

Hochschule Konstanz
Technik, Wirtschaft und Gestaltung

Bachelorthesis

**Weiternutzung gebrauchter Baumaterialien:
Eine Betrachtung der ökonomischen und ökologischen
Potenziale**

Fakultät Bauingenieurwesen

Studiengang: Bauingenieurwesen/Baubetrieb und Baumanagement

Semester: BIB 7
Professor: Prof. Dr.-Ing. Michael Bühler
Student: Nico Gonser (300959)
Abgabedatum: 05.02.2024

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. Ziel und Aufbau der Arbeit	1
2. Theorie und Hintergrund.....	3
2.1 Begriffsdefinitionen.....	3
2.2 Politische Rahmenbedingungen.....	6
2.3 Umsetzungsbeispiele des Klimaschutzes in der Baubranche	8
2.4 Herausforderungen der Wieder- und Weiterverwendung.....	12
2.5 Vorstellung der betrachteten Fälle	17
2.6 Theoretische Grundlagen zur Nachhaltigkeitsbewertung.....	19
3. Analyse der Fälle im Vergleich	23
3.1 Materialien	23
3.2 Transportwege	25
3.2. Transportarten.....	30
3.3. Transport- und Entsorgungskosten	32
4. Ökonomischer Vergleich.....	36
4.1.1 Stahl	37
4.1.2 Kunststoffrohre	41
4.1.3 Aushubmaterial.....	46
5. Ökologischer Vergleich.....	50
5.1 Stahl	51
5.2 Kunststoffrohre	54

5.3 Aushub	58
6. Ergebnisse.....	62
7. Schlussfolgerung und Ausblick	77
8. Literaturverzeichnis	82
Anhang	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des inländischen Konsums an Materialien und Energie in der Schweiz.....	9
Abbildung 2: Umweltmatrix-Ausschnitt 4-Spurausbau Bülach Hardwald.....	11
Abbildung 3: Fall 1 Entsorgung und Neubeschaffung.....	17
Abbildung 4: Fall 2 Wieder- und Weiterverwendung.....	18
Abbildung 5: Ökofaktoren der Methode der ökologischen Knappheit.....	21
Abbildung 6: Fall 1 Entsorgung und Neubeschaffung.....	25
Abbildung 7: Fall 2 Wieder- und Weiterverwendung.....	25
Abbildung 8: Zulässige Abmessungen und Gesamtgewichte LKW-Transport.....	31
Abbildung 9: Umwelteinwirkungen Fall 1 Entsorgung/Neubeschaffung Stahl.....	51
Abbildung 10: Umwelteinwirkungen Fall 2 Weiterverwendung Stahl.....	52
Abbildung 11: Umwelteinwirkungen Fall 1 Entsorgung/Neubeschaffung Kunststoffrohre.....	54
Abbildung 12: Umwelteinwirkungen Fall 2 Weiterverwendung Kunststoffrohre ...	55
Abbildung 13: Umwelteinwirkungen Fall 1 Entsorgung/Neubeschaffung Aushub	58
Abbildung 14: Umwelteinwirkungen Fall 2 Weiterverwendung Aushub.....	59
Abbildung 15: Kosten - Transportdistanz Stahlträger.....	64
Abbildung 16: UBP - Transportdistanz Stahlträger.....	65
Abbildung 17: THG-Emissionen - Transportdistanz Stahlträger.....	66
Abbildung 18: Kosten - Transportdistanz Kabelschutzrohre.....	68
Abbildung 19: UBP - Transportdistanz Kabelschutzrohre.....	69
Abbildung 20: THG-Emissionen - Transportdistanz Kabelschutzrohre.....	70
Abbildung 21: Kosten - Transportdistanz Aushub.....	72
Abbildung 22: UBP - Transportdistanz Aushub.....	73
Abbildung 23: THG-Emissionen - Transportdistanz Aushub.....	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strategische Grundsätze der langfristigen Schweizer Klimastrategie	7
Tabelle 2: Kostenberechnung Entsorgung Stahl.....	37
Tabelle 3: Kostenberechnung Neubeschaffung Stahl.....	38
Tabelle 4: Kostenberechnung Weiterverwendung Stahl.....	39
Tabelle 5: Ermittlung der Transportdistanz Stahl.....	40
Tabelle 6: Kostenberechnung Entsorgung Kunststoffrohre	41
Tabelle 7: Kostenberechnung Neubeschaffung Kunststoffrohre.....	42
Tabelle 8: Kostenberechnung Weiterverwendung für Kunststoffrohre.....	43
Tabelle 9: Ermittlung der Transportdistanz Kunststoffrohre.....	45
Tabelle 10: Kostenberechnung Entsorgung Aushubmaterial	46
Tabelle 11: Kostenberechnung Neubeschaffung Aushubmaterial.....	47
Tabelle 12: Kostenberechnung Weiterverwendung Aushubmaterial.....	48
Tabelle 13: Ermittlung der Transportdistanz Aushubmaterial.....	49
Tabelle 14: Ökobilanzdaten Entsorgung und Neubeschaffung Stahl	52
Tabelle 15: Ökobilanzdaten Weiterverwendung Stahl.....	53
Tabelle 16: Ökobilanzdaten Entsorgung und Neubeschaffung Kunststoffrohre ...	55
Tabelle 17: Ökobilanzdaten Weiterverwendung Kunststoffrohre.....	56
Tabelle 18: Ökobilanzdaten Entsorgung und Neubeschaffung Aushubmaterial ...	59
Tabelle 19: Ökobilanzdaten Weiterverwendung Aushubmaterial.....	60

Abkürzungsverzeichnis

ASTAG	Schweizerischer Nutzfahrzeugverband
BAFU	Bundesamt für Umwelt
bzw.	beziehungsweise
bspw.	beispielsweise
CHF	Schweizer Franken
CO ₂ -äq	CO ₂ -Äquivalente
gew. MW	gewichteter Mittelwert
Hrsg.	Herausgeber
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
Kosten-E/N	Kosten Entsorgung und Neubeschaffung
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
l _{fm}	Laufmeter
LSVA	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe
NDCs	Nationally Determined Contributions
o. E.	ohne Einheit
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
t	Tonne
THG-Emission	Treibhausgas-Emission
tkm	Tonnenkilometer
z. B.	zum Beispiel
UBP	Umweltbelastungspunkte

1. Ziel und Aufbau der Arbeit

Häufig gelangen Baumaterialien, welche ihrer Funktion noch entsprechen oder weiterhin genutzt werden könnten, in die Entsorgung oder aber in die stoffliche oder energetische Verwertung.

Der Grund dafür ist oft der Mangel an ausreichendem Lagerplatz und der Möglichkeit zur Weiterverwendung der Materialien. Wenn die Lagerhaltung keine Option darstellt und die Materialien von einer Baustelle abtransportiert werden müssen, kann nur der Weitertransport an einen anderen Ort der Verwendung, in der Regel eine weitere Baustelle, eine Option anstatt der Entsorgung oder Verwertung sein. Es stellt sich die Frage, inwiefern ein Transport zur Weiterverwendung gebrauchter und übrig gebliebener Baumaterialien sinnvoll ist und welche Kostenvorteile und Reduktionen der Umweltauswirkungen dadurch hervorgebracht werden können. Betrachtet werden dazu Materialien, welche auf Tief- und Infrastrukturbaustellen genutzt werden und deren Weiternutzung in Betracht gezogen werden kann. Dabei liegt der Fokus auf dem Vergleich zwischen dem Transport zum Ort der Weiternutzung und der Entsorgung und Neubeschaffung derselben Materialien.

Die Baubranche erzeugt in der Schweiz 84% des zustande kommenden Abfalls und ist für 40% der CO₂-Emissionen verantwortlich (CircularHub, 2023). Das zeugt von den großen Einsparpotentialen, die eine Weiterverwendung von Materialien mit sich bringt. Ein bewusster Umgang mit übrig gebliebenen oder gebrauchten Baustoffen kann also einen großen Effekt auf den Klimaschutz und die Zukunft unserer Gesellschaft haben.

In dieser Arbeit soll durch die Untersuchung des Rahmens, in dem eine direkte Wiederverwendung der Materialien sinnvoll ist, eine Aussage über die Vorteile ökonomischer sowie ökologischer Art getroffen werden können. Die tatsächlichen Kosten und Umwelteinwirkungen im Zusammenhang mit den Materialien und deren Wiederverwendung können oft nur schwer eingeschätzt werden. Durch die Ausarbeitung kann aus Unternehmer-sicht eine fundierte Aussage unter Abwägung von Kosten und Vorteilen getroffen werden, welche zur Vermeidung von Abfall führen soll.

In der Arbeit werden zunächst die genutzten Begriffe definiert. Anschließend werden politische Rahmenbedingungen des Klimaschutzes auf internationaler und nationaler Ebene

in der Schweiz erläutert, gefolgt von Umsetzungsbeispielen des Klimaschutzes in der Baubranche. Die Herausforderungen der Wieder- und Weiterverwendung werden im allgemeinen Kontext erläutert. Anschließend wird die betrachtete Situation und die daraus resultierenden Fälle dargestellt. Die Grundlage der weiteren Ausarbeitung stellt eine Situation von übrigen und/oder gebrauchten Baumaterialien dar, welche im Fall 1 entsorgt werden, während vergleichbare Materialien auf einer anderen Baustelle neu beschafft werden. Fall 2 zeigt Wieder- und Weiterverwendung dieser Baumaterialien auf einer anderen Baustelle mit Fokus auf den Transport auf diese Baustelle auf. Die Fälle werden zunächst in Hinblick auf ihre Rahmenbedingungen analysiert. Es wird dabei genauer definiert, welche Materialien und Kosten berücksichtigt werden und wie sich die Transportwege sowie Transport- und Entsorgungskosten zusammensetzen. Der Vergleich der Fälle findet auf einer ökonomischen sowie ökologischen Ebene statt. Im ökonomischen Vergleich werden mithilfe einer selbst erarbeiteten Excel-Tool die Kosten beider Fälle für die betrachteten Materialien verglichen. Der ökonomische Vergleich betrachtet sowohl die Umwelteinwirkungen der Entsorgung und Neubeschaffung als auch die Umwelteinwirkungen der Wieder- und Weiterverwendung auf Basis der Umweltbelastungspunkte und CO₂-Äquivalenten. Abschließend wird für die betrachteten Materialien ein Beispiel auf ökonomischer sowie auf ökologischer Ebene verglichen. Es werden die Kostenvorteile und auch die Reduktion von Umwelteinwirkungen durch die Wiederverwendung berechnet und gegenübergestellt. Welche maximalen Transportdistanzen im Rahmen der Wiederverwendung gegenüber der Entsorgung und Neubeschaffung möglich wären, wird ebenfalls kalkuliert. Die Schlussfolgerung bietet einen gesamtheitlichen Überblick der erarbeiteten Ergebnisse unter Anmerkung der unberücksichtigten Faktoren.

2. Theorie und Hintergrund

2.1 Begriffsdefinitionen

In dieser wissenschaftlichen Arbeit werden übliche, auf Baustellen übrige und bereits gebrauchte Baumaterialien betrachtet. Häufig geraten die betrachteten Materialien in die Entsorgung. Diese beinhaltet die Verwertungs- und Beseitigungsverfahren. Unter Verwertungsverfahren fallen bspw. das Recycling oder die thermische Verwertung in einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA). In einem Beseitigungsverfahren werden die Materialien bspw. auf einer Deponie entsorgt.

Es liegt also nahe, dass diese Materialien als Bauabfall bezeichnet werden. Abfall liegt allerdings nur vor, wenn ein „Stoff oder Gegenstand, dessen sich sein Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss“ (Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, 2018), vorliegt. Das Ende der Bezeichnung der Abfalleigenschaft liegt nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG §5 Abs. 1 vor, wenn der Stoff oder Gegenstand

„ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass

1. er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,
2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,
3. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie
4. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.“

Da in den bearbeitenden Fällen, welche in Kapitel 2.5 genauer beschrieben werden, eine Nachfrage und ein Zweck der Nutzung vorliegt werden diese Materialien explizit nicht als Abfall, sondern als gebrauchte oder übrige Materialien bezeichnet. Von übrigen Materialien ist die Rede, wenn diese am Einsatz- oder Ausgangsort nicht mehr benötigt werden. Um gebrauchte Materialien handelt es sich, wenn das Produkt „mindestens einmal in ein Bauwerk eingebaut wurde und

a) keinem Verfahren unterzogen worden ist, das über die vom ursprünglichen Hersteller in seiner Gebrauchsanweisung angegebene bzw. nach gängigen bautechnischen Kenntnissen als notwendig anerkannte Reparatur, Reinigung oder regelmäßige Wartung hinausgeht;

b) keinem Verfahren unterzogen worden ist, das über die Reparatur, Reinigung oder regelmäßige Wartung bzw. ‚Vorbereitung zur Wiederverwendung‘ im Sinne von Artikel 3 Nummer 16 der Richtlinie 2008/98/EG nach dem Ausbau hinausgeht.“ (Halstenberg & Franßen, 2022, S. 21)

Unter der Vorbereitung zur Wiederverwendung versteht man Reparatur- Reinigungs- oder Prüfmaßnahmen, welche zur Vorbereitung nötig sind, um die Materialien weiterzuverwenden, ohne diese weiteren Vorbehandlungsmaßnahmen unterziehen zu müssen (Halstenberg & Franßen, 2022).

Unter den Begriff eines wiederaufbereiteten Produktes fallen Materialien, die für den erneuten Einsatz in einem Bauwerk einen Umwandlungsprozess benötigen, welcher über Reparatur-, Reinigungs- und Wartungsmaßnahmen hinausgeht (Halstenberg & Franßen, 2022).

Nach der, auf nationaler Ebene im Kreislaufwirtschaftsgesetz umgesetzten EU-Richtlinie legt die Abfallrahmenrichtlinie im §6 Abfallhierarchie die Rangfolge der Maßnahmen in der Abfallbewirtschaftung fest. An erster Stelle steht die Vermeidung von Abfall, gefolgt vom Vorbereiten zur Wiederverwendung noch vor dem Recycling (Hillebrandt et al., 2021).

Im Fokus liegt die Wiederverwendung, die weitere Nutzung mit einem Verwendungszweck, der etwa dem entspricht, wofür das Produkt ursprünglich hergestellt wurde, oder die Weiterverwendung, die Nutzung der Bauteile mit einem anderen Verwendungszweck (Dechantsreiter et al., 2015).

Die Anforderungen an die Baumaterialien selbst sind dementsprechend hoch, wenn sie direkt weiterverwendet werden sollen. Also ist ein sorgfältiger Umgang mit den Materialien nötig, welche auf die Wiederverwendung abzielen. Maßnahmen, die der Gewinnung der Materialien dienen, müssen ebenfalls in Anbetracht der Weiternutzung der auszubauenden Materialien durchgeführt werden und den damit einhergehenden, hohen

Anforderungen an die Bauteile gerecht werden. Diese Maßnahmen werden durch den selektiven Rückbau definiert.

Als selektiven Rückbau bezeichnet man die Demontage und Trennung von Elementen aus einem Bauwerk, um möglichst wenig Abfall zu erzeugen und die einzelnen Elemente weiterzuverwenden.

Indem Baumaterialien bestmöglich wiedereingesetzt werden, können so gut wie möglich geschlossene Rohstoffkreisläufe hergestellt werden. Damit kann das Ziel von Küpfer & Fivet (2021), die Energien, welche beispielsweise durch die Produktion bereits in die Materialien gesteckt wurden sowie den Wert der Materialien zu erhalten, umgesetzt werden.

Der Begriff Reuse, von dem englischen Wort „reuse“ kommend und als „Wiederverwendung“ übersetzt, wird hier vereinfachend als Bezeichnung für die Wieder- und Weiterverwendung gebrauchter Baumaterialien genutzt.

2.2 Politische Rahmenbedingungen

Global

Im Jahr 2015 wurde das Pariser Abkommen verabschiedet, in dem die teilnehmenden Staaten vereinbarten, den Kampf gegen die Klimaerwärmung gemeinsam anzugehen. Bei dem Abkommen handelt es sich um ein System aus freiwilligen Selbstverpflichtungen. Das Pariser Abkommen verfolgt im Wesentlichen drei Ziele. Zum einen wurde das langfristige Ziel gesetzt, die Mitteltemperatur auf einen Anstieg um 2 Grad Celsius zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen; zum anderen stand das Bestreben im Raum, den Anstieg sogar auf nur 1,5 Grad zu beschränken. Des Weiteren wird als gleichberechtigtes Ziel angesehen, die Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel zu stärken. Außerdem sind die Flüsse finanzieller Mittel auf die Klimaziele abzustimmen. Zur Erreichung der Ziele sollen die einzelnen Vertragsstaaten nationale klimapolitische Pläne vorlegen, die sogenannten Nationally Determined Contributions (NDCs). Die NDCs müssen nach der globalen Bestandsaufnahme ab dem Jahr 2018 im Fünfjahrestakt überarbeitet werden (BMWK-Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, o. J.; Edenhofer et al., 2016).

Europa

Basierend auf einer Entscheidung des Europäischen Rats vom Juni 2021 sollen in der Europäischen Union die Treibhausgasemissionen bis 2023 um 55% gegenüber 1990 reduziert werden. Das Ziel gilt seit dem 30. Juni 2021 als rechtsverbindlich. Die Europäische Union hat sich außerdem als Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu werden. Um dies zu erreichen, gibt es verschiedene Ansatzpunkte. Neben der Reduzierung des CO₂-Ausstoßes soll auch die Aufnahme von CO₂ durch den Schutz des Erdbodens, der Ozeane und Wälder erhöht werden. Zur Reduzierung des Ausstoßes von CO₂ wurde das EU-Emissionshandelssystem entwickelt (European Council, o. J.; Rat der EU, 2023).

Schweiz

Die klimapolitischen Ziele der Europäischen Union spiegeln sich auch in der Klimastrategie der Schweiz wider. So hat die Schweiz zehn „*Strategische Grundsätze der langfristigen Klimastrategie*“ (Der Bundesrat, 2021, S. 16) festgelegt, mit welchen die Erreichung des „Netto-Null-Ziels bis 2050“ (Der Bundesrat, 2021, S. 16) ermöglicht werden soll. Die

Grundsätze wurden in der folgenden Tabelle nacheinander aufgeführt und die Kernaussage wurde stichwortartig zusammengefasst.

Tabelle 1: Strategische Grundsätze der langfristigen Schweizer Klimastrategie

Grundsatz	Kernaussage
1 Chancen nutzen	Innovation und Forschung vorantreiben und mit Entwicklung neuer Technologien, Verfahren und Lösungen Wettbewerbsfähigkeit stärken
2 Verantwortung übernehmen	Mit konsequenter Verfolgung klimapolitischer Ziele Verantwortungsrolle übernehmen
3 Emissionen im Inland reduzieren	Umfassende Emissionsreduktion und Ausgleich schwer vermeidbarer Emissionen durch Negativemissionstechnologie
4 Emissionen über gesamte Wertschöpfungskette reduzieren	Schonung natürlicher Ressourcen, Kreislaufwirtschaft stärken, Materialien länger verwenden, Mengen reduzieren und durch emissionsärmere Alternativen ersetzen
5 Alle Energieträger haushälterisch und optimal einsetzen	Potentiale zur Verbesserung der Energieeffizienz und Reduzierung des Verbrauchs nutzen und Energieträger optimal nutzen
6 Bund und Kantone richten sich konsequent auf Netto-Null aus	Bauten und Infrastruktur in Hinblick auf Erreichung der Klimaziele planen
7 Sozialverträglichkeit	Erleichterung des Übergangs in Richtung Netto-Null für die Bevölkerung ohne zusätzliche finanzielle Belastungen
8 Wirtschaftsverträglichkeit	Übergang in Richtung Netto-Null-Ziel wirtschaftsverträglich und kosteneffizient gestalten, internationale Wettbewerbsfähigkeit gewährleisten
9 Umweltqualität verbessern	Klimaschutz nicht auf Kosten anderer Umweltbereiche
10 Technologieoffenheit	Politische Handlungs- und Gestaltungsspielräume so offen wie möglich gestalten, langfristige Klimastrategie mit technologieoffenem Ansatz

Quelle: Eigene Darstellung nach Bundesrat 2021

2.3 Umsetzungsbeispiele des Klimaschutzes in der Baubranche

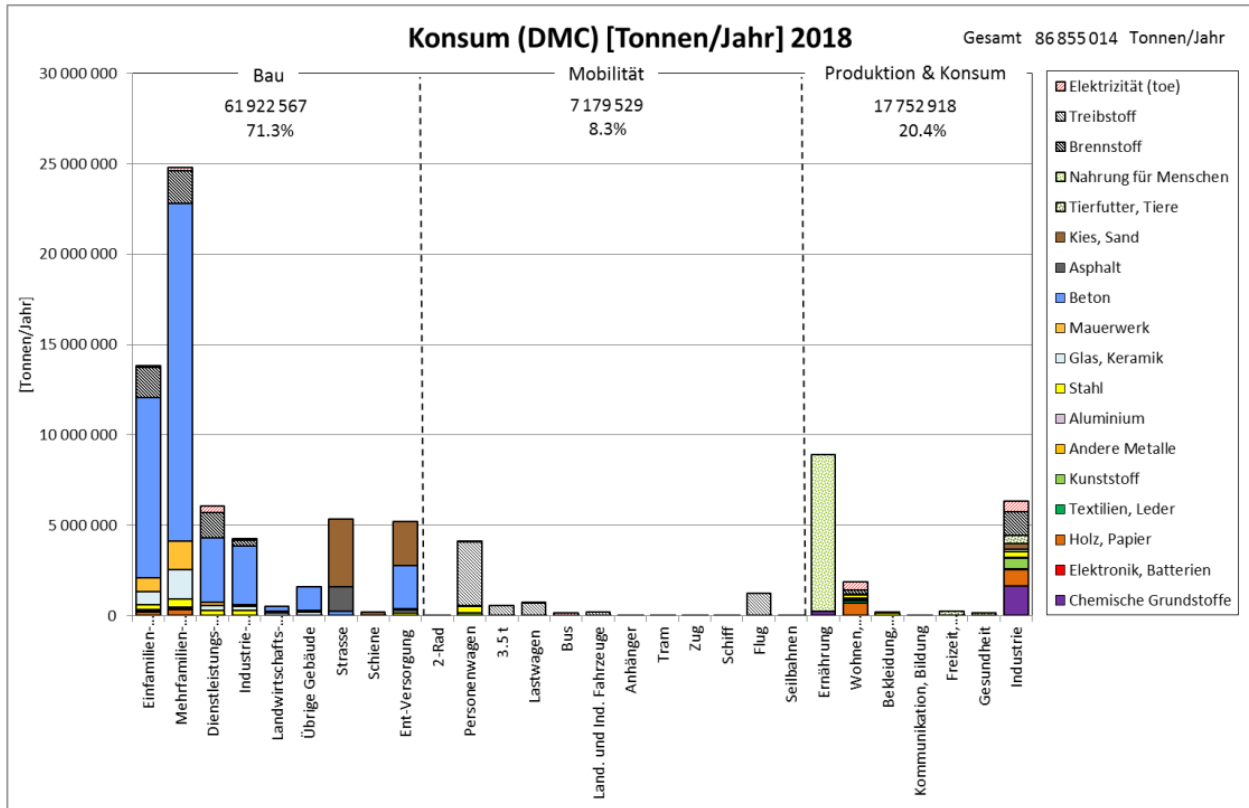
Das Emissionshandelssystem dient zur Reduzierung des Ausstoßes der emissionsstärksten Industrieanlagen. Es werden Teilnehmern Emissionsrechte zum Teil gratis zugeteilt oder sie werden versteigert. Die Emissionen der Teilnehmer müssen jedes Jahr durch Emissionsrechte gedeckt werden. Dazu können die handelbaren Emissionsrechte für die Deckung der selbst erzeugten Emissionen verwendet werden oder überschüssige an andere Teilnehmer verkauft werden. Jährlich wird die Obergrenze der im System verfügbaren Emissionsrechte reduziert. Durch das Emissionshandelssystem werden viele, im Bau verwendete, CO₂-emissionsreiche Güter wie zum Beispiel Stahl, Zement, Aluminium oder Kunststoffe, teurer (KBOB et al., 2023). Damit wird der nachhaltige Umgang mit den Gütern für die am Bau Beteiligten wirtschaftlich umso relevanter (BAFU, 2020; European Council, o. J.).

Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt der Europäischen Union zur Reduktion an dieser Stelle ist die Verstärkung der Kreislauffähigkeit und die Kreislaufwirtschaft von Gütern wie Textilien und elektronischen Bauteilen, aber auch die Einbindung von Baumaterialien durch Recycling und Wiederverwendung (European Council, o. J.).

Die langfristige Umweltstrategie in der Schweiz verfolgt ebenfalls die Stärkung der Kreislaufwirtschaft und die Schonung der natürlichen Ressourcen. Die Emissionen der gesamten Wertschöpfungskette sollen reduziert werden. Dazu werden die Materialien länger und wiederverwendet; außerdem soll die Menge der verwendeten Materialien reduziert sowie durch emissionsärmere Alternativen ausgetauscht werden. (Der Bundesrat, 2021).

Der Bausektor machte, wie in Abbildung 1 durch EMPA (2019) dargestellt, mit einem Anteil von 71,3% im Jahr 2018 einen großen Anteil des gesamten, in der Schweiz konsumierten Materials nach Gewicht aus (EMPA, 2019, S. 6). Der Anteil von 71,3% des konsumierten Materials, war allerdings nur für 28,3% des durch den Konsum von Materialien verursachten Treibhauseffekts verantwortlich. Dennoch besteht im Bausektor ein enormes Potential zur Verstärkung der Kreislaufwirtschaft und der vermehrten Weiterverwendung von Materialien.

Abbildung 1: Übersicht des inländischen Konsums an Materialien und Energie in der Schweiz



Quelle: EMPA (2019)

Im Grundsatz 6 wird vom Bund und von den Kantonen eine auf die Erreichung der Klimaziele angesetzte Planung der Infrastruktur gefordert. Besonders relevant sind hier die raum- und verkehrsplanerischen Bereiche sowie auch die Siedlungsentwicklung und die Energieplanung. Aufgrund der Verwendung von emissionsintensiver Baumaterialien und der Betreibung durch fossile Energien werden hier über lange Zeit Emissionen verursacht (Der Bundesrat, 2021).

Ein konkretes Beispiel für die Berücksichtigung der Klimaziele im Bereich der Raum- und Verkehrsplanung liefert die Ausschreibung des Tiefbauamts des Kantons Zürich für den 4-Spurausbau Hardwald zwischen der Stadt Bülach und der Gemeinde Glattfelden. Mit Hilfe einer von der UTech AG erstellten Umweltmatrix wurden die Kriterien Nachhaltigkeit und Ökologie zu knapp 20% als Zuschlagskriterien berücksichtigt. In der Umweltmatrix werden die angebotenen Baumaßnahmen sowie die einzusetzenden Baumaterialien ökologisch nach der „Methode der Umweltbelastungspunkte“ (Umtec Technologie AG, o. J.,

S. 6) gewichtet. Die Umweltbelastungspunkte, welche aus dem Prinzip der ökologischen Knappheit hervorgehen, bieten eine Einheit zur Gewichtung und Bewertung sämtlicher Umwelteinwirkungen nach den politischen Zielen der Schweiz. Dabei werden verschiedenste Umweltbelastungen wie beispielsweise der Ressourcenverbrauch, Landnutzung, Energie etc. berücksichtigt (*Umtec Technologie AG*, o. J.).

Abbildung 2 stellt einen Ausschnitt der Umweltmatrix, erstellt von der Umtec Technologie AG (o. J.), dar. In die Tabellenabschnitte der Matrix werden die jeweiligen Materialien, welche durch das Bauunternehmen verbaut werden, eingetragen und mit einem Wert in UBP pro Einheit mit der benötigten Menge multipliziert. Alle UBP ergeben eine Gesamtsumme, welche die Menge der Umwelteinwirkungen der gewählten Baumaterialien und Verfahren quantifiziert. Mit der Summe der UBP können so die anbietenden Firmen in der Angebotsphase direkt miteinander verglichen werden (*Umtec Technologie AG*, o. J.).

Nach Aussagen der Umtec Technologie AG werden solche Bewertungskriterien in Ausschreibungen von öffentlichen Auftraggebern zukünftig vermehrt vorkommen. So wurden zwei weitere Umweltmatrizen für Infrastrukturbauprojekte in der Schweiz angefragt. Auch in Deutschland lässt die „Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr“ bei der Ausschreibung zur Baumaßnahme B3/Südschnellweg Hannover ökologische Auswirkungen durch eine Umweltmatrix bewerten (Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, o. J.).

Durch die ökologische Bewertung der Bauleistungen und der zu verwendenden Materialien ist es für Bauunternehmen zukünftig unumgänglich, ökologisch nachhaltiger zu bauen, um weiterhin wettbewerbsfähig zu sein. So werden Themen der Kreislaufwirtschaft beispielsweise Recycling und Wiederverwendung von Baumaterialien immer relevanter. Jedoch sind trotz einer positiven Gewichtung zusätzliche Aufwände der Unternehmen ebenfalls ökologisch als auch ökonomisch zu beurteilen.

2.4 Herausforderungen der Wieder- und Weiterverwendung

Im Zusammenhang mit der Wieder- und Weiterverwendung gebrauchter Baumaterialien, dem Reuse, sowie der damit verbundenen Leistungen wie dem Rückbau von Bauwerken, stehen einige Herausforderungen, welche die Möglichkeiten zur Wiederverwendung einschränken. Im Folgenden werden diese Barrieren gemäß der Aufteilung aus der systematischen Übersichtsarbeit „*Components reuse in the building sector – A systematic review*“ aufgeführt (Rakhshan et al., 2020). Es erfolgt die Einteilung nach Barrieren wirtschaftlicher-, technischer-, sozialer-, rechtlicher-, organisatorischer- und ökologischer Art.

Die ökonomischen Herausforderungen entstehen im Wesentlichen aus den höheren Anforderungen an die Qualität und den Zustand der wiederzuverwendenden Baumaterialien im Vergleich zu den Materialien, welche stofflich verwertet oder entsorgt werden. Die höheren Anforderungen wirken sich häufig in Form einer aufwändigeren Handhabung aus. Dementsprechend kann es sogar dazu führen, dass die Materialien koordiniert rückgebaut werden müssen. Das erzeugt einen Mehraufwand und damit einhergehend höhere

Lohnkosten gegenüber destruktiven Verwertungsmaßnahmen (Dantata et al., 2005; Rakhshan et al., 2020).

