaseffekt

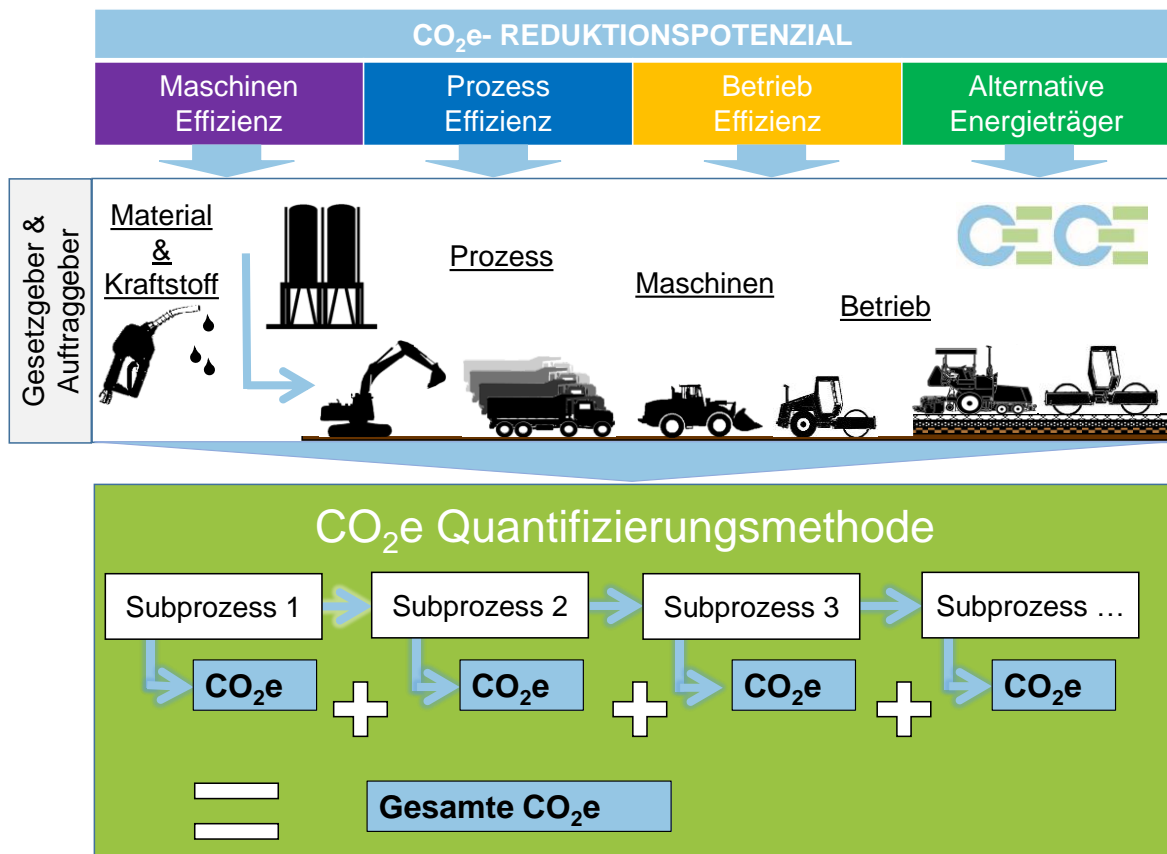


Abbildung 1: Schematische Darstellung der CO₂e-Quantifizierungsmethode

Bei der Berechnung von CO₂e Emissionen, die durch Transportfahrten von Baumaterial entstehen, wird Formel (2) genutzt. Diese Formel basiert auf derselben Formel, wie die im VECTO-Tool³ benutzt wird. Dabei wird die Formel stark vereinfacht.

Somit lautet die Formel wie folgt:

$$\begin{aligned}
 (m_{CO_2e})_{Transport} &= f_{diesel/CO_2e} \times (b \times (P_{engine,full\ loaded} \times t_{full} + P_{engine,empty} \\
 &\quad \times t_{empty}) + b_{idle} \times P_{engine, idle} \times t_{idle}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

So beschreibt f_{diesel/CO_2e} den Konvertierungsfaktor von Diesel in CO₂e Emissionen, b den mittleren spezifischen Kraftstoffverbrauch des Nutzfahrzeugs, $P_{engine,full\ loaded}$ die benötigte Motorleistung bei vollgeladenem Fahrzeug (Hinfahrt), $P_{engine,empty}$ die benötigte Motorleistung bei ungeladenem Fahrzeug (Rückfahrt) und $P_{engine, idle}$ die Motorleistung im Leerlauf. t_{full} , t_{empty} und t_{idle} sind die jeweiligen Zeiten, bei dem das Nutzfahrzeug vollgeladen, ungeladen und im Leerlauf ist.

Dabei wird bei der Ermittlung von P_{engine} der Steigungswiderstand und Beschleunigungswiderstand vernachlässigt. Die Formel wird im Nachfolgenden beschrieben.

³ Das VECTO-Tool quantifiziert die CO₂ Emissionen von schweren Nutzfahrzeuge [12].

$$P_{engine} = \frac{(F_R + F_A) \times v}{\eta_g} = \frac{(f_R \times (m_V + m_L) \times g + c_w \times A \times (\rho_L/2) \times v^2) \times v}{\eta_g} \quad (3)$$

Dabei steht F_R für den Rollwiderstand, F_A für den Luftwiderstand, v für die Fahrzeuggeschwindigkeit und η_g für den Getriebewirkungsgrad. f_R beschreibt den Rollwiderstandsbeiwert, c_w den Luftwiderstandsbeiwert, m_V die Masse des Fahrzeugs, m_L die Masse der transportierten Last, g die Schwerebeschleunigung der Erde, A die Stirnfläche des Fahrzeugs und ρ_L die Luftdichte.

Die Quantifizierung der CO_{2e} Emissionen von Baumaschinen erfolgt wie in Gleichung (4).

$$m_{CO_2e} = f_{diesel/CO_2e} * (B_{working} + B_{idle}) \quad (4)$$

$B_{working}$ beschreibt den gesamten Kraftstoffverbrauch der Maschinen beim Arbeiten und B_{idle} den gesamten Kraftstoffverbrauch der Maschine im Leerlauf.

Beim Ersetzen von $B_{working}$ und B_{idle} entstehen durch Fallunterscheidung folgende drei Gleichungen. Die Rechenschritte der Gleichung (4) zu Gleichungen (5), (6) und (7) ist dem Anhang zu entnehmen. Gleichung (5) ist gültig, wenn auf der Baustelle kein Leerlauf ist, Gleichung (6) wenn es auf der Baustelle sowohl Arbeitsprozesse als auch Leerlaufzeiten gibt und Gleichung (7) wenn eine Baumaschine nur im Leerlauf betrieben wird.

1. Fall: $f_{idle,r} = 0$; $t_{total} = t_{work}$; $t_{idle} = 0$

$$\begin{aligned} (m_{CO_2e})_{Baumaschine} &= f_{energy\ carrier/CO_2e} \\ &\times \frac{V_{material}}{Q_B \times f_{driver} \times f_{process\ assistant} \times f_{construction\ complexity} \times f_{ui}} \end{aligned} \quad (5)$$

2. Fall: $0 < f_{idle} < 1$; $t_{working} \neq 0$; $t_{idle} \neq 0$

$$\begin{aligned} (m_{CO_2e})_{Baumaschine} &= f_{energy\ carrier/CO_2e} \times \frac{V_{material}}{Q_B \times f_{driver} \times f_{process\ assistant} \times f_{construction\ complexity} \times f_{ui}} \\ &\times (b_m \times f_{machine\ condition} \times f_{machine\ technology} + b_{idle}) \\ &\times f_{stop\&go} \times \left(f_{site\ orga.} + f_{idle\ unavoidable} \right) * \frac{1}{f_{stop\&go} \times (1 - f_{site\ orga.} - f_{idle\ unavoidable})} \end{aligned} \quad (6)$$

3. Fall: $f_{idle} = 1$; $t_{total} = t_{idle}$; $t_{work} = 0$

$$(m_{CO_2e})_{Baumaschine} = f_{energy\ carrier / CO_2e} * b_{idle} * t_{total} \quad (7)$$

Dabei beschreibt $V_{material}$ die Menge an Material, die von der Baumaschine bearbeitet wird und Q_B die Grundleistung der Maschine, welche durch die Einflüsse des Fahrers (f_{driver}), der in der Baumaschine eingebauten Prozessassistenzsysteme ($f_{process\ assistant}$), der Baustellenkomplexität ($f_{construction\ complexity}$) und unvorhersehbare Ereignisse (f_{ui}) verändert wird. b_m entspricht dem mittleren Kraftstoffverbrauch einer Baumaschine des gleichen Typs aus dem Jahr 1990. Dieser mittlere Kraftstoffverbrauch wird mit $f_{machine\ technology}$ multipliziert um den aktuellen Kraftstoffverbrauch der Maschine darzustellen. Bei schlechter Instandhaltung der Maschine kann der tatsächliche Kraftstoffverbrauch der Maschine erhöht werden. Dieser Effekt wird mit dem Faktor $f_{machine\ condition}$ berücksichtigt. b_{idle} ist der mittlere Kraftstoffverbrauch der Baumaschine im Leerlauf. Die Leerlaufzeit der Baumaschine wird mithilfe der Faktoren $f_{stop\&go}$, $f_{site\ orga.}$ und $f_{idle\ unavoidable}$ ermittelt. Wird der Motor der Baumaschine jedes Mal ausgeschaltet, wenn diese nicht am Arbeiten ist, so kann die Leerlaufzeit reduziert werden. $f_{stop\&go}$ beschreibt die resultierende Stillstandzeit der Maschine. Je nach Baustellenorganisation (berücksichtigt mit $f_{site\ orga.}$), verändern sich die Leerlaufzeiten. Um bestimmten Tätigkeiten auf der Baustelle ausführen zu können, sind Leerlaufzeiten der Baumaschine unvermeidlich. Dies wird mit dem Faktor $f_{idle\ unavoidable}$ berücksichtigt.

3 Verifizierung

In diesem Kapitel werden die Faktoren (siehe Tabelle 2) aus den Formeln (4) bis (7) verifiziert. Die Verifizierung erfolgt auf zwei Arten: über eine Experten-Umfrage nach der Delphi Methode (siehe Anhang oder [13]) und über eine Literaturrecherche. Anschließend kann daraus die Determinierung der Wertebereiche der Faktoren bestimmt werden. Es folgt eine Einflussanalyse dieser Faktoren. Zum Schluss wird am Beispiel einer BK10 Straße simuliert wie hoch der Anteil an CO_{2e} Emissionen ist, der durch die Berücksichtigung der Zerstörung und des Wiederaufbaus von CO_{2e} Senken verursacht wird.

Tabelle 2: Zu verifizierende Faktoren aus Formeln (4) bis (7)

Faktoren		
Maschinen Effizienz	$f_{machine\ technology}$	f_{engine}
		f_{eco}
		$f_{significant\ improvement}$
	$f_{machine\ condition}$	f_{age}
		$f_{service\ regularity}$
Prozess Effizienz	$f_{site\ orga.}$	
	$f_{idle\ unavoidable}$	
	$f_{process\ assistant}$	
	$f_{constr.\ complexity}$	$f_{weather}$
		$f_{construction\ time}$
		$f_{site\ freedom}$
Betriebs-effizienz	f_{driver}	$f_{physical\&\ mental\ state}$
		$f_{knowledge\&\ skills}$
		$f_{workplace\&\ working\ environment}$
	$f_{stop\&\ go}$	
Alternative Energiequellen	$f_{energy\ carrier / CO_2e}$	

3.1 Faktoren Verifizierung

Die Faktoren, mit dem der Faktor $f_{machine\ technology}$ ermittelt wird, wurden über die Delphi Methode verifiziert. $f_{machine\ technology}$ fasst den kombinierten Effekt aus dem Einfluss des Primärenergiewandlers (heute ist das der Dieselmotor), des eingeschalteten Ecomodus und der signifikanten technologischen Verbesserungen zusammen, siehe Gleichung (8).

$$f_{machine\ technology} = f_{engine} \times f_{eco} \times f_{significant\ improvement} \quad (8)$$

Aus der Experten-Umfrage konnte entnommen werden, dass der Kraftstoffverbrauch und somit die Treibhausgasemissionen von mobilen Maschinen bis zu 3% reduziert werden konnten mithilfe von Verbesserungen des Verbrennungsmotors ($f_{significant\ improvement}$). Der Eco-Modus kann die Treibhausgasemissionen bis zu 15% reduzieren (f_{eco}). Über signifikante technologische Verbesserungen ($f_{significant\ improvement}$) konnte eine Treibhausgasreduktion von bis zu 28 % erreicht werden z.B. durch Elektrifizierung, hydraulisches Downsizing, etc.. Es wird erwartet bei der Emissionen Reduktion durch technologische Verbesserungen in naher Zukunft eine Reduktion von bis zu 35% zu erreichen. [13]

Aus Gleichung (8) ergibt sich für $f_{machine\ technology}$ ein Wertebereich von 0,39 bis 1,0.

Durch die Experten-Umfrage konnte ebenfalls ermittelt werden, dass der Zustand der Maschine die Treibhausgasemissionen beeinflussen kann. Durch eine schlechte Instandhaltung der Maschine bzw. ein höheres Alter der Maschine wird der Kraftstoffverbrauch und somit die Treibhausgasemissionen erhöht. [13]

Die Beziehung zwischen $f_{machine\ condition}$, f_{age} und $f_{service\ regularity}$ kann aus der folgenden Gleichung entnommen werden:

$$f_{machine\ condition} = f_{age} \times f_{service\ regularity} \quad (9)$$

Die Antworten aus der Experten-Umfrage, Interviewbefragung von Baumaschinenvermietungsfirmen von Zou und Veröffentlichungen von Helms und Heidt haben ermöglicht den Wertebereich von f_{age} als zwischen 1,0 und 1,35 zu ermitteln. [13–15]

Verschiedene Literaturquellen bestätigen, dass durch eine schlechte Instandhaltung der Komponenten der Maschinen wie Filter, Ölalterung, Zahnsysteme der Schaufel/Löffel, etc. die Treibhausgasemissionen steigen können [16–24]. Aus der Experten-Umfrage kann entnommen werden, dass bei fehlenden empfohlenen Instandhaltungsarbeiten an der Baumaschine, die Treibhausgasemissionen bis zu 40% steigen können. Somit ist der Wertebereich von $f_{service\ regularity}$ zwischen 1,0 bis 1,40.

Zusammenfassend, bedeutet dies, dass $f_{machine\ condition}$ sich im Wertebereich 1,0 bis 1,89 befindet.

Hinsichtlich der Qualität der Baustellenorganisation konnten verschiedene Verbesserungsmaßnahmen in der Literatur gefunden werden, welche alle unter dem Aspekt „lean construction“ zu klassifizieren sind. Beim „lean construction“ geht es darum die Planung sowohl für wertschöpfende als auch nicht-wertschöpfende Aktivitäten zu verbessern. Schwankungen auf der Baustelle bzw. im Ablauf des Projekts werden stets erfasst und in der Baustellenorganisation berücksichtigt. Damit ist die Baustellenorganisation ein sich immer wieder den Gegebenheiten anpassbares System. [25]

Zur Baustellenorganisation gehört ebenfalls die Auswahl der richtigen Baumaschinen für die Anwendung. Nach Waris et al. gibt es 38 Kriterien nach denen die geeignete Baumaschine für die Anwendung ausgewählt werden kann [26]. Eine Simulation von unterschiedlichen Radladern für die gleiche Aufgabe bzw. gleiche Menge an zu bewegender Erde hat die Ergebnisse in Abbildung 2 ergeben. Damit wird gezeigt, dass sich die Treibhausgasemissionsmenge durch zu kleine oder zu große Radlader für eine bestimmte Aufgabe verändert werden kann. Daher ist für niedrige Treibhausgasemissionen die Wahl der geeigneten Baumaschinen in Abhängigkeit der Aufgabe essentiell.

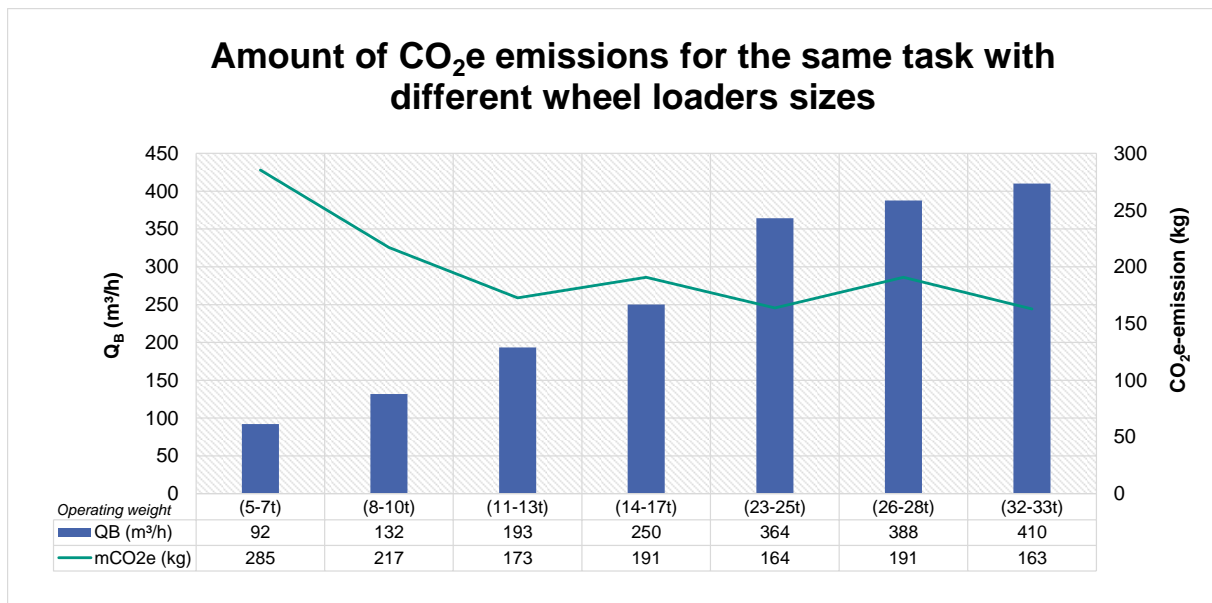


Abbildung 2: Arbeitsleistung und die dabei emittierende CO₂e Menge von unterschiedlichen Größen an Radladern für eine selbe Aufgabe.

In der Formel (6) repräsentiert der Faktor $f_{site\ orga.}$ den Einfluss von Baustellenorganisation auf die Leerlaufzeiten der Baumaschinen. Aus Baustellenmessungen von Lewis et al. kann entnommen werden, dass Baumaschinen bis zu 68% der gesamten Bauzeit⁴ im Leerlauf sein können [27]. Somit nimmt $f_{site\ orga.}$ einen Wert aus dem Bereich [0; 0,68] an. Bei einem Wert von Null, bedeutet dies, dass die Baustelle durch optimale Baustellenorganisation keine Leerlaufzeiten hat.

Aus eigenen Straßenbaubeobachtungen in Karlsruhe sowie aus einer Publikation der „United States Environmental Agency“ konnte festgestellt werden, dass bestimmte Leerlaufzeiten von Baumaschinen für den Bauprozess notwendig sind [28]. Diese Leerlaufzeiten können z. B. dazu dienen einen Kran oder Aufzug zu betreiben und werden mit $f_{idle\ unavoidable}$ bezeichnet. Da hierfür aus der Literatur kein Wertebereich gefunden worden ist, wird die maximale Leerlaufzeit auf Baustellen als Referenz für $f_{idle\ unavoidable}$ herangezogen. Aus der Formel (6), kann die Summe von $f_{idle\ unavoidable}$ und $f_{site\ orga.}$ maximal 1 ergeben. Bei einem Wertebereich für $f_{site\ orga.}$ zwischen 0 und 0,68 folgt für $f_{idle\ unavoidable}$ einen Wertebereich zwischen 0 und 0,32.

Baumaschinen besitzen Prozessassistenzsysteme, welche den Fahrer entlasten bzw. bei der Arbeit unterstützen. Solche Systeme können die Effizienz des Fahrers steigern und werden mit dem Faktor $f_{process\ assistant}$ in der CO₂e-Quantifizierungsformel (5) und (6) berücksichtigt. Der Einfluss auf den Fahrer von einem Prozessassistenzsystem ist stark abhängig von seiner Erfahrung. Fahrer mit Anfänger-Niveau werden mehr vom Prozessassistenzsystem profitieren als Fahrer mit Expertem-Niveau, die auch ohne

⁴ Unter der gesamten Bauzeit wird die Summe von Arbeits- und Leerlaufzeit der Baumaschine verstanden für eine ausgewählte Anwendung bzw. Aufgabe.

solche Systeme das gleiche Ergebnis erzielen. Aus der Experten-Umfrage konnte entnommen werden, dass damit ein Fahrer mit Expertem-Niveau bzw. ein Fahrer mit Anfänger-Niveau bis zu 13% bzw. 72% seine Effizienz steigern kann [13].

Die Baustellenkomplexität beeinflusst die Arbeitsleistung einer Baumaschine. Darunter wird der Einfluss des Wetters, für die Aufgabe verfügbare Bauzeit und der verfügbare Baufreiraum verstanden, siehe Beziehung in Formel (10).

$$f_{constr.complexity} = f_{weather} \times f_{construction\ time} \times f_{site\ freedom} \quad (10)$$

Aus der Literatur kann entnommen werden, dass unter dem Oberbegriff Wetter die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Niederschlag (Regen/Schnee), Windgeschwindigkeit und reduziertes Tageslicht verstanden wird. Der Einfluss der Wettercharakteristiken auf die Baumaschineneffizienz wird in verschiedenen Literaturen untersucht [29–33]. Bei kaltem Wetter wie z.B. -25°C oder bei starkem Wind (48 km/h) kann die Effizienz der Baumaschine bis zu 90% reduziert werden [34]. Somit ergibt sich für den Faktor $f_{weather}$ der Wertebereich [0,1;1,0].

Bei wenig verfügbaren Bauzeiten gibt es verschiedene „Beschleunigungsmöglichkeiten“ um das Bauprodukt rechtzeitig fertig zu bauen. Dabei werden Produktivitätsstunden erhöht durch Überstunden der Bauarbeiter bzw. Baumaschinenfahrer, durch parallele Kolonnenarbeit oder durch Schichtarbeit. Nach Ibbs und Vaughan entspricht jeder zehnten Überstunde pro Woche ein Effizienzverlust von 10%. Bei einer erhöhten Manpower kombiniert mit paralleler Kolonnenarbeit ist mit einem Effizienzverlust von 40% bei 100 m²/Bauarbeiter zu rechnen. Bei weniger als 5% Schichtarbeit kann die Effizienz um bis zu 12% gesteigert werden. Jedoch ist bei über 5% Schichtarbeit mit einem Effizienzverlust zu rechnen. Zum Beispiel entspricht 40% Schichtarbeit einem gesamten Effizienzverlust von 15%. [35]

Somit ergibt sich für $f_{construction\ time}$ ein Wertebereich zwischen 0,6 bis 1,12.

Verschiedene Quellen aus der Literatur geben an, dass ein beengter Bauraum zu Effizienzverlusten führt [36–39]. Da keine genaueren Effizienzverlustwerte in der Literatur gefunden worden sind, wird der Wertebereich für $f_{site\ freedom}$ von 0,9 bis 1,0 gewählt.

Zusammenfassend, lässt sich der Wertebereich von $f_{constr.complexity}$ bestimmen mit [0,05;1,12].

Der Baumaschinenfahrer kann die Arbeitsleistung einer Baumaschine stark beeinflussen. Ein Überblick über die Einflüsse auf das Leistungsangebot des Menschen wird in der Abbildung 3 dargestellt. Der Einfluss des Fahrers wird mit dem Faktor f_{driver} beschrieben und dieser lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_{driver} = f_{physical\&\ mental\ state} \times f_{knowledge\&\ skills} \times f_{workplace\&\ working\ environment} \quad (11)$$

Der Faktor $f_{physical\&\ mental\ state}$ fasst alle Einflüsse zusammen, die in der Abbildung 3 nicht orange umkreist sind. Der Faktor $f_{knowledge\&\ skills}$ berücksichtigt die Einflüsse durch die Ausbildung, die Erfahrung und das Training bzw. Schulungen des Fahrers. Experimente durchgeführt von Frank et al. haben gezeigt, dass bei gleicher Aufgabe unter gleichen Arbeitsplatz- und Arbeitsumgebungsbedingungen mit unterschiedlichen Fahrern ein Leistungsunterschied bis zu 70% erreicht werden kann [40–42]. Unter der

Annahme, dass $f_{physical\&mental\ state}$ und $f_{knowledge\&skills}$ den gleichen Gewichtungsfaktor besitzen, bedeutet dies, dass diese den minimalen Wert von 0,55 einnehmen können. Somit ist der Wertebereich für $f_{physical\&mental\ state}$ und $f_{knowledge\&skills}$ zwischen 0,55 und 1,0.

