



Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Ab- fallvermeidung und Abfallrecyc- ling der EU

(Projekt EnBa)

ACTION 8

Entwicklung und Berechnung von Szena-
rien zur nachhaltigen Nutzung von Bau-
restmassen

Endbericht



Dieses Projekt wird im Rahmen
von LIFE+ von der Europäischen
Union finanziert

finanziert durch:

Bundesministerium für Land- u. Forstwirtschaft,
Umwelt u. Wasserwirtschaft

Land Niederösterreich Land Oberösterreich
Land Steiermark Land Kärnten



lebensministerium.at

Die Ressourcen Management Agentur (RMA)
ist ein Klimabündnisbetrieb





Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Ab- fallvermeidung und Abfallrecyc- ling der EU

(Projekt EnBa)

ACTION 8

Entwicklung und Berechnung von Szena-
rien zur nachhaltigen Nutzung von Bau-
restmassen

Endbericht

**DAVID CLEMENT
PAUL H. BRUNNER**

HAMMER KERSTIN

finanziert
im Rahmen von LIFE+ von der Europäischen Union

durch das
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und
Wasserwirtschaft
Amt der Niederösterreichischen Landesregierung
Amt der Oberösterreichischen Landesregierung
Amt der Steiermärkischen Landesregierung
Amt der Kärntner Landesregierung

Wien, Oktober 2011

IMPRESSUM :

(Vers. 1.0)

Projektsachbearbeitung:

David Clement, Kerstin Hammer, Paul H. Brunner

TU Wien

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft,
Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement

Karlsplatz 13/226

1040 Wien

Tel.: +43 (0)1 58801.22641

Fax: +43 (0)1 58801.22697

Email: office@iwa.tuwien.ac.at; <http://iwr.tuwien.ac.at/ressourcen>

Leadpartner :

Ressourcen Management Agentur (RMA)

Initiative zur Erforschung einer umweltverträglichen nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung

ZVR Zahl: 482686233

Argentinierstraße 48/2. Stock

1040 Wien

Tel.: +43 (0)1 913 22 52.0

Fax: +43 (0)1 913 22 52.22

Email: office@rma.at; www.rma.at

Kurzfassung

Die Bewirtschaftung der Baurestmassen muss im Sinne der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit erfolgen. Zudem muss ihre Qualität die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den Primärrohstoffen ermöglichen. Diese Bedingungen werden in dieser Arbeit als Ziele formuliert, die die Bewirtschaftung der Baurestmassen erreichen sollte. Es sind dies

1. Der Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt
2. Die Schonung der Ressourcen
3. Die Gewährleistung einer guten ökologischen Qualität der Recyclingbaustoffe
4. Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen um diese Ziele zu erreichen

Die Ziele werden im Rahmen einer modifizierten Kosten- Wirksamkeitsanalyse (mKWA) auf operationalisierbare Ziele heruntergebrochen. Der Erreichungsgrad (Wirksamkeit) operationalisierbarer Ziele kann durch Kriterien bzw. Indikatoren quantifiziert werden. Die Ausprägung ausgewählter Kriterien wird für vier verschiedene Szenarien ermittelt. Die Kriterien umfassen den Schadstoffeintrag in die Umwelt und in das Gebäudelager, die Einsparungen an Primärrohstoffen, Energie und Landschaft (Deponievolumen) sowie den Schad- und Störstoffgehalt der Recyclingbaustoffe. Die Wirksamkeit der vier Szenarien in Bezug auf diese Kriterien werden gewichtet und zu drei Wirksamkeiten aggregiert, die die Erreichung der oben genannten ersten 3 Ziele darstellen. Auf der anderen Seite werden die betriebswirtschaftlichen Kosten der Szenarien ermittelt und den drei Zielerreichungsgraden gegenübergestellt. Somit ist es möglich das Szenario zu ermitteln, das der ökologisch nachhaltigen Bewirtschaftung der Baurestmassen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit am nächsten kommt.

Die Szenarien berücksichtigen den Abbruch eines Gebäudes, inklusive dem Rückbau seiner Komponenten, der Sortierung des Bauschuttes und der Aufbereitung. Schließlich gelangen die verschiedenen Materialflüsse in eine Wiederverwertung oder einer Deponie. Entworfen wurden vier Szenarien, wovon eines ein „suboptimales Szenario“ darstellen soll. Das suboptimale Szenario besteht aus einem teilweisen selektiven Rückbau, in dem versucht wird, die Kosten dafür niedrig zu halten, aus einer Sortierung auf der Baustelle und einer Aufbereitung mit einer mobilen Anlage. Zwei der Szenarien bilden sogenannte „Extremszenarien“, die beide entgegengesetzte Abbruchalternativen darstellen. Szenario 1 sieht einen sehr tiefgehenden selektiven Rückbau und Abbruch des Gebäudes vor, denen sich eine konventionelle Aufbereitung in einer Anlage mit Brechstufe und Magnetabscheidung anschließt. Bei Szenario 2 wird das Gebäude ohne selektiven Rückbau demoliert. Es wird versucht, die Stör- und Schadstoffe in einer komplexen Aufbereitungsanlage aus dem RC- Baustoff zu entfernen. Dies erfolgt durch Brechstufe, Magnetabscheider, Siebung, Nassaufbereitung, Wirbelstromabscheider und sensorgestützte Sortierung. Szenario 3 stellt eine realistische Alternative zu den vorhergehenden Szenarien dar. Es berücksichtigt einen gezielten selektiven Rückbau, der nicht so tiefgehend ist wie Szenario 1 (es werden gezielt schadstoffhaltige Baustoffe ausgebaut) und eine Aufbereitungsanlage mit Brechstufe, Magnetabscheider und Windsichter. Die Szenarioanalyse wird für zwei Gebäude durchgeführt: eines aus der Bauperiode vor 1945 und eines aus der Bauperiode 1945 – 1980. Die Gebäude werden virtuell zusammen-

gestellt aufgrund von Literaturdaten und der im Rahmen der Abbruchdokumentationen und Analysen gesammelten Daten.

Das suboptimale Szenario weist die höchste Wirksamkeit in Bezug auf die Ressourcenschonung. Dies ist deshalb der Fall, weil fast die gesamte Gebäudemasse rezykliert wird. Folglich fallen auch die Energie- und CO₂ – Einsparungen höher aus, da diese von der Menge eingesparten Primärressourcen abhängen. In Bezug auf die anderen beiden Ziele, schneidet dieses Szenario quo jedoch sehr schlecht ab. Der nicht vollständig durchgeführte selektive Rückbau sowie die mobile Aufbereitungsanlage sind nicht imstande, Schad- und Störstoffe effizient aus dem Baustoffstrom zu entfernen. Das suboptimale Szenario ist deshalb als ökologisch nicht zufriedenstellend einzustufen.

Szenario 1 erreicht das beste Ergebnis bezüglich den Oberzielen 1 (Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt) und 3 (Qualität der RC- Baustoffe). Der tiefgehende selektive Rückbau ist eindeutig das beste Verfahren um schadstoffhaltige Bausubstanz effektiv aus dem Baustoffkreislauf zu entfernen und um qualitativ hochwertige RC- Baustoffe herzustellen. Aufgrund der Abtrennung einer großen Menge schadstoffhaltiger Bauteile und deren Entsorgung, reduziert sich die Menge der RC- Baustoffe. Mit der geringeren Substitution von Primärressourcen gehen geringere Einsparungen an Energie und Deponievolumen einher. Ausschlusskriterium für Szenario 2 sind jedoch die Kosten, die durch den sehr hohen Personalaufwand des selektiven Rückbaus entstehen. Die Szenarioanalyse zeigt dass vor allem bei einem jüngeren Gebäude wie Gebäude 2 der selektive Rückbau die Schadstofffracht stark reduzieren kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Bauphase mehr problematische Baustoffe eingebaut wurden, die aber lokalisiert und ausgebaut werden können.

Nicht zufriedenstellend sind die Ergebnisse von Szenario 2. Der Versuch, die Schadstoffe, die zum Teil in der Feinfraktion akkumulieren, durch Absiebung derselben aus dem Baustoffstrom zu entfernen, gelingt nur teilweise. Die maschinelle Aufbereitung schafft lediglich beim Kupfer eine höhere Trennschärfe als Szenario 1 und Szenario 3, durch die Entfernung des stückigen Kupfers mittels des Schwermetallabscheiders. In Bezug auf die Schadstoffkonzentrationen bei Ziel 3.1, fällt die Zielerreichung eines Indikatorstoffes sogar negativ aus: durch die Rückgewinnung des Ziegelsplittes erhöht sich die PAK- Konzentration im RC- Baustoff. Dies geschieht dadurch, dass eine Fraktion mit niedriger PAK- Konzentration entfernt wird, und sich somit die Konzentration im RC- Baustoff erhöht. Es wird versucht, durch Absiebung der vermeintlich höher belasteten Feinfraktion, Schadstoffe aus dem Baustoffstrom zu entfernen. Dies gelingt jedoch nur teilweise. Durch die Absiebung geht Entsorgung der Feinfraktion geht ein erheblicher Teil der RC- Baustoffe verloren, was eine schlechte Wirksamkeit bei Oberziel 2 (Schonung der Ressourcen) zur Folge hat. Einen finanziellen Vorteil weist dieses Szenario auf durch die Rückgewinnung von sortenreinem Ziegelsplitt, das relativ teuer verkauft werden kann. Dies kompensiert die Kosten der Aufbereitung und macht Szenario 2 zum günstigsten Szenario, abgesehen vom suboptimalen Szenario.

Das sogenannte „realistische“ Szenario 3 weist in Summe eine sehr gute Zielerreichung auf. Die Oberziele Schutz der Menschlichen Gesundheit und Umwelt sowie gute Qualität der RC- Baustoffe fallen ähnlich wie bei Szenario 1 aus. Die gezielte Abtrennung schadstoffbelasteter

Bausubstanz durch den gezielten selektiven Rückbau ermöglicht eine sehr gute Schadstoffentfrachtung der RC- Baustoffe. Zusätzlich scheidet die Windsichtung in der Aufbereitungsanlage in Kombination mit dem selektiven Rückbau die fast 100%ige Entfernung der Störfraktion aus dem RC- Baustoff. Dies wirkt sich sehr positiv auf die visuelle Qualität des RC- Baustoffes, was wiederum seine Vermarktungsfähigkeit steigert.

Die Schonung der Ressourcen (Oberziel 2), wird durch die höhere Recyclingquote hier besser gesichert als bei den Szenarien 1 und 3. Im Gegensatz zum suboptimalen Szenario ist hier die hohe Recyclingquote nicht mit einer schlechteren Qualität der RC- Baustoffe verbunden. Der gezielte Ausbau schadstoffbelasteter Bauteile ermöglicht es genau die Bauteile mit relativ hohen Schadstoffkonzentrationen zu entfernen, ohne unnötig RC- Baustoffe aus dem Baustoffzyklus zu entfernen. Zudem werden dadurch die Kosten des selektiven Rückbaus stark reduziert.

Für die Praxis bedeutet dies, dass der selektive Rückbau forciert werden muss, um gezielt schadstoffhaltige Stoffe aus dem Baustoffstrom zu entfernen. Bei der Baurestmassenaufbereitung empfiehlt es sich zusätzlich zu den zurzeit eingesetzten Brech- und Magnetabscheidungs- Stufen, eine Trennstufe für die Störfraktion hinzuzufügen, in diesem Fall die Windsichtung. Durch diese Maßnahmen ist es möglich, die Kosten eines Gebäudeabbruches zu begrenzen und eine nachhaltige Bewirtschaftung der Baurestmassen zu gewährleisten.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	V
INHALTSVERZEICHNIS	I
1 EINLEITUNG	1
2 ZIELSETZUNG	3
3 METHODIK.....	5
3.1 Die modifizierte Kosten- Wirksamkeits- Analyse (mKWA)	5
3.1.1 <i>Ablauf einer mKWA</i>	6
3.1.1.1 <i>Der Wirksamkeitswert</i>	6
3.1.2 <i>Kostenanalyse</i>	9
3.2 Die Stoffflussanalyse (SFA)	9
4 KRITERIEN FÜR DIE BEWERTUNG DES GEBÄUDEABBRUCHES	11
4.1 Der Bewertungsgegenstand.....	13
4.1.1 <i>Bauperioden</i>	14
4.1.2 <i>Auswahl der Materialien</i>	15
4.1.2.1 <i>Materialien der tragenden Gebäudestruktur</i>	15
4.1.2.2 <i>Materialien des Gebäudeausbaus – nicht tragende Gebäudeteile</i>	15
4.1.3 <i>Die Modellgebäude</i>	15
4.1.4 <i>Schadstoffkonzentrationen in Bauteilen</i>	18
4.2 Aufbau der Szenarien	19
4.2.1 <i>Fragestellung</i>	19
4.2.2 <i>Komponenten des Systems Gebäudeabbruch</i>	19
4.2.3 <i>Szenarien</i>	20
4.2.3.1 <i>Suboptimales Szenario</i>	20
4.2.3.2 <i>Szenario 1</i>	26
4.2.3.3 <i>Szenario 2</i>	29
4.2.3.4 <i>Szenario 3</i>	33
5 ERGEBNISSE	37
5.1 Das SFA- Modell.....	37
5.2 Stoff- und Güterflüsse für Gebäude 1 (Bauphase 1920 – 1946).....	40
5.2.1 <i>Suboptimales Szenario</i>	40
5.2.1.1 <i>Stoffflüsse</i>	42

5.2.2	Szenario 1: Selektiver Rückbau.....	44
5.2.2.1	Güterflüsse.....	44
5.2.2.2	Stoffflüsse	45
5.2.3	Szenario 2: Maschinelle Aufbereitung	46
5.2.3.1	Güterflüsse.....	46
5.2.3.2	Stoffflüsse	48
5.2.4	Szenario 3 Realistisches Szenario	48
5.2.4.1	Güterflüsse.....	50
5.2.4.2	Stoffflüsse	50
5.3	Ergebnisse der modifizierten Kosten- Wirksamkeitsanalyse (mKWA).....	51
5.3.1	Oberziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt.....	51
5.3.1.1	Ziel 1.1: Verminderung der Schadstofffracht durch RC-Baustoffe in die Umwelt.....	51
5.3.1.2	Ziel 1.2: Verminderung Treibhauswirksamkeit.....	54
5.3.2	Oberziel 2: Schonung der Ressourcen.....	56
5.3.2.1	Ziel 2.1. Substitution stofflicher Ressourcen durch Baustoffrecycling.....	56
5.3.2.2	Ziel 2.2. Schonung energetischer Ressourcen	58
5.3.2.3	Ziel 2.1. Einsparung von Deponievolumen	60
5.3.3	Ziel 1.3: Gewährleistung einer guten ökologischen Qualität der Rc- Baustoffe	61
5.3.3.1	Schadstoffkonzentrationen als Gesamtgehalt	61
5.3.3.2	Schadstoffkonzentrationen im Eluat	62
5.3.4	Oberziel 3: Wirtschaftliche Effizienz.....	63
5.3.5	Wirksamkeiten	66
5.3.5.1	Ziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt.....	66
5.3.5.2	Ziel 2: Schonung der Ressourcen.....	68
5.3.5.3	Ziel 3: Gute Qualität der RC- Baustoffe	71
5.3.5.4	Zusammenfassung Ergebnisse	73
5.4	Stoffflüsse bei Gebäude 2.....	76
5.5	Ergebnisse der mKWA für Gebäude 2.....	77
5.5.1	Oberziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt.....	77
5.5.1.1	Ziel 1.1: Verminderung der Schadstofffracht durch RC- Baustoffe in die Umwelt	77
5.5.1.2	Ziel 1.1: Verminderung des Treibhauseffektes	77

5.5.2	Oberziel 2: Ressourcenschonung.....	77
5.5.2.1	Ziel 2.1: Schonung stofflicher Ressourcen	77
5.5.2.2	Ziel 2.1: Schonung stofflicher Ressourcen	78
5.5.2.3	Ziel 2.1: Schonung von Deponievolumen	78
5.5.3	Oberziel 3: Gute ökologische Qualität der RC- Baustoffe.....	78
5.5.3.1	Ziel 2.1: Schadstoffkonzentrationen als Gesamtgehalte und Störstoffe.....	78
5.5.3.2	Ziel 2.1: Schadstoffkonzentrationen im Eluat: Sulfat	78
5.5.4	Oberziel 4: Wirtschaftliche Effizienz.....	79
5.6	Wirksamkeiten.....	79
6	LITERATUR.....	85
7	ANHANG	87
7.1	Stoff- und Güterflüsse für Gebäude 2	87
7.1.1	Suboptimales Szenario	87
7.1.1.1	Güterflüsse.....	87
7.1.1.2	Stoffflüsse	87
7.1.2	Szenario 1.....	89
7.1.2.1	Güterflüsse.....	89
7.1.2.2	Stoffflüsse	89
7.1.3	Szenario 2.....	91
7.1.3.1	Güterflüsse.....	91
7.1.3.2	Stoffflüsse	91
7.1.4	Szenario 3.....	93
7.1.4.1	Güterflüsse.....	93
7.1.4.2	Stoffflüsse	94
7.2	Ergebnisse der modifizierten Kosten- Wirksamkeitsanalyse (mKWA)	95
7.2.1	Oberziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt.....	95
7.2.1.1	Ziel 1.1: Verminderung der Schadstofffracht durch RC-Baustoffe in die Umwelt.....	95
7.2.1.2	Ziel 1.2: Verminderung Treibhauswirksamkeit.....	97
7.2.2	Oberziel 2: Schonung der Ressourcen.....	98
7.2.2.1	Ziel 2.1. Substitution stofflicher Ressourcen durch Baustoffrecycling.....	98
7.2.2.2	Ziel 2.2. Schonung energetischer Ressourcen	99

7.2.2.3	<i>Ziel 2.1. Einsparung von Deponievolumen</i>	100
7.2.3	<i>Oberziel 1.3: Gewährleistung einer guten ökologischen Qualität der Rc- Baustoffe.....</i>	100
7.2.3.1	<i>Schadstoffkonzentrationen als Gesamtgehalt</i>	100
7.2.3.2	<i>Schadstoffkonzentrationen im Eluat</i>	101
7.2.4	<i>Oberziel 3: Wirtschaftliche Effizienz.....</i>	102
7.2.5	<i>Wirksamkeiten</i>	103
7.2.5.1	<i>Ziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt.....</i>	103
7.2.5.2	<i>Ziel 2: Schonung der Ressourcen.....</i>	104
7.2.5.4	<i>Zusammenfassung Ergebnisse</i>	108

1 Einleitung

Um eine Wiederverwertungsquote von 70% aller Baustellen- und Abbruchabfälle bis zum Jahr 2020 auch im Bereich der Hochbaurestmassen zu erreichen, ist es notwendig Verfahren des Abbruchs und der Aufbereitung so zu praktizieren, dass qualitativ hochwertige Recyclingprodukte entstehen, die am Markt problemlos Abnehmer finden. Dies ist im Moment noch nicht der Fall. Aufgrund hoher Kosten und der somit seltenen Anwendung präziser Separationstechnologien, den daraus resultierenden mangelhaften Qualitäten und der derzeit noch aufrechten Ausweisung von RC-Produkten als Abfall ist Sekundärmaterial nicht mit Primärmaterial kompetitiv.

Aufbauend auf dem Wissen über den Stand der Technik (Action 6) und die Verteilung von Wert- und Schadstoffen in Gebäuden (Action 1,2) erfolgt in dieser Action eine Bewertung der Abbruch- und Aufbereitungsverfahren um Optimierungspotentiale der Bewirtschaftung von Baurestmassen aufzuzeigen.

Die gängige Praxis in Österreich ist je nach Komplexität des Gebäudes und dem ausführenden Unternehmen unterschiedlich. Während bei kleineren Einfamilienhäusern aufgrund ihrer Homogenität meist auf Rückbau verzichtet wird, ist dies bei größeren Mehrfamilien- oder Bürogebäude nicht der Fall. Die Genauigkeit des Rückbaus hängt vorwiegend von der Zeit, welche dem Abbruchunternehmen zur Verfügung steht, und somit von den finanziellen Mitteln ab. Den höchsten Trenngrad erreicht man durch einen selektiven Rückbau (des Innenausbau), dem eine Entkernung voran geht und einem anschließenden selektiven Abbruch (Abbruch mit Trennung der Materialien der tragenden Gebäudesubstanz). Das hierbei anfallende mineralische Material erreicht einen hohen Reinheitsgrad, was eine Voraussetzung dafür ist, durch die folgende Aufbereitung qualitativ hochwertige Produkte zu erzielen.

In den folgenden Szenarien erfolgen eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Verfahren und Technologien sowie eine ökologische und ökonomische Bewertung. Dies soll deren Stärken und Schwächen aufzeigen und Handlungsmöglichkeiten identifizieren.

2 Zielsetzung

Basierend auf dem Wissen aus vorangegangenen Aktionen (1, 2, 4, 6) werden hier Szenarien definiert, die aus der Fülle der Handlungsmöglichkeiten die jeweils optimale Lösung für eine nachhaltige Nutzung von Baurestmassen darstellen. Die Szenarien wurden im Vorfeld im Kreise eines Steering Committees mit den relevanten Stakeholdern diskutiert und abgestimmt.

Zur Berechnung sind folgende Daten erforderlich:

- das Aufkommen von Baurestmassen in einer Region (Action 1),
- die Qualitäten dieser Mengen hinsichtlich des Gehalts an verwertbaren Metallen (Actions 1, 2, 4),
- die Qualitäten dieser Mengen hinsichtlich des Gehalts an nicht entfernbaren Schadstoffen (Actions 1, 2, 4),
- die Qualitäten dieser Mengen hinsichtlich der Aufbereitungseignung (technische Eigenschaften d.h. Verwertbarkeit der Behandlungsprodukte) (Actions 1, 2, 4),
- die technischen Möglichkeiten der Aufbereitung unter Berücksichtigung der Kosten und möglicher Erlöse (Action 6) und
- die unmittelbare Bereitschaft der beteiligten Stakeholder, die Maßnahmen konkret umzusetzen.

Ein wesentlicher Teil dieser Action ist es, die Szenarien zu definieren. Die Hauptaufgabe der Szenarienrechnung ist es einerseits, aus der Fülle der Handlungsmöglichkeiten die jeweils optimale Lösung für definierte Rahmenbedingungen zu entwickeln. Andererseits soll mit Hilfe von Extremszenarien die maximale Bandbreite der Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Diese Extremszenarien wirken unterstützend und sollen aufzeigen, wie weit entfernt sich eine „optimale“ Lösung von „extremen“ Lösungen befindet.

Als Parameter werden jene Größen in die Szenarienrechnung aufgenommen, die als Kriterien zur Überprüfung der Zielerreichung in Action 7 erarbeitet wurden. Folgende Parameter werden für die Definition von Szenarien herangezogen:

- irreversible Stoffflüsse toxischer Stoffe in die Umwelt (diffuse Verteilung von Schadstoffen)
- Erhöhung des „Schadstofflagers“ in der Bausubstanz (Anreicherung von homogen verteilten Schadstoffen in den mineralischen Baustoffen)
- Flüsse verlorener Wertstoffe auf Deponien, in Recyclingmaterialien (stückige Metalle z.B. Kupfer oder Messing im Betonzuschlagstoff) oder in die Umwelt
- Verbrauch an Deponievolumen
- eingesparte Menge an primären mineralischen Rohstoffen
- Verbrauch von Primärenergie
- Treibhausgasrelevanz
- Kosten

Für die Beurteilung der Szenarien wird das suboptimale Szenario in Form eines Basis-Szenarios beschrieben. Des Weiteren werden Szenarien entwickelt, die einerseits realitätsnah die mittelfristige Entwicklung beschreiben, andererseits sollen die Auswirkungen von Extremfällen (z.B. vollständige Aufbereitung nach dem Stand der Technik vs. vollständige Deponierung) untersucht werden. So können Faktoren, die das Gesamtergebnis besonders stark beeinflussen, herauskristallisiert werden.

Entwicklung eines Satzes von Szenarien, welcher aus einem Basis-Szenario, optimalen und extremen Szenarien besteht. Berechnung und Akkordierung der optimierten und von den Akteuren akzeptierten „realistischen“ Szenarien. Das Ziel ist aufzuzeigen, welche Form der Bewirtschaftung für den Großteil der in Österreich anfallenden Baurestmassen die optimale Lösung darstellt. .

3 Methodik

3.1 Die modifizierte Kosten- Wirksamkeits- Analyse (mKWA)

Für die Bewertung verschiedener Szenarien der österreichischen Baurestmassenbewirtschaftung wird die Methode der modifizierten Kosten-Wirksamkeits-Analyse verwendet. Diese Methode stellt eine Erweiterung der Kosten-Wirksamkeits-Analyse dar, und wird in den folgenden Absätzen beschrieben. Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse ist eine Methode der Wirtschaftlichkeitsanalyse für den öffentlichen Sektor. Sie soll es ermöglichen, aus verschiedenen alternativen Gestaltungsmöglichkeiten eines Projektes oder Wirtschaftszweiges die Vorteilhafteste zu finden. Bei einer KWA werden die Kosten monetär erfasst. Der Nutzen hingegen wird durch seine Beiträge zur Erreichung von festgesetzten Zielen beurteilt (Schönback 2009). Dadurch, dass die Nutzen nicht monetär bewertet werden, ist es durch die KWA möglich, sie als physische Größen darzustellen. Große Bedeutung hat die Zielanalyse. Die Oberziele werden auf verschiedenen Ebenen in Ziele, Unterziele und schließlich operationalisierbare Ziele aufgeteilt. Die Erreichung operationalisierbarer Ziele wird durch Kriterien gemessen.

In der darauf folgenden Wirksamkeitsanalyse werden operationale Maßstäbe und Indikatoren (Kriterien) entwickelt, anhand deren die Zielerreichungsgrade gemessen werden. Die Teilwirksamkeiten werden für die Quantifizierung der Zielerreichung auf Wirksamkeitsskalen ermittelt. Schließlich werden in einer Wirksamkeits- oder Zielertragsmatrix die Kosten der einzelnen Szenarien den jeweiligen Teilwirksamkeiten gegenübergestellt.

Um die Wirksamkeitsanalyse im Hinblick auf Zahl und Ausmaß der erfassten Umwelt- und Ressourcenaspekte zu erweitern wurde von (Brunner, Hutterer et al. 2000) die modifizierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse (mKWA) entwickelt. Diese kann Wirkkategorien der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment) verwenden (Schönback 2009). Es können dadurch einerseits die Kosten der Bewirtschaftung, andererseits deren Umweltauswirkungen dargestellt werden. Tabelle 3-1 zeigt die schematische Darstellung der Form einer Kosten-Wirksamkeits-Matrix, Kosten und (Umwelt)Auswirkungen gegenüberstellt.

Tabelle 3-1: Schematische Darstellung einer Kosten-Wirksamkeits-Matrix

Szenarien	Kosten	W1	W2	W3
S1	Kosten k_i	Teilwirksamkeiten w_{ij}		
S2				
S3				

Für die Bewertung der Bewirtschaftung von Baurestmassen werden spezielle Kriterien entwickelt. Einerseits sollen diese speziell auf die Umweltauswirkungen dieses Abfallwirtschaftssektors eingehen; andererseits stehen die definierten Indikatoren exemplarisch auch für andere, nicht berücksichtigte Indikatoren. In Hinsicht auf Schadstoffe werden z.B. nicht nur die Schadstoffemissionen betrachtet, sondern es werden explizit die Schadstoffgehalte der Materialien angeführt. Dies soll es ermöglichen, die Schadstofffrachten im Lager festzustellen. Mineralische Baurestmassen tragen im Tiefbau beträchtlich zur Bildung eines Lagers bei, welches an die nachfolgenden Generationen weitergegeben werden wird. Im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung der österreichischen Baurestmassen ist die Berücksichtigung des Schadstoffeintrages in dieses Lager wesentlich.

3.1.1 Ablauf einer mKWA

Nach der von (Brunner, Hutterer et al. 2000) entwickelten Methodik gliedert sich die Wirksamkeitsanalyse in drei Phasen:

1. Ermittlung der Wirksamkeitswerte der ausgewählten Indikatoren für die Unterziele der Zielhierarchie
2. Gewichtung der Wirksamkeiten der Unterziele
3. Berechnung der Gesamtwirksamkeit der Handlungsalternativen; Die Gesamtwirksamkeit wird im Verhältnis zu den ermittelten normierten Kosten jeder Handlungsalternative gesetzt.

3.1.1.1 Der Wirksamkeitswert

Der Wirksamkeitswert gibt den Grad der Erreichung des definierten Zieles für ein ausgewähltes Kriterium (Indikator) an. Angegeben wird der Wirksamkeitswert als dimensionslose Größe. Er errechnet sich aus dem Quotienten zwischen dem tatsächlich erreichten Wert eines Parameters in einem bestimmten Szenario und dem Zielwert für dieses Bewertungskriterium.

$$W_i = \frac{\sum K_i}{Z_i}$$

W_i = Wirksamkeitswert für Kriterium i

K_i = Wert des Parameters für Kriterium i

Z_i = Zielwert für Kriterium i

Es ist notwendig, die Wirksamkeit zwischen dem Maximalwert – also dem Wert, dem eine 100%-ige Zielerreichung angerechnet werden kann – und dem Minimalwert zu skalieren. Dazu gibt es zwei Ansätze.

Ansatz 1: Maximal beobachtetes Zielkriterium:

Der Maximalwert für das Ziel wird definiert als der höchste in allen Handlungsalternativen erreichte Beitrag. Die anderen Zielerreichungsgrade werden durch eine Gerade skaliert, die durch den Nullpunkt geht. Der Nullpunkt entspricht keiner Veränderung gegenüber dem Nullzustand. Dieser Ansatz eignet sich zum Vergleich aktuell gewählter Handlungsalternativen. Er hat den Vorteil, dass keine Überlegungen über das mögliche Ausmaß der Ausprägung eines Kriteriums angestellt werden müssen. Dieser Ansatz erlaubt es nicht, im Nachhinein weitere Handlungsalternativen in die Analyse miteinzuschließen ohne die Ergebnisse der Wirksamkeitsanalyse zu verschieben. Ein weiterer Nachteil ist die Überbewertung von Unterschieden zwischen Handlungsalternativen für den Fall, dass nur geringe Unterschiede in der Ausprägung eines Zielerreichungsgrades vorliegen.

Ansatz 2: Vorgabe eines maximalen Zielkriteriums:

Es wird ein Sollwert definiert für die maximale Ausprägung eines Kriteriums. Auch hier wird die Wirksamkeit der Handlungsalternativen durch eine Gerade, die durch den Nullpunkt geht, skaliert. Die Anzahl der betrachteten Maßnahmenfälle ist erweiterbar. Vorteilhaft ist, dass der Wirksamkeitswert auf die tatsächlich erreichbare Ausprägung eines Kriteriums bezogen wird.

Die beiden Ansätze zur Wirksamkeitstransformation sind in

Abbildung 3-1 graphisch dargestellt.

Aufgrund der genannten Vorteile des zweiten Ansatzes werden in dieser Studie für die Skalierung der Wirksamkeiten für die meisten Kriterien maximale Zielkriterien definiert (Ansatz 2).

Dies gewährleistet die Erweiterung der Analyse auf weitere Handlungsalternativen. Außerdem hat die Betrachtung der Zielerreichung in Bezug auf den „gewünschten“, definierten Zustand eine bessere Aussagekraft über die Umweltauswirkungen der Handlungsalternativen. Für einige Kriterien, wo kein Maximum bzw. Minimum festgelegt werden kann, wird Ansatz 1 angewendet.

