



# Urban-Mining-Potenzial in der Stadt Zürich

Am Beispiel von ausgewählten  
Rückbaumaterialien

Zwischenbericht

## **IMPRESSUM**

### **Auftraggeberin:**

Stadt Zürich,  
Amt für Hochbauten (AHB)

### **Bearbeitung:**

Dr. Stefan Rubli  
Energie- und Ressourcen-Management GmbH  
rubli@energie-ressourcen.ch

### **Projektleitung:**

Philipp Noger,  
Fachstelle Nachhaltiges Bauen

### **Begleitgruppe:**

Philipp Noger, (Amt für Hochbauten)  
Dr. Karl Tschanz, Daniel Gerber (Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich)  
Rolf Wagner, Manuel Stark (AWEL)  
Niko Heeren (ETH Zürich)

Download als pdf von  
[www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen](http://www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen)

Zürich, Dezember 2014

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>5</b>
<b>1 AUSGANGSLAGE</b> .....	<b>7</b>
<b>2 FRAGESTELLUNGEN UND ZIELE</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 Datengrundlagen</b> .....	<b>8</b>
2.1.1 Daten aus Controllingprojekten .....	8
2.1.2 Untersuchungen Projektarbeit ETH Zürich .....	9
2.1.3 Daten- und Literaturrecherche .....	10
<b>2.2 Zielsetzungen</b> .....	<b>10</b>
<b>3 VORGEHEN UND METHODE</b> .....	<b>11</b>
<b>4 RESULTATE</b> .....	<b>12</b>
<b>4.1 Zusammensetzung der Bauabfälle und Materialanfall</b> .....	<b>12</b>
<b>4.2 Resultate aus der Ökobilanzierung</b> .....	<b>13</b>
<b>4.3 Auswertung der Transportdistanzen zwischen Baustelle und Entsorgungsorten</b> <b>15</b>	
<b>4.4 Analysen zum Rückbau, Entsorgung und Aufbereitung von Beton- und Mischabbruch</b> .....	<b>17</b>
4.4.1 Primärenergieaufwand (PE) Rückbauprozess .....	17
4.4.2 Primärenergieaufwand Transporte .....	19
4.4.3 Primärenergieaufwand Aufbereitung .....	20
4.4.4 Primärenergie für Rückbau, Transport und Aufbereitung .....	21
<b>4.5 Analysen zur Entsorgung von Altholz</b> .....	<b>22</b>
4.5.1 Primärenergieaufwand (PE) Rückbauprozess .....	22
4.5.2 Primärenergieaufwand Transporte .....	23
4.5.3 Primärenergieaufwand Aufbereitung .....	24
4.5.4 Primärenergie für Rückbau, Transport und Aufbereitung .....	24
4.5.5 Szenarien zum PE der Altholzentsorgung/-aufbereitung im In- und Ausland .....	25
<b>5 DISKUSSION</b> .....	<b>31</b>
<b>5.1 Erkenntnisse aus den Auswertungen der ETH-Projektarbeit</b> .....	<b>31</b>
<b>5.2 Erkenntnisse aus Analysen der Transporte</b> .....	<b>31</b>
<b>5.3 Erkenntnisse aus den Analysen der Beton- und Mischabbruchentsorgung</b> .....	<b>32</b>
<b>5.4 Erkenntnisse aus den Analysen der Altholzentsorgung</b> .....	<b>32</b>
<b>5.5 Schlussfolgerungen</b> .....	<b>33</b>
<b>6 AUSBLICK BZW. VORSCHLAG ZUM WEITEREN VORGEHEN</b> .....	<b>34</b>
<b>6.1 Weitere Analysen zum PE</b> .....	<b>34</b>
<b>6.2 Weitere Umweltbelastungsindikatoren</b> .....	<b>35</b>
<b>6.3 Summierung und Vergleich des PE und UBP nach Materialkategorien</b> .....	<b>35</b>
<b>7 LITERATUR</b> .....	<b>36</b>

---

## Glossar

MJ	Megajoule
km	Kilometer
m <sup>3</sup>	Kubikmeter (alle Angabe in Festmass)
PE	Primärenergie/Primärenergieaufwand
t	Tonnen
tkm	Tonnenkilometer

### Begriffsdefintionen:

Rückbau:	Vollständiger Rückbau eines Gebäudes inklusive Fundament aber exklusive Aushubarbeiten.
Sanierung:	Ausbau von Rückbaumaterialien teilweise bis zur vollständigen Entkernung.
Teilrückbau:	Rückbau von Teilen eines Gebäudes, wobei der restliche Teil gemäss obiger Definition saniert wird. Ebenfalls dem Teilrückbau zugeordnet werden Projekte, bei denen Eingriffe bei mehreren Gebäuden auf einem Areal stattfanden, wobei die Gebäude sowohl zurückgebaut als auch saniert wurden.

## Zusammenfassung

### Ausgangslage und Ziele der Studie (1. Etappe)

Das Amt für Hochbauten (AHB) hat in den vergangenen Jahren bei mehreren grösseren Rückbau- und Sanierungsvorhaben im Rahmen von Controllingprojekten die Entsorgung der Rückbaumaterialien überwacht. Mittlerweile steht eine relativ umfangreiche Datenbasis zur weiteren Auswertung zur Verfügung. Die Fachstelle Nachhaltiges Bauen des AHB möchte nun die bestehenden Datengrundlagen nutzen und mittels weiteren Analysen das Urban-Mining-Potenzial des Baubereiches in der Stadt Zürich am Beispiel von ausgewählten Rückbaumaterialien untersuchen.

Ziel des Projekts, welches in zwei Etappen durchgeführt wird, ist es, Grundlagen zu erarbeiten, mit Hilfe derer Optimierungsmassnahmen zum ressourceneffizienten Umgang mit Rückbaumaterialien vom Rückbau- bis zu den Verwertungsprozessen definiert werden können.

### Resultate und Erkenntnisse

Die Auswertung und Analysen zum Primärenergieaufwand (PE) vom Rückbau über die Transporte zur Aufbereitung und bis hin zur Verwertung des Materials für die beiden Materialkategorien „Beton- und Mischabbruch“ sowie „Altholz“ ergaben die folgenden Erkenntnisse:

- Die Zusammensetzung der aus dem Rückbau und Sanierung anfallenden Rückbaumaterialien unterscheidet sich relativ stark. Bei Sanierungsprojekten beträgt der durchschnittliche Anteil an Beton- und Mischabbruch am gesamten Rückbaumaterial 70 Massenprozent (M%). Bei den Rückbauprojekten sind es 88 M%, da hier zusätzlich die tragende Betonkonstruktion zurückgebaut wird.
- Der Primärenergieaufwand (PE) für den Rückbau, den Transport und die Aufbereitung des Beton- und Mischabbruchs beträgt durchschnittlich 200 MJ pro Tonne Beton- und Mischabbruchgranulat. Davon beansprucht der Rückbau alleine 60% des totalen PE.
- Der eingesetzte Maschinenpark scheint einen wesentlichen Einfluss auf den PE des Rückbaus zu haben. Somit könnten entsprechende Vorgaben in der Ausschreibung zum einzusetzenden Maschinenpark zu einer Reduktion des PE beim Rückbau führen.
- Bei den Transporten kann die heute bestehende Praxis bei den Ausschreibungen beibehalten werden. Dieses Vorgehen ist sehr wirksam. Optimierungen sind über weitergehende Vorgaben bei den Emissionscodes der LKW möglich.
- Der Primärenergieaufwand (PE) für den Rückbau, den Transport und die Aufbereitung von Altholz beträgt durchschnittlich 264 MJ pro Tonne Altholz. Im Gegensatz zu Beton- und Mischabbruch ist beim Altholz der Aufbereitungsprozess mit 200 MJ/t Altholz sehr energieintensiv. Aus diesem Grund müssten im Bereich der Aufbereitung Massnahmen definiert werden. Allerdings ist in der Praxis eine Überprüfung von Vorgaben kaum möglich.
- Da ein grosser Teil des Altholzes exportiert wird, ist eine Beurteilung dieser Exporte von Interesse. Die groben Abschätzungen zum PE der stofflichen Verwertung zeigen, dass der Altholzanteil in der Spanplattenproduktion der wichtigste Parameter bei der Beurteilung der stofflichen Verwertung im Ausland ist.

- Solange die stoffliche Verwertung im Ausland durch den Abnehmer nicht auf nachvollziehbare Weise belegt werden kann, ist zu empfehlen, das anfallende Altholz den lokalen Altholzverbrennungsanlagen zuzuführen. Voraussetzung dazu ist, dass diese über einen hohen Gesamtwirkungsgrad verfügen.