Der Faktor $f_{workplace\&working\ environment}$ fasst die Einflüsse zusammen vom Arbeitsplatz, wie z.B. die Arbeitsplatzergonomie und Sichtqualität aus der Kabine sowie von der Arbeitsumgebung wie das Klima, den Lärm, die Vibrationen und die Belichtung, die den Fahrer beansprucht. In verschiedenen Literaturquellen wurde intensiv über die Einflüsse auf den Arbeitsplatz berichtet [43–51]. Literaturen welche die Einflüsse auf der Arbeitsumgebung untersuchten, bestätigten, dass dieser auch nicht vernachlässigbar ist und bei schlechtem Wetter wie z.B. bei -40°C die Arbeitseffizienz eines Arbeiters bis zu 90% reduzieren kann [52–61]. Somit ist der Wertebereich für $f_{workplace\&working\ environment}$ zwischen 0,1 bis 1,0. Bei einem Wert von 1,0 wird von einem idealen Arbeitsplatz und von idealen Arbeitsumwelt-Bedingungen ausgegangen. Bei einem Wert von 0,1 findet eine Leistungsreduktion des Arbeiters von 90% aufgrund des Arbeitsplatzes bzw. der Arbeitsumgebung.

Zusammenfassend wird f_{driver} ein Wert annehmen zwischen 0,03 bis 1,0.

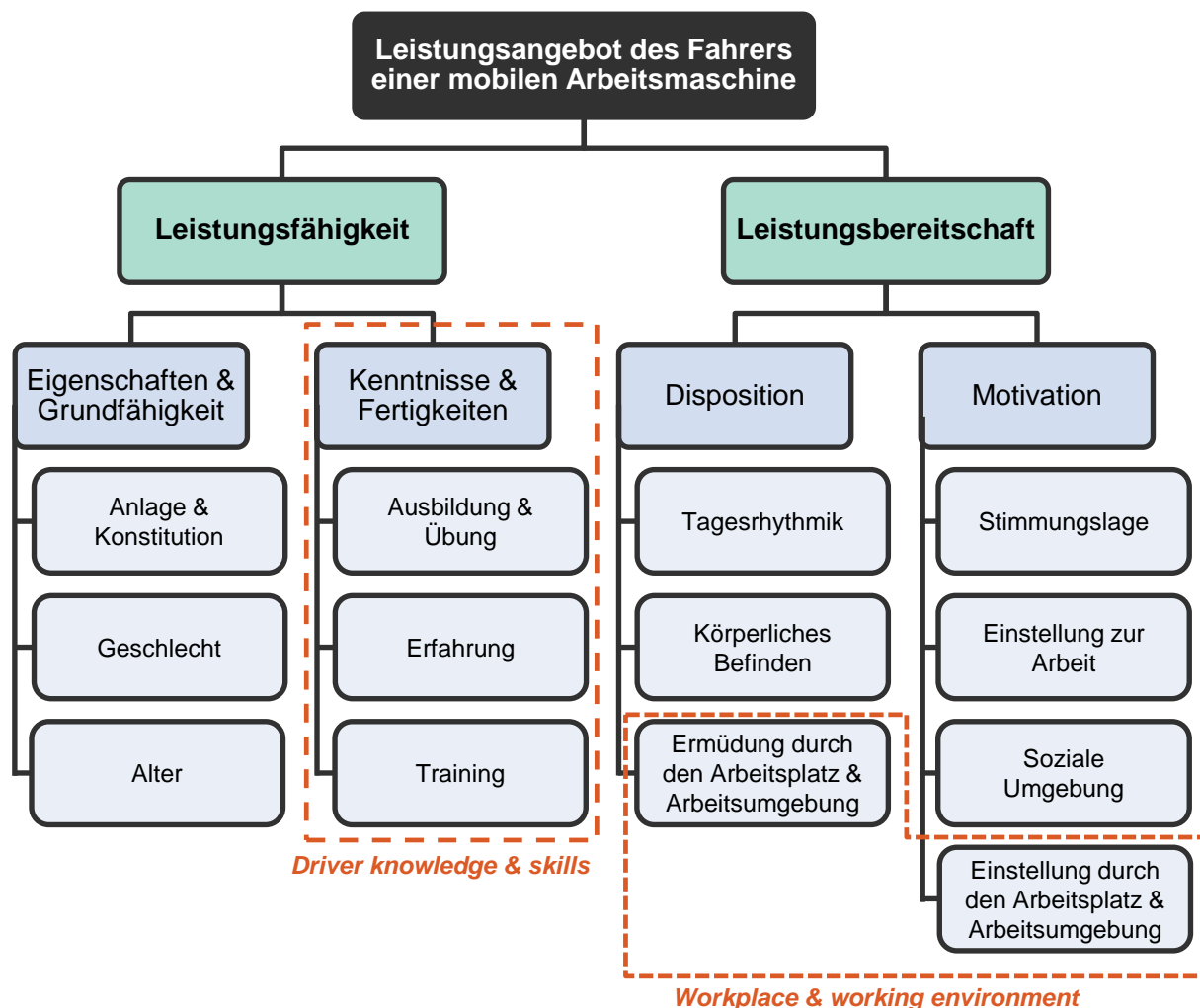


Abbildung 3: Leistungsangebot des Fahrers einer mobilen Arbeitsmaschine [basiert auf62]

Der Faktor $f_{stop\&go}$ repräsentiert die Stillstandzeiten der Maschinen, die durch den Fahrer während der Bauzeit entstehen. Schaltet der Bediener die Maschine nach jeder Bauarbeit aus, so entsteht keine Leerlaufzeit. Der Prozess des Ausschaltens kann ebenfalls von einem Assistentsystem durchgeführt werden, hier genannt „stop & go“, welches das automatische Ausschalten der Baumaschine nach den Arbeitsprozessen übernimmt. Nach einer Veröffentlichung von EPA ist in den USA die Leerlaufzeit auf 3 bis 10 min begrenzt [63]. Jede reduzierte Leerlaufzeit kann abgesehen von den reduzierten Treibhausgasemissionen ebenfalls die Lebenszeit des Motors verlängern [63]. Für den Wertebereich von $f_{stop\&go}$ wird [0;1,0] gewählt. Bei einem Wert von 0 besitzt die Baumaschine keine Leerlaufzeit und ist somit jedesmal im Stillstand. Bei einem Wert von 1,0 wird die Baumaschine bei jeder möglichen Stillstandzeiten im Leerlauf betrieben.

Aus der Literatur und Angaben aus der Experten-Umfrage konnte entnommen werden, dass heutzutage die Baumaschinen hauptsächlich mit Diesel betrieben werden [64; 13]. Alternative Energieträger ermöglichen die Treibhausgasemissionen zu reduzieren gegenüber Diesel. Bei der Auswahl einer geeigneten Alternative sollte sowohl die gravimetrische als auch die volumetrische Dichte berücksichtigt werden. In Tabelle 3 werden Treibhausgasemissionen von flüssigen alternativen Energieträgern gegenübergestellt. In grau sind die alternativen Energieträger mit fossilem Ursprung und in blau mit regenerativem Ursprung dargestellt. Folglich ist der Wertebereich von $f_{energy\ carrier}/_{CO_2e}$ von 0,04 bis 3,18.

Tabelle 3: Treibhausgasemissionen von flüssigen alternativen Energieträgern [65–71]

Energy Carrier (source)	Greenhouse gas emissions – WTW [kg CO ₂ e/ l energy carrier]
Diesel	3.18
Gasoline	2.80
OME ₅ (natural gas)	2.72
Liquid hydrogen (EU-mix)	1.93
Biodiesel (methyl ester)	1.87
DME (natural gas)	1.86
Methanol (natural gas)	1.60
Ethanol (wheat)	1.38
LNG (fossil)	1.38
LBG	0.59
OME ₅₋₆ (tree biomass)	0.53
Liquid hydrogen (wind energy)	0.04

3.2 Wertebereich der Faktoren

Durch die Verifizierung der Faktoren im vorigen Kapitel konnten die jeweiligen Wertebereiche ermittelt werden. Diese sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4: Wertebereich der Faktoren

Faktoren		Wertebereich	
Maschinen Effizienz	$f_{machine\ technology}$	f_{engine}	[0,97; 1,03]
		f_{eco}	[0,85; 1,00]
		$f_{significant\ improvement}$	[0,65; 1,00]
	$f_{machine\ condition}$	f_{age}	[1,00; 1,35]
		$f_{service\ regularity}$	[1,00; 1,40]
Prozess Effizienz	$f_{site\ orga.}$		[0; 0,68]
	$f_{idle\ unavoidable}$		[0; 0,32]
	$f_{process\ assistant}$		[1,00; 1,72]
	$f_{constr.\ complexity}$	$f_{weather}$	[0,10; 1,00]
		$f_{construction\ time}$	[0,60; 1,12]
$f_{site\ freedom}$		[0,90; 1,00]	
Betriebs- effizienz	f_{driver}	$f_{physical\&\ mental\ state}$	[0,55; 1,00]
		$f_{knowledge\&\ skills}$	[0,55; 1,00]
		$f_{workplace\&\ working\ environment}$	[0,10; 1,00]
	$f_{stop\&\ go}$		[0; 1,00]
Alternative Energiequellen	$f_{energy\ carrier / CO_2e}$		[0,04; 3,18]

3.3 Einflussanalyse

Um den Einfluss der Faktoren auf die Menge an Treibhausgasemissionen besser verstehen zu können, wurden diese am Beispiel eines Baggers untersucht.

Für den Bagger wurden folgenden Größen aus Tabelle 5 als Referenz gewählt:

Tabelle 5: Baggerdaten für die Einflussanalyse

Faktoren		Größen für der Bagger	
Bagger Daten	Material Volumen V_{material}	1500 m ³	
	Grundleistung des Baggers	193 m ³ /h	
	Berücksichtigung von unvorhersehbare Ereignisse f_{ui}	1	
	Kraftstoffverbrauch beim Arbeiten b_{m}	31,9 l/h	
	Kraftstoffverbrauch im Leerlauf b_{idle}	3,0 l/h	
Maschinen Effizienz	$f_{\text{machine technology}}$	f_{engine}	1,03
		f_{eco}	0,88
		$f_{\text{significant improvement}}$	0,85
	$f_{\text{machine condition}}$	f_{age}	1,05
		$f_{\text{service regularity}}$	1,04
Prozess Effizienz	$f_{\text{site orga.}}$		0,34
	$f_{\text{idle unavoidable}}$		0,16
	$f_{\text{process assistant}}$		1,18
	$f_{\text{constr. complexity}}$	f_{weather}	1,00
		$f_{\text{construction time}}$	0,90
		$f_{\text{site freedom}}$	1,00
Betriebs-effizienz	f_{driver}	$f_{\text{physical\&mental state}}$	1,00
		$f_{\text{knowledge\&skills}}$	0,78
		$f_{\text{workplace\&working environment}}$	0,83
	$f_{\text{stop\&go}}$		1,00
Alternative Energiequellen	$f_{\text{energy carrier}} /_{\text{CO}_2\text{e}}$		3,18

Durch das Variieren der Faktoren in ihrem entsprechenden Wertebereich wird folgendes Ergebnis aus Tabelle 6 für die Einflussanalyse am Beispiel des ausgewählten Baggers erhalten:

- Schlechtes Wetter kann die Treibhausgasemissionen am stärksten verändern.
- An zweiter Stelle des größten Einflusses ist die Beanspruchung auf den Fahrer anzusehen, die durch den Arbeitsplatz wie die Arbeitsplatzergonomie und Sichtqualität aus der Kabine sowie durch die Arbeitsumgebung wie das Klima, der Lärm, die Vibrationen und die Belichtung entsteht.
- An dritter Stelle mit dem größten Einfluss ist die Nutzung eines alternativen Energieträgers.

Tabelle 6: Ergebnisse der Einflussanalyse am Beispiel eines Baggers

Einfluss Stellenwert	Faktoren	Änderungspotenzial in kg CO ₂ e
1	$f_{weather}$	9.635
2	$f_{workplace\&working\ environment}$	7.467
3	$f_{energy\ carrier} / CO_2e$	2.474
4	$f_{physical\&mental\ state}$	876
5	$f_{construction\ time}$	746
6	$f_{knowledge\&skills}$	727
7	$f_{site\ orga.}$	550
8	$f_{process\ assistant}$	528
9	$f_{significant\ improvement}$	398
10	$f_{service\ regularity}$	370
11	f_{age}	321
12	f_{eco}	165
13	$f_{idle\ unavoidable}$	155
14	$f_{site\ freedom}$	119
15	f_{engine}	56
16	$f_{stop\&go}$	54

4 Validierung

4.1 Maschineneffizienz

Das ursprüngliche Vorhaben bestand darin den Radlader AR250e von der Firma Weycor mit einem Radlader der gleichen Klasse und einer signifikanten technologischen Verbesserung miteinander zu vergleichen. Dabei sollte mit diesem Vorhaben gezeigt werden, dass durch eine Maschineneffizienz auch die Treibhausgasemissionen reduziert werden können. Zu Beginn des Projekts wurde uns von der Firma Weycor mitgeteilt, dass dieselben geplanten Messungen bereits bei der RWTH Aachen stattfinden. Nach Absprache mit der RWTH Aachen wurde vereinbart, dass diese Messergebnisse nach Abschluss der Messungen dem KIT zur Verfügung gestellt werden. Die Messungen bei der RWTH Aachen dauerten länger als geplant und uns wurde kurz vor Ende des Projektes "Validierung und Optimierung einer praxisgerechten Methode zur Quantifizierung der CO₂-Emissionen für eine Nachhaltigkeitsbewertung von Bauprozessen" mitgeteilt, dass deren Projektausschuss entschieden hat, die

Messdaten des Radlader mit signifikanter Verbesserung, in dem Fall mit einem Leistungsverzweigten Getriebe nicht dem KIT freizugeben. Somit war das ursprüngliche Vorhaben bei dem ein Vergleich von zwei Radladern stattfindet nicht möglich.

Die Maschineneffizienz wurde daher mithilfe der Expertenurfrage nach der Delphi Methode bei den Maschinenherstellern des Projektpartner validiert.

Die Maschinenhersteller haben ihre gesamte Maschinenflotte mit den unterschiedlichen Technologien untersucht und konnten eine Effizienzsteigerung gegenüber 1990 sowohl durch eine verbesserte Motorentechnologie, den Eco-Modus und mit weiteren technologischen signifikanten Verbesserungen ermitteln. Die Mittelwerte für den Bagger, Radlader, Straßenfertiger und Walze wurden anschließend berechnet. Die Ergebnisse können der folgenden Tabellen entnommen werden. Die jeweiligen Motorengenerationen wurden nach den Abgasemissionsstufen klassifiziert. In der Tabelle 7 wird f_{engine} für die jeweiligen Motorengenerationen angegeben. Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass eine Effizienzverbesserung von 3% erst durch die Motorengeneration mit Abgasstufe V erreicht wird.

Tabelle 7: Effizienzverbesserung durch veränderte Motorentechnologie

Abgasemissionsstufe	Stufe I	Stufe II	Stufe III A	Stufe III B	Stufe IV	Stufe V
f_{engine}	1.00	1.00	1.03	1.03	1.00	0.97

Im Eco-Modus erfolgt eine Senkung der Drehzahl auf einen konstanten Wert. Solch ein Arbeitsmodus ermöglicht eine Effizienzverbesserung beim Bagger von 12%, beim Radlader von 10%, beim Straßenfertiger von 15% und bei der Walze von 13% zu erreichen.

Tabelle 8: Effizienzverbesserung durch das Arbeiten im Eco-Modus

Maschinentyp	Bagger	Radlader	Straßenfertiger	Walze
Maschinenleistung	86kW	106 kW	125 kW	91kW
f_{eco}	0,88	0,90	0,85	0,87

Durch weitere signifikante technologische Verbesserungen sind weitere Effizienzsteigerungen möglich. Diese werden in der folgenden Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Effizienzverbesserung durch technologische Verbesserungen

	Vergangenheit & Gegenwart		Nahe Zukunft
	Technologieart	Erreichte Reduktion des Kraftstoffverbrauchs	Prognose des Reduktionspotentials des Kraftstoffverbrauchs
Bagger	<ul style="list-style-type: none"> • Einspritzsystem in einem Dieselmotor • Motor-Downsizing • Verbesserung des Kühlsystems • Load-Sensing-Hydraulik 	11%	15%
Radlader	<ul style="list-style-type: none"> • Pumpenanlage • Hydraulisches Downsizing • Niedrigviskose Achsöle • Low idle • Ergonomie • Elektrifizierung 	11%	20%
Straßenfertiger	<ul style="list-style-type: none"> • Energieoptimierter Tamperantrieb • Schaltbares Pumpenverteilergetriebe • Gesteuerter Hydraulikölkreislauf mit Temperaturregelung • Drehzahl geregelter Lüfter 	12%	29%
Walze	<ul style="list-style-type: none"> • Einspritzsystem in einem Dieselmotor • Motor-Downsizing • Elektronische Antriebsstrangsteuerung 	28%	35%

4.2 Prozesseffizienz und Betriebseffizienz

4.2.1 Prozesseffizienz

Unter Prozesseffizienz wird eine Effizienzsteigerung beschrieben, welche durch Prozessänderungen erzielt wird. Dabei können durch eine optimale Planung, die geeignete Auswahl des Bauverfahrens, der geeigneten Baumaschinen, des Bauablaufs, der Baustelleneinrichtung, etc. die Anzahl an Prozessschritten für ein Bauprozess verringert werden. Andersrum, können durch schlechte Baustellenorganisation Subprozessschritte dazuaddiert bzw. durch erhöhte Leerlaufzeiten verlängert werden. Abbildung 4 zeigt schematisch wie die Anzahl an Subprozesse sich für denselben Bauprozess verändern kann.

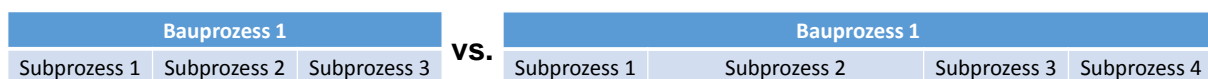


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer möglichen Prozesseffizienzsteigerung durch Änderung der eingesetzten Baumaschinen und des Bauverfahrens

Die Reduzierung bzw. Erhöhung von Subprozessen wird in der CO_{2e} Quantifizierungsmethode berücksichtigt indem die CO_{2e} von jeden auftretenden Subprozess quantifiziert wird (siehe Abbildung 1). Der Effekt von erhöhter Leerlaufzeit durch schlechte Baustellenorganisation wird mittels dem Faktor $f_{site\ orga.}$ in der Methode berücksichtigt. Durch den Einsatz von zu großen oder zu kleinen Baumaschinen wird die Menge an Treibhausgasemissionen erhöht (siehe Abbildung 2). Der Einfluss der Baumaschinengröße wird mittels ihrer Grundleistung kombiniert mit ihrem respektiven Kraftstoffverbrauch sowie mit $f_{site\ orga.}$ in der Methode berücksichtigt.

Weitere Prozesseffizienzeinflüsse finden in der Methode ebenfalls Berücksichtigung. Notwendig Leerlaufzeiten bedingt durch den Bauprozess werden in der Methode mit dem Faktor $f_{idle\ unavoidable}$ berücksichtigt. Die Baustellenkomplexität, welche resultiert aus dem Einfluss des Wetters, des Baustellenfreiraums und der verfügbare Bauzeit kann ebenfalls die Treibhausgasemissionen beeinflussen. Dies wird in der Methode mit dem Faktor $f_{constr.complexity}$ berücksichtigt. In der Maschine implementierte Prozessassistenzsysteme können in Abhängigkeit der Kenntnisse und Fertigkeiten des Fahrers die Treibhausgasemissionen reduzieren. Dies wird in der Methode mit dem Faktor $f_{process\ assistant}$ berücksichtigt.

In der Einflussanalyse in 3.3 wird gezeigt, dass 3 der 5 Faktoren mit dem größten Einfluss auf die Treibhausgasemissionen der Säule „Prozesseffizienz“ zugehören. Beispiele an Prozesseffizienzmaßnahmen können aus der CO₂-Broschüre der CECE entnommen werden [72].

4.2.2 Beschreibung des Vorgehens

Um die Methode bezüglich Prozesseffizienz und Betriebseffizienz zu validieren wurden Beobachtungen und Messungen auf zwei Baustellen durchgeführt. Die erste Baustelle mit Kanalbauarbeiten war in Ludwigsburg. Die zweite Baustelle mit Straßenbauarbeiten war in Mannheim.

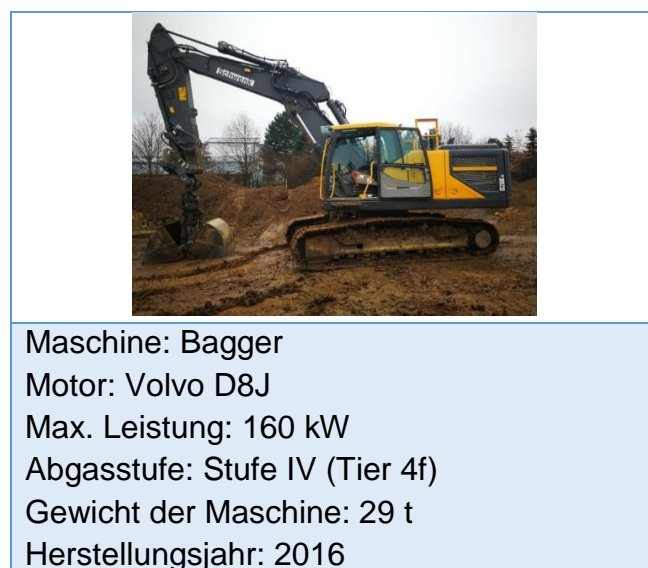


Abbildung 5 : Bagger im Einsatz in Ludwigsburg

In Ludwigsburg wurden der Bagger aus Abbildung 5 mit deren Anbaugeräten aus Abbildung 6 sowie die Erdbauwalze aus Abbildung 7 beobachtet und gemessen.

Folgende Anbaugeräte waren mit dem Bagger im Einsatz:

	
<p>Universallöffel Füllmenge: 0,8 m³ Verschleißteile: 4</p>	<p>Planierlöffel Füllmenge: 1,6 m³</p>
	
<p>Greifer Füllmenge: 1,2 m³</p>	<p>Anbauverdichter Ammann APA 1000</p>
	
<p>Planierlöffel Füllmenge: 2,5 m³</p>	<p>Universallöffel Füllmenge: 2,1 m³ Verschleißteile: 8</p>

Abbildung 6 : Anbaugeräte des Baggers in Ludwigsburg



Maschine: Erdwalze
 Motor: Kubota V3307CR-T
 Max. Leistung: 55,4 kW
 Abgasstufe: Stufe IV (Tier 4f)
 Gewicht der Maschine: 8 t
 Herstellungsjahr: 2015
 Effektive Breite: 1686 mm

Abbildung 7: Erdbauwalze in Ludwigsburg

In Mannheim wurden die Straßenfertiger sowie die Asphaltwalzen aus Abbildung 8 beobachtet und gemessen.



Maschine: Straßenfertiger 1
 Motor: Volvo D8H
 Max. Leistung: 200 kW
 Abgasstufe: Stufe IIIB (Tier 4i)
 Gewicht der Maschine: 17,4 t
 Herstellungsjahr: 2017
 Einbaubreite: 2,5-13m



Maschine: Straßenfertiger 2
 Motor: Cummins QSB6.7-C164
 Max. Leistung: 125 kW
 Abgasstufe: Stufe IV (Tier 4f)
 Gewicht der Maschine: 22 t
 Herstellungsjahr: 2017
 Einbaubreite: 3,0-9,0m

	
<p>[73]</p> <p>Maschine: Tandemwalze 1 Motor: Deutz Max. Leistung: 74,4 kW Abgasstufe: Stufe IV (Tier 4f) Gewicht der Maschine: 9,5 t Herstellungsjahr: 2018 Effektive Breite: 1686 mm</p>	<p>Maschine: Tandemwalze 2 Motor: Kubota Max. Leistung: 55,4 kW Abgasstufe: Stufe IIIb (Tier 4f) Gewicht der Maschine: 7,3 t Herstellungsjahr: 2018 Effektive Breite: 1500 mm</p>

Abbildung 8 : Baumaschinen im Einsatz in Mannheim

Um die Kraftstoffverbräuche zu ermitteln werden bei den Maschinen mit einem CAN-BUS Protokoll J1939 ein CANBUS-Auslesegerät eingebaut. Bei den anderen Maschinen wird der Kraftstoffverbrauch durch das Betanken ermittelt. Der Kraftstofftank wird morgens aufgefüllt und abends nach den Bauarbeiten erneut. Die Menge an getanktem Kraftstoff stellt den Kraftstoffverbrauch des Tages dar.