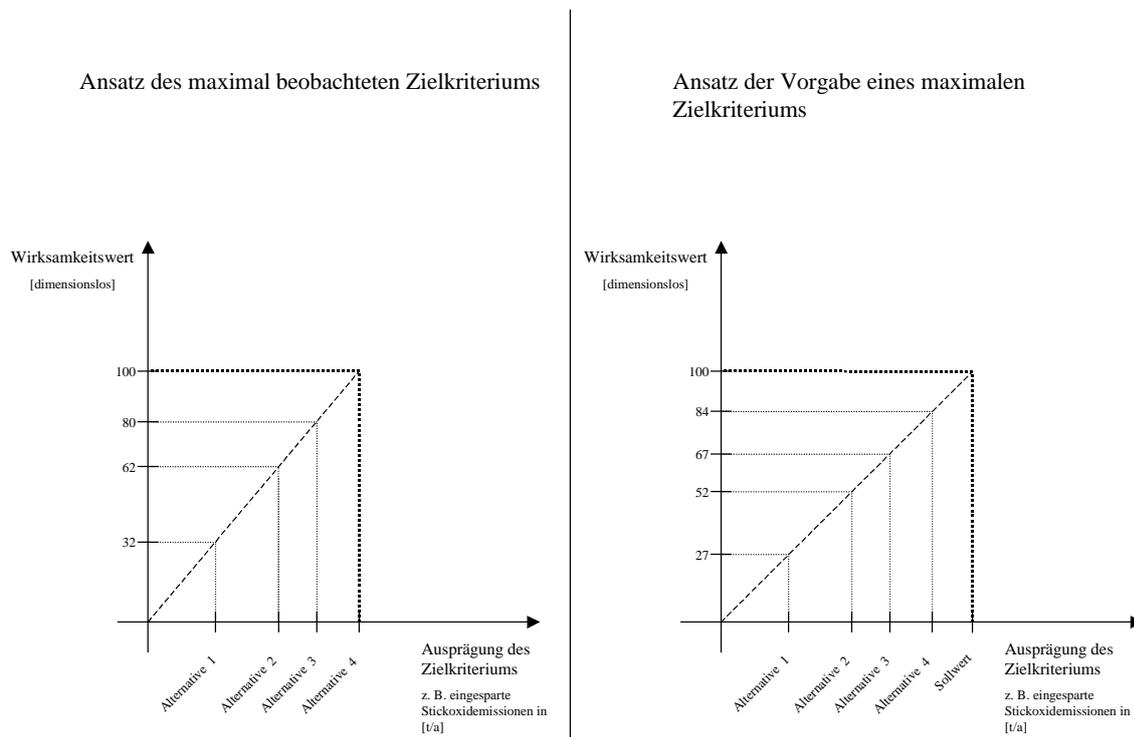


Abbildung 3-1: Darstellung der Ansätze zur Wirksamkeitstransformation der Kriterien. (Brunner, Hutterer et al. 2000)

Aggregation der Wirksamkeiten

Die Erreichungsgrade der operationalisierbaren Ziele (Unterziele) müssen für die Bewertung aggregiert werden. Dazu werden sie gewichtet und aufsummiert. Die Gewichtung der verschiedenen Wirksamkeiten erfolgt entweder nach wissenschaftlichen Kriterien (z.B. die Letale Konzentration (LC für Schadstoffe) oder durch Gesprächen mit ExpertInnen. Nachdem die Wirksamkeiten mit den entsprechenden Gewichtungsfaktoren multipliziert worden sind, werden sie für die Szenarien jeweils aufsummiert. Ergebnis sind Wirksamkeiten für die definierten Oberziele. Nun können diese Wirksamkeiten in einem weiteren Schritt zu Gesamtwirksamkeiten aufsummiert werden, und mit den Kosten verglichen werden. Das Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis wird berechnet, indem man die Gesamtwirksamkeit durch die Kosten des jeweiligen Szenarios dividiert. Durch die Aggregation der Wirksamkeiten geht jedoch Information verloren. Die Gesamtwirksamkeit gibt keine Auskunft über die Erreichung der einzelnen Oberziele, sondern wird durch eine einzige Zahl dargestellt. In manchen Fällen empfiehlt es sich deshalb, die Wirksamkeiten getrennt zu betrachten, mit den Kosten zu vergleichen und qualitative Beschreibungen der Szenarien vorzunehmen.

3.1.2 Kostenanalyse

Die mKWA stellt der Zielhierarchie, die durch ökologische und ressourcenbezogene Kriterien zum Ausdruck kommt, die betriebswirtschaftlichen Kosten gegenüber (Schönback 2009). Es werden die Kosten aller Verfahren und Prozesse betrachtet, die im System „Letzte Gebäudelebensphase“ angeführt sind. Es werden nicht, wie bei anderen ökonomischen Bewertungsmethoden (Kosten-Nutzen Analyse), ökologische Kosten und Nutzen monetär betrachtet. Ökologische Auswirkungen werden lediglich als Erreichungsgrad definierter Ziele bewertet und mit den betriebswirtschaftlichen Kosten einer Handlungsalternative verglichen. Diese Kriterien beschreiben die Umsetzbarkeit von Handlungsalternativen und zeigen die Diskrepanz zwischen dem ökonomisch akzeptablen und den „harten“ Kriterien auf.

3.2 Die Stoffflussanalyse (SFA)

Da die SFA bereits in den vorgehenden Aktionen (6 und 7) ausführlich beschrieben wurde, wird in dieser Aktion darauf verzichtet.

4 Kriterien für die Bewertung des Gebäudeabbruches

Aus Aktion 7.1 werden nun die Kriterien definiert, die für die Bewertung des Gebäudeabbruches herangezogen werden. Es werden hierbei nicht alle Kriterien aus Aktion 7.1 übernommen, sondern lediglich die für die Szenarienanalyse sinnvollen und maßgebenden ausgewählt. Übernommen werden jedoch die Oberziele aus Aktion 7.1. Tabelle 4-3 führt die ausgewählten Kriterien für die Bewertung der Szenarien in Bezug auf Ziel 1, dem Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt, an. Die Schwermetalle Blei, Chrom und Kupfer wurden aufgrund der Ergebnisse der Laboranalysen ausgesucht. Diese drei Schwermetalle waren in kritischen Konzentrationen vorhanden (siehe Aktion 2). Als Vertreter der organischen Schadstoffe wurden die PAKs ausgewählt, da diese, wie die Laboranalysen zeigen, in der Bausubstanz reichlich vorkommen und mitunter auch kritische Konzentrationen annehmen können. Der Treibhauseffekt wird durch die Berechnung der emittierten, bzw. eingesparten CO₂-Äquivalenten ermittelt.

Tabelle 4-1: Ausgewählte Bewertungskriterien zu Oberziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt

Oberziel	1.	SCHUTZ DER MENSCHLICHEN GESUNDHEIT UND UMWELT
Ziel	1.1.	Verminderung der Verbringung von Schadstoffen in die Umwelt durch RC-Baustoffe
operation. Ziele	1.1.1.	Verminderung der Bleifracht
	1.1.2.	Verminderung der Chromfracht
	1.1.3.	Verminderung der Kupferfracht
	1.1.4.	Verminderung der PAK- Fracht
Ziel	1.2.	Minimierung des Treibhauseffektes
operation. Ziele	1.2.1.	Minimierung der Emissionen von CO ₂ -Äquivalenten

Es wird die Schonung stofflicher, energetischer und räumlicher Ressourcen berücksichtigt. Da Baurestmassen als Abfall in großen Mengen anfallen, ist z.B. die Recyclingquote mineralischer Baustoffe eine entscheidende Variable für die Bewertung, von der auch die Energieeinsparungen, die Einsparung an Deponievolumen und die Emission treibhauswirksamer Gase abhängen. Aus diesem Grund werden folgende Kriterien für die Bewertung der Erreichung von Ziel 2, der Schonung der Ressourcen, berücksichtigt (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Ausgewählte Bewertungskriterien zu Oberziel 2: Schonung der Ressourcen

Oberziel	2.	SCHONUNG DER RESSOURCEN
Ziel	2.1.	Schonung stofflicher Ressourcen
operation.Ziel	2.1.1.	Maximierung der Verwertung von Betonabbruch
	2.1.2.	Maximierung der Verwertung von Ziegelsplitt
	2.1.3.	Maximierung der Verwertung von mineralischen Baurestmassen
	2.1.4.	Maximierung der Eisenmetallverwertung
	2.1.5.	Maximierung der Kupferverwertung
	2.1.6.	Maximierung der Holzverwertung (unbehandelt)
Ziel	2.2.	Schonung energetischer Ressourcen
		Minimierung des Energieeinsatzes für die Bewirtschaftung der Baurestmassen
operation.Ziel	2.2.1.	Minimierung des Energieeinsatzes für den Abbruch
	2.2.2.	Minimierung des Energieeinsatzes durch Transport
	2.2.3.	Minimierung des Energieeinsatzes durch die Aufbereitung
	2.2.4.	Minimierung des Energieeinsatzes für die Entsorgung
	2.2.5.	Minimierung des Energieeinsatzes für die Sortierung
		Minimierung des Energieeinsatzes bei Primärproduktion durch Einsatz von Sekundärprodukten
	2.2.6.	Minimierung des Energieeinsatzes durch Bauschuttrecycling
	2.2.7.	Minimierung des Energieeinsatzes durch Einsatz von Sekundärzuschlagstoffe für Beton
	2.2.8.	Minimierung des Energieeinsatzes durch Recycling von Ziegelsplitt
	2.2.9.	Minimierung des Energieeinsatzes durch Eisenrecycling
	2.2.10.	Minimierung des Energieeinsatzes durch Kupferrecycling
	2.2.11.	Minimierung des Energieeinsatzes durch Holzrecycling
		Substitution von Primärenergieträgern durch Energieträger der Abfallwirtschaft
	2.2.12.	Maximierung der Produktion von Energie aus Abfällen

Für die Bewertung der Qualität der RC- Baustoffe werden dieselben Schadstoffe wie für Ziel 1 als Indikatoren eingesetzt. Zusätzlich wird die verbleibende Störstofffraktion in RC- Baustoffen mitberücksichtigt. Da diese ausschlaggebend für die visuelle Qualität der RC- Baustoffe ist, und somit für ihre Vermarktungsfähigkeit, stellt die Schadstofffraktion ein wichtiges Kriterium dar. Ein weiteres entscheidendes Kriterium für die Qualität ist die Sulfatkonzentration im Eluat. Durch den Einsatz gipshaltiger Baustoffe, überschreitet diese häufig den Grenzwert für die Wiederverwendung.

Die als Gesamtgehalte bewerteten Schadstoffe werden nicht absolut, sondern auf geogene Hintergrundkonzentrationen bezogen. Es werden hierfür die natürlichen Konzentrationen der ersetzten Primärrohstoffe angewendet.

Tabelle 4-3: Ausgewählte Bewertungskriterien zu Oberziel 3: Gute Qualität der RC- Baustoffe – Erhaltung der Qualität des Lagers

Oberziel	3.	GUTE QUALITÄT DER RC- BAUSTOFFE (ERHALTUNG DER QUALITÄT DES LAGERS)
Ziel	3.1.	Verträglichkeit der Schadstoffkonzentrationen in RC- Baustoffen
operation. Ziele		Als Gesamtgehalte
	3.1.1.	Verträglichkeit der Bleikonzentration
	3.1.2.	Verträglichkeit der Chromkonzentration
	3.1.3.	Verträglichkeit der Kupferkonzentration
	3.1.4.	Verträglichkeit der PAK- Konzentration
	3.1.5.	Minimierung der Störfraktion in RC- Baustoffen
		Im Eluat (zusätzlich zu den oberen)
	3.1.6.	Verträglichkeit der Sulfatkonzentration

4.1 Der Bewertungsgegenstand

Im Rahmen des EnBa- Life+ Projektes wurde die Beschaffung verschiedener Abbruchgebäude im Hinblick auf ihr Potential an Sekundärressourcen charakterisiert. Es wurden die in den Gebäuden enthaltenen Wertstoffe ausfindig gemacht und quantifiziert. Es sind dies hauptsächlich die mengenmäßig relevanten Fraktionen: Kies und Naturstein, Beton, Ziegel, (Eisen-) Metalle und Strukturholz. Ausschlaggebend für die Qualität der Sekundärressourcen im Gebäudelager und die Umweltauswirkungen von Gebäudeabbrüchen sind jedoch zum Großteil Baustoffe, die in kleineren Mengen vorkommen: Holz, Kunststoffe, teerhaltige Stoffe, Deckenbefüllungen, asbesthaltige Baustoffe, usw.

Das EnBa Life+ Projekt sowie weitere Studien (Lichtensteiger 2006; Deilmann und Schiller 2010), haben gezeigt, dass es durch verschiedene Methoden möglich ist, die großen, vor allem die mineralischen Fraktionen des Gebäudebestandes auf nationaler oder regionaler Ebene mengenmäßig festzulegen. Die Quantifizierung der kleineren Bauteile (z.B. Bauteile des Innenausbaus) hingegen ist nicht, bzw. nur unter sehr großem Aufwand möglich. Dementsprechend kann eine regionale Charakterisierung des Gebäudebestandes im Rahmen des EnBa- Projektes nicht erfolgen.

Da für die Modellierung des Gebäudeabbruches und die Bewertung der Abbruch- und Aufbereitungsverfahren detaillierte Informationen über die Zusammensetzung des Abbruchgegenstandes notwendig sind, wird für die Szenarioanalyse nicht der Gebäudebestand Österreichs eingesetzt, sondern einzelne Gebäude. Diese Gebäude werden fiktiv zusammengestellt und orientieren sich bezüglich Zusammensetzung nach den im Rahmen von Aktion 2 untersuchten Abbruchobjekten. Die Bauteile der Gebäude werden mit Schadstoffkonzentrationen belegt, die teilweise aus der Literatur sowie aus den Laborergebnissen des EnBa- Projektes stammen.

4.1.1 Bauperioden

Die baustoffliche Zusammensetzung hängt stark vom Errichtungszeitpunkt des Gebäudes ab. Vermehrt werden in der Literatur sog. „Bauperioden“ definiert, innerhalb derer Gebäude ähnliche Baustoffe und Bauweisen aufweisen. Auch der prozentuelle Anteil einzelner Baustoffe ist bei Gebäuden aus der gleichen Bauperiode ähnlich. Zu beachten ist bei dieser Einteilung der Gebäude, dass diese im Laufe der Nutzungsphase mehrmals renoviert bzw. umgebaut werden können. Folglich kann vor allem die nicht tragende Bausubstanz, die eine kürzere Lebensdauer hat als die Tragende, nicht mehr durch Bauperioden definiert werden. In dieser Studie wird jedoch davon ausgegangen, dass die Gebäude nicht renoviert wurden, bzw. dass keine „neueren“ Baustoffe im Laufe der Nutzungsphase hinzugefügt wurden. Basierend auf Literaturrecherchen, Erkenntnissen aus Action 5 und eigenen Überlegungen werden für diese Studie folgende Bauperioden festgelegt:

1. Bauperiode bis 1945
2. Bauperiode 1945 – 1980
3. Bauperiode ab 1980.

Die erste Bauperiode (bis 1945) umfasst die Gebäude, die vor 1945 gebaut wurden. Diese zeichnen sich durch einen hohen Anteil an Naturstein aus, vor allem im ländlichen Bereich. Die übrige tragende Gebäudesubstanz besteht aus Backsteinziegel. Ein relativ hoher Holzanteil, wenig Kunststoffe und Metalle sind bezeichnend für diese Bauperiode. Problematisch sind vor allem die Deckenbefüllungen, die meistens aus Schlacken bestehen.

In der zweiten Bauperiode (1945 – 1980) nimmt der Baustoff Beton stark zu und wird in den 60er – 70er Jahren zum mengenmäßig bedeutendsten Baustoff in den Gebäuden, gefolgt vom Ziegel. Naturstein hingegen wird kaum mehr verwendet. Der Holzanteil nimmt ab, während der Einsatz von Kunststoffen und Metallen (vor allem Bewehrungsstahl) zunimmt. Diese Periode ist die problematischste in Bezug auf Schadstoffe. Durch ihre Vorteile als Holzschutzmittel, Weichmacher, Stabilisierungsmittel, Betonverflüssiger, Flammschutzmittel usw. finden vielfältige organische Schadstoffe ihren Weg in das Gebäudelager. Es sind dies beispielsweise PCB, PCDF, Furane, Terpentine, verschiedene VOCs, PCP und andere Holzschutzmittel. Ein sehr problematischer Baustoff, der während dieser Phase verstärkt eingebaut wird, ist Asbest. Vor allem bei Abbrüchen und Renovierungen muss darauf geachtet werden, dass asbesthaltige Baustoffe sachgerecht ausgebaut und entsorgt werden, um nicht die Gesundheit der Anlieger, der Bauarbeiter bzw. der Angestellten bei Aufbereitungsanlagen zu gefährden.

Im Rahmen des EnBa- Projektes wurde kein Abbruch eines Gebäudes aus der Bauperiode nach 1980 dokumentiert. Aus diesem Grund wird in der Szenarioanalyse diese Bauphase nicht berücksichtigt.

4.1.2 Auswahl der Materialien

Aufgrund der Vielfalt an Materialien in Gebäuden ist es im Rahmen der Modellierung nicht möglich, alle Materialien zu berücksichtigen. Es wird deshalb eine Auswahl an Baustoffen und –teilen getroffen, aus denen ein durchschnittliches Gebäude aus den betrachteten Bau-perioden zusammengesetzt ist.

4.1.2.1 Materialien der tragenden Gebäudestruktur

Die tragende Gebäudestruktur der betrachteten Bauwerke setzt sich aus folgenden Baustoffen zusammen:

1. Ziegel
2. Beton
3. Naturstein und Sand
4. Mörtel
5. Baustahl und Bewehrungsstahl
6. Strukturholz

4.1.2.2 Materialien des Gebäudeausbaus – nicht tragende Gebäudeteile

Zusätzlich zur tragenden Gebäudestruktur werden folgende Bauteile und –materialien berücksichtigt:

7. Holz (nicht tragend)
8. Fangkopf
9. Boden- und Wandbeläge Fliesen
10. Bodenbeläge Kunststoff
11. Deckenbefüllungen
12. Estriche
13. Putze und Anstriche
14. Gipsgebundene Baustoffe
15. Eisenmetalle
16. Nichteisenmetalle
17. Teerhaltige Bausubstanz
18. Baustoffe aus Asbest

4.1.3 Die Modellgebäude

Die Modellierung wurde an zwei Gebäuden durchgeführt, aus den Bauphasen vor 1945 und 1945 – 1980, respektive. Tabelle 4-4 zeigt die technischen Daten der beiden Gebäude.

Tabelle 4-4: Technische Daten der Modellgebäude

Bauteile	Vor 1945	1945 bis 1960
Grundfläche	313 m ²	313 m ²
Ausmaße	12,5 x 25 m	12,5 x 25 m
Geschoßanzahl	3	3
Gesamtnutzfläche	980 m ²	1.076 m ²
Bruttorauminhalt (BRI)	4539 m ³	3600 m ³
Fundament	313 m ²	313 m ²
Ausführung	Bodenplatte	Bodenplatte
Raumhöhe (Wohnraum)	3,6 m	2,6 m
Raumhöhe (Keller)	2,1 m	2,1 m
Dachbauweise	Steildach	Steildach
Dachfläche	442 m ²	442 m ²
Dachdeckung	553 m ²	553 m ²
Ausführung	Ziegel	Eternit
Fassade (exkl. Fenster)	888 m ²	663 m ²
Fassadengestaltung	Putz	Eternit
Dämmung	keine	keine
Fenster (Stk.)	39	39
Maße	1,2 x 2,4 m	1,2 x 2,4 m
Ausführung	Holz	Holz
Fensterfläche (Gesamt)	112 m ²	112 m ²
Türen (Stk.)	40	40
Maße	0,95 x 2 m	0,95 x 2 m
Ausführung	Holz	Holz
Türfläche	76 m ²	76 m ²
Wand tragend	55 cm	36 cm
Ausführung	Vollziegel	Hochlochziegel
Laufmeter [lfm/Etage]	100	100
Zwischenwand	25 cm	18 cm
Ausführung	Vollziegel	Hochlochziegel
Laufmeter [lfm/Etage]	50	50
Decke	40 cm	30 cm
Ausführung	Tramdecke	Stahlbeton
Estrich	keiner	Zement
	0 cm	5 cm
Schüttung	Schlacke	Sand
	12 cm	3 cm
Bodenbeläge		
	95 % Holz	50 % Holz
	0 % Kunststoff	45 % Kunststoff
	5 % Keramik	5 % Keramik
Innenputz	Kalkputz	Gipsputz
Mächtigkeit	1 cm	1 cm
Außenputz	Kalkputz	Kalkputz
Mächtigkeit	1,5 cm	1,5 cm
Kellergeschoß	12,5 x 25 x 2,1	12,5 x 25 x 2,1
	Naturstein	Hochlochziegel
Erdgeschoss	12,5 x 25 x 3,6	12,5 x 25 x 2,6
	Naturstein	Hochlochziegel
1. Stock	12,5 x 25 x 3,6	12,5 x 25 x 2,6
	Vollziegel	Hochlochziegel
2. Stock	12,5 x 25 x 3,6	12,5 x 25 x 2,6
	Vollziegel	Hochlochziegel
Dachstuhl	12,5 x 25 x 6,25	12,5 x 25 x 6,25
Decke [m]	0,25	0,2
Gebäudehöhe (Geländekante-Traufe) [m]	11,6	8,4
Gesamthöhe [m]	17,8	14,7
Gesamtmasse [t]	2.312	1.645
t/m² NF	2,4	1,5

Tabelle 4-5 zeigt die Zusammensetzung der Gebäude auf Materialebene. Diese Materialien gehen als Bauteile in die Modellierung ein und sind die Basis für das SFA- System.

Tabelle 4-5: Zusammensetzung der Modellgebäude auf Materialebene

	Materialklasse	Dichte	Gebäude1		Gebäude 2	
			Masse [kg]	Anteil [%]	Masse [kg]	Anteil [%]
	GESAMT		2.043.582		1.529.928	
1	Keramische Baustoffe	1.758,33	636.759	31,20	348.987	23,40
	Vollziegel	1.600	629.941	30,80	26.710	1,80
	Hochlochziegel	1.200	0	0,00	319.853	21,40
	Ziegel	1.600	5.587	0,30	0	0,00
	Ziegel gesamt		635.528	31,10	346.563	22,65
	Ziegel gesamt ohne Kamin		603.185	94,73	319.853	91,65
	Fliesen	2.000	502	0,00	1.625	0,10
	Bodenfliesen	2.000	729	0,00	799	0,10
	Fliesen gesamt		1231	0,06	2424	0,16
2	Holz und Holzwerkstoffe	675	102.967	5,00	16.446	1,10
	Konstruktionsholz	600	101.966	5,00	15.295	1,00
	Holz, lackiert	700	697	0,00	697	0,00
	Hartfaserplatte	800	0	0,00	304	0,00
	Spanplatte	800	304	0,00	150	0,00
	Holz Innenausbau gesamt		1001	0,05	1151	0,08
3	Natur- und Kunststein	2.128,57	686.486	33,60	75.000	5,00
	Naturstein	2.600	686.486	33,60	0	0,00
	Sand	2.000	0	0,00	75.000	5,00
4	Metalle	5.842,17	4.005	0,20	17.216	1,20
	Stahl	7.800	1.800	0,10	15.000	1,00
	Eisen, Blech	7.800	2.131	0,10	2.028	0,10
	Verzinktes Blech	7.800	70	0,00	183	0,00
	Kupfer	8.920	30	0,00	100	0,00
	NE-Metalle gesamt		30	0,00	100	0,01
	FE-Metalle gesamt		2.201	0,11	2.211	0,14
5	Zementgebundene Baustoffe	1.744,23	544.028	26,60	983.374	65,80

	Schlackenbeton	1.500	0	0,00		11000	0,00
	Beton	2.400	88.200	4,30		735.000	49,20
	Zementmörtel	2.000	170.288	8,30		92.124	6,20
	Mörtel ohne Kamin	2.000	161.691	7,91		85.024	5,56
	Schüttung	1.700	254.290	12,40		0	0,00
	Estrichbeton	2.000	31.250	1,50		156.250	10,50
6	Asphalt/Bitumen	1.500	294	0,00		5478	0,10
	Bitumenpappe	1.200	0	0,00		4500	0,00
	Fliesenkleber	1.500	294	0,00		70	0,10
7	Natürliche Mineralfasern	2.000	0	0,00		3.536	0,20
	Eternit	2.000	0	0,00		3.536	0,20
8	Kunststoffe	718,2	1	0,00		2.470	0,20
	PVC Bodenbelag	1.700	0	0,00		2.468	0,20
9	Gipsgebundene Baustoffe	983,33	14.958	0,70		0	0,00
	Gipsdiele	900	0	0,00		20000	0,00
	Gipsputz	1.200	14.958	0,70		0	0,00
10	Kalkgebundene Baustoffe	1.520,83	52.704	2,60		45.116	3,00
	Außenputz	1.800	21.366	1,00		22.114	1,50
	Innenputz (Kalkgips?)	1.400	27.121	1,30		19.393	1,30
	Anstrich	1.800	4.216	0,20		3.609	0,20

4.1.4 Schadstoffkonzentrationen in Bauteilen

Um die Pfade der Wert- und Schadstoffe während des Gebäudeabbruches zu berechnen, werden für alle im Gebäude vorhandenen Bauteile Schadstoffkonzentrationen festgelegt. Diese werden teilweise aus der Literatur und teilweise aus Laborergebnissen im Rahmen von Aktion 2 bestimmt. Tabelle 4-6 zeigt die ermittelten Mittelwerte und Standardabweichungen des Mittelwertes für die verschiedenen Schadstoffkonzentrationen der Bauteile und – stoffe.

Tabelle 4-6: Schadstoffkonzentrationen in den Baustoffen

Baustoff	Mittelwert		Stabw.	Mittelwert		Stabw.	Mittelwert		Stabw.
	Pb			Cr			Cu		
	[mg/kg]		[mg/kg]	[mg/kg]		[mg/kg]	[mg/kg]		[mg/kg]
Naturstein	15	±	8	20	±	10	16	±	8
Ziegel	15	±	1	76	±	20	22	±	4
Beton	16	±	8	24	±	7	12	±	2
Zementmörtel	11	±	3	25	±	3	7	±	1
Kalkputz und Anstrich	18	±	3	23	±	4	8	±	2
Strukturholz	24	±	5	10	±	2	3	±	1
Estrich	11	±	4	19	±	7	8	±	2
Fangkopf	13	±	1	74	±	4	19	±	1
Beschüttung	200	±	105	164	±	65	27	±	12
Schlackenbeton	316	±	294	212	±	164	74	±	51
Fliesen	6.532	±	2.159	159	±	25	40	±	4
Gipshaltige Baustoffe	40	±	20	23	±	4	8	±	2
Kunststoff	10.000	±	2.000	45	±	20	16	±	4
Holz	1.900	±	551	67	±	16	16	±	4
Teerhaltige Baustoffe	309	±	77	10	±	3	129	±	32

4.2 Aufbau der Szenarien

4.2.1 Fragestellung

Die Szenarioanalyse soll es ermöglichen, verschiedene Möglichkeiten des Rückbaus und der Bauschutttaufbereitung zu untersuchen und zu beurteilen. In erster Linie geht es darum abzuwägen, ob eine Separierung der Wert- und Schadstoffe am Anfang des Gebäudeabbruches durch selektiven Rückbau oder am Ende des Prozesses, durch Baurestmassenaufbereitung effizienter ist. Dabei sollen Umweltaspekte sowie der ökonomische Aufwand analysiert werden. Aus diesen Gründen sind die Szenarien technologiebasiert.

4.2.2 Komponenten des Systems Gebäudeabbruch

Das System Gebäudeabbruch besteht aus folgenden Komponenten (Prozesse und Sub-Prozesse), die komplementär oder alternativ in den verschiedenen Szenarien eingebaut werden:

Abbruch:

- Demolierung (maschinell)
- Selektiver Rückbau (mit verschiedenen Genauigkeitsstufen)
- Selektiver Abbruch (maschinell)

Sortierung auf der Baustelle

Bauschuttzubereitung:

- Mobile Anlage
- Stationäre Anlage mit Brechstufe und Magnetabscheider
- Stationäre Anlage mit Brechstufe, Magnetabscheider und Windsichter
- Stationäre Anlage mit Brechstufe, Magnetabscheider, Nasszubereitung (Setzsortierung), Wirbelstromabscheider, Farbsortierung und Siebung.

Zusätzlich werden die „Endprozesse“ für die verschiedenen Fraktionen berücksichtigt:

Recycling:

- Wiederverwendung Strukturholz
- Metallrecycling
- Tiefbau für mineralische RC- Baustoffe
- Betonherstellung mit mineralischen RC- Baustoffen
- Ziegelsplittrecycling

Thermische Verwertung:

- Müllverbrennungsanlage

Entsorgung:

- Baurestmassendeponie
- Schlackendeponie

Die Technologien und Verfahren des Rückbaus und der Bauschuttzubereitung wurden ausführlich in Aktion 6 beschrieben. Deshalb wird in Aktion 8 darauf verzichtet.

4.2.3 Szenarien

4.2.3.1 Suboptimales Szenario

Das Suboptimale Szenario wird abgeleitet einerseits von Beobachtungen während der Gebäudeabbrüche, andererseits von Expertengesprächen. Dieses Szenario stellt nicht den durchschnittlichen Status Quo der in Österreich stattfindenden Gebäudeabbrüche dar, aber orientiert sich nach einigen in der gängigen Praxis gesammelten Beobachtungen. Es wird exemplarisch ein teilselektiver Rückbau dargestellt. Laut Expertenmeinungen findet in der Praxis der teilselektive Rückbau bei 80 % aller Abbrüche statt. (Steinberger und Pirker 2010). Das Suboptimale Szenario setzt sich aus folgenden Prozessen zusammen:

1. GEBÄUDEABBRUCH

Der Prozess Gebäudeabbruch wird in 2 Phasen, in der SFA dargestellt durch „Subsysteme“, unterteilt. Die erste ist der selektive Rückbau, die zweite die Demolierung. Dabei betrifft der selektive Rückbau den Ausbau nichttragender Bauteile und Baustoffe. Meistens händisch ausgeführt, ist er eher aufwendig und kann in verschiedenen Genauigkeitsgraden erfolgen. Je nach Abbruchverfahren wird durch die darauf folgende Demolierung die tragende Gebäudesubstanz entweder zerstört oder abgetragen. Die Demolierung erfolgt unter Einsatz von

Maschinen – meistens Hydraulikbagger mit Tieflöffel, Abbruchgreifer, Betonschere oder Abbruchhammer.

1.1. Teilselektiver Rückbau

In der Praxis wird ein mehr oder wenig detaillierter selektiver Rückbau als „Entkernung“ bezeichnet. Die Arbeitsgenauigkeit und somit wiederum der Rückbaugrad hängen von verschiedenen Faktoren ab. Der wichtigste limitierende Faktor ist geradezu immer die Zeit. Da der selektive Rückbau meist händisch durchgeführt wird, ist er sehr zeitintensiv, und beträgt zwischen 3 und 7 Arbeitstagen für Ein- oder Zweifamilienhäusern (eigene Beobachtungen). Dies hat hohe Personalkosten zur Folge, ein weiterer Grund, den selektiven Rückbau auf Kosten der Rückbaugenauigkeit rasch abzuwickeln. So werden im Zuge der Entkernung meist die leicht auszubauenden Baustoffgruppen und Bauteile entfernt (Türen, Dachabdeckung, Fußbodenbeläge), während aufwendig abzutrennende Bauteile im Gebäude verbleiben (Wandbekleidungen, Dichtanstriche, verklebte Dämmschichten, usw.). Aus diesen Gründen wird dieser Prozess im suboptimalen Szenario als „teilselektiver Rückbau“ bezeichnet.

In diesem Szenario wird der selektive Rückbau folgender Baustoffe und –teile mit angegebener Genauigkeit rückgebaut:

Tabelle 4-7: Selektiver Rückbau im suboptimalen Szenario: Bauteile und Rückbaugenauigkeit (nach eigenen Beobachtungen auf Abbruchbaustellen)

Bauteil / -material	Trennschärfe [%]
Fe- Metalle (gesamt)	38
Rohre	15
Heizkörper	90
Türstock	80
Blech	70
Holz nicht konstruktiv (gesamt)	68
Bodenbelag	60
Fensterbank innen	50
Fensterflügel	95
Fensterstock	60
Türblatt	95
Türstock	60
Kunststoff	
PVC- Bodenbelag	90
Teerhaltige Baustoffe	
Dachpappe	90
Asbesthaltige Baustoffe	
Eternitplatten	100

1.2. Demolierung

Anschließend an den teilselektiven Rückbau erfolgt der maschinelle Abbruch der tragenden Gebäudesubstanz inklusive der verbleibenden nicht tragenden Bauteile. Die am häufigsten eingesetzten Verfahren sind Abtragen/ Schrämen oder Eindrücken und Einreißen (siehe Aktion 6). Zusätzlich werden einzelne tragende Elemente durch Abgreifen entfernt und aufgrund ihres wirtschaftlichen Wertes einer Wiederverwertung zugeführt. Dies betrifft vor allem Holzbalken des Dachstuhles und Stahl- oder Holzträger in Decken. Teilweise werden so gut wie möglich Betonfraktionen während des Abbruches getrennt abgetragen. Diese können einer direkten Aufbereitung zugeführt werden und hoch qualitatives Recyclingmaterial erzeugen (RB). Folgende Bauteile und Baustoffe werden vor der Demolierung selektiv abgebrochen:

Tabelle 4-8: Selektiver Abbruch Suboptimales Szenario: Strukturholz.

Bauteil / -material	Trennschärfe [%]
Strukturholz	85

Der Baustoff Befüllungen (als Füllmaterial in Decken) könnte als meist durch Schwermetallbelastung kritischer Baustoff leicht entfernt werden, da er nicht mit anderen Bauteilen verbunden ist. Da die Mengen relativ groß sind, und Abbruchgebäude beschränkt mit Kleinbagger befahrbar sind (vor allem alte Gebäude mit Holzdeckenkonstruktionen, die größere Mengen an Befüllungen enthalten), ist der Aufwand, die Befüllungen manuell aus dem Gebäude zu entfernen ziemlich hoch. Aus diesem Grund werden Befüllungen nicht selektiv Rückgebaut, sondern verbleiben im Bauschutt.

2. SORTIERUNG AUF DER BAUSTELLE

Der bei der Demolierung anfallende Bauschutt ist nicht sortenrein, so dass eine Nachsortierung auf der Baustelle erforderlich ist. Dabei werden größere Störstoffe entfernt, vor allem solche, die die maschinelle Bauschuttzubereitung beeinträchtigen würden. Die erreichbaren Erfassungsgrade der Störstofffraktionen sind eher niedrig und die Sortenreinheit des mineralischen Bauschuttes kann durch Sortierung auf der Baustelle nicht erheblich verbessert.