Das Verhältnis zwischen Lohn und Materialkosten ist ein entscheidender Faktor. Noch vor der industriellen Revolution standen Material- und Lohnkosten in einem anderen Verhältnis, was die Wiederverwendung gebrauchter Baumaterialien begünstigte. Durch industrialisierte und neue Produktions- sowie Herstellungsverfahren und auch dem revolutionierten globalen Gütertransport, sind vor allem die Produktions- und Materialkosten gesunken (Küpfer & Fivet, 2021, S. 78). In der Studie „*A discussion on the reuse of building components in brazil: An analysis of major social, economical and legal factors*“ zeigen die Autoren, dass in Brasilien durch niedrige Lohnkosten und aufgrund der hohen Nachfrage nach Rückbaumaterial der Rückbau kostengünstiger ist als der Abbruch. Ein weiterer Kostentreiber für gebrauchte Materialien sind Schadstoffanalysen und Laboruntersuchungen der Materialien, sowie deren Prüfung auf erneute Einsetzbarkeit (John & Stark, 2021). Auch die Transportkosten und zusätzliche Lagerkosten, die mit dem Reuse in Verbindung stehen sind Faktoren, die wirtschaftliche Herausforderungen darstellen können (da Rocha & Sattler, 2009; John & Stark, 2021). Der Rückbau und der Reuse benötigt mehr Zeit im Bauablauf, was durch den Artikel „*An analysis of cost and duration for deconstruction and demolition of residential buildings in Massachusetts*“ erarbeitet wurde. Der Artikel zeigt eine durchschnittliche Steigerung der Arbeitsdauer beim Rückbau eines 1000 bis 2000m² großen Wohngebäudes um das 3- bis 5-fache der Zeit im Vergleich zum herkömmlichen Abbruch (Dantata et al., 2005). Es ist anzunehmen, dass es im Tief- und Infrastrukturbau zu ähnlichen Mehraufwänden kommt. Längere Zeitdauern können Schwierigkeiten in engen Projektzeiträumen verursachen und können damit zum ausschlaggebenden Kriterium werden, ob ein Rückbau anstelle eines Abbruchs möglich ist (Dantata et al., 2005).

Eine wesentliche Herausforderung stellt auch der nicht ausreichend große Markt zum Verkauf gebrauchter Materialien dar. Da kein konstantes Angebot an gebrauchten Baumaterialien mit benötigten Eigenschaften vorhanden ist und der Informationsaustausch von Angebot und Nachfrage nur schwer stattfinden kann, müssen Unternehmen die Materialien gezwungenermaßen und trotz ihrer hohen Qualität oft an Entsorgungs- und Recyclingfirmen verkaufen (Rose & Stegemann, 2018).

Die Herausforderungen technischer Art beziehen sich hauptsächlich auf den Zustand gebrauchter Baumaterialien. Nur selten entspricht dieser der Qualität neuer Materialien, da während der Nutzung oder durch frühere Bearbeitung die Materialien verändert oder beschädigt wurden. Ursache hierfür können aber auch Beschädigungen durch den Rückbauprozess, die darauffolgende Lagerung und den Transport sein. Durch eine Anpassung nach der Produktion der wiederzuverwendenden Materialien können Fehlstellen wie Löcher oder Schwächungen durch Überbelastung im Produkt verbleiben. Umwelteinwirkungen können, sowohl im eingebauten wie auch im ausgebauten Zustand, je nach Material beispielsweise Rost und Verschmutzungen mit sich bringen und somit die Wahrscheinlichkeit zum Wiedereinsatz mindern oder den Aufwand zum Wiedereinsatz erhöhen (Tatiya et al., 2018; Yeung et al., 2015). Bei der Wiederverwendung von Baumaterialien sollte, wenn keine exakten Daten oder Informationen vorliegen und somit die tatsächliche Tragfähigkeit einzelner Komponenten nicht klar definiert ist, von einer geringeren Belastbarkeit zur Gewährleistung der Sicherheit ausgegangen werden (Rose & Stegemann, 2018; Tatiya et al., 2018).

Die technischen Eigenschaften von gebrauchten Baumaterialien sind generell schwieriger oder nur durch einen gewissen Mehraufwand zu beurteilen, was immer wieder zu Akzeptanzproblemen der Interessensgruppen führt. Eine negative Einstellung der beteiligten Akteure gegenüber dem Reuse stellt eine bedeutende Herausforderung auf sozialer Ebene dar. Ein Grund für Vorurteile gegenüber dem Einsatz gebrauchter Baumaterialien kann ein abgenutztes Erscheinungsbild der Materialien sein. Diese werden hierdurch als qualitativ schlechter empfunden. Das Vertrauen zur Wiederverwendung verringert sich und kann sogar als Risiko wahrgenommen werden (Dunant et al., 2017; John & Stark, 2021; Rose & Stegemann, 2018). Alle Projektbeteiligten müssen mit der Nutzung gebrauchter Baumaterialien einverstanden sein, damit eine reibungslose Wiederverwendung stattfinden kann. Der Auftraggeber ist hierbei ausschlaggebend, da dieser nicht wie andere Projektbeteiligte, welche nicht mit der Wiederverwendung einverstanden sind, umgangen oder ausgetauscht werden kann (Rose & Stegemann, 2018). Durch konkrete Aufklärungsmaßnahmen über die ökologischen und ökonomischen Vorteile, die der Reuse mit sich bringt, können Skeptiker jedoch von der Wieder- und Weiterverwendung gebrauchter Baumaterialien überzeugt werden (Chileshe et al., 2016; Rose & Stegemann, 2018).

Die fehlende rechtliche Basis für den Reuse stellt eine große Hürde dar. Aktuell gibt es kaum gesetzliche Grundlagen, die einen erneuten Einsatz von gebrauchten Baumaterialien unterstützen. Eher im Gegenteil verlieren Bauteile nach dem Ausbau ihre bauaufsichtliche Zulassung, welche vor dem Wiedereinsatz wieder neu erteilt werden muss. Die benötigte Einzelzulassung verringert somit deutlich die Wettbewerbsfähigkeit der wiederzuverwendenden Produkte (John & Stark, 2021). Probleme stellen aber auch fehlende Produktgarantien dar. Es gibt nichts, was die Haftung oder die Gewährleistung regelt, was den Einsatz von gebrauchten Baumaterialien außerhalb von privaten Bereichen deutlich verkompliziert. Unsicherheiten bezüglich der Qualität könnten durch Zertifikate und einheitliche Prüfmethode beseitigt werden. Für die Klarstellung der Verantwortung und die Absicherung der Beteiligten bedarf es neuer Gesetze oder angepasster Normen, welche die Wiederverwendung erleichtern (de Perrot & Friat-Massard, 2020; John & Stark, 2021). So wird beispielsweise über die Ersatzbaustoffverordnung die Nutzung mineralischer Ersatzbaustoffe von der Herstellung über die Untersuchung bis hin zum Einbau geregelt (*Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV)*, 2023).

Organisatorische Herausforderungen werden durch bestehende und fest etablierte Strukturen erzeugt. In der Baubranche bestehen häufig langjährige Geschäftsbeziehungen, die sich von der Rohstoffquelle, der Gewinnung von Rohstoffen über ihre Verarbeitung und der Produktion neuer Baumaterialien einschließlich der Vermarktung erstrecken (*Jahrbuch Logistik. 2017*, 2017).

Die Verankerung von Gewohnheiten führt auch zur weiteren Nutzung von Verbundwerkstoffen, welche nur für den einmaligen Gebrauch gemacht sind und nur sehr selten wiederverwendet werden können (Küpfer & Fivet, 2021). Zudem gibt es wenige Firmen mit entsprechender Erfahrung im Rückbau sowie der Nutzung gebrauchter Baumaterialien bei baulichen Maßnahmen. Dementsprechend können Firmen hier auch noch nicht so effizient arbeiten, wie in gewohnten Bereichen mit mehr Erfahrung (Küpfer & Fivet, 2021). Das lineare Wirtschaftsmodell stellt für die Etablierung des Rückbaus und der Weiterverwendung der Baumaterialien ebenfalls eine Hürde dar. Durch Überdenken des aktuellen Eigentumssystems und einer Änderung der Besitz- und Verantwortungsverhältnisse könnte bei Lieferunternehmern ein größeres Interesse geweckt werden, eine rückbaubare Konstruktion zu entwerfen sowie Bauteile nach der Nutzung zurückzunehmen und weiter

zu verwenden (Küpfer & Fivet, 2021). Die Unklarheit über die spätere Nutzung erschwert ebenfalls eine frühzeitige Planung. Benötigte Lagerplätze und die damit zusammenhängenden Kosten, aber auch die Vernetzung der Materiallager und die Transparenz über vorhandene Materialien auf den Lagerplätzen können eine Herausforderung für die Weiternutzung, aber auch ein Kostentreiber für die gebrauchten Baumaterialien darstellen (de Perrot & Friat-Massard, 2020; Dunant et al., 2017; Rose & Stegemann, 2018). Für die Wieder- und Weiterverwendung von gebrauchten Materialien benötigt es eine enge Zusammenarbeit zwischen Abbruch- und Bauunternehmen, um einen Informationsfluss bezüglich verfügbarer und benötigter Materialien gewährleisten zu können. Planer, Recyclingunternehmen, Investoren, potenzielle Kunden aber auch Ausbildungs- und Forschungszentren spielen beim Reuse eine zentrale Rolle. Eine erfolgreiche Wiederverwendung ist von der Mitarbeit, Akzeptanz und Aufklärung der zuvor genannten Hauptakteure abhängig (Dunant et al., 2017; Küpfer & Fivet, 2021).

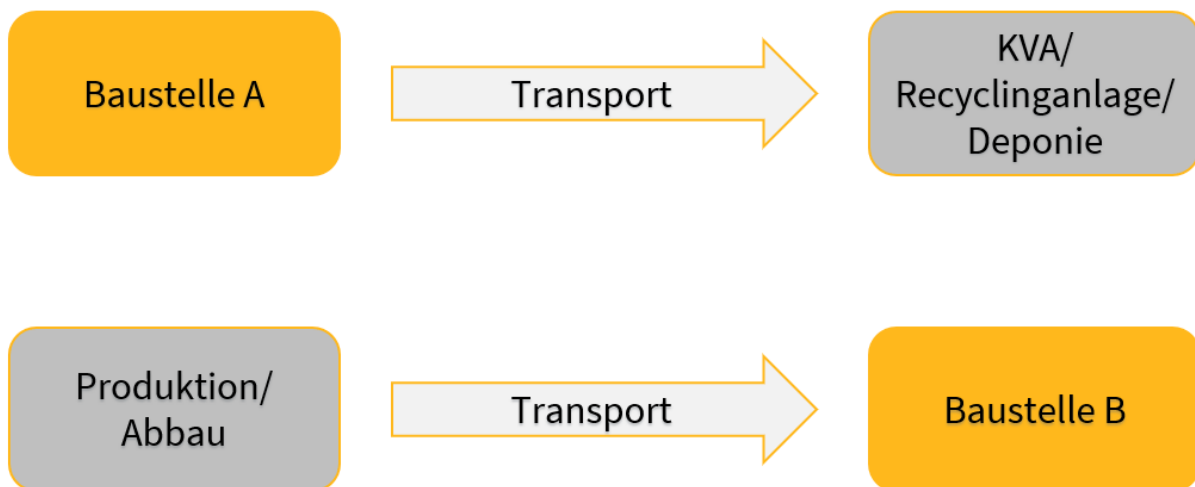
Da das Ziel des Reuses die Reduzierung der Umwelteinwirkungen ist, sind die treibhausgas erzeugenden Maßnahmen im Zusammenhang mit der Bereitstellung der Baumaterialien zu berücksichtigen. Die Bereitstellungsmaßnahmen dürfen für einen positiven ökologischen Gesamtnutzen der Weiterverwendung nicht mehr Umwelteinwirkungen verursachen, als durch die Weiternutzung eingespart werden können (Klang et al., 2003).

2.5 Vorstellung der betrachteten Fälle

Für die folgende detailliertere Betrachtung der Wieder- und Weiterverwendung gebrauchter Baumaterialien wird eine Situation betrachtet, die in zwei definierten Fällen ablaufen kann. Die Fälle werden auf ökonomischer und ökologischer Ebene miteinander verglichen. Im Anschluss kommt es zur gesamtheitlichen Betrachtung der Wieder- und Weiterverwendung unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem ökologischen und ökonomischen Vergleich.

Bei der betrachteten Situation ist auf einer Baustelle, welche als Baustelle A bezeichnet wird, Baumaterial vorhanden, welches seine Funktion noch erfüllen oder weiterhin genutzt werden kann, allerdings nicht mehr benötigt wird und aufgrund von Platzmangel von der Baustelle abtransportiert werden muss. Gründe für das übrige Baumaterial könnten bspw. Rückbau bestehender oder Hilfskonstruktionen, Bestelländerungen oder die Bauarbeiten selbst sein. Auf die Gründe wird jedoch nicht im Detail eingegangen. Auf einer anderen Baustelle, hier Baustelle B genannt, wird Baumaterial benötigt, welches auf Baustelle A übrigbleibt oder dessen Eigenschaften entspricht.

Abbildung 3: Fall 1 Entsorgung und Neubeschaffung



Quellen: Eigene Darstellung

In Abbildung 3 ist Fall 1 der Entsorgung und Neubeschaffung dargestellt. Wie der Name sagt, wird hier das übrige Baumaterial von Baustelle A entsorgt, da vor Ort kein Bedarf mehr besteht und eine Einlagerung wegen geringer Kapazitäten oder aus wirtschaftlichen Gründen keine Option darstellt. Die genaue Betrachtung des Prozesses startet mit dem Anfallen des nicht mehr benötigten Materials auf der Baustelle. Für den Abtransport der Materialien wird ein Transport- oder Entsorgungsunternehmen beauftragt. Je nach Material kommt es zur Deponierung oder zur stofflichen oder energetischen Verwertung. Welche Bestandteile dieses Prozesses im Detail in die jeweiligen Vergleiche einfließen, wird in den entsprechenden Abschnitten erarbeitet.

Auf Baustelle B, auf der Bedarf nach dem betrachteten Baumaterial besteht, startet die Neubeschaffung mit dem Kauf bzw. der Bestellung des neuen Materials bei einem entsprechenden Händler. Die neuen Materialien werden auf Baustelle B gebracht, auf der sie verbaut oder genutzt werden. Auch die ökologischen sowie ökonomischen Bestandteile der Neubeschaffung werden in den entsprechenden Abschnitten detailliert aufgeführt.

Abbildung 4: Fall 2 Wieder- und Weiterverwendung



Quelle: Eigene Darstellung

Auf Abbildung 4 ist Fall 2 der Wieder- und Weiterverwendung von gebrauchten und/oder übrigen Baumaterialien visualisiert. Das Baumaterial, welches auf Baustelle A übrig bleibt, wird in diesem Fall direkt auf Baustelle B transportiert, welche das Material benötigt. Voraussetzung für die direkte Weiterverwendung der Materialien ist die zeitliche Übereinstimmung des Vorhandenseins des übrigen Materials auf Baustelle A und des Bedarfs auf Baustelle B. Eine Zwischenlagerung auf einer der beiden Baustellen ist jedoch auch

möglich. Die Voraussetzungen werden jedoch nicht weiter erläutert und als gegeben angenommen.

Ein erneuter Einsatz von gebrauchten Baumaterialien ist nur sinnvoll, wenn er Vorteile ökonomischer und ökologischer Art mit sich bringt. Aus diesem Grund werden die Kosten und Umwelteinwirkungen der genannten Fälle erarbeitet und miteinander verglichen.

2.6 Theoretische Grundlagen zur Nachhaltigkeitsbewertung

Um die Wieder- und Weiterverwendung mit der Entsorgung und Neubeschaffung ökologisch zu vergleichen, werden die potenziellen Umwelteinwirkungen durch die einzelnen Bestandteile der Prozesse der Fälle 1 und 2 im Vergleich betrachtet.

„*Quantitative Methoden zur Beurteilung der Umwelteinwirkungen*“ (Dinkel, 2013, S. 12) werden als Ökobilanzen bezeichnet. Der Begriff der Ökobilanz oder auch Lebenszyklusanalyse (LCA) beinhaltet „*methodische Hilfsmittel des umweltorientierten Handelns*“ (Dinkel, 2013, S. 12). Darunter wird beispielsweise die Erfassung des In- und Outputs von Stoff- und Energieströmen sowie der Ressourcenbedarf und andere Umwelteinwirkungen verstanden. Unter dem Begriff der Umwelteinwirkungen werden Ressourcennutzungen und verschiedene Emissionen zusammengefasst (BAFU, 2021). Die Einflüsse werden über den gesamten Lebenszyklus erfasst und nach ökologischen Kriterien bewertet. Nach der Norm DIN EN ISO 14040/44 besteht eine Ökobilanz aus vier Phasen: Zuerst wird das Ziel und der Untersuchungsrahmen der durchzuführenden Ökobilanz festgelegt. Darauf folgt die Sachbilanz darüber, was die „für das Produktsystem relevanten Input- und Outputströme [quantifiziert]. Dabei werden Ströme von Roh- und Betriebsstoffen, Energie, Produkte, Abfälle, Emissionen, Einleitungen in Wasser und Bodenverunreinigung ermittelt und quantifiziert“ (VDI, 2023). Anschließend kommt es zur Wirkungsabschätzung, bei der die Wirkungskategorien nach ihrer Relevanz bewertet werden. Zum Schluss werden die Ergebnisse aus Sachbilanz und Wirkungsabschätzung zusammengeführt, interpretiert und ausgewertet (BAFU, 2021).

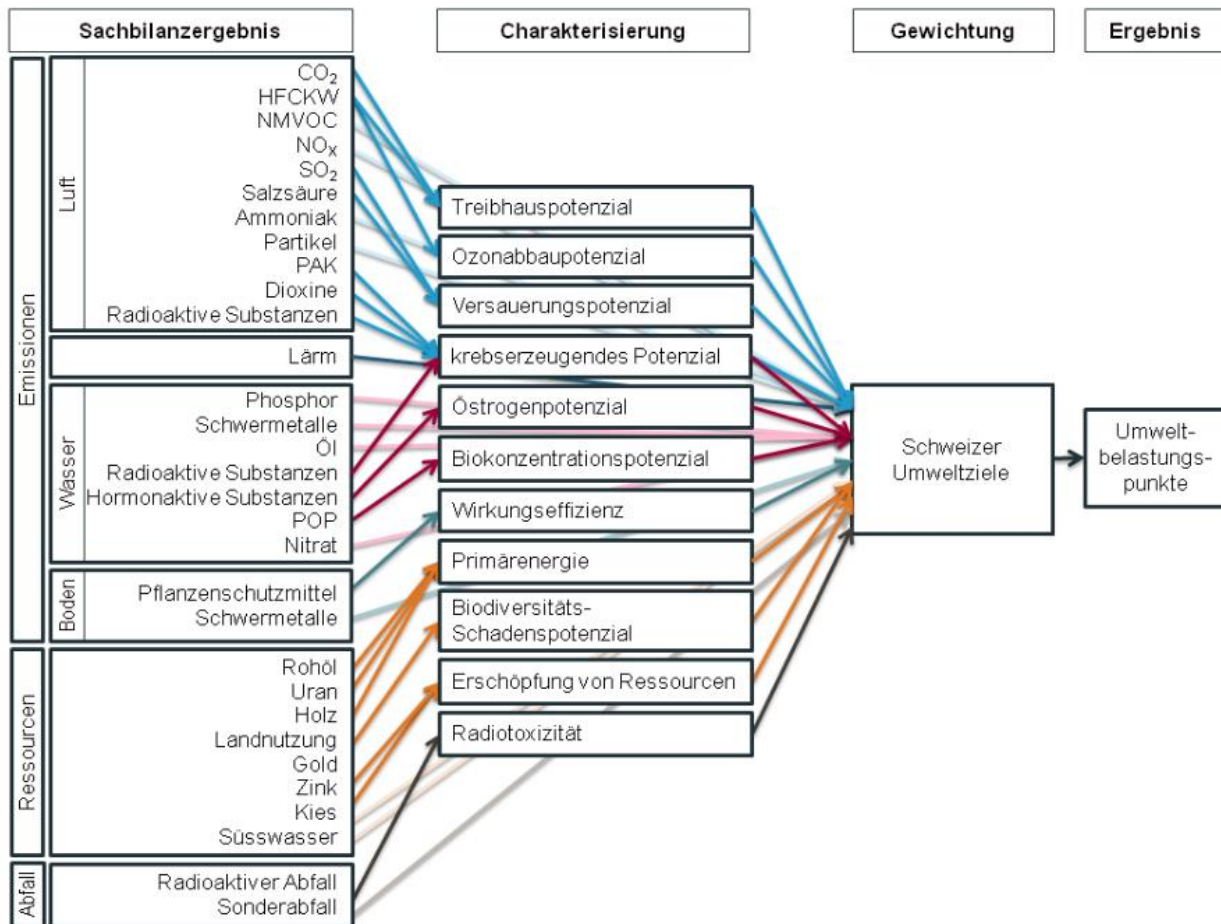
Der ökologische Vergleich der Fälle findet durch eine Ökobilanz statt. Das Ziel hierbei ist es, die Umwelteinwirkungen der Fälle zu quantifizieren, vergleichbar zu machen und eine

Entscheidungsempfehlung geben zu können. Der Untersuchungsrahmen wird durch die Definition der beiden Fälle in Kapitel 2.5 und durch die Definition der betrachteten Bestandteile, wie bspw. der Transportwege, in Kapitel 3 festgelegt. Für die Sachbilanzen und deren Wirkungsabschätzung werden die Prozesse und Produkte durch die Methode der ökologischen Knappheit sowie durch Umrechnung der erzeugten Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalente quantifiziert.

Die Methode der ökologischen Knappheit, oft auch UBP-Methode genannt, ist „nach Ansicht des BAFU [...] eine Referenzmethode für Ökobilanzen, welche die Schweiz betreffen“ (BAFU, 2021, S. 39). Aus diesem Grund sollten Studien, die in einem Bezug zur Schweiz stehen, die Bewertungen mit dieser Methode durchführen.

Nach der von Udo de Haes entwickelten „Distance-to-Target“-Methode zur Wirkungsabschätzung werden dabei die Sachbilanzen durch ein Verhältnis der aktuellen Situation zur tolerierbaren Zielmenge bewertet. Die Ökofaktoren sämtlicher Umwelteinflüsse werden in der Einheit UBP pro Mengeneinheit angegeben und nach den Zielen der schweizerischen Umweltpolitik gewichtet. Vereinzelt werden auch andere globale und internationale Ziele berücksichtigt und auf die schweizerischen Ziele projiziert. Es ist aber auch möglich, die Methode auf weitere Länder und Regionen anzuwenden. Hierzu werden lediglich die Informationen der aktuellen Belastungssituation und die Umweltziele des Landes oder der Region benötigt. Durch die einheitliche Darstellung in den Umweltbelastungspunkten werden verschiedenste Umwelteinflüsse auf eine gemeinsame Einheit gebracht und können miteinander verglichen werden (BAFU, 2021). Die folgende Abbildung 5 nach BAFU (o. J.) zeigt die in der Methode der ökologischen Knappheit berücksichtigten Ökofaktoren mit der Unterteilung der Sachbilanzergebnisse, Charakterisierung, Gewichtung und dem Ergebnis der Umweltbelastungspunkte (BAFU, o. J.).

Abbildung 5: Ökofaktoren der Methode der ökologischen Knappheit



Quelle: BAFU (o. J.)

Der ökologische Vergleich der Weiternutzung gebrauchter und übriger Baumaterialien mit der Entsorgung und Neubeschaffung bezieht sich auf Situationen in der Schweiz und findet deshalb in dieser Arbeit mit der Methode der ökologischen Knappheit statt. Ein weiterer Grund ist die Berücksichtigung vieler unterschiedlicher Umwelteinwirkungen und die gute Vergleichbarkeit durch die gemeinsame Einheit der UBP.

Die Methode UBP kann auf andere Länder angewendet werden, ist aktuell jedoch nicht so verbreitet wie die Bewertung der Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen), welche durch ein Produkt oder einen Prozess ausgestoßen werden. Die THG-Emissionen aller Industriestaaten werden im Rahmen des Übereinkommens von Paris und der

Klimarahmenkonvention (UNFCCC) nach einheitlichen Vorgaben berechnet. Durch Expertengremien wird die Richtlinien Einhaltung überprüft (BAFU, 2023a). Das lässt eine vereinheitlichte Darstellung durch eine vergleichbare Einheit in CO₂-Äquivalenten (CO₂-äq) zu.

Als Datengrundlage für Berechnungen der Umwelteinflüsse werden die Ökobilanzdaten der KBOB/ecobau-Liste hinzugezogen. Diese Daten entstammen der Version V4.0 der Ökobilanzdaten im Baubereich vom Stand 07.11.2023 und beinhalten Ökobilanzdaten zu Baumaterialien, Transporten, Entsorgungsprozessen, Energiebereitstellung und Gebäudetechnik aus dem Baubereich. Für die Berechnungen werden die Daten für Materialien, Transporte und Entsorgung in UBP sowie auch die THG-Emissionsdaten in CO₂-äq der Liste der öffentlichen Bauherren KBOB entnommen (KBOB et al., 2023).

Die in der KBOB/ecobau-Liste vorliegenden Daten für die THG-Emissionen beinhalten „*die Emissionen der gesamten Versorgungskette*“ (KBOB, o. J.) nach Scope 1-3. Scope 1 umfasst direkte Emissionen, welche aus Quellen der Organisation oder unter ihrer Kontrolle stehender entstammen. Zu Scope 2 gehören Emissionen aus der Energieerzeugung oder der konsumierten Energie. Scope 3 deckt alle Emissionen ab, welche außerhalb der Organisation entstehen und nicht durch Scope 2 abgedeckt sind (Global Sustainability Standards Board, 2023).

Eine Bewertung und Interpretation der berechneten Daten und der Bezug zu dem ökonomischen Vergleich erfolgen in den Kapiteln 5 und 6.

3. Analyse der Fälle im Vergleich

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Bestandteile des Vergleichs der Fälle, welche in Kapitel 2.5 vorgestellt wurden, genauer betrachtet. Dazu werden die Materialien, der Transport und die Entsorgung genauer analysiert.

3.1 Materialien

Die folgende Vorstellung beschränkt sich auf gebrauchte und übrige Baumaterialien, die häufig auf Baustellen des Tief- und Infrastrukturbaus anfallen. Um möglichst realistische Ergebnisse zu erreichen, werden durch die zuvor definierten Fälle und die Vernachlässigung von Rückbauaufwänden Materialien gewählt, die auf der Baustelle übriggeblieben sind oder keinen großen zusätzlichen Rückbauaufwand benötigen. Dabei kann es sich auch um Materialien handeln, welche nur temporär für den Konstruktionsprozess verbaut wurden und für die Fertigstellung des Bauwerks zurückgebaut werden müssen. Hierunter fallen beispielsweise Kunststoffrohre, welche zum Abpumpen von auf der Baustelle anfallendem Wasser genutzt wurden oder Stahlprofile, die als Träger in einer Hilfskonstruktion wie z.B. einer Baugrubenwand verbaut waren. Durch den Ausbau von Baumaterialien wird für den erneuten Einbau eine neue bauaufsichtliche Zulassung benötigt (John & Stark, 2021). Wenn die gebrauchten Materialien nur während der Konstruktionsphase im Bauwerk genutzt werden, muss das bauausführende Unternehmen aufgrund nicht vorhandener Herstellergarantie keine zusätzlichen Risiken für die Gewährleistung am fertiggestellten Bauwerk auf sich nehmen. Generell ist allerdings eine technische Beurteilung der Materialien wichtig, damit diese bei erneutem Einsatz kein zusätzliches Risiko erzeugen.

Aufbereitungsaufwände von gebrauchten Baumaterialien können ebenfalls nur schwer bestimmt werden. Deshalb werden Materialien betrachtet, die möglichst direkt und ohne Aufbereitung wiederverwendet werden können.

Für einen ökologischen sowie ökonomischen Vergleich der Entsorgung und Neubeschaffung mit der Wieder- und Weiterverwendung wurden die folgenden Materialien gewählt:

Die betrachtete Materialgruppe der Stahlprodukte, beinhaltet Stahlprofile und Armierungsstahl. Unter die Materialgruppe der Kunststoffrohre werden Rohre aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC), welche im Tief- und Ingenieurbau zum Einsatz kommen, begutachtet. Auch die Weiterverwendung von kiesigem Aushubmaterial wird genauer beleuchtet. Das Aushubmaterial, was infolge eines Baugrubenaushubs anfällt, für das zum Zeitpunkt des Anfallens auf der Baustelle jedoch keine geeignete Verwertungsmöglichkeit besteht, wird auf einer Deponie von Typ A entsorgt. Auf einer Deponie des Typs A dürfen nur Abfälle, welche in der Abfallverordnung (VVEA, SR 814.600) aufgeführt sind, abgelagert werden. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Aushub- und Ausbruchmaterialien, „bei denen Verdacht auf Verschmutzung ausgeschlossen werden kann“ (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2022). Betrachtet wird kiesiges Erdmaterial, welches ohne Aufbereitung für Hinterfüllungen, zum Erstellen von Baustraßen oder Sonstigem direkt weiterverwendet werden kann.