Die Faktoren aus Formeln (5), (6) und (7) werden mittels Beobachtungen und Messungen der Umgebung erfasst. Die genaue Vorgehensweise ist in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Vorgehensweise zur Ermittlung der Faktoren auf beiden Baustellen für die jeweiligen Faktoren

Faktoren		Ermittlungsvorgehensweise
Maschinen Effizienz	$f_{machine\ technology}$	f_{engine} 1. Aus dem technischen Datenblatt der Maschine wird die Abgasstufe des Motors entnommen. 2. Wert wird mit der Experten-Umfrage definiert.
		f_{eco} 1. Beobachtung und Befragung auf der Baustelle wann der Ecomodus genutzt worden ist 2. Wert wird mit der Experten-Umfrage definiert.
	$f_{significant\ improvement}$ 1. Beobachtung und Befragung auf der Baustelle sowie Informationen aus dem technischen Datenblatt	

			2. Wert wird mit der Experten-Umfrage definiert.
	$f_{machine\ condition}$	f_{age}	1. Jahrgang der Maschine aus dem technischen Datenblatt 2. Wert wird mit der Experten-Umfrage definiert.
		$f_{service\ regularity}$	1. Befragung beim Maschinenbetreiber, wann letzter Service stattfand und was dabei gemacht worden ist 2. Wert wird mit der Experten-Umfrage definiert.
Prozess Effizienz	$f_{site\ orga.}$		Wert wird mithilfe von Beobachtungen und Befragungen der Bauarbeiter ermittelt
	$f_{idle\ unavoidable}$		Wert wird mithilfe von Beobachtungen und Befragungen der Bauarbeiter ermittelt
	$f_{process\ assistant}$		1. Beobachtung und Befragung auf der Baustelle sowie Informationen aus dem technischen Datenblatt 2. Wert wird mit der Experten-Umfrage definiert.
	$f_{constr.\ complexity}$	$f_{weather}$	Wert wird mit Beobachtungen und Messungen mit dem Multimessgerät ermittelt
		$f_{construction\ time}$	Wert wird mithilfe von Beobachtungen und Befragungen der Bauarbeiter ermittelt
		$f_{site\ freedom}$	Wert wird mithilfe von Beobachtungen und Befragungen der Bauarbeiter ermittelt
Betriebs-effizienz	f_{driver}	$f_{physical\&mental\ state}$	Wert wird mithilfe von Beobachtungen und Befragungen der Bauarbeiter ermittelt
		$f_{knowledge\&skills}$	Wert wird mithilfe von Beobachtungen und Befragungen der Bauarbeiter ermittelt
		$f_{workplace\&working\ environment}$	<u>Ergonomie</u> : Messungen der Verstellbarkeit der Teile in der Kabine <u>Sicht aus der Kabine</u> : Bewertung erfolgt angelehnt an ISO 500:2017 (siehe Beschreibung unten) <u>Wetter</u> : Wert wird mit Beobachtungen und Messungen mit dem Multimessgerät ermittelt <u>Lärm</u> : Wert wird mit dem Multimessgerät ermittelt <u>Vibrationen</u> : Wert wird mit dem Vibrationsmessgerät ermittelt
	$f_{stop\&go}$		Wert wird durch Beobachtungen ermittelt

Das Multimessgerät kann die Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Lärm und Belichtung des Arbeitsplatzes messen. Diese Daten sind notwendig um f_{weather} und $f_{\text{workplace\&working environment}}$ zu bestimmen.

„Die Anforderungen an die Sichtbedingung [einer Baumaschine] werden in der ISO 500:2017 festgelegt. Sie besagt, dass die Direktsicht immer Priorität haben muss. Anzeigeräte müssen in Vorwärtsrichtung angebracht sein. Spiegel-zu-Spiegel-Systeme sind nicht mehr zulässig und müssen durch Kamera-Monitor-Systeme ersetzt werden. Zur Messung der Sichtanforderungen können die Nahfeldmessung und der Messkreis mit einem 12-m-Radius herangezogen werden. In der Überarbeitung der Norm von 5006:2006 zu 5006:2017 wird die Nahfeldmessung angepasst. Bei der Messung im Nahbereich wird eine Umrisslinie im Abstand von 1m zur Baumaschine aufgezeichnet und entlang dieser Linie wird ein Prüfkörper aufgestellt. Die Umrisslinie und eine Darstellung der Messung sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Höhe des Prüfkörpers variiert je nach Fahrzeugmodell und Gewicht.“ [51]

Die Prüfkörperhöhe im Bereich des Nahfeldes entsprechen 1,2 m für einen Bagger und Lader [51].

In Abbildung 10 wird dargestellt, wie in Ludwigsburg und Mannheim die Sichtqualität erfasst worden ist. Hierfür hat sich eine Person um die Taille ein Band umbunden der genau 1,20 m vom Boden entfernt ist und die Person ist bei 1 m Abstand um die Maschine gelaufen. Eine weitere Person saß in der Kabine und hat sich notiert in welchen Bereichen das Band für ihn nicht sichtbar war. Ein Ergebnisbeispiel ist in Abbildung 11 dargestellt.

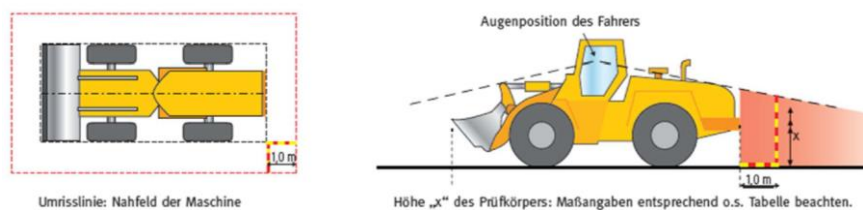


Abbildung 9: Vorgehensweise bei der Messung der Sicht bei mobilen Arbeitsmaschinen [51]

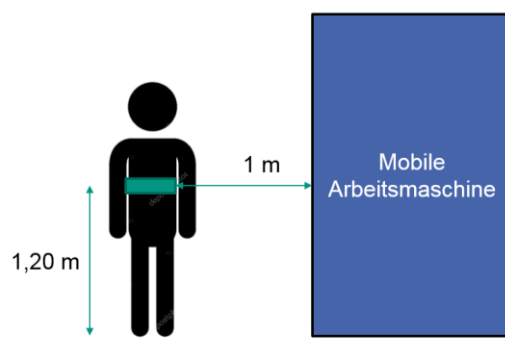


Abbildung 10: Darstellung, wie in Ludwigsburg und Mannheim die Sichtqualität erfasst worden ist

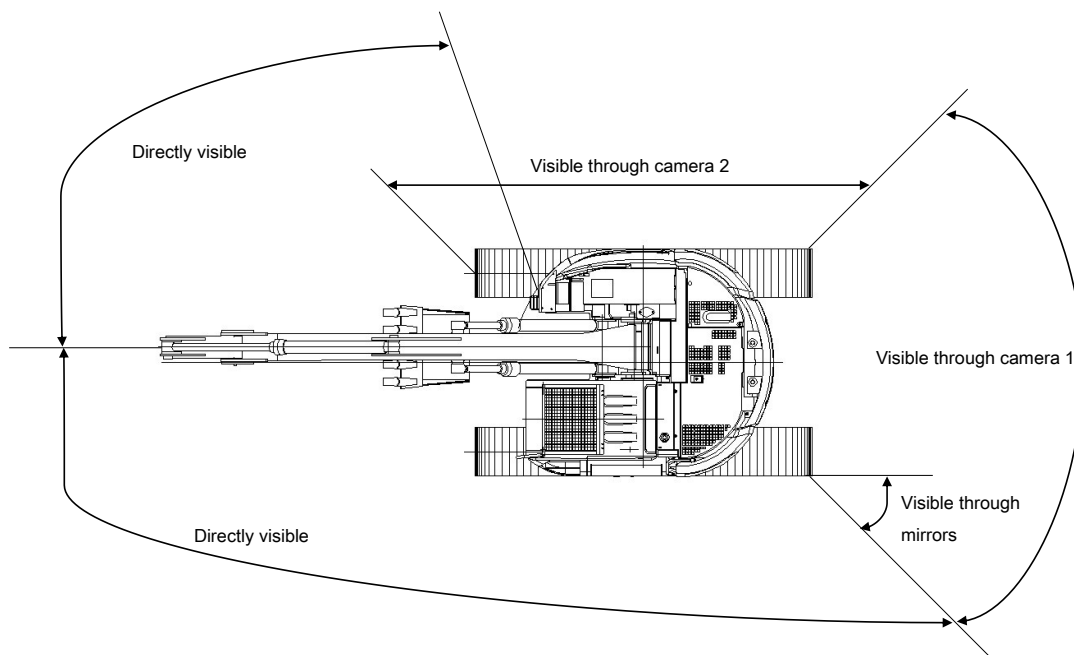


Abbildung 11: Beispielhaftes Ergebnis der Sichtbedingungenbewertung um den Bagger

4.2.3 Ergebnisse

Ludwigsburg

Praxis

In Ludwigsburg wurde der Bagger einen ganzen Morgen von 7h bis 12h beobachtet. Die Beschreibungen der Arbeitsprozesse des Baggers sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Notizen der Arbeitsprozesse des Baggers am 14.12.2018

Beginn	Zustand der Maschine	Löffel	Material: Menge in Anzahl an Löffeln	Fahrstrecke [m]	Aufgaben der Maschine & des Fahrers	Dauer [min]
7:00	Leerlauf					38
7:38	Arbeit			250	Fahren	6

7:44	Arbeit			100	Fahren	3
7:47	Arbeit	1,6m ³	Erde:15		Graben	6
7:53	Arbeit	1,6m ³	Erde:22	15	Graben	12
8:05	Leerlauf					1
8:06	Arbeit	1,6m ³	Erde:4		Graben	5
8:11	Arbeit	1,6m ³	Erde:2		Graben	2
8:13	Arbeit	1,6m ³	Erde:16	30	Graben	9
8:22	Leerlauf					2
8:24	Arbeit	1,6m ³	Erde:16		Graben	10
8:34	Stillstand					46
9:20	Arbeit			340	Fahren	8
9:28	Arbeit	Greifer	Splitter:1	130	Fahren&Holen&Verteilen	3
9:31	Leerlauf					3
9:34	Arbeit	Greifer	Splitter:1	260	Fahren&Holen	4
9:38	Leerlauf					7
9:45	Arbeit	Greifer			Verteilen	2
9:47	Arbeit	Greifer	Splitter:1	260	Fahren&Holen&Verteilen	4
9:51	Arbeit	Greifer	Erde:2	10	Verteilen	2
9:53	Leerlauf					9
10:02	Arbeit	Greifer	Erde:7	4	Verteilen	6
10:08	Leerlauf					6
10:14	Arbeit	Greifer	Erde:9		Verteilen	3
10:17	Leerlauf					2
10:19	Arbeit	Verdichter			Verdichten	4
10:23	Arbeit	Greifer	Erde:1	10	Verteilen	2
10:25	Arbeit	Verdichter			Verdichten	1
10:26	Arbeit	Greifer	Splitter:1	75	Fahren&Holen	3
10:29	Leerlauf					6
10:35	Stillstand					25
11:00	Arbeit	Greifer			Verteilen	1
11:01	Leerlauf					2
11:03	Arbeit	Greifer			Verteilen	1
11:04	Arbeit	Greifer	Splitter:1	90	Fahren&Holen&Verteilen	4
11:08	Arbeit	Greifer	Splitter:1	200	Fahren&Holen&Verteilen	7
11:15	Arbeit	Greifer	Erde:2	10	Verteilen	2
11:17	Arbeit	Greifer	Erde:1	5	Verteilen	2
11:19	Leerlauf					8
11:27	Arbeit	Verdichter			Verdichten	1
11:28	Arbeit	Greifer	Erde:8		Verteilen	4

11:32	Arbeit	Verdichter			Verdichten	4
11:36	Arbeit	1,6m ³	Erde:5	25	Verteilen	5
11:41	Arbeit	1,6m ³	Erde:3		Verteilen	2
11:43	Arbeit	Verdichter			Verdichten	8
11:51	Arbeit				Fahren	9
12:00	Stillstand					

Daraus lässt sich ausrechnen, dass der Bagger insgesamt 1,71 h im Leerlauf, 0,75 h am Fahren und 1,18h im Stillstand war. Der Bagger hat insgesamt 1,36 h gearbeitet. Die Zeiten des Fahrens werden im Validierungsprozess nicht berücksichtigt, da das Fahren in der CO_{2e} Quantifizierungsmethode als Vorbereitungsarbeit angesehen wird und damit nicht quantifiziert wird. Aus diesem Grund muss der Kraftstoff, der beim Fahren verbraucht wird dem gesamten Kraftstoffverbrauch abgezogen werden.

Aus der Tabelle kann entnommen werden, dass fünf unterschiedliche Prozesse mit dem Bagger durchgeführt werden: Graben, Füllen des Kanals, Verdichten, Leerlauf und Fahren.

Der Kraftstoffverbrauch beim Verdichten wird mithilfe des Datenblatts des Anbauverdichter APA1000 von Ammann berechnet. In dem Datenblatt wird angegeben, dass der Anbauverdichter für das Verdichten einen Druck von 250 bar und einen Hydrauliköl-Volumenstrom von 150 l/min benötigt. Somit lautet die benötigte Leistungsanforderung an den Bagger 62,5 kW. Dies entspricht 56% der maximalen Baggerleistung. Der ungefähre Kraftstoffverbrauch beim Verdichten wird über das Kreuzprodukt berechnet. Bei maximaler Leistung verbraucht der Bagger 36,4 l/h somit entspricht 56% einen Kraftstoffverbrauch von 20,32 l/h. Bei einer Verdichtungszeit von 0,3 h entspricht dies einem Kraftstoffverbrauch von 6,09 l Diesel bzw. 19 kg CO_{2e}.

Bei Fahren wird ein Kraftstoffverbrauch von 16,31 l/h angenommen. Bei einer Fahrzeit von 0,75h entspricht dies einem Kraftstoffverbrauch von 12,18 l Diesel bzw. 39 kg CO_{2e}.

Der gesamte Kraftstoff des Baggers an diesem Morgen entspricht 50 l Diesel, was wiederum äquivalent zu 159 kg CO_{2e} ist.

Zusammenfassend kann der Kraftstoffverbrauch für die jeweiligen zu validierenden Prozesse berechnet werden. Dieser entspricht 31,73 l Diesel bzw. 101 kg CO_{2e}.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Kraftstoffverbräuche des Baggers in seinen fünf Prozessen.

Baggerprozesse	Kraftstoffverbrauch [l Diesel]	CO ₂ e Emissionen [kg]
Graben	31,73	101
Füllen des Kanals		
Leerlauf		
Verdichten	6,09	19
Fahren	12,18	39
Summe	50	159

Theorie

Aus der Grundleistungsformel des Baggers von Hoffmann et al. wird für den Bagger eine Grundleistung (Q_B) von 211,8 m³/h für den Prozess des Füllen des Kanals bzw. von 271,6 m³/h für den Prozess des Graben berechnet (siehe Berechnung in Tabelle 13) [74].

$$Q_B = V_R * f_L * n * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (12)$$

Mit

- V_R Löffelinhalt
- f_L Ladefaktor
 $f_L = f_F / f_S$;
 f_F – Füllungsfaktor des Löffels;
 f_S – Auflockerungsfaktor des Bodens
- n Spielzeit
- f_1 Berücksichtigung des Schwenkwinkels
- f_2 Berücksichtigung der Grabtiefe bzw.-höhe
- f_3 Berücksichtigung der Entleerung
- f_4 Berücksichtigung der Einsatzart

Tabelle 13: Grundleistungsberechnung des Baggers am 14.12.2018

	V_R	f_L	n	f_1	f_2	f_3	f_4	Q_B [m ³ /h]
Füllen	1,2 m ³	1,13	202	0,98	1	0,83	1	222,80
Graben	1,6 m ³	0,95	175	1	0,95	1	0,9	227,43

Aus Fahrer Befragungen, Baustellenbeobachtungen und Messungen des Multimessgerätes und Vibrationsmessgerät wurden folgende Werte für die Faktoren definiert.

Tabelle 14: Faktorenwerte für den Bagger in Ludwigsburg

Faktoren			Werte
Maschinen Effizienz	$f_{machine\ technology}$	f_{engine}	1,00
		f_{eco}	0,88
		$f_{significant\ improvement}$	0,87
	$f_{machine\ condition}$	f_{age}	1,05
		$f_{service\ regularity}$	1,00
Prozess Effizienz	$f_{site\ orga.}$		0,45
	$f_{idle\ unavoidable}$		0,34
	$f_{process\ assistant}$		1,09
	$f_{constr.\ complexity}$	$f_{weather}$	0,88
		$f_{construction\ time}$	1,00
		$f_{site\ freedom}$	1,00
Betriebs-effizienz	f_{driver}	$f_{physical\&\ mental\ state}$	0,96
		$f_{knowledge\&\ skills}$	0,83
		$f_{workplace\&\ working\ environment}$	0,98
	$f_{stop\&\ go}$		0,76
Alternative Energiequellen	$f_{energy\ carrier / CO_2e}$		3,18

Durch das Einsetzen der Faktorenwerte in Formel (6) werden folgende Kraftstoffverbräuche bzw. CO_{2e} Emissionen berechnet.

Tabelle 15: Kraftstoffverbräuche bzw. Treibhausgasemissionen für die Prozesse Graben und Füllen

Prozesse	V _{Material} [m ³]	Q _B [m ³ /h]	b _m [l/h]	f _{ui}	B [l Diesel]	m _{CO_{2e}} [kg CO _{2e}]
Graben	120	227,43	36,41	1	20,64	66
Füllen	56	222,80	36,41	1	9,83	31
Summe					30,47	97

Vergleich Praxis vs. Theorie

In Tabelle 16 werden die Ergebnisse aus den Messungen auf der Baustelle (Praxis) und ermittelt mit der CO_{2e} Quantifizierungsformeln (Theorie), berechnet mit Formel (6) gegenübergestellt.

Tabelle 16: Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis

	B [l Diesel]	m_{CO_2e} [kg CO ₂ e]
Praxis	31,73	101
Theorie	30,47	97
Differenz	1,26 l Diesel	4 kg CO₂e
	-4%	-4%

Die Differenz zwischen der Praxis und der Theorie sind also im akzeptablen Bereich.

Nach dem gleichen Prinzip wurde für den Bagger am 27.11.2018 vorgegangen.

Die Ergebnisse können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden:

Tabelle 17: Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 27.11.2018

		B [l Diesel]	m_{CO_2e} [kg CO ₂ e]
Bagger	Praxis	125	398
	Theorie	119,69	381
	Differenz	5,31 l Diesel	17 kg CO₂e
		-4%	-4%

Auch hier ist die Differenz zwischen den Werten aus der Praxis und der Theorie im akzeptablen Bereich

Praxis

Für die Auswertung der gesammelten Daten der Walze in Ludwigsburg wurde ebenfalls nach dem gleichen Prinzip vorgegangen. Bei der Walze konnte ein CANBUS Auslesegerät eingebaut werden. Dadurch konnte die auf dem BUS vorhandenen Signale für Geschwindigkeit, Kraftstoffverbrauch und Drehzahl aufgezeichnet werden. Die Walze wurde sowohl am 27.11.2018 als auch am 14.12.2018 beobachtet.

Am 27.11.2018 war die Walze 28 min im Einsatz. Davon waren die letzten 8 min das Herausfahren der Walze aus der Baustelle, welches in der CO₂e Quantifizierungsmethode als Vorbereitungsarbeit angesehen und daher unberücksichtigt bleibt. Der Prozess, der zu validieren ist, besteht daher aus 20 min, von 16h21 bis 16h41. In der folgenden Tabelle sind die Beobachtungen des Arbeitsprozesses dargestellt.

Aus den Daten kann entnommen werden, dass $t_{working}$ 0,28 h und t_{idle} 0,06 h entspricht. Der Kraftstoffverbrauch im Leerlauf und beim Verdichten konnten mittels den Daten aus dem Auslesegerät erfasst werden. Der Kraftstoffverbrauch im Leerlauf entsprach 0,07 l Diesel mit einem b_{idle} von 1,1 l/h. Der gesamte Kraftstoffverbrauch beim Verdichten entsprach 2,06 l Diesel. Dies entspricht einem gesamten Kraftstoffverbrauch von 2,13 l bzw. 7 kg CO₂e.

Tabelle 18: Notizen über die Arbeitsprozesse der Walze am 27.11.2018

Uhrzeit	Zustand der Maschine	Strecke vorwärts (m)	Strecke Rückwärts (m)	v [m/h]
	Fahren			
16:22:51	Verdichten		52	1686,5
16:24:42	Verdichten	52		1686,5
16:26:33	Verdichten		52	1642,1
16:28:24	Verdichten	52		1686,5
16:30:15	Verdichten		52	1733,3
16:32:06	Verdichten	52		1782,9
16:33:57	Verdichten		52	1671,4
16:35:48	Verdichten	52		1717,4
	Verdichten & umdrehen		52	2018,2
		22		
16:38-16:41	Leerlauf			
16:42-16:48	Fahren	100		1900
			47	
			43	
16:49	Stoppen			

Theorie

Aus der Grundleistungsformel der Walze wird für die Walze eine Grundleistung (Q_B) von 595,62 m³/h für den Prozess des Verdichten berechnet [75].

$$Q_B = f * b_{eff} * v/n \quad (13)$$

Mit

- f Abminderungsfaktor (0,75)
- v Durchschnittsgeschwindigkeit in m/h
- n Empfohlene Übergänge
- b_{eff} Effektive Arbeitsbreite

Aus der Literatur von Hoffmann et al. werden für eine effektive Verdichtung 3 bis 5 Übergänge mit einer Vibrationswalze empfohlen. Der Boden, der verdichtet werden soll, wird nach der DIN 18300 als Bodenklasse 4: lockerer mittelschwerer lösbarer Bodenart klassifiziert [74]. Aus den Prozessbeobachtungen und Informationen aus der Literatur wird eine Übergangszahl von 4,2 gewählt. Nach dem Datenblatt der Walze ist

ihre effektive Breite 1.686 mm. Als Durchschnittsgeschwindigkeit wird die gemessene Geschwindigkeit aus dem CANBUS Auslesegerät gewählt von 1975 m/h. Die Grundleistungsberechnung erfolgt in der nachfolgenden Tabelle.

Tabelle 19: Grundleistungsberechnung des dynamischen Verdichtens eines Bodens der Bodenklasse 4

Prozess	f	b_{eff} [m]	v [m/h]	n	Q_B [m ² /h]
Dynamisches Verdichten	0,75	1,686	1975	4,2	594,62

Aus den Baustellenbeobachtungen und Messungen des Multimeßgerätes und Vibrationsmeßgerät wurden folgende Werte für die Faktoren definiert.

Tabelle 20: Definition der Faktoren in Ludwigsburg für die Walze

Faktoren			Werte
Maschinen Effizienz	$f_{machine\ technology}$	f_{engine}	1,00
		f_{eco}	0,87
		$f_{significant\ improvement}$	0,66
	$f_{machine\ condition}$	f_{age}	1,00
		$f_{service\ regularity}$	1,00
Prozess Effizienz	$f_{site\ orga.}$		0,18
	$f_{idle\ unavoidable}$		0
	$f_{process\ assistant}$		1,23
	$f_{constr.\ complexity}$	$f_{weather}$	1,00
		$f_{construction\ time}$	1,00
		$f_{site\ freedom}$	1,00
Betriebs- effizienz	f_{driver}	$f_{physical\&\ mental\ state}$	1,00
		$f_{knowledge\&\ skills}$	0,83
		$f_{workplace\&\ working\ environment}$	1,00
	$f_{stop\&\ go}$		1,00
Alternative Energiequellen	$f_{energy\ carrier}/CO_2e$		3,18

Durch das Einsetzen der Faktorenwerte in Formel (6) werden folgende Kraftstoffverbräuche bzw. CO₂e Emissionen berechnet. Dabei werden für b_m und b_{idle} die Werte aus der Experten-Umfrage genutzt [13].

Tabelle 21: Kraftstoffverbräuche bzw. Treibhausgasemissionen für die Prozesse Graben und Füllen

Prozesse	V _{Material} [m ²]	Q _B [m ² /h]	b _m [l/h]	b _{idle} [l/h]	f _{ui}	B [l Diesel]	m _{CO₂e} [kg CO ₂ e]
Dynamisches verdichten	151,74	594,62	12,7	1,6	1	1,91	6

Vergleich Praxis vs. Theorie

In Tabelle 16 werden die Ergebnisse der Praxis und der Theorie gegenübergestellt.

Tabelle 22: Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 27.11.2018

	B [l Diesel]	m _{CO₂e} [kg CO ₂ e]
Praxis	2,12	7
Theorie	1,91	6
Differenz	0,2 l Diesel	0,7 kg CO₂e
	-10%	-10%

Die Differenz zwischen Praxis und Theorie befindet sich im akzeptablen Bereich.

Nach dem gleichen Prinzip wurde für dieselbe Walze am 14.12.2018 vorgegangen. Das Ergebnis kann Tabelle 23 entnommen werden.

Tabelle 23: Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 14.12.2018

	B [l Diesel]	m _{CO₂e} [kg CO ₂ e]
Praxis	15,56	49
Theorie	12,61	40
Differenz	2,95 l Diesel	9,38 kg CO₂e
	-19%	-19%

Die Differenz zwischen Praxis und Theorie befindet sich im akzeptablen Bereich.

Die Differenz von 19% ist hauptsächlich durch den unterschiedlichen Kraftstoffverbrauch b_{idle} theoretisch (aus der Experten-Umfrage) von 1,6 l/h und b_{idle} praktisch (aus den Messungen ermittelt mithilfe des CANBUS Auslesegerät) von 1,1 l/h. Diese Differenz an Kraftstoffverbrauch für die Walze im Leerlauf ist für den 14.12.2018 ausschlaggebender als für den 27.11.2018, da die Leerlaufzeitmenge am 14.12.2018 höher war ($t_{idle, am 27.11.2018}=0,06$ h und $t_{idle, am 14.12.2018}=2,12$ h). Bei einer richtigen Angabe von b_{idle} mit 1,1 l/h statt 1,6 l/h würde eine Differenz von 0,56 l Diesel bzw. von 1,77 kg CO₂e (-4%) entstehen.

Mannheim

In Mannheim wurden sowohl die zwei Straßenfertiger als auch drei Walzen beobachtet.

Praxis

Wie in Ludwigsburg wurden zunächst die Arbeitsprozesse durch Beobachtungen aufgenommen. Beim Straßenfertiger konnte kein Auslesegerät eingebaut werden. Der gesamte Kraftstoffverbrauch wurde durch Betankung vor Arbeitsbeginn und nach Arbeitsbeginn ermittelt. Am 12.12.2019 haben der „Straßenfertiger 1“ 148 l Diesel und der „Straßenfertiger 2“ 49 l Diesel verbraucht. Dies entspricht einer ausgestoßenen Treibhausgasemissionsmenge von 471 kg CO_{2e} für den Straßenfertiger 1 und von 156 kg CO_{2e} für den Straßenfertiger 2.