Tabelle 4-9: Sortierung auf der Baustelle, suboptimales Szenario. Bauteile/ -materialien und Sortierleistung (nach (Rentz, Seemann et al. 2003))

Bauteil / -material	Trennschärfe [%]
Fe- Metalle (gesamt)	13
Rohre	10
Heizkörper	10
Türstock	75
Blech	55
Holz nicht konstruktiv (gesamt)	74
Bodenbelag	75
Fensterbank innen	75
Fensterflügel	75
Fensterstock	75
Türblatt	55
Türstock	75
Kunststoff	
PVC- Bodenbelag	0
Teerhaltige Baustoffe	
Dachpappe	0
Strukturholz	
Sperriges Holz	95
NE- Metalle	
Kupferkabel	50

3. MOBILE AUFBEREITUNGSANLAGE

In der Praxis werden mobile und stationäre Aufbereitungsanlagen für Baurestmassen eingesetzt. Da sich zurzeit aufgrund logistischer und ökonomischer Vorteile der Einsatz von mobilen Aufbereitungsanlagen immer stärker durchsetzt, wird im suboptimalen Szenario eine solche berücksichtigt. Die mobile Aufbereitungsanlage, wie sie in der Praxis am häufigsten Anwendung findet, besteht im Wesentlichen aus einer Zerkleinerungsstufe und einem Magnetband für die Entfernung von Eisenmetallen. Zusätzlich kann eine Siebstufe für die Abtrennung der Feinfraktion angeschlossen werden. Da dies in der Praxis eher selten der Fall ist, wird im suboptimalen Szenario davon ausgegangen, dass nur die Eisenmetallfraktion aus dem vorsortierten Bauschuttstrom entfernt wird. Dabei kann laut Hersteller- und Betreiberangaben mit einer Rückgewinnung von 95 % der enthaltenen Eisenmetalle gerechnet werden.

Tabelle 4-10: Aus dem Bauschutt durch mobile Recyclinganlage abgetrennte Fraktion

Baumaterialien/ Fraktionen	Trennschärfe [%]
FE- Metalle	95

4. WIEDERVERWERTUNG IM TIEFBAU

Der Großteil der Recyclingbaustoffe findet derzeit seine Verwendung im Tiefbau. Je nach Qualitätsklasse können diese als Baumaterialien für den Straßenunterbau, Böschungen und Künetten eingesetzt werden. Als Betonzuschlag im Hochbau wird Recyclingmaterial derzeit so gut wie gar nicht verwendet. Lediglich über die Zementherstellung, wo Ziegelsplitt als Tonersatz eingesetzt wird, gelangt ein sehr geringer Teil der Hochbaurestmassen zurück in den Hochbau. Das suboptimale Szenario geht davon aus, dass die hergestellten Recyclingbaustoffe gänzlich im Tiefbau verwendet werden.

5. DEPONIERUNG

Beim Abbruch gelingt eine ca. 80 %ige Erfassung der mineralischen Baustoffe (Deilmann und Schiller 2010). Ungefähr 20 % müssen aus Gründen der Sortenreinheit bzw. der Qualität aus dem Baustoffstrom entfernt und auf Baurestmassendeponien deponiert werden. Ähnliches wurde bei den beobachteten Gebäudeabbrüchen festgestellt. Ebenfalls auf Baurestmassendeponien gelangen Fraktionen aus dem selektiven Rückbau und der Sortierung auf der Baustelle. Diese beinhalten im Wesentlichen folgende Materialien:

1. Asbestkontaminierte Bausubstanz
2. Gipsgebundene Baustoffe
3. Mineralische Restfraktionen
4. Schlackenbeton

6. MÜLLVERBRENNUNGSANLAGE

Die restmüllähnliche Leichtfraktion wird aufgrund ihres hohen organischen Kohlenstoffgehaltes in einer MVA thermisch behandelt. Diese Baustoffe werden durch den selektiven Rückbau und die Sortierung auf der Baustelle erfasst. Folgende Fraktionen gelangen in eine MVA:

1. Kunststoffe
2. Behandeltes Holz
3. Karton, Papier

7. WIEDERVERWENDUNG HOLZ

Strukturholz aus Abbruchgebäuden wird häufig einer Wiederverwendung zugeführt. Meist finden sich Käufer, die Holzbalken und –Bretter private Zwecke erwerben. Andererseits wird, vor allem in ländlichen Gebieten, altes Bauholz in Holzöfen verbrannt. Wiederverwendung und thermische Verwertung von Bauholz erweisen sich beide als äußerst problematisch. Grund dafür ist die Unkenntnis über die Behandlung des Holzes mit Holzschutzmittel und die Tatsache, dass Bauholz im Laufe der Nutzungsphase in den meisten Fällen behandelt wurde. Bauholz sollte deshalb in MVAs thermisch verwertet werden, außer ein Nachweis über die Nichtbehandlung ist möglich. Im suboptimalen Szenario wird angenommen, dass

kleinstückiges Holz sowie Leimholz in einer MVA verbrannt wird, während das Strukturholz für bauliche Zwecke wiederverwendet wird.

8. RECYCLING METALLE

Eisen ist die Baustofffraktion mit der höchsten Wiederverwertungsquote. Das liegt einerseits an Marktwert und Absatzmöglichkeiten von Eisen und Stahl, andererseits gestaltet sich die Rückgewinnung durch Magnetband einfach und effizient. Im suboptimalen Szenario wird davon ausgegangen, dass 95 % der Eisenmetalle aus dem Baurestmassenstrom entfernt und recycelt werden, was der derzeitigen Wiederverwertungsquoten entspricht. NE-Metalle werden im suboptimalen Szenario durch die Sortierung auf der Baustelle rückgewonnen und einem Recycling zugeführt.

4.2.3.2 Szenario 1

Szenario 1 stellt ein Gebäudeabbruch dar, bei dem der selektive Rückbau für alle Bauteile und –schichten eingesetzt wird. Angestrebt wird die Maximierung der Getrennthaltung der verschiedenen Baustoffe während des Abbruches. Als Extremszenario untersucht Szenario 1 die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen des maximierten selektiven Rückbaus und des selektiven Abbruches. Szenario 1 berücksichtigt folgende Prozesse:

1. GEBÄUDERÜCKBAU

1.1. Selektiver Rückbau

Der komplette Innenausbau des Gebäudes wird selektiv rückgebaut. Nach diesem Vorgang soll lediglich die tragende Gebäudesubstanz übrigbleiben. Der Arbeitsaufwand und somit die Kosten des selektiven Rückbaues sind sehr hoch, dafür erreicht man eine sehr gute Sortenreinheit der Materialfraktionen. Dementsprechend werden schadstoffhaltige Bauteile und –stoffe getrennt rückgebaut und aus dem Bauschuttstrom entfernt. Dies erhöht die Arbeitssicherheit an der Baustelle sowie die Umweltqualität der Recyclingbaustoffe.

Folgende Fraktionen werden durch den selektiven Rückbau abgetrennt:

Tabelle 4-11: Bauteile und Baustoffe durch selektiven Rückbau abgetrennt.

Bauteil / -material	Trennschärfe [%]
Fe- Metalle (gesamt)	38
Rohre	15
Heizkörper	90
Türstock	80
Blech	70
Holz nicht konstruktiv (gesamt)	96
Bodenbelag	95
Fensterbank innen	95
Fensterflügel	100
Fensterstock	95
Türblatt	100
Türstock	95
Kunststoff	
PVC- Bodenbelag	90
Teerhaltige Baustoffe	
Dachpappe	90
Bitumenkleber	80
Mineralische Baustoffe	
Estrich	80
Putze und Anstrich	80
Beschüttung	90
Fliesen	85
Gipshaltige Baustoffe	90
Asbesthaltige Baustoffe	
Eternitplatten	100

1.2. Selektiver Abbruch

Nachdem der hauptsächlich manuell durchgeführte selektive Rückbau erfolgt ist, wird die verbleibende tragende Gebäudesubstanz selektiv abgebrochen. Die verschiedenen Baustoffe werden so gut wie möglich getrennt abgetragen und gelagert. Den selektiven Abbruch ermöglicht der Einsatz von Geräten, die mit mehr oder weniger hoher Genauigkeit arbeiten, z.B. Betonschere, Greifwerkzeug usw. Folgende Baustoffe und -teile werden selektiv abgebrochen:

Tabelle 4-12: Selektiver Abbruch: Bauteile, -materialien und Trennschärfe

Bauteil/ -material	Trennschärfe [%]
Beton + Bewehrungsstahl	80
Fangkopf	90
Strukturholz	90
Schlackenbeton	80

Während Dachstuhl und Balkendecken in die Holz- bzw. Eisenmetallfraktion und der Bauschutt vom Fangkopf zur Deponierung überführt werden, verlassen zwei mineralische Wertstofffraktionen die Baustelle Richtung Aufbereitungsanlage: Betonabbruch und gemischter Bauschutt (besteht aus Ziegel, Naturstein und Mörtel). Aufgrund der baulichen Vermischung von Ziegel und Mörtel können diese beim selektiven Abbruch nicht voneinander getrennt werden. Dies kann nur in einer Aufbereitungsanlage geschehen.

2. STATIONÄRE AUFBEREITUNGSANLAGE

Szenario 1 sieht für die Aufbereitung der mineralischen Fraktionen eine stationäre Aufbereitungsanlage vor. Aufgrund der hohen Sortenreinheit der Inputfraktionen ist diese eher einfach gestaltet. Die Aufbereitungsanlage besteht aus einer Zerkleinerungsstufe, einer Siebung und einem Magnetabscheider. Die aus dem Abbruch gewonnenen Fraktionen werden getrennt aufgegeben um sie nicht miteinander zu vermischen. Dementsprechend entstehen zwei mineralische Produkte: einerseits ein hochwertiger Recycling-Beton (RB), andererseits Hochbauabbruch bestehend aus Ziegelsplitt, Betonabbruch Mörtel und Naturstein.

Tabelle 4-13: Trennschärfe der Magnetabscheidung

Baumaterialien/ Fraktionen	Trennschärfe [%]
FE- Metalle	95

3. WIEDERVERWERTUNG IM TIEFBAU UND IM HOCHBAU

Szenario 1 berücksichtigt die Wiederverwertung von RB im Hochbau. Die derzeitige Nachfragesituation für Recyclingbaustoffe lässt deren Einsatz im Hochbau nicht sehr realistisch erscheinen (durch das ausreichende Angebot an Primärrohstoffen). Trotzdem wird in diesem Szenario diese Möglichkeit modelliert, um ökonomische und ökologische Auswirkungen feststellen zu können. Der gemischte Bauschutt hingegen wird nach wie vor im Tiefbau verwendet.

4. DEPONIERUNG

Die Mengen an deponiertem Material sind in Szenario 1 höher, da durch den selektiven Rückbau schadstoffbelastete Bausubstanz besser erfasst werden kann.

1. Asbestkontaminierte Bausubstanz
2. Gipsgebundene Baustoffe
3. Teerhaltige Baustoffe
4. Putz und Anstrich
5. Estrich
6. Beschüttungen
7. Fangkopf
8. Schlackenbeton
9. Mineralische Restfraktionen

5. MÜLLVERBRENNUNGSANLAGE

Die restmüllähnliche Leichtfraktion wird aufgrund ihres hohen organischen Kohlenstoffgehaltes in einer MVA thermisch behandelt. Diese Baustoffe werden durch den selektiven Rückbau und die Sortierung auf der Baustelle erfasst. Folgende Fraktionen gelangen in eine MVA:

- 1- Kunststoffe
- 2- Behandeltes Holz
- 3- Karton, Papier

6. WIEDERVERWENDUNG HOLZ

Das beim selektiven Abbruch zurückgewonnene Strukturholz wird einer Wiederverwendung zugeführt. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Holz nicht behandelt ist.

7. RECYCLING METALLE

Die NE- Metalle werden in diesem Szenario zu einem höheren Grad zurückgewonnen, da der selektive Rückbau der Elektroinstallationen mit höherer Genauigkeit durchgeführt wird.

4.2.3.3 Szenario 2

Während Szenario 1 die Effektivität der Wert- und Schadstofftrennung am Anfang des Gebäudeabbruches durch selektiven Rückbau untersucht, bewertet Szenario 2 diese am Ende der Prozesskette. In Szenario 2 werden die Gebäude ohne selektiven Rückbau demoliert. Selektiv abgetragen werden lediglich die asbesthaltigen Baustoffe (Eternit) sowie das Strukturholz des Dachstuhles und der Decken. Die Bauschuttrecyclinganlage ist stationär und besteht aus sechs verschiedenen Aufbereitungsstufen. Als Extremszenario ist Szenario 2 nicht realistisch, da der selektive Rückbau gesetzlich festgelegt ist

1. DEMOLIERUNG

1.1. Selektiver Rückbau

Szenario 2 sieht den selektiven Rückbau für das Strukturholz des Dachstuhles und der Decken, das die Demolierung und die Handhabung des Bauschuttes stark erschweren würde. Zusätzlich müssen asbesthaltige Baustoffe vor der Demolierung abgetragen werden, denn diese maschinell mit abzubrechen ist gesetzlich nicht zulässig und würde zu einer Gesundheitsgefährdung der Arbeiter und Anreiner führen sowie zu einer Kontamination des Bauschuttes.

Tabelle 4-14: Trennschärfen des selektiven Rückbaues für Szenario 2

Baumaterialien/ Fraktionen	Trennschärfe [%]
Strukturholz	85
Eternitplatten	100

1.2. Demolierung

Nach den vorher genannten Rückbaustufen wird eine Demolierung der gesamten Bausubstanz durchgeführt. Die Gebäude werden durch eindrücken bzw. einreißen mit Hydraulikbagger abgebrochen. Es werden keine Fraktionen getrennt abgetragen.

2. SORTIERUNG AUF DER BAUSTELLE

Nach der Demolierung ist eine Sortierung auf der Baustelle notwendig, da sperrige Störstoffe die Verladung und Aufbereitung der Baurestmassen behindern würden. Tabelle 4-15 zeigt die Trennschärfen für die Sortierung auf der Baustelle für Szenario 2. Da in diesem Szenario hauptsächlich die Leistung der Aufbereitungsanlage untersucht wird, wird der Sortieraufwand auf der Baustelle minimiert; es werden somit nur solche Baustoffe sortiert, die bei der Aufbereitung für die Anlage problematisch sein könnten.

Tabelle 4-15: Trennschärfen für die Sortierung auf der Baustelle, Szenario 2

Bauteil / -material	Trennschärfe [%]
Holz nicht konstruktiv (gesamt)	74
Bodenbelag	75
Fensterbank innen	75
Fensterflügel	62,5
Fensterstock	75
Türblatt	55
Türstock	75
Kunststoff	
PVC- Bodenbelag	0
Teerhaltige Baustoffe	
Dachpappe	0
Strukturholz	
Sperriges Holz	95
NE- Metalle	
Kupferkabel	0

3. STATIONÄRE AUFBEREITUNGSANLAGE

Die hier berücksichtigte stationäre Aufbereitungsanlage besteht aus sechs Aufbereitungsstufen. Anfänglich wird der Bauschutt zerkleinert. Nach Absiebung der Feinfraktion entfernt ein Magnetabscheider die FE-Metalle. Durch Nasssortierung mit Setzbettverfahren die Leichtfraktion ausgeschleust. Ein Wirbelstromabscheider gewinnt die NE-Metalle aus dem Bauschutt zurück, und schließlich trennt eine sensorgestützte Farbsortierung die Ziegelfraktion ab. Tabelle 4-16 führt die Trennschärfen für die Stationäre Aufbereitungsanlage an.

Tabelle 4-16 Trennschärfen der stationären Aufbereitungsanlage (siehe Aktion 6)

Aufbereitungsstufe	Fraktion	Trennschärfe [%]
Magnetabscheider	FE- Metalle	95
Nasssortierung (Setzbettverfahren)	Leichtfraktion	98
Wirbelstromabscheider	NE- Metalle	80
Sensorgestützte Sortierung	Ziegelsplitt	90

Studien zeigen, dass die Schadstoffe verstärkt in der Feinfraktion akkumulieren (Brunner und Stämpfli 1993). Da beim selektiven Rückbau außer dem Asbest keine Schadstoffe abgetrennt werden, wird versucht, durch Absieben der Feinfraktion in der Aufbereitungsanlage die schadstoffreichere Fraktion abzutrennen. Können Trennschärfen für die Abtrennung von Schadstoffen durch die Siebung angegeben werden. Tabelle 4-17 führt die Trennschärfen für Schadstoffe durch Absieben der Feinfraktion an.

Tabelle 4-17: Trennschärfen für Schwermetalle durch die Feinfraktion abgeschieden (Brunner und Stämpfli 1993), eigene Beobachtungen

Schadstoff	Durch Absieben der Feinfraktion < 6,5 mm entfernter Anteil .[%]
Blei (Pb)	49
Chrom (Cr)	32
Kupfer (Cu)	26
Sulfat (SO ₄ ²⁺)	57

4. WIEDERVERWERTUNG IM TIEFBAU

Aus der mineralischen Fraktion der Baurestmassen wird ein Recyclingbaustoff für den Tiefbau gewonnen. Zusätzlich wird durch die sensorgestützte Sortierung reiner Ziegelsplitt gewonnen. Dieser kann als Baustoff für Sportanlagen (z.B. Tennissand) eingesetzt werden.

5. DEPONIERUNG

Auf die Baurestmassendeponie gelangen in Szenario 2 der Eternit aus dem Rückbau und die Feinfraktion aus der Bauschutttaufbereitungsanlage. Aufgrund der Absiebung der Feinfraktion ist die deponierte Menge an Baurestmassen bei Szenario 2 am höchsten.

6. MÜLLVERBRENNUNG

In die Müllverbrennung gelangen die Fraktionen aus der Sortierung an der Baustelle sowie die Leichtfraktion aus der Recyclinganlage.

7. WIEDERVERWENDUNG HOLZ

Das beim selektiven Abbruch zurückgewonnene Strukturholz wird einer Wiederverwendung zugeführt.

8. RECYCLING METALLE

Der Einsatz eines Wirbelstromabscheiders erlaubt die Rückgewinnung von 80% der NE-Metalle. FE-Metalle werden in der Anlage durch den Magnetabscheider zurückgewonnen.

4.2.3.4 Szenario 3

Aus den Ergebnissen der beiden Szenarien 1 und 2 wird Szenario 3 gebildet. Szenario 3 stellt eine realistische Alternative zur Durchführung eines Gebäudeabbruches dar. Es werden Komponenten aus dem selektiven Rückbau (Szenario 1) und der maschinellen Aufbereitung der Baurestmassen (Szenario 2) miteinander kombiniert. Ziel ist es, eine Alternative zu entwickeln, die die Vorzüge der Alternativen von Szenario 1 und 2 aufweist, unter Berücksichtigung der ökonomischen Effizienz. Dieses Szenario soll die Qualität der RC-Baustoffe im Vergleich zum suboptimalen Szenario erhöhen, negative Umwelteinflüsse der Bewirtschaftung der Baurestmassen sowie Ressourcenverbrauch verringern und vom technisch-ökonomischen Gesichtspunkt eine in der Praxis durchsetzbare Alternative für Gebäudeabbruch und Bauschuttrecycling darstellen.

1. GEBÄUDERÜCKBAU

1.1. Gezielter Selektiver Rückbau

In Szenario 3 wird wie in Szenario 1 der selektive Rückbau durchgeführt, jedoch in beschränktem Ausmaß. Es werden gezielt Bauteile aus dem Gebäude entfernt, die erhöhte Schadstoffgehalte aufweisen oder für die RC- Baustoffe störend sind. Somit kann der Aufwand des selektiven Rückbaus erheblich reduziert und die Qualität der RC- Baustoffe trotzdem gewährleistet werden. Tabelle 4-18 führt die durch selektiven Rückbau entfernten Bauteile und die jeweiligen Trennschärfen an.

Tabelle 4-18: Selektiver Rückbau Szenario 3, Bauteile und Trennschärfen.

Bauteil / -material	Trennschärfe [%]
Fe- Metalle (gesamt)	38
Rohre	15
Heizkörper	90
Türstock	80
Blech	70
NE- Metalle	80
Holz nicht konstruktiv (gesamt)	96
Bodenbelag	95
Fensterbank innen	95
Fensterflügel	100
Fensterstock	95
Türblatt	100
Türstock	95
Kunststoff	
PVC- Bodenbelag	90
Teerhaltige Baustoffe	
Dachpappe	90
Mineralische Baustoffe	
Beschüttung	90
Gipshaltige Baustoffe	90
Asbesthaltige Baustoffe	
Eternitplatten	100

1.2. Selektiver Abbruch

Um stör- und schadstoffhaltige Bausubstanz aus dem RC- Baustoff zu entfernen, ist es notwendig, das Gebäude selektiv abzurechen. Außerdem kann dadurch die wertvollere Betonfraktion vom gemischten Bauschutt separiert werden. Tabelle 4-19 gibt die Bauteile und Trennschärfen des selektiven Abbruches an.

Tabelle 4-19: Selektiver Abbruch, Szenario 3. Bauteile und Trennschärfen.

Bauteil/ -material	Trennschärfe [%]
Beton + Bewehrungsstahl	80
Fangkopf	90
Strukturholz	90
Schlackenbeton	80

2. STATIONÄRE AUFBEREITUNG

Die Aufbereitungsanlage in Szenario 3 wird im Vergleich zu Szenario 2 wesentlich reduziert. Nach der Brechstufe und dem Magnetabscheider folgt lediglich eine Windsichtung, die die verbleibende Leichtfraktion aus dem Bauschuttstrom ausschleußt. Da die Feinfraktion nicht übermäßig mit Schwermetallen belastet ist (durch den Ausbau der Deckenbefüllungen wird ein Großteil der belasteten Feinfraktion entfernt), wird sie in Szenario 3 nicht abgesiebt, sondern verbleibt im RC- Material. Tabelle 4-20 führt die Trennschärfen der stationären Aufbereitung für Szenario 3 an.

Tabelle 4-20 Trennschärfen der stationären Aufbereitungsanlage mit Windsichtung, Szenario 3.

Aufbereitungsstufe	Fraktion	Trennschärfe [%]
Magnetabscheider	FE- Metalle	95
Windsichtung	Leichtfraktion	95

3. WIEDERVERWERTUNG IM TIEFBAU

Aus der mineralischen Fraktion der Baurestmassen wird ein Recyclingbaustoff für den Tiefbau gewonnen. Der aufbereitete Betonabbruch wird als Zuschlagstoff für neuen Beton eingesetzt und findet somit seinen Weg zurück in den Hochbau.

4. DEPONIERUNG

Auf die Baurestmassendeponie gelangen in Szenario 3 der Eternit, sowie die weiteren mineralischen Fraktionen aus dem Rückbau (Deckenbefüllungen, Schlackenbeton, Gipshaltige Baustoffe, Fangkopf.). Aus der Aufbereitungsanlage hingegen, werden keine mineralischen Fraktionen deponiert.

5. MÜLLVERBRENNUNG

In die Müllverbrennung gelangen die Fraktionen aus dem selektiven Rückbau (Holz, PVC) sowie die Leichtfraktion aus der Aufbereitungsanlage.

6. WIEDERVERWENDUNG HOLZ

Das beim selektiven Abbruch zurückgewonnene Strukturholz wird einer Wiederverwendung zugeführt.

7. RECYCLING METALLE

FE-Metalle werden teilweise durch den selektiven Rückbau, teilweise in der Aufbereitungsanlage durch den Magnetabscheider zurückgewonnen. NE- Metalle werden zu 80% beim selektiven Rückbau zurückgewonnen und einer Wiederverwertung zugeführt.

5 Ergebnisse

Die in 0 beschriebenen Bauteile der Modellgebäude wurden mit Schadstoffkonzentrationen belegt. Durch die Methode der SFA werden der Gebäudeabbruch und das Bauschuttrecycling modelliert und die Pfade der Baumaterialien respektive der Schadstoffe festgelegt. Dabei wurden die in 4.2.3 angeführten Trennschärfen der verschiedenen Verfahren und Technologien als Transferkoeffizienten für die Prozesse der SFA eingesetzt. Somit ist es möglich, Wert- und Schadstoffe durch die Prozesse der letzten Gebäudelebensphase zu verfolgen und ihren Verbleib in den „Endprozessen“ zu bestimmen.

Dieses SFA- Modell dient als Sachbilanz für die ökonomisch- ökologische Bewertung. Die Prozesse und Güterflüsse werden mit den vorher beschriebenen Indikatoren belegt. Einerseits werden die Kosten quantifiziert, andererseits ausgewählte ökologische Kriterien.

5.1 Das SFA- Modell

Das SFA Modell wurde mit der Software STAN2 erstellt und berücksichtigt alle in 4.2.3 beschriebenen Prozesse. Abbildung 5-1 zeigt das SFA- Modell, mit dem die Szenarioanalyse durchgeführt wurde. Für die zwei entscheidenden Prozesse, der Gebäudeabbruch und die Bauschuttzubereitung, wurden Subsysteme erstellt, die eine detaillierte Anführung der Baustoffflüsse ermöglichen Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 und zeigen die beiden Subsysteme.

Beim Modell wird davon ausgegangen, dass ein Baustoffstrom (das Gebäude), das zusammengesetzt ist aus allen im Gebäude vorhandenen Baustoffen in den Prozess „Gebäudeabbruch“ fließt. Hier findet zunächst der selektive Rückbau dann die Demolierung bzw. der selektive Abbruch statt. Die dabei entstehenden Fraktionen verlassen den Prozess „Gebäudeabbruch“ in verschiedene Richtungen. Gemischter Bauschutt und Betonabbruch kommen nach einer Sortierung auf der Baustelle in die mobile bzw. stationäre Bauschuttzubereitungsanlage. Das maschinell abgetragene in diesem Fall unbehandelte Strukturholz wird wiederverwendet, die rückgewonnenen Metalle werden einem Recycling zugeführt. Mineralische Fraktionen aus dem selektiven Rückbau werden auf einer Baurestmassendeponie abgelagert, während die restmüllähnliche organische Fraktion (Holz, Kunststoffe) aus der Entkernung in einer MVA verbrannt werden.

Aus der Bauschuttzubereitungsanlage entstehen je nach eingesetzter Technologie verschiedene Fraktionen: Metalle werden einem Recyclingprozess zugeführt, mineralische Fraktionen im Tiefbau (RC- Baustoff aus gemischtem Bauschutt), im Hochbau (RC- Beton) oder anderwertig (Ziegelsplitt) wiederverwertet. Die Leichtfraktion aus der Windsichtung wird ebenfalls einer MVA zugeführt.

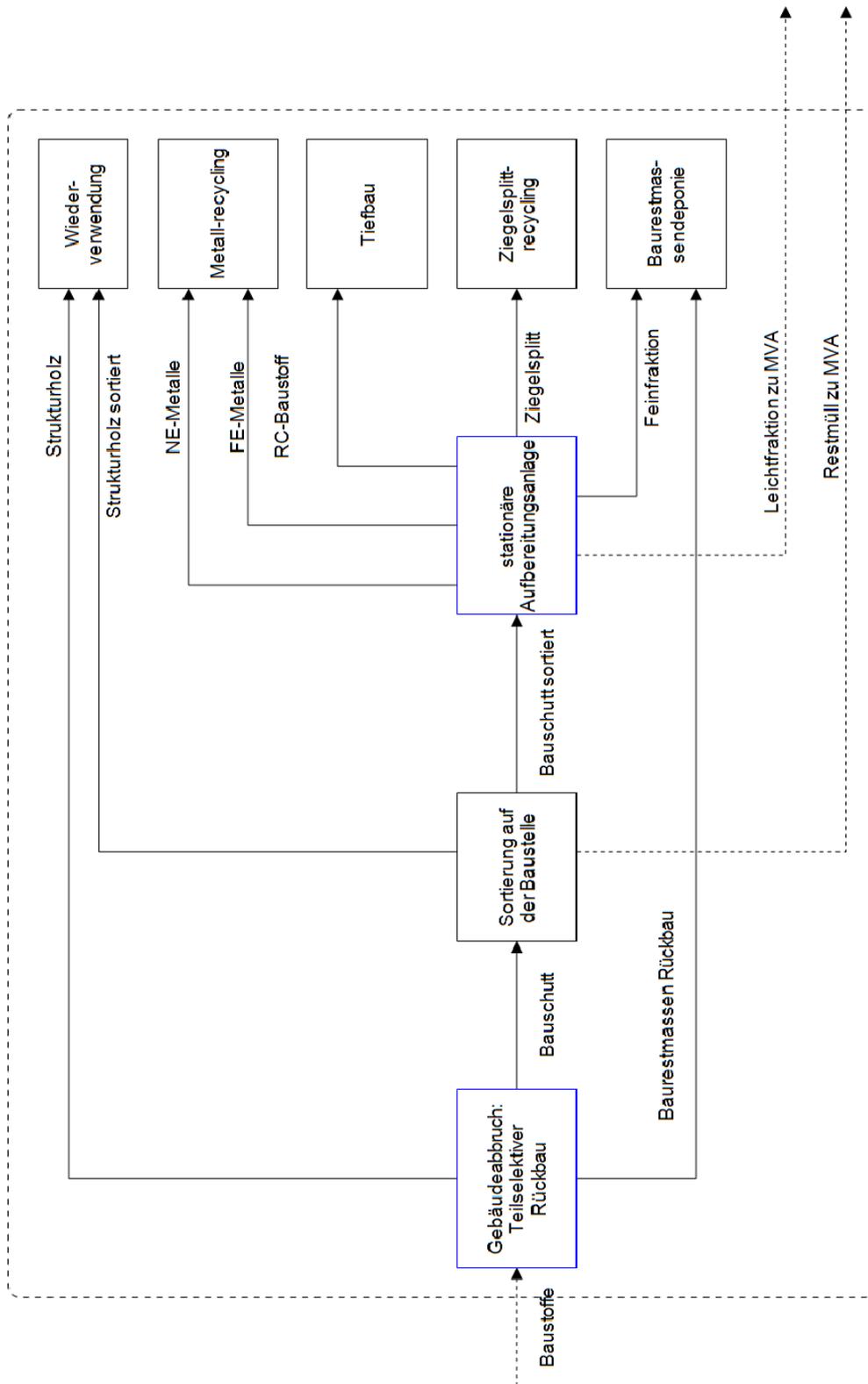


Abbildung 5-1: SFA- Modell für die Szenarioanalyse

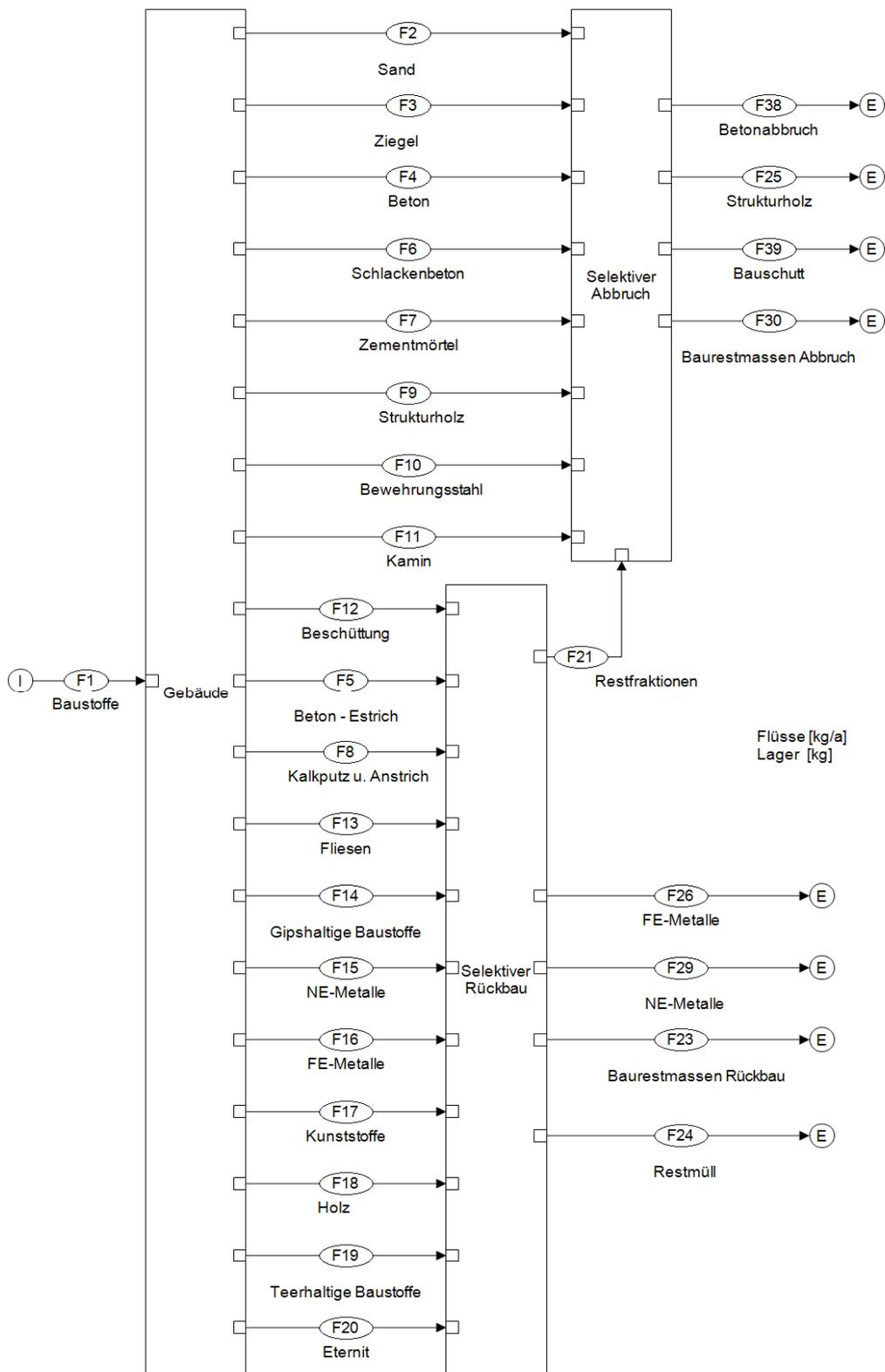


Abbildung 5-2: Subsystem Gebäudeabbruch (selektiver Abbruch und Rückbau)