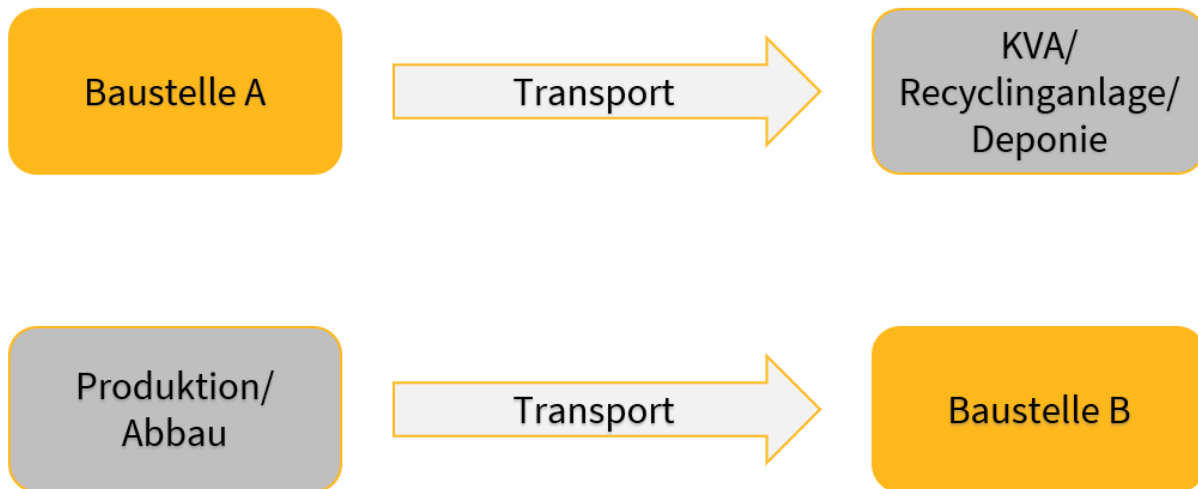
Die Baumaterialien aus Stahl werden mit dem Restwert des aktuellen Marktpreises für Schrott beziffert, wie ebenfalls in Kapitel 3.3 genauer aufgeführt wird. Für den Neuwert des Stahls wurden [REDACTED] ein Preis für Stahlprofilen mit 1500 CHF/t und für Betonstahl mit 800 CHF/t angenommen.

Bei den Kunststoffrohren, welche auf der Baustelle übrig sind, werden mögliche Restwerte vernachlässigt und Entsorgungskosten unter Kapitel 3.3 aufgeführt. Die Neukosten werden den Preislisten von Herstellern oder Händlern entnommen.

Für das auf der Baustelle anfallende Aushubmaterial wird ebenfalls kein Restwert, sondern Entsorgungskosten nach durchschnittlichen Deponiekosten (siehe Kapitel 3.3) angesetzt. Für den Vergleich wird der Neuwert für den mit kiesigem Aushub vergleichbaren Wandkies angesetzt. Die Kosten für den Wandkies wurden durch die Auswertung von Preislisten schweizerischer Kiesgruben aus dem Jahr 2023 ermittelt, wie im Anhang 2 ersichtlich ist. Für den durchschnittlichen Wert wurde der Preis von 16,41 CHF/t für die weiteren Berechnungen gewählt.

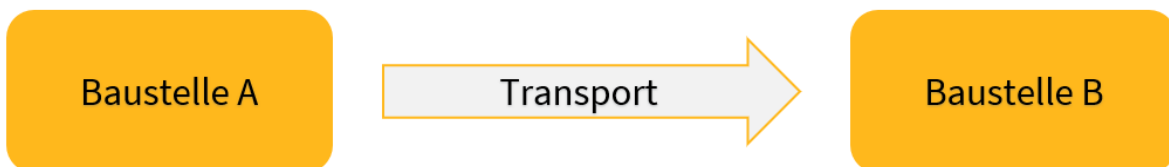
3.2 Transportwege

Abbildung 6: Fall 1 Entsorgung und Neubeschaffung



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 7: Fall 2 Wieder- und Weiterverwendung



Quelle: Eigene Darstellung

Wie in den obigen Abbildungen 6 und 7 ersichtlich, werden für die Analyse der Transportwege die jeweils unterschiedlichen Fälle der Weiterverwendung gebrauchter Materialien und der Entsorgung und Neubeschaffung von Materialien betrachtet.

3.2.1 Fall 1: Entsorgung und Neubeschaffung

Zuerst werden die Transportwege betrachtet, die Baumaterialien bei der Entsorgung zurücklegen. Der Transportprozess der Entsorgung startet am Ort des Ausbaus der

Materialien, also auf der Baustelle. Von hier werden die Materialien von einem entsprechenden Fuhrunternehmen eingesammelt und je nach Material auf einen Sammelplatz oder direkt zum Ort der stofflichen Verwertung, einer Kehrrichtverbrennungsanlage oder Deponie, gebracht. In der Entsorgungsdistanzberechnung wird hier allerdings nur der erste Schritt der Entsorgung berücksichtigt. Bspw. werden Kunststoffrohre auf eine Bausperrgutsortierung gebracht, sortiert und anteilig in eine KVA oder in eine Kunststoffsortierung weitertransportiert. Der Weitertransport ab der Bausperrgutsortierung wird in der Berechnung der Entsorgungswege vernachlässigt, da dieser Transportweg weder in den Kosten noch in den Ökobilanzen gesondert ins Gewicht fällt. Für die ökonomische Betrachtung beinhalten die Entsorgungskosten den Abtransport von der Baustelle mit den Abgabegebühren für das Material auf der ersten Annahmestelle. In den ökologischen Vergleich der Fälle fließen die Emissionen der gesamten Versorgungskette durch die Tabellenwerte der KBOB/ecobau-Liste ein und somit sind auch alle Entsorgungswege ausreichend abgedeckt (KBOB, o. J.).

Zur Berechnung der durchschnittlichen Transportdistanzen wird das Vorgehen gemäß Klingler & Savi (2021) zur Ermittlung der Transportdistanzen aus dem Bericht der „*Harmonisierten Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen*“ angewendet. Die Fläche der Schweiz von 41.000 km² wird durch die Anzahl der entsprechenden Anlagen oder Deponien dividiert und so ergibt sich das durchschnittliche Einzugsgebiet einer Anlage oder Deponie. Für den Luftlinienradius des Einzugsgebietes R muss die Wurzel aus dem Einzugsgebiet A dividiert durch die Zahl Pi gezogen werden, wie in Formel 1 abgebildet ist. Für die Berechnung der durchschnittlichen Transportdistanz über die Straße wird der Mittelwert des Faktors zur Berechnung der Transportdistanz über die Straße aus der Luftlinie gemäß Tabelle 29 (Klingler & Savi, 2021, S. 61) mit 1,48 entnommen. Die Transportdistanz ist das Produkt der Distanz der Luftlinie multipliziert mit dem Mittelwert des Route/Luftlinie-Verhältnisses (abgebildet in Formel 2).

Formel 1:

$$R = \sqrt{\frac{A}{n \cdot \pi}}$$

R = Luftlinienradius

A = Fläche der Schweiz= 41 000 m²

n = Anzahl der Anlagen

Formel 2:

$$D = R * 1.48$$

D = durchschnittliche Transportdistanz

Die Transporte der neuen Materialien auf die Baustelle können je nach Material und Ort der Baustelle stark variieren und werden hier vereinfacht betrachtet. Die Transportkosten für neue Materialien werden bei der Neubeschaffung häufig direkt mit den Materialkosten verrechnet. Welche Kosten jedoch genau berücksichtigt werden, ist im Detail in Kap. 3.3 aufgeführt. Inwiefern die Transportwege von neuen Materialien in den ökologischen Vergleich miteinbezogen werden, ist in Kapitel 5 genauer beschrieben. In den folgenden Abschnitten werden die Entsorgungs- und Transportwege der betrachteten Materialien erläutert.

Stahl

Der Entsorgungsweg von gebrauchten Stahlbauteilen startet auf der Baustelle und wird hier vereinfachend als reiner LKW-Transport betrachtet. Stahl kann fast zu 100% stofflich verwertet werden, allerdings entstehen auch in der Verarbeitung auf Recyclinganlagen Verluste. Verluste können durch Störfractionen in anderen Recyclingprozessen oder durch den unkontrollierten Eintrag in die Umwelt mit anschließender Entsorgung als Wischgut entstehen (Klingler & Savi, 2021). Der Anteil der Verluste wird auf 2% geschätzt und wird, da keine besseren Möglichkeiten vorhanden sind, mit der Entsorgung auf Deponie B bilanziert. In der Schweiz gibt es 130 Deponien des Typs B, was unter Anwendung der Formeln 1 und 2 eine durchschnittliche Transportdistanz von 14 km ergibt. Dieser Wert wurde jedoch wegen ihrer Lage auf 30 km erhöht, da sie sich häufig außerhalb von Agglomerationszonen größerer Städte befinden, wie in Tabelle 32 (Klingler & Savi, 2021, S. 62) ersichtlich. Der Transport der Stahlprodukte zur nächstgelegenen Altmetall-

Recyclinganlage erfolgt durchschnittlich über eine Distanz von 15 km, wie ebenfalls Tabelle 32 zu entnehmen ist (Klingler & Savi, 2021, S. 62). Von einem Zwischentransport zu einer Sammelstelle kann hier abgesehen werden, da davon ausgegangen wird, dass auf der Baustelle eine ausreichende Vorsortierung stattfindet. Auch die betrachteten größeren Mengen des gesammelten Stahls genügen dem direkten Transport ohne Zwischenstopp auf einer Sammelstelle. Zusammenfassend wird von einem zurückgelegten Weg der zu recycelnden Stahlprofile von 15 km für 98% des Stahls zur Recyclinganlage und 30 km für 2% der Menge des entsorgten Reststahls ausgegangen. So ergibt sich unter anteiliger Berücksichtigung der zuvor genannten Entsorgungswege ein Wert von 15,3 km für Stahlprodukte.

Wie im vorherigen Abschnitt angedeutet, ist der Transportweg der Lieferung des Stahls, kostentechnisch durch den Bezug der neuen Materialien abgedeckt. Für die ökologische Bilanzierung der Transportwege, welche neuen Materialien zurücklegen, bevor sie die Baustelle erreichen, sind die entsprechenden Werte aus der Versorgungskette vorhanden; gleiches gilt für die Ökobilanzdaten von Stahlprofilen und Armierungsstählen aus der KBOB/ecobau-Liste (Klingler & Savi, 2021).

Kunststoffrohre

Vom Anteil der Kunststoffrohre, der auf einer Baustelle anfallen wird, gemäß den Angaben aus „*Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen*“ angenommen, dass 10% der gebrauchten Kunststoffrohre direkt in eine KVA gelangen. Aktuell gibt es laut dem Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallbeseitigungsanlagen 29 betriebene KVAs in der Schweiz (VBSA, 2023). Durch die Nutzung der oben aufgestellten Formeln ergibt sich also eine durchschnittliche Transportdistanz zu einer KVA von 31,4 km. Die restlichen 90% gelangen auf eine Bausperrgutsortierung, von welchen es aktuell 164 in der Schweiz gibt (Klingler & Savi, 2021). Für die Berechnung nach Formel 1 und 2 ergibt sich eine durchschnittliche Transportdistanz von 13,2 km. Durch die anteilige Berücksichtigung der genannten Transportdistanzen erhalten wir also einen durchschnittlichen Entsorgungsweg für Kunststoffrohre von 15 km.

Die Transportdistanzen der neuen Rohre lassen sich aufgrund mangelnder Daten ebenfalls schwer ermitteln, zumal auch sehr viele unterschiedliche Rohrtypen und -größen auf

dem Markt verfügbar sind und somit Transportdistanzen für unterschiedliche Typen sehr stark voneinander abweichen können. Wie bereits zuvor beschrieben, sind die Anlieferungswege kostenmäßig ausreichend in den Transportgebühren beim Materialbezug vorhanden. Für den ökologischen Vergleich mit den gebrauchten Materialien genügen die Angaben aus der Versorgungskette, die in der KBOB/ecobau-Liste vorhanden sind (Klingler & Savi, 2021).

Aushub

Zunächst werden die Entsorgungswege des Aushubs auf eine Deponie des Typs A betrachtet. Von den Deponien dieses Typs sind aktuell 149 in der Schweiz vorhanden, was unter Einbeziehung der Formel aus Abschnitt Fall 1 Entsorgung und Neubeschaffung eine durchschnittliche Transportdistanz zwischen einer Baustelle und der nächsten Deponie von 14 km ergibt (Klingler & Savi, 2021).

Als neu gekauftes Erdmaterial, das den Anforderungen von Aushub entspricht wird der sogenannte Wandkies betrachtet. Die Transportdistanz des Materials setzt sich aus der Distanz eines Kieswerkes, in dem das Material abgebaut wird und der Baustelle, auf der das Material benötigt wird, zusammen. In der Schweiz gibt es derzeit 500 Kies- und Betonwerke (FSKB, o. J.). Die schweizerische Unternehmensgruppe Kibag Holding AG betreibt in der Schweiz 14 Kies- und 25 Betonwerke, was einem Verhältnis von ca. 36% von Kies- zu Betonwerken entspricht. Die Holcim Schweiz AG betreibt 16 Kieswerke und 36 Betonwerke, dies entspricht einem Verhältnis von ca. 31% von Kies zu Betonwerken. Für diese Arbeit wurde eine Anzahl von 170 Kieswerken also einem Verhältnis von 34% gegenübergestellt, was etwa dem Mittel beider vorliegender Verhältnisse entspricht. Durch die Berechnung mithilfe der Formeln 1 und 2 ergibt sich eine durchschnittliche Transportdistanz von 13 km vom nächstgelegenen Kieswerk auf eine Baustelle.

3.2.2 Fall 2: Wieder - und Weiterverwendung

Für die Transportwege zur Wiederverwendung der betrachteten Materialien wird vereinfachend angenommen, dass keine Aufbereitung oder sonstige Bearbeitungsschritte zur Weiterverwendung nötig sind. Eine Lagerhaltung der Materialien wird ebenfalls nicht betrachtet. Somit wird lediglich der Transport von der Baustelle, auf der das Material übrig bleibt, bis zur Baustelle, auf der die Weiterverwendung stattfindet, betrachtet. Die zeitliche

Übereinstimmung der Verfügbarkeit auf der einen Baustelle und des Bedarfs auf der nächsten Baustelle ist maßgeblich - es sei denn, auf einer der beteiligten Baustellen könnte das Material durch genügend vorhandenen Platz kurz vor der Weiterverwendung zwischengelagert werden. Eine Zwischenlagerung auf einer Baustelle bedarf allerdings einen zweiten Be- und Entladeschritt, was hier ebenfalls vernachlässigt wird. Bei allen betrachteten Baumaterialien wird einheitlich der direkte Transport zwischen den Baustellen betrachtet, wie in Abbildung 7 dargestellt ist.

Unter den gebrauchten Baumaterialien können auch unbrauchbare Teile vorhanden sein. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass aufgrund mangelnder Passgenauigkeit nicht alle Materialien vollständig wiederverwendet werden können. Dieser Ausschuss kann jedoch nach Zustand und Material stark schwanken und es kann auch eine Aussortierung vor dem Prozess der Wieder- und Weiterverwendung stattfinden, weshalb der Anteil unbrauchbarer Materialien hier vernachlässigt wird.

3.2. Transportarten

Als Transportart wird generell der LKW-Transport betrachtet. Im Straßengüterverkehr im Bereich des Baugewerbes lag der Transport durch inländische schwere Fahrzeuge im Jahr 2022 bei einer Gesamttransportleistung von 578.724.400 tkm. Dies entspricht einem Anteil von knapp 5% der totalen Transportleistung des innerschweizerischen schweren Straßengüterverkehrs (Statistik, 2023). Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass geeignete Baumaschinen oder Geräte zum Beladen der LKWs auf der Baustelle vorhanden sind und zu einer reibungslosen Be- und Entladung der gebrauchten oder übrigen Materialien führen. Die LKW-Transporte werden von Transporteuren durchgeführt, welche je nach Bedarf und Material gewählt werden.

Die Wahl des Transportmittels hängt im Wesentlichen von dem zu befördernden Transportgut ab. Als entscheidende Kriterien gelten dabei die Menge des Materials mit Gesamtgewicht und Volumen, die Anschlagmöglichkeit sowie die Gewichtsverteilung, damit die zulässigen Achslasten nicht überschritten werden (Günthner et al., 2006).

Stahl

Stahlträger oder Stahlprofile werden je nach Abmessung und Gewicht von einem LKW mit geeigneter Größe in der Regel mit offener Pritsche und Bordwänden transportiert. Für die Abwicklung der Transporte der Stahlbauteile können LKWs mit 2-, 3-, 4-, und 5-Achsen genutzt werden. Die Berechnungen durch gemittelte Werte der genannten Größen der LKWs können in Anhang 5 eingesehen werden. Falls auf der Baustelle kein geeignetes Gerät zum Heben des Stahls vorhanden ist, kann ein LKW mit passendem Kran bestellt werden, was allerdings mit Mehrkosten im Vergleich zu einem baugleichen LKW ohne Kran verbunden ist. Für die Betrachtung in der Arbeit wird angenommen, dass geeignete Geräte oder Maschinen zum Be- und Entladen der LKWs auf der Baustelle vorhanden sind und somit kein Ladekran am Transportfahrzeug benötigt wird. Stahl weist eine hohe Dichte von rund 7.850 kg/m³ auf, was dazu führt, dass je nach zu ladenden Bauteilen das Gewicht ein maßgeblicher Faktor ist, wie viel der jeweilige LKW laden kann. Das führt dazu, dass die LKWs ausgelastet werden können und damit wirtschaftlich transportieren. Jedoch müssen die maximalen Bauteilabmessungen, wie in Abbildung 3 ersichtlich, eingehalten werden (Bauforumstahl, o. J.).

Abbildung 8: Zulässige Abmessungen und Gesamtgewichte LKW-Transport

	Straßentransporte ohne besondere Genehmigung				Schwer- und Spezialtransporte	
	Fahrzeuge mit 2 Achsen	Fahrzeuge mit über 2 Achsen	Sattelkraftfahrzeuge	Lastzüge	mit Jahresdauer-genehmigung	mit Einzelfahrt-genehmigung
Länge [m]	12,0	12,0	15,5 ¹⁾	18,0	25,0	> 25,0
Breite [m]	2,5	2,5	2,5	2,5	3,0	> 3,0
Höhe [m]	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	> 4,0
Gesamtgewicht [t]	18,0	25,0	40,0	40,0	40,0 ²⁾	> 40,0

¹⁾nach Euro-Norm 16,50 m

²⁾42,0 t für unteilbare Lasten

Quelle: Bauforumstahl (o. J.)

Kunststoffrohre

Die Auswahl des Transportmittels kann bei den Kunststoffrohren nach den gleichen Kriterien wie bei den Stahlprofilen erfolgen. So werden auch hier die Berechnungen mit Mittelwerten für LKWs mit 2-, 3-, 4-, und 5-Achsen durchgeführt. Kunststoff hat jedoch eine wesentlich geringere Dichte als Stahl und ist somit bei ähnlichen Abmessungen deutlich leichter. Damit werden die Bauteilabmessungen bzw. die Volumina der Bauteile in den meisten Fällen der maßgebende Faktor zur Auswahl des Transportmittels. Je nach

Beladungsdichte kann dies zu Mehraufwänden und damit auch zu Mehrkosten und -emissionen führen. Wie genau der Transport von Materialien mit geringem Gewicht den Transport beeinflusst, ist den jeweiligen Abschnitten der Transportkosten und Umwelteinwirkungsbetrachtungen zu entnehmen.

Aushub

Aushub wird wie Schüttgüter bevorzugt in kippbaren Transportmitteln befördert, was ein einfaches „Abkippen“ und keine manuelle Entladung zulässt. Generell ist der Transport von Schüttgütern durch jedes Transportfahrzeug mit kippbarem Aufbau möglich. Aufgrund des hohen Gewichts und geringer Preise ist der weitere Einsatz von Aushubmaterial nur bei größeren Mengen wirtschaftlich sinnvoll. Deshalb wird hier der Aushubtransport nur mit 4- und 5-Achsen-Muldenkippern betrachtet. Die Dauer der Beladung der Transportfahrzeuge richtet sich stark nach der Ladeleistung der beladenden Maschinen. Bei einem Aushub ist dies in der Regel ein Bagger. Die Dauer der Beladung ist jedoch unabhängig davon, was mit dem geladenen Material später passiert. Das Laden der Muldenkipper fällt bei einer Entsorgung und Neubeschaffung sowie bei der Wieder- und Weiterverwendung gleichermaßen an und wird deshalb im Vergleich beider Fälle nicht weiter berücksichtigt. Zur Vereinfachung wird ebenfalls davon ausgegangen, dass das Aushubmaterial in trockenem Zustand vorliegt. Die Handhabung von trockenem Material ist deutlich einfacher und auch kostengünstiger, da das Gewicht bei gleichem Volumen durch Wassersättigung ansteigt.

3.3. Transport- und Entsorgungskosten

Wie in Anhang 4 ersichtlich, wurden für die Berechnung der Transportkosten Daten und Kosten von sämtlichen Unternehmen, welche in der Schweiz im Zusammenhang mit der Logistik oder dem Handel von Baustoffen stehen, erhoben. Diese Daten wurden nach Fahrzeugtypen und Achszahlen mit dementsprechenden Nutzlasten unterteilt und anschließend gemittelt. Die Transportkosten wurden mit den Regieansätzen auf Basis von Stundentarifen berechnet. Hier war die leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe teilweise schon inkludiert oder wurde anteilig dazugerechnet. Zur Umrechnung auf die

Einheit des Preises pro Tonnenkilometer (CHF/tkm) dient die Umrechnungsgrundlage des ASTAG, des schweizerischen Nutzfahrzeugverbandes, sowie die Nutzlasten der jeweiligen Transportfahrzeuge. Wie in Anhang 1 ersichtlich, liefert der ASTAG das Verhältnis von Kilometer zu Stunde für den Überlandverkehr von knapp 40,05 km/h und für den Nahverkehr von knapp 26,48 km/h. Die jeweiligen Nutzlasten der Transportfahrzeuge werden aus Fahrzeugscheinen entsprechender LKWs abgelesen. Bei Muldenkippern kann es je nach Gewicht des Fahrzeugaufbaus zu Abweichungen innerhalb einzelner Fahrzeugtypen mit gleichen Achszahlen kommen (Günthner et al., 2006). In allen Transportprozessen kommt es zur Vernachlässigung der Kosten der An- und Abfahrt des Transporteurs, da dieser Teil bei beiden Fällen – also der Entsorgung und auch der Weiterverwendung – gleichermaßen anfällt und somit auf den wirtschaftlichen Vergleich keinen Einfluss hat. Für den Rückweg wird zur Vereinfachung der eigentliche Transportweg doppelt berechnet. Wie bereits zuvor erwähnt, werden allgemein nur Transportfahrzeuge ohne Ladekran betrachtet, da davon auszugehen ist, dass auf der Baustelle geeignete Maschinen oder Geräte zum Be- und Entladen vorhanden sind. Auf LKWs verbaute Ladekräne würden ebenfalls Kosten verursachen. Um diese zu vermeiden, werden sie bei den Berechnungen nicht berücksichtigt. Generell lassen sich die Transportmittel in zwei Arten unterteilen. Zum einen wird für den Transport des Aushubmaterials, wie generell von Schüttgütern, der Transport durch LKWs mit kippbarer Mulde (auch Muldenkipper genannt) betrachtet. Zum anderen werden Baumaterialien, wie hier Stahl aber auch Kunststoffrohre von LKWs mit offener, nicht unbedingt kippbarer Pritsche transportiert.

Der Transport der Baumaterialien wird in Anhang 5 aus den ermittelten Transportkosten von LKWs mit 2-, 3-, 4- und 5-Achsen berechnet. Die Kosten pro Einsatzstunde werden mit dem Ansatz des ASTAG in Anhang 1 für den Regionalverkehr von 40,05 CHF/tkm, den jeweiligen Nutzlasten der LKWs und den mittleren LSVA-Zuschlägen in einen Preis pro Tonnenkilometer umgerechnet. Die Werte mit der Einheit CHF/tkm werden dann auf einen durchschnittlichen Preis pro Tonnenkilometer des Baumaterialtransportes gemittelt. Hiermit werden im Anschluss die Transportkilometer und Massen verrechnet. Der mittlere Stundentarif wird weiterhin ebenfalls benötigt, um beispielsweise Mehraufwände bei der Be- und Entladung zu berücksichtigen.

Je nach Menge und Material kann es zu geringen Auslastungen der Transportmittel bzw. zu Fahrten von weniger stark beladenen LKWs kommen. Mögliche Mehrkosten, die hierdurch entstehen könnten, werden jedoch bis auf die Berücksichtigung von niedrigen Auslastungen der LKWs durch den Transport leichter Materialien in der Betrachtung der Transportkosten größtenteils vernachlässigt. Das Vorgehen bei der Transportkostenberechnung von leichten Materialien wird im folgenden Abschnitt über die Kunststoffrohre und in Kapitel 4.1.2 näher beschrieben. Da die Transportdienstleister ebenfalls Interesse daran haben, die Abwicklung von Transportaufträgen möglichst wirtschaftlich zu gestalten, werden Transportmittel den Aufträgen entsprechend gewählt und es kommt nicht zu unnötigen Mehrkosten. Deshalb können die Berechnungen ökonomischer sowie ökologischer Art vereinfacht mit durchschnittlichen Preisen pro Einheit berechnet werden, ohne auf jeden Transportauftrag im Detail einzugehen.

Stahl

Bei Materialien aus Stahl werden die Kosten der Transportdistanzen für die Entsorgung sowie der Weiterverwendung mit den mittleren Transportkosten pro Tonnenkilometer berechnet. Für die Deponiegebühren, was bei Stahl allerdings einer Vergütung entspricht, wird ein Beispiel für den aktuellen Marktwert angesetzt. Da die hier betrachteten Stahlprodukte eine Materialdicke von 6 mm überschreiten, wird die Vergütung nach Stahlschrottsorte 3 oder Schwerer Stahlschrott berechnet. Der Wert der Vergütung wird hier gemäß Solenthaler Recycling AG von 140 CHF/t gewählt (Solenthaler Recycling AG, o. J.). Der Mehraufwand für das Abladen auf der Baustelle anstelle eines Recyclinghofes wird mit dem mittleren Stundentarif verrechnet (BDSV, o. J.). Als Lieferkosten für die neuen Baumaterialien aus Stahl wird ein Wert von 4% des Neupreises angesetzt [REDACTED]

Kunststoffrohre

Auch bei den Kunststoffrohren werden die Transportdistanzen der Entsorgung und Weiterverwendung mit den mittleren Transportkosten pro Tonnenkilometer berechnet. Bei der Weiterverwendung werden die Mehrkosten des Transportes leichter Materialien aufgrund der geringen Ladungsdichte mit einem variablen Faktor berücksichtigt, der nach den „Transporttarifen 2023“ von HGC ermittelt wurde. Die Kosten der Materiallieferung werden

ebenfalls nach diesen Transporttarifen berechnet (Allgemeine Geschäftsbedingungen & Transporttarife der HGC | HGC, o. J.). Die Entsorgungskosten werden durch einen gemittelten Wert für die Abgabe von Bausperrgut bei unterschiedlichen Annahmestellen berechnet. Ein Mehraufwand zum Abladen der weiterverwendenden Rohre ist ebenfalls mit dem mittleren Stundentarif zu berechnen, da die Anforderungen der Unversehrtheit deutlich höher sind als bei der Entsorgung.

Aushub

Der Transport von Aushub und dem mit kiesigem Aushub vergleichbaren Wandkies, welcher keiner Normung unterliegt, wird in dieser Betrachtung von Muldenkippern mit 4- und 5-Achsen durchgeführt. Da hier größere Massen an Aushub betrachtet werden, wäre es unwirtschaftlich, den Transport von kleineren Kippern durchführen zu lassen. Der hier errechnete mittlere Stundentarif und die Transportkosten pro tkm werden hier wie Transportkosten von Baumaterialien berechnet. Dazu werden die aus den Daten erhobenen mittleren Stundentarife mit dem Faktor für Nahverkehr aus Anhang 1 nach ASTAG von 26,48 km/h und den jeweiligen Nutzlasten verrechnet. Der Faktor für den Nahverkehr wird hier genutzt, da es sich bei Schüttgütern häufig um Materialien handelt, die sehr regional bezogen werden. Die so ermittelten Kosten dienen als Grundlage zur Berechnung aller zu transportierenden Distanzen. Die Ladung zur Weiterverwendung bedarf im Vergleich zur Entsorgung keinen Mehraufwand. Für das Abkippen auf der Baustelle, auf der das Material weiterverwendet wird, wird ein geringer zeitlicher Mehraufwand im Vergleich zum Abkippen auf der Deponie berücksichtigt. Für die Betrachtung wird in allen Fällen von trockenem Aushub ausgegangen, da nasser Aushub zu Mehrkosten bei der Entsorgung führen würde.

Für die Deponiekosten wurden im Anhang 3, Abgabegebühren für Aushubmaterial von knapp 20 Unternehmen mit Standorten in der gesamten Schweiz gemittelt und auf einen einheitlichen Preis pro Tonne gebracht.

4. Ökonomischer Vergleich

Der ökonomische Vergleich findet durch die Kostenberechnung der unterschiedlichen Fälle für die betrachteten Materialien statt. Diese werden in Kapitel 2.5 genauer vorgestellt. Zum einen wird dort der gängige Prozess der Entsorgung der Materialien auf Baustelle A und die Neubeschaffung derselben oder vergleichbarer Materialien auf Baustelle B dargestellt. Zum anderen den Prozess der Wieder- und Weiterverwendung der Materialien, welche auf der Baustelle A nicht mehr benötigt und zur Weiternutzung auf die Baustelle B mit Bedarf nach diesen Materialien transportiert werden.

Die Berechnung der Fälle findet mit einem hierfür erstellten Excel-Tool statt. Die in Kapitel 3 hergeleiteten und ermittelten Kosten stellen die Grundlage für die Kostenkalkulation dar. Für die betrachteten Materialgruppen und die Fälle gibt es jeweils ein Tabellenblatt, in welches die wesentlichen Parameter, die Materialmenge und die Transportdistanz zwischen Baustelle A und B eingegeben werden können. So gibt es z.B. für den ökologischen Vergleich der Fälle von Stahlprodukten ein Tabellenblatt, auf welchem die Kosten der Entsorgung und Neubeschaffung berechnet werden, sowie ein weiteres, auf dem die Kosten der Wieder- und Weiterverwendung ersichtlich sind. Außerdem kann zusätzlich die maximale Transportdistanz der Materialien berechnet werden. Dadurch kann ausgesagt werden, wie weit bspw. die Stahlprodukte transportiert werden können, ohne Mehrkosten aufgrund von Fall 2 der Wieder- und Weiterverwendung zu erzeugen.

Durch das Tool werden die Wiederverwendungsmöglichkeiten monetär quantifiziert und der Rahmen der Wirtschaftlichkeit der Wiederverwendung der betrachteten Materialien wird ermittelt.

Im Folgenden werden einzelne Tabellenausschnitte des Tools für beispielhaft betrachtete Materialien der Materialkategorien erläutert. Die Tabellen sind gemäß dem möglichen zeitlichen Ablauf abgebildet und die einzelnen Berechnungsschritte werden beschrieben. Anschließend werden die Fälle der jeweiligen Materialien miteinander verglichen und die maximale Transportdistanz, welche wirtschaftlich für den Fall der Wieder- und Weiterverwendung ohne Mehrkosten möglich ist, wird ermittelt.