Auch hier, müssen die Fahrten von und zum Arbeitsplatz abgezogen werden. Hier besteht der Prozess Fahren aus einer Kombination aus Fahren und im Leerlauf stehen. Die jeweiligen Kraftstoffverbräuche beim Prozess „Fahren“ können Tabelle 24 entnommen werden. Die Kraftstoffverbräuche beim Fahren b_{Fahren} wurden auf Basis der Angaben der Maschinenhersteller geschätzt mit 26 l/h für den Straßenfertiger 1 und mit 14 l/h für den Straßenfertiger 2.

Tabelle 24: Menge an Treibhausgasemissionen der Straßenfertiger beim Prozess „Fahren“

Maschine	Prozess: Fahren	t_{fahren} [h]	b_{fahren} [l/h]	t_{idle} [h]	b_{idle} [l/h]	B [l]	m_{CO_2e} [kg CO _{2e}]
Straßenfertiger 1	Fahren + Leerlauf	0,62	26	2,52	4,05	26,22	83
Straßenfertiger 2	Fahren + Leerlauf	0,65	14	5,93	4,05	33,13	105

Somit ergibt sich für den zu untersuchenden Prozess „Asphalt legen“ ein Kraftstoffverbrauch von 122 l Diesel bzw. eine Emissionsmenge von 387 kg CO_{2e} für den Straßenfertiger 1 und 16 l Diesel bzw. 50 kg CO_{2e} für den Straßenfertiger 2.

Theorie

Mit der Grundleistungsformel (14) des Straßenfertigers von Hoffmann et al. kann die Grundleistung (Q_B) für den Straßenfertiger 1 und für den Straßenfertiger 2 für den Prozess des „Asphalt legen“ berechnet werden [74].

$$Q_B = b_{\text{eff}} * v * h \quad (14)$$

Mit

- b_{eff} Arbeitsbreite in m
- v Arbeitsgeschwindigkeit in m/h
- h Schichthöhe des verdichteten Materials

Nach den Datenblättern der beiden Straßenfertiger kann die Arbeitsbreite bestimmt werden. Aus den Beobachtungen auf der Baustelle kann Schichthöhe des verdichteten Materials bestimmt werden. Die theoretische Arbeitsgeschwindigkeit wird mittels der Einbaufibel ermittelt [76]. Die Grundleistungsberechnung erfolgt in der nachfolgenden Tabelle.

Tabelle 25: Grundleistungsberechnung des „Asphalt legen“ für den Straßenfertiger 1 und 2

Maschine	Arbeitszeiten	b_{eff} [m]	v [m/h]	h [m]	Q_B [m ² /h]
Straßenfertiger 1	Vormittag	6,15	300	0,1	184,5
	Mittag	5,00	360	0,04	72,00
	Nachmittag	6,15	360	0,06	132,84
Straßenfertiger 2	Vormittag	4	360	0,04	57,60
	Mittag	5	360	0,04	72,00

Aus den Baustellenbeobachtungen und Messungen des Multimeßgeräts und Vibrationsmessgeräts wurden die Werte für die Faktoren des Straßenfertigers 1 (siehe Tabelle 26) und des Straßenfertiger 2 (siehe Tabelle 27) ermittelt.

Tabelle 26: Definition der Faktoren in Mannheim für den Straßenfertiger 1

Faktoren für den Straßenfertiger 1		Vormittag	Mittag	Nachmittag		
Maschinen Effizienz	$f_{machine\ technology}$	f_{engine}	1,00			
		f_{eco}	0,85			
		$f_{significant\ improvement}$	0,88			
	$f_{machine\ condition}$	f_{age}	1,05			
		$f_{service\ regularity}$	1,00			
Prozess Effizienz	$f_{site\ orga.}$		0,81	0,64	0,47	
	$f_{idle\ unavoidable}$		0			
	$f_{process\ assistant}$		1,00			
	$f_{constr.\ complexity}$	$f_{weather}$		0,9		
		$f_{construction\ time}$		1,00	0,90	0,85
$f_{site\ freedom}$		0,95				
Betriebs-effizienz	f_{driver}	$f_{physical\&\ mental\ state}$		1,00	0,95	0,95
		$f_{knowledge\&\ skills}$		0,92		
		$f_{workplace\&\ working\ environment}$		0,95		
	$f_{stop\&\ go}$		1,00			
Alternative Energiequellen	$f_{energy\ carrier / CO_2e}$		3,18			

Tabelle 27: Definition der Faktoren in Mannheim für den Straßenfertiger 2

Faktoren für den Straßenfertiger 2		Vormittag	Mittag	
Maschinen Effizienz	$f_{machine\ technology}$	f_{engine}	1,00	
		f_{eco}	1,00	
		$f_{significant\ improvement}$	0,88	
	$f_{machine\ condition}$	f_{age}	1,05	
		$f_{service\ regularity}$	1,00	
Prozess Effizienz	$f_{site\ orga.}$		0,81	0,46
	$f_{idle\ unavoidable}$		0	
	$f_{process\ assistant}$		1,00	
	$f_{constr.\ complexity}$	$f_{weather}$	0,90	
		$f_{construction\ time}$	0,9	0,85
		$f_{site\ freedom}$	0,95	
Betriebs-effizienz	f_{driver}	$f_{physical\&\ mental\ state}$	1,00	0,95
		$f_{knowledge\&\ skills}$	0,92	
		$f_{workplace\&\ working\ environment}$	0,95	
	$f_{stop\&\ go}$		1,00	
Alternative Energiequellen	$f_{energy\ carrier / CO_2e}$		3,18	

Durch das Einsetzen der Faktorenwerte in Formel (6) werden die Kraftstoffverbräuche bzw. CO_{2e} Emissionen berechnet, siehe Tabelle 28. Dabei kann für b_m des Vögele-Straßenfertiger der Kraftstoffverbrauch aus der Experten-Umfrage genutzt werden. Beim Straßenfertiger 1 wird der Kraftstoffverbrauch hochskaliert auf 200 kW, da der Referenzkraftstoffverbrauch für eine Maschine von 125 kW (wie der Straßenfertiger 2 in Mannheim) gültig ist. Für b_{idle} wird 4,05 l/h angenommen, da wegen niedrigen Temperaturen, der Straßenfertiger einen höheren Kraftstoffverbrauch im Leerlauf hat. Im Leerlauf muss der Straßenfertiger die Bohle warm halten und bei niedrigen Temperaturen benötigt er dafür mehr Energie.

Tabelle 28: Kraftstoffverbräuche bzw. Treibhausgasemissionen für die Prozesse „Asphalt legen“ der beiden Straßenfertiger

Maschine	Arbeitszeiten	V _{Material} [m ³]	Q _B [m ³ /h]	b _m [l/h]	b _{idle} [l/h]	f _{ui}	B [l Diesel]	m _{CO₂e} [kg CO ₂ e]
Straßenfertiger 1	Vormittag	125,77	184,50	46,71	4,05	1	49,56	158
	Mittag	23,00	72,00	46,71	4,05	1	21,90	70
	Nachmittag	101,48	132,84	46,71	4,05	1	51,03	162
Summe							122,49	390
Straßenfertiger 2	Vormittag	4,96	57,60	20,40	4,05	1	4,11	13
	Mittag	23,2	72,00	20,40	4,05	1	11,94	38
Summe							16,05	51

Vergleich Praxis vs. Theorie

In Tabelle 29 werden die Ergebnisse der Praxis und der Theorie gegenübergestellt.

Tabelle 29: Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 27.11.2018

		B [l Diesel]	m _{CO₂e} [kg CO ₂ e]
Straßenfertiger 1	Praxis	121	387
	Theorie	122,49	390
	Differenz	1,49 l Diesel	6 kg CO ₂ e
		+0,1%	+0,1%
Straßenfertiger 2	Praxis	16	50
	Theorie	16,05	51
	Differenz	0,05 l Diesel	1 kg CO ₂ e
		vernachlässigbar	vernachlässigbar

Bei den Ergebnissen aus Tabelle 29 wird deutlich, dass die Differenz zwischen Theorie und Praxis vernachlässigbar ist. Somit wird auch hier für den Straßenfertiger die CO₂e Quantifizierungsformel für Baumaschinen validiert.

Nach dem gleichen Prinzip wie bei den Walzen in Ludwigsburg wurden die CO₂e emittierten Mengen der Walzen in Mannheim über die CO₂e Quantifizierungsformel berechnet und in der Praxis ermittelt gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung kann Tabelle 30 entnommen werden.

Tabelle 30: Vergleich der Ergebnisse aus der Theorie und Praxis am 27.11.2018

		B [l Diesel]	m_{CO_2e} [kg CO₂e]
Tademwalze 1	Praxis	11,97	38
	Theorie	12,88	41
	Differenz	0,92 l Diesel +0,07%	3 kg CO₂e +0,07%
Tademwalze 2	Praxis	16,60	53
	Theorie	16,87	54
	Differenz	0,26 l Diesel +0,02%	0,85 kg CO₂e +0,02%

Bei den Ergebnissen aus Tabelle 30 wird deutlich, dass die Differenzen zwischen Theorie und Praxis vernachlässigbar sind. Somit wird auch hier für Walzen im Asphaltbau die CO₂e Quantifizierungsformel validiert.

4.2.4 Fazit

Mithilfe von Beobachtungen und Messungen auf der Baustelle konnte die entwickelte CO₂e Quantifizierungsformel angewendet werden und mit Treibhausgasemissionen, welche tatsächlich in der Praxis emittiert worden sind, verglichen werden. In 4.2.3 konnte gezeigt werden, dass diese Unterschiede, die möglicherweise zwischen der Theorie und Praxis entstehen im Bereich zwischen 0 und 19% liegen. Somit gilt die entwickelte CO₂e Quantifizierungsmethode als validiert.

In der Parametrierung der Faktoren sollte für b_{idle} der Walzen zwischen Asphaltbau und Erbau unterschieden werden. Des Weiteren muss bei der Ermittlung des b_{idle} für den Straßenfertiger die Außentemperatur mitberücksichtigt werden. Bei niedrigen Temperaturen benötigt der Straßenfertiger mehr Energie um die Bohle auf konstanter Temperatur zu halten.

4.3 Alternative Energieträger

Die Säule „Alternativer Energieträger“ konnte nicht durch praktische Versuche validiert werden, da heute nur vereinzelt Baumaschinen existieren, die mit alternativen Energieträger betrieben werden. Alle verfügbaren Baumaschinen wurden ausschließlich mit Diesel betrieben.

5 Tool

Ziel der Toolentwicklung ist es ein Tool zu haben, dass die Treibhausgasemissionen quantifiziert nach den Formeln aus Kapitel 2. Dabei soll das Tool die CO₂e Quantifizierung vereinfachen so dass sowohl für eine Person mit Experten Wissen oder allgemeinen Wissen die Quantifizierung möglich ist. Die CO₂e Quantifizierung soll für Prozesse aus folgenden Anwendungen möglich sein: Steinbruch, Erdbau, Hochbau und Straßenbau.

5.1 Anforderung an das Tool

Die Anforderungen an das Tool lassen sich in funktionellen und technischen Anforderungen differenzieren. Dabei kann jede Anforderung als Festforderung oder Wunschforderung definiert werden. Diese werden in Tabelle 31 und

Tabelle 32 zusammengefasst.

Tabelle 31: Funktionelle Anforderungen [basiert auf 77]

Titel	Forderung (Wunsch/Fest)	Erläuterung
Emissionsberechnung und -darstellung	F	CO ₂ - und CO ₂ -äquivalente Emissionen müssen automatisch für ganze Projekte berechnet und angezeigt werden.
Erweiterung der Programmfunktionalität um Referenzprojekte; alternativ Neuentwicklung eines integrierbaren Moduls	F	Die vorliegenden Daten für die Projektkategorie Erdbau, Steinbruch, Hochbau und Straßenbau sollen eingepflegt werden.
Vereinfachte Nutzeransicht	F	Nutzeransicht für den Laien (ohne Details) und den Experten (mit Details und Datenbankzugriff)
Export der Ergebnisse	W	in PDF-Form und in Tabellenform (Excel-File)
Speicher- und Ladefunktion	W	Es soll eine beliebige Anzahl an Projekten erstellt werden können, die abgespeichert und zu gegebenem Zeitpunkt wieder geladen werden können.
Elementarprozesse mit beliebiger Anzahl von Maschinen- und Materialkindern	W	Prozesse sollen u.U. auch mehr als nur ein Material und eine Maschine verarbeiten können.
Erstellung von Maschinen- und Materialien	F	Die Datenbanken müssen mit Maschinen und Materialien erweitert werden können. Die Erweiterung um neue Maschinen- und Materialtypen muss gewährleistet sein.
Neuzuweisung Maschine/Material	F	Maschinen und Materialien für einen Prozess müssen ausgetauscht werden können.

Manipulation von Maschinen/Materialparametern	F	Der Nutzer muss die Möglichkeit haben, die verwendeten Parameter zu ändern und an eigenen Projektbedingungen anzupassen.
Änderung von Prozessparametern	F	Analog, s.o.
Projektvorlagen	F	Standardvorlagen sollen dem Nutzer das Erstellen eigener Projekte erleichtern. Die Vorlagen sollen Default-Werte für Prozess-, Maschinen- und Materialparameter zur Verfügung stellen.
Nutzerdefinierte Projekte	W	Der Nutzer soll Prozesse frei zu einem Projekt verknüpfen können.
Adaption von Projektstrukturen	W	Projekte sollen bausteinartig vom Endnutzer zusammengesetzt werden können.
Anpassbarkeit der Berechnungsgrundlage	W	Der Softwarebetreuer soll Berechnungsschemata auch ohne Programmierkenntnisse adaptieren können.
Darstellung der Projektstruktur	W	Der Nutzer soll die Projekthierarchie, d.h. die Summe aller Prozesse im Projekt, einsehen können.
Berechnungsgrundlage	F	Der Zugriff auf die Berechnungsschemata soll für den Standardnutzer unzugänglich sein.

Tabelle 32: Technische Anforderungen [basiert auf 77]

Titel	Forderung (Wunsch/Fest)	Erläuterung
Programmierungsumgebung	F	Die Umsetzung des Programms hat zwingend in Python zu erfolgen.
Sicherheit / Wahrung Datenintegrität	W	Die Datengrundlagen sollen vor unberechtigtem Zugriff geschützt werden können. Diese Anforderung muss nicht unmittelbar umgesetzt werden, die Möglichkeit einer solchen Erweiterung soll aber grundsätzlich realisierbar sein.
Datenexport & -import	W	Mittelfristig sollen Datensätze zwischen verschiedenen Programminstanzen ausgetauscht werden können. Die Möglichkeit einer solchen Erweiterung soll gewährleistet sein.
Erweiterbarkeit	F	Das Programm soll möglichst modular aufgebaut sein, um Teilfunktionen ohne großen Aufwand überarbeiten und anpassen zu können.

5.2 Aufbau des Tools

Das Tool soll die Emissionen eines neuen Projekts quantifizieren können und die Treibhausgasemissionen von zu drei Projekte vergleichen können. Dabei muss bei der Erstellung eines neuen Projekts zunächst ausgewählt werden in welcher Anwendungsart das Projekt eingeordnet werden soll. Anschließend erfolgt die Detaillierung des Projekts durch die Definition der Teilschritte. Das Ergebnis wird anschließend im Tool angezeigt und soll in Form eines pdfs ausdrückbar sein. Beim Projektvergleich werden aus der Datenbank drei Projekte ausgewählt, anschließend werden die Ergebnisse dem Toolnutzer gezeigt und in Form eines pdf Dokuments zum Druck bereitgestellt. Es soll jederzeit möglich sein in das Hauptmenü zurück zu kehren, und mittels „Help“ die Funktionen des Tools bzw. den Umgang mit dem Tool nachzuvollziehen. Außerdem soll für den Nutzer jederzeit möglich sein zwischen den professionellen bzw. Standardmodus zu wechseln. Der schematische Aufbau des Tools erfolgt in Abbildung 12.

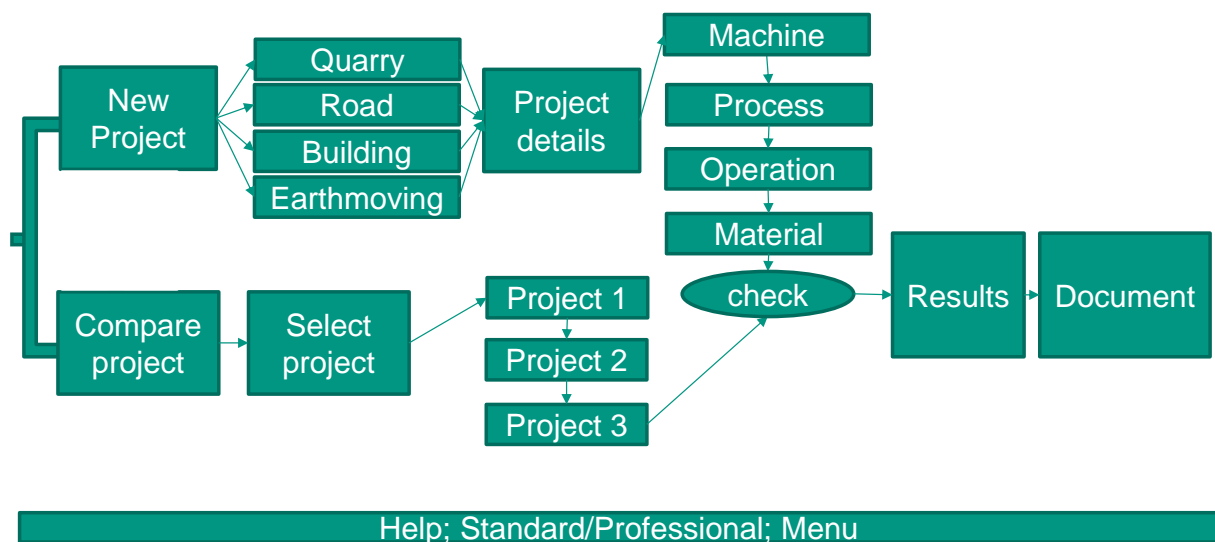


Abbildung 12: Schematischer Aufbau des Tools

Die folgenden Abbildungen zeigen ein paar Interfaces des Tools, welches in Python programmiert worden ist. In Abbildung 13 ist die Hauptseite dargestellt. Links befindet sich das Menü. Der Menü- Zugriff ist auf jeder Seite des Tools ermöglicht. In „New Project“ kann ein neues Projekt in das Tool eingegeben werden. Die Treibhausgasemissionen des Projekts werden als Ergebnis dargestellt. In „Compare Project“ können die Treibhausgasemissionen von bis zu drei Projekten miteinander verglichen werden. Dabei können jeweils die Projekte in drei Zeitschiene verglichen werden: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. In „Database“ wird dem Nutzer nur unter dem professionellem Modus Zugriff auf die Datenbank erlaubt. In „introduction“ wird das Tool kurz erläutert. In „Help“ befinden sich Videos mit Erklärungen, wie mit dem Tool umgegangen werden soll.

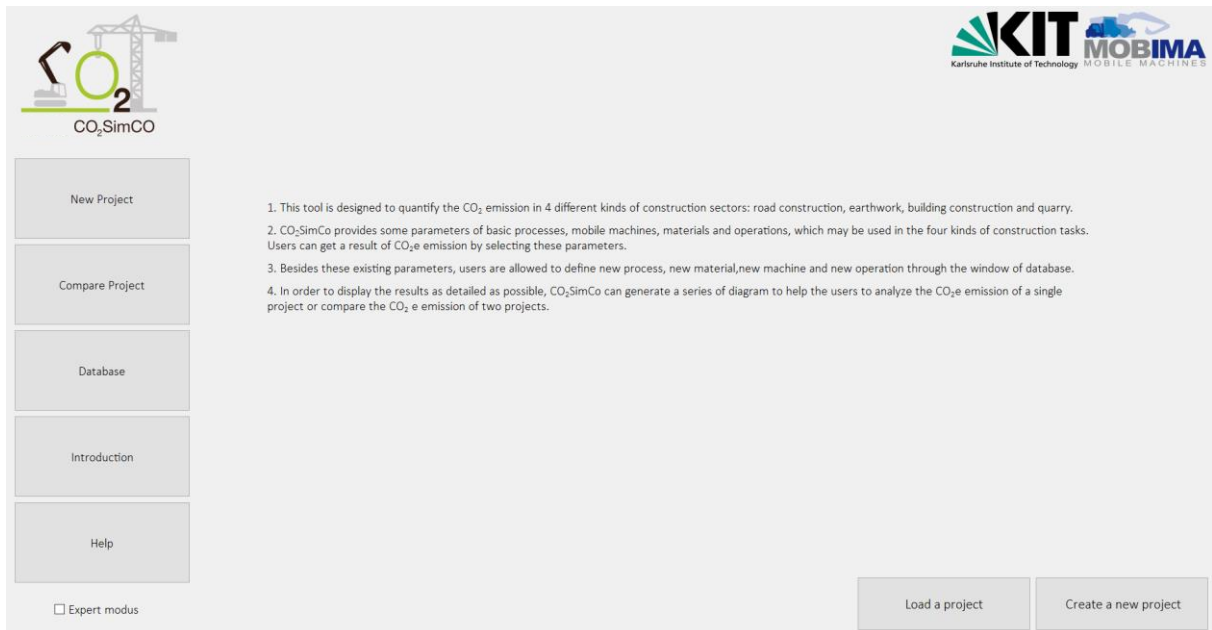


Abbildung 13: Tool Hauptseite

In Abbildung 14, ist das Interface zu sehen bei dem der Nutzer ein Projekt anlegen kann. Hier muss der Nutzer zunächst die Anwendungsart auswählen um geeigneten Hilfen bei der Materialauswahl, Maschinenauswahl und Betriebsbedingungen zu erhalten. Des Weiteren kann das Projekt, dann mit den richtigen Informationen in den Projekten-Datenbank gespeichert werden.

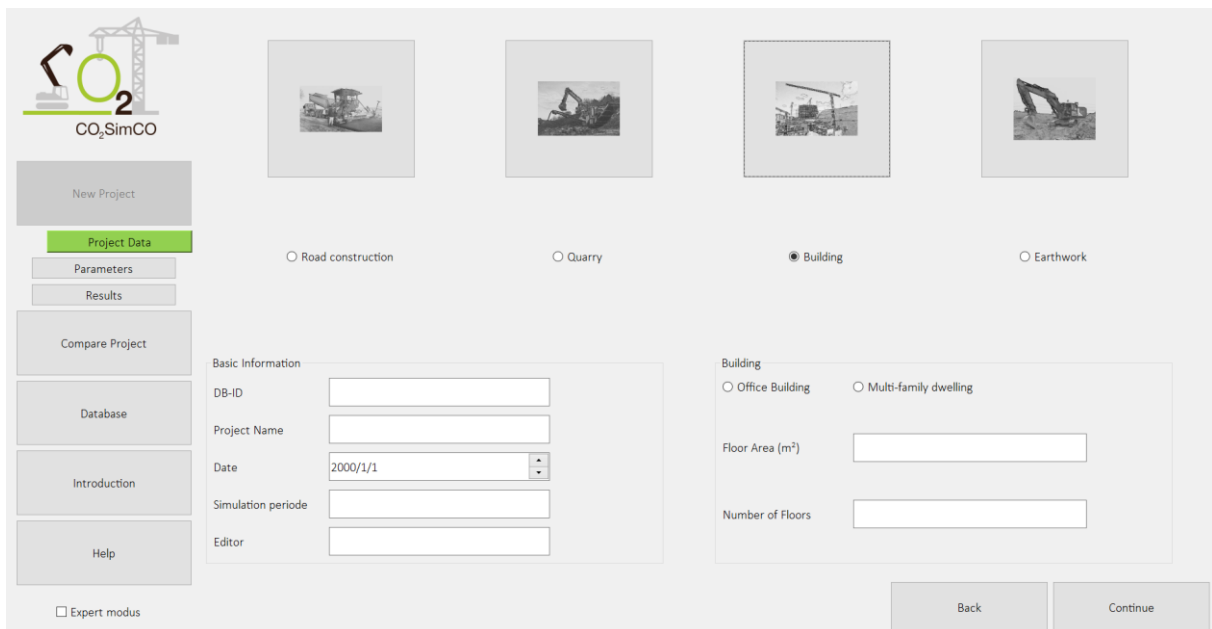


Abbildung 14: Tool- Neues Projekt

Nach der Eingabe im Interface aus Abbildung 14 kann der Nutzer die Parameter im Interface in Abbildung 15 eingeben

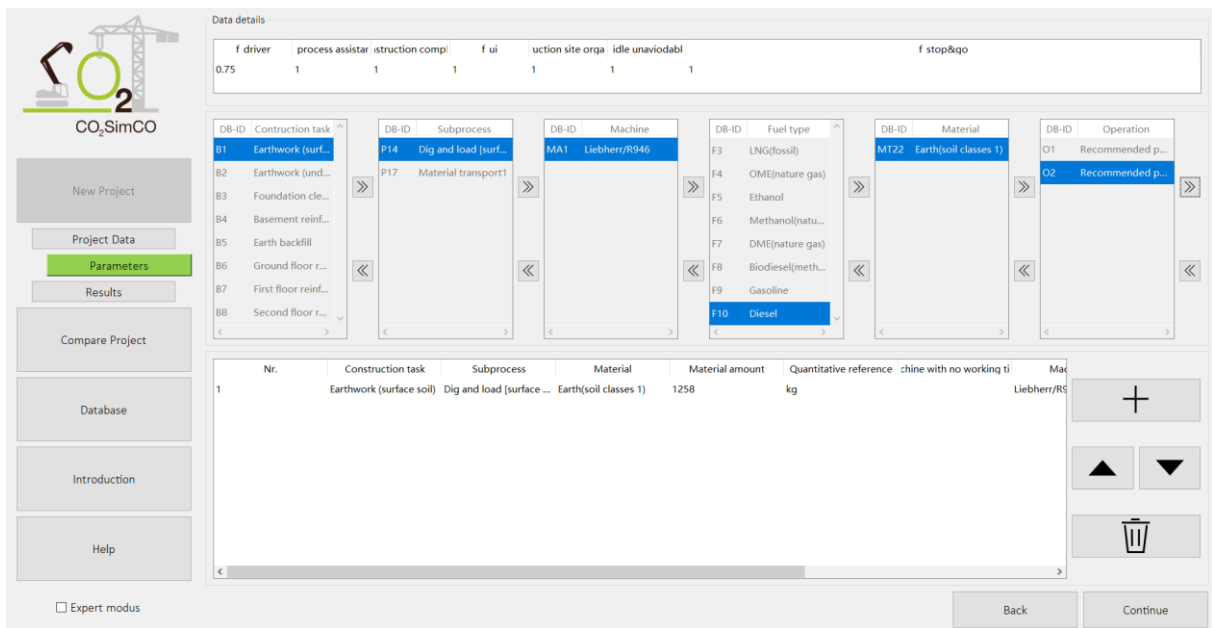


Abbildung 15: Parametereingabe des neuen Projekts

In Abbildung 16 wird der Zugriff der Daten dem Nutzer ermöglicht unter der Bedingung, dass er sich im professionellen Modus „Expert modus“ befindet.