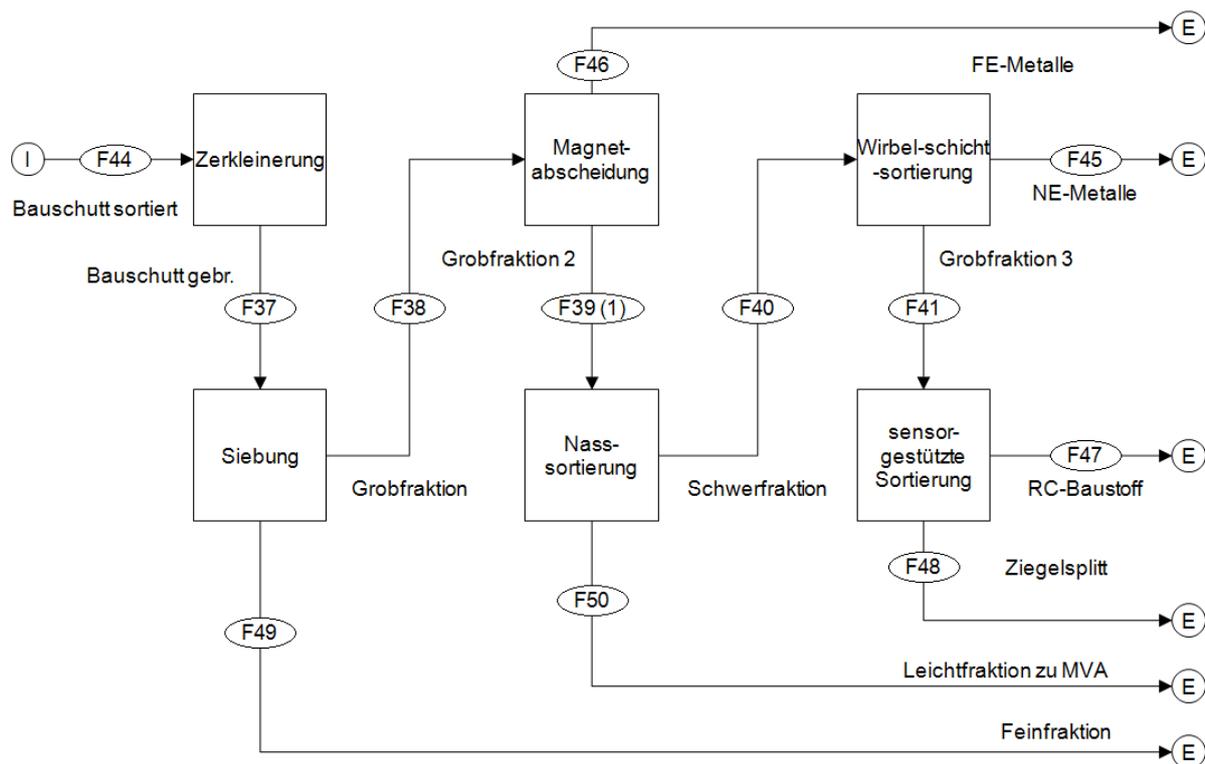


Abbildung 5-3: Subsystem maschinelle Bauschuttzubereitung (in diesem Fall für Szenario 2)

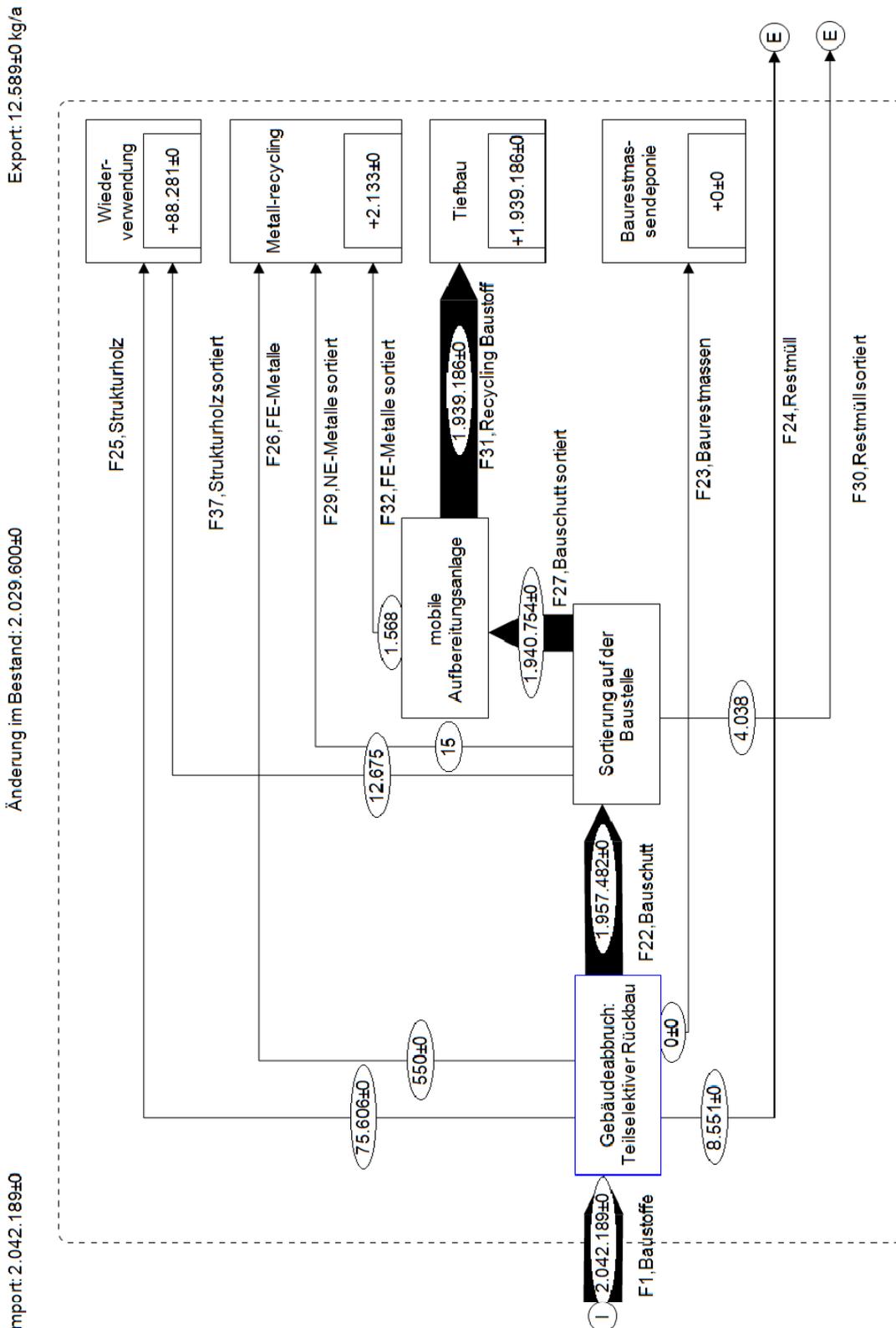
5.2 Stoff- und Güterflüsse für Gebäude 1 (Bauphase 1920 – 1946)

Es werden nun die Pfade der verschiedenen Baumaterialien und ausgewählter Schadstoffe der Gebäudeabbrüche für Modellgebäude 1 dargestellt. Dabei untersucht die Güterflussanalyse in erster Linie die Wertstoffflüsse, während die SFA sich auf ausgewählte Schadstoffe konzentriert.

5.2.1 Suboptimales Szenario

Güterflüsse

Abbildung 5-4 zeigt Güterflussanalyse für das suboptimale Szenario für Gebäude 1. Auffallend ist, dass keine Baurestmassen für die Baurestmassendeponie anfallen. Das Gebäude wird zum Teil vor dem Abbruch entkernt, es werden aber keine mineralischen Fraktionen manuell rückgebaut. Deshalb gelangt das gesamte mineralische Material als RC- Baustoff in den Tiefbau. Dementsprechend ist die Qualität der RC- Baustoffe schlechter als in den folgenden Szenarien, erfüllt jedoch in diesem Fall die Qualitätskriterien für die QK A. Dadurch dass das Gebäude nicht selektiv abgebrochen wird, sondern demoliert, und der Bauschutt auch in der maschinellen Aufbereitung mit Ausnahme der Eisenmetalle nicht weiter sortiert wird, entsteht nur eine Fraktion an mineralischem RC- Baustoff. Diese wird im Tiefbau als Schütt- oder Füllmaterial verwendet.



Abbruch Gebäude 1, suboptimales Szenario

Abbildung 5-4: Güterflussanalyse Suboptimales Szenario, Gebäude 1.

5.2.1.1 Stoffflüsse

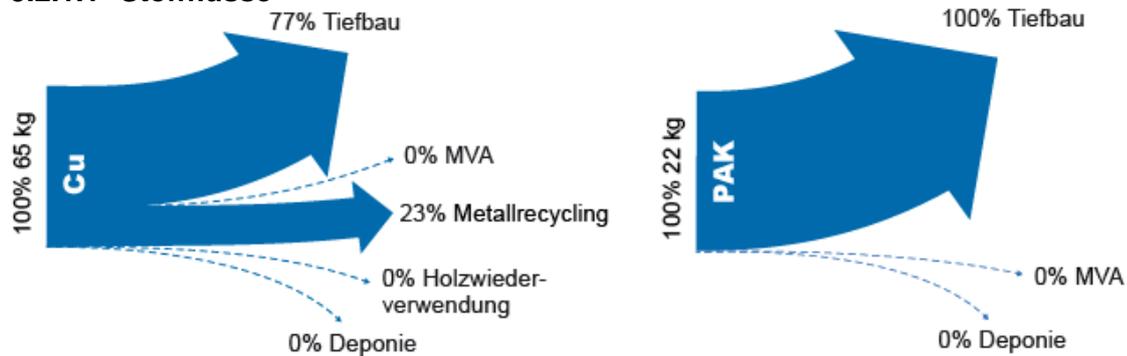
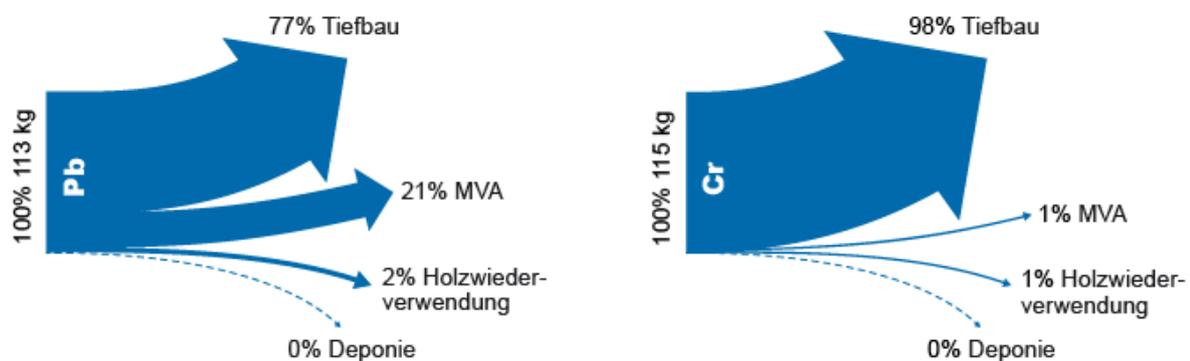


Abbildung 5-5 zeigt die Pfade von Pb, Cr, Cd und der PAKs für das suboptimale Szenario. Es wird ersichtlich, dass der Großteil der Schwermetalle in den Tiefbau gelangt, vor allem was das Chrom betrifft. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass weder beim Rückbau, noch bei der Sortierung und Aufbereitung gezielt schwermetallhaltige Fraktionen entfernt werden. Vor allem die stärker kontaminierte mineralische Bausubstanz (Deckenbefüllungen, Fangkopf, Fliesen) wird nicht selektiv rückgebaut und führt die darin enthaltene Schwermetallfracht mit sich in die Wiederverwertung. Der selektive Rückbau ist hier lediglich imstande, die Pb- Fracht um 21% in die Restmüllfraktion (zur MVA) umzuleiten. Ein ähnlich großer Teil der Cu- Fracht wird durch den Ausbau der Kupferkabel in das Metallrecycling umgeleitet. Keine bzw. ganz geringe Mengen an Schwermetalle gelangen auf die Baurestmassendeponie und in die Holzwiederverwendung. Ersteres ist dadurch bedingt, dass keine Baurestmassen abgelagert werden, während Zweites durch die geringe Schwermetallkonzentrationen im Strukturholz gegeben ist. Im suboptimalen Szenario gelangt praktisch die gesamte PAK Fracht in den Tiefbau. Ursache dafür ist, dass beim selektiven Rückbau die PAK kontaminierte Bausubstanz nicht ausgebaut wird. Die mobile Recyclinganlage ist nicht imstande, diese Bausubstanz aus dem RC- Baustoff zu entfernen.

Suboptimales Szenario



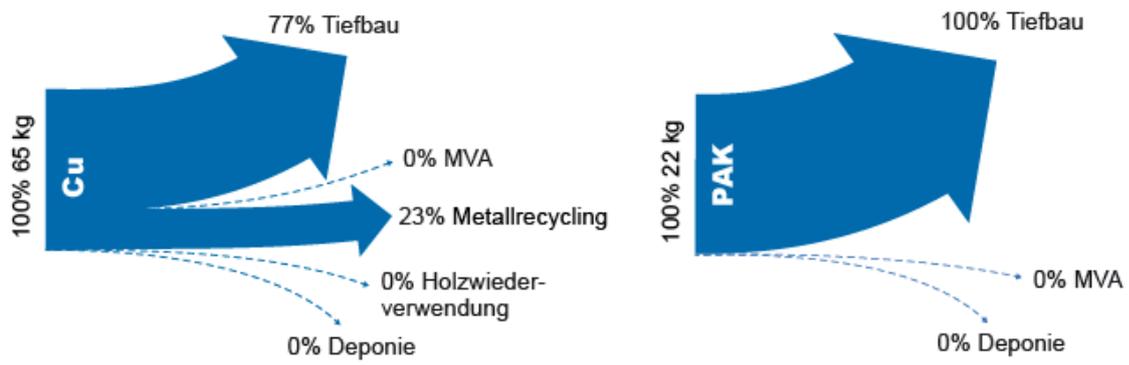


Abbildung 5-5: Pfade ausgewählter Schadstoffe für Gebäude 1, suboptimales Szenario.

5.2.2 Szenario 1: Selektiver Rückbau

5.2.2.1 Güterflüsse

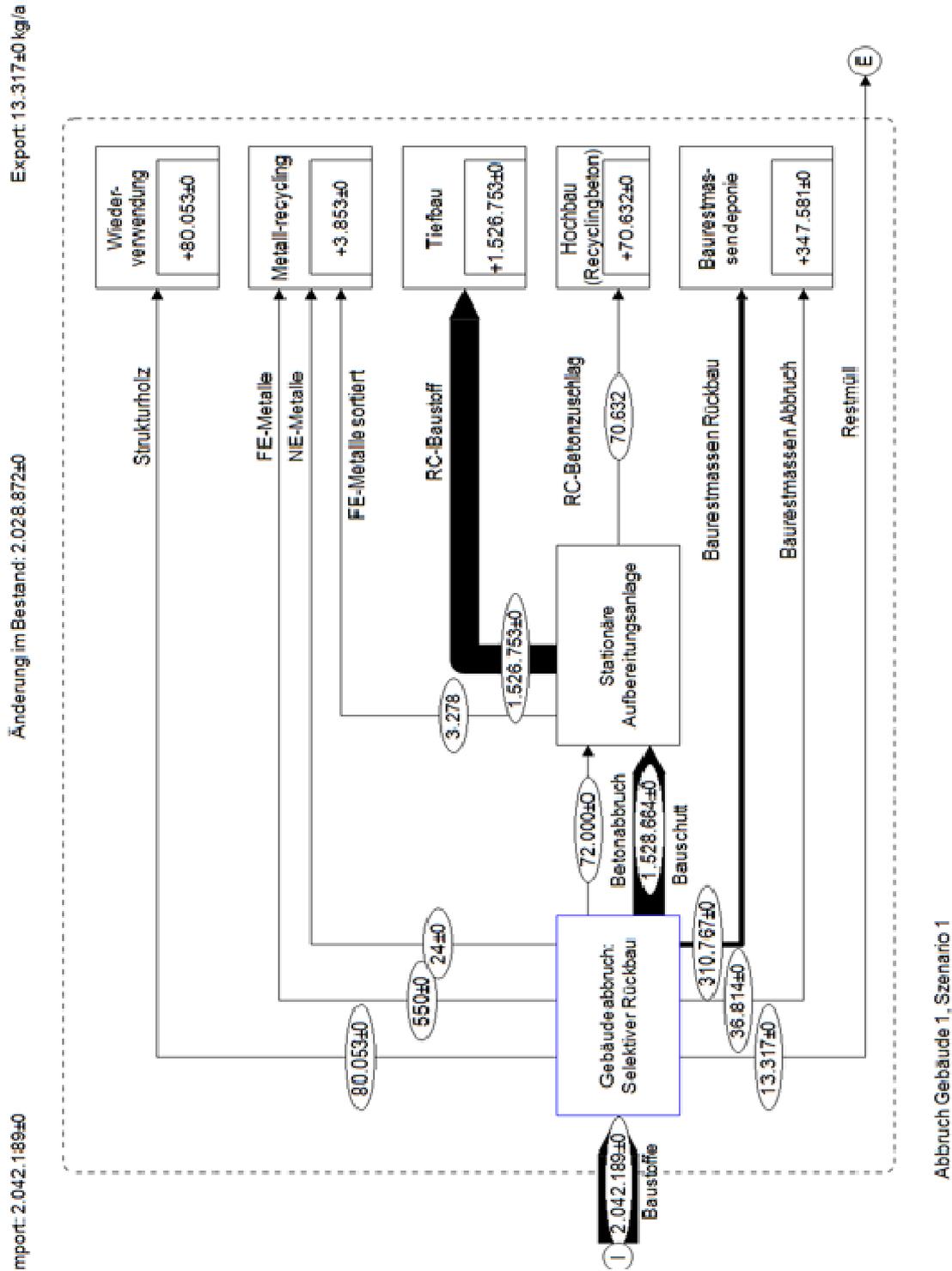


Abbildung 5-6: Güterflussanalyse Szenario 1, Gebäude 1.

Abbildung 5-6 zeigt die Güterflussanalyse für Szenario 1. Der selektive Rückbau ermöglicht es, einen Großteil der Störstoffe und schadstoffhaltige Materialien im ersten Schritt des Gebäudeabbruches aus dem Gebäude zu entfernen. So werden durch die Entkernung und den selektiven Abbruch bereits 91% der Leichtfraktion und 80 % der NE- Metalle abgetrennt. Mineralische schadstoffhaltige Bausubstanz wird ebenfalls zum Großteil aus dem Gebäude ausgebaut bzw. selektiv abgebrochen und entsorgt. Zusätzlich findet beim selektiven Abbruch eine 80%ige Trennung von Betonabbruch statt. In der stationären Aufbereitungsanlage werden lediglich Eisenmetalle abgeschieden.

5.2.2.2 Stoffflüsse

Beim Betrachten der Diagramme in wird sofort ersichtlich, dass der selektive Rückbau imstande ist, die Schadstofffracht in den RC- Baustoffen in Abhängigkeit vom Schwermetall deutlich zu reduzieren. Die Bleifracht im RC- Baustoff beträgt noch 27%, die Chormfracht 60% und die Kupferfracht 49%. Der größte Teil der Pb- Fracht (48%) gelangt auf die Baurestmassendeponie, durch die Entsorgung belasteter mineralischer Bauteile. 37% des Chorms werden ebenfalls über mineralische Substanz auf der Baurestmassendeponie entsorgt, während Kupfer nur zu 12% auf diesem Weg entsorgt wird. Dafür gelangt ein erheblicher Teil des Kupfers über die selektiv rückgebauten Elektroinstallationen in das Metallrecycling. Über die restmüllähnliche Leichtfraktion gelangen 22% des Bleis in die MVA. Chrom und Kupfer hingegen sind in der Leichtfraktion nicht sehr stark enthalten und gelangen nur zu 0,5 bzw. 0,3% in die MVA. Der durch den selektiven Abbruch rückgewonnene RC- Beton ist mit den betrachteten Schwermetallen nicht belastet und führt zwischen 1% und 2% der Gesamtfracht mit.

Betreffend die Abtrennung der PAK- Fracht, weist Szenario 1 eine gute Leistung auf. 71% werden auf die Deponie umgeleitet, während lediglich 29% der Fracht in den Tiefbau gelangt. Der gezielte Rückbau PAK- kontaminierter Bausubstanz kann die Qualität der RC- Baustoffe deutlich erhöhen.

Szenario 1

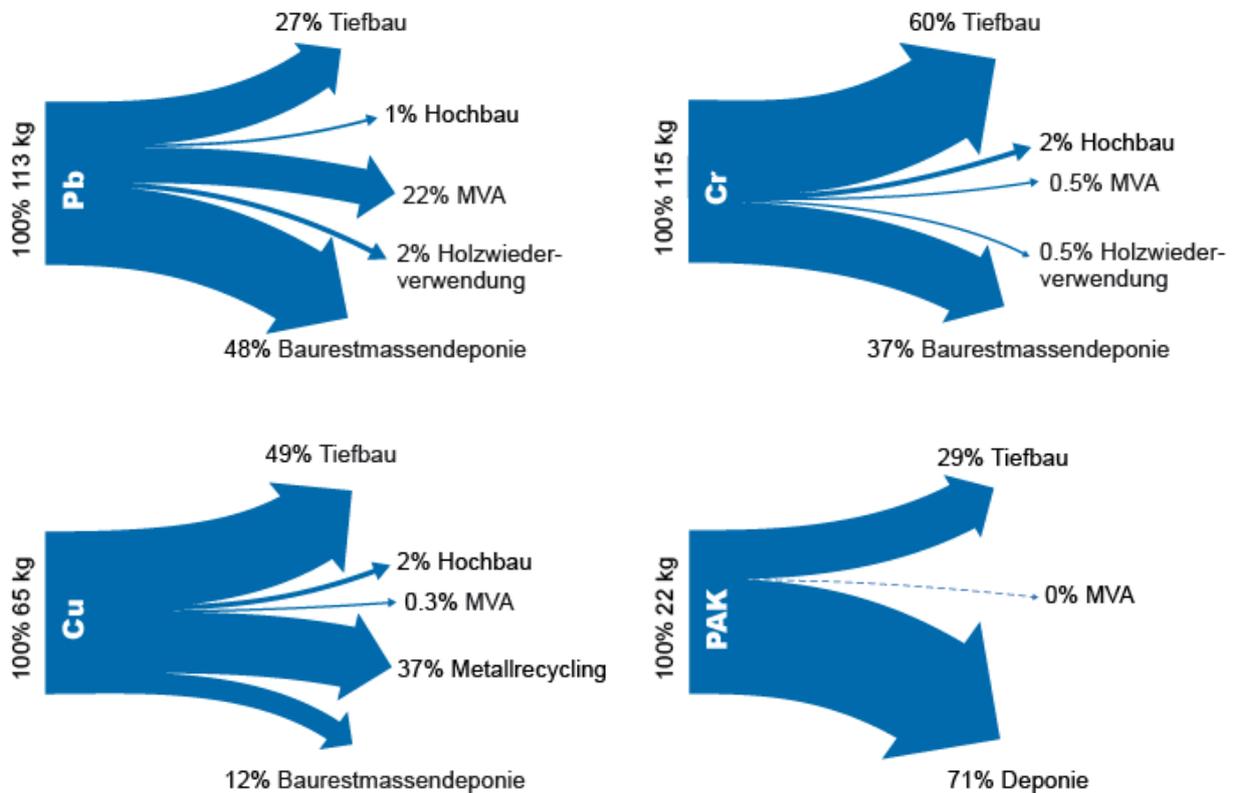


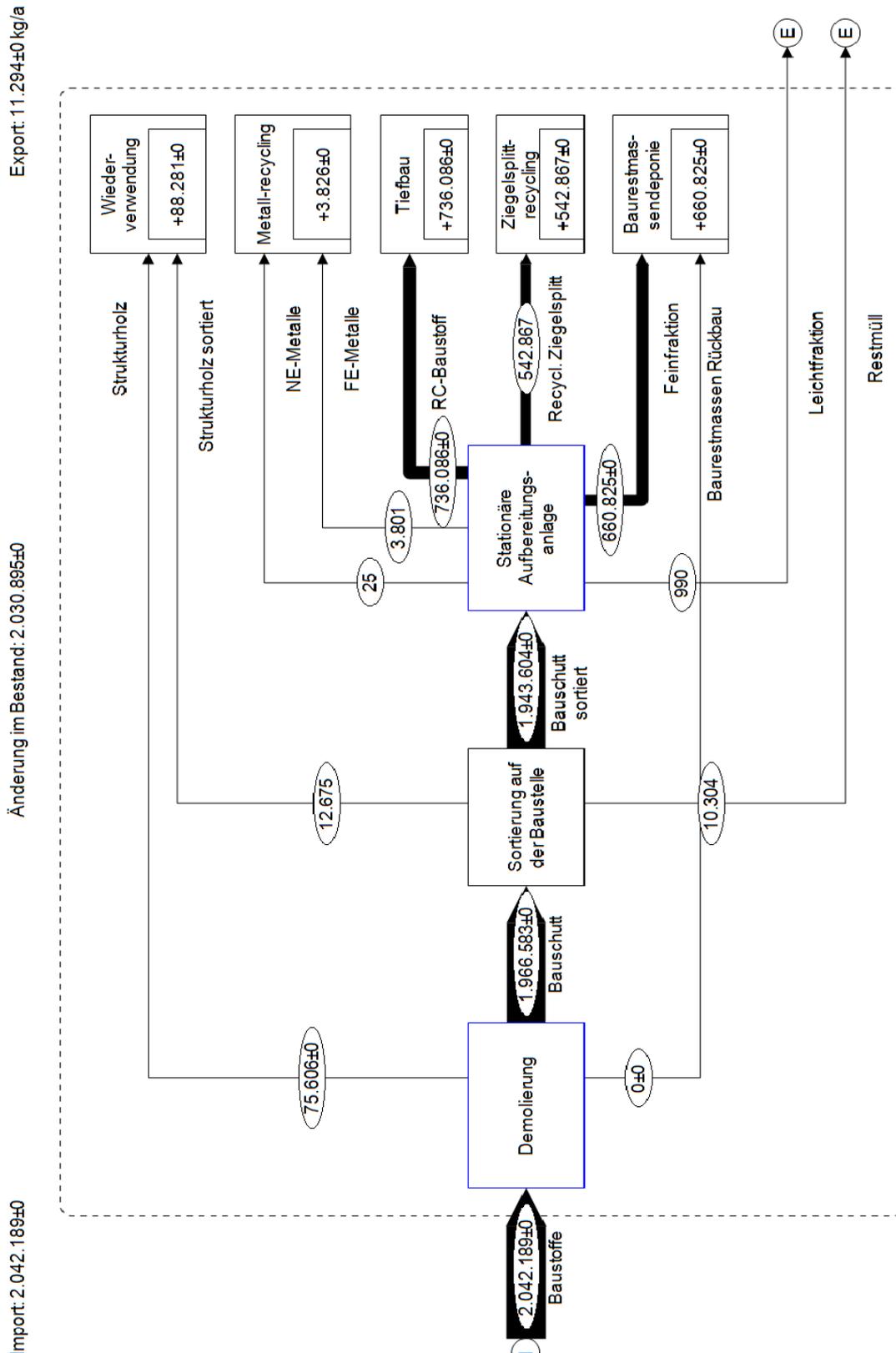
Abbildung 5-7: Pfade ausgewählter Schadstoffe für Gebäude 1, Szenario 1.

5.2.3 Szenario 2: Maschinelle Aufbereitung

5.2.3.1 Güterflüsse

Bei Szenario 2 wird während des Abbruchs lediglich das Strukturholz selektiv abgetragen, da dieses die Demolierung und die weitere Handhabung der übrigen Gebäudesubstanz stark beeinträchtigen würde. Der gesamte Bauschutt gelangt nach einer Sortierung auf der Baustelle in die stationäre Bauschuttanfertigungsanlage, wo er mit der besten zur Verfügung stehenden Technologie aufbereitet wird. Nach der Zerkleinerung verlässt zunächst die abgesiebte Feinfraktion die Aufbereitungsanlage in Richtung Baurestmassendeponie. Dadurch gehen ungefähr 34% des mineralischen Materials für das Recycling verloren. Die Magnetabscheidung schafft die Abscheidung von 95% der FE- Metalle; während die Wirbelschichtsortierung 80% der NE- Metalle zurückgewinnen kann. Durch die Nassaufbereitung werden 98% der im Bauschutt verbliebenen Leichtstoffe (Holz) entfernt. Somit entsteht ein relativ sortenreines RC- Material, von dem durch sensorgestützte Sortierung noch die Ziegelfraktion abgetrennt werden kann.

Abbildung 5-8: Güterflussanalyse Szenario 2, Gebäude 1.



Abbruch Gebäude 1, Szenario 2

5.2.3.2 Stoffflüsse

Szenario 2

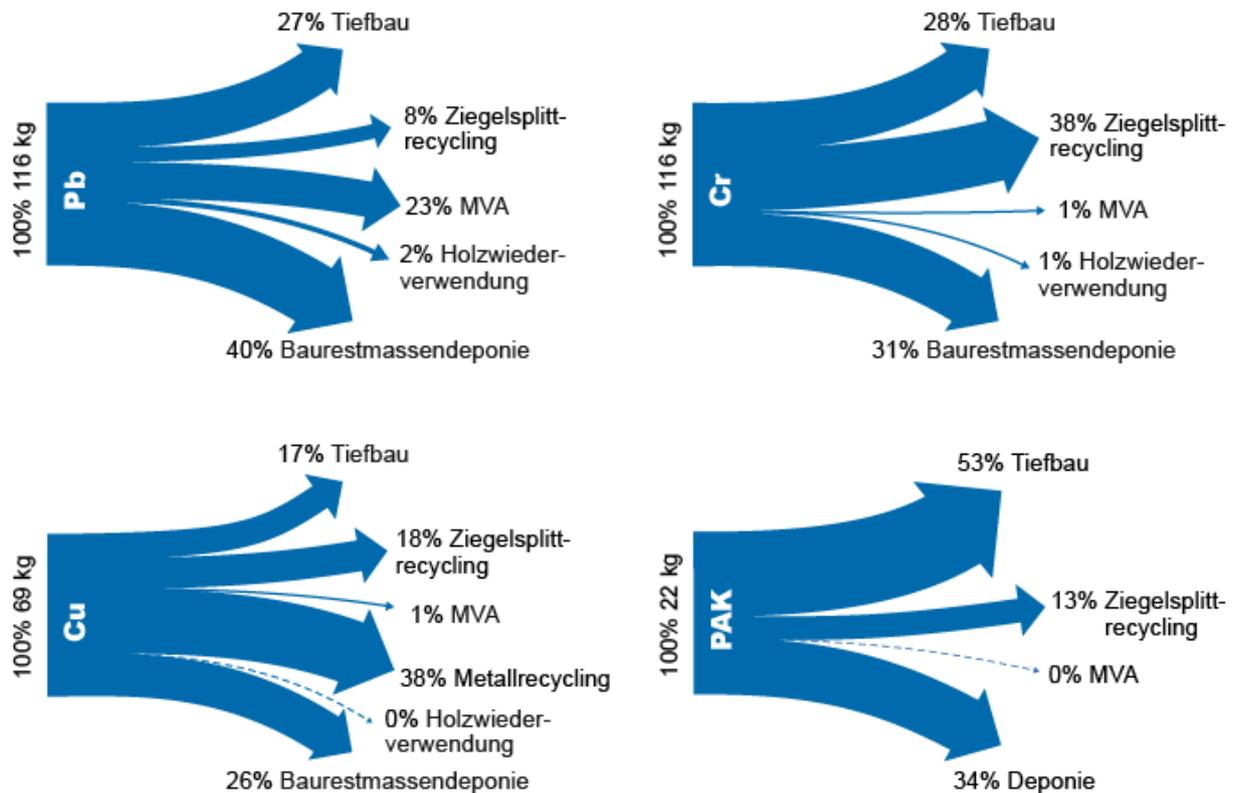
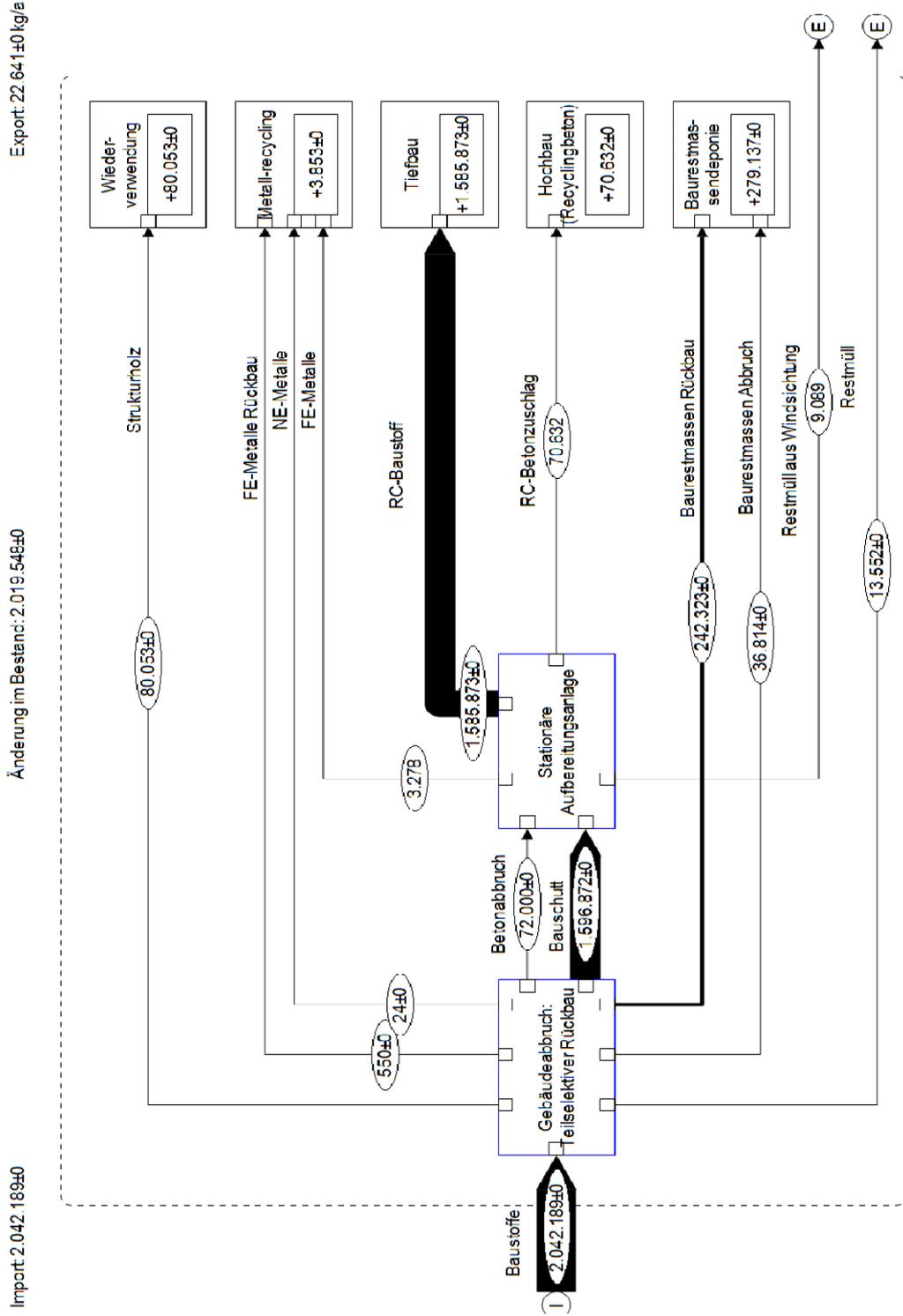


Abbildung 5-9: Pfade ausgewählter Schadstoffe für Abbruch Gebäude 1, Szenario 2

Die in Abbildung 5-9 dargestellten Schadstoffflüsse zeigen die Leistung der maschinellen Aufbereitung in Bezug auf die Schwermetallabscheidung. Es verbleiben 35% des Bleis, 66% des Chroms und 35% des Kupfers in den RC- Baustoffen. Auffallend sind vor allem die PAKs, die zu 53% im RC- Baustoff verbleiben. Im Vergleich zum selektiven Rückbau ist die Schadstofffracht in den Tiefbau höher, mit Ausnahme des Kupfers. Dementsprechend sind auch die Schwermetallfrachten, die auf die Deponie gelangen, geringer als bei Szenario 1 (wieder mit Ausnahme des Kupfers). Dem muss hinzugefügt werden, dass bei Szenario 2 die deponierten Frachten durch die Feinfraktion auf die Deponie kommen. Da die deponierte Menge in Szenario 2 doppelt so hoch ist wie die in Szenario 1, erfolgt hier die Schadstoffentfrachtung auf ineffizientere Weise als beim gezielten Ausbau schadstoffhaltiger Bauteile. Es gehen große Mengen an mineralischen Wertstoffen zusammen mit den Schadstoffen verloren. Ähnlich zu Szenario 1 hingegen verhalten sich die in der Leichtfraktion und im Strukturholz enthaltenen Schwermetallfrachten, sowie das dem Recycling zugeführte Kupfer.