### **Ausblick und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen**

Die erste Projektetappe ist abgeschlossen. Die vorliegenden Resultate und Erkenntnisse zeigen, in welche Richtung eine allfällige Weiterentwicklung des Projekts gehen könnte.

In der zweiten Etappe sollten auf die folgenden Aspekte vertieft bearbeitet werden:

- Bausperrgut:  
Die Aufbereitung von Bausperrgut in Sortieranlagen dürfte mit einem relativ hohen PE (Primärenergieaufwand) verbunden sein. Dieser könnte ebenfalls mit dem PE aus dem Rückbau, Transport und der Verwertung verglichen werden, um zu sehen, ob hier allenfalls Optimierungsmassnahmen sinnvoll wären.
- Metalle (Eisen, Alu und Kupfer):  
Bei den Altmetallen sind vor allem die durch den Ersatz von Primärressourcen erzielten Gutschriften von Interesse. Werden diese in die gesamthafte Bilanzierung der Rückbau- und Sanierungsprojekte mit einbezogen, sind hier weitere Erkenntnisse zu erwarten.
- Brennbare Bauabfälle:  
Bei den brennbaren Bauabfällen wäre vor allem eine Analyse bezüglich des Rückbaus, Aufbereitung und Verwertung von Isolationsmaterial von Interesse. Leider liegen keine spezifischen Daten zum Anteil der Isolationsmaterialien an den gesamten brennbaren Bauabfällen vor. Aus diesem Grund müsste eine solche Analyse auf theoretischer Basis erfolgen.
- Gips und Inertstoffe:  
Die Gipsabfälle werden in Zukunft stark zunehmen. Dies hat eine Modellierung der Gipsflüsse in der Schweiz (AWEL 2014) gezeigt. Auf Basis dieser Daten könnte eine Analyse zum PE vom Rückbau bis zur Verwertung durchgeführt werden. Bei den Inertstoffen wäre interessant zu sehen, welche Umweltbelastungen durch die Ablagerung in Inertstoffdeponien ausgelöst werden. Eine solche Analyse würde allenfalls auch die Grenzen der bewertenden Ökobilanzierung aufzeigen.

Die Daten sind grösstenteils so aufbereitet, dass neben dem PE beispielsweise auch die ökologische Knappheit (UBP) beziffert werden kann. Da die Methode der ökologischen Knappheit umfassender als die Bestimmung des PE ist, sind entsprechende Unterschiede bei den Resultaten zu erwarten.

Zudem würden es die oben erwähnten Analysen erlauben, den PE oder die UBP der verschiedenen Materialkategorien einander gegenüberzustellen sowie aufzusummieren. Der Vergleich der PE/UBP der einzelnen Materialkategorien würde aufzeigen, welche Kategorien die höchste Relevanz, und damit verbunden, das höchste Optimierungspotenzial haben. Daraus liessen sich wiederum verschiedenen Optimierungsmassnahmen miteinander vergleichen. Zudem könnte eine Gewichtung der Massnahmen erfolgen.

## 1 Ausgangslage

Die Stadt Zürich bekennt sich im Rahmen der 2000-Watt-Gesellschaft zu einer nachhaltigen Entwicklung. Insbesondere verpflichtet sich Zürich

- seinen Energieverbrauch auf 2000 Watt pro Person zu senken
- seinen CO<sub>2</sub>-Ausstoss bis 2050 auf eine Tonne pro Person und Jahr zu senken
- erneuerbare Energien und Energieeffizienz zu fördern
- und seine Beteiligungen an Atomkraftwerken nicht zu erneuern.

In diesem Zusammenhang ist es nun besonders wichtig, dass die Umsetzung dieser Vorgaben nicht auf zusätzlichen „Kosten“ anderer Regionen, Länder oder Wirtschaftsräume erfolgt. Eine Stadt kann sich nur im beschränkten Ausmass selbst versorgen, weil sie eine gewisse Menge an mineralischen und metallischen Ressourcen, Energie und Nahrungsmitteln aus dem nahen und weiteren Umfeld beziehen muss. Die damit verbundenen Umweltlasten werden somit teilweise ausgelagert. Allerdings besteht die Möglichkeit, den „Export“ von Umweltlasten durch eine optimale Nutzung der Ressourcen, Energie und Nahrungsmittel zu minimieren. Da sich in den Städten in Laufe der der Zeit riesige Ressourcenlager aufgebaut haben, gilt es diese in Zukunft optimal zu bewirtschaften. Wie bei der Exploration von primären Ressourcenvorkommen muss deshalb zunächst bekannt sein, welche Rahmenbedingungen erfüllt sein müssen, um die sekundären Ressourcenlager rentabel, umweltschonend und sozialverträglich bewirtschaften zu können.

Das Amt für Hochbauten möchte deshalb im Rahmen eines Projekts das Urban-Mining-Potenzial des Baubereiches in der Stadt Zürich am Beispiel von ausgewählten Stoffen/Materialien untersuchen. Damit soll die Vorbildfunktion der öffentlichen Hand in diesem Bereich gestärkt werden. Dazu werden die Erkenntnisse aus bereits ausgeführten Projekten in die Untersuchung mit einbezogen und mit weiteren Auswertungen und Analysen ergänzt. Das Projekt wird in zwei Etappen ausgeführt, wobei sich der vorliegende Bericht auf die erste Etappe bezieht:

Inhalte der ersten Projektetappe:

- a.) Auswertung der Daten aus den verschiedenen Controllingprojekten, welche im Rahmen von grossen Sanierungs- und Ersatzneubauprojekten des AHB ausgeführt wurden. Neben der Auswertung der Materialmengen sind vor allem die Umweltauswirkungen der verschiedenen Entsorgungswege, differenziert nach Materialkategorien, von Interesse. Diese werden, sofern es die Daten erlauben, vertieft ausgewertet.
- b.) Auswertung des mit den Transporten der Rückbaumaterialien verbundenen Primärenergieaufwandes. Erste Abschätzungen zum Primärenergiebedarf der Aufbereitung eines ausgewählten Sekundärmaterials und Gegenüberstellung zum PE der entsprechenden Transporte. Die Analyse soll aufzeigen, ob allfällige Optimierungsmassnahmen eher im Bereich der Aufbereitungsprozesse oder bei den Transporten einzuleiten sind.

Inhalte der zweiten Projektetappe:

In Abhängigkeit von den in der ersten Projektetappe gewonnenen Erkenntnissen, erfolgt eine Vertiefung der Arbeit. Von Interesse ist vor allem, welcher energetische Aufwand für die Aufbereitung der Sekundärmaterialien im Vergleich zur Primärproduktion getätigt werden muss und welchen Anteil der Transport dieses Materials am Gesamtenergiebedarf hat. Daraus kann unter anderem abgeleitet werden, ob eher bei den Transporten oder bei der Aufbereitung Optimierungspotenzial besteht. Weiter werden die Recyclingsysteme der einzelnen Materialkategorien untersucht und beschrieben. In Verbindung mit den Auswertungen der Daten aus den verschiedenen Controllingprojekten, können erste Analysen zum Istzustand der Entsorgung der Materialien durchgeführt werden.

Anhand der Erkenntnisse aus den beiden Projektetappen, sollen die Potenziale und die Handlungsoptionen für einen nachhaltigen und energieoptimierten Umgang mit den Rückbaumaterialien aufgezeigt werden. Allenfalls sind auch Aussagen betreffend des Materialeinsatzes beim Neubau und Sanierung möglich. Es werden Grundlagen erarbeitet, welche es ermöglichen, weitere Optimierungsmassnahmen zu definieren, welche bei konkreten Bauprojekten des AHB umgesetzt werden können (z.B. Definition von Vorgaben in den Ausschreibungsunterlagen). Falls es die Datengrundlagen erlauben, kann allenfalls eine Bewertung der Massnahmen hinsichtlich deren ökonomischen Auswirkungen auf die Bauprojekte durchgeführt werden.