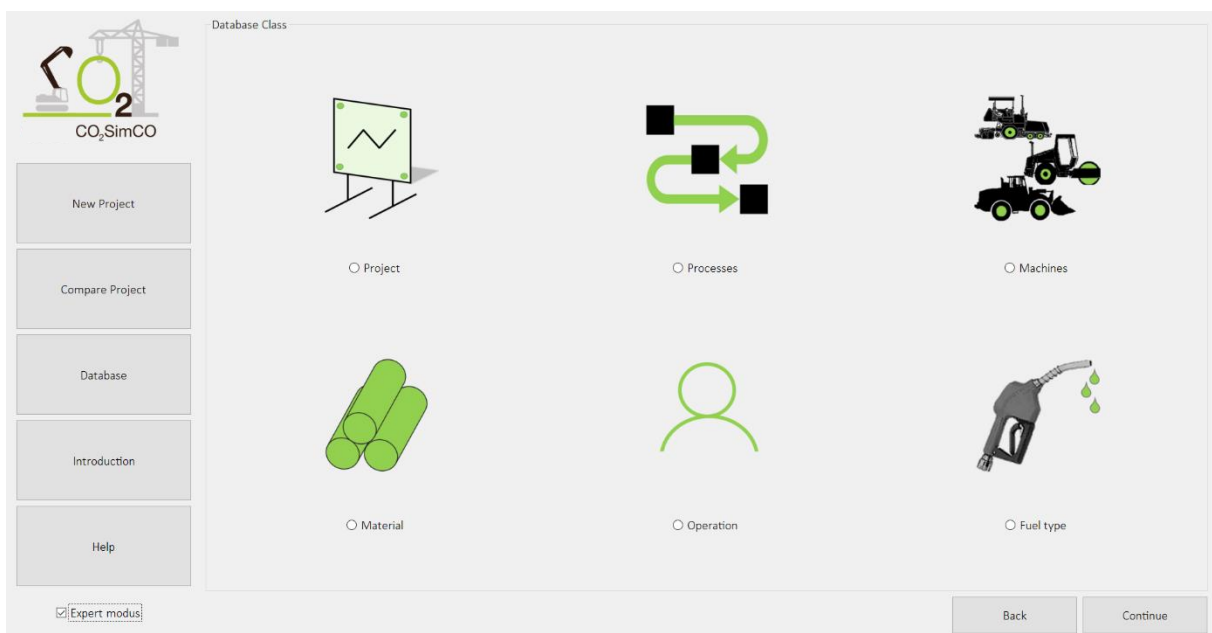


Abbildung 16: 6 Datenbanken: Projekt-, Prozess-, Maschinen-, Material-, Betriebsbedingungen- und Kraftstoff-Datenbanken

Die Treibhausgasemissionsergebnisse eines Projektes oder Projektvergleich werden in einem pdf. zusammengefasst dargestellt. Eine Beispielhafte Ergebnisdarstellung kann dem Anhang entnommen werden.

5.3 Weitere Schritte für das Tool

Im Rahmen dieses Projekts konnte der Aufbau und die Art des Tools definiert werden. Das Ergebnis hat gezeigt, dass Funktionen für den Nutzer noch fehlen. Die fehlenden Funktionen werden im Folgenden kurz erklärt.

- Die Treibhausgasemissionen für die Herstellung des Materials sind für den Nutzer im Eingabefeld von Abbildung 15 nicht deutlich zu sehen.
- Der Nutzer kann keinen eigenen Materialmix mit dem Tool herstellen. Wie zum Beispiel Asphalt, Frostschutzschicht Material, etc.
- Die Grundleistung einer Maschine muss im Tool immer in m^3/t angegeben werden. Dies bedeutet wiederum, dass der CO_2e Faktor des Materials in $\text{kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3$ angegeben werden muss. Alternativen sind nicht möglich, da das Tool die Einheiten nicht kontrolliert bzw. der Nutzer keine Einsicht auf die hinterlegten Einheiten bekommt, wenn er ein Projekt erstellt.
- Bei der Erstellung eines neuen Projekts fehlt ein Interface-Aufbau nach dem 4 Säulen Modell
- Laden eines bestehenden Projektes ist nicht möglich. Das heißt das Laden eines Projektes, mit anschließender Modifizierung dieses und Speicherung als neues Projekt, ist nicht möglich.
- Die Ergebnisse der Quantifizierung werden nicht im Tool dargestellt, sondern nur als pdf.-Dokument. Eine zusätzliche Darstellung im Tool sollte ebenfalls erfolgen mit der Möglichkeit Parametern im Tool zu modifizieren.
- In der Ergebnisdarstellung fehlt die genaue Wertangabe in Form einer Tabelle.
- Die Ergebnisdarstellung im pdf.-Dokument sollten verbessert werden wie z.B. Schriftgröße 11, Y-Achse und X-Achse der Diagramme beschriften, Darstellungseinheit an das Ergebnis anpassen ($\text{kg CO}_2\text{e}$ oder $\text{t CO}_2\text{e}$)
- Das Tool sollte sowohl die CO_2e und die CO_2 Emissionen quantifizieren
- Datenbanken sollten über das Tool verändert werden. Datenbanken sollte nur in einer Excel Datei angepasst werden müssen (statt in 2 Excel Dateien)

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung und allgemeiner Ausblick

Das Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie in Karlsruhe hat zusammen mit Vertretern der Baumaschinenindustrie sich mit der Entstehung von CO_2e Emissionen von Baumaschine in Bauprozessen beschäftigt. Bei der CO_2e Quantifizierungsmethode sind drei Bereiche zu unterscheiden: Die Treibhausgasemissionsentstehung durch die Herstellung des Baumaterials, durch den Transport des Baumaterials und durch die Baumaschinen in der Bauphase.

In Zusammenarbeit mit der Industrie konnten die Einflussgrößen der Treibhausgasemissionen von Baumaschinen kategorisiert nach dem 4-Säulen-Modell der CECE: Maschineneffizienz, Prozesseffizienz, Betriebseffizienz und alternative Energiequellen ermittelt [1]. Die Durchführung einer Experten-Umfrage nach der Delphi-Methode sowie durch eine Literaturrecherche ermöglichten einen Wertebereich für die

jeweiligen Faktoren zu definieren. Diese können je nach Faktorart zwischen 0 und 1,40 variieren. Anschließend konnte am Beispiel eines Baggers eine Einflussanalyse dieser Faktoren durchgeführt werden. Dabei kam raus, dass durch schlechtes Wetter die Treibhausgasemissionen am stärksten verändert werden können. An zweiter Stelle ist die Beanspruchung auf den Fahrer anzusehen, die durch den Arbeitsplatz z.B. die Arbeitsplatzergonomie und Sichtqualität aus der Kabine, sowie durch die Arbeitsumgebung z.B. das Klima, der Lärm, die Vibrationen und die Belichtung entsteht. Die Nutzung eines alternativen Energieträgers hat den drittgrößten Einfluss auf die Gesamtemissionen.

Im Anschluss daran konnte die weiterentwickelte CO_{2e} Quantifizierungsmethode für Baumaschinen validiert werden. Durch eine Experten-Umfrage nach der Delphi-Methode konnte der Einfluss der Maschineneffizienz validiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass durch eine technologisch signifikante Verbesserung der Kraftstoffverbrauch einer Baumaschine verändert werden kann. Dabei spielt nicht nur die Technologieverbesserung bei dem Motor eine Rolle, sondern auch die Arbeitsmodi wie z. B. der Eco-Modus vs. Powermodus in welchen die Maschine betrieben wird. Des Weiteren können durch andere technologische Verbesserungen ebenfalls Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch ausgeübt werden. Durch die Experten-Umfrage und Einflussanalyse der Faktoren konnte gezeigt werden, dass Maschinenmaßnahmen einen höheren Hebel für die CO_{2e} Reduzierung darstellen, als der Eco-modus oder die Motorentechologie (Motormaßnahmen).

Auf der Baustelle konnte anschließend der Einfluss von Prozesseffizienz und Betriebseffizienz auf die Treibhausgasemissionen von Baumaschinen validiert werden. Durch Befragung, Beobachtungen, Messungen der Umgebung sowie Aufnahmen des Kraftstoffverbrauchs von Baumaschinen konnte die CO_{2e} Quantifizierungsmethode am Bagger, am Straßenfertiger, an der Erdbauwalze sowie an den Tandemwalzen validiert werden.

Zusammenfassend wurde im Rahmen dieses Projekts die CO_{2e} Quantifizierungsmethode überarbeitet, verifiziert und validiert. Parallel wurde ein Tool entwickelt, welches bei der CO_{2e} Quantifizierung von Bauprozessen unterstützt.

In diesem Projekt wurde die Methode für eine bestimmte Auswahl an Prozessen validiert. Der Bagger führt in der Realität durchaus mehr Prozesse aus als die zwei Prozesse, die untersucht und validiert worden sind. Die CO_{2e} Quantifizierungsmethode am Radlader konnte im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht und somit nicht validiert werden. In einem nächsten Schritt sollte die CO_{2e} Quantifizierungsmethode ebenfalls für den Steinbruch und Spezialtiefbau validiert werden. Des Weiteren sollte eine größere Anzahl an unterschiedlichen Baustellen zur Verfeinerung des Modells herangezogen werden.

Das begleitende CO_{2e} Quantifizierungstool „CO₂SimCo“ sollte weiterentwickelt werden, so dass alle Funktionen, die ein Nutzer benötigt, implementiert sind.

6.2 Erweiterter Ausblick

Durch die Erweiterung der definierten Systemgrenze ist es möglich den Treibhausgas-effekt durch Zerstörungen von CO_{2e} Senken durch Entwaldung und Bodenbewegung sowie Auswirkungen durch Wiederaufforstung, Wiederbepflanzung oder Wiederbegrü-nung nach Bauarbeiten zu quantifizieren. Im Folgenden wird dieser Treibhausgas-ef-fekt quantifiziert und untersucht, ob er in der Methode berücksichtigt werden sollte.

Vor Beginn der Bauarbeiten findet die Vorbereitung der Baustelle statt. Als Referenz wird das Ökosystem gewählt, welches noch bestehen würde, falls es nicht wegen Bau-arbeiten entfernt wäre. Hierbei wird der Baustellenort von Pflanzen, Bäume und Mut-terboden entfernt. Dabei werden CO_{2e} Senken zerstört. Durch Wiederaufforstung, Wiederbepflanzung oder Wiederbegrüung nach Bauarbeiten werden neue CO_{2e} Senken aufgestellt. Um die Zerstörung und neue Entstehung von CO_{2e} Senken zu berücksichtigen wird folgende Formel benutzt. [78]

$$L_{CO_2e} = L_{before} - G_{after} \quad (15)$$

Dabei beschreibt L_{CO_2e} , den Verlust an CO_{2e} Senken und damit die erhöhten entste-henden Treibhausgasemissionen. L_{before} beschreibt den Verlust an CO_{2e} Senken durch Entwaldung, Rodung, Entfernung von Grünflächen oder Mutterböden während den Bauzeiten (L_{con}) und während der Instandhaltung bzw. Lebensdauer des Baupro-dukts (L_{ser}) wie z. B. einer Straße. In diesen zwei Zeiten werden folgende Verluste an CO_{2e} Senken berücksichtigt [78]:

- Durch die Entfernung der Vegetation ($L_{con,v}$) und ($L_{ser,v}$)
- Die Zusatzemissionen der Böden (L_{flux}), die in den ersten 2-3 Jahren vom Boden ausgestoßen werden durch die Entfernung der Vegetation
- Durch die Bodenbewegung von Mutterböden ($L_{con,s}$) und ($L_{serv,s}$)

Aus Gleichung (15) ist zu entnehmen, dass den Verlusten ein möglicher Gewinn ab-gezogen werden muss, um das Wiederaanlegen von CO_{2e} Senken (G_{after}) durch Auf-forstung, Wiederbepflanzung oder Wiederbegrüung nach den Bauarbeiten zu berück-sichtigen. Hier wird zwischen $G_{potential}$ und G_{rapid} unterschieden. $G_{potential}$ beschreibt den möglichen Gewinn durch wieder Aufstellen von CO_{2e} Senken über die Lebens-dauer des Bauprodukts und G_{rapid} berücksichtigt den Vegetationseffekt in den ersten Jahren. Eine Pflanze wächst schneller in den ersten Jahren und entnimmt dadurch in dieser Zeit mehr CO₂ aus der Atmosphäre. [78]

Somit wird aus Gleichung (15) folgende Gleichung [78]:

$$L_{CO_2e} = L_{con,v} + L_{con,s} + L_{ser,v} + L_{ser,s} + L_{flux} - G_{potential} - G_{rapid} \quad (16)$$

$L_{con,v}$, $L_{con,s}$, $L_{ser,v}$ und $L_{ser,s}$ werden wie folgt berechnet [78]:

$$L_{con,v} = \Delta_{c,v} * A_{con} * t_{con} \quad (17)$$

$$L_{con,s} = \Delta_{c,s} * A_{con} * t_{con} \quad (18)$$

$$L_{ser,v} = \Delta_{c,v} * A_{ser} * t_{ser} \quad (19)$$

$$L_{ser,s} = \Delta_{c,s} * A_{ser} * t_{ser} \quad (20)$$

Mit:

$\Delta_{c,v}$ (kg m⁻² yr⁻¹): jährliche CO₂-Sequestrierung der dominierten Vegetation

$\Delta_{c,s}$ (kg m⁻² yr⁻¹): jährliche CO₂-Sequestrierung des Bodens

A_{con} (m²): gesamte betroffene Fläche durch den Bau

A_{ser} (m²): belegte Fläche durch das Bauprodukt über seine Lebensdauer

t_{con} (year): Bauzeit

t_{ser} (year): Lebensdauer des Bauprodukts

Die jährlichen CO₂-Sequestrierungswerte für die Vegetation werden der Tabelle 33 entnommen.

Tabelle 33: Jährliche CO₂-Sequestrierungswerte der Vegetation [79]

Vegetationskategorisierung	Jährliche CO₂-Sequestrierungswerte in <i>kg/(m² * year)</i>
Kantabrische und Bergtanne, schnellwachsende Kiefern	1,25
Eukalyptus	0,45
Kastanie	1,03
Pappel	1,34
Buche	0,70
Uferbäume	0,08
Myrische Faya-Wälder - Heide und kanarischer Lorbeerwald	2,07
Eurisibirische Eichen	0,64
Immergrüner Quercus	0,03
Mittelmeer-Eichen und Gallaichen	0,18
Olivenbäume	0,03
Obstbäume	0,03
Andere Laubbäume	0,47
Mischung aus Nadelbäumen und Laubbäumen	0,36
Spanischer Wacholder	0,05
Pinus halepensis oder P. ananas	0,24
Kanarische Kiefer	0,44
Andere Kiefern	0,53
Andere Nadelbäume	1,17
Verstreute Bäume	0,04
Wiese	0,20
Ackerland	0,788
Hochentwickelte, wiederbelebende Strauchlandschaft	0,03
Sträucher	0,26

Die jährlichen CO₂-Sequestrierungswerte für den Boden werden der Tabelle 34 entnommen.

Tabelle 34: Jährliche CO₂-Sequestrierungswerte für den Boden [80]

Bodenklassifizierung	Eigenschaften des Bodens	Bodenarten	Jährliche CO ₂ -Sequestrierungswerte für den Boden in kg/(m ² * year)
1	Dystrophische Sandablagerungen	Regosole, Arenosole, Podzole, Podzole	0,348
2	Sandige bis lehmige Ablagerungen	Fluvisole, Gleysole, Podzole, Podsole	0,007
3	Lehmige bis lehmige Par-tykalkablagerungen	Fluvisole, Gleysole, Luvisole, Luvisole	0,070
4	Kieselton und Till	Cambisole, Luvisole, Regosole, Podzoluvisole, Podzoluvisole	0,051
5	Sandige Ablagerungen, die den Geröllton überlagern.	Gleysole, Arenosole, Regosole, Regosole, Cambisole	0,070
6	Eutrophe Sandablagerungen	Cambisole, Arenosole, Arenosole	0,495
7	Sandige Löss- bis Lösslehm- partie, die verschiedene Fel- sen überlagert.	Luvisole, Podzoluvisole, Kam- bisole	0,172
8	Mergel und Tonstein oder kalkhaltig	Cambisols, Gleysols, Gleysols	0,070
9	Grund- und mittlere Eruptiv- gesteine	Cambisols	0,139
10	Harte tonige und schlammige Schieferplatten mit Grauwa- cke, Sandstein, Quarzit und Phyllit	Cambisols, Podsols, Podsols	0,161
11	Sandsteine, Quarzit und Konglomerate	Cambisols, Podsols, Gleysols, Gleysols	0,128
12	Kalkstein, Dolomit und nicht kalkhaltiges Silikatgestein	Leptosole, Cambisole	0,147

Durch die Bewegung des Bodens verändern sich die Bodentemperatur, der Wassergehalt des Bodens und die Tiefe bis zum Grundwasser, was wiederum die Menge vom Boden an emittierende Fluxe wie CO₂, CH₄, und N₂O verändert. Die Menge an emittierenden Fluxen wird ebenfalls durch die Wurzelaktivitäten, Abbau von organischen Substanzen, Boden-Nitrat-Dynamics beeinflusst. Darüber hinaus wird der Boden durch das Befahren von schweren Maschinen verdichtet. Bei solch einer Verdichtung

wird die Makroporosität des Bodens verschlechtert, was wiederum dazu führt, dass Luftdiffusions- und Wasserinfiltrationsraten verringert werden, wodurch der Wassergehalt des Bodens sich erhöht und damit die Bodenumgebung anaerober wird. Dieser Effekt beeinflusst die Mengen an emittierten Fluxen. [78]

Die CO₂ Fluxen entstehen durch die schnellen abbauenden Ernterückstände, die auf dem Boden liegen, da durch Entfernung der Vegetation die Aufnahmen von CO₂ durch Photosynthese der Flora weggefallen ist. Die CH₄ Fluxen entstehen durch den anaeroben Abbau von organischen Substanzen durch methanogene Bakterien. Diese Bakterien gedeihen besonders in Abwesenheit von Sauerstoff. Daher führt eine verstärkte anaerobe Umgebung zu einer größeren Menge an CH₄ Fluxen. N₂O-Fluxe werden durch die Veränderung der Nitrifikations- und Denitrifikationsraten beeinflusst. Die Denitrifikation ist ein mikrobiell unterstützter Prozess, bei dem durch Zersetzung von organischen Substanzen Nitrat (NO₃⁻) reduziert wird und schließlich molekularer Stickstoff (N₂) durch eine Reihe von gasförmigen Zwischenprodukten erzeugt wird. Die Denitrifikation ist hauptsächlich auf das Vorhandensein ausreichender organischer Substanz angewiesen. Bei einer Vegetationsrodung entsteht ein Überschuss an zersetzten organischen Substanzen, welche zu hohen Anteilen an Stickstoffmineralisierung und Nitrifikation führen, gleichzeitig herrscht ein Mangel an Pflanzen welches zu einem Denitrifikationsproblem führt. Somit entstehen N₂O-Fluxe. CO₂, CH₄ und N₂O Fluxen gehören zu den Treibhausgasen und haben somit auch einen GWP-Wert von jeweils 1, 28 und 265. Die jährlichen Fluxen von CO₂, CH₄ und N₂O, nach der Entfernung von Vegetation, werden jeweils mit 1,8, 0,8 und 0,2 kg/(m² * year) gemessen. Somit lässt sich der Treibhausgaseffekt von diesen Fluxen mit der folgenden Gleichung erfassen. [8; 78]

$$L_{flux} = (E_{CO_2} + 28 * E_{CH_4} + 265 * E_{N_2O}) * A_{con} * t_{con} \quad (21)$$

Mit E_{CO_2} , E_{CH_4} und E_{N_2O} wird die Menge an jährlichen emittierenden Fluxen an CO₂, CH₄ und N₂O beschrieben. Auch hier, steht A_{con} für die gesamte betroffene Fläche durch den Bau und t_{con} für die Bauzeit.

Die wieder Aufforstung, Bepflanzung oder Begrünung am Ende der Bauzeit führt zu einem Zugewinn an CO₂ Senken. Dieser Zugewinn wird mit folgender Gleichung berechnet [78]:

$$G_{potential} = (\Delta_{c,v1} - \Delta_{c,v}) \times A_{res} \times t_{ser} \quad (22)$$

$\Delta_{c,v1}$ beschreibt die jährliche CO₂-Sequestrierung der neuen bepflanzten dominierten Vegetation, $\Delta_{c,v}$ die der Referenzvegetation bzw. -ökosystem, A_{res} den Restaurierungsbereich mit Vegetation und t_{ser} die Lebensdauer des Bauprodukts. [78]

Tabelle 35: CO₂-Sequestrierung während der schnellen Wachstumsphase [79]

Vegetationsart	CO₂-Sequestrierung in hoher Pflanzdichte kg/(m² * year)	CO₂-Sequestrierung in niedriger Pflanzdichte kg/(m² * year)
Kantabrische und Bergtanne, schnellwachsende Kiefern	2,49	1,61
Eukalyptus	1,24	0,73
Kastanie	3,86	2,58
Pappel	2,23	1,43
Buche	4,38	2,94
Uferbäume	1,52	0,93
Myrische Faya-Wälder - Heide und kanarischer Lorbeerwald	6,31	4,31
Eurisibirische Eichen	3,02	1,98
Immergrüner Quercus	0,93	0,58
Mittelmeer-Eichen und Gallaichen	1,95	1,23
Olivenbäume	0,27	0,09
Obstbäume	0,15	-
Andere Laubbäume	2,14	1,37
Mischung aus Nadelbäumen und Laubbäumen	2,26	1,45
Spanischer Wacholder	0,89	0,55
Pinus halepensis oder P. ananas	2,26	1,45
Kanarische Kiefer	3,70	2,47
Andere Kiefern	2,46	1,59
Andere Nadelbäume	2,53	1,64
Verstreute Bäume	0,93	-
Niedriges Strauchland	0,58	0,30
Hochentwickelte, wiederbelebende Strauchlandschaft	3,91	2,80
Mittlentwickelte, wiederbelebende Strauchlandschaft	2,43	1,66
Wohngarten	0,4	0,4
Wiese	0,36	0,36

Junge Pflanzen werden nach den Baustellenarbeiten wieder gepflanzt. Diese Pflanzen haben in den ersten 20 Jahren ihrer Lebenszeit ein schnelles Wachstum und nehmen somit in dieser Zeit ihres Wachstums mehr CO₂ auf. Bei der Wiederbepflanzung können unterschiedliche Entscheidungen über Plantagenspektren und Umgebungsvariablen die langfristige Kohlenstoffsequestrierung erheblich beeinflussen. Dieser Effekt wird mit G_{rapid} , siehe Formel (23) berücksichtigt. [78]

$$G_{rapid} = (\Delta_{c,v2} - \Delta_{c,v1}) \times A_{res} \times t_{rapid} \quad (23)$$

Es steht $\Delta_{c,v2}$ (kg.m².yr⁻¹) für die CO₂-Sequestrierung während der schnellen Wachstumsphase, $\Delta_{c,v1}$ für die jährliche CO₂-Sequestrierung der neuen bepflanzten dominierten Vegetation auf lange Dauer, A_{res} für den Restaurierungsbereich mit Vegetation und t_{rapid} (yr) für die Zeit der schnellen Wachstumsphase der neu bepflanzten Vegetation. [78]

Die Werte für die CO₂-Sequestrierung während der schnellen Wachstumsphase sind in Tabelle 35 dargestellt.