5.2.4 Szenario 3 Realistisches Szenario



Abbruch Gebäude 1, Szenario 3

Abbildung 5-10: Güterflussanalyse Szenario 3, Gebäude 1.

5.2.4.1 Güterflüsse

Die Kombination von Verfahren und Technologien des selektiven Rückbaus und der Baurestmassenaufbereitung, liefert gute Ergebnisse in Bezug auf die Abtrennung von Störstoffen und der Rückgewinnung von Wertstoffen beim Gebäudeabbruch. Ungefähr 90% der Leichtfraktion (Holz) wird bereits durch den selektiven Rückbau aus dem Gebäude entfernt. Der Einsatz des Windsichters ermöglicht die Abtrennung von fast weiteren 9% der Leichtfraktion. Somit werden ungefähr 99% der Leichtstoffe abgeschieden. Des Weiteren werden durch selektiven Rückbau 80% der NE- Metalle abgetrennt und durch Rückbau und Aufbereitung 96% der FE- Metalle. Durch den selektiven Abbruch ist es möglich, die wertvolle RC- Betonfraktion zurückzugewinnen.

5.2.4.2 Stoffflüsse

Szenario 3

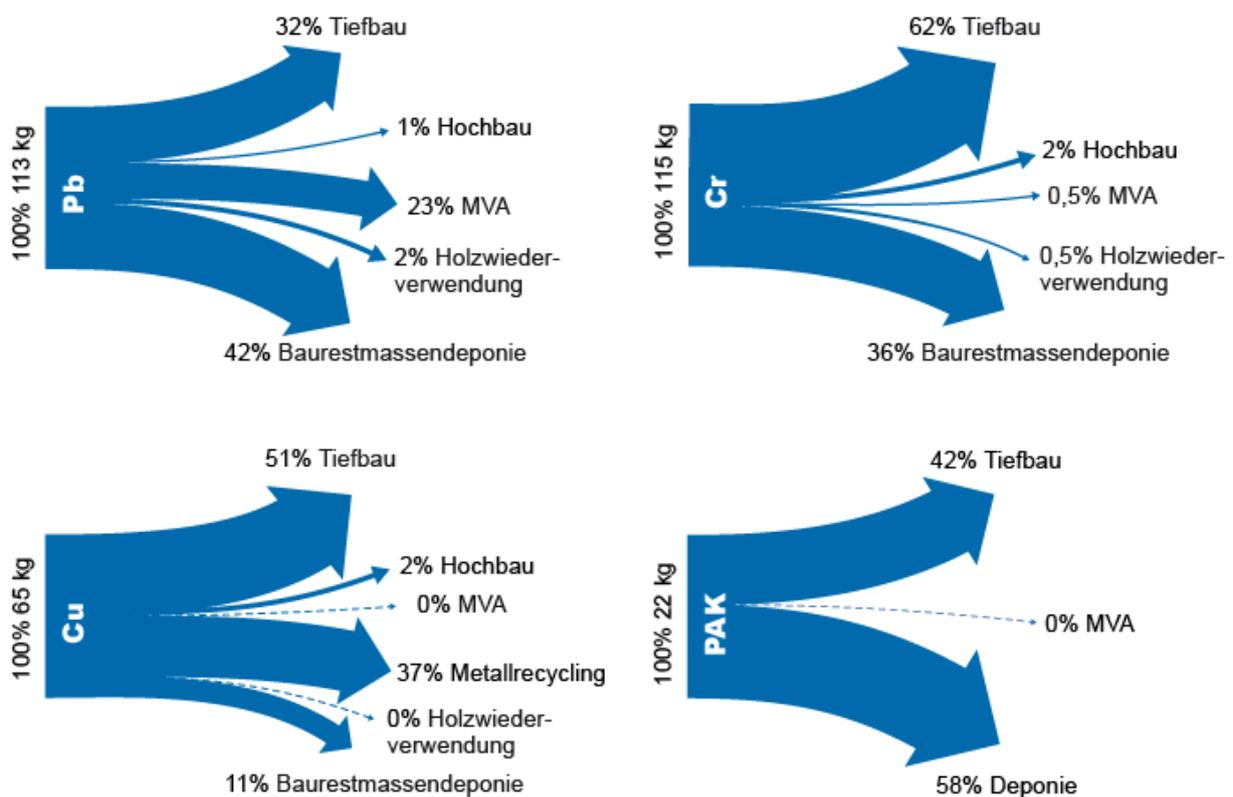


Abbildung 5-11: Pfade ausgewählter Schwermetalle beim Abbruch von Gebäude 1, Szenario 3.

Szenario 3 zeigt ähnliche Abscheideleistung wie Szenario 1. Es verbleiben nämlich jeweils 5% mehr Blei und 2% mehr Chrom und Kupfer im RC- Baustoff. Mit Ausnahme des Kupfers, schneidet Szenario 3 leicht besser als Szenario 2 ab. 42% des Bleis, 36% des Chroms und 11% des Kupfers gelangen auf die Baurestmassendeponie. Insgesamt werden mehr Pb und Cr auf die Deponie umgeleitet als bei Szenario 2 und weniger als bei Szenario 1. Die PAK Fracht in den Tiefbau ist deutlich geringer als bei der maschinellen Aufbereitung (Szenario 2), und höher als beim selektiven Rückbau (Szenario 3).

5.3 Ergebnisse der modifizierten Kosten- Wirksamkeitsanalyse (mKWA)

Die in 6.2 dargestellten SFAs dienen als Grundlage für die Durchführung der mKWA, durch die eine Bewertung der Szenarien erfolgt. In den folgenden Absätzen werden die Erreichungsgrade der Szenarien für die definierten Zielkategorien dargestellt.

5.3.1 Oberziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt

5.3.1.1 Ziel 1.1: Verminderung der Schadstofffracht durch RC-Baustoffe in die Umwelt

Negative Auswirkungen der verschiedenen Szenarien auf die Umwelt werden durch die Schadstofffracht bewertet, die durch die Bauwirtschaft in die Umwelt gelangt. Es sind dies Schadstofffrachten, die über ungebundene RC- Baustoffe in die Bauwirtschaft gelangen (RC- Baustoff- RMH, Ziegelsplitt). Schadstoffe, die in gebundenen RC- Baustoffen enthalten sind (RC- Betonzuschlag) werden hier nicht berücksichtigt. Frachten, die über abfallwirtschaftliche Systeme entsorgt werden (Baurestmassendeponie, MVA), gelten als sachgerecht entsorgt und werden deshalb nicht weiterhin berücksichtigt. Tabelle 5-1 vergleicht die Schadstofffrachten der Szenarien für verschiedene Fraktionen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten.

Tabelle 5-1: Schadstofffracht in die Umwelt durch die Bauwirtschaft

Fraktion	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
RC-Baustoff	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
Pb	87 ± 28	30 ± 6	37 ± 15	36 ± 7
Cr	113 ± 22	69 ± 14	33 ± 15	71 ± 14
Cu	50 ± 7	32 ± 6	15 ± 3	33 ± 6
PAK	22 ± 9	6 ± 1	11 ± 6	9 ± 3
RC-Betonzuschlag				
Pb	-	1 ± 1	-	1 ± 0
Cr	-	2 ± 1	-	2 ± 1
Cu	-	1 ± 0	-	1 ± 0
PAK	-	0	-	0
RC-Ziegelsplitt				
Pb	-	-	9 ± 1	-
Cr	-	-	44 ± 2	-
Cu	-	-	11 ± 2	-
PAK	-	-	3 ± 0	-

Das Ziel in Bezug auf die Schadstofffracht in RC- Baustoffen ist deren Minimierung. Die Bewertung wird deshalb nicht auf einen Grenzwert bezogen, sondern erfolgt absolut. Eine Reduktion der Schadstofffracht in die Umwelt auf 0 kg bedeutet eine 100%ige Zielerreichung, während die Verbringung der gesamten Schadstoffe in die Umwelt einen Zielerreichungsgrad von 0% bedeuten würde.

Tabelle 5-2 zeigt die prozentuelle Verminderung der Schadstofffracht in die Umwelt durch die Anwendung der verschiedenen Szenarien an.

Tabelle 5-2: Verminderung der Schadstofffracht in die Umwelt (bezogen auf 100% der im Gebäude enthaltenen Schadstoffe)

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Pb	23%	73%	59%	68%
Cr	2%	40%	33%	38%
Cu	23%	51%	77%	49%
PAK	0%	73%	50%	59%

Schadstoffe haben verschiedene Wirkungen auf Organismen. Die Ökotoxizität der Schadstoffe wird durch die Letale Konzentration ausgedrückt (LC). Die LC 50 gibt die Konzentration

on an, bei der 50% der Versuchsorganismen bei einer Exposition innerhalb der vom Versuch bestimmten Zeit (z.B. 2 Tage) sterben. In Abhängigkeit von der LC 50 werden die Gewichtungsfaktoren der betrachteten Schadstoffe angenähert. Je höher die LC 50, desto weniger toxisch ist der Schadstoff und desto geringer der Gewichtungsfaktor. Für die PAKs wurde die mittlere LC 50 der 16 betrachteten Verbindungen errechnet. Tabelle 5-3 zeigt die ermittelten Gewichtungsfaktoren.

Tabelle 5-3: Gewichtungsfaktoren, abhängig von der LC 50 der Schadstoffe (Betrachtet wurden die Organismen Daphnia Magna, Eisenia Fetida und Ceriodaphnia Reticulata).

	Pb	Cr	Cu	PAK
Gewichtungsfaktor	0,04	0,52	0,26	0,18

Tabelle 5-4 zeigt die gewichteten Zielerreichungsgrade für das Ziel „Verminderung der Schadstofffracht durch RC- Baustoffe in die Umwelt“.

Tabelle 5-4: Zieleirreichung Ziel 1.1: Verminderung der Schadstofffracht durch RC- Baustoffe in die Umwelt.

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Pb	0,01	0,03	0,02	0,03
Cr	0,01	0,21	0,17	0,20
Cu	0,06	0,13	0,20	0,13
PAK	0,00	0,13	0,09	0,11
Zielerreichung gesamt 1.1	0,08	0,50	0,49	0,46

Das schlechteste Ergebnis wird vom suboptimalen Szenario erreicht. Die schwache Abscheideleistung für Schadstoffe, insbesondere für das höher gewichtete Chrom, führen zu einem niedrigen Erreichungsgrad für Ziel 1.1. Szenario 1 bis 3 weisen ähnliche Zielerreichungsgrade auf. Die beste Leistung wird vom Selektiven Rückbau (Szenario 1) erreicht. Auffallend ist vor allem die hohe Abscheideleistung für Chrom und den PAKs. Dieses Ergebnis zeigt, dass der selektive Rückbau von möglichst vielen potentiell schadstoffbelasteten Baustoffen Schadstoffe am effektivsten aus dem RC- Baustofffluss entfernen kann. Lediglich bei der Abscheidung von Kupfer ist die Leistung von Szenario 2 (maschinelle Aufbereitung) besser. Dies ist einerseits durch die Abscheideleistung des NE-Metallabscheiders, andererseits durch die Entfernung der Feinfraktion mit einer relativ hohen Kupferkonzentration bedingt. Szenario 3 entfernt Chrom und PAKs aus dem Baustoffstrom zu einem leicht geringeren Grad. Bedingt ist dies durch die niedrigere Rückbauscharfe während des selektiven Rückbaus im Vergleich zu Szenario 1.

5.3.1.2 Ziel 1.2: Verminderung Treibhauswirksamkeit

Treibhausrelevanten Emissionen werden durch CO₂- Äquivalente dargestellt. Auch klimarelevante Emissionen werden nicht anhand eines Grenzwertes oder einer natürlichen Hintergrundbelastung bewertet, sondern absolut. D.h. das Ziel ist nicht deren Verträglichkeit, sondern deren Minimierung. Diese Kategorie berücksichtigt auch Gase mit indirekter Klimawirksamkeit. CO z.B. ist an sich nicht treibhauswirksam, es wird jedoch leicht zum klimawirksamen CO₂ oxidiert. Auf der anderen Seite trägt es wie NO_x an der Bildung troposphärischen Ozons bei, welches seinerseits treibhauswirksam ist. Tabelle 5-5 zeigt die absolute Treibhauswirksamkeit der Szenarien, während Tabelle 5-6 die Zielerreichung in Bezug auf dieses Ziel darstellt.

Tabelle 5-5: Treibhauswirksamkeit für die Szenarien

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	kg CO2	kg CO2	kg CO2	kg CO2
Emissionen CO2 Äquivalente	Äquiv.	Äquiv.	Äquiv.	Äquiv.
Selektiver Rückbau	13	2.246	7	1.547
Selektiver Abbruch	93	268	79	263
Demolierung	698	574	719	598
Sortierung auf der Baustelle	84	-	84	-
Mobile Aufbereitungsanlage	2.764	-	-	-
Stationäre Aufbereitungsanlage einfach	-	1.621	-	-
Stationäre Aufbereitungsanlage mit Nassaufbereitung, Wirbelschichtsortierung, sensorgestützte Sortierung	-	-	4.851	-
Stationäre Aufbereitungsanlage mit Windsichtung	-	-	-	2.317
Transport Baurestmassen	5.070	5.093	5.094	5.106
Deponierung Baurestmassen	0	820	1.560	193
Deponierung Schlacken aus MVA	0	0	0	1
Einsparungen an CO2 Äquivalente				
Thermische Verwertung Restmüll	0	0	0	0
Abbau Primärrohstoffe	10.685	8.029	4.050	9.127
durch Fe-Metallrecycling	2.067	3.737	3.709	3.737

durch Kupferrecycling	59	95	99	95
durch Holzwiederverwendung	3.090	2.802	3.090	2.802
Emissionen CO₂ Äquivalente Gesamt	-7.179	-4.039	1.445	-5.736

Es wird ersichtlich, dass alle Szenarien außer Szenario 2, negative CO₂ – Emissionswerte aufweisen, d.h. es werden CO₂ – Emissionen eingespart. Obwohl die Prozesse des Bauschuttrecyclings treibhausrelevante Gase emittieren, ist der Effekt der Einsparungen durch die Substitution an Rohstoffen höher. Hierbei fallen vor allem der Abbau und die Aufbereitung der Primärrohstoffe ins Gewicht, die aufgrund ihrer Masse für die Energiebilanz entscheidend sind.

In Tabelle 5-6 ist die Zielerreichung in Bezug auf die Minimierung des Treibhauseffektes dargestellt. Die Umrechnung der CO₂ – Einsparungen auf Zielerreichungsgrade erfolgt ausgehend von einer Zielerreichung von 0 bei Szenario 2 (bei +1.445 kg CO₂) und einer Zielerreichung von 100% beim Szenario mit den höchsten CO₂ – Einsparungen. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass im Nachhinein eine Erweiterung des Modelles mit einem „besseren“ Szenario bezüglich der CO₂ – Emissionen nicht mehr möglich sein wird. Ein möglicher Bewertungsansatz wäre die Bildung eines (unrealistischen) Referenzszenarios mit einer Recyclingquote von 100% für jeden Baustoff. Es wurde ein solches Szenario gerechnet und es hat sich gezeigt, dass die Zunahme des CO₂ – Ausstoßes durch die Prozesse des selektiven Rückbaus und der Aufbereitung für die Rückgewinnung von 100% der Bausubstanz höher sind als die zusätzlichen Einsparungen an CO₂ - Äquivalenten durch höhere Verwertungsquoten. Daher kann man davon ausgehen, dass in Bezug auf treibhausrelevante Emissionen das suboptimale Szenario die bestmögliche Option darstellt. Deshalb ist die Verwendung dieses Wertes als 100%ige Zielerreichung legitim.

Tabelle 5-6: Zielerreichung Ziel 1.2: Verminderung der Treibhauswirksamkeit

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 1.2 Minimierung des Treibhauseffektes	1,00	0,47	0,00	0,67

Die Tatsache, dass das suboptimale Szenario für dieses Kriterium den höchsten Zielerreichungsgrad erreicht, beruht darauf, dass der Aufwand des selektiven Rückbaus und der Bauschuttzubereitung eher niedrig ist. Somit werden dabei weniger treibhausrelevante Gase emittiert. Vor allem aber fällt die hohe Wiederverwertungsquote der mineralischen Substanz ins Gewicht. Beim suboptimalen Szenario werden wenige mineralische Bauteile aus dem Baustoffstrom entfernt; d.h. diese werden zu nahezu 100% wiederverwertet. Dabei entsteht jedoch ein RC- Baustoff niedriger Qualität mit einer höheren Schadstoffkonzentration als bei den anderen Szenarien.

Szenario 2 weist aufgrund der niedrigen Wiederverwertungsquote (die Feinfraktion wird deponiert) den niedrigsten Zielerreichungsgrad auf. Szenario 1 verursacht höhere CO₂ - Emis-

sionen durch den selektiven Rückbau und Abbruch; zusätzlich wird der Großteil der schadstoffhaltigen mineralischen Bauteile deponiert, was zu einer niedrigeren Recyclingquote und somit zu CO₂-Emissionen führt. Besser schneidet Szenario 3 ab, das gezielter schadstoffbelastete Bauteile aus dem Baustoffstrom entfernt und somit höhere Recyclingquoten erreicht.

5.3.2 Oberziel 2: Schonung der Ressourcen

Auf der einen Seite werden die energetischen Ressourcen ausgewiesen, die durch die Prozesse (Abbruch, Aufbereitung, Transport) verbraucht werden. Auf der anderen Seite werden die stofflichen Ressourcen quantifiziert, die durch das Recycling eingespart werden können. Mineralische Rohstoffe an sich sind in Österreich nicht unbedingt knapp. Deren Abbau nimmt einerseits Flächen in Anspruch, die anthropogen auch anderwärtig genutzt werden könnten. So steht der Abbau von mineralischen Primärrohstoffen in Konkurrenz zur landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen, wohnbaulichen oder infrastrukturellen Nutzung dieser Flächen. Andererseits werden durch den Abbau natürliche Biotope zerstört. Tabelle 5-11 bis Tabelle 5-10 führen den Verbrauch an Deponievolumen, die Substitution stofflicher Ressourcen und den Verbrauch sowie Einsparungen energetischer Ressourcen für die verschiedenen Szenarien an. Tabelle 5-16 zeigt die Zielerreichung für Oberziel 2, Schonung der Ressourcen.

5.3.2.1 Ziel 2.1. Substitution stofflicher Ressourcen durch Baustoffrecycling

Ziel des Baustoffrecyclings ist in erster Linie die Substitution natürlicher Rohstoffe durch RC-Produkte.

Tabelle 5-7 enthält die Mengen an rezyklierten Baustoffen eingeteilt nach Fraktionen. Quantitativ relevant sind die mineralischen Baustoffe. Bei diesen sind auch die Unterschiede zwischen den Szenarien bezüglich der Recyclingquoten bedeutend. Die höchste Recyclingquote weist das suboptimale Szenario auf, gefolgt von Szenario 3. Aufgrund der Deponierung der Feinfraktion ist die Recyclingquote für Szenario 2 die geringste. Die hohe Recyclingquote des suboptimalen Szenarios erklärt sich dadurch, dass ein sehr geringer Anteil der schadstoffbelasteten mineralischen Bausubstanz durch den selektiven Rückbau oder die Ausschuttauferbereitung aus dem Baustofffluss abgetrennt wird. Dies führt zu einem guten Ergebnis bezüglich dem Ziel Ressourcenschonung. Durch ein solches Vorgehen bleibt jedoch der Schad- und Störstoffgehalt im RC- Baustoff hoch, was zu stärkeren Umweltbeeinträchtigungen führt. Zudem ist ein störstoffhaltiger RC- Baustoff weniger vermarktungsfähig als ein sauberer.

Tabelle 5-7: Substitution stofflicher Ressourcen durch Recycling

Fraktion		Suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
RC- Baustoff Tiefbau	[t]	1939	1527	735	1586
RC-Betonzuschlag	[t]	0	71	0	71
RC- Ziegelsplitt	[t]	0	0	543	0
MINERALISCH GESAMT	[t]	1939	1597	1278	1657
Holz	[t]	88	80	88	80
FE- Metalle	[t]	2	4	4	4
NE- Metalle (Cu)	[t]	0,02	0,02	0,03	0,02

Für die Berechnung der Zielerreichung (Tabelle 5-8) werden die Recyclingquoten aller Baustoffe berücksichtigt. 100%ige Zielerreichung bedeutet Wiederverwertung der gesamten Baustoffe (durch das suboptimale Szenario erreicht), während 0% Zielerreichung die Entsorgung aller Baustoffe durch die Abfallwirtschaft bedeuten würde.

Tabelle 5-8: Zielerreichung in Bezug auf die Substitution stofflicher Primärressourcen durch Recycling

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 2.2 Substitution stofflicher Ressourcen durch Recycling	1,00	0,83	0,68	0,86

5.3.2.2 Ziel 2.2. Schonung energetischer Ressourcen

Die Prozesse des Gebäudeabbruches und der Bauschuttzubereitung verbrauchen Energie, entweder als Treibstoff oder in Form von elektrischer Energie. Relevante Prozesse sind hierbei der Transport und die Bauschuttzubereitung. Wird ein detaillierter selektiver Rückbau durchgeführt (Szenarien 1 und 2), so fallen auch diese Prozesse ins Gewicht. Viel höher als der Energieverbrauch des Gebäudeabbruches sind jedoch die Energieeinsparungen durch das Baustoffrecycling. Der beim Abbau mineralischer Primärrohstoffe sowie bei der Gewinnung von Holz relativ hohe Energiebedarf wird durch Wiederverwertung und –verwendung reduziert. Somit wird das Ziel 2.2, Schonung energetischer Ressourcen am besten von den

Szenarien mit den höchsten Recyclingquoten erreicht, nämlich das suboptimale Szenario, gefolgt von Szenario 3. Tabelle 5-9 führt den kumulierten Energieaufwand (KEA) für die verschiedenen Szenarien an. Im KEA wird nicht nur der Energieverbrauch des betroffenen Prozesses berücksichtigt, sondern es werden alle Energieaufwendungen inklusive der grauen Energie zur Herstellung der Maschinen, Treibstoff und Strom mitberücksichtigt.

Tabelle 5-9: Kumulierter Energieaufwand der Bauschutttaufbereitung

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Energieverbrauch	MJ	MJ	MJ	MJ
Selektiver Rückbau	206	29.318	105	18.665
Selektiver Abbruch	1.062	3.071	902	3.004
Demolierung	7.984	6.566	8.226	6.843
Sortierung auf der Baustelle	956	-	956	-
Mobile Aufbereitungsanlage	31.621	-	-	-
Stationäre Aufbereitungsanlage einfach	-	24.718	-	-
Stationäre Aufbereitungsanlage mit Nassaufbereitung, Wirbelschichtsortierung, sensorgestützte Sortierung	-	-	63.180	-
Stationäre Aufbereitungsanlage mit Windsichtung	-	-	-	35.331
Transport Baurestmassen	20.642	20.738	20.738	20.787
Deponierung Baurestmassen	0	9.385	17.842	2.791
Deponierung Schlacken aus MVA	3	4	3	6
Energieeinsparungen				
Thermische Verwertung Restmüll	5.514	5.833	4.947	10.936
Abbau Primärrohstoffe	152.439	114.553	57.786	130.218
durch Fe-Metallrecycling	20.333	36.758	36.490	36.758
durch Kupferrecycling	649	1.038	1.081	1.038
durch Holzwiederverwendung	13.242	12.008	13.242	12.008
KUMULIERTER ENERGIEAUFWAND	-129.704	-76.391	-1.594	-103.531

Für die Umrechnung des KEAs auf die Zielerreichung werden die Energieeinsparungen auf eine Skala bezogen, wo keine Einsparungen 0% Zielerreichung entspricht, während das Szenario mit den höchsten Einsparungen 100% Zielerreichung entspricht. Für diesen Bewertungsansatz gilt dasselbe wie für die Treibhausgasemissionen: es wurde ein Szenario mit einer 100%igen Recyclingquote für jeden Baustoff gerechnet; hier waren aber die zusätzlichen Energieaufwendungen für die Rückgewinnung der Baustoffe höher als die zusätzlichen Einsparungen durch die höhere Verwertungsquote. Daher wird davon ausgegangen, dass das suboptimale Szenario die bestmögliche Zielerreichung für dieses Kriterium erreicht.

Tabelle 5-10: Einsparung energetischer Ressourcen durch Baustoffrecycling

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 2.3 Schonung Energetischer Ressourcen	1,00	0,59	0,01	0,80

5.3.2.3 Ziel 2.1. Einsparung von Deponievolumen

Die Einsparung an Deponievolumen ist abhängig von der deponierten Menge an Baurestmassen und Schlacken aus der Müllverbrennung. Hier schneidet das suboptimale Szenario dadurch am besten ab, dass keine mineralische Substanz abgelagert wird. Das meiste Deponievolumen wird durch Szenario 2 in Anspruch genommen, gefolgt von Szenario 1. Szenario 3 schneidet wiederum relativ gut ab.

Tabelle 5-11: Zu deponierende Abfallmenge und Verbrauch an Deponievolumen

Fraktion		suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Zu deponierende Abfallmenge (Baurestmassen + MVA-Schlacken)	t	3	348	664	285
Deponievolumen	m ³	2	199	379	163

5.3.3 Ziel 1.3: Gewährleistung einer guten ökologischen Qualität der RC- Baustoffe

5.3.3.1 Schadstoffkonzentrationen als Gesamtgehalt

Entscheidenden Einfluss auf die ökologische Leistung der Bewirtschaftung der Baurestmassen hat die Umweltqualität der Baustoffe. Diese wird durch Schadstoffkonzentrationen in den Baustoffen ausgedrückt. Tabelle 5-12 zeigt die Schadstoffkonzentrationen in verschiedenen RC- Baustoffen für die Szenarien.

Tabelle 5-12: Schadstoffkonzentrationen und Störstoffanteile in RC- Baustoffen

Fraktion	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
RC-Baustoff	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
Pb	45 ± 14	20 ± 4	50 ± 20	23 ± 4
Cr	58 ± 11	45 ± 9	45 ± 20	44 ± 9
Cu	26 ± 3	21 ± 4	20 ± 4	21 ± 4
PAK	11 ± 5	4 ± 1	15 ± 8	6 ± 2
Störfraction	0,21%	0,64%	0,49%	0,03%
RC-Betonzuschlag				
Pb	-	16 ± 8	-	17 ± 6
Cr	-	24 ± 7	-	24 ± 7
Cu	-	12 ± 2	-	12 ± 2
PAK	-	0	-	0
RC-Ziegelsplitt				
Pb	-	-	17 ± 2	-
Cr	-	-	81 ± 5	-
Cu	-	-	20 ± 4	-
PAK	-	-	6 ± 1	-

QK A+
QK A
QK B

Vor allem für die Wettbewerbsfähigkeit der RC- Baustoffe im Vergleich zu den Primärrohstoffen ist die Sortenreinheit ein wichtiges Kriterium. RC- Baustoffe, die die Umweltkriterien der Schadstoffkonzentrationen erfüllen, jedoch einen schlechten visuellen Eindruck machen, werden kaum einen Absatz in der Bauwirtschaft finden. Aus diesem Grund werden in Tabelle 5-12 die Störstoffanteile in den RC- Baustoffen dargestellt.

Tabelle 5-13: Störstoffe im RC- Baustoff

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Störfractionanteil im RC- Baustoff	0,21%	0,64%	0,49%	0,03%

Das Ziel in Bezug auf die Schadstoffkonzentrationen ist deren Minimierung, bzw. Annäherung an geogene Hintergrundkonzentrationen. Die Reduktion der Schadstofffracht (Ziel 1.1) wird auf geogene Hintergrundgehalte der ausgewählten Schadstoffe bezogen. D.h., dass eine Schadstoffkonzentration im RC- Baustoff, die der geogenen Hintergrundkonzentration dieses Schadstoffes im ersetzten Primärrohstoff (z.B. Kies) entspricht, eine 100%ige Zielerreichung bedeutet. Tabelle 5-14 fasst die Zielerreichungsgrade für Schad- und Störstoffkonzentrationen in den RC- Baustoffen zusammen. Die Gewichtung der Schadstoffe erfolgt wie bei Ziel 1.1., über die durch die LC 50 ermittelten Gewichtungsfaktoren. Die Störstoffe werden durch einen Gewichtungsfaktor 0,2 berücksichtigt, da sie für die visuelle Qualität eines RC- Baustoffes wichtig sind und dessen Vermarktungsfähigkeit einschränken können.

Tabelle 5-14: Zielerreichung in Bezug auf die Reduktion der Schadstoffkonzentrationen und des Störstoffanteiles

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 1.3 Erreichung einer guten ökologischen Qualität der RC- Baustoffe	0,26	0,56	0,41	0,55

Der selektive Rückbau (Szenario 1) ist imstande, die Schadstoffkonzentration in den RC- Baustoffen am stärksten zu reduzieren. Szenario 3, wo der selektive Rückbau gezielt stattfindet, weist eine geringfügig niedrigere Zielerreichung auf. Die maschinelle Aufbereitung in Szenario 2 hingegen ist nicht imstande, die Schad- und Störstoffkonzentrationen im RC- Baustoff erheblich zu senken. Vor allem ist die Leistung in Bezug auf die PAKs sehr schlecht. Dieser Parameter erreicht für Szenario 2 nicht die Grenzwerte für QK A.