4.1.1 Stahl

Entsorgung und Neubeschaffung

Tabelle 2: Kostenberechnung Entsorgung Stahl

Entsorgungskosten		
	Eingabe der Menge:	10,00 t
Durchschnittlicher Marktwert Schwerschrott (Sorte 3):	140,00 CHF/t	
Durchschnittliche Transportdistanz zur Recyclinganlage:	15,30 km	
Transportkosten pro tkm: (Mittel aus 2-, 3-, 4-, und 5-Achs-LKW)	0,35 CHF/tkm	
Transportkosten der angegebenen Menge:	107,02 CHF	
Abgabekosten der angegebenen Menge:	-1.400,00 CHF	
Entsorgungskosten gesamt	-1.292,98 CHF	

Quelle: Eigene Darstellung

Für die Berechnung der Entsorgungskosten von Stahl kann das Gewicht der zu entsorgenden Menge in das obere rechte Feld von Tabelle 2 eingegeben werden. Die Masse wird dann unter Zuhilfenahme des durchschnittlichen Marktwerts für Schwerschrott oder Schrott Sorte 3 zu den Abgabekosten des Materials verrechnet (BDSV, o. J.). Produkte aus Stahl haben einen hohen Rohstoffwert, was dazu führt, dass für zu entsorgenden Stahlschrott keine Abgabegebühr anfällt, sondern eine Vergütung bezahlt wird. Darum werden hier die Abgabegebühren mit einem negativen Wert berücksichtigt. Der aktuelle Marktwert wird gemäß den Ankaufspreisen für Schwerschrott über 10t Annahmemenge der Solenthaler Recycling AG von 140 CHF/t gewählt (Solenthaler Recycling AG, o. J.). Zu den Abgabekosten kommen die Gebühren für den Transport zur nächstgelegenen Recyclinganlage hinzu. Der Transportweg wird nach der Formel in Kap. 3.2.1 (Klingler & Savi, 2021) ermittelt und beträgt 15,3 km. Die Transportkosten bestehen aus dem Hin- und Rückweg zur Recyclinganlage, welche mit den Transportkosten pro tkm und der Stahlmenge multipliziert werden. Die An- und Abfahrt des Transporteurs wird nicht berücksichtigt, da diese in gleichem Maß bei beiden betrachteten Fällen zustande kommen.

Das Beladen wird hier außen vorgelassen, da auch im Fall der Wiederverwendung beladen werden muss. Abschließend werden die Teilkosten des Transportes und der Abgabe zu den „Entsorgungskosten gesamt“ aufsummiert.

Tabelle 3: Kostenberechnung Neubeschaffung Stahl

Neubeschaffungskosten	
Kosten für Trägerstahl:	1.500,00 CHF/t
Durchschnittliche Transportkosten frei Baustelle:	0,04 von NP
Transportkosten auf die Baustelle	600,00 CHF
Gesamtkosten der Neubeschaffung:	15.600,00 CHF
Gesamtkosten der Fall Entsorgung/Neubeschaffung:	14.307,02 CHF

Quelle: Eigene Darstellung

Die Berechnung der Neubeschaffungskosten ist in Tabelle 3 dargestellt und setzt sich im Wesentlichen aus den Kosten für das neue Baumaterial zusammen. Der aktuelle Marktwert für Trägerstahl/Stahlprofile wurde vereinfachend mit 1500 CHF/t angenommen [REDACTED]. Für die Materialkosten wird somit der Wert der angegebenen Menge aus Tabelle 2 mit den Kosten pro Tonne Stahl verrechnet. Für die Lieferung des Stahls wird ein vereinfachter Wert von 4% des Materialneupreises angenommen, welcher zusammen mit den Materialkosten die „Gesamtkosten der Neubeschaffung“ ergibt. Das Be- und Entladen der Materialien ist inbegriffen und muss nicht separat aufgeführt werden [REDACTED]. Die „Gesamtkosten der Situation Entsorgung/Neubeschaffung“ bestehen aus der Summe der „Entsorgungskosten gesamt“ und der „Gesamtkosten der Neubeschaffung“.

Wieder- und Weiterverwendung

Tabelle 4: Kostenberechnung Weiterverwendung Stahl

Kostenvergleich unter Angabe der Transportdistanz	
Eingabe Transportdistanz zwischen Baustellen	80,00 km
Nutzlast durchschnittliches Transportfahrzeug (Mittel aus 2-, 3-, 4-, und 5-Achs-LKW)	16,08 t/LKW
mittlerer Stundentarif:	183,75 CHF/h
Transportkosten pro tkm:	0,35 CHF/tkm
Abladen auf der Baustelle:	0,15 h
Mehrkosten durch längere Abladezeiten:	27,56 CHF
Gesamtkosten der Weiterverwendung:	587,14 CHF
Kostenvergleich Weiterverwendung anstatt Entsorgung	13.719,88 CHF

Quelle: Eigene Darstellung

Die „Gesamtkosten der Weiterverwendung“, die in Tabelle 4 berechnet wurden, setzen sich aus dem eigentlichen Transportaufwand und einem Mehraufwand beim Abladen zusammen. Um einen realen Wert für die Transportkosten zu ermitteln, werden diese für den Hin- und Rückweg zwischen den Baustellen ermittelt. Die An- und Abfahrt steht sowohl bei der Entsorgung und Neubeschaffung als auch bei der Weiterverwendung an und sie kann daher vernachlässigt werden. Es wird allerdings ein zeitlicher Mehraufwand von 0,15h zum gezielten Abladen auf der Baustelle im Vergleich zur Recyclinganlage berücksichtigt. Dieser Mehraufwand fällt für jeden genutzten LKW an. Die zu transportierende Menge wird durch die durchschnittliche Nutzlast geteilt, um so die Anzahl der LKWs mit mittlerem Stundentarif zu errechnen. Die „Gesamtkosten der Weiterverwendung“ können dann mit den „Gesamtkosten Fall Entsorgung/Neubeschaffung“ aus Tabelle 3 verglichen werden. Die Differenz der Kosten der Weiterverwendung zu den Kosten der Entsorgung und Neubeschaffung stellt den direkten Kostenvorteil der Weiterverwendung in der letzten Zeile von Tabelle 4 dar. Ist dieser Wert negativ, ist die Wiederverwendung kostenintensiver als die Entsorgung und Neubeschaffung.

Tabelle 5: Ermittlung der Transportdistanz Stahl

Ermittlung der Transportdistanz	
	Eingabe der Menge: 10,00 t
Nutzlast durchschnittliches Transportfahrzeug (Mittel aus 2-, 3-, 4-, und 5-Achs-LKW)	16,08 t/LKW
mittlerer Stundentarif:	183,75 CHF/h
Transportkosten pro tkm:	0,35 CHF/tkm
Abladen auf der Baustelle:	0,15 h
Mehrkosten durch längere Abladezeiten:	27,56 CHF
Transportdistanz	2.041,47 km

Quelle: Eigene Darstellung

In Tabelle 5 „Ermittlung der Transportdistanz“ wird die Transportdistanz ermittelt, die im Kostenrahmen der Entsorgung und Neubeschaffung liegt. Wie bei der Berechnung der Kosten der Weiterverwendung werden ebenfalls die Mehrkosten der Abladezeit berücksichtigt. Für die „Transportdistanz“ in km werden die „Gesamtkosten Fall Entsorgung/Neubeschaffung“ abzüglich der Mehrkosten der Abladezeit durch die Transportkosten für Hin- und Rückweg geteilt.

4.1.2 Kunststoffrohre

Entsorgung und Neubeschaffung

Tabelle 6: Kostenberechnung Entsorgung Kunststoffrohre

Entsorgungskosten		
Eingabe der Menge:	3.000,00	lfm
Gewicht pro lfm:	1,84	kg/m
Durchschnittliche Entsorgungskosten Bausperrgut:	258,32	CHF/t
Durchschnittlicher Entsorgungsweg:	15,00	km
mittlerer Stundentarif:	183,75	CHF/h
Transportkosten pro tkm:	0,35	CHF/tkm
(Mittel aus 2-, 3-, 4-, und 5-Achs-LKW)		
Transportkosten der angegebenen Menge:	28,96	CHF
Abgabekosten der angegebenen Menge:	1.425,92	CHF
Gesamtkosten der Entsorgung:	1.454,87	CHF

Quelle: Eigene Darstellung

In Tabelle 6 werden die Entsorgungskosten der Kunststoffrohre, welche sich aus den Abgabekosten der Materialien und ihrem Transport zusammensetzen, im Vergleich zur Verwertung ermittelt. Hier besteht die Möglichkeit, in der Zeile „Eingabe der Menge“ die Menge der Kunststoffrohre in Laufmeter (lfm) angeben zu können. Mit dem Gewicht pro lfm des zu entsorgenden Rohrs, welches ebenfalls einzugeben ist, kann das zu entsorgende Gesamtgewicht ermittelt werden. Die Masse wird mit den durchschnittlichen Kosten zur Entsorgung von Bausperrgut verrechnet. Daraus resultieren die Abgabekosten für das Material. Die Transportkosten dafür setzen sich aus der Masse, den durchschnittlichen Transportkosten und dem Entsorgungsweg zur weiteren Verwertung zusammen. Diese werden mithilfe der Formeln 1 und 2 nach dem Vorgehen aus „*Harmonisierte Ökobilanzdaten der Entsorgung von Baustoffen*“ ermittelt. Die Summe der Transport- und der Abgabekosten ergeben die „Gesamtkosten der Entsorgung“.

Tabelle 7: Kostenberechnung Neubeschaffung Kunststoffrohre

Neubeschaffungskosten		
Kosten für benötigte Kunststoffrohre	11,65	CHF/m
Gewicht des gewählten Durchmessers:	1,84	kg/m
Mittleres Gewicht der Rohre gestapelt:	0,12	t/m ³
Transportkosten für leichte Materialien nach HGC-Transporttarife 2023:	13,60	CHF/m ³
Durchschnittliche Transportkosten frei Baustelle:	625,60	CHF
Gesamtkosten der Neubeschaffung:	35.575,60	CHF
Gesamtkosten der Situation Entsorgung/Neubeschaffung:	37.030,47	CHF

Quelle: Eigene Darstellung

Wie in Tabelle 7 ersichtlich, setzen sich die Kosten der Neubeschaffung der Kunststoffrohre aus den Kosten für die neuen Materialien sowie den Transportgebühren des Lieferanten zusammen. Die Preise von Rohren werden in Preislisten von Händlern normalerweise in Schweizer Franken pro Meter Rohr angegeben und können in der Zeile „Kosten für benötigte Kunststoffrohre“ auch so eingegeben werden. Der Materialpreis ermittelt sich aus der in Tabelle 6 eingegebenen Menge und der Kosten pro Meter. Für die Liefergebühren wurde teilweise das Vorgehen nach den Transporttarifen der HGC für das Jahr 2023 genutzt. Hier werden die Materialien generell für eine Gebühr pro Tonne auf die Baustelle geliefert, wobei die tatsächlichen Transportdistanzen unberücksichtigt bleiben. In den Transporttarifen der HGC werden die Transportkosten für leichte Materialien mit einem Gewicht bis 130 kg/m³ mit 13,60 CHF/m³ berechnet. Da im Tabellenblatt die Materialmengen allerdings nach Gewicht angegeben werden, muss eine Umrechnung in Volumen stattfinden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass mit abnehmender Dichte des gestapelten Materials das Volumen bei gleichem Gewicht zunimmt. Dazu wird zusätzlich das mittlere Gewicht der gestapelten Rohre pro Volumen in der Berechnung der Transportkosten berücksichtigt. Gewählt werden kann das Gewicht bis 130kg/m³, darüber gilt der normale Tarif pro Tonne. Minimale oder maximale Transporttarife pro Auftrag nach

HGC bleiben unberücksichtigt. Diverse Zuschläge, wie beispielsweise Wartezeiten, werden hier außen vor gelassen (Allgemeine Geschäftsbedingungen & Transporttarife der HGC | HGC, o. J.).

Die „Gesamtkosten der Neubeschaffung“ ergeben sich aus der Summe der Liefergebühren und der Materialkosten. Die Gesamtkosten von Entsorgung und Neubeschaffung liefern den Vergleichswert für den wirtschaftlichen Vergleich der Fälle.

Wieder- und Weiterverwendung

Tabelle 8: Kostenberechnung Weiterverwendung für Kunststoffrohre

Kostenvergleich unter Angabe der Transportdistanz	
Eingabe Transportdistanz zwischen Baustellen	150,00 km
Nutzlast durchschnittliches Transportfahrzeug (Mittel aus 2-, 3-, 4-, und 5-Achs-LKW)	16,08 t/LKW
mittlerer Stundentarif:	183,75 CHF/h
Transportkosten pro tkm:	0,35 CHF/tkm
Eingabe mittleres Gewicht der Rohre gestapelt:	0,12 t/m ³
Faktor für höhere Transportkosten aufgrund geringem Gewicht nach HGC-Transporttarife 2023:	1,08 o. E.
Abladen auf der Baustelle:	0,50 h
Mehrkosten durch längere Abladezeiten:	91,87 CHF
Gesamtkosten der Weiterverwendung:	717,00 CHF
Kostenvergleich Weiterverwendung anstatt Entsorgung	36.313,47 CHF

Quelle: Eigene Darstellung

Die Transportkosten der Weiterverwendung der Kunststoffrohre werden in Tabelle 8 berechnet. In der Zeile „Eingabe Transportdistanz zwischen Baustellen“ kann die Distanz zwischen den betrachteten Baustellen A und B eingegeben werden. Auch bei dem

Zwischenbaustellentransport wird das geringe Gewicht über einen Faktor berücksichtigt. Dieser orientiert sich am ähnlichen Vorgehen der Transporttarife der HGC und wurde im vorherigen Abschnitt bereits beschrieben. Das mittlere Gewicht der gestapelten Rohre ist bis 130 kg/m^3 anzugeben und wird mit den Transportkosten der HGC für leichte Materialien sowie den normalen Transporttarifen zu dem einheitslosen Faktor umgerechnet, welcher die Transportkosten je nach Gewicht erhöht.

Für die Kosten des Transportes wird die zuvor ermittelte Masse mit der Transportdistanz für den Hin- und Rückweg, den Transportkosten pro Tonnenkilometer und dem ermittelten Faktor für leichte Materialien verrechnet.

Für die „Gesamtkosten der Weiterverwendung“ wird noch der zusätzliche Abladeaufwand auf der Baustelle mit einer halben Stunde berücksichtigt. Dieser kommt durch die höheren Qualitätsanforderungen an die Materialien bei der Weiterverwendung im Gegensatz zur Entsorgung zustande. Die „Mehrkosten durch längere Abladezeit“ setzen sich aus dem mittleren Stundentarif und der zusätzlichen Abladezeit pro transportierendem LKW zusammen.

Im „Kostenvergleich der Weiterverwendung anstatt Entsorgung“ wird die Differenz der „Gesamtkosten der Weiterverwendung“ zu den „Gesamtkosten der Entsorgung und Neubeschaffung“ ermittelt und zeigt somit das Einsparpotential unter Berücksichtigung der zurückzulegenden Distanz.

Tabelle 9: Ermittlung der Transportdistanz Kunststoffrohre

Ermittlung der Transportdistanz	
	Eingabe der Menge: 5,52 t
Nutzlast durchschnittliches Transportfahrzeug (Mittel aus 2-, 3-, 4-, und 5-Achs-LKW)	16,08 t/LKW
mittlerer Stundentarif:	183,75 CHF/h
Transportkosten pro tkm:	0,35 CHF/tkm
Eingabe mittleres Gewicht der Rohre gestapelt:	0,12 t/m ³
Faktor für höhere Transportkosten aufgrund geringem Gewicht nach HGC-Transporttarife 2023:	1,08 o. E.
Mehraufwand zum Be- und Entladen	0,50 h
Mehrkosten durch längere Abladezeiten:	91,87 CHF
Transportdistanz	8.863,49 km

Quelle: Eigene Darstellung

In Tabelle 9 „Ermittlung der Transportdistanz“ wird nach der in Kap. 4.1.1 beschriebenen Vorgehensweise die Transportdistanz ermittelt, die im Kostenrahmen der Entsorgung und Neubeschaffung liegt. Zusätzlich werden die Mehrkosten für den Transport leichter Materialien berücksichtigt. Auch der Mehraufwand für das Be- und Entladen der Kunststoffrohre, die nicht beschädigt werden dürfen, wird mit dem mittleren Stundentarif berücksichtigt. Das Ergebnis der „Transportdistanz“ stellt die maximale Entfernung dar, über welche das Material transportiert werden kann ohne Mehrkosten durch die Weiterverwendung zu erzeugen.

4.1.3 Aushubmaterial

Entsorgung und Neubeschaffung

Tabelle 10: Kostenberechnung Entsorgung Aushubmaterial

Entsorgungskosten	
Eingabe der Menge:	1.400,00 t
Durchschnittliche Deponiekosten Deponie Typ A:	17,79 CHF/t
Durchschnittliche Transportdistanz zur Deponie:	14,00 km
Nutzlast durchschnittliches Transportfahrzeug: (Mittel aus 4- und 5-Achs-Muldenkipper 18t oder 24t)	21,00 t/LKW
mittlerer Stundentarif:	197,61 CHF/h
Transportkosten pro tkm:	0,38 CHF/tkm
Transportkosten der angegebenen Menge:	14.710,32 CHF
Deponiekosten der angegebenen Menge:	24.912,60 CHF
Entsorgungskosten gesamt:	39.622,93 CHF

Quelle: Eigene Darstellung

Die in Tabelle 10 berechneten Entsorgungskosten des Aushubmaterials setzen sich aus den Kosten für den Transport und den Deponiegebühren für die vorhandene Mengen zusammen. Die Menge des vorhandenen Materials ist hier in Tonnen in der Zeile „Eingabe der Menge“ einzugeben. Die Menge wird anschließend mit den ermittelten durchschnittlichen Deponiekosten für die Entsorgung in einer Deponie des Typs A in der Schweiz berechnet. Wird der ermittelte Wert der Transportkosten für Schüttgüter durch den Muldenkippertransport mit der eingegebenen Masse multipliziert, ergeben sich die „Transportkosten der angegebenen Menge“. Die „Entsorgungskosten gesamt“ setzen sich aus der Summe der Transport- und Deponiekosten zusammen.

Tabelle 11: Kostenberechnung Neubeschaffung Aushubmaterial

Neubeschaffungskosten		
Kosten für Wandkies nicht genormt:	16,41	CHF/t
Durchschnittliche Distanz zu nächstgelegenen Kieswerk:	13,00	km
Be- und Entladen des Materials:	-	h
Transportkosten auf die Baustelle:	6.829,79	CHF
Gesamtkosten der Neubeschaffung:	29.799,90	CHF
Gesamtkosten Fall Entsorgung/Neubeschaffung:	69.422,83	CHF

Quelle: Eigene Darstellung

In Tabelle 11 werden die Neubeschaffungskosten von Wandkies berechnet. Dazu werden die Materialkosten mit den Transportkosten summiert. Erstere bestehen aus den Kosten pro Tonne Wandkies multipliziert mit der benötigten Menge, welche der vorhandenen Menge aus der Berechnung der Entsorgungskosten in Tabelle 11 entspricht. Für die Transportkosten des neuen Wandkieses wird die durchschnittliche Distanz zwischen der Baustelle und dem nächstgelegenen Kieswerk mit der Menge und den Transportkosten pro tkm aus Tabelle 11 multipliziert.

Die „Gesamtkosten der Neubeschaffung“ addiert mit den „Entsorgungskosten gesamt“ ergeben die Kosten von Entsorgung und Neubeschaffung, welche als Grundlage des wirtschaftlichen Vergleichs dienen.

Wieder- und Weiterverwendung

Tabelle 12: Kostenberechnung Weiterverwendung Aushubmaterial

Kostenvergleich unter Angabe der Transportdistanz		
Eingabe Transportdistanz zwischen Baustellen	20,00	km
Nutzlast durchschnittliches Transportfahrzeug (Mittel aus 4- und 5-Achs-Muldenkipper 18t oder 24t)	21,00	t/LKW
mittlerer Stundentarif:	197,61	CHF/h
Transportkosten pro tkm:	0,38	CHF/tkm
Abladen auf der Baustelle:	0,15	h
Mehrkosten durch längere Abladezeiten:	1.985,97	CHF
Gesamtkosten der Weiterverwendung:	23.000,72	CHF
Kostenvergleich Weiterverwendung anstatt Entsorgung		46.422,11 CHF

Quelle: Eigene Darstellung

Die Kosten der Wiederverwendung von Aushub werden in Tabelle 12 berechnet. In der Zeile „Eingabe Transportdistanz zwischen Baustellen“ wird die Transportdistanz eingegeben. Diese wird für den Hin- und Rückweg verdoppelt und ergibt multipliziert mit den zu transportierenden Massen und den Transportkosten pro tkm die Transportkosten. Mehrkosten im Zusammenhang mit dem Beladen der Kipper können hier vernachlässigt werden, da kein Unterschied bei der Beladung der LKWs besteht, ob diese auf eine Deponie oder auf eine weitere Baustelle fahren. Ein zeitlicher Mehraufwand zum Abladen auf der Baustelle anstatt zum Abkippen auf einer Deponie wird hier allerdings einkalkuliert. Der Mehraufwand in Stunden pro LKW wird mit dem mittleren Stundentarif multipliziert und ergibt zusammen mit den Transportkosten die „Gesamtkosten der Weiterverwendung“.

Anschließend werden zum Kostenvergleich beider Fälle die Gesamtkosten der Wiederverwendung von den Gesamtkosten der Entsorgung und Neubeschaffung abgezogen. Auch hier gibt ein negatives Ergebnis Mehrkosten im Zusammenhang mit der Wiederverwendung verglichen zu Entsorgung und Neubeschaffung der Materialien wieder.

Tabelle 13: Ermittlung der Transportdistanz Aushubmaterial

Ermittlung der Transportdistanz	
Eingegebene Menge:	1.400,00 t
Nutzlast durchschnittliches Transportfahrzeug (Mittel aus 4- und 5-Achs-Muldenkipper 18t oder 24t)	21,00 t/LKW
mittlerer Stundentarif:	197,61 CHF/h
Transportkosten pro tkm:	0,38 CHF/tkm
Abladen auf der Baustelle:	0,15 h
Mehrkosten durch längere Abladezeiten:	1.985,97 CHF
Transportdistanz	64.18 km

Quelle: Eigene Darstellung

Die Ermittlung der Transportdistanz für Aushubmaterial erfolgt nach äquivalent zu den zuvor aufgezeigten Beispielen von Stahl und Kunststoffrohren. Berücksichtigt werden auch hier die Transportkosten sowie der Mehraufwand zum Abkippen der Materialien auf der Baustelle mit den mittleren Stundentarifen. Aufgelöst nach Kilometern ergibt sich die Distanz, in der die Weiterverwendung wirtschaftlich günstiger ist als die Entsorgung und Neubeschaffung.

5. Ökologischer Vergleich

Wie bereits in Kapitel 2.6 eingeleitet, findet der ökologische Vergleich der Fälle mittels einer Ökobilanz statt. Das Ziel ist es, die Umwelteinwirkungen der Fälle getrennt zu quantifizieren, um sie miteinander vergleichen zu können. Es sollen Entscheidungsempfehlungen getroffen werden, unter welchen veränderlichen Bedingungen welcher Fall die Umwelt weniger belastet. Dazu zählen die Materialmengen, Transportdistanzen und je nach Materialgruppe der Baustoff selbst. Die Sachbilanzen und deren Wirkungsabschätzung für die Materialien wird für die jeweiligen Fälle auf Basis der Einheiten UBP und kgCO₂-äq quantifiziert. Die Werte werden mit einem hierfür entwickelten Excel-Tool unter Eingabe der veränderlichen Bedingungen berechnet. In dem Tool werden Entsorgung und Neubeschaffung sowie Wieder- und Weiterverwendung separat in den Einheiten UBP und kgCO₂-äq berechnet. Die Differenz beider Fälle gibt die Einsparungen der Umwelteinwirkungen durch die Weiterverwendung wieder. Abschließend werden für den Vergleich in UBP und kgCO₂-Äquivalenten die maximalen Transportdistanzen berechnet, welche direkt miteinander verglichen werden können.

Ökologische Daten Material

Wie bereits in Kap. 2.3 erläutert, entstammen die Daten für den ökologischen Vergleich der betrachteten Situationen der KBOB/ecobau-Liste. Die Werte der UBP und CO₂-äq der Materialien werden getrennt nach Herstellung und Entsorgung unterteilt, aber auch zusammengezählt in der Spalte „Total“ angegeben und für den ökologischen Vergleich von Stahl und Kunststoffrohren dort entnommen. Bei der Betrachtung des Aushubs und Wandkieses ist eine andere Vorgehensweise nötig, welche im weiter unten folgenden Abschnitt „Aushub“ im Detail betrachtet wird.

Ökologische Daten Transport

Für die Ökobilanzdaten der Transporte werden durchschnittliche Daten für Lastwagen genutzt. Die Emissionen der verschiedenen Transportmittel, welche in Kap. 3.2 vorgestellt werden, können aufgrund der unterschiedlichen Nutzlasten und Bauarten sowie nach unterschiedlichen Baujahren stark schwanken und nicht genau im Voraus festgelegt werden. Als Ökobilanzdaten eines LKW-Transportes werden die Daten für Gütertransporte aus

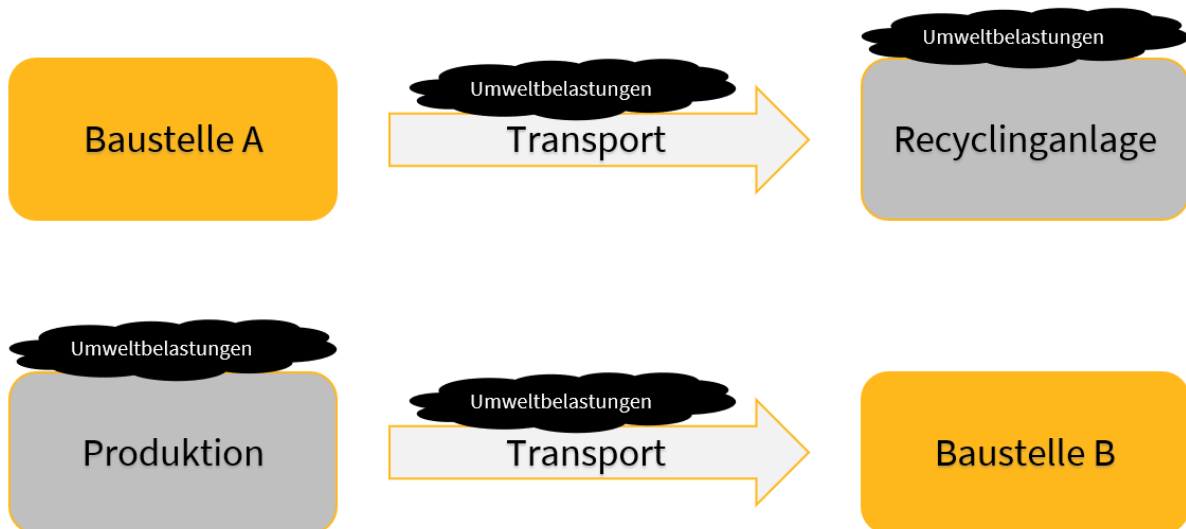
der Zeile für Lastwagen im Durchschnitt erhoben. Die UBP und die Daten der THG-Emissionen sind aufgeteilt in Betrieb, Fahrzeug und Infrastruktur sowie gebündelt unter den jeweiligen Spalten „Total“ zu finden. Auch bei den Transporten werden die Daten der Spalte „Total“ für die Vergleiche gewählt, da alle Bestandteile gleichermaßen berücksichtigt werden müssen (KBOB et al., 2023).

Die manuellen Berechnungen von Umwelteinwirkungen der Entsorgungstransporte von Baumaterialien können vernachlässigt werden, da diese durch die entsprechenden Bereiche der Entsorgungsdaten der Materialien abgedeckt sind. Die Ausnahme bildet hier der Bereich des Aushubs, welcher ebenfalls im Abschnitt „Aushub“ genauer betrachtet wird.

Der Vergleich der Materialien und die Bestandteile werden im Folgenden im Detail mithilfe der Abbildungen der jeweiligen Fälle genauer betrachtet. Welche Emissionen und Umwelteinwirkungen genau berücksichtigt werden, ist den Abbildungen durch die schwarze Wolke zu entnehmen.

5.1 Stahl

Abbildung 9: Umwelteinwirkungen Fall 1 Entsorgung/Neubeschaffung Stahl



Quelle: Eigene Darstellung

Der Fall der Entsorgung und Neubeschaffung von Baustoffen aus Stahl berücksichtigt die Umwelteinwirkungen, die Abbildung 9 zu entnehmen sind. Durch die Ökobilanzdaten der

jeweiligen Stahlmaterialien werden sämtliche Umwelteinwirkungen der Produkte berücksichtigt. Abgebildet sind die Umweltbelastungen durch den Transport ab der Baustelle in eine Recyclinganlage, den Prozess des Recyclings und der Neuproduktion sowie den Neutransport auf die Baustelle.

Abbildung 10: Umwelteinwirkungen Fall 2 Weiterverwendung Stahl



Quelle: Eigene Darstellung

Wie Abbildung 10 entnommen werden kann, steht die Wieder- und Weiterverwendung von Stahl-Baustoffen der Entsorgung und Neubeschaffung gegenüber. In diesem Fall werden lediglich die durch den Transport zwischen den Baustellen erzeugten Umwelteinwirkungen eingerechnet.

Tabelle 14: Ökobilanzdaten Entsorgung und Neubeschaffung Stahl

Stahl			
		Materialbeschaffenheit wählen	Stahlprofil blank
Materialbilanz			
		Eingabe der Menge:	10 t
UBP pro kg	1.290,00	UBP/kg	THG-Emissionen pro kg
			0,736 kgCO ₂ -äq/kg
UBP Material gesamt:		12.900.000,00	UBP
		THG-Emissionen Material gesamt:	7.360,00 kgCo₂-äq

Quelle: Eigene Darstellung

Für den Ökobilanzvergleich der berechneten Fälle wird im ersten Schritt das vorliegende Stahlprodukt ausgewählt. Die Menge der Materialien kann in Tabelle 14 manuell in der Zeile „Eingabe der Menge“ eingegeben werden oder direkt aus dem ökonomischen

Vergleich übernommen werden. Für einen gesamtheitlichen Vergleich muss im ökonomischen sowie im ökologischen Vergleich dieselbe Menge und dasselbe Material verwendet werden, damit ein aussagefähiges Ergebnis erwartet werden kann.