## 2 Fragestellungen und Ziele

### 2.1 Datengrundlagen

#### 2.1.1 Daten aus Controllingprojekten

Das Amt für Hochbauten hat diverse grosse Rückbau- und Sanierungsprojekte begleiten lassen und dabei die Rückbauarbeiten und Rückbaumaterialentsorgung überprüft. Es wurden jeweils die Materialflüsse und Verwertungsquoten sowie die mit der Entsorgung der Rückbaumaterialien verbundenen Transporte ausgewertet. In der Tabelle 1 sind die verschiedenen Kennzahlen und Umweltindikatoren der begleiteten Rückbau- und Sanierungsprojekte zusammengefasst. Der Vergleich der Daten liefert bereits interessante Informationen. So sind die durchschnittlichen Schüttdichten der abtransportierten Materialien sehr unterschiedlich. Die Unterschiede sind meistens erklärbar. So weisen die Rückbauprojekte höhere Werte als die Sanierungsprojekte auf, weil der Anteil an Beton- und Mischabbruch, die hohe Materialdichten aufweisen, deutlich höher ist als bei den Sanierungen. Die Unterschiede bei den Sanierungen hängen mit der Eingriffstiefe zusammen, je höher die durchschnittliche Schüttdichte ist, umso stärker war die Eingriffstiefe. Interessant ist der tiefe Wert beim Rückbau der Wohnsiedlung Rautistrasse: Hier war der Holzanteil in den zurückgebauten Gebäuden sehr hoch, was zu einer tieferen Schüttdichte als bei anderen Rückbauten führte. Die Schüttdichte liefert somit auch Hinweise zur Materialisierung der zurückgebauten Gebäude.

Auch bei den Verwertungsquoten und den durchschnittlichen Transportdistanzen gibt es erhebliche Unterschiede. Insbesondere bei älteren Projekten, wie die Instandsetzung des Verwaltungszentrums Werd oder des Behandlungstraktes im Triemlispital sind tiefe Verwertungsquoten und hohe Transportdistanzen zu verzeichnen. Es handelte sich bei diesen



## Fragestellungen und Ziele

Projekten um reine Controllingprojekte, in denen ausschliesslich die Materialflüsse erfasst wurden. Erst auf Basis der Erkenntnisse aus diesen Projekten wurden ökologische Vorgaben definiert und diese in die Ausschreibungsunterlagen integriert.

Tabelle 1: Ausgewertete Daten aus den Baubegleitungen von grossen Rückbau- und Sanierungsprojekten des Amtes für Hochbauten.

Projekt	Massnahmen	Materialmenge t	Materialvolumen m <sup>3</sup>	Ø Schüttdichte kg/m <sup>3</sup>	Verwertungsquote %	Transporte km/Fahrt	Fahrten Anzahl	Transportkapazität t/Fahrt	Auswertung mit Mobitool		
									Umweltbelastungspunkte 2006 UBP/1Bauball	Primärenergie gesamt MJ/1Bauball	Treibhausgasemissionen kg/1Bauball
Instandsetzung Verwaltungszentrum Werd	Controlling	3'650	9'750	374	61	21	656	6	2'616	48	2.8
Instandsetzung Altersheim Dorflinde	ökologische Kriterien Controlling	3'023	3'378	895	88	9	244	12	1'059	19	1.1
Instandsetzung Spital Triemli, Behandlungstrakt	Controlling	2'912	5'226	557	24	41	286	10	5'106	94	5.5
Instandsetzung Amtshaus Parkring	ökologische Kriterien Controlling	1'072	1'377	779	88	30	80	13	3'736	69	4.0
Instandsetzung Schulhaus Milchbuck	Controlling	2'810	2'935	957	75	43	267	11	5'356	99	5.8
Instandsetzung Rechenzentrum OIZ II	ökologische Kriterien Controlling	2'898	5'267	550	92	16	216	13	1'972	36	2.1
Instandsetzung Pflegezentrum Witikon	ökologische Kriterien Controlling	6'088	6'844	890	80	19	536	11	2'362	43	2.6
Renovation Wohnsiedlung Kehlhof (Auswertung 1)	ökologische Kriterien Controlling	564	951	593	75% 82% <sup>(1)</sup>	7	126	4	862	17	1.0
Renovation Wohnsiedlung Kehlhof (Auswertung 2)	ökologische Kriterien Controlling	564	951	593	75% 82% <sup>(1)</sup>	7	126	4	3'979	62	3.7
Rückbau Wohnsiedlung Werdwies	ökologische Kriterien Bewirtschaftungskonzept Controlling	31'000	30'200	1'026	91	13	2'190	14	1'619	30	1.8
Rückbau Schulhaus Falletschen	ökologische Kriterien Controlling	8'350	6'700	1'246	93	23	470	18	2'865	53	3.1
Rückbau Stadion Letzigrund	ökologische Kriterien Bewirtschaftungskonzept Controlling	46'200		n.b.	99	8.4	2'854	16	1'046	19	1.1
Rückbau Wohnsiedlung Brunnenhof	Controlling	7'825	7'700	1'016	87	21	440	18	2'616	48	2.8
Teilrückbau Rechenzentrum OIZ I	ökologische Kriterien Controlling	14'294	12'800	1'117	90	29	663	22	3'566	66	3.9
Rückbau Rautstrasse	ökologische Kriterien Controlling	4'718	6'430	734	97	8.7	381	12	1'084	20	1.2
Benchmark Rückbau*					> 90	< 20			2'491	46	2.7
Benchmark Sanierung*					> 75	< 20			2'491	46	2.7

\*Quelle: Ressourcenstrategie - Bauwerk Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Stadt Zürich 2009

(1) Verwertungsquote von 82%, wenn PAK belasteter Gussasphalt, Absatzschutt und asbesthaltige Materialien nicht berücksichtigt würden.

Auswertung 1: Hier wird bei den Umweltlasten der Kleintransporte angenommen, dass diese den LKW-Transporten entsprechen.

Auswertung 2: Hier sind die Umweltlasten der Kleintransporte aus dem Mobitool eingesetzt.

Die in der Tabelle 1 aufgeführten Daten sind aggregiert. Da detaillierten Erhebungen während den Projekten durchgeführt wurden, ist eine vertiefte Datenauswertung möglich. So sind folgende Analysen möglich:

- Auswertung der durchschnittlichen Transportdistanzen für die Entsorgung der einzelnen Materialfraktionen.
- Materialzusammensetzung aus dem Rückbau im Vergleich zum Rückbau bei Sanierungen.
- Differenzierung der Verwertungswege innerhalb einzelner Materialkategorien (z.B. beim Holz: stoffliche vs. thermische Verwertung).
- Usw.

### 2.1.2 Untersuchungen Projektarbeit ETH Zürich

Ein Studierender der Umweltingenieurwissenschaften an der ETH Zürich wertete im Sommer 2014 im Rahmen einer Projektarbeit die Daten aus den in der Tabelle 1 aufgeführten Projekten weiter aus und entwickelte mittels Powerpivots ein Excel-Tool zur ökologischen Bewertung der Projekte. Die wichtigsten Resultate aus diesen Auswertungen werden im Resultatteil kurz vorgestellt. Zudem konnten die Daten als Grundlage für die weiteren Auswertungen verwendet werden.

### **2.1.3 Daten- und Literaturrecherche**

Für die Analysen der Verwertungswege und –optionen waren relativ umfassende Abklärungen notwendig. Einerseits mussten Unternehmen betreffend Daten zum Energieaufwand für die Materialaufbereitung angefragt werden. Andererseits mussten die Daten aus anderen Quellen (Literatur, Studien) zusammengetragen werden. Im Rahmen der ersten Etappe konnten vor allem Daten zur Altholzaufbereitung und Verwertung sowie zur Misch- und Betonabbruchaufbereitung zusammengetragen werden.

## **2.2 Zielsetzungen**

Die Zielsetzungen für die erste Projektetappe können wie folgt zusammengefasst werden:

- Auswertung bestehende Daten aus den Controllingprojekten:
  - Transportdistanz nach Materialkategorie.
  - Materialzusammensetzung aus Rückbauprojekten bzw. Sanierungsprojekten.
  - Analyse der Verwertungswege.
  - usw.
- Einbezug der Daten und Erkenntnisse der ETH-Projektarbeit in die Auswertung.
- Primärenergieaufwand für Transporte differenziert nach Materialkategorie.
- Erste Abschätzungen zum Primärenergieaufwand für die Aufbereitung eines ausgewählten Rückbaumaterials/-stoffes
- Erstellen eines Zwischenberichts mit den Resultaten aus den Auswertungen und Vorschlägen zum weiteren Vorgehen und zur Vertiefung der Analysen.
- Erste Analysen und Beurteilungen bezüglich den heute zur Verfügung stehenden Recyclingsystemen differenziert nach den verschiedenen Materialkategorien. Bestehen Optimierungspotenziale? Wenn ja, wo und wie sind diese zu nutzen? Was kann das AHB dazu beitragen?
- Präsentation der Zwischenresultate

### **3 Vorgehen und Methode**

Wie oben beschrieben, werden zunächst die Ergebnisse aus der Projektarbeit der ETH zusammengefasst und mit weiteren Auswertungen ergänzt. Danach erfolgt die Auswertung der Transporte, differenziert nach den Materialkategorien Betonabbruch, Mischabbruch, Holz, Metalle (Eisen, Kupfer und Aluminium) Bausperrgut, brennbares Material und weiteren Materialien.