Durch das Einsetzen der Gleichungen (17) bis (21) in Gleichung (16) wird Gleichung (24) erhalten. [78]

$$L_{CO_2e} = \Delta_{c,v} * A_{con} * t_{con} + \Delta_{c,s} * A_{con} * t_{con} + \Delta_{c,v} * A_{ser} * t_{ser} + \Delta_{c,s} * A_{ser} * t_{ser} + (E_{CO_2} + 28 * E_{CH_4} + 265 * E_{N_2O}) * A_{con} * t_{con} - (\Delta_{c,v1} - \Delta_{c,v}) \times A_{res} \times t_{ser} - (\Delta_{c,v2} - \Delta_{c,v1}) \times A_{res} \times t_{rapid} \quad (24)$$

Mit

$\Delta_{c,v}$	die Referenz Vegetation bzw. Ökosystem
A_{con}	gesamte betroffene Fläche durch den Bau
t_{con}	Bauzeit
$\Delta_{c,s}$	Jährliche CO ₂ -Sequestrierung des Bodens
A_{ser}	Belegte Fläche durch das Bauprodukt über seine Lebensdauer
t_{ser}	Lebensdauer des Bauprodukts
E_{CO_2}	Menge an jährlichen emittierende Fluxen an CO ₂
E_{CH_4}	Menge an jährlichen emittierende Fluxen an CH ₄
E_{N_2O}	Menge an jährlichen emittierende Fluxen an N ₂ O
$\Delta_{c,v1}$	Jährliche CO ₂ -Sequestrierung der neuen bepflanzten dominierten Vegetation auf lange Dauer
$\Delta_{c,v2}$	CO ₂ -Sequestrierung während der schnellen Wachstumsphase
A_{res}	Restaurierungsbereich mit Vegetation
t_{rapid}	Zeit der schnellen Wachstumsphase der neu bepflanzten Vegetation

6.3 Simulation: Quantifizierung der CO_{2e} Emissionen durch die Zerstörung und neue Entstehung von CO_{2e} Senken am Beispiel einer BK10 Straße

Um den Einfluss der Zerstörung und der neuen Entstehung von CO_{2e} Senken werden zwei Simulationen am Beispiel eines BK10 Straßenbaus durchgeführt. Als Referenz werden die Daten aus den vorigen Projekten⁵ genutzt (siehe Tabelle 36). Die betrachtete Straße ist 1 km lang und 7,5 m breit. Als Ursprungsvegetation wird für Simulation 1 eine Wiese angenommen und für Simulation 2 ein Wald.

Folgende Daten werden für die Simulation angenommen:

Tabelle 36: Gewählte Daten für die Simulation

Gewählte Daten für die Simulation	
Betroffene Fläche A_{con}	20.000 m ²
Restaurierungsfläche A_{ser}	12.500 m ²
Bauzeit t_{con}	0,04 year (15 Tage)
Lebensdauer der Straße t_{ser}	30 year
Treibhausgasemissionen für die Materialherstellung	348 t CO _{2e}
Treibhausgasemissionen vom Materialtransport	24 t CO _{2e}
Treibhausgasemissionen von Maschinen	42 t CO _{2e}
Treibhausgasemissionen durch Straßenerneuerungsarbeiten	232 t CO _{2e}
Bei einer Lebensdauer von 30 Jahren	4 Erneuerungsprozesse

Aus den gewählten Daten in Tabelle 36 folgt eine gesamte Menge an Emissionen für den Bau der Straße von 414 t CO_{2e} und von insgesamt 1.342 t CO_{2e} bei vier Instandhaltungsarbeiten für eine BK10 Straße in 30 Jahren.

Durch den Einsatz der Gleichung (24) werden folgende Ergebnisse für beide Simulationen erhalten.

⁵ Siehe Abschlussberichte des CO_{2e} Projekts Phase B, Phase C1 und C2.

Tabelle 37: Ergebnisse der Simulationen mit Ursprungsvegetation für Simulation 1 eine Wiese und für Simulation 2 ein Wald

Komponenten			Simulation 1		Simulation 2		
Referenzvegetation			Wiese		Wald		
Verluste	Bauzeit t_{con}	Vegetationsrodung	0,16 t CO ₂ e		0,3 t CO ₂ e		
		Bodenbewegung des Mutterbodens	Verluste	0,056 t CO ₂ e		0,056 t CO ₂ e	
			Fluxe	61,76 t CO ₂ e		61,76 t CO ₂ e	
	Summe		62 t CO ₂ e	13%	62 t CO ₂ e	13%	
	Lebensdauer t_{ser}	Vegetationsrodung	45 t CO ₂ e		81 t CO ₂ e		
		Bodenbewegung des Mutterbodens	16 t CO ₂ e		16 t CO ₂ e		
Summe		61 t CO ₂ e		97 t CO ₂ e			
Gewinne	Anfängliche, schnelle Zugewinne an CO ₂ e Senken durch Wiederbepflanzung		41 t CO ₂ e		41 t CO ₂ e		
	Langsame Zugewinne an CO ₂ e Senken durch Wiederbepflanzung		0 t CO ₂ e		-60 t CO ₂ e		
	Summe		41 t CO ₂ e		-19 t CO ₂ e		
Gesamte Treibhausgasemissionen			82 t CO ₂ e	5,7%	178 t CO ₂ e	13%	

Aus den Ergebnissen folgt für die erste Betrachtungsgrenze von 0,04 Jahren Abbildung 17 und für die zweite Betrachtungsgrenze von 30 Jahren Abbildung 18.

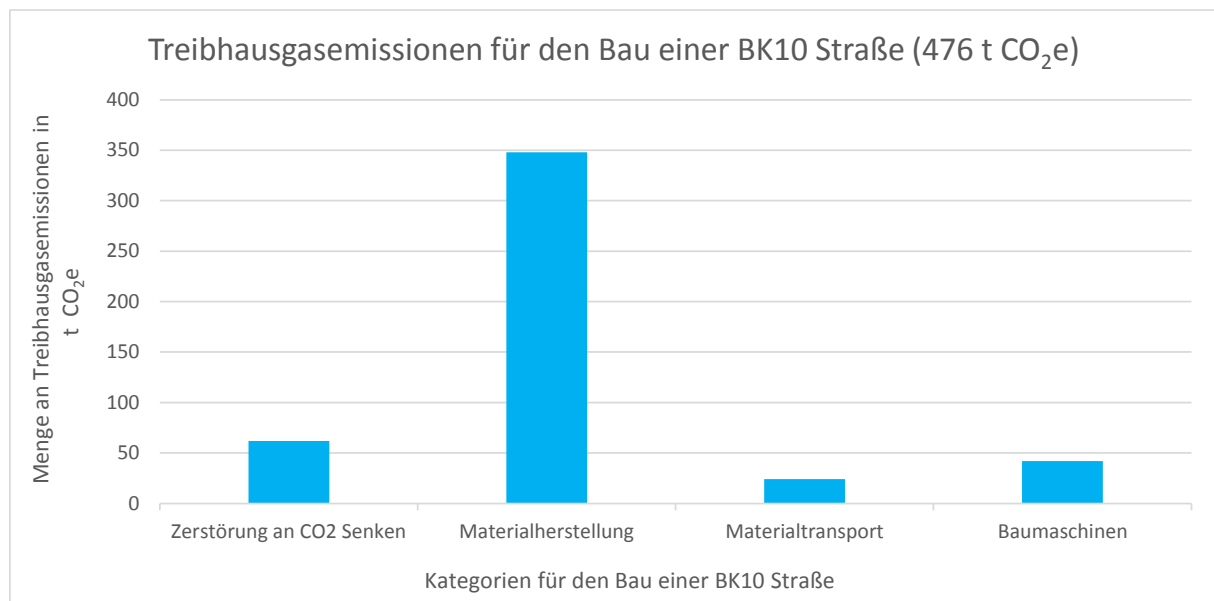


Abbildung 17: Treibhausgasemissionen beim Bau einer BK10 Straße

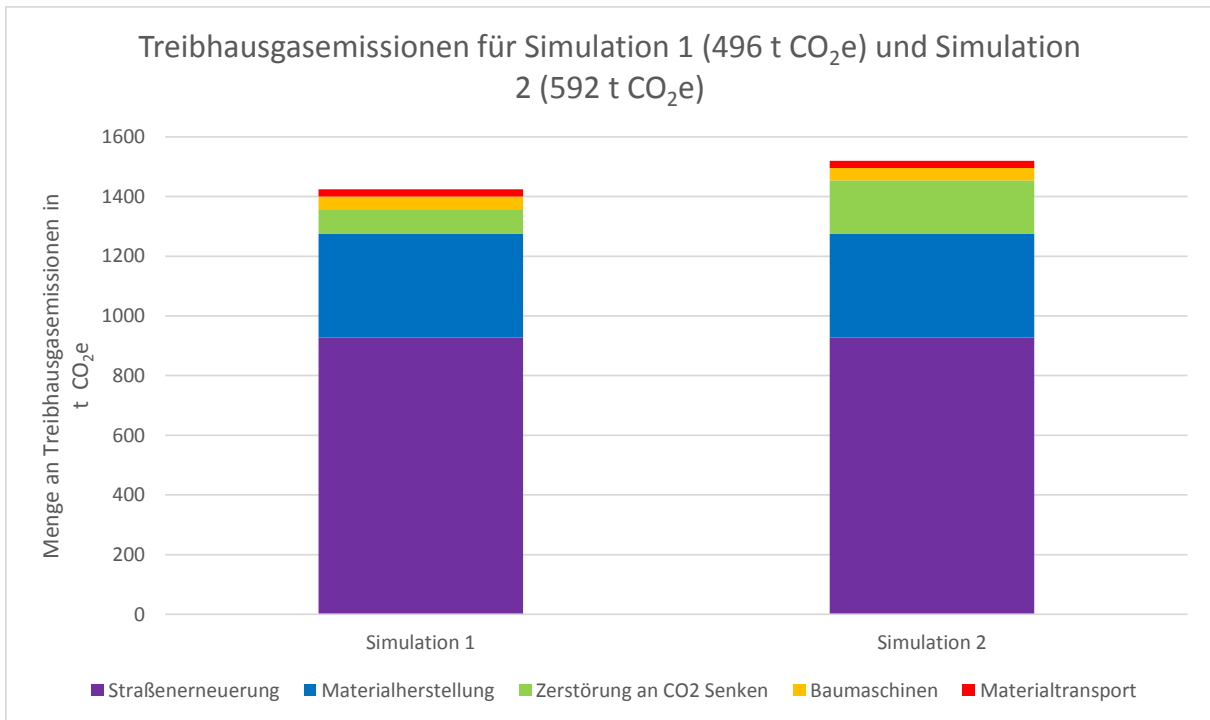


Abbildung 18: Treibhausgasemissionen beim Bau einer BK10 Straße für die Betrachtungsgrenze von 30 Jahren

6.4 Fazit

Die Simulation an einer BK10 Straße hat gezeigt dass die Zerstörung und neue Entstehung von CO₂e Senken einen nicht vernachlässigbaren Anteil an CO₂e Emissionen produzieren kann. Je nach Systemgrenze beträgt der Anteil 5,7% bis 13% der gesamten Treibhausgasemissionen. Diese können zwar durch ausgewählten Maßnahmen stark reduziert werden (siehe Abbildung 19), jedoch finden solche Anwendung selten statt.

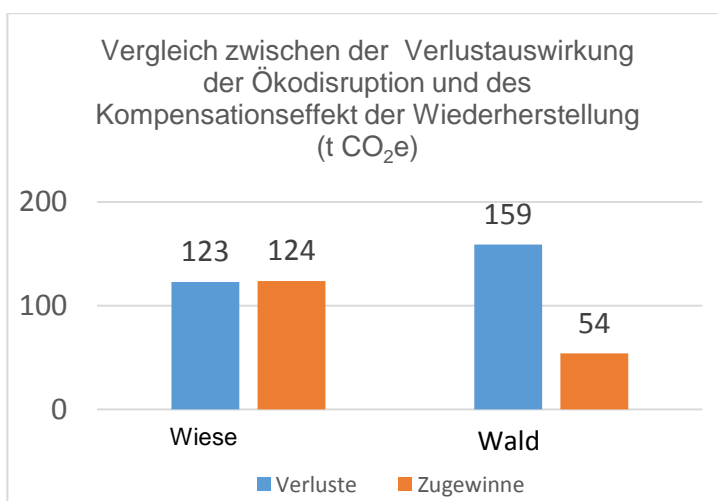


Abbildung 19: Vergleich zwischen der Verlustauswirkung der Ökodisruption und des Kompensationseffekt der Wiederherstellung am Beispiel einer BK10

Maßnahmen für Zugewinne:

- Mehrschichtige Bepflanzung
- Arten mit hoher Sequestrierung (Strauchgebiete: 0,58 kg CO₂.m⁻².Jahr⁻¹)
- Vergrößerte Pflanzflächen durch Hügel/Hänge (15%)
- Reduzierter Flächenverbrauch in der Urbanisierung

Es wird empfohlen bei einer Verfeinerung der CO₂e Quantifizierungsmodells diesen Effekt der Zerstörung und neu Entstehung von CO₂e Senken zu berücksichtigen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] CEMA und CECE: CECE and CEMA Optimising our industry 2 reduce emissions 2011.
- [2] Rahmstorf, S. und Schellnhuber, H.-J.: Der Klimawandel - Diagnose, Prognose, Therapie. In: Beck'sche Reihe C.-H.-Beck-Wissen, 2366, 6. Auflage, München: Verlag C. H. Beck 2007, ISBN 9783406508660.
- [3] Karl, U.: Vorlesungsunterlagen "Emissionen in die Umwelt", Karlsruhe 2011.
- [4] European Commission: Paris Agreement - Climate Action - European Commission, 17.09.2018. Internet: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en, Stand: Zugriff am: 18.09.2018.
- [5] Europäische Kommission: CO2-arme Wirtschaft bis 2050. Internet: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_de.
- [6] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: CO2-Emission. Internet: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/co2-kohlenstoffdioxid-oder-kohlendioxid-emission-614692>.
- [7] Badea, A.: Vorlesungsunterlagen "Energiesysteme I", Karlsruhe 2012.
- [8] Greenhouse Gas Protocol: Global Warming Potentials Values. Internet: https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf, Stand: Zugriff am: 14.02.2019.
- [9] Ökobaudat: German Federal Ministry of the Interior, for Building and Home Affairs 2013.
- [10] Ecoinvent: institutes of the ETH Domain; the Swiss Federal Offices 2007.
- [11] ProBas: German Federal Environment Agency 2015.
- [12] Europäische Kommission: Reducing CO2 emissions from heavy-duty vehicles. Internet: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_de, Stand: Zugriff am: 14.02.2019.
- [13] Ays, I.: Expert survey after the Delphi method 2018.
- [14] Technician from construction equipment rental companies Kohrmann Baumaschinen GmbH and Kiesel Süd GmbH: Phone interview about machine conditions of wheel loaders (April 2018), Karlsruhe.
- [15] Helms, H. und Heidt, C.: Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungs-optionen für den Bestand, Heidelberg 2014.
- [16] Nessau, B.: Zur Diagnose von Kraftstoffeinspritzanlagen, Agrartechnik, 27 (1977) H. 1, S. 6–9.

- [17] Tschöke, H.; Mollenhauer, K. und Maier, R. (Hrsg.): Handbuch Dieselmotoren, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg 2018.
- [18] Behched, B.; Delikostov, T. und Enchev, E.: Research the influence of technical condition of the intake air filter on fuel consumption, Scientific Proceedings XIX International Scientific-Technical Conference "trans&MOTAUTO'11", XIX (2011) 1&2, S. 43–44.
- [19] Kunze, G.; Göhring, H. und Jacob, K.: Baumaschinen - Erdbau- und Tagebau-
maschinen ; mit 147 Tabellen. In: Aus dem Programm Maschinenelemente und
Konstruktion, 2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2012, ISBN 978-3-
8348-1592-7.
- [20] Todsén, U.: Verbrennungsmotoren, München: Hanser Carl 2012, ISBN 978-3-
446-42846-1.
- [21] Murtonen, T. und Kytö, M.: The effect of lubrication oil on the fuel consumption of
heavy-duty diesel engine, Finland 2004.
- [22] Anon.: Notwendiger Ölwechsel: Warum auch das Getriebe an und an neuen
Schmierstoff benötigt. Internet: [https://www.motointegrator.de/blog/notwendiger-
oewechsel-getriebeoel/](https://www.motointegrator.de/blog/notwendiger-oewechsel-getriebeoel/), Stand: Zugriff am: 23.12.2018.
- [23] Will, D. und Gebhardt, N. (Hrsg.): Hydraulik - Grundlagen, Komponenten, Schal-
tungen, 5. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- [24] Case construction, C. I.H.: Intelligentes Design verbunden mit Brachialer Kraft,
Stand: Zugriff am: 11.01.2019.
- [25] Bajjou, M. S.; Chafi, A. und En-Nadi, A.: A Comparative Study between Lean
Construction and the Traditional Production System, International Journal of En-
gineering Research in Africa, 29 (2017), S. 118–132.
- [26] Waris, M., et al.: Criteria for the selection of sustainable onsite construction
equipment, International Journal of Sustainable Built Environment, 3 (2014) H. 1,
S. 96–110.
- [27] Lewis, P.; Leming, M. und Rasdorf, W.: Impact of Engine Idling on Fuel Use and
CO2 Emissions of Nonroad Diesel Construction Equipment, Journal of Manage-
ment in Engineering, 28 (2012) H. 1, S. 31–38.
- [28] EPA: Compilation of State, County, and Local Anti-Idling Regulations 2006.
- [29] Al-Abbasi, M. D.: Impact of weather conditions on construction labor productivity
in state of qatar, Report, Betreuer: Senouci, A., College of Engineering, Qatar
University, Qatar 2014.
- [30] Hilgers, M.: Kraftstoffverbrauch und Verbrauchsoptimierung. In: Nutzfahrzeug-
technik lernen, Wiesbaden: Springer Fachmedien 2016, ISBN 978-3-658-12751-
0.

- [31] Cummins MPG Guide: Secrets of better fuel economy - The physics of MPG 2012.
- [32] Howdy Honda: How do warm temperatures affect a vehicle's MPG? Internet: <http://www.howdyhonda.com/blog/how-do-warm-temperatures-affect-a-vehicles-mpg/>, Stand: Zugriff am: 04.12.2018.
- [33] Intergraph Corporation: Factors Affecting Construction Labor Productivity - Managing Efficiency in Work Planning 2012.
- [34] Abele, G.: Technology transfer opportunities for the construction engineering community - Effect of cold weather on productivity, U.S. 1986.
- [35] Ibbs, W. und Vaughan, C.: Change and the loss of productivity in construction: A field guide, U.S. 2015.
- [36] Ok, S. C. und Sinha, S. K.: Construction equipment productivity estimation using artificial neural network model, Construction Management and Economics, 24 (2006) H. 10, S. 1029–1044.
- [37] Smith, S.: Earthmoving Productivity Estimation Using Linear Regression Techniques, Journal of construction engineering and management (1999), S. 133–141.
- [38] Holt, G. D. und Edwards, D.: Analysis of interrelationships among excavator productivity modifying factors, International Journal of Productivity and Performance Management, 64 (2015) H. 6, S. 853–869.
- [39] Iseley, T. und Gokhale, S.: 3. Equipment Productivity. In: New Directions in Civil Engineering (2002), 3-1–3-24. Baton Rouge: CRC Press 2002.
- [40] Frank, B.; Skogh, L. und Alaküla, M.: On wheel loader fuel efficiency difference due to operator behaviour distribution. In: Berichte aus der Fahrzeugtechnik (2012). Aachen: Shaker 2012.
- [41] Frank, B., et al.: On Increasing Fuel Efficiency by Operator Assistance Systems in a Wheel Loader, International Conference on Advanced Vehicle Technologies and Integration (VTI 2012), Changchun, China. Beijing: China Machine Press 2012.
- [42] Stec, M.: Emerging Technologies - Volvo Operator Tool, Eskilstuna, Sweden 2016.
- [43] Bullinger, H.-J.: Ergonomie - Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung. In: Technologiemanagement - Wettbewerbsfähige Technologieentwicklung und Arbeitsplatzgestaltung, Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag 1994, ISBN 9783663120957.
- [44] Bubb, H., et al.: Automobilergonomie, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2015.
- [45] Heine, T.: Lecture documents: "Fahrzeugergonomie", Karlsruhe 2018.

- [46] Zieschang, H. und Müller-Gethmann, H.: Ergonomische Anforderungen an Multifunktionsstellteile bei Erdbaumaschinen, Dresden 2004, ISBN 3-88383-665-6.
- [47] Böser, C.; Brütting, M. und Ellegast, R.: Einsatz von VR zur Sichtfeldgestaltung von Baumaschinenführer - Themenblock „„Konzeptive Ergonomie““. In: IFA-Report (2011), S. 19–24. Sankt Augustin, Berlin: IFA; DGUV 2011.
- [48] Hoske, P., et al.: Prognose und Bewertung der Sicht für mobile Arbeitsmaschinen (Teil 1), Bauportal (2010) H. 9, S. 530–536.
- [49] Hoske, P., et al.: Prognose und Bewertung der Sicht für mobile Arbeitsmaschinen (Teil 2), Bauportal (2010) H. 10, S. 607–612.
- [50] Kunze, G., et al.: Methode zur dynamischen Sichtfelderfassung und -bewertung für mobile Arbeitsmaschinen unter Einbeziehung der Prozessund Nutzercharakteristik - Abschlussbericht zum DFG-Projekt "DYNASICHT", Dresden 2012.
- [51] Brixel, R.: Validierung des Einflusses eines Baumaschinenführers auf die CO2e-Quantifizierungsmethode, Bachelor thesis, Betreuer: Geimer, M.; Ays, I., Institute Mobile Machines, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe 2018.
- [52] Drobek, J.: Die Auswirkung von ungünstigen Witterungseinflüssen auf den arbeitenden Menschen in Hinblick auf Gesundheit und Produktivität. In: Technik, Hamburg: Diplomica GmbH 2003, ISBN 9783832464486.
- [53] Merkel, T. und Schmauder, M.: Ergonomisch und normgerecht konstruieren - Handlungsleitfaden zur Anwendung von Richtlinien und Normen in der ergonomischen Produktgestaltung. In: Beuth Praxis, 1. Auflage, s.l.: Beuth Verlag GmbH 2012, ISBN 978-3-410-20799-3.
- [54] Wenzel, H. G. und Piekarski, C.: Klima und Arbeit, Munich, Germany: Bayer. Staatsmin für Arbeit und Sozialordnung 1980.
- [55] Zülch, G.; Kiparski, R. v. und Brinkmeier, B.: Messen, Beurteilen und Gestalten von Arbeitsbedingungen - Handbuch für die betriebliche Praxis zur Umsetzung ergonomischer Erkenntnisse. In: Schriftenreihe Ergo-Med, 4, 2. Auflage, Heidelberg: Haefner 1999, ISBN 3872840436.
- [56] Adolph, L., et al.: Ratgeber zur Gefährdungsbeurteilung - Handbuch für Arbeitsschutzfachleute: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2016.
- [57] LärmVibrationsArbSchV: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung - LärmVibrationsArbSchV) - LärmVibrationsArbSchV 2007.
- [58] VDI 2057: Human exposure to mechanical vibrations - Whole-body vibration, VDI-Richtlinien 2017.

- [59] Directive 2002/44/EC: Directive 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration) (sixteenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) - Directive 2002/44/EC 2002.
- [60] Wittig, P.; Nöllenheidt, C. und Brenscheidt, S.: Grundausswertung der BIBB/BAuA-Erwerbstätigenbefragung 2012 - mit den Schwerpunkten Arbeitsbedingungen, Arbeitsbelastungen und gesundheitliche Beschwerden, Dortmund, Berlin, Dresden 2013.
- [61] Bös, M.: Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen, Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2014. In: Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, 29, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2015.
- [62] Zülch, G.: Arbeitswissenschaft - lecture notes, Karlsruhe 2012.
- [63] EPA: Potential For Reducing Greenhouse Gas Emissions In The Construction Sector | US EPA ARCHIVE DOCUMENT, U.S. 2009.
- [64] EPA: Nonroad Engine Population Estimates, Report No. NR-006e (EPA-420-R-10-017) (July 2010), NR-006e 2010.
- [65] Edwards, R., et al.: WELL-TO-TANK Appendix 1 - Version 4a - Conversion factors and fuel properties, Well-to-wheels analysis of future Automotive fuels and powertrains in the European context, Ispra, Italy 2014.
- [66] Edwards, R., et al.: WELL-TO-TANK Appendix 2 - Version 4a - Summary of energy and GHG balance of individual pathways, Well-to-wheels analysis of future Automotive fuels and powertrains in the European context, Ispra, Italy 2014.
- [67] Edwards, R., et al.: WELL-TO-TANK Appendix 4 - Version 4a: - Description, results and input data per pathway, Well-to-wheels analysis of future Automotive fuels and powertrains in the European context, Ispra, Italy 2014.
- [68] Geimer, M. und Ays, I.: Nachhaltige Energiekonzepte für mobile Arbeitsmaschinen – in welche Richtung gehen sie?, Mobile Maschinen (2014) 6/2014.
- [69] Wu, Y.: Analyse und Vorauslegung einer mit OME angetriebenen mobilen Arbeitsmaschinen, Master thesis, Betreuer: Geimer, M.; Ays, I., Institute Mobile Machines, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe 2018.
- [70] Weberbeck, L., et al.: Liquefied Natural Gas in Mobile Machines, ATZoffhighway worldwide, 9 (2016) H. 4, S. 38–45.
- [71] Stan, C.: Alternative Antriebe für Automobile - Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015, ISBN 978-3-662-48511-8.