5.3.3.2 Schadstoffkonzentrationen im Eluat

Für die Schadstoffkonzentration im Eluat wurde lediglich SO_4 als Parameter ausgewählt, da die Schwermetalle bereits im Gesamtgehalt berücksichtigt werden und SO_4 meist der kritischste Parameter für die Erfüllung der ökologischen Qualitätsanforderungen.

Tabelle 5-15: SO₄ – Konzentrationen im Eluat

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS
Sulfatkonzentration im RC-Baustoff	2.013	661	2.553	1.121
Sulfatkonzentration im Ziegelsplitt	-	-	1.125	-

QK A+

QK A

QK B

Wie auch bei den anderen Schadstoffen, weist Szenario 2 das schlechteste Ergebnis auf. Weitaus besser schneidet hier Szenario 1 ab, gefolgt von Szenario 3. Es zeigt sich wiederum dass es nur durch selektiven Rückbau möglich ist, eine gute ökologische Qualität der RC-Baustoffe zu gewährleisten.

Tabelle 5-16 führt die Zielerreichungsgrade bezogen auf die SO₄ Konzentration im Eluat an.

Tabelle 5-16: Zielerreichung in Bezug auf die Reduktion der SO₄ – Konzentration im Eluat.

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 3.2 Reduktion der SO₄- Konzentration im Eluat	0,66	0,89	0,67	0,81

5.3.4 Oberziel 3: Wirtschaftliche Effizienz

Die Maßnahmen, die im Sinne des Umweltschutzes durchgeführt bzw. bewertet werden, müssen auch auf betriebswirtschaftlicher Ebene bewertet werden, um ihre Durchführbarkeit prüfen zu können.

Tabelle 5-17 führt die betriebswirtschaftlichen Kosten und Einnahmen der verschiedenen Szenarien an.

Tabelle 5-17: Betriebswirtschaftliche Kosten und Einnahmen der verschiedenen Szenarien.

Kosten	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Selektiver Rückbau	€ 4.706,64	€ 42.347,27	€ 1.891,26	€ 16.829,00
Selektiver Abbruch	€ 453,90	€ 1.546,49	€ 2.277,08	€ 1.517,55
Demolierung	€ 2.661,39	€ 2.188,55	€ 2.742,13	€ 2.280,98
Sortierung auf der Baustelle	€ 995,88	-	€ 1.858,77	-
Lagerung/Mulden	€ 206,43	€ 928,67	€ 114,26	€ 492,08
Maschinelle Aufbereitung	€ 3.523,47	€ 4.401,83	€ 18.765,12	€ 5.641,51
Transport	€ 2.644,68	€ 2.654,71	€ 2.657,01	€ 2.664,54
Entsorgung	€ 1.762,46	€ 8.225,11	€ 13.674,26	€ 8.277,95
Einnahmen				
Recyclingbaustoffe	€ 8.810,15	€ 5.663,43	€ 14.406,95	€ 5.749,12
Kosten Gesamt	€ 8.144,71	€ 56.629,21	€ 29.572,93	€ 31.954,49

Das teuerste Szenario ist der selektive Rückbau, Szenario 1. Dies ist auf die sehr hohen Personalkosten des selektiven Rückbaues und die Maschinenkosten des selektiven Abbruchs zurückzuführen. Zudem sind die Einnahmen durch den Verkauf der RC- Baustoffe nicht recht hoch, da die recycelte Menge geringer ist als z.B. im suboptimalen Szenario. Dieser hat aufgrund des niedrigen Aufwandes beim selektiven Rückbau und der Bauschutttaufbereitung die niedrigsten Kosten. Die relativ hohen Erlöse aus den RC- Baustoffen beruhen auf die große verkaufte Menge. Szenario 2 hat durch den fehlenden selektiven Rückbau auch relativ geringe Kosten. Die höheren Kosten der Bauschutttaufbereitung werden durch die höheren Erlöse eingedämmt, die auf den Verkauf der sortenreinen Ziegelsplittfraktion beruhen. Knapp über die Kosten von Szenario 2 liegen die Kosten von Szenario 3. Diese setzen zum Großteil aus Kosten des selektiven Rückbaus, der Aufbereitung und der Entsorgung zusammen.

5.3.5 Wirksamkeiten

In den folgenden Abschnitten werden die oben dargestellten Erreichungsgrade für die Ziele zu Erreichungsgrade für die drei Oberziele zusammengeführt. Dabei werden die Ziele gewichtet. Die Gewichtung erfolgt entweder nach wissenschaftlichen Kriterien (z.B. LC 50) oder durch Expertengespräche.

5.3.5.1 Ziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt

In Tabelle 5-18 sind die Zielerreichungsgrade zusammengefasst, die den Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit betreffen. Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13 stellen die Zielerreichung der Szenarien graphisch dar. Tabelle 5-19 führt die für die Bewertung eingesetzten Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Indikatoren an, und schließlich enthält Tabelle 5-20 die Zielerreichung für Ziel 1, Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt.

Tabelle 5-18: Erreichung der Ziele 1.1 und 1.2: Reduktion der Schadstofffracht und Minimierung des Treibhauseffektes

Erreichung Ziel 1.1: Verminderung der Schadstofffracht	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Pb	0,01	0,03	0,02	0,03
Cr	0,01	0,21	0,17	0,2
Cu	0,06	0,13	0,2	0,13
PAK	0	0,13	0,09	0,11
Zielerreichung 1.1. gesamt	0,08	0,5	0,49	0,46
Erreichung Ziel 1.2: Minimierung des Treibhauseffektes	1	0,47	0	0,67

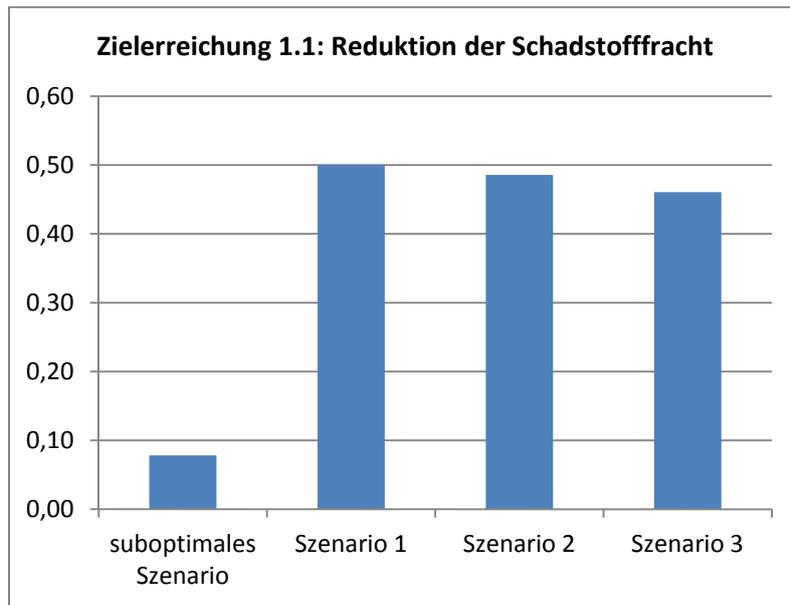


Abbildung 5-12: Reduktion der Schadstofffracht

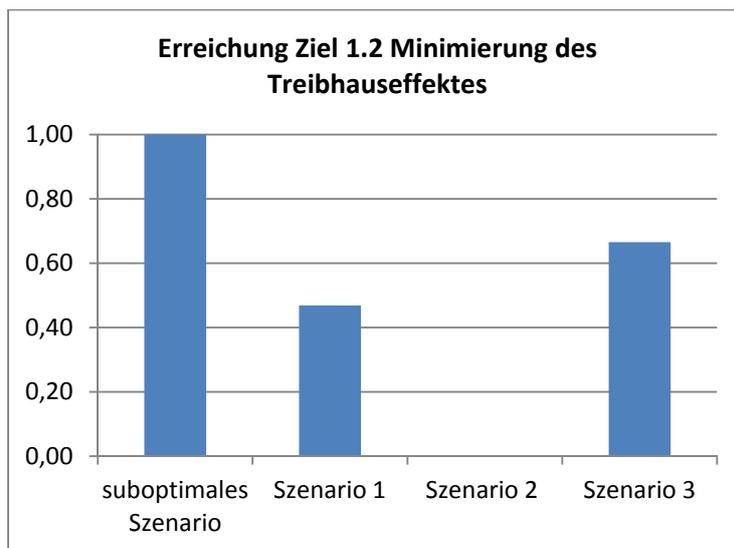


Abbildung 5-13: Minimierung des Treibhauseffektes

Tabelle 5-19: Gewichtungsfaktoren für Ziele 1.1 und 1.2

	Pb	Cr	Cu	PAK	CO ₂ -Äquiv.
Gewichtungsfaktoren	0,02	0,26	0,13	0,09	0,5

Tabelle 5-20: Zielerreichungsgrad für Ziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Pb	0	0,01	0,01	0,01
Cr	0	0,1	0,09	0,1
Cu	0,03	0,07	0,1	0,06
PAK	0	0,07	0,05	0,05
CO ₂ - Äquiv.	0,5	0,23	0	0,33
Erreichung Ziel 1:	0,54	0,48	0,24	0,56

5.3.5.2 Ziel 2: Schonung der Ressourcen

Folgende drei Abbildungen zeigen die Erreichungsgrade für die Einsparungen an stofflichen, energetischen Ressourcen sowie Deponievolumen. Tabelle 5-21 enthält die Gewichtungsfaktoren für die Aggregation der Ziele 2.1 bis 2.3 zu Oberziel 2, und

Tabelle 5-22 stellt die Erreichungsgrade für Ziel 2 „Schonung der Ressourcen“ dar.

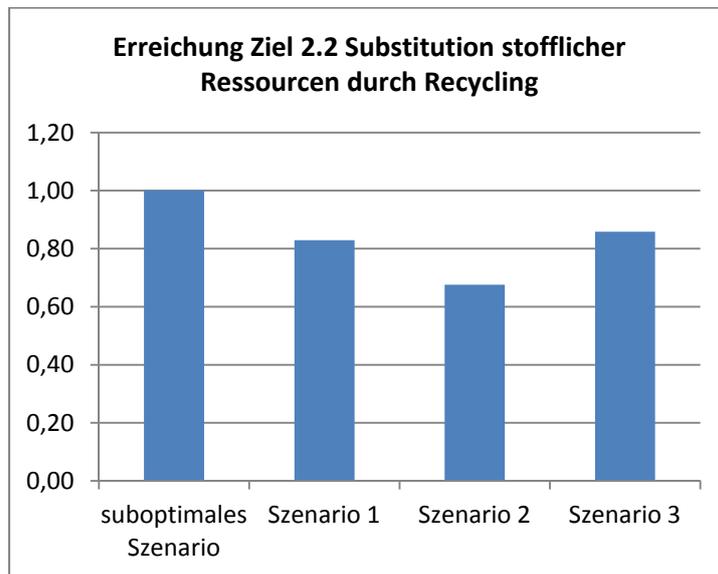


Abbildung 5-14: Schonung stofflicher Ressourcen durch Bauschuttrecycling

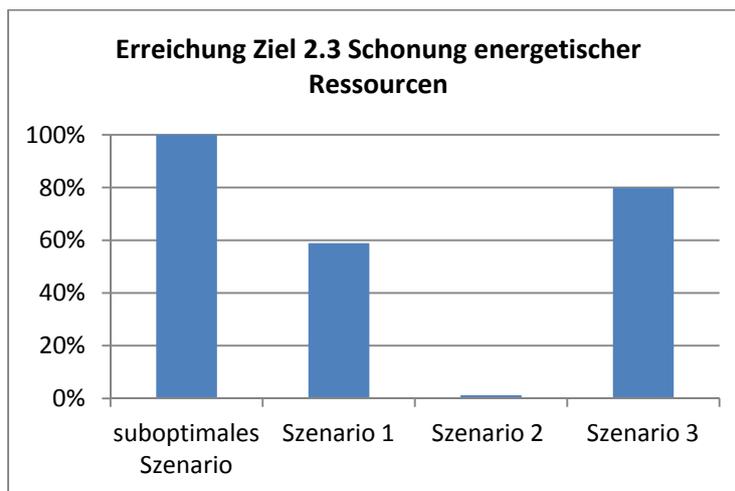


Abbildung 5-15: Schonung energetischer Ressourcen durch Bauschuttrecycling

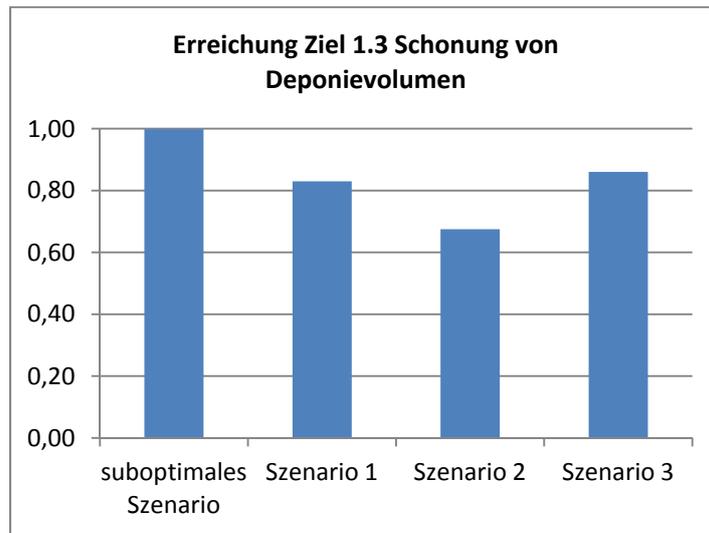


Abbildung 5-16: Schonung von Deponievolumen durch Bauschuttrecycling

Tabelle 5-21: Gewichtungsfaktoren für Ziel 2, Schonung der Ressourcen

	stoffliche Ressourcen	energetische Ressourcen	Deponievolumen
Gewichtungsfaktoren	0,375	0,375	0,25

Tabelle 5-22: Zielerreichungsgrad für Ziel 2, Schonung der Ressourcen

	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 2.1: Schonung stofflicher Ressourcen	1	0,83	0,68	0,86
Erreichung Ziel 2.2: Schonung energetischer Ressourcen	1	0,59	0,01	0,8
Erreichung Ziel 2.3: Schonung von Deponievolumen	1	0,83	0,68	0,86
Erreichung Ziel 2: Schonung der Ressourcen	1	0,74	0,43	0,83

5.3.5.3 Ziel 3: Gute Qualität der RC- Baustoffe

In Tabelle 5-23 ist die Zielerreichung bezüglich Reduktion der Schad- und Störstoffkonzentrationen im RC- Baustoff dargestellt. Eine Zielerreichung von 1 bedeutet eine Reduktion um 100%. Eine negative Zielerreichung bedeutet eine Anreicherung einer gewissen Fraktion im RC- Baustoff. Dies geschieht, wenn z.B. eine Fraktion mit einer niedrigeren Konzentration aus dem Baustoffstrom entfernt wird, wie z.B. die Ziegelfraktion bei Szenario 2. Abbildung 5-18 hingegen zeigt die Reduktion der SO₄ – Konzentration im Eluat. Die dazugehörigen Tabellen führen die Werte für beide Abbildungen an. Tabelle 5-25 enthält die Gewichtungsfaktoren, die für die Aggregation der Ziele 3.1 und 3.2 zu Oberziel 3 (Tabelle 5-26) eingesetzt wurden.

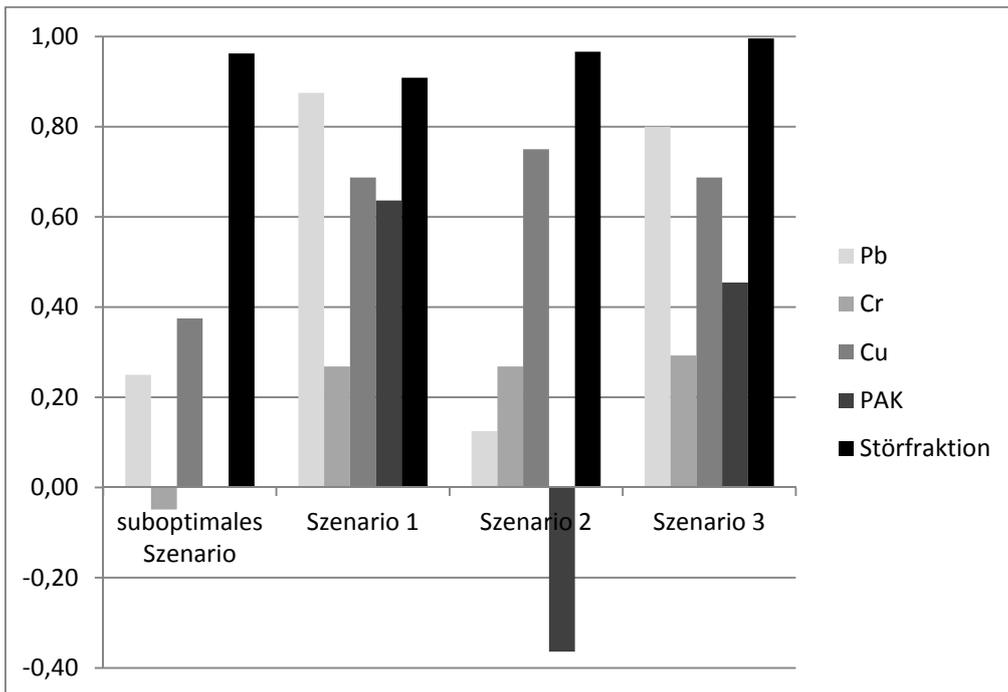


Abbildung 5-17: Reduktion der Schad- und Störstoffkonzentration im RC- Baustoff

Tabelle 5-23: Ziel 3.1: Zielerreichung in Bezug auf die Gesamtgehalte und Störstofffraktion

Fraktion	Suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 3.1 Gesamtgehalte und Störstofffraktion	0,26	0,56	0,41	0,55

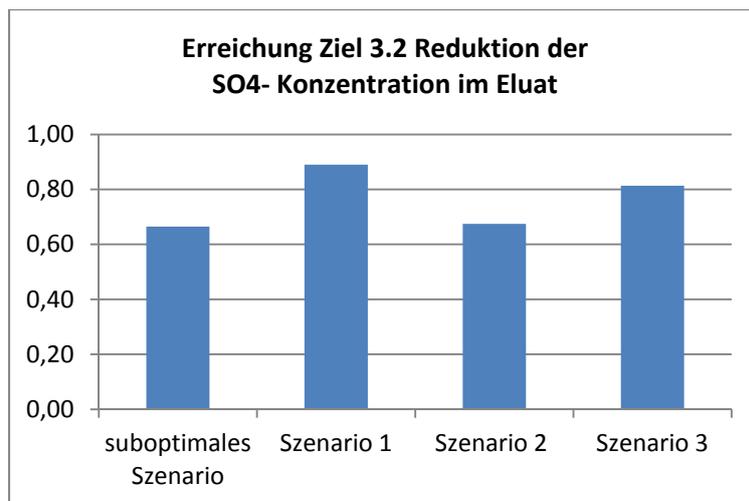


Abbildung 5-18: Reduktion der Sulfatkonzentration im Eluat

Tabelle 5-24: Ziel 3.1: Zielerreichung in Bezug auf die Sulfatkonzentration im Eluat

Erreichung Ziel 3.2 Reduktion der SO ₄ - Konzentration im Eluat	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
		0,66	0,89	0,67

Tabelle 5-25: Ziel 3.1: Gewichtungsfaktoren für Ziele 3.1 und 3.2

	Pb	Cr	Cu	PAK	Störfraktion	SO ₄
Gewichtungsfaktor	0,03	0,34	0,17	0,12	0,17	0,17

Tabelle 5-26: Erreichung Oberziel 3: Gute Qualität der RC- Baustoffe

Fraktion	suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Pb	0,01	0,02	0	0,02
Cr	-0,02	0,09	0,09	0,1
Cu	0,06	0,12	0,13	0,12
PAK	0	0,08	-0,04	0,05
Störfraktion	0,16	0,15	0,16	0,17
SO ₄	0,11	0,15	0,11	0,14
Erreichung Ziel 3: Qualität der RC- Baustoffe	0,33	0,61	0,46	0,6

5.3.5.4 Zusammenfassung Ergebnisse

Es werden nun die Ergebnisse der mKWA zusammengefasst. Tabelle 5-27 führt die Zielerreichungsgrade der drei Oberziele an. Diese werden nicht weiter aggregiert, denn dies würde zu Informationsverlust in Bezug auf die Erreichung der einzelnen Oberziele führen.

Tabelle 5-27: Ergebnisse der mKWA zusammengefasst

	Kosten [€]	Ziel 1 Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt	Ziel 2 Schonung der Ressourcen	Ziel 3 Gute Qualität der RC- Baustoffe
suboptimales Szenario	8.144,71	0,54	1	0,33
Szenario 1	56.765,07	0,48	0,74	0,61
Szenario 2	29.572,93	0,24	0,43	0,46
Szenario 3	31.954,49	0,56	0,83	0,6

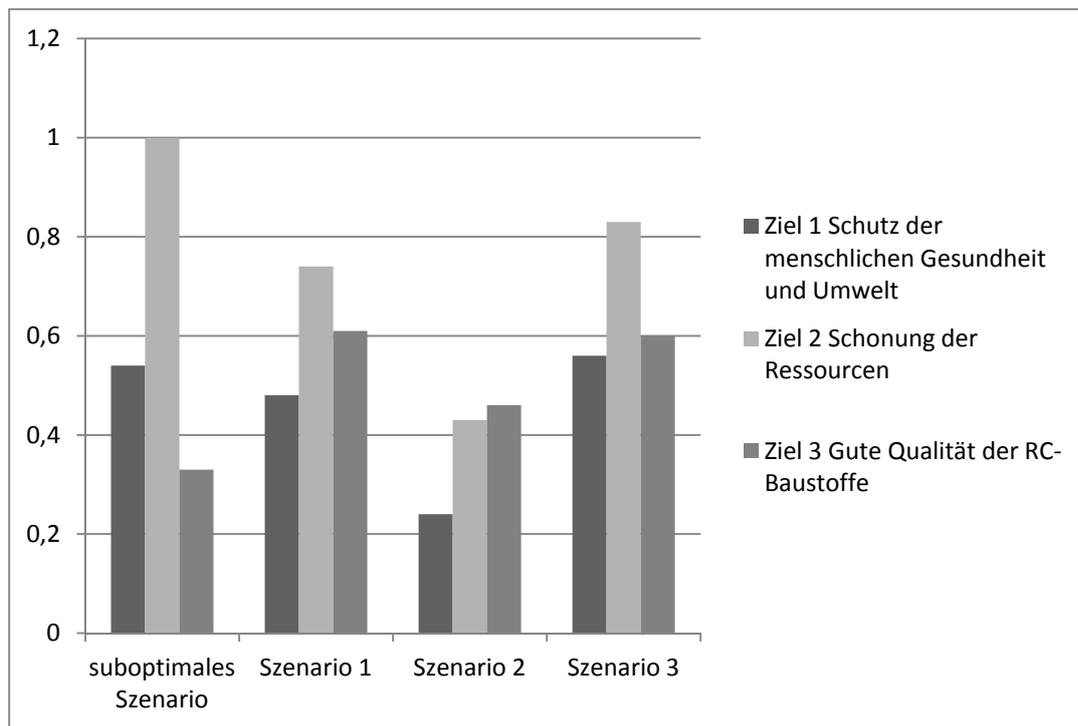


Abbildung 5-19: Zielerreichung für die 3 ausgewählten Oberziele.

Das suboptimale Szenario schneidet bezüglich Ziel 2 (Schonung der Ressourcen) und den Kosten am besten ab. Es hat die höchste Einsparungsquote an stofflichen, energetischen Ressourcen und Deponievolumen, da es die höchste Recyclingquote für mineralische Baustoffe hat. Da diese mengenmäßig so stark ins Gewicht fallen, haben sie auch den stärksten Einfluss auf die Energieeinsparungen und das geschonte Deponievolumen. Die Kosten fallen gering aus, da der kostenintensive selektive Rückbau kaum stattfindet und der Bauschutt mit einer mobilen Aufbereitungsanlage lediglich gebrochen wird. Sehr schlecht schneidet dieses Szenario jedoch bezüglich der Qualität der Recyclingbaustoffe ab. Hier ist der Zielerreichungsgrad halb so hoch wie der der Szenarien 1 und 3. Im suboptimalen Szenario ist es also nicht möglich die Schadstoffe effektiv aus dem Baustoffstrom zu entfernen, da weder während des Rückbaus/Abbruchs noch während der Aufbereitung Verfahren oder Technologien eingesetzt werden, die eine Abtrennung der schadstoffhaltigen Baustoffe und Bauteile beabsichtigen bzw. ermöglichen. Ziel 1 (Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt) scheidet leicht besser ab aufgrund der höheren Zielerreichung von Indikator 1.2, Minimierung des Treibhauseffektes. Da die Treibhausgasemissionen wie der Energieverbrauch hauptsächlich durch die hohe Recyclingquote eingespart werden, hebt dieser Indikator zum Teil den schlechten Zielerreichungsgrad von Ziel 1.1 (Reduktion der Schadstofffracht durch RC-Baustoffe in die Umwelt) auf. Insgesamt ist das suboptimale Szenario durch die schlechte Zielerreichung von Oberzielen 1 und 3 als ökologisch nicht zufriedenstellend anzusehen.

Szenario 1 erreicht das beste Ergebnis bezüglich den Oberzielen 1 (Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt) und 3 (Qualität der RC-Baustoffe). Der tiefgehende selektive Rückbau ist eindeutig das beste Verfahren um schadstoffhaltige Bausubstanz effektiv aus

dem Baustoffkreislauf zu entfernen und um qualitativ hochwertige RC- Baustoffe herzustellen. Da die Menge der selektiv ausgebauten Bausubstanz mit höheren Schadstoffkonzentrationen relativ hoch ist, reduziert sich die Recyclingquote. Vor allem die Entfernung der Deckenbefüllungen, der Putze, des Kamins und des Estrichs führen zu bedeutenden Verlusten an Sekundärrohstoffen. Aus diesem Grund schneidet Oberziel 2 bei Szenario 2 schlechter ab. Mit der geringeren Substitution von Primärressourcen gehen geringere Einsparungen an Energie und Deponievolumen einher. Ausschlusskriterium für Szenario 2 sind jedoch die Kosten. Der selektive Rückbau erfordert einen sehr hohen Personalaufwand. Vor allem der manuelle Ausbau von Bauteilen wie Putze, Estrich, Metalle gestalten sich sehr aufwendig. Aus diesem Grund ist der selektive Rückbau in dieser Tiefe nicht durchführbar. Dieses Erkenntnis geht in Szenario 3 ein, wo der selektive Rückbau gezielter auf Bausubstanz mit hohen Schadstoffkonzentrationen angewendet wird. Bausubstanz mit Schadstoffkonzentrationen, die zwar über dem Durchschnitt im Gebäude jedoch an sich nicht problematisch sind (Verputze, usw.) werden in Szenario 3 nicht selektiv ausgebaut.

Szenario 2 schneidet allgemein eindeutig am schlechtesten ab. Der Versuch, die Schadstoffe, die zum Teil in der Feinfraktion akkumulieren, durch Absiebung derselben aus dem Baustoffstrom zu entfernen, gelingt nur teilweise. Lediglich beim Kupfer schafft die maschinelle Aufbereitung eine höhere Trennschärfe als Szenario 1 und Szenario 3, durch die Entfernung des stückigen Kupfers mittels des Schwermetallabscheiders. Betrachtet man die Schadstoffkonzentrationen bei Ziel 3.1, so fällt die Zielerreichung eines Indikatorstoffes sogar negativ aus: durch die Rückgewinnung des Ziegelsplittes erhöht sich die PAK- Konzentration im RC- Baustoff. Dies geschieht dadurch, dass eine Fraktion mit niedriger PAK- Konzentration entfernt wird, und sich somit die Konzentration im RC- Baustoff erhöht.

Durch die Absiebung und Entsorgung der Feinfraktion geht ein erheblicher Teil der RC- Baustoffe verloren. Dadurch fällt auch die Zielerreichung für Oberziel 2 eher schlecht aus. Die Energie und Deponievolumeneinsparungen durch die Substitution stofflicher Ressourcen sind gering, die CO₂ Emissionen sind bei diesem Szenario als einziges positiv. Einen finanziellen Vorteil weist dieses Szenario auf durch die Rückgewinnung von sortenreinem Ziegelsplitt, das relativ teuer verkauft werden kann. Dies kompensiert die Kosten der Aufbereitung und macht Szenario 2 zum günstigsten Szenario, abgesehen vom suboptimalen Szenario.

Das sogenannte „realistische“ Szenario 3 weist in Summe eine sehr gute Zielerreichung auf. Die Oberziele Schutz der Menschlichen Gesundheit und Umwelt sowie gute Qualität der RC- Baustoffe fallen ähnlich wie bei Szenario 1 aus. Die gezielte Abtrennung schadstoffbelasteter Bausubstanz durch den gezielten selektiven Rückbau ermöglicht eine sehr gute Schadstoffentfrachtung der RC- Baustoffe. Zusätzlich scheidet die Windsichtung in der Aufbereitungsanlage in Kombination mit dem selektiven Rückbau die fast 100%ige Entfernung der Störfraktion aus dem RC- Baustoff. Dies wirkt sich sehr positiv auf die visuelle Qualität des RC- Baustoffes, was wiederum seine Vermarktungsfähigkeit steigert.

Die Schonung der Ressourcen (Oberziel 2), wird durch die höhere Recyclingquote hier besser gesichert als bei den Szenarien 1 und 3. Im Gegensatz zum suboptimalen Szenario ist hier die hohe Recyclingquote nicht mit einer schlechteren Qualität der RC- Baustoffe verbunden. Der gezielte Ausbau schadstoffbelasteter Bauteile ermöglicht es genau die Bauteile

mit relativ hohen Schadstoffkonzentrationen zu entfernen, ohne unnötig RC- Baustoffe aus dem Baustoffzyklus zu entfernen. Zudem werden dadurch die Kosten des selektiven Rückbaus stark reduziert.

Szenario 3 wurde aus den beiden Extremszenarien 1 und 2 entwickelt um ein sog. realistisches Szenario aufzubauen. Es kann als solches betrachtet werden, denn ohne übermäßigen finanziellen Aufwand werden die Oberziele Schutz von Mensch und Umwelt und Schonung der Ressourcen (ökologische Ziele) sowie die gute Qualität der RC- Baustoffe, in hohem Maße erreicht.

Für die Praxis bedeutet dies, dass der selektive Rückbau forciert werden muss, um gezielt schadstoffhaltige Stoffe aus dem Baustoffstrom zu entfernen. Bei der Baurestmassenaufbereitung empfiehlt es sich zusätzlich zu den zur Zeit eingesetzten Brech- und Magnetabscheidungs- Stufen, eine Trennstufe für die Störfraktion hinzuzufügen, in diesem Fall die Windsichtung. Durch diese Maßnahmen ist es möglich, die Kosten eines Gebäudeabbruches zu begrenzen und eine nachhaltige Bewirtschaftung der Baurestmassen zu gewährleisten.

5.4 Stoffflüsse bei Gebäude 2

Die Graphen und Tabellen für Gebäude 2 sind im Anhang zu finden. Die Ergebnisse unterscheiden sich nicht wesentlich von denen der Szenarioanalyse von Gebäude 1, deshalb wird hier nur auf die Unterschiede zwischen den beiden Gebäudeabbrüchen eingegangen.

Die Aufteilung der Stoffflüsse des suboptimalen Szenarios unterscheiden sich wenig zwischen den beiden Gebäuden. Auffallend ist lediglich eine bessere Recyclingrate des Kupfers (dadurch, dass ein größerer Teil des Kupfers in metallischer Form vorkommt) sowie die Deponierung von 40 % der PAKs durch den Abtrag der bituminösen Dachdeckung (Dachpappe)

Bei Szenario 1 wird ein höherer Anteil des Bleis in die Baurestmassendeponie verfrachtet, was den Bleianteil im RC- Baustoff reduziert. Ebenfalls Chrom gelangt zu einem höheren Anteil auf die Deponie als bei Gebäude 1. Ein höherer Anteil an Chrom gelangt in den Hochbau, was aber nur durch die höhere Masse an RC- Beton bedingt ist. Beim Kupfer erkennt man wiederum eine höhere Recyclingquote. PAKs werden zu einem leicht höheren Grad in die Baurestmassendeponie umgeleitet.

Bei Szenario 2 fällt lediglich der Unterschied zwischen den beiden Gebäude auf, dass Kupfer wiederum eine höhere Recyclingquote aufweist.

Szenario 3 für weist Gebäude 2 eine bessere Umleitung des Chromes und der PAK auf die Baurestmassendeponie auf als für Gebäude 1, sowie eine höhere Recyclingquote für das Kupfer. Ansonsten verhält sich die Aufteilung der Stoffflüsse ähnlich wie bei Gebäude 2.

5.5 Ergebnisse der mKWA für Gebäude 2

5.5.1 Oberziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt

5.5.1.1 Ziel 1.1: Verminderung der Schadstofffracht durch RC- Baustoffe in die Umwelt

Bezüglich Ziel 1.1 verhalten sich bei Gebäude 2 die Szenarien untereinander wie bei Gebäude 1. Die besten Ergebnisse bezüglich der Schadstoffentfrachtung werden von Szenario 1, dem selektiven Rückbau erzielt. Lediglich sind bei den Szenarien 1 und 3 von Gebäude 2 die Reduktionen der Schadstofffrachten in den RC- Baustoffen höher. Dies beruht darauf, dass bei dem „neueren“ Gebäude 2 die Schadstoffe konzentrierter in Bauteilen zu finden sind, die selektiv rückgebaut werden können. Dies bestätigt auch die Tatsache, dass bei der maschinellen Aufbereitung die Reduktion der Schadstofffracht bei beiden Gebäuden gleich bleibt.