Auf Basis dieser Auswertungen werden die weiteren Prozesse Rückbau, Aufbereitung und Verwertung für die Materialkategorien „Beton- und Mischabbruch“ sowie „Altholz“ analysiert. Dabei wird die Primärenergie bzw. der Primärenergieaufwand (PE) der Prozessstufen Rückbau, Transport, Aufbereitung und Verwertung abgeschätzt. Der PE der einzelnen Prozessstufen wird anschliessend summiert und die Anteile der einzelnen Prozessstufen am Total der Prozesskette quantifiziert. Mit Kenntnis der PE-Anteile der einzelnen Prozessstufen und den gewonnen Erkenntnissen aus den Analysen der einzelnen Prozesse kann beurteilt werden, bei welchen Prozessstufen mittels Massnahmen die grösste Wirkung erzielt werden kann.

Die Resultate aus den Untersuchungen bilden die Basis für den Entscheid, in welche Richtung die zweite Projektetappe entwickelt werden soll. Ziel soll es sein, Grundlagen zu entwickeln, anhand derer weitere Massnahmen zu Reduktion der Umweltbelastungen in konkreten Bau- bzw. Rückbauprojekten definiert werden können.

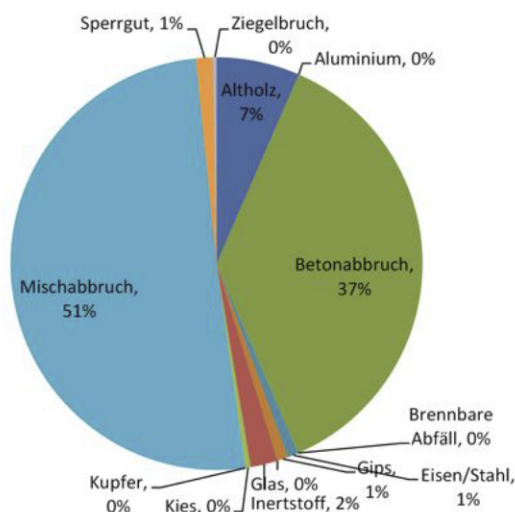
## 4 Resultate

### 4.1 Zusammensetzung der Bauabfälle und Materialanfall

Im Rahmen der Projektarbeit an der ETH wurden die Daten aus den Controllingprojekten zusammengefasst und ausgewertet. Die Analysen betreffend der Zusammensetzung der entsorgten Bauabfälle zeigen markante Unterschiede zwischen Rückbau- und Sanierungsprojekten (Abbildung 1). Der Mischabbruch- und vor allem der Betonabbruchanteil ist bei den Rückbauprojekten mit insgesamt 88 Massenprozenten deutlich höher als bei den Sanierungsprojekten (70%). Dies ist nachvollziehbar, da beim Rückbau zusätzlich die tragende Betonkonstruktion zurückgebaut und entsorgt wird.

Bei den Sanierungsprojekten ist der Sperrgutanteil mit 10 Massenprozenten relativ hoch. Oftmals kann bei Sanierungsprojekten aus Platzgründen nur eine beschränkte Anzahl Mulden gestellt werden. Aus diesem Grund erfolgt ein Teil der Materialtrennung nicht vor Ort sondern in den externen Bausperrgutsortieranlagen.

Materialzusammensetzung Rückbauprojekte



Materialzusammensetzung Sanierungsprojekte

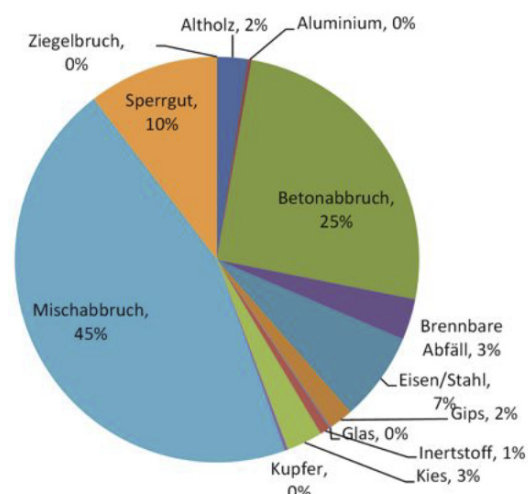


Abbildung 1: Durchschnittliche Zusammensetzung der Bauabfälle bei den begleiteten Rückbau- (links) und Sanierungsprojekten (rechts) der Stadt Zürich. Angaben in Massenprozenten.

Neben der Zusammensetzung ist der gesamte Materialanfall in Tonnen bezogen auf Nutzfläche (Abbildung 2) bzw. das Gebäudevolumen (Abbildung 3) von Interesse. Auch hier sind relativ deutlich Unterschiede zwischen den Rückbau bzw. Teilrückbau- und Sanierungsprojekten erkennbar. So liegt der Materialanfall pro m<sup>2</sup> Nutzfläche beim Misch- und Betonabbruch rund eine Grössenordnung höher als bei den Sanierungen (Abbildung 2). Bei den anderen Materialfraktionen sind die Unterschiede weniger markant. In den Grafiken sind die grossen Unterschiede zwischen den einzelnen Materialkategorien gut zu erkennen. Diese können sich über mehrere Grössenordnungen erstrecken. Ähnliches gilt grundsätzlich für die Auswertung der Daten nach Gebäudevolumen (Abbildung 3). Auch hier liegen die Werte für Beton- und Mischabbruch bei den Rückbauten bzw. Teilrückbauten rund eine Grössenordnung höher als bei den Sanierungen. Die Variabilität zwischen den einzelnen Projekten bei den verschiedenen Materialkategorien ist ähnlich gross. Die grossen Variabilitäten sind darauf zurückzuführen, dass die Materialzusammensetzung der zurückgebauten Gebäude

## Resultate

unterschiedlich ist bzw. sein kann. Bei den Sanierungen wirkt sich zudem die Eingriffstiefe auf die Materialzusammensetzung der Rückbaumaterialien aus. Je ausgeprägter die Eingriffstiefe ist, umso grösser wird der Anteil an Beton- und Mischabbruch.

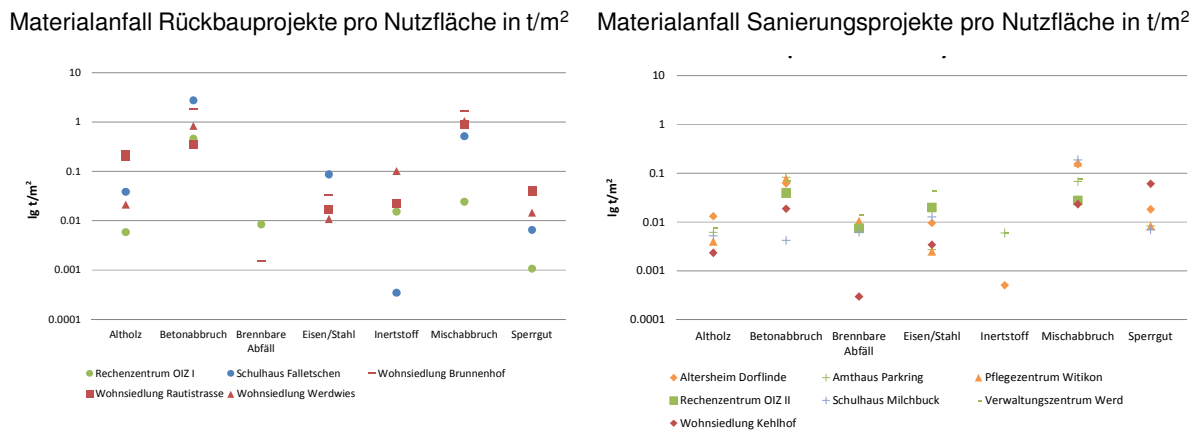


Abbildung 2: Vergleich des Materialanfalls pro Quadratmeter Nutzfläche von Rückbau- (links) und Sanierungsprojekten (rechts). Angaben in Tonnen pro Quadratmeter; logarithmisch Skala.