Die Materialbilanz spiegelt den Prozess der Entsorgung und Neubeschaffung wider und wird in Tabelle 14 wiedergegeben. Dazu wird zunächst die zuvor eingegebene oder übernommene Menge für die Berechnung der UBP mit dem gelisteten Wert der Ökobilanzdaten Baubereich für UBP pro kg des gewählten Stahlproduktes verrechnet. Darüber hinaus werden die Treibhausgasemissionen des Materials durch Verrechnung der angegebenen Menge mit dem Tabellenwert berechnet.

Tabelle 15: Ökobilanzdaten Weiterverwendung Stahl

Transportbilanz					
UBP pro tkm	263	UBP/tk m	THG-Emissionen pro tkm	0,142	kgCO ₂ - äq/tkm
Transportweg Fall 2 Weiterverwendung von Kunststoffrohren					
Durchschnittlicher An- und Abfahrtsweg:		25 km			
Eingabe Transportdistanz zwischen Baustellen:		80 km			
UBP Transport:		486.550,00		UBP	
THG-Emissionen gesamt:		262,70		kgCO ₂ -äq	
Ökologischer Vergleich Entsorgung/Neubeschaffung & Transport					
Einsparung UBP:		12.413.450,00		UBP	
Einsparung THG-Emissionen:		7.097,30		kgCO ₂ -äq	

Quelle: Eigene Darstellung

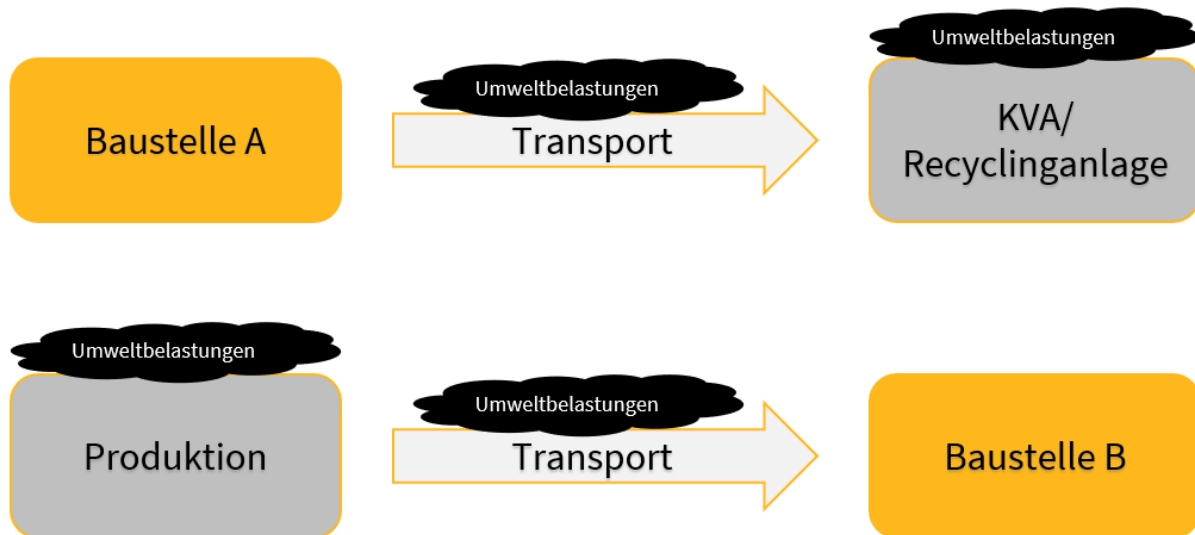
In Tabelle 15 ist die Transportbilanz abgebildet. Hier werden die gegebenen Werte für UBP und kgCO₂-äq pro tkm für den Güter-Transport durch LKWs im Durchschnitt für die Berechnung gewählt. Die Ökobilanzdaten werden mit der angegebenen Menge des zu transportierenden Materials aus Tabelle 14 und der Transportdistanz in km multipliziert. Die Transportdistanz setzt sich aus dem Hin- und Rückweg zwischen den zwei Baustellen sowie einer durchschnittlichen An- und Abfahrt von 25 km zusammen. Die Umwelteinwirkungen der Wieder- und Weiterverwendung werden durch die Transportbilanz dargestellt.

Der errechnete Wert der Transportbilanz wird in „UBP Transport“ sowie „THG-Emissionen Transport“ dargestellt und kann nun direkt mit den Werten der Materialbilanz verglichen werden. Die Differenz der Umwelteinwirkungen der Transportbilanz zu den Umwelteinwirkungen der Materialbilanz ist in der letzten Zeile abgebildet und gibt die ökologischen Einsparungen von Umwelteinwirkungen der Wieder- und Weiterverwendung im Vergleich zur Entsorgung und Neubeschaffung der gebrauchten Stahlprodukte wieder.

Die maximale Transportdistanz kann wie im Kostenvergleich auch auf ökologischer Ebene ermittelt werden. Der jeweilige Wert der Materialbilanz wird abzüglich der Transportbilanz aus An- und Abfahrtswegen durch die Bestandteile der Umwelteinwirkungen eines Transportweges geteilt und nach dem Wert für km aufgelöst. So erhält man für die UBP und für die $\text{kgCO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q}$ zwei verschiedene Werte.

5.2 Kunststoffrohre

Abbildung 11: Umwelteinwirkungen Fall 1 Entsorgung/Neubeschaffung Kunststoffrohre



Quelle: Eigene Darstellung

Die Umwelteinwirkungen, die durch die Entsorgung und Neubeschaffung von Kunststoffrohren zu erwarten sind, sind in Abbildung 11 dargestellt. Dabei werden die

Transportemissionen von Baustelle A, auf der die Materialien anfallen werden, in eine Anlage der stofflichen oder energetischen Verwertung berücksichtigt. Hinzu kommen die Umwelteinwirkungen aus Verwertung und Recyclingprozess sowie die Neuproduktion mit der Lieferung auf die nächste Baustelle, welche im unteren Abschnitt von Abbildung 11 zu erkennen ist. Der Fall gibt somit einen vollständigen Produktlebenszyklus wieder, der durch die Ökobilanzdaten von KBOB in UBP und CO₂-Äquivalente beziffert wird.

Abbildung 12: Umwelteinwirkungen Fall 2 Weiterverwendung Kunststoffrohre



Quelle: Eigene Darstellung

Wie Abbildung 12 zu entnehmen ist, werden im Fall der Wieder- und Weiterverwendung von Kunststoffrohren die Umwelteinwirkungen des Transportes zwischen zwei beteiligten Baustellen herangezogen.

Tabelle 16: Ökobilanzdaten Entsorgung und Neubeschaffung Kunststoffrohre

Kunststoffrohre			
			Materialbeschaffenheit wählen
			PE
Materialbilanz			
		Eingabe der Menge:	3.000,00 lfm
Gewicht pro lfm:		1,84	kg/m
Gesamtgewicht:		5.520,00	kg
UBP pro kg	6.020,00	UBP/kg	
UBP Material			
UBP Material			
gesamt:	33.230.400,00	UBP	
		THG-Emissionen	
		pro kg	4,75 kgCO ₂ -äq/kg
		THG-Emissionen	
		Material gesamt:	26.220,00 kgCo ₂ -äq

Quelle: Eigene Darstellung

Zuerst wird für den Ökobilanzvergleich zwischen der Entsorgung und Neubeschaffung und der Wieder- und Weiterverwendung die genaue Materialart der begutachteten

Materialien gewählt. In Tabelle 16 kann zwischen Rohren aus PP, PE und PVC unterschieden werden. Im Anschluss wird aus der Menge die Masse der Rohre ermittelt. Auch hier gilt, dass in den Vergleichen dieselben Massen gewählt werden müssen, um ein aussagekräftiges Ergebnis für den gesamtheitlichen Vergleich in ökonomischer und ökologischer Hinsicht zu erlangen.

Die Entsorgung und Neubeschaffung der Kunststoffrohre wird durch die Materialbilanz, welche in Tabelle 16 dargestellt ist, wiedergegeben. Die Werte hierfür errechnen sich aus der Masse multipliziert mit dem jeweiligen Tabellenwert der KBOB/ecobau-Liste für die UBP und die CO₂-Äquivalente.

Tabelle 17: Ökobilanzdaten Weiterverwendung Kunststoffrohre

Transportbilanz					
UBP pro tkm	263,00	UBP/tkm	THG-Emissionen pro tkm	0,14	kgCO ₂ -äq/tkm
Transportweg der Situation Weiterverwendung von Kunststoffrohren					
Durchschnittlicher An- und Abfahrtsweg:					
	25,00	km			
Eingabe mittleres Gewicht der Rohre gestapelt:					
	0,12	t/m ³			
Faktor für Mehraufwand zum Transport von Materialien mit geringem Gewicht:					
	1,04	o. E.			
Eingabe Transportdistanz zwischen Baustellen					
	150,00	km			
UBP Transport:			49.579,45	UBP	
THG-Emissionen gesamt:			264,88	kgCO ₂ -äq	
Ökologischer Vergleich Entsorgung/Neubeschaffung & Transport					
Einsparung UBP:			32.739.820,55	UBP	
Einsparung THG-Emissionen:			25.955,12	kgCO ₂ -äq	

Quelle: Eigene Darstellung

In Tabelle 17 ist die Transportbilanz für die Wieder- und Weiterverwendung von Kunststoffrohren abgebildet. Die Ermittlung der Transportbilanz der Kunststoffrohre findet analog zum Vorgehen der Ermittlung der Transportbilanz für Stahl statt. Dazu werden die

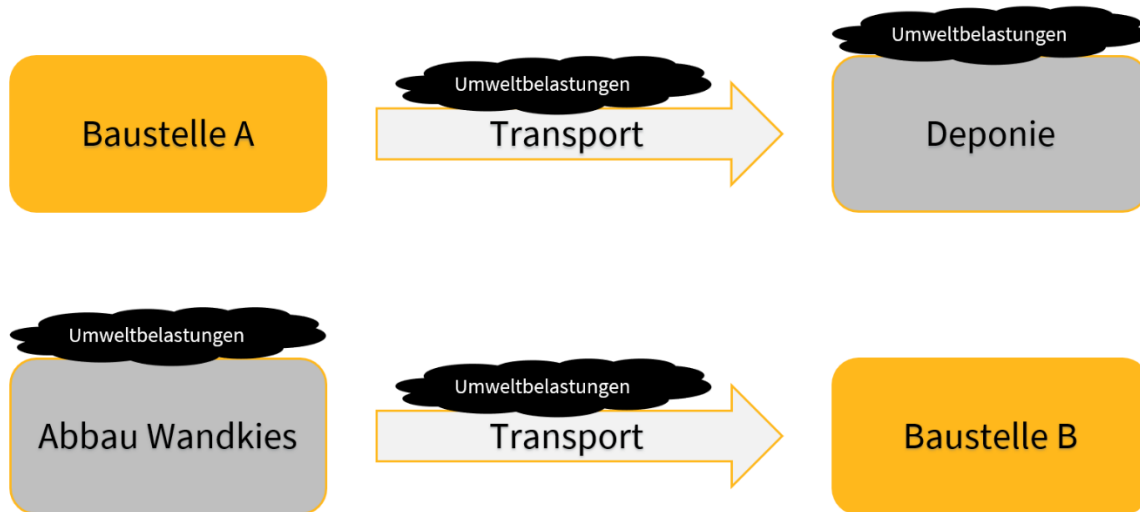
Ökobilanzwerte für den Gütertransport mit LKWs im Durchschnitt herangezogen. Die Transportdistanz setzt sich aus dem angenommenen Wert für den durchschnittlichen An- und Abfahrtsweg mit 25 km sowie dem Hin- und Rückweg für den Transport zwischen den Baustellen zusammen. Die resultierenden Werte in der Zeile „UBP Transport“ und „THG-Emissionen gesamt“ sind das Ergebnis aus der Multiplikation des jeweiligen Tabellenwertes mit der Masse, der Transportdistanz und dem Faktor für leichte Materialien. Der Faktor ermittelt sich nach dem Vorgehen, das in Kap. 4.1.2 beschrieben wird und stellt die Mehremissionen, die durch den Transport von Materialien mit geringem Gewicht und großem Volumen erzeugt werden, dar. Aufgrund des Gewicht-Volumen-Verhältnisses ist in der Regel das Volumen und nicht das Gewicht des Materials maßgebend. Da hier allerdings mit einem Tabellenwert für tkm gerechnet wird, kommt es durch den Faktor zur Berücksichtigung des Mehraufwands. Das Ergebnis der Transportbilanz ist mit den Transportemissionen des Falls Wieder- und Weiterverwendung gleichzusetzen.

In der Zeile „Ökologischer Vergleich Entsorgung/Neubeschaffung und Transport“ werden die Materialbilanz und Transportdistanz verglichen. Die ermittelte Differenz zwischen beiden Bilanzdaten gibt die Ersparnisse der Umwelteinwirkungen durch Wiederverwendung im Gegensatz zu Entsorgung und Neubeschaffung an.

Auch im ökologischen Vergleich der Fälle für Kunststoffrohre können maximale Transportdistanzen ermittelt werden. Die Distanz lässt sich analog zum ökologischen Vergleich von Stahl mit der Berücksichtigung des Faktors für Materialien mit geringer Dichte ermitteln.

5.3 Aushub

Abbildung 13: Umwelteinwirkungen Fall 1 Entsorgung/Neubeschaffung Aushub



Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 13 ist ersichtlich, welche durch die Entsorgung und Neubeschaffung von Aushubmaterial bzw. Wandkies erzeugten Umweltweinflüsse im ökologischen Vergleich berücksichtigt werden. Gestartet auf der Baustelle wird das Lösen und Beladen der Transportmittel durch geeignete Maschinen, in der Regel durch Bagger, vernachlässigt. Emissionen entstehen dabei genauso wie bei der Wieder- und Weiterverwendung und können daher aus dem ökologischen Vergleich vernachlässigt werden. Der Transport zur nächsten Deponie des Typs A und die Deponierung fließen jedoch mit den entsprechenden Umwelteinflüssen in den Vergleich ein. Für die Deponierung wird der Tabellenwert der Ökobilanzdaten aus der Tabelle „Entsorgung“ für die Entsorgung von Kies und Sand entnommen. Die Neubeschaffung startet in einer Kiesgrube mit dem Abbau des Kieses. Hierfür liefert KBOB die Ökobilanzdaten für Aushub maschinell im Durchschnitt je m³. Im Anschluss werden die Transportemissionen durch die Lieferung auf die Baustelle ebenfalls berücksichtigt.

Abbildung 14: Umwelteinwirkungen Fall 2 Weiterverwendung Aushub



Quelle: Eigene Darstellung

Die Umwelteinwirkungen durch den Transport bei der Weiterverwendung von Aushubmaterial beschränken sich auf die durch den Transport von Baustelle A zu Baustelle B erzeugten Umwelteinwirkungen.

Tabelle 18: Ökobilanzdaten Entsorgung und Neubeschaffung Aushubmaterial

Materialbilanz			
		Eingabe der Menge:	1.400 t
		Dichte Wandkies, durchschnittlich:	1,85 t/m ³
		Menge in m ³ :	755 m ³
Gewinnung des Materials/Aushub maschinell:			
UBP pro m ³ :	690,00 UB/m ³	THG-Emissionen pro m ³	0,433 kgCO ₂ -äq/m ³
UBP Gewinnung:	520.910.725 UB	THG-Emissionen Gewinnung:	326,89 kgCo₂-äq
Transport			
Entsorgung und Neubeschaffung:		27 km	
UBP pro tkm:	263,00 UB/tkm	THG-Emissionen pro tkm:	0,142 kgCO ₂ -äq/tkm
UBP Transport:	9.941.400 UB	THG-Emissionen Transport:	5.367,60 kgCo₂-äq
Deponierung des Aushubmaterials:			
UBP pro kg:	40,20 UB/kg	THG-Emissionen pro kg:	0,0126 kgCO ₂ -äq/kg
UBP Deponierung:	56.280.000 UB	THG-Emissionen Deponierung:	17.640,00 kgCo₂-äq
UBP Materialbilanz: 66.742.310,72 UB		THG-Emissionen Materialbilanz: 23.334,49 kgCo₂-äq	

Quelle: Eigene Darstellung

In Tabelle 18 werden die Umweltauswirkungen für die Entsorgung und Neubeschaffung von Aushubmaterial berechnet. Im ersten Schritt wird die Masse des Aushubs, welche in der Zeile „Eingabe der Menge“ angegeben wird oder aus dem wirtschaftlichen Vergleich der beiden Situationen übernommen werden kann, in m³ umgerechnet. Die Umwelteinwirkungen, welche aus der Materialgewinnung entstammen, werden unter der Zeile

„Gewinnung des Materials/Aushub maschinell“ dargestellt und berechnen sich aus dem berechneten Volumen multipliziert mit den Werten von KBOB für maschinellen Aushub im Durchschnitt. Für die Umwelteinwirkungen aus „Transport Entsorgung und Neubeschaffung“ werden die durchschnittlichen Transportdistanzen von der Baustelle in die nächste Deponie Typ A mit der Transportdistanz zur Baustelle aus einem Kieswerk, wie in Kap. 3.2.1 erläutert, zusammengerechnet. Diese Distanz wird analog zu den zuvor berechneten Transportemissionen mit den Tabellenwerten für den LKW-Transport im Durchschnitt und der Masse verrechnet. Die Zeile „Deponierung des Aushubmaterials“ liefert die Umwelteinwirkungen der Entsorgung des Aushubmaterials durch Multiplikation der Masse mit den Ökobilanzdaten für die Deponierung. Die Umweltauswirkungen der Materialbilanz ergeben sich aus der Summe von Gewinnung, Transport und Deponierung und sind in der letzten Zeile dargestellt. Die Materialbilanzdaten ergeben die ökologischen Vergleichsdaten für die Entsorgung und Neubeschaffung von Aushubmaterial.

Tabelle 19: Ökobilanzdaten Weiterverwendung Aushubmaterial

Transportbilanz			
UBP pro tkm	263,00	UBP/tkm	
			THG-Emissionen pro tkm
			0,14
			kgCO ₂ -äq/tkm
Transportweg Fall 2 Weiterverwendung von Aushubmaterial			
Durchschnittlicher An- und Abfahrtsweg:		5 km	
Eingabe Transportdistanz zwischen Baustellen		20,00 km	
UBP Transport:	16.569.000,00	UBP	
			THG-Emissionen gesamt:
			8.946,00
			kgCO ₂ -äq
Ökologischer Vergleich Entsorgung/Neubeschaffung & Transport			
Einsparung			Einsparung
UBP:	50.173.310,72	UBP	THG-Emissionen:
			14.388,49
			kgCO ₂ -äq

Quelle: Eigene Darstellung

Die Transportbilanz wird in Tabelle 19 berechnet und enthält die Daten der Umwelteinwirkungen für die Weiterverwendung von Aushubmaterial. Die Transportdistanz setzt sich hierfür aus einer durchschnittlichen An- und Abfahrt von angenommenen 5 km und dem Hin- und Rückweg zwischen den Baustellen zusammen. Da es sich bei Schüttgütern dieser Art, aufgrund von großem Gewicht und geringen Preis, üblicherweise um

standortgebundene Materialien handelt, wurde hier die An- und Abfahrtstrecke geringer gewählt als bei den anderen Materialien. Außerdem kann es beim Transport von großen Mengen zum häufigeren Einsatz derselben LKWs kommen, sodass die An- und Abfahrt nur anteilig anfällt. Die Transportdistanzen werden mit den Massen und den Tabellenwerten des LKW-Transportes im Durchschnitt multipliziert. Daraus ergeben sich die vergleichbaren Ökobilanzwerte der Weiterverwendung des Materials.

Die Einsparungen der Umwelteinwirkungen der Wieder- und Weiterverwendung gegenüber der Deponierung und Neubeschaffung ergeben sich ebenfalls aus der Differenz der zuvor aufgeführten Fälle.

Auch im Falle von Aushubmaterial können – analog zu den anderen Berechnungen der Transportdistanzen – die maximalen Distanzen berechnet werden, die Baustellen auseinanderliegen können, um einen ökologisch rentablen Transport zu ermöglichen.

6. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden beispielhaft die Fälle der Entsorgung und Neubeschaffung sowie der Wieder- und Weiterverwendung für bestimmte Baumaterialien der jeweils zuvor erläuterten Materialgruppen berechnet und verglichen. Zunächst findet eine Berechnung der Einsparungen für eine realistisch angenommene Transportdistanz zwischen den Baustellen A und B statt, dann erfolgen die Vergleiche der maximalen Transportdistanzen im rentablen Bereich. Die Verhältnisse der maximal zurückzulegenden Distanzen werden im Anschluss bewertet.

Stahl

Als Beispiel für die Wieder- und Weiterverwendung von Stahlprodukten werden 10 t blanke Stahlprofile aus ökonomischer und ökologischer Perspektive miteinander verglichen. Für eine mögliche Transportdistanz zwischen den zwei Baustellen wird eine Transportdistanz von 80 km angenommen. Die Stahlträger könnten auf der einen Baustelle durch den Rückbau einer temporären Baumaßnahme oder einer Hilfskonstruktion als übrigtes Material anfallen und auf einer weiteren Baustelle ebenfalls für den Konstruktionsprozess benötigt werden.

Auf Grundlage der Annahme, dass Baustelle A geräumt werden muss und die Einlagerung der Materialien nicht möglich ist, wird als Restwert der Stahlprofile eine Vergütung gemäß der Solenthaler Recycling AG für Schwerschrott von 140 CHF/t veranschlagt (Solenthaler Recycling AG, o. J.). Die Entsorgung des Stahls würde der Baustelle A damit 1.292,98 CHF einbringen. Baustelle B, die das Material benötigt, würde für die gleiche Menge neuer Stahlträger 15.600 CHF zahlen müssen. Der Transport zwischen den Baustellen kostet für die angegebene Menge 587,14 CHF. Durch die Weiternutzung der Stahlprofile auf Baustelle B könnten also 13.719,88 CHF eingespart werden.

Folglich wird das betrachtete Beispiel mit geänderten Rahmenbedingungen betrachtet, welche die Wiederverwendung mit wesentlich mehr Kosten verbinden. Es wird angenommen, dass Baustelle B der Baustelle A 50% des Neupreises der Träger zahlen müsste und 10% der Träger wegen Mängel nach dem Transport aussortiert werden müssen, hätte Baustelle B Kosten in Höhe von 7.500 CHF für das Material und müsste 1t des Materials

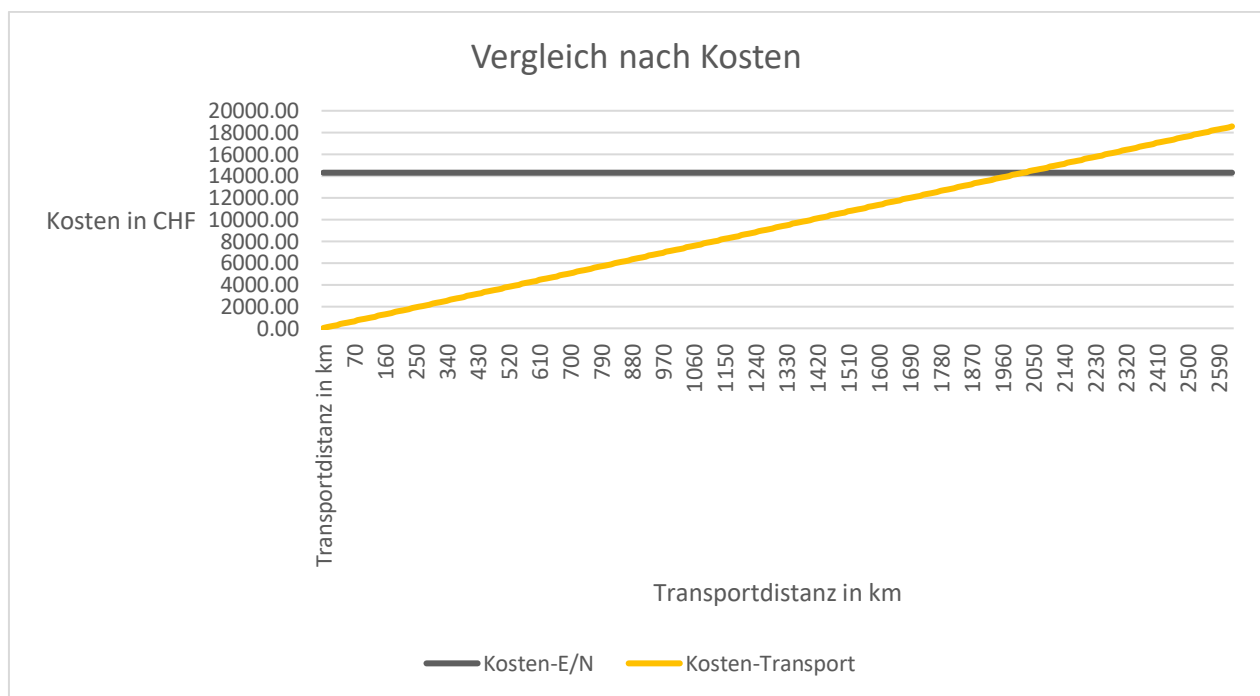
verschrotten. Baustelle A würde dadurch eine Vergütung für den Schrott in Höhe von 7.500 CHF anstelle der oben veranschlagten 1.292,98 CHF erhalten. Baustelle B hätte in diesem Fall Kosten für Transport, Material und Vergütung für 1 t Schrott in Höhe von 7.947,14 CHF. In der Neubeschaffung müsste für die tatsächlichen 9 t Trägerstahl allerdings insgesamt 14.040 CHF zahlen. Damit spart Baustelle B noch immer 6.092,86 CHF ein.

Aus ökologischer Sicht könnten durch die Wiederverwendung der Stahlträger auf Baustelle B 12.413.450 UBP im Vergleich zur Entsorgung und Neubeschaffung eingespart werden. 12.413.450 UBP entsprechen knapp über 60% der UBP, welche eine durchschnittliche Person in der Schweiz pro Jahr verursacht (BAFU, 2011). Die THG-Emissionen, die durch die Weiterverwendung eingespart werden können, betragen 7.097,30 kgCO₂-äq. Eine durchschnittliche Schweizer Person verbrauchte im Jahr 2020 ca. 12 tCO₂-äq. Die Weiternutzung der Stahlträger würde somit mehr als die Hälfte CO₂-Äquivalente einsparen, die eine durchschnittliche Person in der Schweiz pro Jahr erzeugt (BAFU, 2023b).

Um die ökonomische sowie die ökologischen Betrachtungsweisen miteinander vergleichen zu können, werden in den folgenden Abbildungen die entstehenden Kosten und Umwelteinwirkungen in Abhängigkeit der Transportdistanz dargestellt.

In Abbildung 15 werden die durch den Transport entstehenden Kosten in Abhängigkeit der zunehmenden Transportdistanz durch die Kurve „Kosten-Transport“ dargestellt. Ein möglicher Restwert der Materialien über den Schrottwert hinaus oder möglicher Ausschuss wird in den folgenden Diagrammen nicht betrachtet. Die Kurve Kosten-E/N stellt die Kosten von Entsorgung und Neubeschaffung dar. Diese bleiben über die zunehmenden Transportdistanzen gleich, da diese nicht in Abhängigkeit von der Distanz zwischen den betrachteten Baustellen stehen. Der Schnittpunkt der beiden Graphen bei 2.041,5 km zeigt den Punkt, an dem beide betrachteten Kosten denselben Wert haben. Ist die Transportdistanz grösser als dieser Wert, fallen durch den Transport mehr Kosten an, als durch die Weiternutzung der gebrauchten Baumaterialien eingespart werden kann. Der Transport über 2.041 km ist somit unter Betrachtung der Kosten unwirtschaftlich.

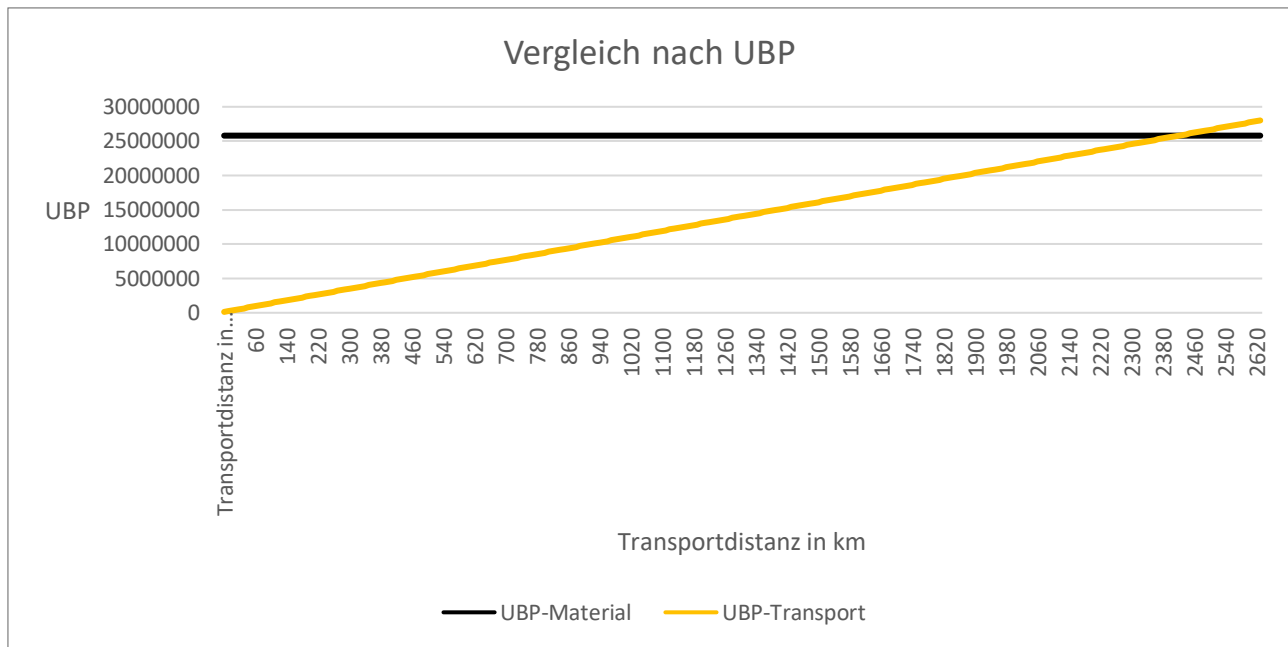
Abbildung 15: Kosten - Transportdistanz Stahlträger



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 16 zeigt die Abhängigkeit der UBP von den Transportkilometern. Die durch die Entsorgung und Neubeschaffung entstehenden UBP sind ebenfalls unabhängig vom Transport zwischen den Baustellen. Der Graph UBP-Transport zeigt die UBP, die durch den Transport entstehen. Der Schnittpunkt der beiden Kurven hier liegt bei 2.439,97 km und zeigt auch hier die Grenze, ab der durch den Transport mehr Umweltbelastungen entstehen als durch den Produktions- und Entsorgungsprozess.