- [72] CECE und CEMA: CECE and CEMA- Optimising our industry 2 reduce emissions, Brussels 2018.
- [73] Bomag GmbH, F. G.: Technical Data - Asphalt Manager 2, BW 154 AP-4V AM, BW 174 AP-4F AM, Hellerwald 2015.
- [74] Hoffmann, M., et al.: Zahlentafeln für den Baubetrieb. In: Praxis, 8. Auflage: Vieweg Teubner Verlag 2011, ISBN 978-3-8348-0934-6.
- [75] Bomag GmbH, F. G.: Grundlagen der Asphaltverdichtung - Verdichtungsverfahren, Verdichtungsgeräten, Walztechnik, Boppard 2009.
- [76] Vögele: Vögele Einbaufibel. Internet: http://media.voegel.info/media/03_voegel/kundenservice/einbaufibel/Einbaufibel_DE_Leseprobe.pdf, Stand: Zugriff am: 27.02.2019.
- [77] Losch, F.: Quantifizierungswerkzeug zur Bestimmung des CO₂-Ausstoßes mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel eines idealisierten Steinbruchs, Betreuer: Geimer, M.; Ays, I., Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe 2016.
- [78] Chen, X.: Quantification of the loss of CO₂e sinks due to vegetation clearance and soil movement before construction work & quantification of the effects of restoration after construction work, Masterthesis, Betreuer: Geimer, M.; Ays, I., Institute Mobile Machines, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe 2019.
- [79] Barandica, J. M., et al.: Estimation of CO₂ emissions in the life cycle of roads through the disruption and restoration of environmental systems, Ecological Engineering, 71 (2014), S. 154–164.
- [80] Grüneberg, E.; Ziche, D. und Wellbrock, N.: Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany, Global change biology, 20 (2014) H. 8, S. 2644–2662.

8 Anhang

1. CO₂e Quantifizierungswert
2. Delphi Methode
3. Herleitung der Formeln
4. Beispielhafte Tool-Ergebnisdarstellung
5. Fragebögen für den Maschinenführer und Bauleiter

1. CO₂e Quantifizierungswert

Aus [65]:

$$\rho_{\text{Diesel}} = 832 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$f_{\text{CO}_2/\text{diesel combustion}} = 73,2 \frac{\text{g CO}_2}{\text{MJ}}$$

Aus [71]:

$$\text{Lower heating value: } H_u = 43,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Folgt:

$$f_{\text{CO}_2/\text{diesel combustion}} = 0,0732 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{MJ}} * 0,832 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 43,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = \mathbf{2,63 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{l Diesel}}} \quad (1)$$

Hinweis: Bei der Dieselerverbrennung wird nur das emittierte CO₂-Gas als Treibhausgas (CO₂e) betrachtet, welches die CO₂e-Menge beeinflusst. Somit entspricht, die bei der Dieselerverbrennung emittierte CO₂-Menge der emittierten CO₂e-Menge.

Aus [66]:

$$f_{\text{CO}_2/\text{diesel production}} = 15,40 \frac{\text{g CO}_2\text{e}}{\text{MJ}}$$


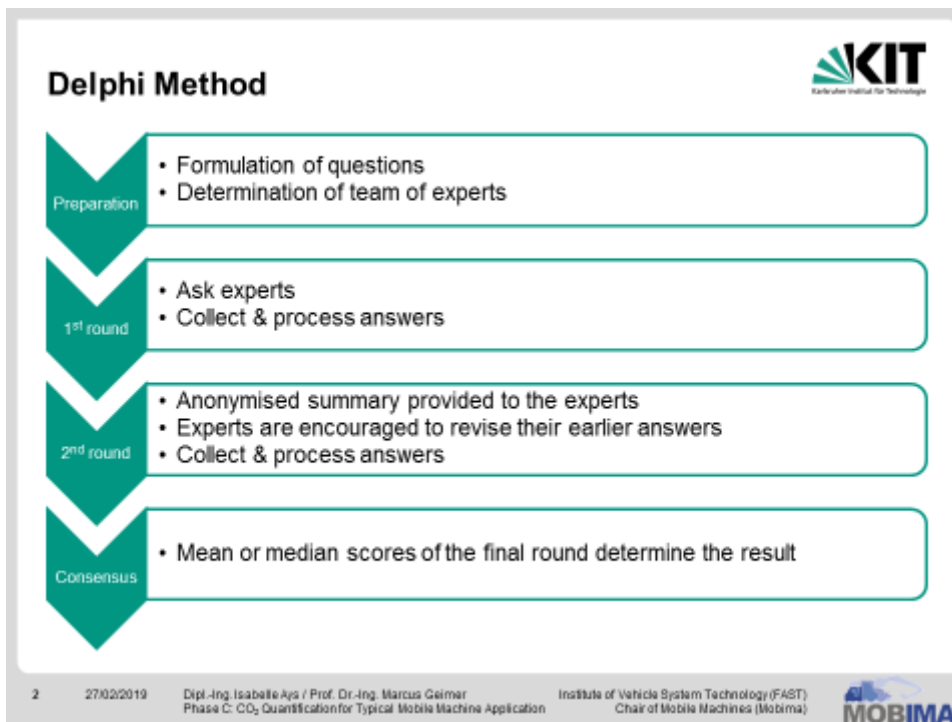
Folgt:

$$f_{\text{CO}_2/\text{diesel production}} = 0,01540 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{MJ}} * 0,832 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 43,2 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = \mathbf{0,55 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{l Diesel}}} \quad (2)$$


Somit folgt für:

$$f_{\text{Diesel}/\text{CO}_2\text{e}} = \mathbf{2,63 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{l Diesel}} + 0,55 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{l Diesel}} = \mathbf{3,18 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{l Diesel}}} \quad (3)$$

2. Delphi Methode



BASIC MACHINE

3 27/02/2019 Dipl.-Ing. Isabelle Ays / Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Phase C: CO₂ Quantification for Typical Mobile Machine Application Institute of Vehicle System Technology (FAST)
Chair of Mobile Machines (Mobima) 

Definition of the basic machine

■ Emission technology: Stage 1

	Excavator	Wheel loader	Paver	Roller
Year of construction	1999	1992	1995	1990
Size	20 t	-	1800	-
Max. engine performance	86 kW	106 kW	125 kW	91 kW
Machine characteristics	Bucket volume: 0.5m ³	Bucket volume: 3.3m ³	Working width: 8m	Weight: 11 t Working width: 1.9 m
Average fuel consumption (b_m)	23,8 l/h	11.4 l/h	20,4 l/h	12.7 l/h

Info.: b_m is the average fuel consumption of the machine under ideal conditions, which equals to the fuel consumption during test drives (without idle).

Elaboration of machine related efficiency

■ Define the average fuel consumption at idle (b_{idle})

Definition of idle: Idle, also called “low idle” is when only the engine is switch on but no driving or other operation takes place (no air conditioning).

Excavator	Wheel loader	Paver	Roller
2.7 l/h	2.6 l/h	2.5 l/h	1.6 l/h

Machine efficiency

$$f_{\text{machine technology}} = f_{\text{engine}} * f_{\text{eco}} * f_{\text{significant improvement}}$$

6

27/02/2019

Dipl.-Ing. Isabelle Aya / Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Phase C: CO₂ Quantification for Typical Mobile Machine Application

Institute of Vehicle System Technology (FAST)
Chair of Mobile Machines (Mobima)

Reduction of the fuel consumption through improvement of the combustion engine (f_{engine})

- This factor equals to the reduction of the fuel consumption of the combustion engine depending on the emissions legislation stages.
- Reference is the engine with stage I; $f_{\text{engine}} = 1.0$
- E.g. 3% reduction of fuel consumption -> 0.97

Emission technology	Stage I	Stage II	Stage III A	Stage III B	Stage IV	Stage V
Combustion engine	1.00	1.00	1.03	1.03	1.00	0.97

7

27/02/2019

Dipl.-Ing. Isabelle Aya / Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Phase C: CO₂ Quantification for Typical Mobile Machine Application

Institute of Vehicle System Technology (FAST)
Chair of Mobile Machines (Mobima)

Elaboration of machine related efficiency (f_{eco})

- Definition of “Ecomode”: Ecomode is when the engine speed is reduced to a fix value.
- E.g. 10% reduction of fuel consumption with Ecomode → 0.9

	f_{eco}
Excavator	0.88
Wheel loader	0.90
Paver	0.85
Roller	0.87

8

27/02/2019

Dipl.-Ing. Isabelle Aya / Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Phase C: CO₂ Quantification for Typical Mobile Machine ApplicationInstitute of Vehicle System Technology (FAST)
Chair of Mobile Machines (Mobima)

Elaboration of machine related efficiency

($f_{significant\ improvement}$)

- Describe shortly other significant technology improvements (single technologies or combination of technologies) having an influence on the fuel consumption

	Past & Present	Future	
	Which technology?	Amount of Reduction of fuel consumption (%)	
Excavator	<ul style="list-style-type: none"> - Injection system in diesel engine - Engine downsizing - Improvements cooling system - Loadsensing hydraulics - Pump system - Hydraulic downsizing - Low-viscosity axle oils - Low idle - Ergonomics - Electrification 	11%	Prognosis of fuel reduction for the future (%) 15%

9

27/02/2019

Dipl.-Ing. Isabelle Aya / Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Phase C: CO₂ Quantification for Typical Mobile Machine ApplicationInstitute of Vehicle System Technology (FAST)
Chair of Mobile Machines (Mobima)

Elaboration of machine related efficiency

(*f_{significant improvement}*)



- Describe shortly other significant technology improvements (single technologies or combination of technologies) having an influence on the fuel consumption (the reduction percentage is referenced to the value of 1990)

Past & Present		Future 5 years
Which technology?	Amount of reduction of fuel consumption (%)	Prognosis of fuel reduction for the future (%)
Wheel loader <ul style="list-style-type: none"> - Injection system in diesel engine - Engine downsizing - Improvements cooling system - Loadsensing hydraulics - Pump system - Hydraulic downsizing - Low-viscosity axle oils - Low idle - Ergonomics - Electrification 	11%	20%

10 27/02/2019

Dipl.-Ing. Isabelle Aya / Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Phase C: CO₂ Quantification for Typical Mobile Machine Application

Institute of Vehicle System Technology (FAST)
Chair of Mobile Machines (Mobima)



Elaboration of machine related efficiency

(*f_{significant improvement}*)



- Describe shortly other significant technology improvements (single technologies or combination of technologies) having an influence on the fuel consumption

Past & Present (since 1990)		Future 5 years
Which technology?	Reduction amount of fuel consumption compared to 1990	Prognosis of fuel reduction for the future compared to 1990
Paver <ul style="list-style-type: none"> - energy-optimized tamper drive - Switchable pump distribution gear - Controlled hydraulic oil temperature circuit - speed-controlled fan 	12%	29%

11 27/02/2019

Dipl.-Ing. Isabelle Aya / Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Phase C: CO₂ Quantification for Typical Mobile Machine Application

Institute of Vehicle System Technology (FAST)
Chair of Mobile Machines (Mobima)



Elaboration of machine related efficiency

(*f_{significant improvement}*)



- Describe shortly other significant technology improvements (single technologies or combination of technologies) having an influence on the fuel consumption

	Past & Present (since 1990)		Future 5 years
	Which technology?	Reduction amount of fuel consumption compared to 1990	Prognosis of fuel reduction for the future compared to 1990
Roller	<ul style="list-style-type: none"> Injection system in diesel engine Engine downsizing Electronic powertrain control 	28%	35%

12

27/02/2019

Dipl.-Ing. Isabelle Aya / Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Phase C: CO₂ Quantification for Typical Mobile Machine Application

Institute of Vehicle System Technology (FAST)
Chair of Mobile Machines (Mobima)



Machine efficiency

$$f_{\text{machine condition}} = f_{\text{service regularity}} * f_{\text{age}}$$

13

27/02/2019

Dipl.-Ing. Isabelle Aya / Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Phase C: CO₂ Quantification for Typical Mobile Machine Application

Institute of Vehicle System Technology (FAST)
Chair of Mobile Machines (Mobima)



Elaboration of machine related efficiency

- **Machine condition:** depends from “service regularity” and from “machine age”.
- A value of 1.20 means that the fuel consumption increases by 20%
 - Service regularity:

Service regularity	Very good, as defined by the machine producer	Exceeding by 20%	Exceeding by 50%	Exceeding by 100%
Excavator	1	1.02	1.04	1.08
Wheel loader	1	1.02	1.04	1.08
Paver	1	1.02	1.04	1.08
Roller	1	1.10	1.20	1.40

Elaboration of machine related efficiency

- Machine age:
 - Statement: With correct maintenance and repair, fuel consumption of the machine will not deteriorate by more than 10% over its lifespan.
(source: interview with 1 project partner)
 - Hypothesis: linear performance deterioration
 - Average lifetime differs for a private owned machine & rental park machine
 - According to source Helms & Heidt, maximum lifetime is 10 000 Bh.

Average lifetime (Bh *)	Private owned machine ¹	Machine from rental park	f_age	
Small machines	17,500 Bh	No info.	0	1.00
Big machines	25,000 Bh	17,500 Bh ²	0.5	1.05
Mining machines	35,000 Bh	No info.	1	1.10
			1.5	1.15
			2	1.20
			2.5	1.25
			3.0	1.30
			3.5	1.35

* Bh: stands for operation hour (dt. Betriebsstunden)

1: data from interview with 1 project partner

2: data from interviews with 2 machine rental parks

Helms H, Fleck C. Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsminderungsoptionen für den Bestand 2014/24.

Process efficiency

$f_{process\ assistant}$ (driver experience, process assistant features)

Elaboration of machine related efficiency

- Effects of “process assistant systems” on the driver performance

$f_{process\ assistant} (driver\ experience)$
 $= 1 + \sum a (driver\ experience)$

E.g expert driver of an wheel loader with tire pressure monitoring and payload weighting system

$f_{process\ assistant} (expert) = 1 + 0.02 + 0.05 = 1.07$

		$f_{driver\ experience}$
Driver Experience + basic educational training	Expert 15y-25y	0.92
	Good 8y-15y	0.83
	Medium 3y-8y	0.77
	Beginner <3y	0.55

a (efficiency increase through assistant systems)	Excavator & Wheel loader					
	Tire Pressure monitoring	Bucket filling assist system	Visibility assistants (sensors, cameras, etc.)	Semi-automatic movements	Payload weighting System	Data analysis & visualisation
Expert 15y-25y	0.02	0.00	0.01	0.00	0.05	0.05
Good 8y-15y	0.04	0.02	0.02	0.05	0.07	0.08
Medium 3y-8y	0.07	0.10	0.02	0.07	0.12	0.10
Beginner <3y	0.10	0.20	0.02	0.10	0.15	0.15

Elaboration of machine related efficiency

- Effects of “process assistant systems” on the driver performance

a (efficiency increase through assistant systems)		Paver			
		Repositioning & paving function	3D positioning system	Communication system between truck & paver	All 3 features combined together
Driver experience	Expert 15y-25y	0.00	0.00	0.00	0.00
	Good 8y-15y	0.10	0.20	0.00	0.30
	Medium 3y-8y	0.10	0.20	0.10	0.35
	Beginner <3y	0.20	0.30	0.10	0.40

Elaboration of machine related efficiency

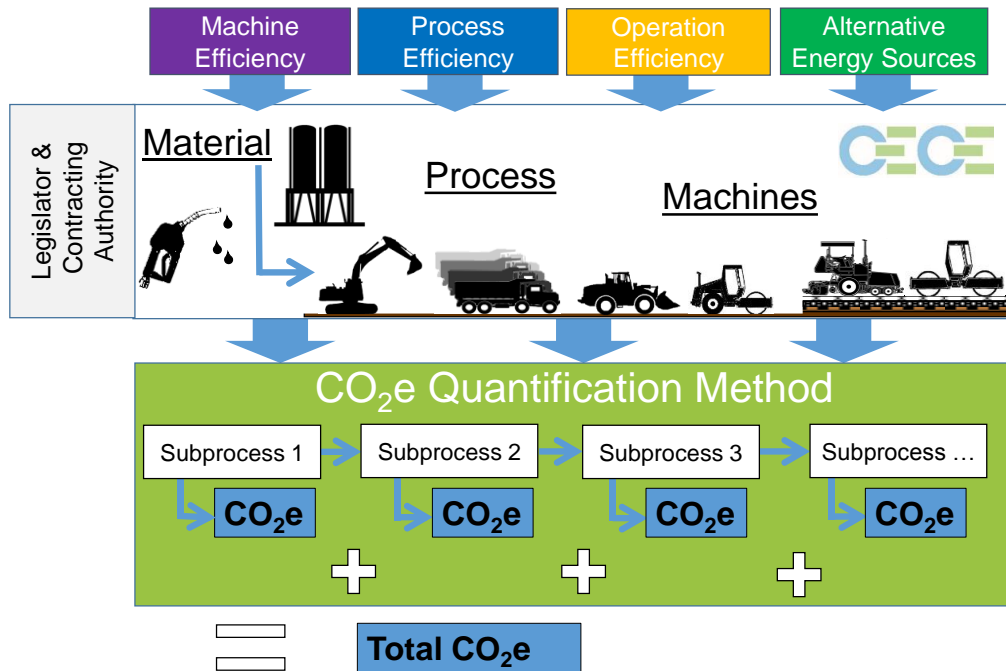
- Effects of “process assistant systems” on the driver performance

a (efficiency increase through assistant systems)		Roller (avoidance of unnecessary passages)		
		Measurement of the compaction degree	Measurement of the compaction degree + Automatic continuously variable amplitude System	Measurement of the compaction degree + Automatic continuously variable amplitude system + Track and temperature control
Driver experience	Expert 15y-25y	0.12	0.14	0.12
	Good 8y-15y	0.18	0.23	0.28
	Medium 3y-8y	0.21	0.27	0.34
	Beginner <3y	0.40	0.51	0.63

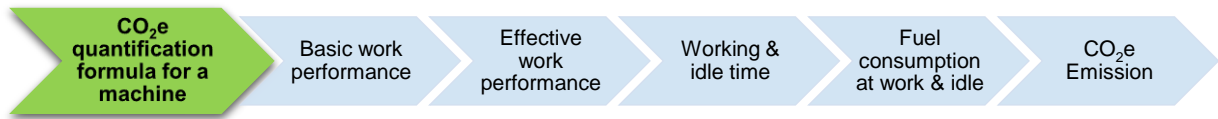
3. Herleitung der Formeln:

CO₂e Quantification Method for Construction Machines

CO₂e quantification method



CO₂e quantification formula for a machine



Basic Work Performance

The machine basic work performance Q_B [m³/h] is calculated after [74].

- **Excavator:**

$$Q_B = V_R * f_L * n * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (2)$$

- V_R Bucket capacity
- f_L Load factor
 $f_L = f_F / f_S$;
 f_F – Filling factor of the bucket;
 f_S – Loosing factor of the soil
- n Cycle criterion
- f_1 Pivoting angle
- f_2 Digging depth /height
- f_3 Kind of emptying
- f_4 Type application

- **Wheel Loader:**

$$Q_B = V_R * f_L * f_1 * \frac{3600}{t_H + \Delta t} \quad (3)$$

- V_R Bucket capacity [m³]
- f_L Load factor
 $f_L = f_F / f_S$;
 f_F – Filling factor of the bucket;
 f_S – Loosing factor of the soil
- f_1 Kind of emptying
- t_H Main period [s]
 $t_H = t_F + t_E + t_{FA}$
- t_F – Filling time
- t_E – Emptying time
- t_{FA} – Drive time
- Δt Time supplement depending on the road condition [s]

- **Paver:**

$$Q_B = b' * v * h \quad (4)$$

b' Working width
 v Working velocity
 h Thickness layer

- **Roller:**

$$Q_B = b' * v * h * \frac{1}{z} \quad (5)$$

b' Working width
 v Working velocity
 h Thickness layer
 z Number of passages

Effective Work Performance

$$Q_E = Q_B * f_{driver} * f_{process\ assistant} * f_{construction\ complexity} * f_{ui} \quad (6)$$

Q_B	Basic work performance
f_{driver}	Operator factor
$f_{process\ assistant}$	Process assistant factor
$f_{construction\ complexity}$	Construction complexity factor
f_{ui}	Unpredictable influences factor

Working and Idle Time

$$t_{idle} = f_{idle} * t_{total} \quad (7)$$

$$t_{working} = \frac{V_{material}}{Q_E} \quad (8)$$

$$t_{working} = t_{total} - t_{idle} = t_{total} - f_{idle} * t_{total} = t_{total} * (1 - f_{idle}) \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow t_{total} = \frac{t_{working}}{1 - f_{idle}}$$

Q_E	Effective work performance [m ³ /h]
f_{idle}	Idle factor
	$f_{idle} = f_{stop\&go} * (f_{construction\ site\ organisation} + f_{idle\ unavoidable})$
	$f_{stop\&go}$ – factor describing the regularity of switching off the machine during still stand time
	$f_{construction\ site\ organisation}$ – construction site organisation factor
$V_{material}$	Volume of material [m ³]
t_{total}	Total time

Fuel consumption at work & idle

$$B_{working} = t_{working} * b_m * f_{machine\ condition} * f_{machine\ technology} \quad (10)$$

$$B_{idle} = b_{idle} * t_{idle} = b_{idle} * f_{idle} * t_{total} = b_{idle} * f_{idle} * \frac{t_{working}}{1 - f_{idle}} \quad (11)$$

$t_{working}$	Working time
b_m	Average fuel consumption of a basic machine
$f_{machine\ condition}$	Machine condition factor
$f_{machine\ technology}$	Machine technology factor
b_{idle}	Fuel consumption at idle
t_{idle}	Idle time
f_{idle}	Idle factor
	$f_{idle} = f_{stop\&go} * (f_{construction\ site\ organisation} + f_{idle\ unavoidable})$
	$f_{stop\&go}$ – factor describing the regularity of switching off the machine during still stand time
	$f_{construction\ site\ organisation}$ – construction site organisation factor
t_{total}	Total time

CO₂e Emission

$$m_{CO_2e} = f_{diesel/CO_2e} * (B_{working} + B_{idle}) \quad (12)$$

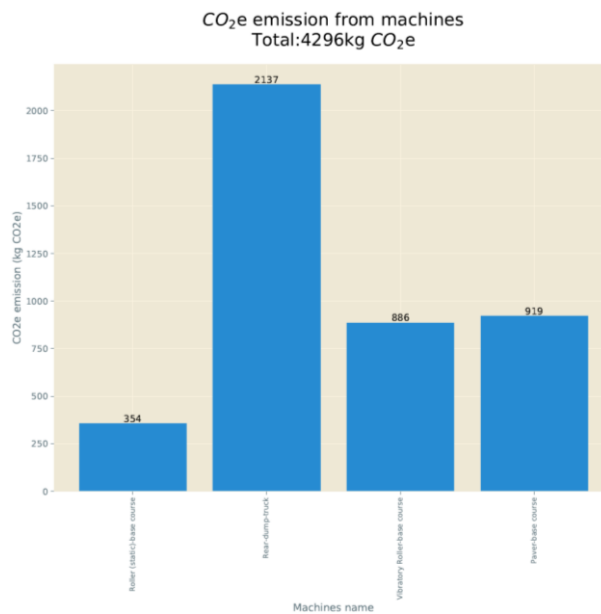
f_{diesel/CO_2e}	CO ₂ e factor for diesel
$B_{working}$	Total fuel consumption during working time
B_{idle}	Total fuel consumption during idle time

Machine formula summarise

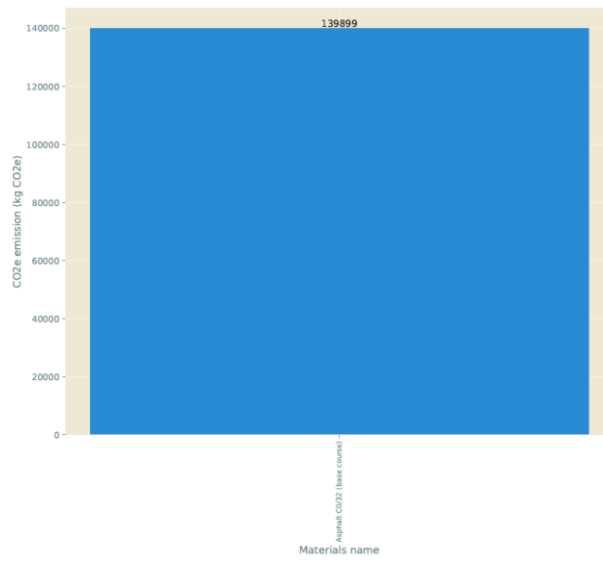
$f_{idle} = 1 \Leftrightarrow t_{working} = 0; t_{total} = t_{idle}$	(13)
$m_{CO_2e} = f_{diesel/CO_2e} * b_{idle} * t_{total}$	
$0 < f_{idle} < 1$	
$m_{CO_2e} = f_{diesel/CO_2e} * \frac{V_{material}}{Q_B * f_{driver} * f_{process\ assistant} * f_{construction\ complexity} * f_{ui}} * (b_m$ $* f_{machine\ condition} * f_{machine\ technology} + b_{idle} * f_{stop\&go} *$ $(f_{construction\ site\ organisation}$ $+ f_{idle\ unavoidable}) * \frac{1}{1 - f_{stop\&go} * (f_{construction\ site\ organisation} + f_{idle\ unavoidable})}$	(14)
$f_{idle} = 0 \Leftrightarrow t_{working} = t_{total}; t_{idle} = 0$	
$m_{CO_2e} = f_{diesel/CO_2e} * \frac{V_{material}}{Q_B * f_{driver} * f_{process\ assistant} * f_{construction\ complexity} * f_{ui}} * (b_m$ $* f_{machine\ condition} * f_{machine\ technology})$	(15)