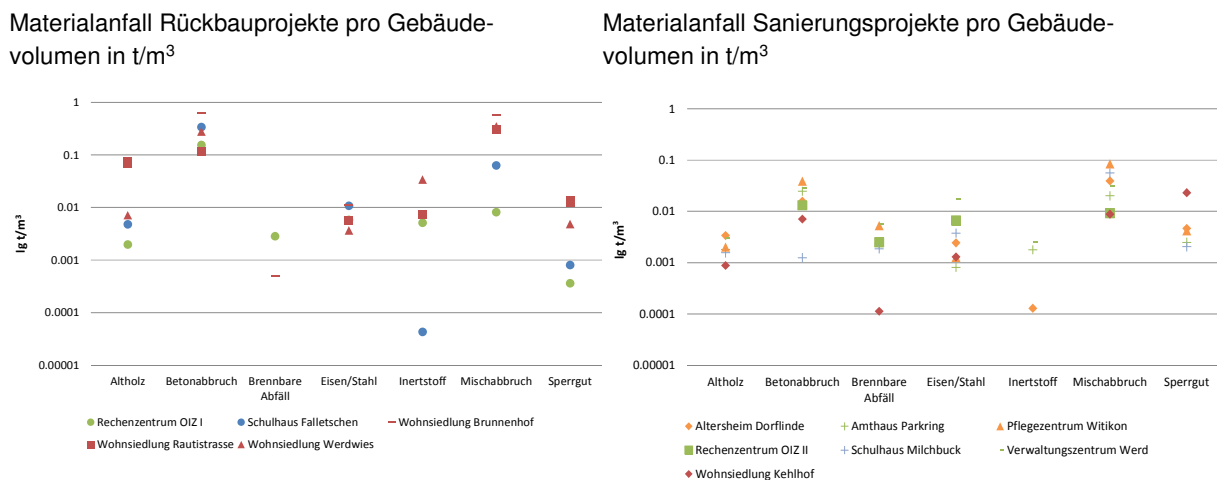


Abbildung 3: Vergleich des Materialanfalls pro Kubikmeter Gebäudevolumen von Rückbau- (links) und Sanierungsprojekten (rechts). Angaben in Tonnen pro Kubikmeter; logarithmisch Skala.

## 4.2 Resultate aus der Ökobilanzierung

In der Studienarbeit der ETH wurden Ökobilanzen für die verschiedenen Bauprojekte erstellt. Die Bilanzierung erfolgte vom Rückbau bis zur Entsorgung und beinhaltet sämtliche Transporte sowie die Entsorgungs- und Aufbereitungsprozesse. Die Ergebnisse aus diesen Ökobilanzierungen basieren auf verschiedenen Annahmen und methodischen Grundlagen, welche im Rahmen der Arbeit nicht weiter verifiziert und validiert wurden. Aus diesem Grund sind die nachfolgenden Ergebnisse mit hohen Unsicherheiten behaftet und deshalb mit entsprechenden Vorbehalten zu interpretieren. Die methodischen Grundlagen zu den Ökobilanzierungen sind im Schlussbericht zur Projektarbeit beschrieben (Boucher 2014).

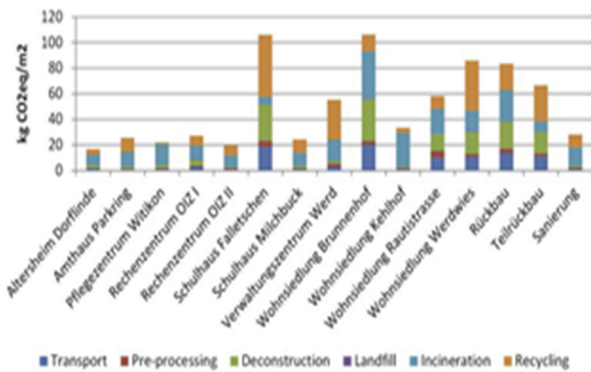
In der Abbildung 4 sind die Treibhausgasemissionen pro Nutzfläche für die verschiedenen Projekte in Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro m<sup>2</sup> Nutzfläche (Grafik rechts) und pro Tonne Rückbaumaterial (Grafik links) aufgeführt. Die Treibhausgasemissionen pro m<sup>2</sup> Nutzfläche liegen bei den Rückbau- bzw. Teilrückbauprojekten (SH Fallletschen, WS Brunnenhof, WS

## Resultate

Rautstrasse, WS Werdwies) deutlich höher als bei den Sanierungsprojekten, weil der Materialanfall bei Rückbauprojekten grösser ist als bei Sanierungen. Somit resultieren durchschnittliche Treibhausgasemissionen von rund 80 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> für den Rückbau, 60 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> Teilrückbau und rund 30 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> für die Sanierung (die drei letzten Säulen). Die Resultate widerspiegeln im Wesentlichen die mit der Materialintensität einhergehende Umweltbelastung bzw. die damit verbundenen Treibhausgasemissionen.

Werden die Treibhausgasemissionen nun anstatt auf die Nutzfläche auf die gesamte Rückbaumaterialmasse bezogen (Abbildung 4, rechts), zeigt sich ein etwas anderes Bild. Nun schneiden die Rückbauprojekte oft besser ab, als die Sanierungsprojekte. Interessant ist hier, dass bei den Sanierungsprojekten vor allem bei der Verbrennung (Incineration) und beim Recycling hohe Treibhausgasemissionen resultieren. Begründen lässt sich dies damit, dass bei der Verbrennung CO<sub>2</sub> emittiert wird und der mit dem Recycling der brennbaren Bauabfälle und des Altholzes verbundene CO<sub>2</sub>-Ausstoss aufgrund der geringen Dichten der zu bearbeitenden Materialien grösser ist als bei mineralischen Fraktionen und den Metallen.

Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> Nutzfläche



Treibhausgasemissionen CO<sub>2</sub>eq/t Rückbaumaterial

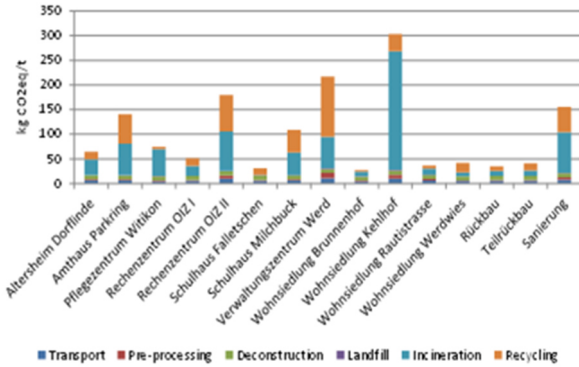
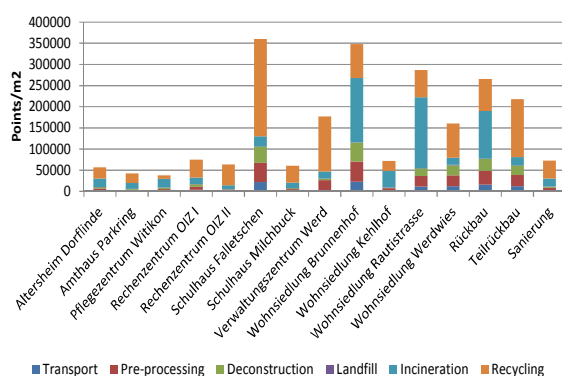


Abbildung 4: Treibhausgasemissionen pro m<sup>2</sup> Nutzfläche (links) und pro Tonnen Rückbaumaterial (rechts) der verschiedenen Sanierungs- und Rückbauprojekte berechnet nach der Methode IPCC GWP 2007.

Umweltbelastung (UBP) pro m<sup>2</sup> Nutzfläche



Umweltbelastung (UBP) pro Tonne Rückbaumaterial

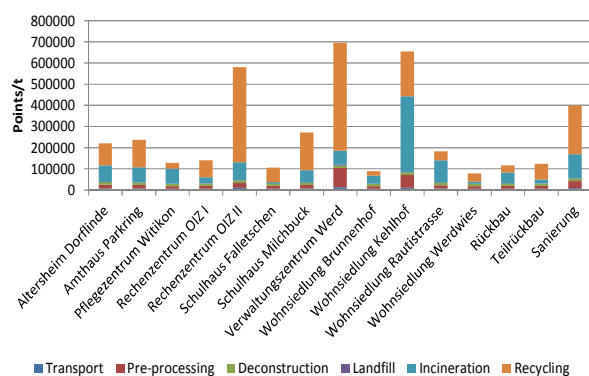


Abbildung 5: Umweltbelastungspunkte pro m<sup>2</sup> Nutzfläche (links) und pro Tonnen Rückbaumaterial (rechts) für die verschiedenen Sanierungs- und Rückbauprojekte.