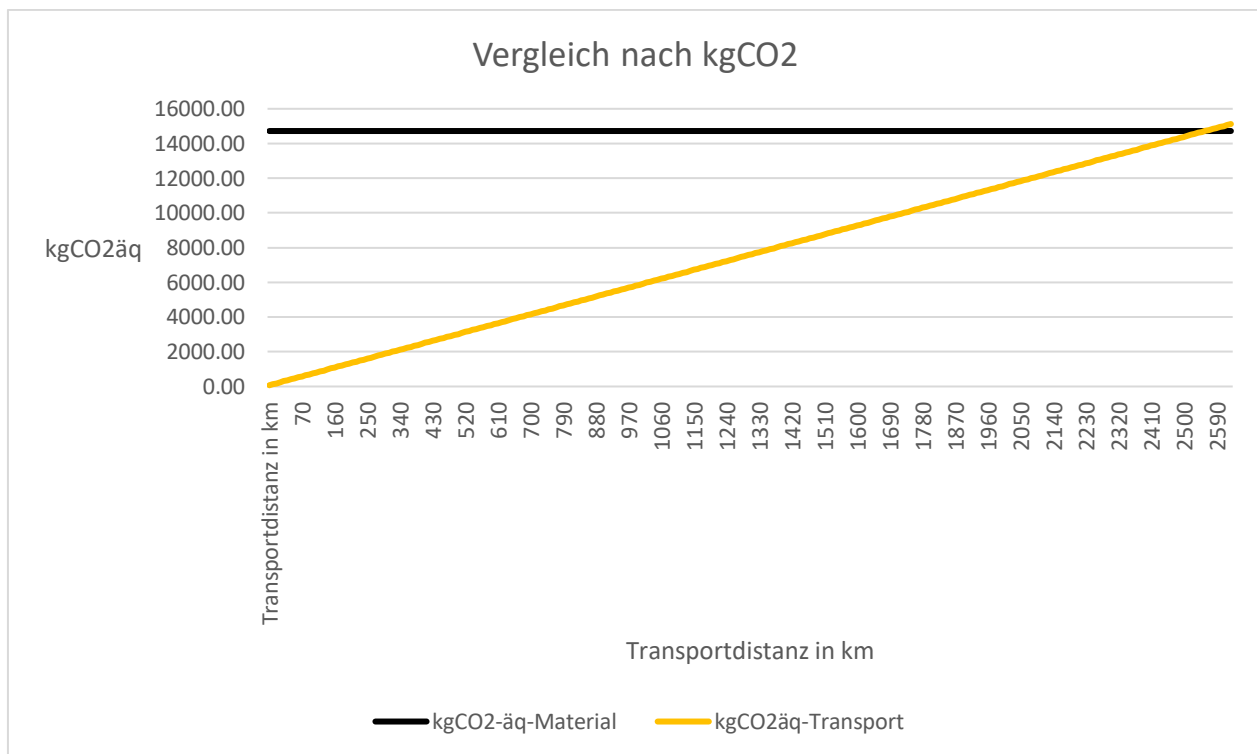
Abbildung 16: UBP - Transportdistanz Stahlträger



Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 17 wird das Verhältnis der entstehenden THG-Emissionen visualisiert. Der gleichbleibende Graph stellt die durch die Entsorgung und Neubeschaffung der Stahlträger entstehenden Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten dar. Der Graph kgCO₂-äq-Transport zeigt die entstehenden THG-Emissionen in Abhängigkeit zur Transportdistanz. Ab einer Transportdistanz von 2.579,05 km entstehen durch den Transport mehr CO₂-Emissionen als durch den Produktions- und Entsorgungsprozess.

Abbildung 17: THG-Emissionen - Transportdistanz Stahlträger



Quelle: Eigene Darstellung

Aus dem ökonomischen Vergleich gehen die geringsten maximalen Transportdistanzen hervor und somit sind diese für den gesamthaften Vergleich maßgebend. Eine mögliche Transportdistanz von 2.041,5 km ist für eine solche Menge an Stahlträgern sehr beachtlich und die Wahrscheinlichkeit, dass es innerhalb dieser Transportdistanz eine Baustelle mit dem Bedarf nach solchen Materialien gibt, ist ebenfalls sehr hoch. Die Transportdistanz von 2.041,5 km bietet sogar die Möglichkeit, die Materialien deutlich über die Schweizer Landesgrenzen hinaus transportieren zu können und macht damit die großen Einsparmöglichkeiten durch die Wieder- und Weiterverwendung von Stahlprofilen deutlich.

Kunststoffrohre

Ein beispielhafter Vergleich für Kunststoffrohre liefern insgesamt 3.000 m Kabelschutzrohre mit einem Durchmesser von 100 mm, welche auf einer Tiefbaubaustelle nicht verbaut wurden und übriggeblieben sind. Da die Baustelle geräumt werden muss, sind die Kabelschutzrohre abzutransportieren. Es wird angenommen, dass Baustelle B, welche 150 km entfernt liegt, diese Kabelschutzrohre verbauen kann. So wird der Transport von Baustelle A zu Baustelle B über 150 km mit der Entsorgung und Neubeschaffung der Materialien ökonomisch und ökologisch miteinander verglichen.

Im ersten Beispiel wird davon ausgegangen, dass der Wert der übrigen Kabelschutzrohre vernachlässigt wird. Für die Entsorgung der Kabelschutzrohre als Bausperrgut mit einer durchschnittlichen Entsorgungsgebühr von 258,32 CHF/t zuzüglich des Transports fallen Kosten von 1.454,87 CHF an. Die Neuanschaffung der Kabelschutzrohre mit einem Preis von 11,65 CHF/m zuzüglich Transport würde Baustelle B mit insgesamt 35.575,60 CHF belasten. Die Gesamtkosten der Entsorgung und Neubeschaffung summieren sich somit auf insgesamt 37.030,47 CHF.

Hiergegen stehen die Transportgebühren der Kabelschutzrohre über 150 km von Baustelle A zu Baustelle B mit insgesamt 717,00 CHF. Es ergibt sich eine Ersparnis von 36.313,47 CHF, wenn die Materialien für die Weiterverwendung auf Baustelle B weitertransportiert werden.

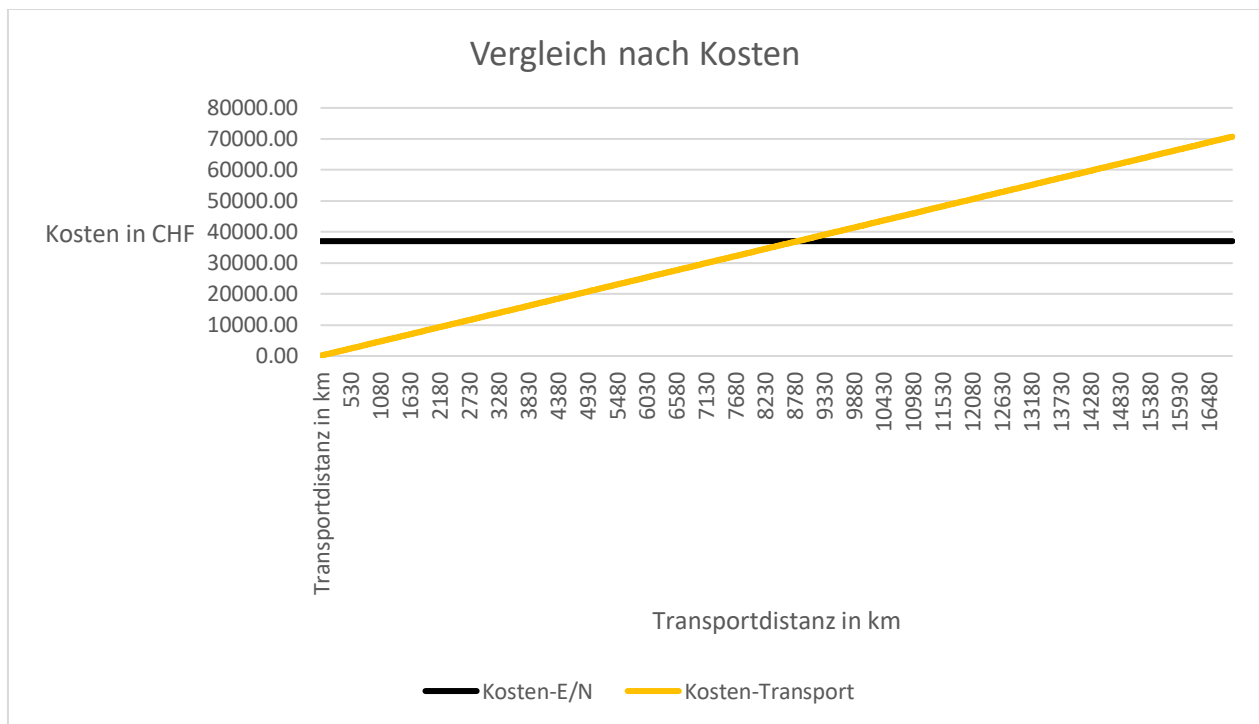
Im zweiten Beispiel wird die Situation mit Randbedingungen betrachtet, welche die mit der Wiederverwendung zusammenhängenden Kosten deutlich erhöhen. Es wird angenommen, dass Baustelle B der Baustelle A 50% des Neupreises für die Rohre bezahlt. Eine weitere Annahme ist, dass den Baustellen generell vom Händler 30% Unterrabatt gewährleistet wird. Baustelle A erhält von Baustelle B somit 12.232,50 CHF und zahlt keine Entsorgungsgebühren. Für Baustelle B fallen die genannten 12.232,50 CHF und die Transportgebühren von 717 CHF, also insgesamt 12.949,5 CHF, an. Das entspricht 12.141,10 CHF weniger als die Neuanschaffung mit 30% Unternehmerrabatt. Das entspricht noch immer einer Einsparung von knapp der Hälfte der Neubeschaffung mit 30% Rabatt durch die Weiterverwendung der Rohre.

Aus dem ökologischen Vergleich der Entsorgung und Neubeschaffung mit der Weiternutzung der Kabelschutzrohre auf der 150 km entfernten Baustelle geht eine Ersparnis von 32.739.820,55 UBP hervor. Die hierdurch eingesparten UBP können die jährliche Erzeugung von 1,5 durchschnittlichen Schweizer Personen abdecken (BAFU, 2011). Treibhausgas-Emissionen könnten hierdurch in einer Höhe von 25.955,12 kgCO₂-äq eingespart werden, was über dem THG-Emissionsausstoß von zwei durchschnittlichen Schweizer Personen im Jahr 2020 steht (BAFU, 2023b).

In den folgenden Abbildungen 18, 19 und 20 sind die Kosten sowie Umwelteinwirkungen in Abhängigkeit der möglichen Transportdistanzen für den gesamten Vergleich dargestellt.

Wie in Abbildung 18 ersichtlich, lassen sich aus ökologischer Perspektive die Kabelschutzrohre 8.863,49 km transportieren, bis durch den Transport Mehrkosten entstehen. Berücksichtigt werden die Entsorgungskosten sowie die vollen Neuanschaffungskosten.

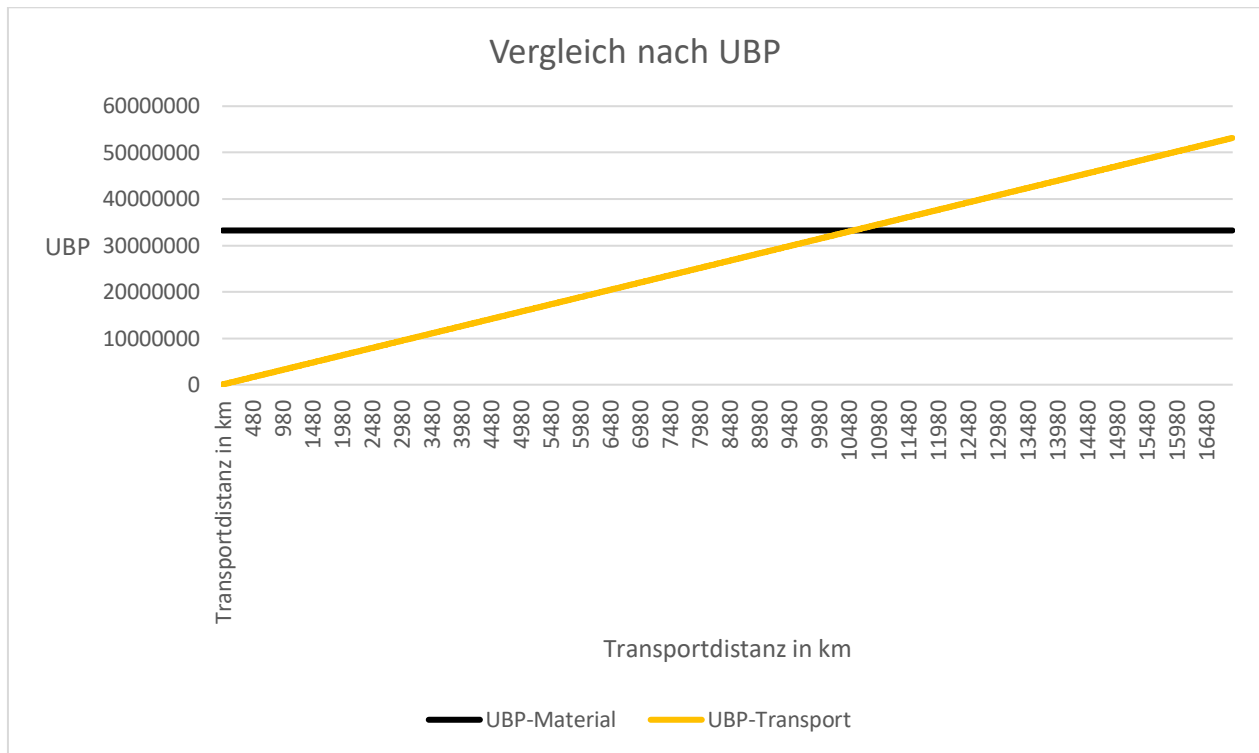
Abbildung 18: Kosten - Transportdistanz Kabelschutzrohre



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 19 zeigt, dass die angegebene Menge der Kabelschutzrohre knapp 10.590,83 km transportiert werden könnten, um dieselbe Menge an Umweltbelastungen (UBP) zu erzeugen, wie durch die Entsorgung und Neubeschaffung verursacht werden.

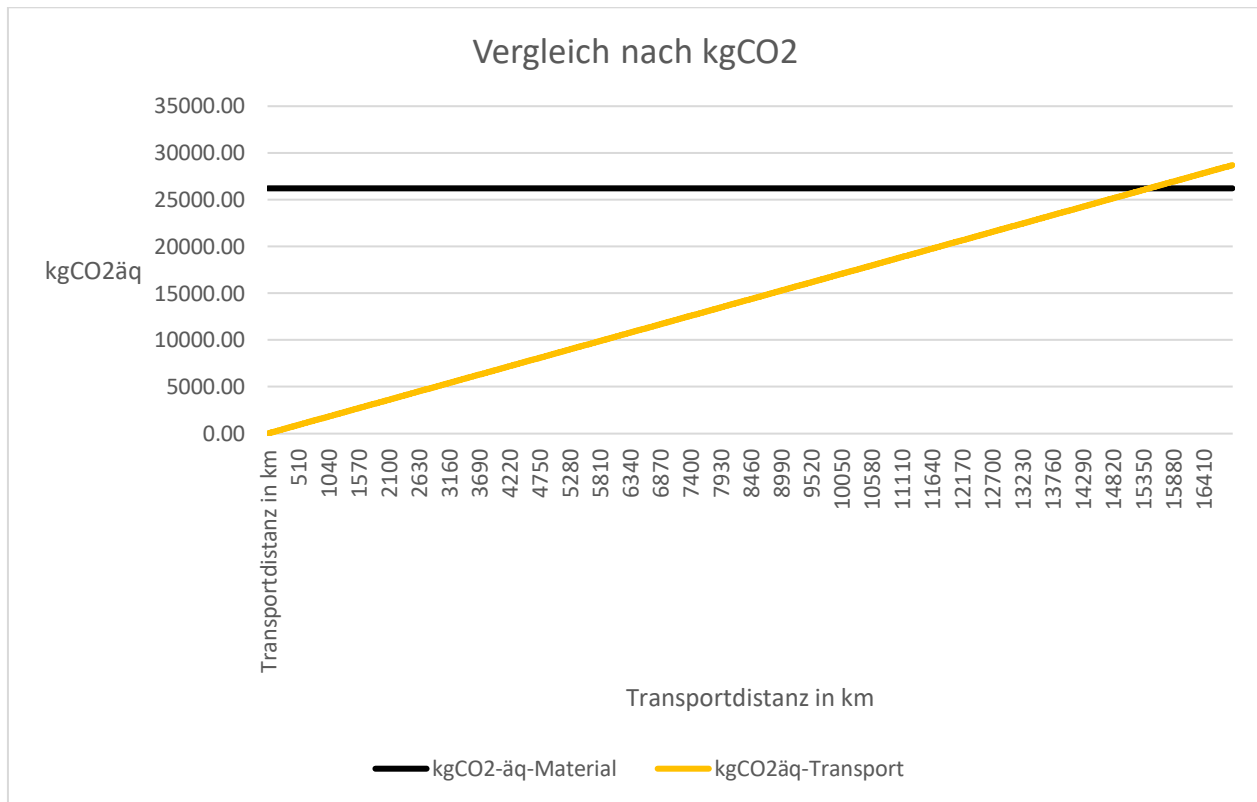
Abbildung 19: UBP - Transportdistanz Kabelschutzrohre



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 20 zeigt, dass ein Transport von 15.483,05 km die gleiche Menge an THG-Emissionen in CO₂-Äq erzeugen würde, wie durch die Prozesse der Entsorgung und Neuanschaffung entstehen würden.

Abbildung 20: THG-Emissionen - Transportdistanz Kabelschutzrohre



Quelle: Eigene Darstellung

Die geringstmögliche Transportdistanz errechnet sich hier aus dem ökologischen Vergleich. Der Transport dieser Kabelschutzrohre über 8.863,49 km verdeutlicht, wie weitreichend Bemühungen zur Weiternutzung der übrigen Kabelschutzrohre angestellt werden könnten, anstatt diese entsorgen zu lassen, auch wenn die Entsorgung und Neuanschaffung oft eine einfachere Lösung darstellt. Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit wird kein Transport über solch eine weite Distanz für diese Menge an Kabelschutzrohren organisiert werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass im Umkreis von 8.863,49 km Transportkilometer eine Baustelle mit dem Bedarf nach diesen Kabelschutzrohren liegt, ist jedoch sehr hoch.

Aushub

Inwiefern ein Weitertransport von kiesigem Aushub ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist, wird in diesem Beispiel erarbeitet. Betrachtet werden ebenfalls zwei Baustellen. Auf Baustelle A fällt kiesiges Aushubmaterial infolge eines Baugrubenaushubs an. Auf Baustelle B, welche 20 km entfernt liegt, wird kiesiges Erdmaterial zum Hinterfüllen und zum Errichten einer Baustraße benötigt. Infolge des Baugrubenaushubs müssen ca. 755 m³ Erdmaterial abtransportiert werden, was unter Annahme einer durchschnittlichen Dichte von 1,85 t/m³, welche im Anhang 2 ermittelt wurde, einer Gesamtmasse von 1.400 t entspricht.

Die Kosten für die Entsorgung fallen – wie in Kapitel 3.3 ermittelt und nach der Berechnung von Kapitel 4.1.3 hergeleitet – in einer Höhe von insgesamt 39.622,93 CHF an. Die Neubeschaffung derselben Menge Wandkies inklusiv Liefergebühren betragen nach den Berechnungen aus Kapitel 4.1.3 29.799,90 CHF. Insgesamt kommen durch die Entsorgung und Neubeschaffung somit Kosten in Höhe von 69.422,83 CHF auf die Baustellen zu.

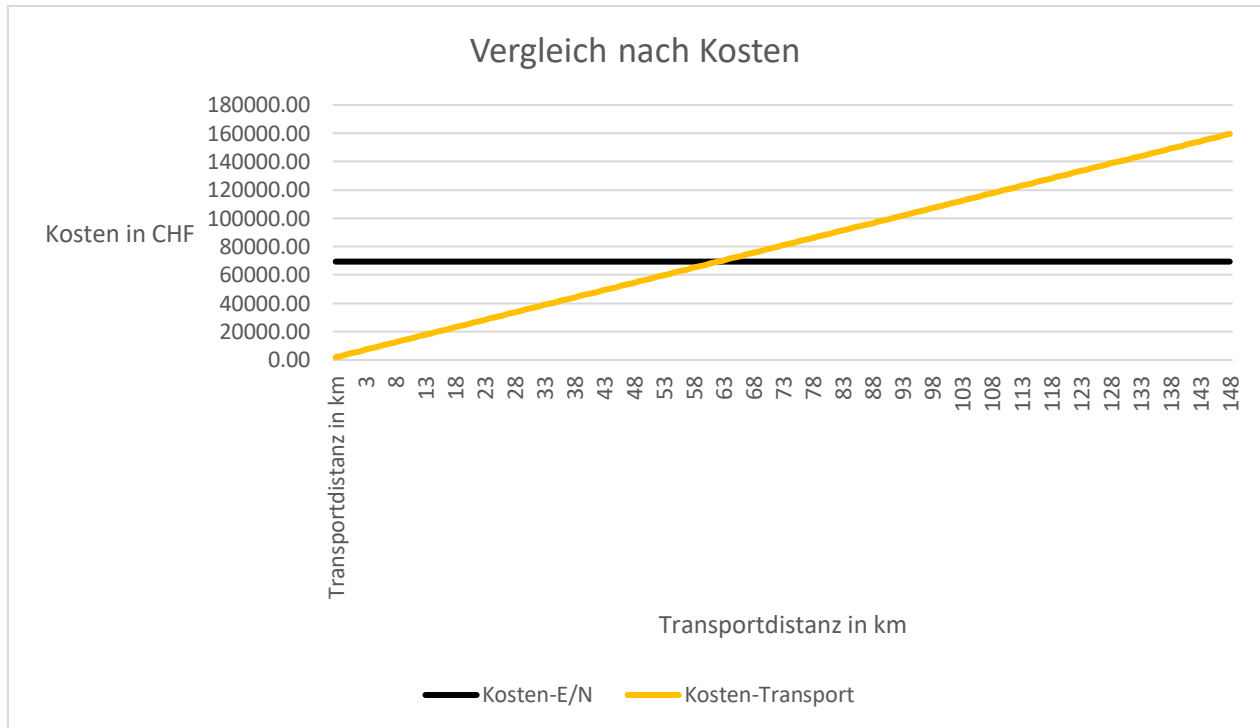
Demgegenüber steht der direkte Transport von Baustelle A auf Baustelle B, durch den Kosten in Höhe von 23.000,72 CHF zustande kommen. Somit ist die Weiterverwendung des Aushubmaterials 46.422,11 CHF kostengünstiger als die Entsorgung und Neubeschaffung.

Aus dem ökologischen Vergleich geht eine Ersparnis von 50.173.310,72 UBP durch die Weiterverwendung gegenüber der Entsorgung und Neubeschaffung hervor. Das entspricht ungefähr der durch den jährlichen Konsum von 2,5 Schweizer Personen verursachten UBP (BAFU, 2011). In THG-Emissionen umgerechnet, beträgt die Ersparnis 14.388,49 kgCO₂-äq, was deutlich über dem Betrag der durchschnittlichen THG-Emissionen pro Jahr entspricht, welche der gesamte Konsum einer Schweizer Person erzeugt (BAFU, 2023b).

In den Abbildungen 21, 22 und 23 sind die verursachten Kosten und Umwelteinwirkungen in Abhängigkeit der Transportdistanzen dargestellt.

Bis zu einer Transportdistanz von 64,18 km ist ein Weitertransport der genannten Menge Aushubmaterial unter reiner Kostenbetrachtung rentabel. Das zeigt der Schnittpunkt der beiden Kurven in Abbildung 21.

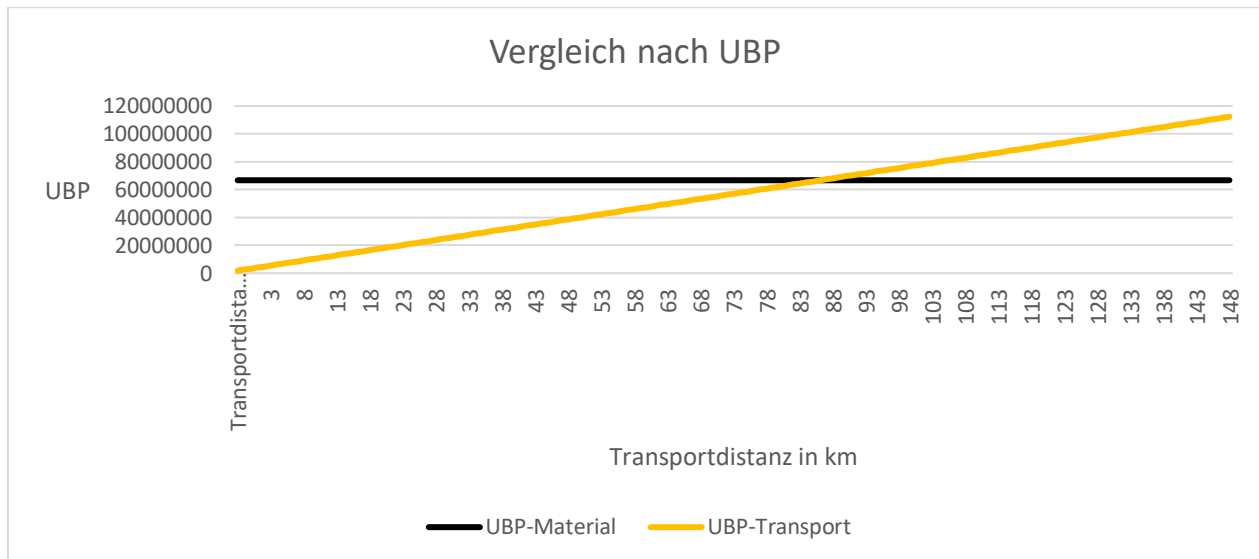
Abbildung 21: Kosten - Transportdistanz Aushub



Quelle: Eigene Darstellung

Wie in Abbildung 22 dargestellt, ist ein Transport bis zu einer Distanz von 88,13 km nach der Bewertung des Transports durch UBP ökologisch rentabel.

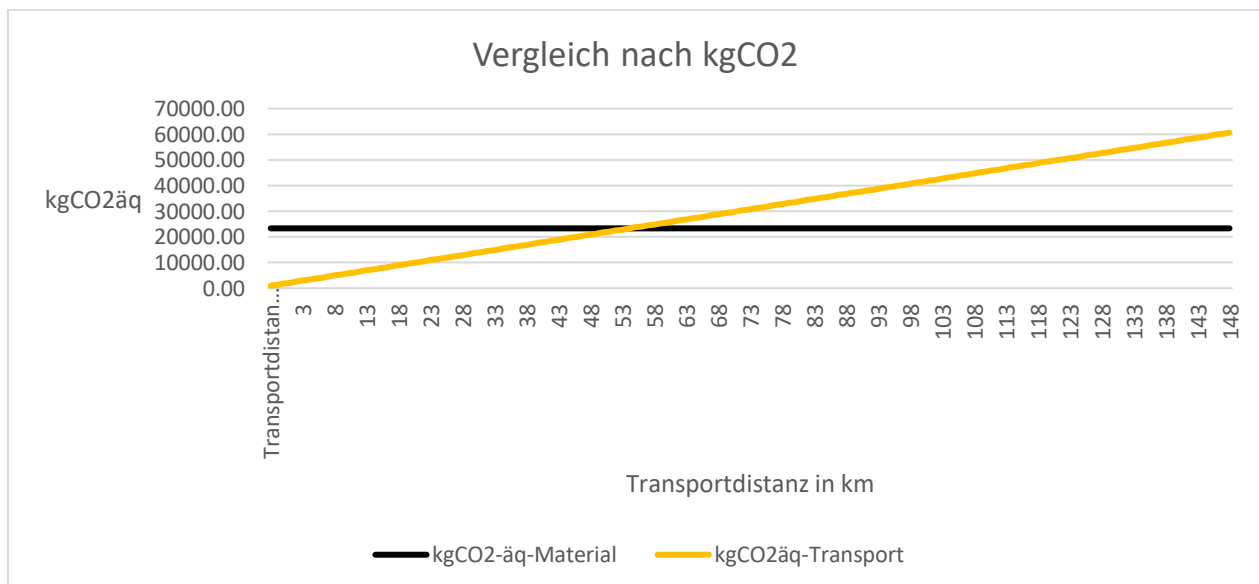
Abbildung 22: UBP - Transportdistanz Aushub



Quelle: Eigene Darstellung

Die Menge von Treibhausgasemissionen durch den Transport übertrifft die der Entsorgung und Neubeschaffung der genannten Menge Wandkies ab einer Transportdistanz von über 56,19 km, wie aus Abbildung 23 abgelesen werden kann.