4. Beispielhafte Tool-Ergebnisdarstellung

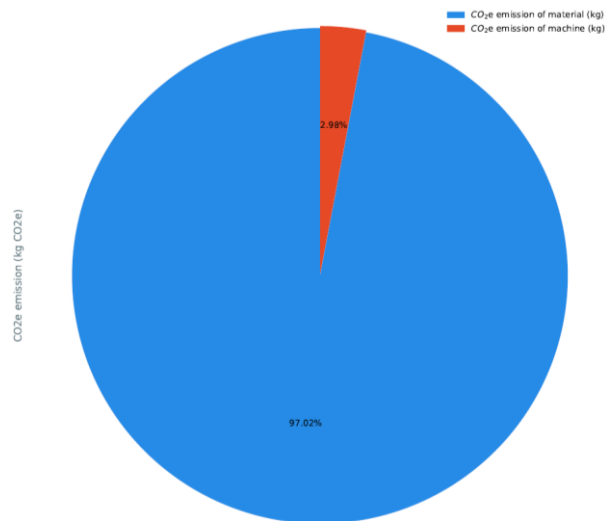
Beispielhafte Ergebnisse für „new Project“



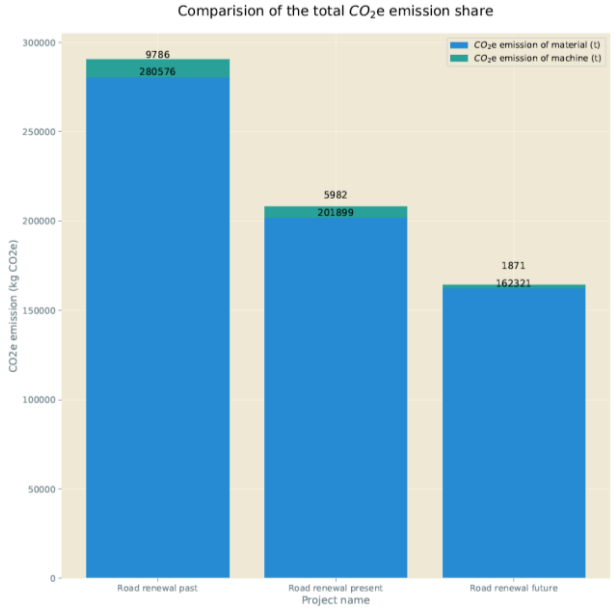
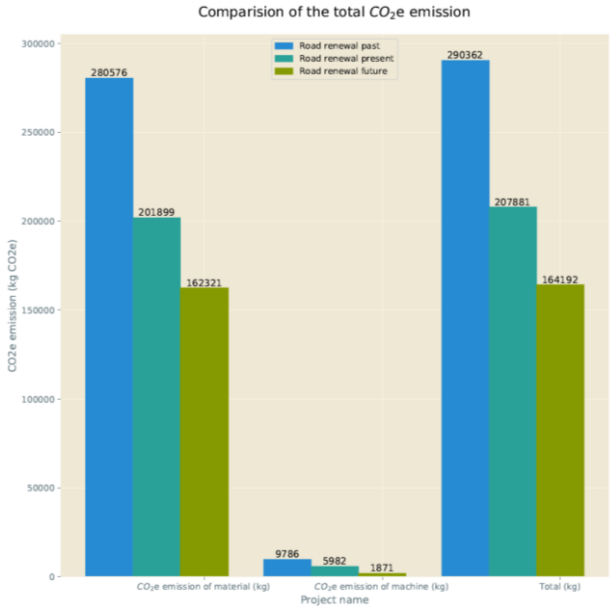
CO₂e emission from materials
Total:139898kg CO₂e



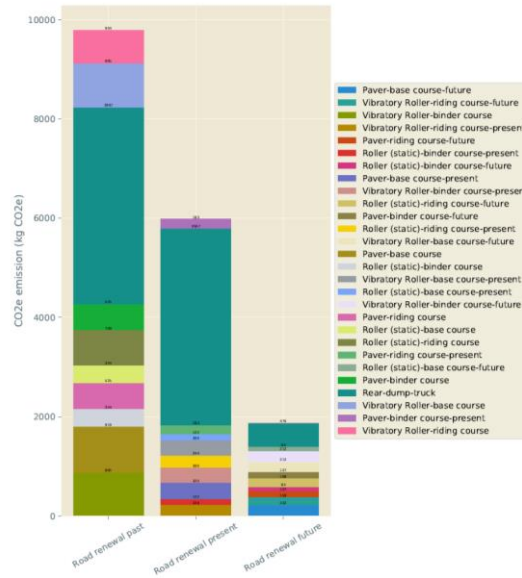
CO₂e emission from total construction work.
Total:144194kg CO₂e



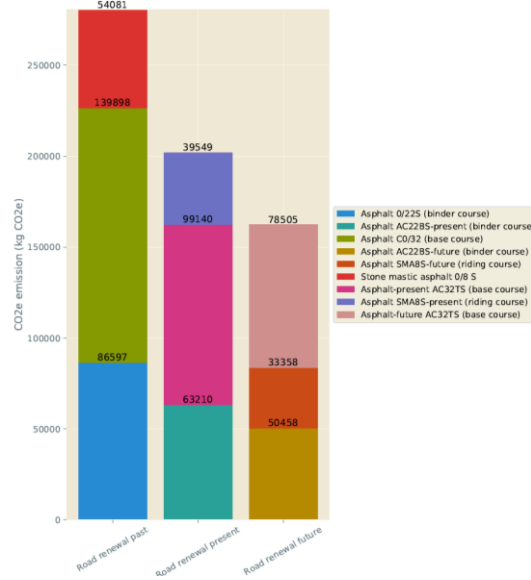
Beispielhafte Ergebnisse für „compare Projects“



Comparison of the CO₂e emission of machine



Comparison of the CO₂e emission of material



5. Fragebögen für den Maschinenführer und Bauleite

Maschinenführer Fragenbogen für Tag 1

Datum:.....Ort: Hohenrainstraße, 71642 Ludwigsburg Neckarweihingen

Baumaschine:

Welche Maschine sind Sie heute gefahren?

Baumaschinentyp, Größe, Bau-
jahr:.....

Herstel-
ler:.....

1. Schalten Sie Ihre Maschine selbst/manuell aus oder macht das die Auto-Stopp Funktion?

.....
.....
.....

2. Sind Sie für die Erfüllung der Bauaufgabe unter Zeitdruck?

- Ja
- Nein

3. Haben Sie ausreichenden Raum für die Bauarbeiten?

- Ja
- Nein

Klima:

4. Wie würden Sie das heutige Wetter beurteilen?

- Ideal
- Gut
- Schlecht
- So schlecht, dass kein Baubetrieb stattfinden darf

5. Denken Sie, dass Regen und Nässe beeinflusst?

- Ja, negativ
- Ja, positiv
- Nein

Wenn ja, wie stark beeinflusst der Regen die Arbeit?

1(nicht stark).....10 (sehr stark)

Wie beeinflusst der Regen die Arbeiten?

.....
.....
.....

6. Beeinflusst das Wetter Ihr Wohlbefinden und Ihre Motivation am Arbeitsplatz?

- Oft
- Manchmal
- Selten
- Gar nicht

7. Wie war die Temperatur in der Kabine?

- Ideal
- Unangenehm:
 - Zu warm
 - Zu kalt

8. Fühlen Sie sich von tiefen oder hohen Temperatur in Ihrer Arbeit negativ beeinflusst?

Tiefe Temperaturen	Hohe Temperaturen
<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Ja
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein

Sichtbedingung:

9. Tragen Sie eine Brille oder Kontaktlinsen?

- Ja
- Nein

10. Wie schätzen Sie die Sichtbedingungen in der Baumaschine ein?

- gute Rundumsicht
- einzelne Stellen sind nicht gut zu sehen
- ungenügend

11. Gibt es Sichtprobleme auf Grund von Reflexionen und Blendung?

- Ja, wann und warum?.....
- Nein

12. Waren heute Sichtprobleme auf Grund von Reflexionen und Blendung?

- Ja
- Nein

13. Wie ist die Sichtbedingung heute?

- sehr gut
- gut
- Mittelmäßig, warum?.....
- Schlecht, warum?.....

14. Sind alle Spiegel verstellbar?

- Ja
- Nur manche

Stellen Sie die Spiegel bei jedem Maschinenwechsel auf Ihre Größe ein?

- Ja
- Manchmal
- Nein

15. Wie ist die Sicht mit der Kamera?

- Alles erkennbar
- Zum Teil problematisch
- ungenügend

16. Wie ist die Sicht beim Rückwärtsfahren?

- Alles erkennbar
- Zum Teil problematisch
- ungenügend

17. Wie oft müssen Sie sich bewegen, da die Sicht auf Ihrem Stuhl eingeschränkt ist?

- Sehr oft, allemin
- oft (jede Stunde)
- manchmal (1-2-mal am Tag)
- nie

18. Haben Sie das Gefühl, dass Regen die Sicht einschränkt?

- Ja
- Manchmal
- Selten
- Nie

19. Haben Sie das Gefühl, dass Schnee die Sicht einschränkt?

- Ja

- Manchmal
- Selten
- Nie

Ergonomie:

20. Ist der Sitz verstellbar?

- | | | |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Höhe | <input type="checkbox"/> Ja | <input type="checkbox"/> Nein |
| Nach vorne oder hinten | <input type="checkbox"/> Ja | <input type="checkbox"/> Nein |
| Rückenlehne | <input type="checkbox"/> Ja | <input type="checkbox"/> Nein |

21. Ist das Lenkrad verstellbar?

- Ja
- Nein
- Nein, Schalthebel

22. Sitzen Sie bequem?

- Ja
- Nein

23. Hatten Sie schon einmal Rückenprobleme auf Grund Ihrer Tätigkeit in der Baumaschine?

- Oft (auf jeden Fall jede Woche)
- Manchmal (jeden Monat)
- Selten (jedes halbe Jahr)
- Nie

24. Haben Sie genügend Bewegungsfreiheit am Fahrerplatz? (ist personenbezogen)

- Ja
- Nein

25. Sind die Pedale gut zu erreichen?

- Ja
- Nein

26. Sind die (elektronischen) Anzeigen alle ersichtlich?

- Ja
- Teilweise, welche nicht?

27. Ist jede Funktion im Display klar?

- Ja
- Nein

28. Wie ist das Display zu bedienen?

- Einfach
- Schwierig zu betätigen mit Handschuhen / dreckigen Finger
- Viel Druck muss aufgewendet werden

29. Sind die Stellteile (z.B. Multifunktionsstellteil, Display...) gut zu erreichen?

- Ja
- Nein

30. Welches Stellteil hat mehr Priorität und welches eher weniger?

.....
.....

31. Können Sie jedem Knopf eine Funktion zuordnen?

- Ja
- Nein

Zusammenfassung (Kima, Sicht, Ergonomie, Assistent Systeme)

32. Wie würden Sie den Komfort in der Maschinenkabine einstufen?

- Gut

- Mittel
- Schlecht

Umgang mit Baumaschinen - Qualifikationen und Kompetenzen:

33. Welche Ausbildung haben Sie abgeschlossen?.....
34. Wann war Ihre Ausbildung?
.....
35. Wie viele Jahre hat die Ausbildung gedauert?
.....
36. Wo haben Sie die Ausbildung abgeschlossen?.....
37. Bei welcher Firma?
.....
38. Wie lange bedienen Sie schon Baumaschinen?
.....
39. Wie lange fahren Sie diese Art von Baumaschinen?.....
40. Können Sie auch andere Arten von Baumaschinen fahren?
- Ja, welche noch?.....
 - Nein

Wie oft wechseln Sie die Maschinenart?

- Gar nicht
- Oft (mehrmals täglich)
- Manchmal (wöchentlich)
- Selten (monatlich)

41. Fahren Sie immer dieses Maschinentyp (=Maschinenmodell)?
- Ja
 - Nein, welche noch?.....

Wie oft wechseln Sie den Maschinentyp (=Maschinenmodell)?

- Gar nicht

- Oft (mehrmals täglich)
- Manchmal (wöchentlich)
- Selten (monatlich)

Sind verschiedenen Maschinentypen unterschiedlich von Ihrer Handhabung und Führung?

- Sehr
- Etwas
- Wenig
- Gar nicht

42. Ist der Maschinenwechsel schwierig?

- Ja, mit dem Wechsel der Maschinenarten
- Ja, mit dem Wechsel der Maschinentypen
- Ja, mit beiden Wechseln
- Nein

Beim Maschinenwechsel, welche Aussage trifft bei Ihnen zu?

- Entstehung von mehr Fehlern in der Bedienung
- höhere Konzentration ist notwendig
- größere Anstrengung
- schnellere Müdigkeit
- Reaktion in Gefahrensituationen ist langsamer

Bekommen Sie beim Maschinenwechsel eine Einweisung in die Maschine?

- Ja, beim Wechsel der Maschinenart
- Ja, beim wechseln des Maschinentyps
- Nein

43. Wie war Ihre Arbeitsleistung heute?

- Sehr gut

- Gut
 - Mittelmäßig
 - Schlecht
44. Wie schätzen Sie die Aufgabenschwierigkeit (Komplexität) Ihrer Aufgabe ein?
(allgemein, im Vergleich zum Auto fahren)
- 1 (sehr leicht)10 (sehr schwierig)
45. Wie oft nehmen Sie jedes Jahr an einer Unterweisung (Baumaschinenfortbildung) teil?
- 0
 - 1
 - 2
 - Mehr als 3
46. Wo und wann war Ihre letzte Fortbildung/ Unterweisung
?.....
47. Was war der Inhalt dieser letzten Fortbildung / Unterweisung?.....
48. Wer macht die Schulung bzw. wo findet die Schulung
statt?.....
49. Wie sind die Fortbildungen aufgebaut?
- Theoretisch
 - Praktisch, bei wem?
 - Beides, bei wem?.....
50. Wo finden diese Fortbildungen statt?
- Testgelände
 - Baustelle
 - Schulungsraum
 - Sonstiges:.....

Fragenbogen Bauleiter/Polier für Tag 1

Datum:.....

Ort:
.....

Baustelle

Tätigkeit:

Dauer der Tätigkeit (wie viele Tage?):

Anzahl an Maschinen:

Anzahl an Mitarbeiter:

Besondere Bedingungen:

Baumaschine:

1. Haben Ihre Maschine „Prozess Assistenz Systeme“?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Ja, welche?	<input type="checkbox"/> Ja, welche?	<input type="checkbox"/> Ja, welche?	<input type="checkbox"/> Ja, welche?
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein
<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht

Wenn ja, wie oft werden diese genutzt?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Oft
<input type="checkbox"/> Manchmal	<input type="checkbox"/> Manchmal	<input type="checkbox"/> Manchmal	<input type="checkbox"/> Manchmal
<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Selten
<input type="checkbox"/> Gar nicht	<input type="checkbox"/> Gar nicht	<input type="checkbox"/> Gar nicht	<input type="checkbox"/> Gar nicht
<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht

Haben Sie heute diese „Assistent Systeme“ genutzt?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Ja, wann?	<input type="checkbox"/> Ja, wann?	<input type="checkbox"/> Ja, wann?	<input type="checkbox"/> Ja, wann?

wie lange?..... <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	wie lange?..... <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	wie lange?..... <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	wie lange?..... <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht
---	---	---	---

2. Haben die Maschine einen Ecomode?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Ja, <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ja, <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ja, <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ja, <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht

Wenn ja, wie oft wird der Ecomode genutzt und für welche Arbeitsaufgaben?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Oft <input type="checkbox"/> Manchmal <input type="checkbox"/> Selten <input type="checkbox"/> Gar nicht <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Oft <input type="checkbox"/> Manchmal <input type="checkbox"/> Selten <input type="checkbox"/> Gar nicht <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Oft <input type="checkbox"/> Manchmal <input type="checkbox"/> Selten <input type="checkbox"/> Gar nicht <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Oft <input type="checkbox"/> Manchmal <input type="checkbox"/> Selten <input type="checkbox"/> Gar nicht <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht
Arbeitsaufgaben:	Arbeitsaufgaben:	Arbeitsaufgaben:	Arbeitsaufgaben:

Wurde heute der Ecomode genutzt, wenn ja für welche Arbeitsaufgaben?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Ja, wann? wie lange?..... <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ja, wann? wie lange?..... <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ja, wann? wie lange?..... <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ja, wann? wie lange?..... <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht
Arbeitsaufgaben:	Arbeitsaufgaben:	Arbeitsaufgaben:	Arbeitsaufgaben:

3. Wie wird Ihrer Meinung nach mit Ecomode richtig umgegangen?

.....

.....

.....

.....

4. Haben die Maschinen eine Auto-Stopp Funktion?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Ja,	<input type="checkbox"/> Ja,	<input type="checkbox"/> Ja,	<input type="checkbox"/> Ja,
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein
<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht

Wenn ja, wie oft nutzen Sie die Auto-Stopp Funktion?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Oft	<input type="checkbox"/> Oft
<input type="checkbox"/> Manchmal	<input type="checkbox"/> Manchmal	<input type="checkbox"/> Manchmal	<input type="checkbox"/> Manchmal
<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Selten	<input type="checkbox"/> Selten
<input type="checkbox"/> Gar nicht	<input type="checkbox"/> Gar nicht	<input type="checkbox"/> Gar nicht	<input type="checkbox"/> Gar nicht
<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht

Wurde diese Auto-Stopp Funktion heute genutzt?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Ja, wann? wie lange?.....	<input type="checkbox"/> Ja, wann? wie lange?.....	<input type="checkbox"/> Ja, wann? wie lange?.....	<input type="checkbox"/> Ja, wann? wie lange?.....
<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein	<input type="checkbox"/> Nein
<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht

Bei welchen Maschinen kann die Auto-Stopp Funktion ausgeschaltet werden?

.....

Wurde dieser „Auto-Stopp“ heute ausgeschaltet? Wenn ja, wieso?

.....

Bei den Maschinen mit Auto-Stopp Funktion, werden die Maschine trotzdem manuell ausgeschaltet? Wieso?

.....

.....

.....

.....

.....

5. Gibt es weitere wesentliche technologische Verbesserung im Vergleich zu anderen Baumaschinen dieses Typs?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht

6. Wie lange vor Arbeitsbeginn müssen die Baumaschinen eingeschaltet werden? (z.B. Temperatur in der Kabine, Temperatur für den Fertiger,...)

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Sommer.....min	<input type="checkbox"/> Sommer.....min	<input type="checkbox"/> Sommer.....min	<input type="checkbox"/> Sommer.....min
<input type="checkbox"/> Winter.....min	<input type="checkbox"/> Winter.....min	<input type="checkbox"/> Winter.....min	<input type="checkbox"/> Winter.....min
<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> Ich weiß es nicht

7. Fallen Ihnen andere Situationen ein bei denen die Leerlaufzeiten der Baumaschine nötig sind?

.....

.....

Planung:

8. Wie beurteilen Sie die Planung der heutigen Baustelle?

- Sehr gut
- Gut
- Mittel
- Schlecht

9. Lief alles wie geplant?

- Ja
- Nein, was lief nicht wie geplant?.....

10. Sind auf der Baustelle die richtigen Baumaschinen im Einsatz?

- Ja
- Nein, sollten manche Maschinen kleiner bzw. größer sein?
.....
oder sollten andere Maschinentypen im Einsatz sein?
.....

11. Sind Sie für die Erfüllung der Bauaufgabe unter Zeitdruck?

- Ja
- Nein

12. Haben Sie ausreichenden Raum für die Bauarbeiten?

- Ja
- Nein

Klima:

13. Wie würden Sie das heutige Wetter beurteilen?

- Ideal
- Gut
- Schlecht
- So schlecht, dass kein Baubetrieb stattfinden darf

14. Denken Sie, dass Regen und Nässe die Arbeit beeinflusst?

- Ja, negativ

- Ja, positiv
- Nein

Wenn ja, wie stark beeinflusst der Regen die Arbeit?

1(nicht stark).....10 (sehr stark)

Wie beeinflusst der Regen die Arbeiten?

.....

.....

.....

15. Beeinflusst das Wetter das Wohlbefinden und die Motivation der Baumaschinenführer?

- Oft
- Manchmal
- Selten
- Gar nicht
- Ich weiß es nicht

16. Wie werden die Fahrer von hohen und tiefen Temperaturen beeinflusst?

Tiefen Temperaturen	Hohen Temperaturen

Sichtbedingung:

17. Wie schätzen Sie die Sichtbedingungen in der Baumaschine ein?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> gute Rundumsicht	<input type="checkbox"/> gute Rundumsicht	<input type="checkbox"/> gute Rundumsicht	<input type="checkbox"/> gute Rundumsicht
<input type="checkbox"/> einzelne Stellen sind nicht gut zu sehen	<input type="checkbox"/> einzelne Stellen sind nicht gut zu sehen	<input type="checkbox"/> einzelne Stellen sind nicht gut zu sehen	<input type="checkbox"/> einzelne Stellen sind nicht gut zu sehen

<input type="checkbox"/> ungenügend	<input type="checkbox"/> ungenügend	<input type="checkbox"/> ungenügend	<input type="checkbox"/> ungenügend
<input type="checkbox"/> ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> ich weiß es nicht	<input type="checkbox"/> ich weiß es nicht

18. Haben Sie das Gefühl, dass Regen die Sicht einschränkt?

- Ja
- Manchmal
- Selten
- Nie

19. Haben Sie das Gefühl, dass Schnee die Sicht einschränkt?

- Ja
- Manchmal
- Selten
- Nie

Umgang mit Baumaschinen - Qualifikationen und Kompetenzen:

20. Ist der Maschinenwechsel schwierig?

- Ja, mit dem Wechsel der Maschinenarten
- Ja, mit dem Wechsel der Maschinentypen
- Ja, mit beiden Wechseln
- Nein

Beim Maschinenwechsel, welche Aussage trifft meistens zu?

- Entstehung von mehr Fehlern in der Bedienung
- höhere Konzentration ist notwendig
- größere Anstrengung
- schnellere Müdigkeit
- Reaktion in Gefahrensituationen ist langsamer

Bekommen die Fahrer beim Maschinenwechsel eine Einweisung in die Maschine?

- Ja, beim Wechsel der Maschinenart
- Ja, beim wechseln des Maschinentyps
- Nein

21. Wie würden Sie Ihre Maschinenführer einschätzen?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Experte <input type="checkbox"/> Guter Fahrer <input type="checkbox"/> Mittlerer Fahrer <input type="checkbox"/> Anfänger	<input type="checkbox"/> Experte <input type="checkbox"/> Guter Fahrer <input type="checkbox"/> Mittlerer Fahrer <input type="checkbox"/> Anfänger	<input type="checkbox"/> Experte <input type="checkbox"/> Guter Fahrer <input type="checkbox"/> Mittlerer Fahrer <input type="checkbox"/> Anfänger	<input type="checkbox"/> Experte <input type="checkbox"/> Guter Fahrer <input type="checkbox"/> Mittlerer Fahrer <input type="checkbox"/> Anfänger

22. Wie war die Arbeitsleistung der Maschinenführer heute?

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Sehr gut <input type="checkbox"/> Gut <input type="checkbox"/> Mittelmäßig <input type="checkbox"/> Schlecht	<input type="checkbox"/> Sehr gut <input type="checkbox"/> Gut <input type="checkbox"/> Mittelmäßig <input type="checkbox"/> Schlecht	<input type="checkbox"/> Sehr gut <input type="checkbox"/> Gut <input type="checkbox"/> Mittelmäßig <input type="checkbox"/> Schlecht	<input type="checkbox"/> Sehr gut <input type="checkbox"/> Gut <input type="checkbox"/> Mittelmäßig <input type="checkbox"/> Schlecht

23. Wie schätzen Sie die Aufgabenschwierigkeit der Baumaschinenführer ein? (allgemein, im Vergleich zum Auto fahren)

Radlader	Walze	Walze	Straßenfertiger
<input type="checkbox"/> Sehr schwierig <input type="checkbox"/> schwierig <input type="checkbox"/> Mittelmäßig <input type="checkbox"/> leicht	<input type="checkbox"/> Sehr schwierig <input type="checkbox"/> schwierig <input type="checkbox"/> Mittelmäßig <input type="checkbox"/> leicht	<input type="checkbox"/> Sehr schwierig <input type="checkbox"/> schwierig <input type="checkbox"/> Mittelmäßig <input type="checkbox"/> leicht	<input type="checkbox"/> Sehr schwierig <input type="checkbox"/> schwierig <input type="checkbox"/> Mittelmäßig <input type="checkbox"/> leicht

24. Wie oft nehmen die Baumaschinenführer jedes Jahr an einer Fortbildung (Baumaschinenfortbildung) teil?

- 0
- 1
- 2
- Mehr als 3

25. Wie oft werden Fortbildung angeboten?.....

26. Wie sind die Fortbildungen aufgebaut?

- Theoretisch
- Praktisch, von welcher Firma sind die Baumaschinen?
.....
- Beides

27. Wo finden diese Fortbildungen statt?

- Testgelände
- Baustelle

- Schulungsraum
- Sonstiges:.....

Rückendeckel