Erfolgt die Auswertung nach Umweltbelastungspunkten (Abbildung 5) dann ergibt sich beim Bezug auf die Nutzfläche ein ähnliches Bild (Grafik links) wie bei den Treibhausgasemissionen (Abbildung 4, links). Beim Bezug auf die Tonne Rückbaumaterial sind gewisse Unterschiede zwischen der Auswertung nach Treibhausgasen (Abbildung 5, rechts) und nach UBP

(Abbildung 5, rechts) feststellbar. Bei der Auswertung nach UBP sind bei den Projekten Rechenzentrum OIZ II, VZ Werd und WS Kehlhof hohe Werte zu verzeichnen. Bei diesen Projekten ist der Beitrag des Recyclings aufgrund des verhältnismässig hohen Metallanteils am gesamten Rückbaumaterial überdurchschnittlich hoch. Bei der WS Kehlhof fällt zudem der Beitrag der Verbrennung ins Gewicht.

Die Auswertungen zeigen, dass sich die Resultate stark unterscheiden können, je nachdem, welche funktionale Einheit zugrunde gelegt wird. Dies macht eine Interpretation der Resultate schwierig. Die Beiträge aus der Verbrennung und aus dem Recycling sind oft sehr gross. Offensichtlich haben die brennbaren Materialien aufgrund des CO<sub>2</sub>-Ausstosses durch die Verbrennung einen überproportionalen Einfluss auf die Ökobilanz. Aus diesem Grund eignet sich eine Auswertung nach der Wirkungskategorie Treibhausgasemissionen unter den gegebenen methodischen Rahmenbedingungen nur beschränkt. Beim Recycling ist nicht klar, ob die Systemgrenzen richtig gezogen sind. Die Allokationsregeln müssten genauer definiert bzw. in konsistenter Form angewendet werden, damit die Resultate vergleichbar werden. Auch hier müsste demnach die Methode entsprechend angepasst und validiert werden.

Um dennoch aussagekräftige Analysen in Bezug auf die Umweltbelastungen aus dem Umgang mit Rückbaumaterialien durchführen zu können, sollte das System und die Methodik vereinfacht werden. Vorgeschlagen wird eine Beschränkung auf die Prozesse Rückbau, Transport und Aufbereitung. Für diese Prozesse können materialspezifische Daten ermittelt und zusammengefasst werden. Sind weitere Daten zu den Transporten von der Aufbereitung bis zum Verwertungsort vorhanden, und allenfalls sogar spezifische Daten zur stofflichen Verwertung verfügbar, können weitergehende Berechnungen zu den Umweltbelastungen durchgeführt werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird aufgezeigt, welche Daten zur Verfügung stehen und wie der Primärenergieaufwand für ausgewählte Materialkategorien abgeschätzt werden kann.

### **4.3 Auswertung der Transportdistanzen zwischen Baustelle und Entsorgungsorten**

Die zur Verfügung stehenden Daten erlauben eine vertiefte Auswertung der Transporte. Dabei zeigen sich wesentliche Unterschiede zwischen den Projekten und den Materialkategorien (Abbildung 6). So variieren die Transportdistanzen bei beinahe allen Materialkategorien zwischen den Projekten relativ stark. Die Unterschiede könnten einerseits damit erklärt werden, dass einige Baustellen weiter von den verschiedenen Entsorgungsorten entfernt sind, als andere. Bei einer näheren Betrachtung kann diese Hypothese aber nur beschränkt bestätigt werden. So lag beispielsweise das Projekt Pflegezentrum Witikon eher weiter von den Entsorgungsstellen entfernt als die anderen Projekte. Trotzdem liegen die entsprechenden Werte bei den meisten Materialkategorien im Bereich des Mittelwertes (orange Säulen in den Diagrammen). Andererseits liegen die Werte des Projekts Schulhaus Falletschen, welches ebenfalls weiter von den Entsorgungsorten entfernt war, bei den meisten Kategorien über den jeweiligen Mittelwerten. Der Teilrückbau des Schulhauses Falletschen fand im Jahr 2004 statt. Damals wurden zwar ökologische Kriterien in die Ausschreibungsunterlagen integriert aber im Gegensatz zum Projekt PZ Witikon, noch keine Vorgaben bezüglich den Transportdistanzen in den Ausschreibungsunterlagen gemacht. Aus diesem Grund könnten die höheren Werte beim Schulhaus Falletschen auf die fehlenden Vorgaben bezüglich den Transporten zurückzuführen sein.



Abbildung 6: Transportdistanzen von den Baustellen zu den Entsorgungsorten differenziert nach Bauprojekten.



Gestützt wird diese Vermutung durch ein weiteres Projekt: Beim Projekt Schulhaus Milchbuck wurde nur ein Controlling der Bauabfallentsorgung durchgeführt. Das heisst, es wurden keine ökologischen Kriterien in die Ausschreibungsunterlagen integriert. Die Transportdistanzen liegen bei diesem Projekt bei den meisten Materialkategorien deutlich über den jeweiligen Mittelwerten.

**Somit kann gefolgert werden, dass mittels Integration von ökologischen Vorgaben zum Transport bei Rückbauprojekten, die Transportlogistik positiv beeinflusst werden kann. Der Standort der Baustelle spielt meistens eine untergeordnete Rolle.**

Bei den meisten Materialkategorien (Altholz, Ausbausphalt, Beton- und Mischabbruch, Bausperrgut, brennbare Bauabfälle und Eisen/Stahl) liegen die Mittelwerte im Bereich von knapp 15 km bis 24 km. Dies bedeutet, dass die Entsorgungsstellen in der näheren Umgebung der Stadt Zürich liegen. Sehr kurze Distanzen werden für die Entsorgung der brennbaren Bauabfälle und für Eisen/Stahl zurückgelegt. Die brennbaren Bauabfälle werden weitgehend in den Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) in oder nahe der Stadt Zürich verbrannt, was zu kurzen Wegen führt. Der Altmetallhandel ist sehr an den Metallen aus dem Baubereich interessiert. Aus diesem Grund und aufgrund der hohen Wertschöpfung im Metallhandel liegen die Annahmestellen für Altmetalle trotz den höheren Mieten für die Arealflächen näher beim „Kunden“.

Für die Entsorgung der Inertstoffe und des Gipses werden deutlich grössere Distanzen zurückgelegt. Sie liegen durchschnittlich um das 2- bis 3- fache höher als bei den anderen Fraktionen. Die Inertstoffdeponien und/oder die Verwertungsmöglichkeiten für Gips liegen meist deutlich weiter von der Stadt Zürich entfernt als die Aufbereitungsstandorte. Teilweise werden über 100 km Fahrstrecke zurückgelegt, um das Material zu entsorgen. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht ist dies nur vertretbar, wenn Rücktransporte durchgeführt werden können, was dann auch bei den beiden Projekten WS Kehlhof und PZ Witikon der Fall war. Hier ist zu erwähnen, dass die Entsorgung bei diesen Projekten durch das gleiche Entsorgungsunternehmen (AGIR) erfolgte. Die Controllings zeigen, dass die Entsorgungsunternehmen für die Entsorgung der verschiedenen Bauabfallfraktionen oftmals die gleichen Entsorgungskanäle nutzen und somit in die gleichen Deponien fahren.

#### **4.4 Analysen zum Rückbau, Entsorgung und Aufbereitung von Beton- und Mischabbruch**

Die Fraktionen Beton- und Mischabbruch beanspruchen den grössten Anteil der total zurückgebauten Materialien. Aus diesem Grund ist eine detaillierte Analyse der Umweltbelastungen aus dem Rückbau, aus den Transporten zwischen der Baustelle und den Aufbereitungsanlagen und aus der Materialaufbereitung notwendig. Nachfolgend wird auf die von diesen drei Prozessstufen ausgehenden Umweltbelastungen am Beispiel des Primärenergieaufwandes eingegangen.