Abbildung 23: THG-Emissionen - Transportdistanz Aushub



Quelle: Eigene Darstellung

Die möglichen Transportdistanzen sind im Vergleich zu den zuvor aufgeführten Materialien gering. Das lässt sich dadurch erklären, dass der Aushub als natürliches unverarbeitetes Produkt mit einer hohen Masse und im Verhältnis geringen Preis betrachtet wird. Schüttgüter und speziell Materialien mit geringer oder keiner Aufbereitung sind generell eher standortgebundene Materialien. Da Kies in vielen Bereichen in der Schweiz abgebaut werden kann, machen große Transportdistanzen unabhängig von dieser Arbeit keinen Sinn. So liegen die Ergebnisse in einem erwarteten Rahmen. Die mögliche Transportdistanz, die ökologisch sinnvoll ist, liegt nach UBP-Bewertung mit 80,63 km deutlich über der Bewertung durch emittierte Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten. Das kann durch die Berücksichtigung von zusätzlichen Umwelteinwirkungen durch die Methode der ökologischen Knappheit erklärt werden. In den UBP wird bspw. die Landnutzung berücksichtigt. Die Landnutzung stellt bei der Deponierung und Gewinnung von Aushub einen wesentlichen Faktor bei der Berücksichtigung von Umwelteinwirkungen dar. Deshalb lässt der Vergleich nach der UBP-Methode einen Transport über eine größere Distanz zu als aus dem Vergleich durch die verursachten THG-Emissionen (*Umtec Technologie AG*, o. J.).

Zuvor wird berechnet, welche Transportdistanzen maximal möglich sind, ohne durch den Transport Kosten oder Umwelteinwirkungen zu verursachen, die über denen der üblichen Handhabung liegen. Die möglichen Transportdistanzen für die berechneten Beispiele der unterschiedlichen Materialien lassen sich wie die benötigten Energien für Herstellung und Entsorgung pro Gewicht, welche ebenfalls in der KBOB/ecobau-Liste aufgeführt sind, herabstufen und zeigen damit, dass die benötigten Energien in Zusammenhang mit den Kosten der Materialien sowie der Umwelteinwirkungen stehen. Transportdistanzen von Aushub sind in den betrachteten Vergleichen am geringsten, wie auch der Energiebedarf pro Masse. Darauf folgen die möglichen Transportwege des Stahls und ebenso wie die zur Produktion und Entsorgung des Stahls benötigten Energien. Am weitesten lassen sich Kunststoffrohre zur Wiederverwendung transportieren, welche auch am meisten Energie für die Produktion und Entsorgung pro Masse benötigen (KBOB et al., 2023).

Die geringen Werte für Transportdistanzen von Aushub richten sich nach dem im Vergleich zu Stahl oder Kunststoff deutlich geringeren Wert pro Masse, welcher sich nach dem großen Vorkommen in der Schweiz und auch nach dem geringen

Bearbeitungsaufwand, welcher hier nur als reiner Abbau betrachtet wird, richtet. Innerhalb der möglichen Transportdistanz von ca. 56 km können die Einsparungen aufgrund hoher Massen, die hier anfallen, dennoch sehr hoch sein. Generell sind Aushubmaterialien eher standortgebunden, fallen allerdings auch, abhängig nach Baugrund, auf fast jeder Baustelle an. Daher ist es wichtig, sie im Rahmen der Wieder- und Weiterverwendung in Betracht zu ziehen.

Stahl zeigt trotz einer hohen Recyclingquote von fast 100% und seines hohen Rohstoffwerts, welcher hier als Vergütung bei der Abgabe von Stahl anfällt, große Einsparmöglichkeiten im Bereich der Kosten und noch höhere im Bereich der Reduktion von Umwelteinwirkungen (Klingler & Savi, 2021). Die aus dem ökonomischen Vergleich hervorgehende geringstmögliche Transportdistanz von 2.041,5 km, die im Rahmen der Entsorgung und Neubeschaffung liegt, lässt einen Transport zur Weiternutzung von Stahl deutlich über die Landesgrenzen der Schweiz zu. Mit hoher Wahrscheinlichkeit lässt sich innerhalb dieser Distanz eine Baustelle finden, welche die Stahlbauteile verbauen oder nutzen könnte. Die Transportdistanzen des ökologischen Vergleichs nach UBP mit 2439,97 km und nach CO₂-Äquivalenten mit 2579,05 km zeigen, dass auch unabhängig von Veränderungen der Ergebnisse des ökonomischen Vergleichs durch Unternehmerkosten die Reduktionspotentiale der Umweltbelastungen so hoch sind, dass die Koordination der Wieder- und Weiterverwendung gerechtfertigt werden kann. Hinzu kommt die zukünftige positive Gewichtung von klimaschützenden Maßnahmen in Ausschreibungswettbewerben, wie am Beispiel der Ausschreibung für das Projekt 4-Spurausbau Bülach-Hardwald aufgezeigt. Hier werden die von den Bauunternehmen verwendeten Materialien und Maschinen mit Ökobilanzdaten der UBP bewertet, sodass die Weiternutzung gebrauchter Baumaterialien positiv ins Gewicht fällt.

Das im Kapitel 6 berechnete Beispiel für Kabelschutzrohren aus PE zeigt mit der geringstmöglichen Transportdistanz von 8.863,49 km aus dem Kostenvergleich klar das enorme Einsparpotential. Die Mehrkosten und Mehremissionen, welche durch den Transport von leichten Materialien und damit zu gering ausgelasteten LKWs entstehen, werden ebenfalls berücksichtigt. Auch wenn durch Unternehmerrabatte und sonstige Veränderungen der Kosten die monetären Einsparungen geschmälert würden, sprechen die Reduktionspotentiale der Umweltbelastungen für sich. Aus dem ökologischen Vergleich gehen nach

UBP 10.590,83 km und nach CO₂-Äquivalenten 15.483,05 km mögliche Transportdistanz mit dem LKW-Transport hervor, welche Umweltauswirkungen erzeugen, die denen der Entsorgung und Neubeschaffung der Baumaterialien entsprechen würden. Mögliche Transportdistanzen in einer solchen Höhe wurden nicht erwartet und werden in solch einem Ausmaß auch nie genutzt werden. Sofern Transparenz über den Bedarf anderer Baustellen besteht, ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Baustelle innerhalb dieser Distanz die Materialien benötigt, sehr hoch. Bei Ausschreibungskriterien mit Wertung der Baumaterialien nach Ökobilanzdaten könnten durch die Wieder- und Weiterverwendung von Kunststoffrohren einige UBP eingespart werden und damit könnte ein besseres Ergebnis im Wettbewerb erzielt werden.

7. Schlussfolgerung und Ausblick

Beurteilung der erhobenen Daten

Bei den Kosten, welche für die ökonomischen Vergleiche der Fälle genutzt werden, handelt es sich um öffentliche Daten. Trotz der Betrachtung der Fälle aus der Sicht von Bauunternehmen werden keine Rabatte oder vergünstigten Kosten aufgrund langer Geschäftsbeziehungen oder Ähnlichem berücksichtigt. Die Material- und Entsorgungskosten entstammen Preislisten, welche auf Webseiten der Händler zur Verfügung stehen und enthalten damit keine Unternehmerrabatte. Auch Transportkosten wurden nach öffentlich zugänglichen Regietarifen pro Einsatzstunde berechnet. Es handelt sich dabei um die Abrechnungstarife, welche nach effektivem Zeitaufwand berechnet werden und damit keine Vergünstigungen durch höhere Auftragsvolumen, Verhandlungen oder Geschäftsbeziehungen beinhalten. Bei den Regietarifen handelt es sich um die Abrechnungstarife, welche nach effektivem Zeitaufwand berechnet werden. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Kosten für Material und Transport für Bauunternehmen oft geringer ausfallen. Die Kosten von Entsorgung und Neubeschaffung bestehen im Wesentlichen aus den Material- und Entsorgungskosten und die Kosten von Wieder- und Weiterverwendung bestehen im Wesentlichen aus den Transportkosten. Im ökonomischen Vergleich stehen sich die Fälle und damit auch die Kosten gegenüber. Bei einer Reduzierung der tatsächlichen Kosten für Bauunternehmen kann davon ausgegangen werden, dass sich auch die Kosten beider Fälle reduzieren und es damit zu keinen großen Veränderungen der Ergebnisse kommt. Es muss jedoch beachtet werden, dass es bei den Kosten generell, je nach Unternehmen und Geschäftsbeziehungen, zu Preisunterschieden kommen kann.

Die Daten, die zur Berechnung der ökologischen Vergleiche der Fälle für die Materialien dienen, entstammen der KBOB/ecobau-Liste für Ökobilanzdaten im Baubereich. Die UBP beziehen sich auf die Situation in der Schweiz mit ihren Umweltschutzziele und die CO₂-Äquivalenten decken die THG-Emissionen inklusive Versorgungskette ab. Die Ökobilanzdaten der Materialien werden dadurch sehr genau abgebildet. Auch die Umweltauswirkungen der Transporte können damit auf tkm genau berechnet werden. Für die Rückfahrten der Transport-LKWs, bei welchen es sich um Leerfahrten handelt, werden dieselben

Werte wie für die beladenen Fahrten berechnet. Somit fällt die Transportbilanz im Allgemeinen eher höher aus, als diese tatsächlich sind. Das lässt die Einsparungen der ökologischen Vergleiche damit konservativer ausfallen und gibt geringere Werte für die möglichen Transportdistanzen aus den ökologischen Vergleichen wieder. Die Nutzung der durchschnittlicher Ökobilanzdaten für den Gütertransport mit LKWs führt ebenfalls zu eher höheren berechneten Umwelteinwirkungen. Die Nutzung von neuesten und möglichst großen LKWs führt zu geringerer Erzeugung von Umwelteinwirkungen als die Nutzung durchschnittlicher LKWs (KBOB et al., 2023). Der Transport großer Mengen lässt die LKWs mit größerer Wahrscheinlichkeit optimal ausgelastet Güter transportieren und kann somit ebenfalls zur anteiligen Reduktion von erzeugten Umwelteinwirkungen führen.

Mithilfe der erstellten Excel-Tools können die Einsparungen ökonomischer sowie ökologischer Art berechnet werden, die im Fall der Wieder- und Weiterverwendung gegenüber dem Fall der Entsorgung und Neubeschaffung von gebrauchten Baumaterialien erreicht werden. Hierbei handelt es sich um Materialien, welche oft als übrige Materialien auf Tief- und Infrastrukturbaustellen anfallen und ohne Aufbereitungs- oder Prüfaufwände direkt weiterverwendet werden können. So sind gebrauchte Baumaterialien auf mögliche Fehlstellen zu prüfen. Bspw. müssen Stahlträger, welche bereits belastet wurden, geprüft werden, inwiefern die Belastbarkeit des ursprünglichen Zustands noch gewährleistet werden kann.

Im Allgemeinen wird durch die betrachteten Situationen, welche in Fall 1 oder Fall 2 ablaufen können, sowie durch die Eingrenzung der Materialien und Rahmenbedingungen nur ein kleiner Teil der in dem Reuse gebrauchter und übriger Baumaterialien entstehenden Kosten und Herausforderungen abgedeckt. Zu den wichtigsten Faktoren, welche die Wirtschaftlichkeit der Weiternutzung von Baumaterialien beeinflussen können und in den Beispielen berücksichtigt wurden, gehören die Material-, Entsorgungs-, und Transportkosten. Wie bereits erwähnt, könnten diese von Unternehmen zu Unternehmen schwanken. Durch die situative Eingrenzung und definierten Rahmenbedingungen wurden Kostenfaktoren, welche im Zusammenhang mit dem Reuse stehen, vernachlässigt. Dazu zählen Kosten für: die Lagerung sowie den Aus- und Rückbau von Materialien, die Koordination der Wieder- und Weiterverwendung, die Aufbereitung oder Reinigung der Materialien sowie mögliche Materialprüfungen und Laboruntersuchungen.

Generell ist die Weiternutzung von gebrauchten Materialien lukrativer, wenn der Wert der Materialien hoch ist. Die vorher aufgezählten Kosten können den Wert der gebrauchten Materialien jedoch steigern und somit die Wiederverwendung kostenmäßig unrentabler werden lassen. Wenn der Preis von gebrauchten Baumaterialien ökonomisch attraktiv ist, wird die Nachfrage nach den Produkten dieser Art steigen, was zu einem Marktwachstum führt, was wiederum zu einem höheren Absatz und steigenden Erlös aus dem Verkauf von gebrauchten Materialien führt (Dunant et al., 2017; Klang et al., 2003).

Mögliche Anreize für ein den Reuse beförderndes Preisverhältnis zwischen neuen und gebrauchten Materialien könnten neben der Anpassung der Kosten auf der Wiederverwendungsseite auch Preissteigerungen auf der Entsorgungs-/Neubeschaffungsseite sein. Zu solchen Preissteigerungen könnte es durch Erhöhung von Deponiekosten sowie der Steigerung von Produktionskosten der neuen Baumaterialien kommen (Chileshe et al., 2016; Dantata et al., 2005).

Preissteigerungen in der Produktion könnten unter anderem durch die Preissteigerungen der CO₂-Emissionen, welche auf emissionsreiche Güter umgelegt werden, verursacht werden. Im Europäischen-Emissionshandels-System (EU ETS) kommt es künftig weiter zur Verknappung der Zertifikate, was zu Preissteigerungen der CO₂-Emissionen, speziell in der Produktion emissionsreicher Güter wie beispielsweise Stahl und Zement, führt (Taubitz & Buhl, o. J.). Mit steigenden Preisen für neue Materialien wird die Wiederverwendung von gebrauchten Baumaterialien lukrativer. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass dadurch auch der LKW-Transport teurer werden kann. Je nachdem, wie stark mit ansteigenden Emissionskosten auf emissionsärmeren Transport gesetzt wird, entscheidet sich, inwieweit die Transportkosten steigen.

Durch bereits erwähnte Ausschreibungskriterien, welche ebenfalls klimaschonendes Bauen bewerten, könnte ebenfalls der Reuse angetrieben werden. Bauunternehmen können sich in Ausschreibungswettbewerben durch die Weiternutzung von Baumaterialien Vorteile erarbeiten, dadurch werden Aktivitäten in diesem Zusammenhang immer relevanter, um konkurrenzfähig bleiben zu können. Das könnte auch dem Problem entgegenwirken, dass aktuell noch kein wirklicher Markt für gebrauchte Baumaterialien besteht (Rose & Stegemann, 2018).

Ein weiterer wichtiger Faktor, der in den betrachteten Beispielen als gegeben angenommen wurde, ist die zeitliche Übereinstimmung von Angebot auf Baustelle A und Nachfrage auf Baustelle B. Da die Lagerhaltung vernachlässigt wird, müssen die Materialien direkt von einer auf die andere Baustelle transportiert werden können. Wenn eine Zwischenlagerung auf einer der beteiligten Baustellen möglich ist, ist die zeitliche Übereinstimmung nicht so kritisch.

Die technischen Anforderungen, welchen die Baumaterialien beim Wiedereinsatz gerecht werden müssen, werden in dieser Arbeit als ebenfalls gegeben angenommen. In der beispielhaft betrachteten Situation können die Baumaterialien von den beteiligten Fachkräften begutachtet, geprüft und aussortiert werden. Die Daten und Informationen zu den Produkten speziell zu Stahl und Kunststoff können mithilfe von Produktdatenblättern oder Webdaten erfolgreich aufgearbeitet werden.

Faktoren, welche die Weiternutzung von gebrauchtem Baumaterial ebenfalls stark einschränken können, sind rechtliche Barrieren wie bspw. die Pflicht, eine neue bauaufsichtliche Zulassung zu erlangen, bevor ausgebaute Bauteile weiterverwendet werden können, oder, dass kaum Normen und Zertifizierungen vorhanden sind, welche die Verantwortung der Beteiligten klarstellen (de Perrot & Friat-Massard, 2020; John & Stark, 2021). Es benötigt hier zwingend Anpassungen der Gesetzgeber zur Vereinfachung der Wiederverwendung gebrauchter Baumaterialien.

Akzeptanzprobleme, die rechtliche Ursachen haben können oder aus einer prinzipiellen Ablehnung gebrauchter Baumaterialien herrühren, gilt es generell für die Weiterwendung zu überwinden. Eine der wichtigsten Komponenten zur erfolgreichen Weiternutzung gebrauchter Baumaterialien ist die Akzeptanz aller Projektbeteiligten. In diesen Beispielen werden als Beteiligte hauptsächlich die an der Bauausführung involvierten Fachkräfte berücksichtigt. Generell ist allerdings zu beachten, dass es im Zusammenhang mit der Weiternutzung zu einem gewissen Mehraufwand in Koordination, Ausbau oder der Handhabung kommen kann. Es ist auch wahrscheinlich, dass sich gewohnte Arbeitsschritte hierdurch ändern können und eine Anpassung der Beteiligten unausweichlich ist. Die Beteiligten selbst haben durch Weiterverwendung gebrauchter Baumaterialien oft keinen direkten monetären Vorteil und somit ist es notwendig, dass die Motivation, gebrauchte

Baumaterialien wiederzuverwenden, aus eigenem Interesse am Schutz des Klimas entsteht. In Zeiten, in denen der Klimaschutz so relevant wie nie zuvor ist, kann das Interesse bereits aus moralischen Gründen erwartet werden. Das genaue Potential der Einsparung von Umweltbelastungen durch die Weiternutzung ist nur schwer zu beziffern, allerdings ist das Potential in gesamtheitlicher Betrachtung sämtlicher Wirtschaftszweige sehr hoch. Wie in Kapitel 2.3 bereits erwähnt wurde, konsumierte die schweizerische Bauwirtschaft 2018 71,3% des gesamten konsumierten Materials. Dieser Anteil betrug 28,3% des in der Schweiz durch den Konsum verursachten Treibhauseffekts (EMPA, 2019).

Mithilfe der erstellten Excel-Tools können unter Angabe entsprechender Rahmenbedingungen schnell die Einsparungen von Kosten und Umweltbelastungen im Zusammenhang mit der Wieder- und Weiterverwendung von Baumaterialien berechnet werden. In Situationen, in denen auf einer Baustelle übriges, noch brauchbares Baumaterial anfällt, müssen rasche und klare Entscheidungen getroffen werden, inwiefern eine Weiternutzung sinnvoll ist. Die Excel-Tools unterstützen bei der Abwägung der Möglichkeiten und Entscheidung über die Handhabung der Baumaterialien. Wie durch das Kapitel der Ergebnisse ersichtlich, können dadurch unverhoffte Möglichkeiten zur Wieder- und Weiterverwendung von Baumaterialien aufgezeigt werden, welche den Blick auf die Nutzung dieser Materialien ändern können. In den betrachteten Beispielen können durch die Koordination von Materialien einer Baustelle, welche durch zwei Projektverantwortliche stattfinden kann, enorme Umwelteinwirkungen eingespart werden. Es müssen dafür grundsätzlich gewisse Rahmenbedingungen gegeben sein, allerdings sind die Einsparungen der Klimabelastung sehr hoch und die Aufwände dafür nur sehr gering.

8. Literaturverzeichnis

Allgemeine Geschäftsbedingungen & Transporttarife der HGC | HGC. (o. J.). Abgerufen

5. Dezember 2023, von <https://www.hgc.ch/de/agb>

BAFU. (o. J.). *Methode der ökologischen Knappheit.* Abgerufen 13. Dezember 2023, von

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-wirtschaft-und-konsum/fachinformationen-wirtschaft-und-konsum/methodische-grundlagen-von-oekobilanzen/methode-der-oekologischen-knappheit.html>

BAFU. (2011). *Gesamt-Umweltbelastung durch Konsum und Produktion der Schweiz.*

Bundesamt für Umwelt BAFU. file:///C:/Users/Nico/Downloads/gesamt-umweltbelastungdurchkonsumundproduktionderschweizkurzfass%20(3).pdf

BAFU. (2020, Dezember 30). *Emissionshandelssystem (EHS).* [https://www.bafu.ad-](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimawandel-stoppen-und-folgen-meistern/schweizer-klimapolitik/emissionshandel.html)

[min.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimawandel-stoppen-und-folgen-meistern/schweizer-klimapolitik/emissionshandel.html](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimawandel-stoppen-und-folgen-meistern/schweizer-klimapolitik/emissionshandel.html)

BAFU. (2023a, April 11). *Indikator Klima.* [https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html/aHR0cHM6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWRtaW4uY2gvUHVibG/ljL0FIbURId-](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html/aHR0cHM6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWRtaW4uY2gvUHVibG/ljL0FIbURId-GFpbD9pbmQ9S0wwMTImbG5nPWRIJIBhZ2U9aHR0/cHMIM2EIM-mYIMmZ3d3cuYmFmdS5hZG1pbi5jaCUyZmJhZnUIMm/ZkZWZy-aXRlbiUyZmhvbWUIMmZ0aGVtZW4IMmZ0aGVtYS10cmFI/Z2Vyc2VpdGUI-MmZ0cmFIZ2Vyc2VpdGUt-LWRhdGVuLS1pbmRpa2/F0b3Jlbi11bmQta2FydGVuJTJmdHJhZWdlcnN-laXRILS1pbmRp/a2F0b3JlbiUyZmluZGlrYXRvci10cmFIZ2Vyc2VpdGUuch-QuaH/RtbCZTdWJqPU4%3d.html)

[\[\\[\\\[LWRhdGVuLS1pbmRpa2/F0b3Jlbi-11bmQta2FydGVuJTJmdHJhZWdlcnN-\\\]\\\(https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html/aHR0cHM6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWRtaW4uY2gvUHVibG/ljL0FIbURId-GFpbD9pbmQ9S0wwMTImbG5nPWRIJIBhZ2U9aHR0/cHMIM2EIM-mYIMmZ3d3cuYmFmdS5hZG1pbi5jaCUyZmJhZnUIMm/ZkZWZy-aXRlbiUyZmhvbWUIMmZ0aGVtZW4IMmZ0aGVtYS10cmFI/Z2Vyc2VpdGUI-MmZ0cmFIZ2Vyc2VpdGUt-LWRhdGVuLS1pbmRpa2/F0b3Jlbi-11bmQta2FydGVuJTJmdHJhZWdlcnN-laXRILS1pbmRp/a2F0b3JlbiUyZmluZGlrYXRvci10cmFIZ2Vyc2VpdGUuch-QuaH/RtbCZTdWJqPU4%3d.html\\\)\\]\\(https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html/aHR0cHM6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWRtaW4uY2gvUHVibG/ljL0FIbURId-GFpbD9pbmQ9S0wwMTImbG5nPWRIJIBhZ2U9aHR0/cHMIM2EIM-mYIMmZ3d3cuYmFmdS5hZG1pbi5jaCUyZmJhZnUIMm/ZkZWZy-aXRlbiUyZmhvbWUIMmZ0aGVtZW4IMmZ0aGVtYS10cmFI/Z2Vyc2VpdGUI-MmZ0cmFIZ2Vyc2VpdGUt-</p></div><div data-bbox=\\)\]\(https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html/aHR0cHM6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWRtaW4uY2gvUHVibG/ljL0FIbURId-GFpbD9pbmQ9S0wwMTImbG5nPWRIJIBhZ2U9aHR0/cHMIM2EIM-mYIMmZ3d3cuYmFmdS5hZG1pbi5jaCUyZmJhZnUIMm/ZkZWZy-</p></div><div data-bbox=\)](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html/aHR0cHM6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWRtaW4uY2gvUHVibG/ljL0FIbURId-</p></div><div data-bbox=)

[laXRILS1pbmRp/a2F0b3JlbiUyZmluZGlrYXRvci10cmFIZ2Vyc2VpdGUuch-QuaH/RtbCZTdWJqPU4%3d.html](https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html/aHR0cHM6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWRtaW4uY2gvUHVibG/ljL0FIbURId-GFpbD9pbmQ9S0wwMTImbG5nPWRIJIBhZ2U9aHR0/cHMIM2EIM-mYIMmZ3d3cuYmFmdS5hZG1pbi5jaCUyZmJhZnUIMm/ZkZWZy-aXRlbiUyZmhvbWUIMmZ0aGVtZW4IMmZ0aGVtYS10cmFI/Z2Vyc2VpdGUI-MmZ0cmFIZ2Vyc2VpdGUt-LWRhdGVuLS1pbmRpa2/F0b3Jlbi-11bmQta2FydGVuJTJmdHJhZWdlcnN-laXRILS1pbmRp/a2F0b3JlbiUyZmluZGlrYXRvci10cmFIZ2Vyc2VpdGUuch-QuaH/RtbCZTdWJqPU4%3d.html)

- BAFU. (2023b, April 11). *Klima: Das Wichtigste in Kürze*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--das-wichtigste-in-kuerze.html>
- BAFU, B. für U. (2021). *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaftskonsum/publikationen-studien/publikationen/oekofaktoren-schweiz.html>
- Bauforumstahl. (o. J.). *Arbeitshilfe_05-05.pdf*. Abgerufen 1. Dezember 2023, von https://bauforumstahl.de/upload/documents/publikationen/arbeitshilfen/Arbeitshilfe_05-05.pdf
- BDSV, B. D. S. E. e.V. (o. J.). *Stahlschrottsorten*. Abgerufen 6. Dezember 2023, von <https://www.bdsv.org/die-branche/stahlschrottsorten/>
- BMWK-Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (o. J.). *Abkommen von Paris*. Abgerufen 15. November 2023, von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html>
- Bundesamt für Umwelt BAFU, O. fédéral de l'environnement O. | U. federale dell'ambiente. (2022, Mai 3). *Begriffserklärung Deponien*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-abfall/abfall--fachinformationen/abfallentsorgung/deponien.html>
- Chileshe, N., Rameezdeen, R., & Hosseini, M. R. (2016). Drivers for adopting reverse logistics in the construction industry: A qualitative study. *Engineering Construction & Architectural Management*, 23, 134–157. <https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2014-0087>
- CircularHub. (2023, März). *Zirkularität in der Schweizer Baubranche: Es stockt in der Umsetzung*. <https://circularhub.ch/magazin/details/zirkularitaet-in-der-schweizer-baubranche-es-stockt-in-der-umsetzung>

- da Rocha, C. G., & Sattler, M. A. (2009). A discussion on the reuse of building components in Brazil: An analysis of major social, economical and legal factors. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(2), 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.004>
- Dantata, N., Touran, A., & Wang, J. (2005). An analysis of cost and duration for deconstruction and demolition of residential buildings in Massachusetts. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.09.001>
- de Perrot, O., & Friat-Massard, M. (2020). *Wiederverwendung Bauen—Aktuelle Situation und Perspektiven: Der Fahrplan*. Salza.
- Dechantsreiter, U., Horst, P., Mettke, D. A., Schmidt, S. A. S., Knappe, F., Reinhardt, J., Theis, S., & Lau, J. J. (2015). *Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen*.
- Der Bundesrat. (2021). Langfristige Klimastrategie der Schweiz. URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050/klimastrategie-2050.html> (10.08. 2022). <http://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/langfristige-klimastrategie-der-schweiz.pdf>
- Dinkel, Dr. F. (2013, Juli). *Skript Ökobilanzen Lebenszyklusanalyse Life cycle analysis*. https://carbotech.ch/cms/wp-content/uploads/Oekobilanz-skript_2013.pdf
- Dunant, C. F., Drewniok, M. P., Sansom, M., Corbey, S., Allwood, J. M., & Cullen, J. M. (2017). Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.036>

Edenhofer, O., Flachsland, C., & Kornek, U. (2016). *Koordinierte CO₂-Preise: Zur Weiterentwicklung des Pariser Abkommens* (S. 69–78).

EMPA, M. S. & T. (2019). *Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Abfall und Rohstoffe 3003 Bern*.

Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV). (2023, August 10). Baden-Württemberg.de. <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/abfall-und-kreislaufwirtschaft/rechtliche-grundlagen/gesetze-verordnungen-und-sonstige-regelungen/mineralische-abfaelle/ersatzbaustoffverordnung>

Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, (2018). <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/2018-07-05/deu>

European Council, C. of the E. U. (o. J.). *5 facts about the EU's goal of climate neutrality*. Abgerufen 15. November 2023, von <https://www.consilium.europa.eu/en/5-facts-eu-climate-neutrality/>

FSKB. (o. J.). *Daten und Fakten – FSKB*. Abgerufen 30. November 2023, von <https://www.fskb.ch/kies/daten-und-fakten/>

Global Sustainability Standards Board. (2023). *Consolidated Set of the GRI Standards*.

Günthner, W. A., Kessler, S., & Sanladerer, S. (2006). *Transportlogistik am Bau*. Lehrstuhl für Fordertechnik Materialfluss Logistik.

Halstenberg, R. M., & Franßen, R. G. (2022, November 17). *Studie Regelwerke des Normungs- und technischen Zulassungswesens anhand des Themenkomplexes Recyclingverfahren und Weiter-/Wiederverwendung von Bauprodukten und Baustoffen* *Wiederverwendung_Bauprodukte_Roadmap_Studie.pdf*. https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Media/Veroeffentlichungen/Wiederverwendung_Bauprodukte_Roadmap_Studie.pdf

Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A., & Seggewies, J.-K. (2021). *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource* (Zweite, korrigierte Auflage). Detail Business Information GmbH.

Jahrbuch Logistik. 2017. (2017). Unikat Werbeagentur GmbH.

John, V., & Stark, T. (2021). *Wieder- und Weiterverwendung von Baukomponenten (RE-USE)*.

KBOB, ecobau, & IPB. (2023). *Oekobilanzdaten_ Baubereich_Donne_ecobilans_construction_2009-1-2022_v4.0 (6).xlsx*. https://www.kbob.admin.ch/dam/kbob/de/dokumente/Themen%20und%20Trends/Oekobilanzen/Oekobilanzdaten_%20Baubereich_Donne_ecobilans_construction_2009-1-2022_v4.0.xlsx.download.xlsx/Oekobilanzdaten_%20Baubereich_Donne_ecobilans_construction_2009-1-2022_v4.0.xlsx

KBOB, K. der B. L. der öffentlichen B. (o. J.). *Ökobilanzdaten im Baubereich*. Abgerufen 14. Dezember 2023, von https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html

Klang, A., Vikman, P.-Å., & Brattebø, H. (2003). Sustainable management of demolition waste—An integrated model for the evaluation of environmental, economic and social aspects. *Resources, Conservation and Recycling*, 38(4), 317–334. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00167-2](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00167-2)

Klingler, M., & Savi, D. (2021). *Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen*.