Absolut gesehen ist die Schadstofffracht beim suboptimalen Szenario und Szenario 2 tendenziell höher als bei Gebäude 1, was auf den höheren Schadstoffgehalt im Gebäude zurückzuführen ist. Durch sachgerechten selektiven Rückbau ist es jedoch möglich, diese effizienter zu reduzieren als bei Gebäude 1.

5.5.1.2 Ziel 1.1: Verminderung des Treibhauseffektes

Wie bei Gebäude 1 erzielt auch bei Gebäude 2 das suboptimale Szenario die höchsten CO₂ - Einsparungen. Dies ist wiederum auf die höchste Recyclingquote für mineralische Baustoffe zurückzuführen, die jedoch eine schlechte Qualität aufweisen. Zusätzlich sind bei den Szenarien 1-3 die Energieaufwendungen durch Rückbau- und Aufbereitungstechnologien höher, was einen höheren CO₂ – Ausstoß zur Folge hat. Die Szenarien 1-3 bewegen sich in einem sehr ähnlichen Bereich. Zwischen diesen schneidet Szenario 3 aufgrund der höheren Recyclingquote für mineralische Baustoffe besser ab.

Insgesamt sind hier die CO₂ – Einsparungen um ca. 10 t CO₂ je Gebäudeabbruch höher als bei Gebäude 1. Durch die Rückgewinnung der vor allem als Baustahl im Gebäude enthaltenen hohen Eisenmetallmenge können erhebliche Mengen an CO₂ – Emissionen eingespart werden.

5.5.2 Oberziel 2: Ressourcenschonung

5.5.2.1 Ziel 2.1: Schonung stofflicher Ressourcen

Die Einsparungen stofflicher Ressourcen durch Baustoffrecycling verhalten sich ähnlich wie bei Gebäude 2. Aus diesem Grund wird hier nicht näher darauf eingegangen.

5.5.2.2 Ziel 2.1: Schonung stofflicher Ressourcen

Für das Kriterium „Schonung energetischer Ressourcen“ gilt das gleiche wie bei Ziel 1.2 (Verminderung des Treibhauseffektes) diskutiert wurde, da der CO₂ – Ausstoß vom Energieverbrauch abhängt und mit ihm korreliert. Darum wird an dieser Stelle auf dieses Kriterium nicht eingegangen.

5.5.2.3 Ziel 2.1: Schonung von Deponievolumen

Dieses Kriterium verhält sich analog zu Ziel 2.1 „Schonung stofflicher Ressourcen“.

5.5.3 Oberziel 3: Gute ökologische Qualität der RC- Baustoffe

5.5.3.1 Ziel 2.1: Schadstoffkonzentrationen als Gesamtgehalte und Störstoffe

Die Schadstoffkonzentrationen im RC- Baustoff aus Gebäude 2 sind teilweise höher als bei Gebäude 1. Einerseits ist dies auf die höheren gesamten Schadstoffgehalte in Gebäude 2 zurückzuführen, im Fall des Pb, des Cu und der PAK (auch aufgrund der geringeren Gesamtmasse von Gebäude 2 ergeben sich höhere errechnete Gesamtkonzentration der Schadstoffe). Beim Kupfer jedoch zeigt sich die unter Ziel 1.1 beschriebene Tendenz, dass bei Gebäude 2 durch den Einsatz der richtigen Verfahren (selektiver Rückbau, Wirbelstromabscheider für metallisches Cu) die Schwermetallkonzentration erheblich reduziert werden kann. Kaum reduziert werden kann die Chromkonzentration im RC- Baustoff. Hier erreicht Szenario 3 die besten Resultate durch die Kombination von selektivem Rückbau und maschineller Aufbereitung. Insgesamt schneidet bezüglich der Schadstoffkonzentrationen Szenario 1, der selektive Rückbau am besten ab, gefolgt von Szenario 3. Sehr schlecht schneidet Szenario 2 ab, wo e sogar zu einer Aufkonzentrierung der PAKs kommt. Dies erfolgt durch die Abtrennung von unbelasteter Gebäudesubstanz, und der nicht-Abtrennung der PAK hältigen Bausubstanz. Durch die Reduktion der Gesamtmasse der RC- Baustoffe wird somit die PAK- Konzentration erhöht. Die Reduktion der Störstofffraktion kann am besten durch die Erweiterung der Maschinellen Aufbereitung. Es zeigt sich jedoch das durch selektivem Rückbau und Sortierung auf der Baustelle die Störstofffraktion ebenfalls stark reduziert werden kann (suboptimales Szenario).

5.5.3.2 Ziel 2.1: Schadstoffkonzentrationen im Eluat: Sulfat

Die Sulfatkonzentration wird am besten durch Szenario 1 oder 2 reduziert, deren Werte nahe aneinander liegen. Im Vergleich zu Gebäude 2 ist jedoch die verbleibende Sulfatkonzentration höher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die mehr oder wenig gleich groß bleibende Sulfatfracht auf eine niedrigere Gesamtmasse bei Gebäude 2 verteilt.

5.5.4 Oberziel 4: Wirtschaftliche Effizienz

Bei Gebäude 2 verhalten sich die Abbruchkosten der Szenarien relativ zueinander wie bei Gebäude 1. Es fallen die Kosten des selektiven Rückbaus höher aus aufgrund der höheren ruckzubauenden Mengen an Bausubstanz. Die Kosten für die maschinelle Aufbereitung sind bei Gebäude 2 niedriger, da weniger mineralische Baurestmassen anfallen. Dasselbe gilt für die Transportkosten. Die Erlöse fallen bei Gebäude aufgrund der größeren Mengen an rückgewonnenen Metallen höher aus.

5.6 Wirksamkeiten

Auch bei Gebäude 2 schneidet das suboptimale Szenario bezüglich Ziel 2 (Schonung der Ressourcen) und den Kosten am besten ab. Er weist wie bei Gebäude 1 schlechte Wirksamkeiten für die Oberziele 1 und 3. Insgesamt ist das suboptimale Szenario durch die schlechte Zielerreichung von Oberzielen 1 und 3 als ökologisch nicht zufriedenstellend anzusehen.

Szenario 1 erreicht wie bei Gebäude 1 das beste Ergebnis bezüglich den Oberzielen 1 (Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt) und 3 (Qualität der RC- Baustoffe).

Szenario 2 schneidet allgemein eindeutig am schlechtesten ab (siehe Diskussion Kap. 5.3.5.4)

Szenario 3 erweist sich als das vorteilhafteste Szenario für Gebäude 2 wie für Gebäude 1.

6 Schlussfolgerung

Um eine Verwertungsquote von 70% aller Baustellen- und Abbruchabfälle bis zum Jahr 2020 auch im Bereich der Hochbaurestmassen zu erreichen, ist es notwendig Verfahren des Abbruchs und der Aufbereitung so zu kombinieren, dass qualitativ hochwertige Recyclingprodukte entstehen, die am Markt Abnehmer finden. Um die Quote umzusetzen, soll deshalb das Kreislaufdenken im Bauwesen forciert werden. Das Ziel der Bewirtschaftung von Baurestmassen ist die Gewährleistung des Schutzes der menschlichen Gesundheit und Umwelt, die Schonung der Ressourcen, eine gute ökologische Qualität der Recyclingbaustoffe sowie auch die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen, um diese Ziele zu erreichen. Um die optimale Kombination aus Abbruch- und Aufbereitungstechnologie zu ermitteln, wird eine mKWA (modifizierte Kosten-Wirksamkeitsanalyse) durchgeführt. Die Wirksamkeit dieser Analyse, auch Erreichungsgrad genannt, kann durch Indikatoren bzw. Kriterien ausgedrückt werden. Die Ermittlung von Kriterien erfolgt für vier Szenarien, welche den Abbruch des Gebäudes mit Rückbau, die Sortierung des Bauschutts, die Aufbereitung und die Wiederverwertung oder Deponierung enthalten.

Unter anderem wurde ein suboptimales Szenario entworfen. Dieses besteht aus einem teilweisen selektiven Rückbau, in dem die Kosten dafür gering gehalten werden, aus einer Sortierung auf der Baustelle und einer Aufbereitung mit einer mobilen Anlage vor Ort. Weiteres bestehen die Szenarien 1 und 2, welche so genannte Extremszenarien sind. Szenario 1 beinhaltet einen tiefgreifenden selektiven Rückbau und Abbruch des Gebäudes sowie eine darauffolgende Aufbereitung in einer Anlage mit Brechstufe und Magnetabscheider. Die Demolierung des Gebäudes in Szenario 2 findet ohne selektiven Rückbau statt. Die Stör- und Schadstoffe sollen durch eine komplexe Aufbereitungsanlage aus den Baurestmassen entfernt werden. Diese beinhaltet die Schritte Brechstufe, Magnetabscheider, Siebung, Nassaufbereitung, Wirbelstromabscheider sowie sensorgestützte Sortierung. Szenario 3 ist von den Szenarien 1 und 2 zu unterscheiden, da sie die realistische Alternative darstellt. Es berücksichtigt einen gezielten selektiven Rückbau, d.h. Schadstoffe werden gezielt entfernt, mit anschließender Aufbereitung mit den Stufen Brecher, Magnetabscheider und Windsichter.

Die Szenarioanalyse erfolgt für zwei Gebäude, die hinsichtlich ihres Alters unterschieden werden. Das eine stammt aus der Bauperiode vor 1945 und das andere aus der Bauperiode 1945-1980. Die Kriterien der ausgewählten Szenarien beinhalten den Schadstoffeintrag in die Umwelt und das Gebäudelager, die Einsparung von Primärrohstoffen, Energie und Landschaft bzw. von Deponievolumen sowie auch den Schad- und Störstoffgehalt der Recyclingbaustoffe. Nach der Wahl der Kriterien werden die drei Wirksamkeiten der vier Szenarien, die die oben erwähnten Ziele darstellen (Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt, Schonung der Ressourcen, Gewährleistung einer guten ökologischen Qualität der Recyclingrohstoffe) gewichtet und aggregiert. Zusätzlich erfolgt die Ermittlung der betriebswirtschaftlichen Kosten, diese werden darauffolgend den Zielerreichungsgraden gegenübergestellt.

Aufgrund der Analyse ist es möglich, das geeignetste Szenario hinsichtlich ökologisch nachhaltiger Bewirtschaftung der Baurestmassen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit zu ermitteln.

Das suboptimale Szenario ergab die höchste Wirksamkeit hinsichtlich der Ressourcenschonung, da fast die gesamte Gebäudemasse rezykliert wird. Deshalb sind die Einsparungen von Energie und CO₂ sehr hoch, da diese großteils von der Menge eingesparter Primärressourcen abhängen. Im Gegensatz dazu fallen die anderen beiden Ziele Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt sowie Gewährleistung einer guten ökologischen Qualität der Recyclingbaustoffe schlecht aus. Dies liegt besonders daran, dass die Schad- und Störstoffe aufgrund des nicht vollständig selektiven Rückbaus und der mobilen Anlage nicht effizient aus dem Baustoffstrom entfernt werden kann. Das suboptimale Szenario ist somit keine ökologische Alternative.

Bei Szenario 1 ist aufgrund der Analyse ersichtlich, dass dieses das beste Ergebnis bezüglich des Schutzes der menschlichen Gesundheit und Umwelt und der Qualität der RC-Baustoffe aufweist (Oberziele 1 und 3). Das gute ökologische Abschneiden resultiert aus dem tiefgreifenden selektiven Rückbau, der die schadstoffhaltige Baustoffsubstanz effektiv aus dem Baustoffkreislauf entfernt und qualitativ hochwertige Recycling-Baustoffe herstellt. Gegen diese Alternative sprechen jedoch die hohen Kosten, da aufgrund des selektiven Rückbaus ein sehr hoher Personalaufwand besteht. Auch reduziert sich die Menge an RC-Baustoffen, da aufgrund der intensiven Abtrennung eine große Menge schadstoffhaltiger Bauteile und somit Entsorgungskosten entstehen. Aus der Entfernung einer großen Menge an schadstoffhaltigen Bauteilen folgen eine geringere Substitution von Primärressourcen und somit auch eine geringere Einsparung von Energie, Emissionen und Deponievolumen. Es zeigt sich, dass vor allem bei jüngeren Gebäuden eine große Reduktion der Schadstofffracht erfolgen kann, da in der Bauphase 1945-1980 mehr problematische Baustoffe eingebaut wurden und heutzutage vermehrt eingebaut werden.

Das entgegengesetzte Szenario 2 erzielt weniger gute ökologische Ergebnisse. So gelingt der Versuch, die Schadstoffe, die zum Teil in der Feinfraktion akkumulieren, durch Absiebung derselben aus dem Baustoffstrom zu entfernen, nur teilweise. In Bezug auf die Schadstoffkonzentration fällt die Zielerreichung des Indikatorstoffes Ziegelsplitt sogar negativ aus. Der Grund dafür liegt in der Erhöhung der PAK-Konzentration bei Rückgewinnung des Ziegelsplitts, das heißt bei Entfernung einer Fraktion mit niedriger PAK-Konzentration erhöht die Konzentration im RC-Baustoff. Deshalb wird der Versuch unternommen, durch Absiebung der höher belasteten Feinfraktion, Schadstoffe aus dem Baustoffstrom zu entfernen, was jedoch nur teilweise gelingt. Durch die Absiebung geht ein großer Teil der Recycling-Baustoffe verloren. Dies führt zu einem schlechten Ergebnis hinsichtlich des Ziels Schonung der Ressourcen. Aufgrund der Rückgewinnung von sortenreinem Ziegelsplitt bei Szenario 2, das einen hohen Verkaufswert auf dem Markt erreicht, ist jedoch ein positives Ergebnis in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit zu verzeichnen.

Im Gegensatz dazu weist das realitätsnahe Szenario 3 eine gute Zielerreichung auf. Die gezielte Abtrennung schadstoffbelasteter Bauteile durch den gezielten selektiven Rückbau führt

zu einer guten Schadstoffentfrachtung von Recycling-Baustoffen. Somit sind die Ziele Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt wie auch die gute ökologische Qualität der RC-Baustoffe gewährleistet. Die fast 100%ige Entfernung der Störfraktion aus den Recycling-Materialien ist ein weiteres positives Resultat von Szenario 3. Dies geschieht durch die Windsichtung in der Aufbereitungsanlage in Kombination mit dem selektiven Rückbau. Durch die bessere visuelle Qualität des RC-Baustoffes wird die Vermarktungsfähigkeit gesteigert. Aufgrund der höheren Recyclingquote wird die Schonung der Ressourcen besonders gewährleistet. Im Falle des suboptimalen Szenarios ist die hohe Recyclingquote mit einer schlechteren Qualität von RC-Materialien verbunden. Bei Szenario 3 ist dies jedoch nicht der Fall, da es der gezielte Ausbau schadstoffbelasteter Bauteile ermöglicht genau die Bauteile mit relativ hohen Schadstoffkonzentrationen zu entfernen, ohne unnötig Recycling-Materialien aus dem Baustoffkreislauf zu entnehmen. Die Reduktion der Kosten des selektiven Rückbaus ist zudem ein zusätzlicher positiver Faktor.

Die gängige Praxis in Österreich sieht jedoch anders aus als die oben erwähnten theoretischen Szenarien. Sie ist je nach Materialbeschaffenheit des Gebäudes und dem ausführenden Abbruchunternehmen unterschiedlich. Während bei kleineren Einfamilienhäusern aufgrund ihrer Homogenität oft auf Rückbaumaßnahmen verzichtet wird, ist dies bei größeren, neueren Mehrfamilienhäusern bzw. Bürogebäuden nicht der Fall. Die Genauigkeit des Rückbaus hängt vorwiegend von der Zeit, welche der Abbruchfirma zur Verfügung steht, und somit auch stark von den finanziellen Mitteln ab. Das Verfahren des Abbruchs und der Aufbereitung so zu praktizieren, dass qualitativ hochwertige Recyclingprodukte entstehen, ist derzeit in Österreich noch nicht Stand der Technik. Der höchste Trenngrad wird durch eine Entkernung, einen darauffolgenden selektiven Rückbau und einen anschließenden Abbruch des Gebäudes erreicht. Das hierbei anfallende mineralische Material erreicht einen hohen Reinheitsgrad, was die Voraussetzung für eine folgende Aufbereitung zu qualitativ hochwertigen Produkten ist. Aufgrund hoher Kosten und der somit seltenen Anwendung präziser Separationstechnologien resultierenden mangelhaften Qualitäten. Weiters sind aufbereitete Baurestmassen rein rechtlich Abfall. Dies wirkt sich negativ auf die Stärkung des Marktes aus.

Schlussfolgernd bedeutet dies für die Praxis, dass der selektive Rückbau forciert werden muss, um gezielt schadstoffhaltige Bauteile aus den RC Baustoffen zu entfernen. Bei der Baurestmassenaufbereitung empfiehlt es sich zusätzlich zu den zurzeit eingesetzten Brech- und Magnetabscheidungs-Stufen, eine Trennstufe für die Störfraktion, d.h. eine Windsichtung vorzusehen. Dadurch ist es möglich, die Kosten eines Gebäudeabbruches zu begrenzen und eine nachhaltige Bewirtschaftung der Baurestmassen zu gewährleisten.

8 Literatur

- Brunner, P. H., H. Hutterer, et al. (2000). Bewertung abfallwirtschaftlicher Massnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie. H. Umweltbundesamt Gmb. Wien.
- Brunner, P. H. und D. M. Stämpfli (1993). "Material Balance of a Construction Waste Sorting Plant." Waste Management & Research(11): 27-48.
- Deilmann, C. und G. Schiller (2010). Ermittlung von Ressourcenschonungspotentialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt. **Fachgebiet III.**
- Lichtensteiger, T. (2006). Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ARK04 - Gebäude im Umbau urbaner Kulturlandschaften. . H. a. d. E. Zürich. Zürich.
- Rentz, O., A. Seemann, et al. (2003). Entwicklung optimierter Rückbau- und Recyclingverfahren durch Kopplung von Gebäudedemontage und Bauschuttzubereitung. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH).
- Schönback, W. (2009). Vorlesungsunterlagen VO Ökonomische Bewertungsmethoden. Wien, TU Wien, Department für Raumentwicklung, Infrastruktur- und Umweltplanung
- Steinberger, G. und C. Pirker (2010). Gespräch, 17.02.2010. Wien, Alpine AG.

9 Anhang

9.1 Stoff- und Güterflüsse für Gebäude 2

9.1.1 Suboptimales Szenario

9.1.1.1 Güterflüsse

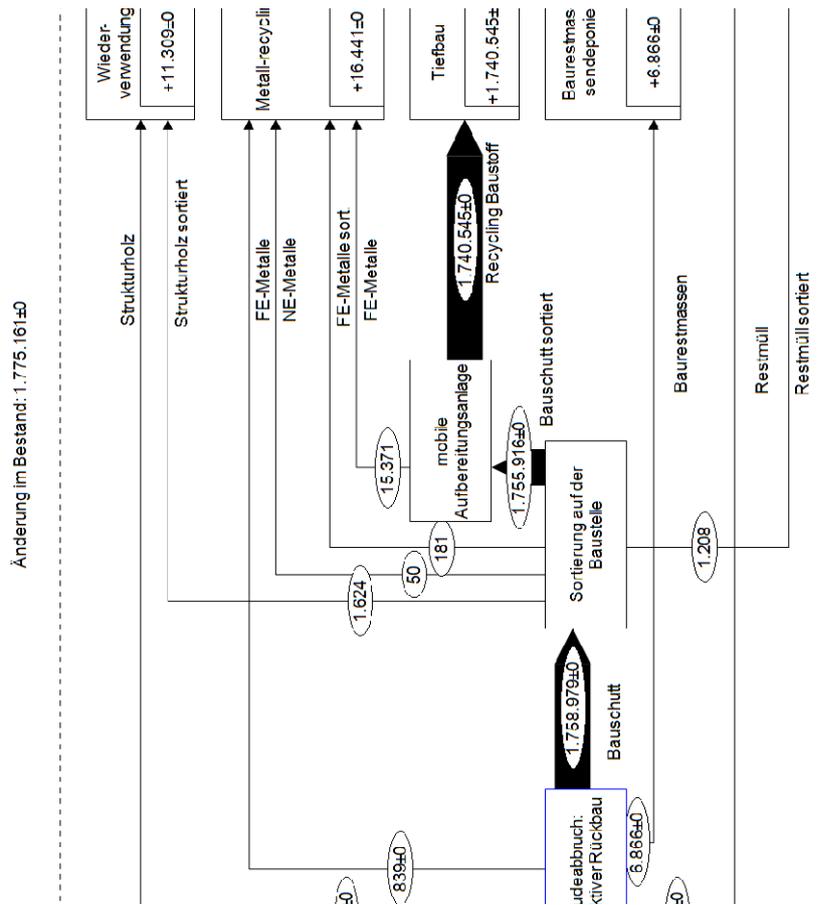


Abbildung 9-1: Güterflussanalyse suboptimales Szenario, Gebäude 2.

9.1.1.2 Stoffflüsse

Suboptimales Szenario

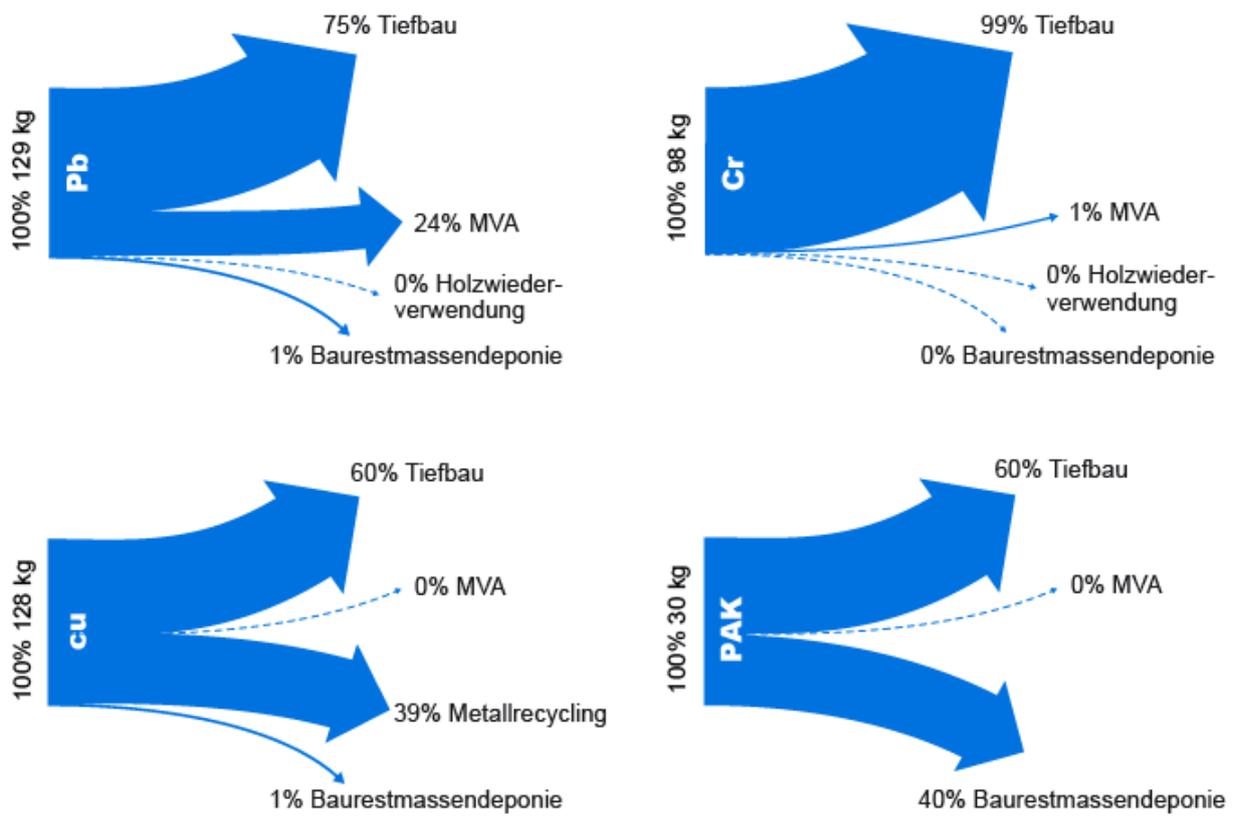


Abbildung 9-2: Pfade ausgewählter Schadstoffe für Gebäude 2, suboptimales Szenario.

9.1.2 Szenario 1

9.1.2.1 Güterflüsse

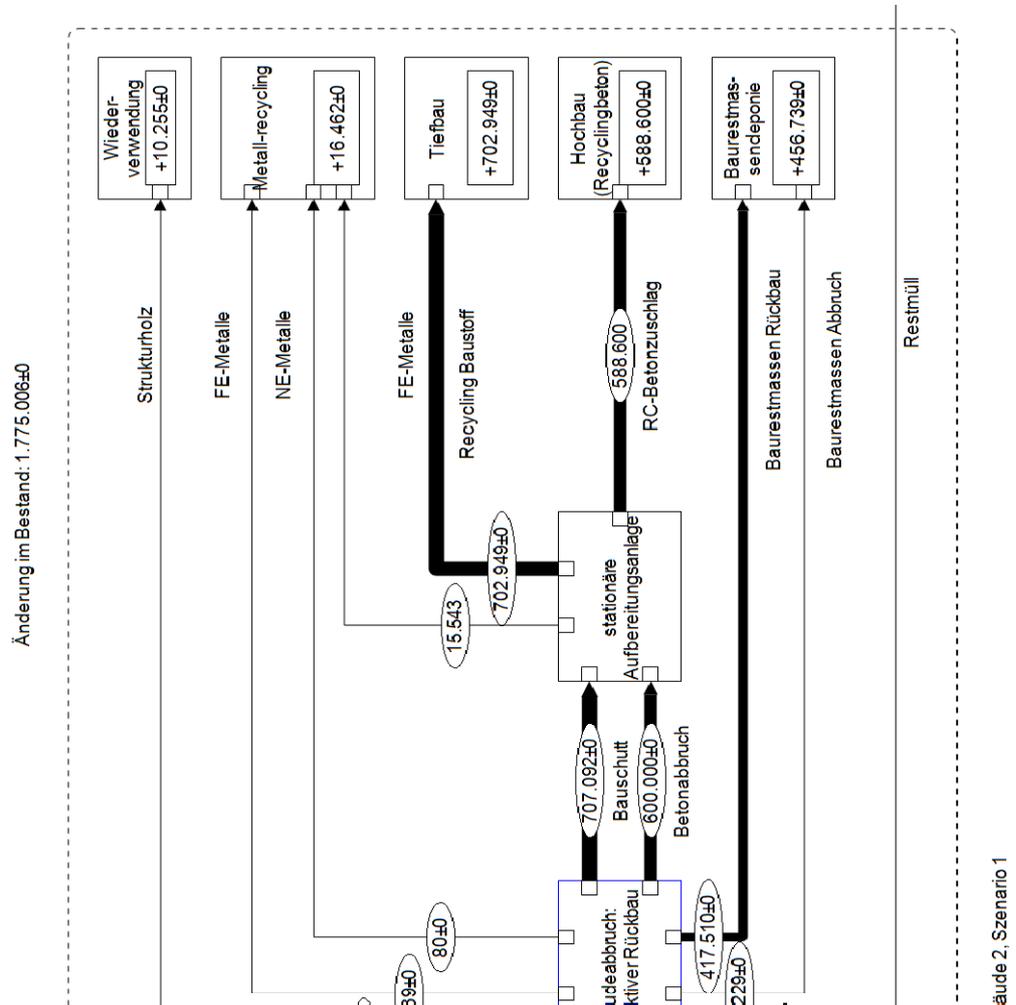


Abbildung 9-3: Güterflussanalyse Szenario 1, Gebäude 2.

9.1.2.2 Stoffflüsse

Szenario 1

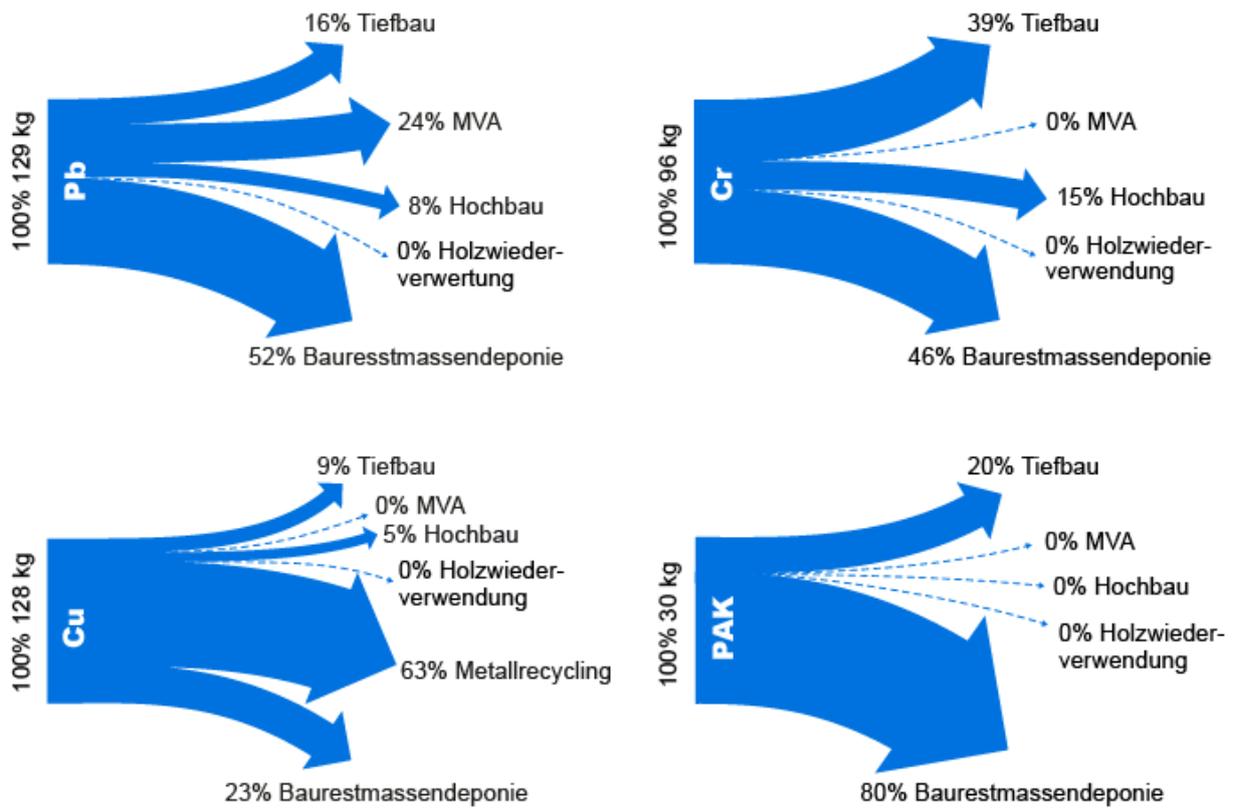


Abbildung 9-4: Pfade ausgewählter Schadstoffe für Gebäude 2, Szenario 1.