##### **4.4.1 Primärenergieaufwand (PE) Rückbauprozess**

Für den Prozess „Rückbau“ wurde bereits vor einigen Jahren der Primärenergieaufwand von drei Rückbauprojekten der Stadt Zürich abgeschätzt. Dabei wurde der Dieserverbrauch der eingesetzten Maschinen während den Rückbauvorhaben Wohnsiedlung Werdwies, Wohnsiedlung Brunnenhof sowie des Rückbaus der Turnhalle Schulhaus Falletschen erhoben

## Resultate

oder abgeschätzt und der damit verbundene Primärenergieaufwand bestimmt. In der Tabelle 2 sind diese Daten zusammengefasst. Der Primärenergieaufwand pro Tonne Beton- und Mischabbruch bewegt sich zwischen 33 und 155 MJ/t. Die grossen Unterschiede sind teilweise erklärbar. Einerseits besteht eine gewisse projektspezifische Abhängigkeit, andererseits beeinflussen andere Rahmenbedingungen, wie beispielsweise der eingesetzte Maschinenpark den Primärenergieaufwand des Rückbaus.

Tabelle 2: Primärenergieaufwand in Megajoule pro Tonne Rückbaumaterial (zweitletzte Spalte) bzw. zurückgebauter Beton- und Mischabbruch (letzte Spalte) für die drei Rückbauvorhaben WS Werdwies, WS Brunnenhof und Schulhaus Falletschen (Teilrückbau).

Projekt	Rückbaumenge t	Dieserverbrauch l	Dieserverbrauch l/t	Energieverbrauch MJ/t	PE alle Materialien MJ/t	PE nur B+MA MJ/t
WS Werdwies	28505.5	65590	2.30	82.7	101.8	93.1
WS Brunnenhof	7824	30159	3.85	138.6	170.5	155.4
SH Falletschen	8349	6912	0.83	29.8	36.6	33.4
<b>Mittelwert</b>				<b>83.7</b>	<b>102.9</b>	<b>94.0</b>
<b>Mittelwert Werdwies +Brunnenhof</b>				<b>110.7</b>	<b>136.1</b>	<b>124.3</b>

Nachfolgend einige Bemerkungen zu den Unterschieden beim Primärenergieaufwand:

Beim Projekt Schulhaus Falletschen wurde nur die Turnhalle und ein Nebengebäude zurückgebaut. Es handelt sich somit um ein grossvolumiges und „leichtes“ Gebäude, welches mit relativ wenig Energieaufwand zurückgebaut werden kann. Zudem ist bei diesem Projekt nicht sicher, ob alle am Rückbau eingesetzten Maschinen erfasst wurden, weil die Aushubarbeiten teilweise mit den gleichen Baggern ausgeführt wurden. Aus diesem Grund ist der ermittelte Primärenergieaufwand bei diesem Projekt nicht sehr repräsentativ.

Der Unterschied zwischen den beiden Rückbauprojekten WS Werdwies und WS Brunnenhof ist ebenfalls relativ gross. Hier könnte der eingesetzte Maschinenpark eine wichtige Rolle spielen. In der Tabelle 3 sind die Dieserverbräuche für diese beiden Rückbauprojekte aufgeführt. Beim Vergleich der Daten fällt auf, dass der Rückbauunternehmer des Projekts WS Brunnenhof Maschinen mit einem höheren Dieserverbrauch (und mit hohen Leistungen) eingesetzt hat. Bei der WS Werdwies wurden sparsamere Bagger eingesetzt, obwohl die Gebäude höher waren als jene bei der WS Brunnenhof. Oft verfügen die Unternehmen über einen vorgegebenen Maschinenpark. Dies kann dazu führen, dass zu grosse Maschinen bei einem Rückbau eingesetzt werden, was zu einem höheren Primärenergieaufwand beim Rückbau führt.

## Resultate

Tabelle 3: Dieserverbrauch beim Rückbau der Wohnsiedlung Werdwies (oben) und der Wohnsiedlung Brunnenhof (unten).

WS Werdwies	Leistung in kW	Dieserverbrauch Liter/Std.	Einsatzdauer in Std.	Dieserverbrauch Liter
Bagger 3.5 Tonnen		3.5	240	840
Pneukran 50 Tonnen		8.5	300	2550
2 Bagger 24 Tonnen		14	800	11200
2 Bagger 45 Tonnen		25.5	2000	51000
<b>Total</b>			<b>3340</b>	<b>65590</b>
WS Brunnenhof	Leistung in kW	Dieserverbrauch Liter/Std.	Einsatzdauer in Std.	Dieserverbrauch Liter
Bagger 1.5 Tonnen	15	3	23	69
Bagger 5 Tonnen	37	5	18	90
Bagger 24 Tonnen	100	24	310	7440
Bagger 35 Tonnen	150	30	230	6900
Bagger 55 Tonnen	270	54	290	15660
<b>Total</b>			<b>871</b>	<b>30159</b>

Somit ergibt sich ein gewisses Optimierungspotenzial beim Primärenergieaufwand des Rückbauprozesses, welches sich über die Ausschreibung nerschliessen liesse. Werden in der Ausschreibung Vorgaben betreffend des einzusetzenden Maschinenparks definiert, kann der Primärenergieaufwand reduziert werden.

### 4.4.2 Primärenergieaufwand Transporte

Die Datengrundlagen zur Berechnung des PE der Transporte von den Baustellen bis zu den Beton- und Mischabbruchaufbereitungsanlagen lassen eine detaillierte Auswertung nach den verschiedenen Projekten zu. Der PE wird aus den Transportleistungen und den PE-Faktoren in der KBOB-Liste (KBOB 2014) berechnet. Mittels Auswahlmenu und Vorgabe zur Auslastung kann in der Exceltabelle der PE in Abhängigkeit des Transportsystems und der Auslastung berechnet werden. In der Tabelle 4 sind die Mengen in Tonnen, die Distanzen, die Transportleistungen und die PE differenziert nach Beton- und Mischabbruch aufgeführt. Die Werte in den grün markierten Spalten sind die Summen der PE von Beton- und Mischabbruch. Es wurde die folgenden Parameter aus der KBOB-Liste eingesetzt:

- LKW 20-28 t: 3,24 MJ/tkm
- Auslastung: 80 Prozent

Tabelle 4: Berechnung des PE in MJ pro Tonne Rückbaumaterial für die Transporte von den Baustellen bis zu den Aufbereitungsanlagen von Beton- und Mischabbruch.

	Beton- abbruch in t	Misch- abbruch in t	Distanz zur Beton- aufbereitung in km	Distanz zur Mischabbruch- aufbereitung in km	Transport- leistung Betonabbruch tkm	Transport- leistung Mischabbruch tkm	Primärenergie Transport Betonabbruch MJ	Primärenergie Transport Mischabbruch MJ	PE Total Hinfahrt MJ	Betonabbruch PE Total Hinfahrt MJ/t	Mischabbruch PE Total Hinfahrt MJ/t	BA+MA PE Total Hinfahrt MJ/t
WS Rautstrasse	1061	2712	8.5	8.5	9019	23052	29'220	74'688	103'908	28	28	28
WS Kehlhof	88	110	11	2.8	968	308	3'136	998	4'134	36	9	21
WS Brunnenhof	3733	3402	9	30	33597	102060	108'854	330'674	439'529	29	97	62
WS Werdwies	11592	14493	7	8	81144	115944	262'907	375'659	638'565	23	26	24
VZ Werd	982	1110	8.3	47.9	8151	53169	26'408	172'268	198'676	27	155	95
Amtshaus Parkring	1462	399	28	36	40936	14364	132'633	46'539	179'172	91	117	96
SH Fallletschen	6301	1187	18	24	113418	28488	367'474	92'301	459'775	58	78	61
SH Milchbuck	45	2014	50	50	2250	100700	7'290	326'268	333'558	162	162	162
RZ OIZ I	12032	633	30.3	33.9	364570	21459	1'181'206	69'526	1'250'732	98	110	99
RZ OIZ II	1024	720	21.3	17	21811	12240	70'668	39'658	110'326	69	55	63
PZ Witikon	1462	3157	17.6	17.6	25731	55563	83'369	180'025	263'394	57	57	57
AH Dorflinde	614	1528	9.7	10.3	5956	15738	19'297	50'992	70'289	31	33	33
<b>Mittelwert</b>										<b>59</b>	<b>77</b>	<b>67</b>
<i>Standardabweichung</i>										<b>41</b>	<b>51</b>	<b>41</b>

Die Auswertung nach Projekten zeigt, wie gross die Unterschiede zwischen den einzelnen Projekten sind. Sie bewegen sich für den Beton- und Mischabbruch zusammen zwischen 21 und 162 MJ/t. Der Mittelwert liegt bei 67 MJ/t und die Standardabweichung liegt bei 41 MJ/t. Das Projekt Schulhaus Milchbuck sticht mit 162 MJ/t besonders hervor. Hier wurden grosse Distanzen (durchschnittlich 50 km) zurückgelegt, was zu einem hohen PE führt. Es sei nochmals erwähnt, dass bei diesem Projekt keine Vorgaben in den Ausschreibungsunterlagen gemacht wurden. Demgegenüber werden tiefe Werte bei den WS Rautistrasse, WS Kehlhof, WS Werdwies und Altersheim Dorflinde, wo ökologische Vorgaben/Kriterien definiert wurden, erreicht. Bei den Projekten VZ Werd, Amtshaus Parkring Rechenzentrum OIZ I wurde die Baustellenentsorgung durch Unternehmen aus dem Kanton Aargau (Raum Baden/Brugg) ausgeführt. Diese benutzen, wie bereits erwähnt, die Entsorgungskanäle in ihrem Kanton, was schlussendlich höhere Transportdistanzen zur Folge hatte.