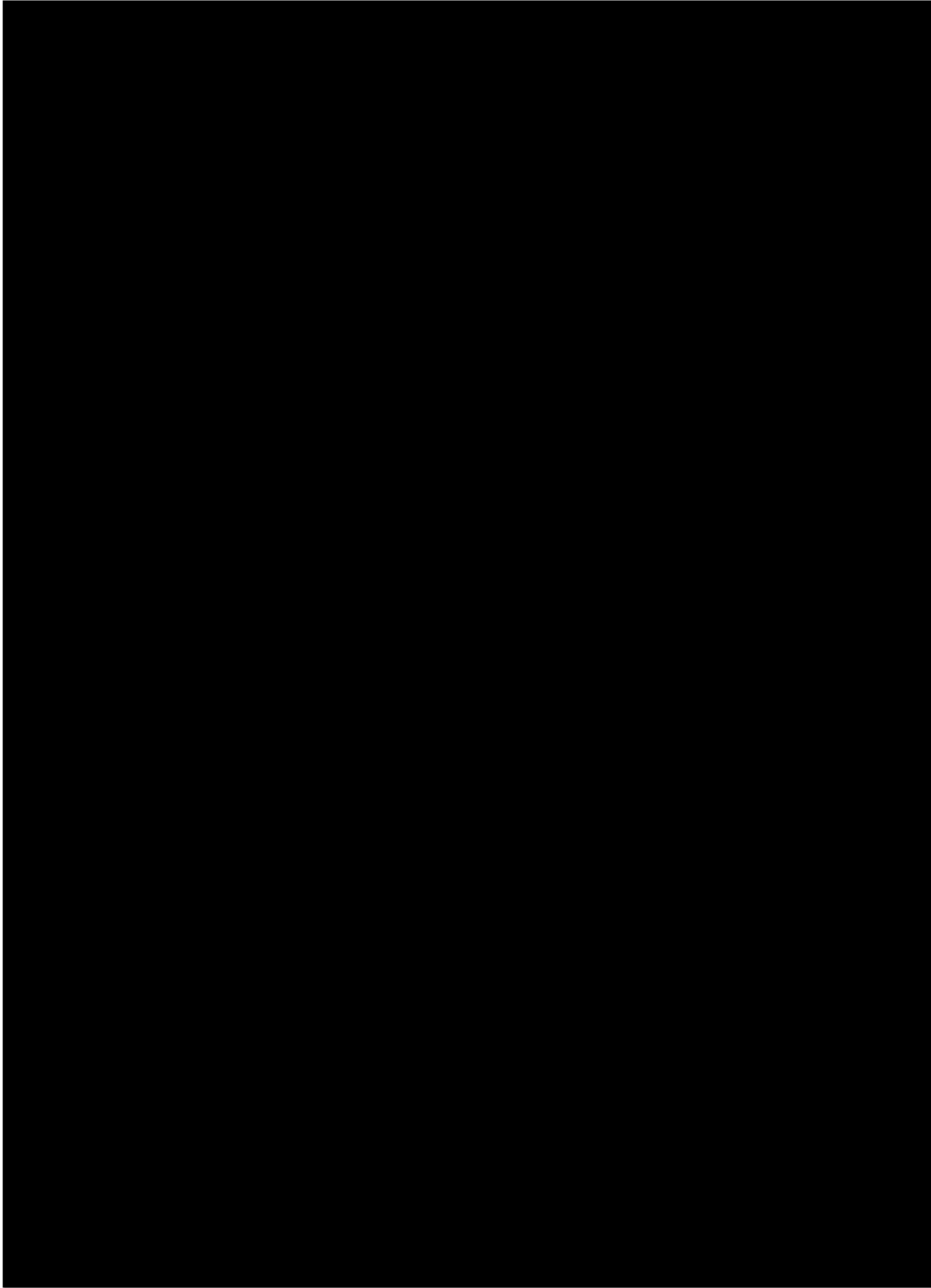
Küpfer, C., & Fivet, C. (2021). *Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion: Studie zur Förderung der Abfallreduktion und der Wiederverwendung in der Baubranche*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5131243>

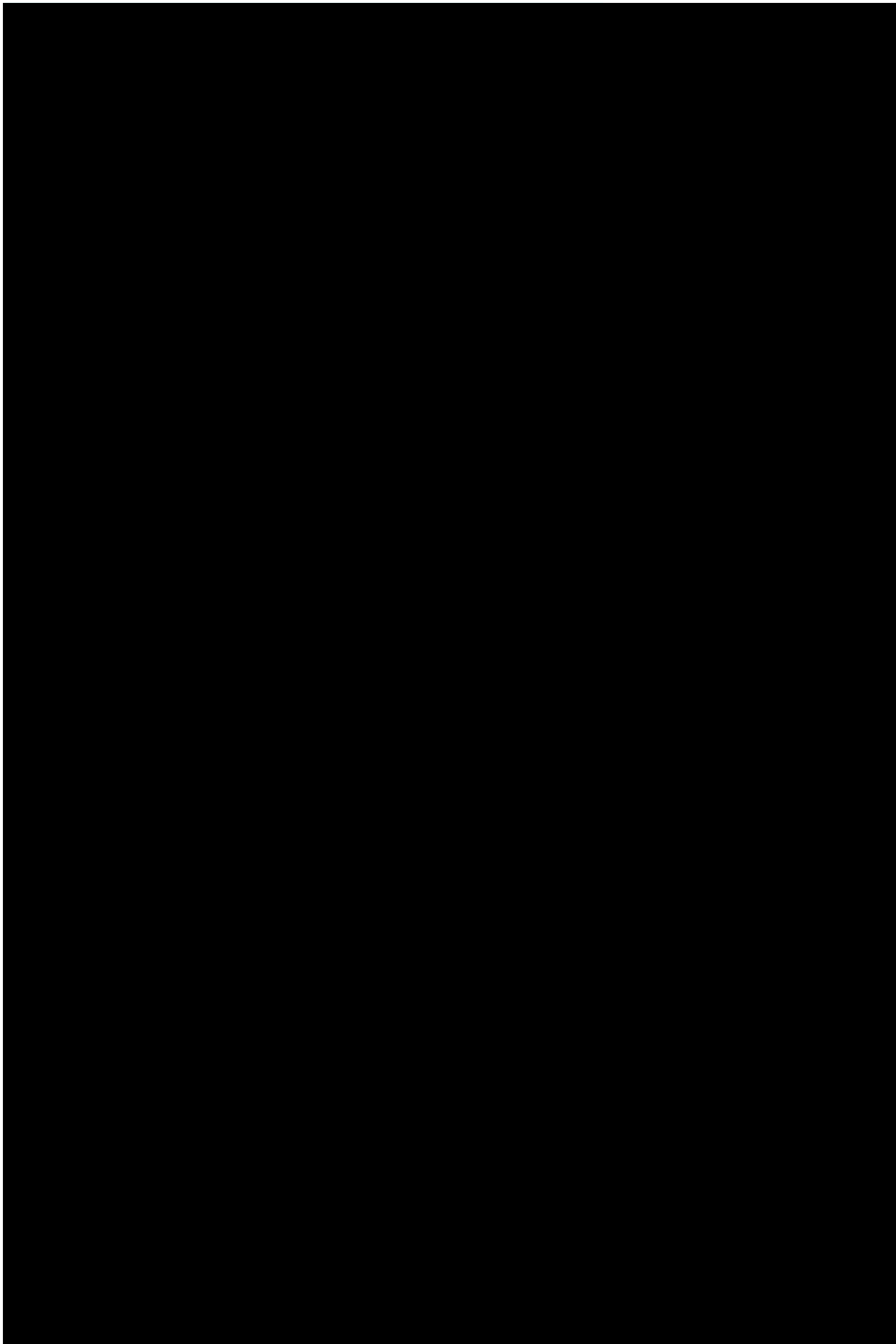
- Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr. (o. J.). *Öffentliche Ausschreibung Hannover 2023 B3/SSW Landwehrkreisel bis DB-Trog—VE 2—Rückbau / Neubau BW Leine und Leineflut Referenznummer der Bekanntmachung: 03_165827_140725 2023-10-04*. Abgerufen 28. November 2023, von https://ausschreibungen-deutschland.de/2044401_B3SSW_Landwehrkreisel_bis_DB-Trog_-_VE_2_-_Rueckbau__Neubau_BW_Leine_und_2023_Hannover
- Rakhshan, K., Morel, J.-C., Alaka, H., & Charef, R. (2020). Components reuse in the building sector – A systematic review. *Waste Management & Research*, 38, 347–370. <https://doi.org/10.1177/0734242X20910463>
- Rat der EU. (2023, Oktober 16). *Übereinkommen von Paris: Rat übermittelt aktualisierten NDC im Namen der EU und der Mitgliedstaaten*. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/10/16/paris-agreement-council-submits-updated-ndc-on-behalf-of-eu-and-member-states/>
- Rose, C., & Stegemann, J. (2018). From Waste Management to Component Management in the Construction Industry. *Sustainability*, 10, 229. <https://doi.org/10.3390/su10010229>
- Solenthaler Recycling AG. (o. J.). *Eisen und Stahl*. Abgerufen 8. Januar 2024, von <https://shop.sorec.ch/altmetall-ankauf/eisen>
- Statistik, B. für. (2023, November 27). *Leistungen nach Wirtschaftszweigen. Inländische schwere Fahrzeuge—2022 | Tabelle*. Bundesamt für Statistik. <https://dam-api.bfs.admin.ch/hub/api/dam/assets/28005531/master>
- Tatiya, A., Zhao, D., Syal, M., Berghorn, G. H., & LaMore, R. (2018). Cost prediction model for building deconstruction in urban areas. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1572–1580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.084>

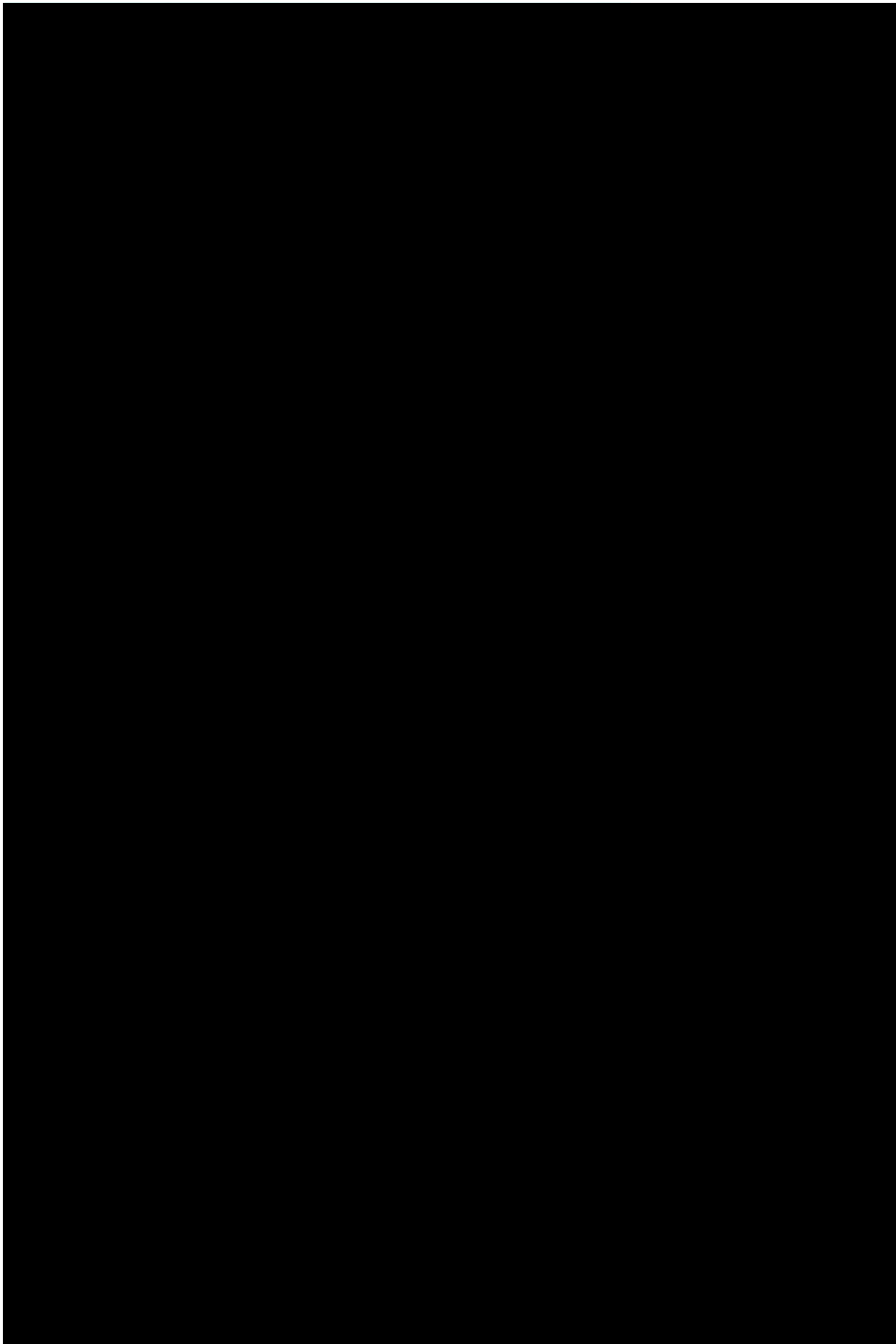
- Taubitz, P., & Buhl, C. (o. J.). *EU ETS: Wie stark steigen die CO₂-Preise bis 2030?* Abgerufen 23. November 2023, von https://www.ey.com/de_de/decarbonization/eu-ets-wie-stark-steigen-die-co-preise-bis-2030
- Umtec Technologie AG. (o. J.). Abgerufen 15. November 2023, von https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/organisation/baudirektion/tba/oekologisches/211020_reduktion_umweltbelastung_tba.pdf
- VBSA. (2023, November 30). *VBSA | ASED | ASIR – Kehricht-Verwertungs-Anlagen (KVA)*. <https://vbsa.ch/anlagegruppen/kva/>
- VDI. (2023). *Ökobilanz – DIN EN ISO 14040/44*. <https://www.ressource-deutschland.de/leitfaden-re/methoden/oekobilanz-din-en-iso-14040/44/>
- Yeung, J., Walbridge, S., & Haas, C. (2015). The role of geometric characterization in supporting structural steel reuse decisions. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.017>

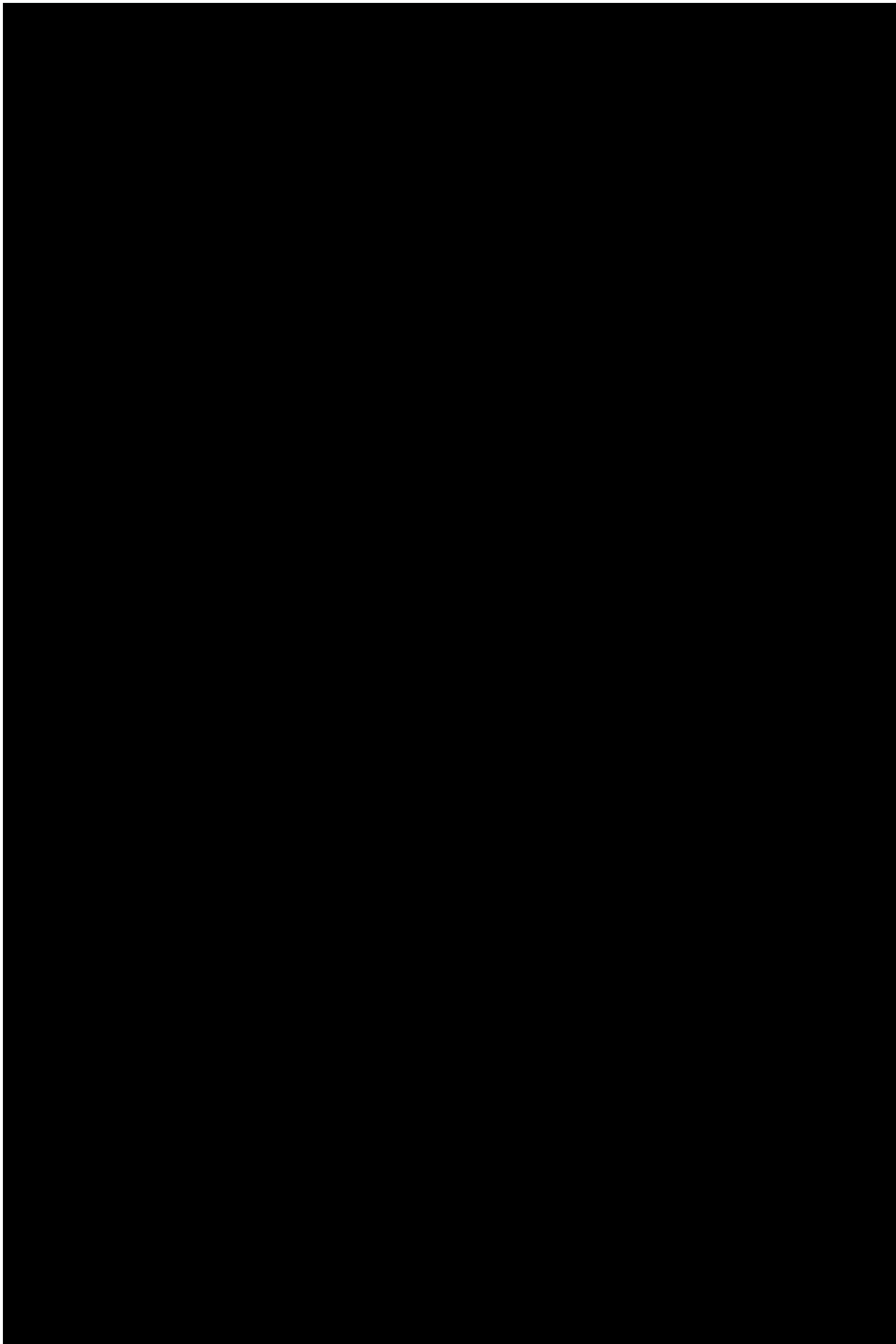
Anhang

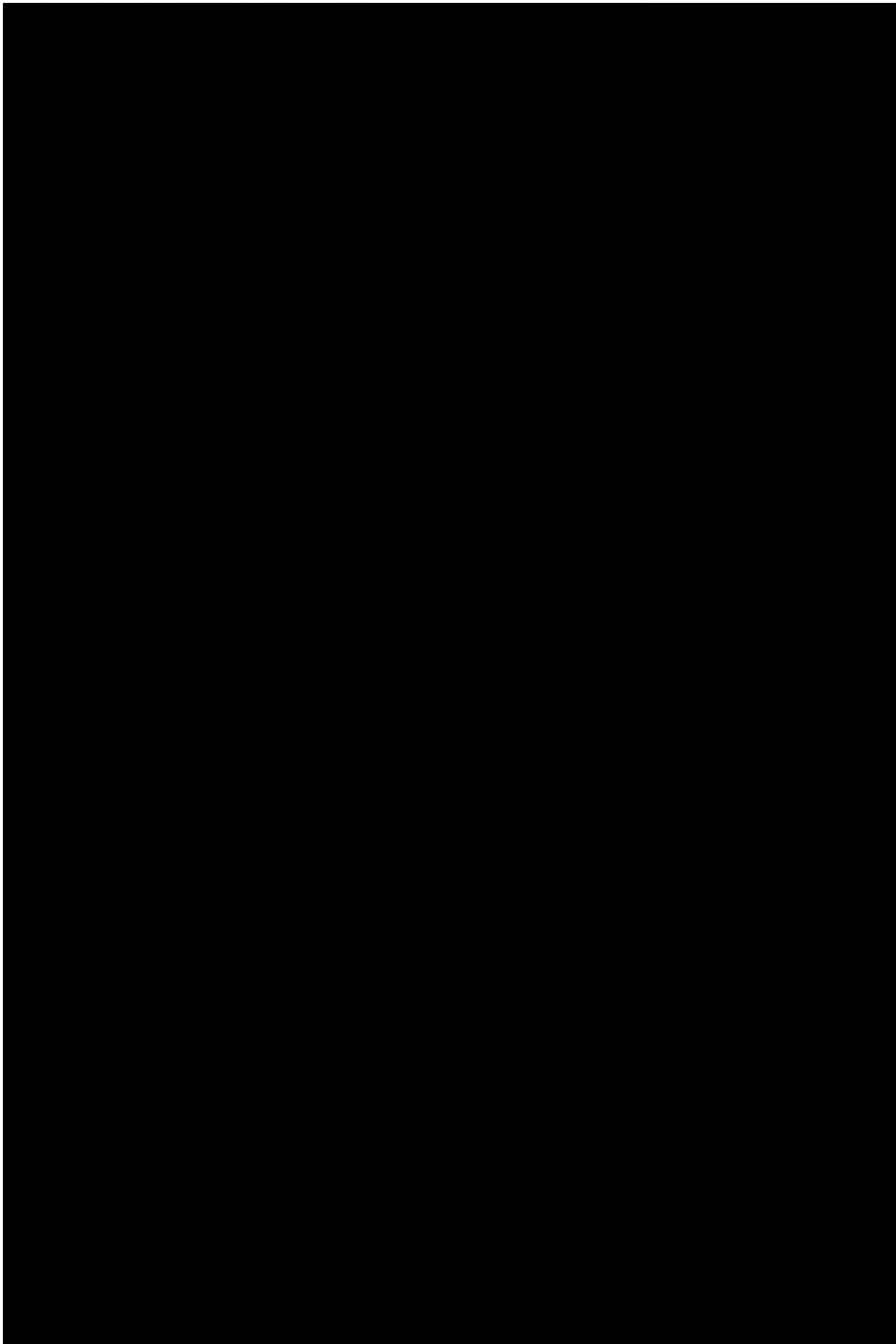
Anhang 1

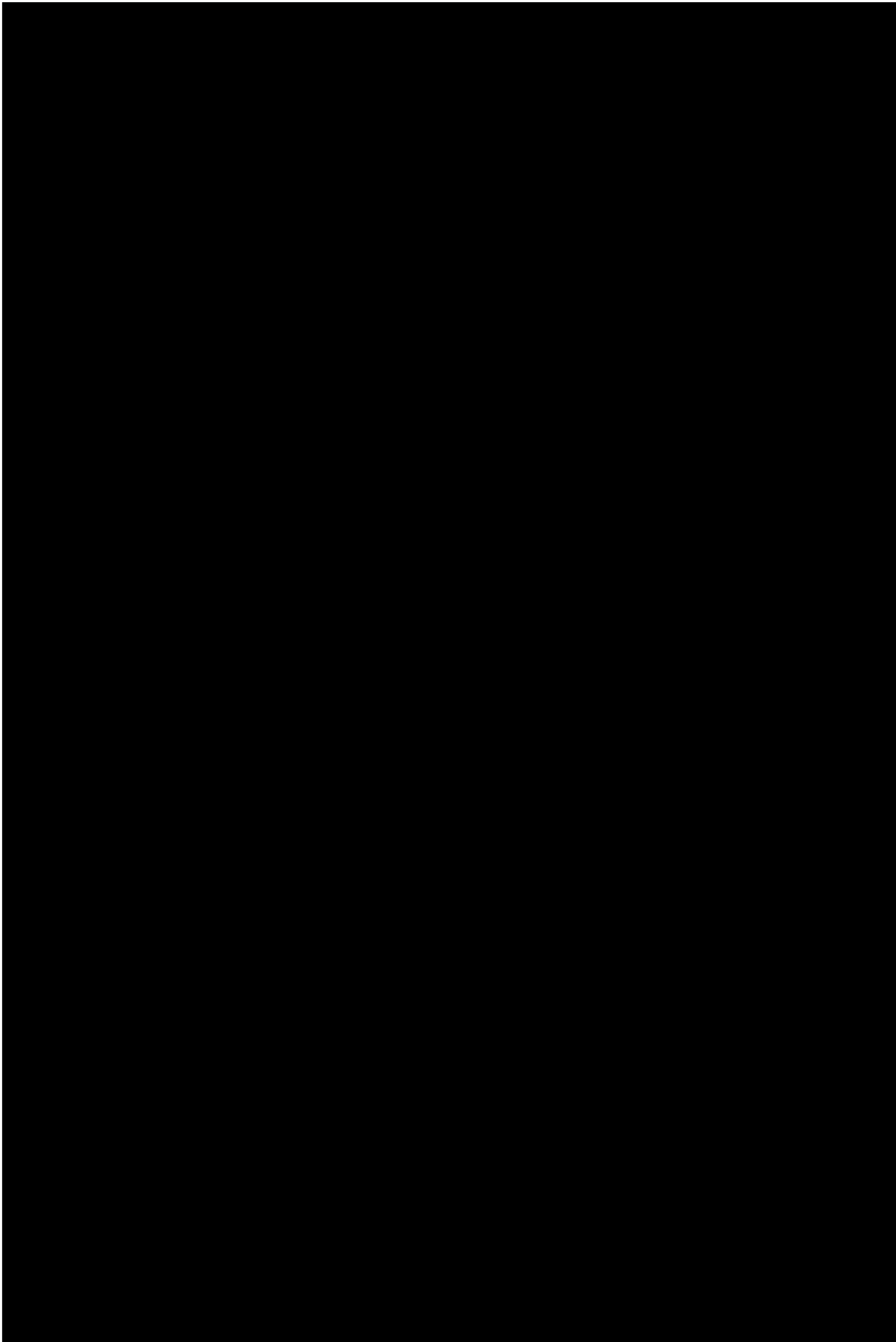












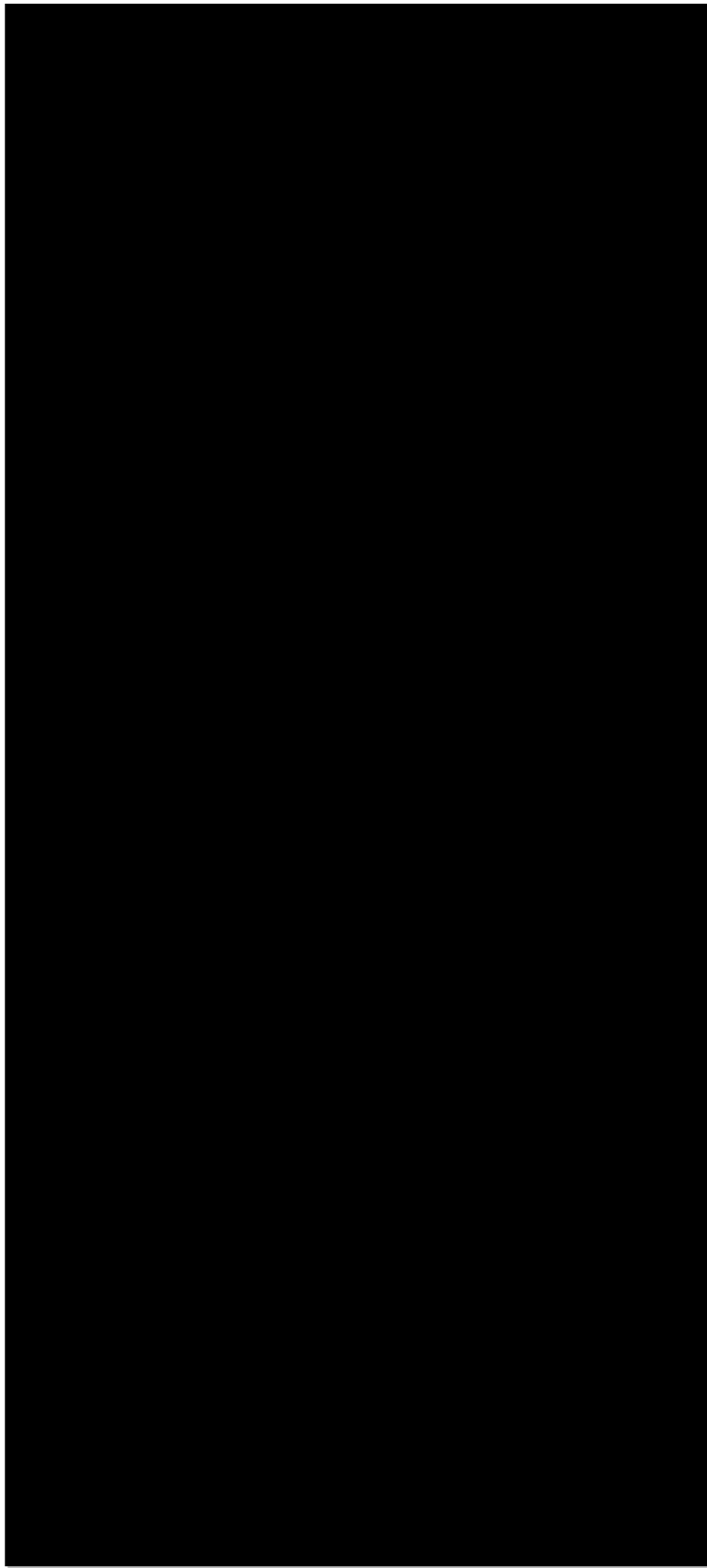
Anhang 2

Unternehmen	Ort	PLZ	Wandkies CHF/t	Dichte t/m ³

Anhang 3

Unternehmen	Ort	PLZ	Mischabbruch	Aushub unversch	Brennbares in KVA	
Mittelwert:				47,58	17,79	258,32

Anhang 4



Anhang 5

Kostenermittlung des Baumaterialtransportes					
Unterschiedliche LKW-Typen von 2- bis 5-Achser LKWS					
	2-Achser	3-Achser	4-Achser	5-Achser	Einheit
Mittlerer Stundentarif:	165,12	174,90	189,40	205,58	CHF/h
Mittlerer Stundentarif Durchschnitt:	183,75				CHF/h
Faktor für Überlandverkehr ermittelt nach ASTAG:	40,05				km/h
Nutzlast in t:	7,9	14	18	24,4	t
Mittlere Nutzlast in t:	16,075				t
Mittlere LSVA :	0,27	0,39	0,26	0,36	CHF/km
Mittelwert LSVA:	0,32				CHF/km
Preis je tkm:	0,56	0,34	0,28	0,23	CHF/tkm
Gerundet Mittelwert:	0,35				CHF/tkm

Anhang 6

Kostenermittlung des Schüttguttransportes			
Annahme Transporte von 4- und 5-Achs-Muldenkipper durchgeführt			
	4-Achser	5-Achser	Einheit
Mittlerer Stundentarif:	188,77	206,45	CHF/h
Mittlerer Stundentarif Durchschnitt:	197,61		CHF/h
Faktor für Überlandverkehr ermittelt nach ASTAG:	26,48		km/h
Nutzlast in t:	18	24	t
Mittlere Nutzlast in t:	21		t
Mittlere LSVA :	0,27	0,34	CHF/km
Mittelwert LSVA:			CHF/km
Preis je tkm:	0,41	0,34	CHF/tkm
Gerundet Mittelwert:	0,38		CHF/tkm

Eidesstattliche Erklärung

H T · **Hochschule Konstanz**
W · Technik, Wirtschaft und Gestaltung
G ·

Anlage zur Bachelor-Thesis von

Nico Gonser

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorstehende Bachelor-Thesis selbstständig angefertigt und die benutzten Hilfsmittel sowie die befragten Personen und Institutionen vollständig angegeben habe.