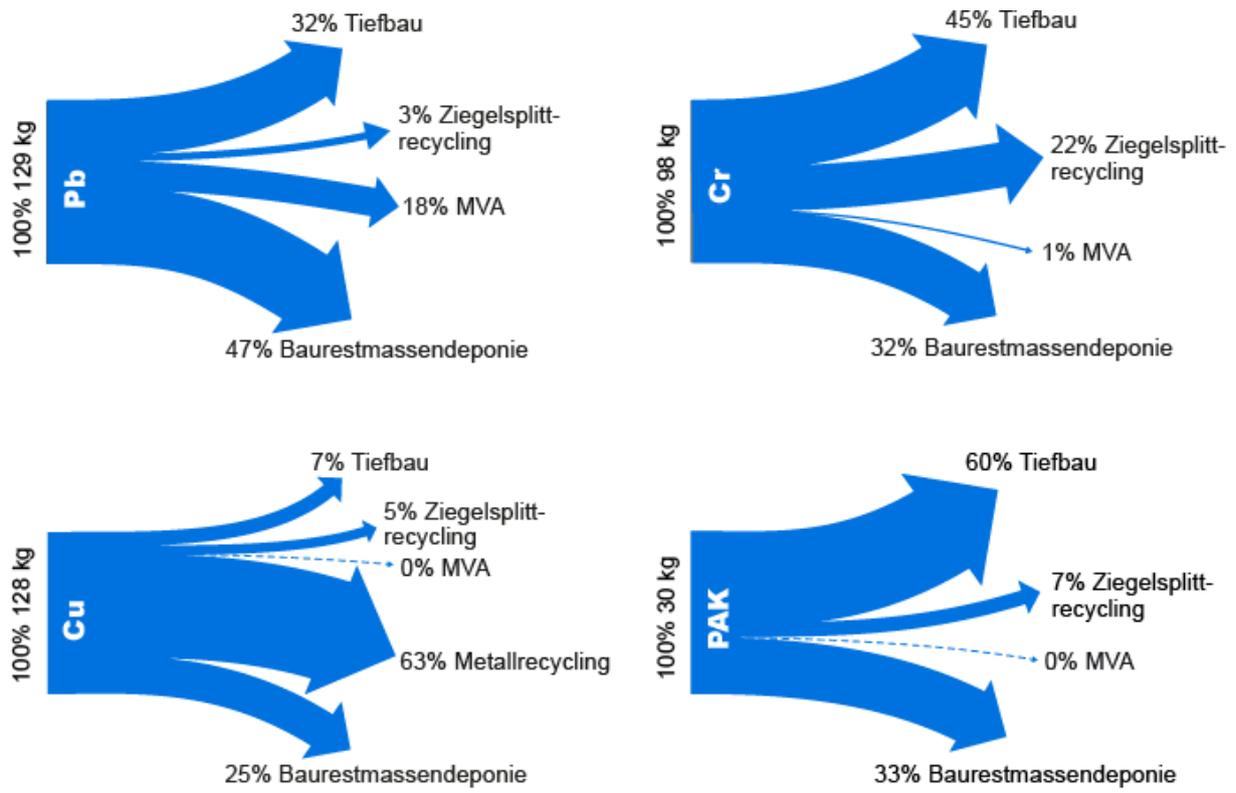
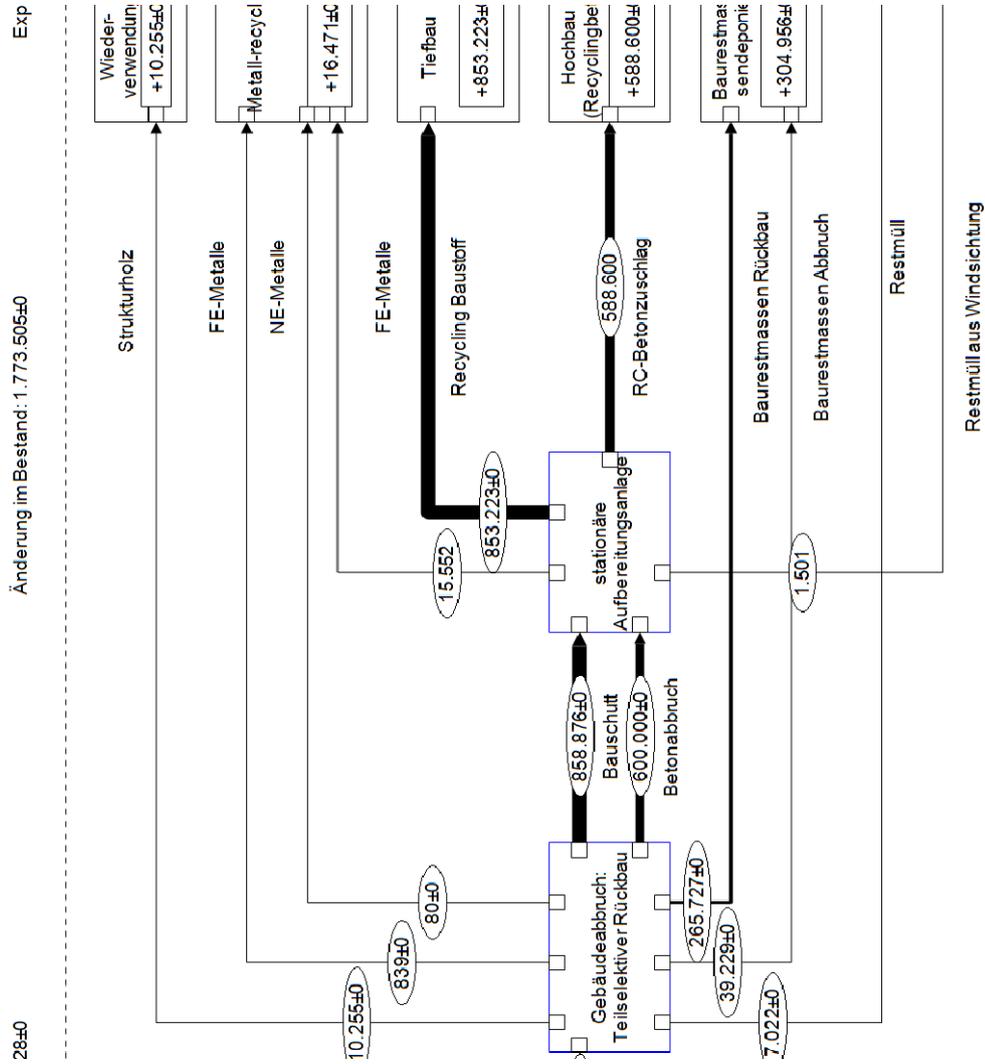


Abbildung 9-6: Pfade ausgewählter Schadstoffe für Gebäude 2, Szenario 2.

9.1.4 Szenario 3

9.1.4.1 Güterflüsse



:h Gebäude 2, Szenario 3

9.1.4.2 Stoffflüsse

Szenario 3

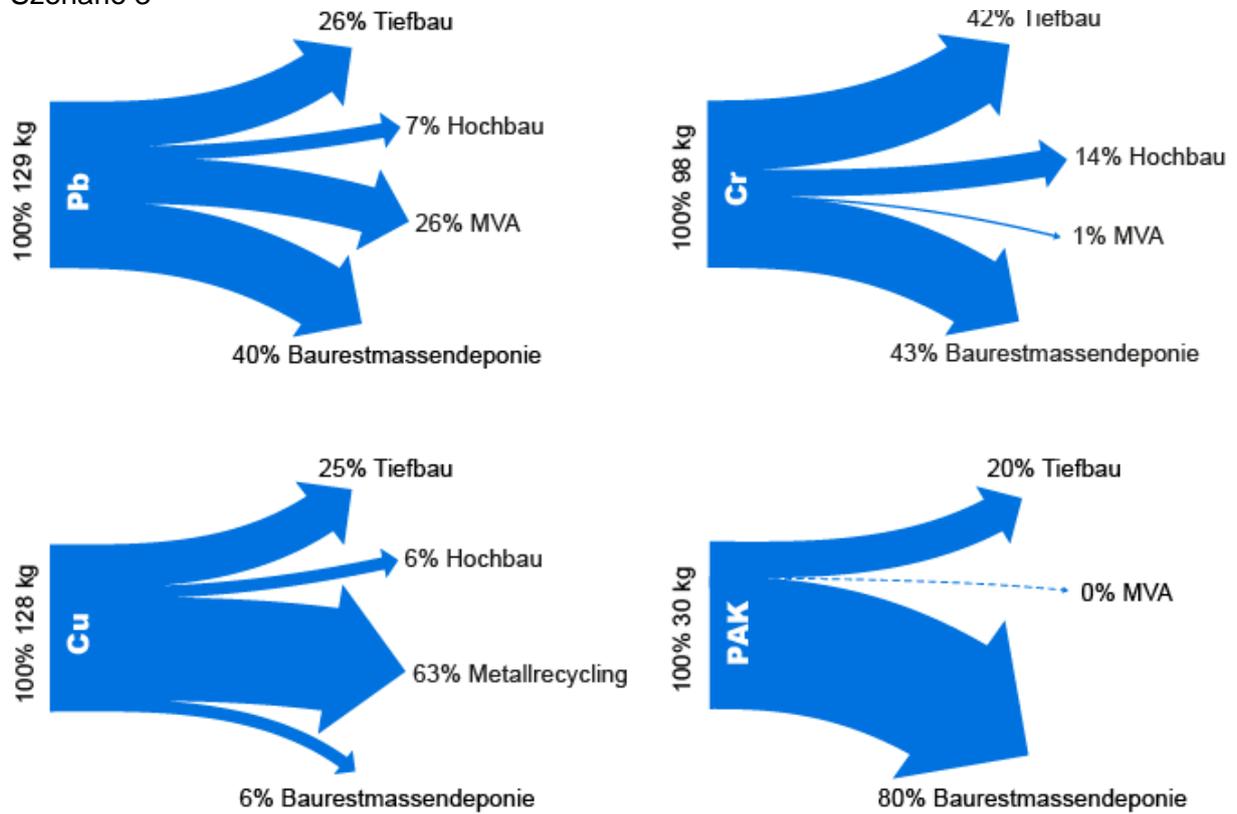


Abbildung 9-8: Pfade ausgewählter Schadstoffe für Gebäude 2, Szenario 3.

9.2 Ergebnisse der modifizierten Kosten- Wirksamkeitsanalyse (mKWA)

9.2.1 Oberziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt

9.2.1.1 Ziel 1.1: Verminderung der Schadstofffracht durch RC-Baustoffe in die Umwelt

Tabelle 9-1: Schadstofffracht in die Umwelt durch die Bauwirtschaft

Fraktion		Suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
RC-Baustoff					
Pb	kg	97 ± 28	21 ± 8	42 ± 14	34 ± 9
Cr	kg	97 ± 19	37 ± 10	44 ± 14	41 ± 10
Cu	kg	78 ± 4	12 ± 3	9 ± 3	33 ± 3
PAK	kg	18 ± 14	6 ± 2	18 ± 8	6 ± 2
RC-Betonzuschlag					
Pb	kg	-	10 ± 5	-	10 ± 5
Cr	kg	-	14 ± 4	-	14 ± 4
Cu	kg	-	7 ± 1	-	7 ± 1
PAK	kg	-	0	-	0
RC-Ziegelsplitt					
Pb	kg	-	-	4 ± 0	-
Cr	kg	-	-	22 ± 6	-
Cu	kg	-	-	6 ± 1	-
PAK	kg	-	-	2 ± 0	-

Tabelle 9-2: Verminderung der Schadstofffracht in die Umwelt (bezogen auf 100% der im Gebäude enthaltenen Schadstoffe)

Fraktion	Suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Pb	25%	84%	64%	74%
Cr	1%	62%	33%	58%
Cu	39%	91%	88%	74%
PAK	40%	80%	33%	80%

Tabelle 9-3: Gewichtungsfaktoren, abhängig von der LC 50 der Schadstoffe (Betrachtet wurden die Organismen *Daphnia Magna*, *Eisenia Fetida* und *Ceriodaphnia Reticulata*).

	Pb	Cr	Cu	PAK
Gewichtungsfaktor	0,04	0,52	0,26	0,18

Tabelle 9-4: Zieleirreichung Ziel 1.1: Verminderung der Schadstofffracht durch RC- Baustoffe in die Umwelt.

Fraktion	Suboptimales Szenario	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Pb	0,01	0,03	0,03	0,03
Cr	0,01	0,32	0,17	0,30
Cu	0,10	0,24	0,23	0,19
PAK	0,07	0,14	0,06	0,14
Zielerreichung gesamt	0,19	0,74	0,49	0,67

9.2.1.2 Ziel 1.2: Verminderung Treibhauswirksamkeit

Tabelle 9-5: Treibhauswirksamkeit für die Szenarien

Emissionen CO2 Äquivalente	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	kg CO2 Äquiv.	kg CO2 Äquiv.	kg CO2 Äquiv.	kg CO2 Äquiv.
Selektiver Rückbau	6	2.336	0	1.543
Selektiver Abbruch	204	1.447	173	1.329
Demolierung	835	317	902	387
Sortierung auf der Baustelle	184	-	285	-
Mobile Aufbereitungsanlage	2.480	-	-	-
Stationäre Aufbereitungsanlage einfach	-	1.369	-	-
Stationäre Aufbereitungsanlage mit Nassaufbereitung, Wirbelschichtsortierung, sensorgestützte Sortierung	-	-	2.484	-
Stationäre Aufbereitungsanlage mit Windsichtung	-	-	-	2.052
Transport Baurestmassen	4.524	4.561	4.572	4.564
Deponierung Baurestmassen	9	1.078	1.424	711
Deponierung Schlacken aus MVA	0	0	0	0
Einsparungen an CO2 Äquivalente				
Thermische Verwertung Restmüll	0	0	0	
Abbau Primärrohstoffe	9.590	7.116	6.301	7.944
durch Fe-Metallrecycling	16.016	15.908	15.954	15.917
durch Kupferrecycling	-197	316	316	316
durch Holzwiederverwendung	396	359	359	359
Emissionen CO2 Äquivalente Gesamt	-17.562	-12.590	-13.089	-13.950

Tabelle 9-6: Zieleirreichung Ziel 1.2: Verminderung der Treibhauswirksamkeit

	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 1.2 Minimierung des Treibhauseffektes	1,00	0,72	0,75	0,79

9.2.2 Oberziel 2: Schonung der Ressourcen

9.2.2.1 Ziel 2.1. Substitution stofflicher Ressourcen durch Baustoffrecycling

Tabelle 9-7: Substitution stofflicher Ressourcen durch Recycling

Fraktion		Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
RC- Baustoff Tiefbau	[t]	1741	703	856	853
RC-Betonzuschlag	[t]	0	589	0	589
RC- Ziegelsplitt	[t]	0	0	288	0
MINERALISCH GESAMT	[t]	1741	1292	1144	1442
Holz	[t]	11	10	11	10
FE- Metalle	[t]	16	16	16	16
NE- Metalle (Cu)	[t]	0,05	0,08	0,08	0,08

Tabelle 9-8: Zielerreichung in Bezug auf die Substitution stofflicher Primärressourcen durch Recycling

	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 2.2 Substitution stoffli- cher Ressourcen durch Recycling	1,00	0,75	0,66	0,83

9.2.2.2 Ziel 2.2. Schonung energetischer Ressourcen

Tabelle 9-9: Kumulierter Energieaufwand der Bauschuttzubereitung

	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Energieverbrauch	MJ	MJ	MJ	MJ
Selektiver Rückbau	98	30.692	0	18.593
Selektiver Abbruch	2.335	16.557	1.985	15.205
Demolierung	9.554	3.631	10.317	4.428
Sortierung auf der Baustelle	2.101	-	3.264	-
Mobile Aufbereitungsanlage	28.369	-	-	-
Stationäre Aufbereitungsanlage einfach	-	20.880	-	-
Stationäre Aufbereitungsanlage mit Nassaufbereitung, Wirbelschichtsortierung, sensorgestützte Sortierung	-	-	37.880	-
Stationäre Aufbereitungsanlage mit Windsichtung	-	-	-	31.283
Transport Baurestmassen	18.419	18.569	18.616	18.582
Deponierung Baurestmassen	107	12.332	16.285	8.139
Deponierung Schlacken aus MVA	2	2	2	2
Energieeinsparungen				
Thermische Verwertung Restmüll	3.007	3.076	3.296	4.117
Abbau Primärrohstoffe	136.824	101.529	89.899	113.342
durch Fe-Metallrecycling	157.555	156.499	156.950	156.586
durch Kupferrecycling	2.163	3.460	3.460	3.460
durch Holzwiederverwendung	1.696	1.538	1.696	1.538
KUMULIERTER ENERGIEAUFWAND	-240.262	-163.439	-166.953	-182.811

Tabelle 9-10: Einsparung energetischer Ressourcen durch Baustoffrecycling

	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 2.3 Schonung Energetischer Ressourcen	1,00	0,68	0,69	0,76

9.2.2.3 Ziel 2.1. Einsparung von Deponievolumen

Tabelle 9-11: Zu deponierende Abfallmenge und Verbrauch an Deponievolumen

Fraktion		Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Zu deponierende Abfallmenge (Bau- restmassen + MVA- Schlacken)	t	8	457	603	0
Deponievolumen	m ³	4	261	345	0

9.2.3 Oberziel 1.3: Gewährleistung einer guten ökologischen Qualität der Rc- Baustoffe

9.2.3.1 Schadstoffkonzentrationen als Gesamtgehalt

Tabelle 9-12: Schadstoffkonzentrationen und Störstoffanteile in RC- Baustoffen

Fraktion		Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
RC-Baustoff					
Pb	mg/kg	55 ± 16	30 ± 12	49 ± 17	39 ± 10
Cr	mg/kg	56 ± 11	53 ± 14	52 ± 16	47 ± 11
Cu	mg/kg	45 ± 2	17 ± 4	10 ± 4	38 ± 3
PAK	mg/kg	10 ± 8	8 ± 2	21 ± 9	7 ± 2
RC-Betonzuschlag					
Pb	mg/kg	-	16 ± 8	-	16 ± 8
Cr	mg/kg	-	24 ± 7	-	24 ± 7
Cu	mg/kg	-	12 ± 2	-	12 ± 2
PAK	mg/kg	-	0	-	0
RC-Ziegelsplitt					
Pb	mg/kg	-	-	15 ± 1	-
Cr	mg/kg	-	-	76 ± 20	-
Cu	mg/kg	-	-	22 ± 4	-
PAK	mg/kg	-	-	5 ± 1	-

QK A+

QK A

QK B

QK C

Tabelle 9-13: Störstoffe im RC- Baustoff

	Subopt, Sz	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Störfraction im RC- Baustoff	0,09%	0,35%	0,11%	0,11%

Tabelle 9-14: Zielerreichung in Bezug auf die Reduktion der Schadstoffkonzentrationen und des Störstoffanteiles

Fraktion	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 3.1 Erreichung einer guten ökologischen Qualität der RC- Baustoffe	0,35	0,51	0,41	0,50

9.2.3.2 Schadstoffkonzentrationen im Eluat

Tabelle 9-15: SO_4 – Konzentrationen im Eluat

	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS	mg/kg TS
Sulfatkonzentration im RC-Baustoff	2.045	1.564	2.155	1.449
Sulfatkonzentration im Ziegelsplitt	-	-	1.125	-

QK A+

QK A

Tabelle 9-16: Zielerreichung in Bezug auf die Reduktion der SO_4 – Konzentration im Eluat.

	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 3.2 Reduktion der SO_4 -Konzentration im Eluat	0,66	0,74	0,71	0,76

9.2.4 Oberziel 3: Wirtschaftliche Effizienz

Tabelle 9-17: Betriebswirtschaftliche Kosten und Einnahmen der verschiedenen Szenarien.

Prozess		Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Selektiver Rückbau	€	6.142,86	47.428,84	3.234,56	20.040,21
Selektiver Abbruch	€	998,09	9.203,28	848,38	8.456,27
Demolierung	€	3.145,80	1.210,47	3.438,93	1.476,07
Sortierung auf der Baustelle	€	331,78	0,00	538,83	0,00
Mulde	€	269,42	1.040,11	0,00	585,97
Aufbereitung	€	3.161,11	3.594,77	16.870,81	4.912,59
Transport	€	2.359,87	2.379,08	2.385,11	2.380,78
Entsorgung	€	1.175,39	9.418,13	12.168,24	6.850,81
Kosten gesamt	€	17.584,32	74.274,68	39.484,86	44.702,70
Erlöse (RC-Baustoffe)	€	11.029,78	10.849,20	13.126,69	11.497,28
Kosten abzüglich Erlöse	€	6.554,54	63.425,47	26.358,17	33.205,42

Prozess		Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Kosten abzüglich Erlöse	€	6.554,54	63.425,47	26.358,17	33.205,42
Erlöse (RC-Baustoffe)	€	11.029,78	10.849,20	13.126,69	11.497,28

9.2.5 Wirksamkeiten

9.2.5.1 Ziel 1: Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt

Tabelle 9-18: Erreichung der Ziele 1.2 und 1.2: Reduktion der Schadstofffracht und Minimierung des Treibhauseffektes

	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Pb	0,00	0,02	0,01	0,01
Cr	0,00	0,16	0,08	0,15
Cu	0,05	0,12	0,11	0,10
PAK	0,04	0,07	0,03	0,07
CO ₂ - Äquiv.	0,50	0,36	0,37	0,40
Erreichung Ziel 1:	0,59	0,73	0,62	0,73

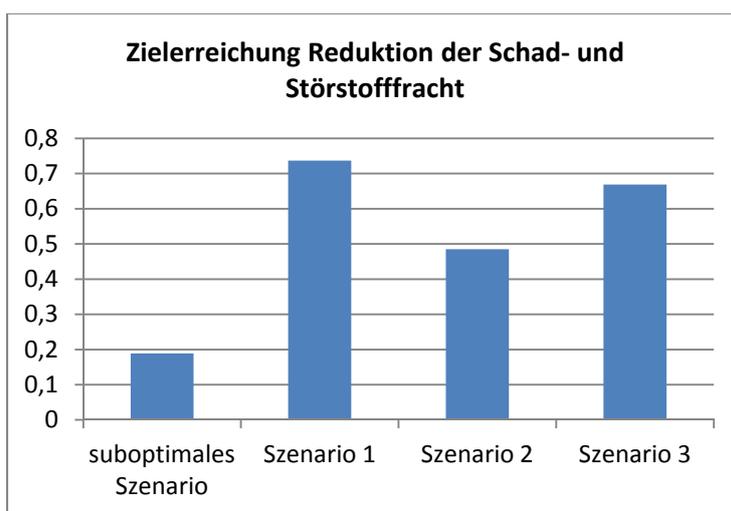


Abbildung 9-9: Reduktion der Schad- und Störstofffracht

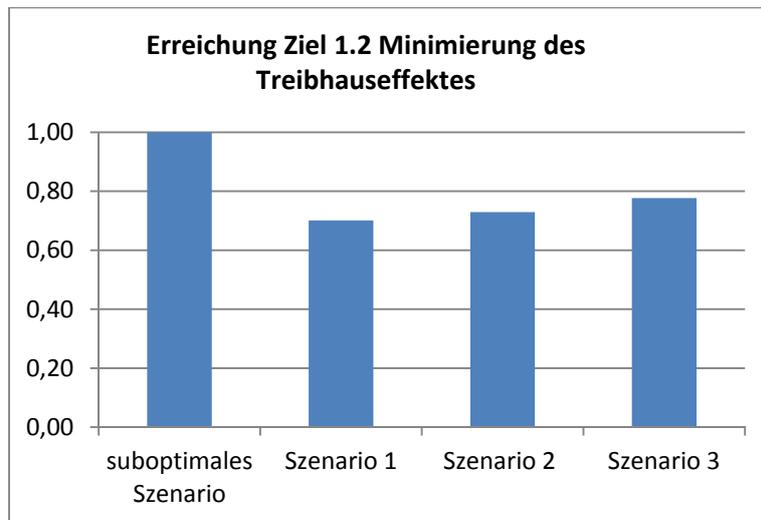


Abbildung 9-10: Minimierung des Treibhauseffektes

9.2.5.2 Ziel 2: Schonung der Ressourcen

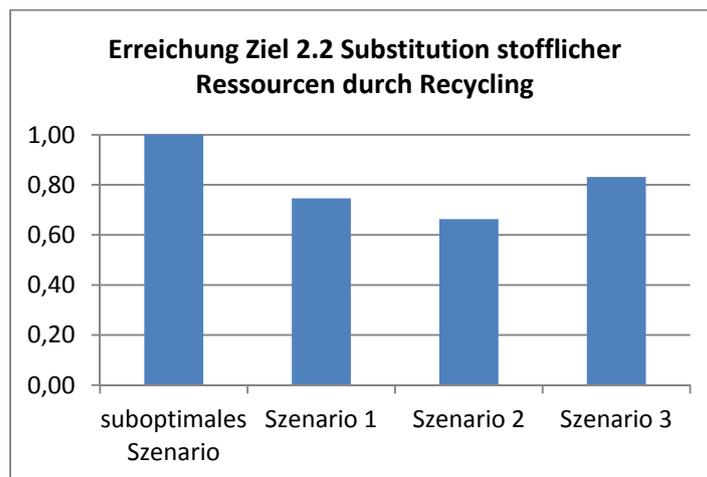


Abbildung 9-11: Schonung stofflicher Ressourcen durch Bauschuttrecycling

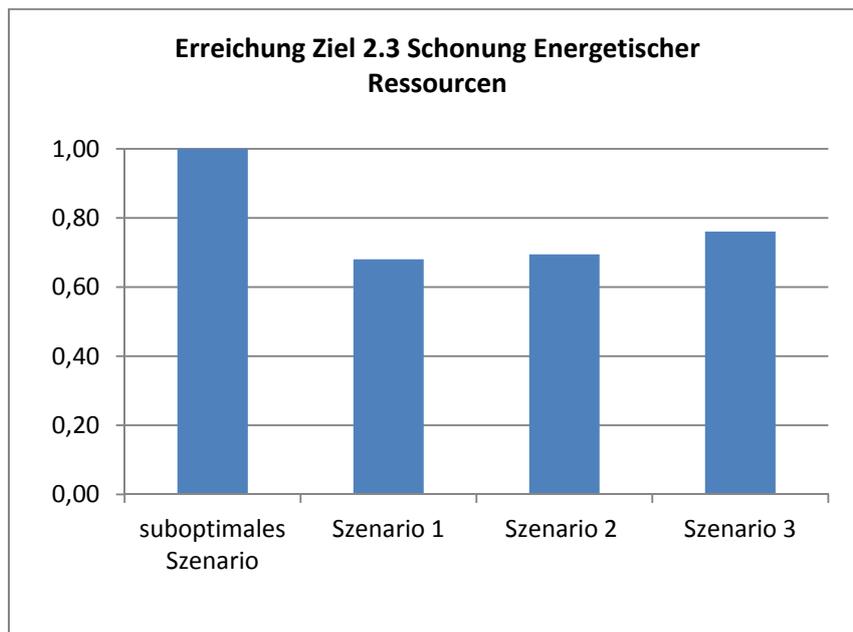


Abbildung 9-12: Schonung energetischer Ressourcen durch Bauschuttrecycling

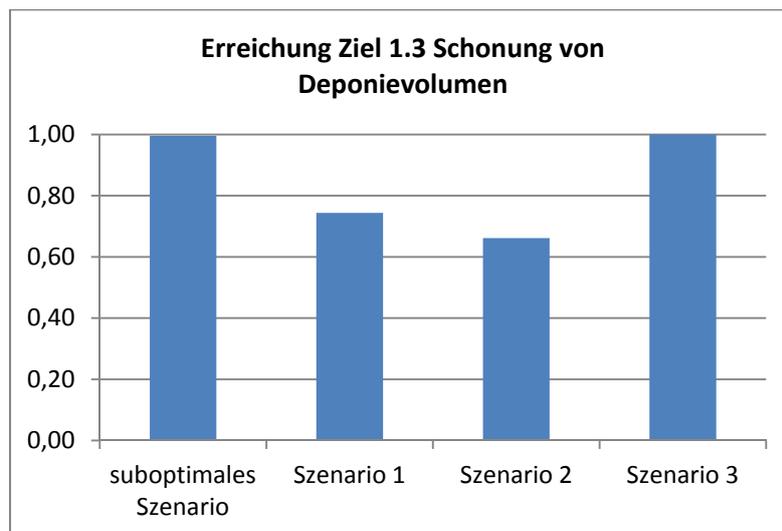


Abbildung 9-13: Schonung von Deponievolumen durch Bauschuttrecycling

Tabelle 9-19: Gewichtungsfaktoren für Ziel 2, Schonung der Ressourcen

	stoffliche Ressourcen	energetische Ressourcen	Deponievolumen
Gewichtungsfaktoren	0,375	0,375	0,25

Tabelle 9-20: Zielerreichungsgrad für Ziel 2, Schonung der Ressourcen

	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 2.1 Substitution stofflicher Ressourcen durch Recycling	0,38	0,28	0,25	0,31
Erreichung Ziel 2.2 Schonung Energetischer Ressourcen	0,38	0,26	0,26	0,29
Erreichung Ziel 1.3 Schonung von Deponievolumen	0,25	0,19	0,17	0,25
Erreichung Ziel 2: Schonung der Ressourcen	1,00	0,72	0,67	0,85

9.2.5.3 Ziel 3: Gute Qualität der RC- Baustoffe

Abbildung 9-14: Reduktion der Schad- und Störstoffkonzentration im RC- Baustoff

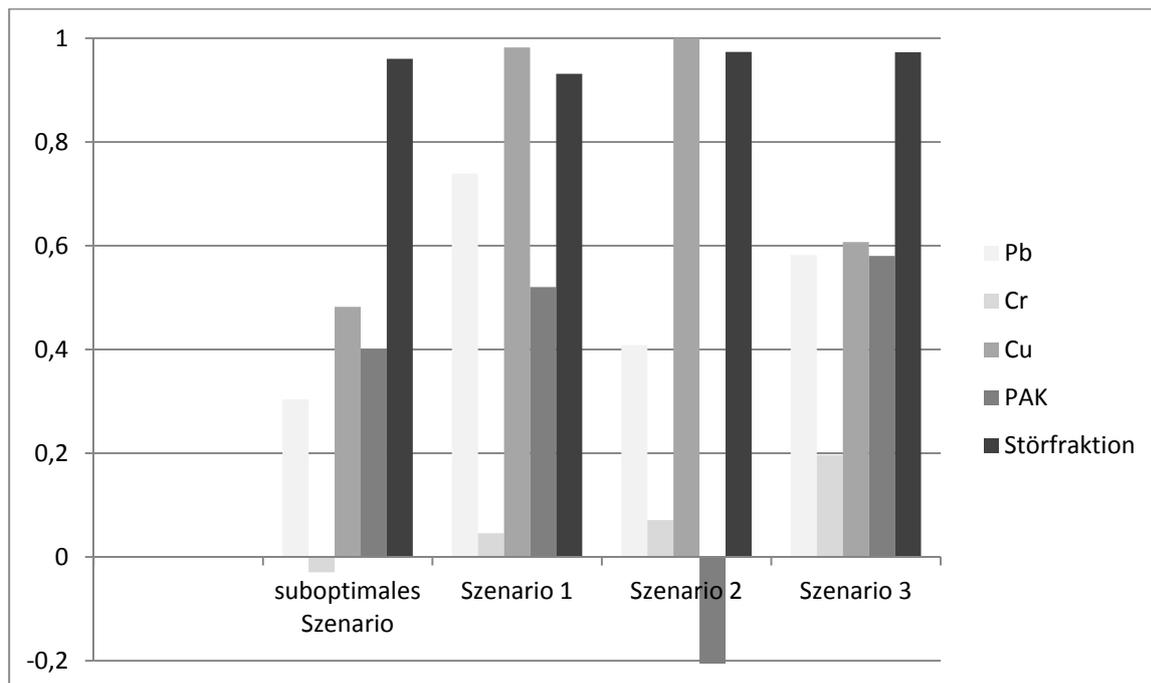


Tabelle 9-21: Ziel 3.1: Zielerreichung in Bezug auf die Gesamtgehalte und Störstofffraktion

Fraktion	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 3.1				
Erreichung einer guten ökologischen Qualität der RC- Baustoffe	0,35	0,51	0,41	0,50

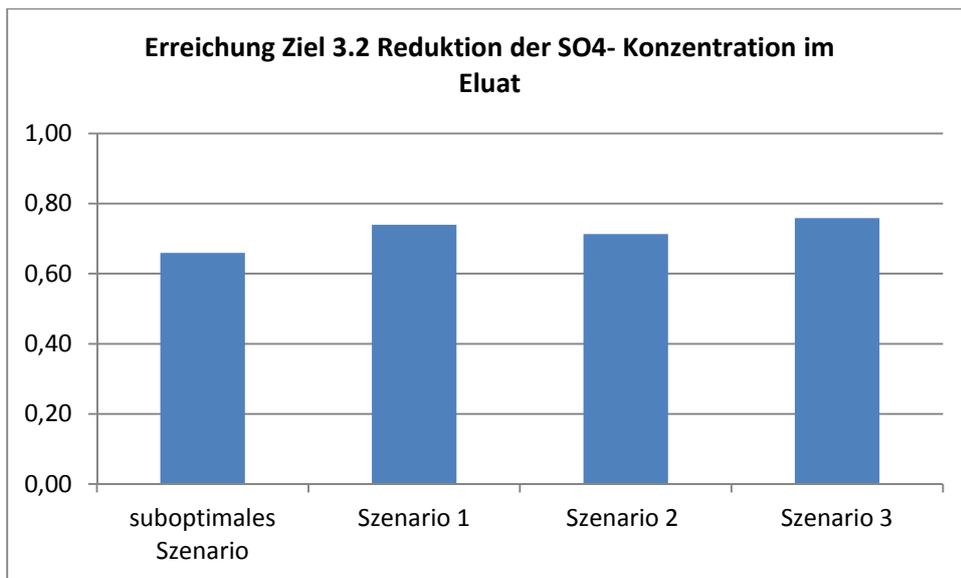


Abbildung 9-15: Reduktion der Sulfatkonzentration im Eluat

Tabelle 9-22: Ziel 3.1: Zielerreichung in Bezug auf die Gesamtgehalte und Störstofffraktion

	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erreichung Ziel 3.2 Reduktion der SO4- Konzentration im Eluat	0,66	0,74	0,71	0,76

Tabelle 9-23: Ziel 3.1: Gewichtungsfaktoren für Ziele 3.1 und 3.2

	Pb	Cr	Cu	PAK	Störfraktion	SO4
Gewichtungsfaktor	0,03	0,34	0,17	0,12	0,17	0,17

Tabelle 9-24: Erreichung Oberziel 3: Gute Qualität der RC- Baustoffe

Fraktion	Subopt. Sz.	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Pb	0,30	0,74	0,41	0,58
Cr	-0,03	0,05	0,07	0,20
Cu	0,48	0,98	1,00	0,61
PAK	0,40	0,52	-0,26	0,58
Störfraction	0,96	0,93	0,97	0,97
Sulfat	0,66	0,74	0,71	0,76
Erreichung Ziel 3: Gute Qualität der Rc- Baustoffe	0,40	0,55	0,46	0,55

9.2.5.4 Zusammenfassung Ergebnisse

Tabelle 9-25: Ergebnisse der mKWA zusammengefasst

	Kosten	Ziel 1: Schonung der menschlichen Gesundheit und Umwelt	Ziel 2: Schonung der Ressourcen	Ziel 3: Gute Qualität der RC- Baustoffe
Subopt. Sz.	6.554,54	0,59	1,00	0,40
Szenario 1	63.425,47	0,73	0,72	0,55
Szenario 2	26.358,17	0,62	0,67	0,46
Szenario 3	33.205,42	0,73	0,85	0,55

Abbildung 9-16: Zielerreichungsgrade der mKWA für Gebäude 2