Weiter sind Unterschiede bezüglich der Entsorgung von Beton- und Mischabbruch festzustellen. Der durchschnittliche PE von Mischabbruch liegt rund 30% höher als jener des Betons. Offensichtlich wird der Mischabbruch nicht immer am gleichen Ort aufbereitet wie der Betonabbruch. Zudem wird der Mischabbruch oft über weitere Distanzen transportiert als der Betonabbruch. Die Entsorgungspreise von Beton- und vor allem von Mischabbruch unterliegen starken Schwankungen. Aus diesem Grund werden bei einem günstigen Entsorgungspreis weitere Fahrdistanzen in Kauf genommen.

#### 4.4.3 Primärenergieaufwand Aufbereitung

Es liegen nur wenige Daten für die Abschätzung des PE für die Aufbereitung von Beton- und Mischabbruch vor. Für die Aufbereitung von Beton- und Mischabbruch sind Pneu- lader, Brecher- und Siebanlagen notwendig. Die Daten stammen von der Firma Richi AG aus dem Jahr 2005. Damals wurde die oben aufgeführten Maschinen und Anlagekomponenten mit Diesel betrieben. Die entsprechenden Dieserverbräuche und der daraus abgeleitete PE sind in der Tabelle 5 aufgeführt. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass der PE für Aufbereitung von Beton- und Mischabbruch gleich hoch ist. Allfällige Unterschiede könnte es bei der Brechanlage geben, weil Beton härter als Mischabbruch ist. Allerdings enthält der Mischabbruch meist einen Anteil von über 80% Beton.

Der Primärenergieaufwand für das Brechen und Sieben inklusive der damit verbundenen Materialverschiebung mit dem Pneu- lader beträgt rund 41 MJ/t. Der Beitrag der mobilen Brechanlage liegt gemäss Tabelle 5 bei rund 60%, jener der Siebanlage bei 15%. Die Materialverschiebung mit dem Pneu- lader macht immerhin 25% des gesamten PE aus.

Tabelle 5: Abschätzung des PE für die Beton- und Mischabbruchaufbereitung aus der Aufbereitungsleistung, Dieserverbrauch und PE-Faktoren der KBOB-Liste im Jahr 2005. (Die Angaben stammen von der Richi AG).

	Leistung t/h	Dieserverbrauch Liter/Std.	Dieserverbrauch Liter/t	Dieserverbrauch MJ/t	Primärenergie MJ/t
Brechanlage	100	55	0.55	19.8	24.3
Siebanlage	100	14	0.14	5.0	6.2
Pneu- lader	100	24	0.24	8.6	10.6
<b>Total (Brechen Sieben)</b>			<b>0.93</b>	<b>33.4</b>	<b>41.1</b>

Bei dem angegebenen PE in der Tabelle 5 handelt es sich um eine grobe Abschätzung. Heute werden die Aufbereitungsanlagen vermehrt stationär und damit elektrisch betrieben. Zudem

## Resultate

sind die Anlagen teilweise komplexer aufgebaut als noch vor einigen Jahren, weil die RC-Granulate als Zuschlagstoffe in der Betonproduktion eingesetzt werden (Ergänzung mit Windsichtern, nass Aufbereitung und Siebung usw.). Zudem spielt die eingesetzte Zerkleinerungstechnologie eine Rolle. Hier wurden in den vergangenen Jahren starke Fortschritte erzielt. In der Tabelle 6 sind die Dieserverbräuche und der PE von heute auf dem Markt verfügbaren mobilen Brechanlagen aufgeführt. Die Daten wurden den technischen Datenblättern der Hersteller entnommen. Der Mittelwert liegt bei rund 5 MJ/t, was nur noch rund 20% des in der Tabelle 5 angegebenen Wertes entspricht.

Tabelle 6: Dieserverbrauch von verschiedenen heute auf dem Markt verfügbaren Brechanlagen.

Bezeichnung	Brechertyp	Leistung kW	Durchsatzleistung t/h	Dieserverbrauch Liter/Std.	Dieserverbrauch Liter/t	Primärenergie MJ/t
Brecher RM 70 GO	Prallbrecher	103	120	15	0.125	5.5
Brecher RM 80 GO	Prallbrecher	168	160	18	0.113	5.0
SBM Brechen 300 t/h	Prallbrecher	200	300	33	0.110	4.9
Prallbrecher RCI 140-160/TV	Prallbrecher	600	450	37	0.082	3.6
Backenbrecher KB700	Backenbrecher		70	6	0.086	3.8
<b>Median</b>			<b>160</b>	<b>18</b>	<b>0.110</b>	<b>4.9</b>
<i>Standardabweichung</i>					<b>0.018</b>	<b>0.81</b>

Es kann davon ausgegangen werden, dass auch bei den Siebanlagen und Pneucladern in den vergangenen Jahren eine Reduktion beim Dieserverbrauch erreicht wurde. Wird angenommen, dass bei diesen Maschinen eine Effizienzsteigerungen von 30% erreicht werden konnte, resultiert ein PE für die mobile Aufbereitung von Beton- und Mischabbruch von knapp 17 MJ/t (Tabelle 7), was einer Reduktion von rund 60% gegenüber dem Jahr 2005 entspricht.

Tabelle 7: Abgeschätzter PE für die mobile Beton- und Mischabbruchaufbereitung im Jahr 2014.

	Leistung t/h	Dieserverbrauch Liter/Std.	Dieserverbrauch Liter/t	Dieserverbrauch MJ/t	Primärenergie MJ/t
Brechanlage	100	11	0.11	4.0	5.0
Siebanlage	100	9.8	0.10	3.5	4.3
Pneuclader	100	16.8	0.17	6.0	7.4
<b>Total (Brechen Sieben)</b>			<b>0.38</b>	<b>13.6</b>	<b>16.7</b>

### 4.4.4 Primärenergie für Rückbau, Transport und Aufbereitung

Für die Beurteilung der Optimierungspotenziale beim Rückbau, Transport und Ausbereitung von Beton- und Mischabbruch ist es nun wichtig zu wissen, bei welcher Prozessstufe mit Optimierungsmassnahmen die grösste Wirkung erzielt werden kann.

In der Tabelle 8 sind die PE für die drei Prozessstufen differenziert nach den begleiteten Projekten aufgeführt. Der totale PE für den Rückbau, Transport und die Aufbereitung beträgt durchschnittlich rund 200 MJ/t. Damit liegt der Wert im Bereich des PE für die Gewinnung und Aufbereitung von Rundkies (236 MJ/t).

## Resultate

Tabelle 8: PE differenziert nach Rückbau, Transport und Aufbereitung sowie dem Total in MJ pro Tonne Rückbaumaterial für die verschiedenen Controllingprojekte und Vergleich mit dem PE für die Herstellung und Entsorgung von Rundkies (gem. KBOB-Liste).

Bauprojekt	Rückbau in MJ/t	Transport in MJ/t	Aufbereitung in MJ/t	Total in MJ/t
WS Rautistrasse	124	28	17	169
WS Kehlhof	124	21	17	162
WS Brunnenhof	155	62	17	234
WS Werdwies	93	24	17	134
VZ Werd	124	95	17	236
Amtshaus Parkring	124	96	17	237
SH Falletschen	33	61	17	112
SH Milchbuck	124	162	17	303
RZ OIZ I	124	99	17	240
RZ OIZ II	124	63	17	204
PZ Witikon	124	57	17	198
AH Dorflinde	124	33	17	174
<b>Mittelwert</b>	<b>117</b>	<b>67</b>	<b>17</b>	<b>200</b>
<b>Vergleich Primärenergie Rundkies gem. KBOB-Liste in MJ/t:</b>				<b>236</b>
davon Herstellung				59
davon Entsorgung				177

Beim Vergleich der einzelnen Prozessstufen wird erkennbar, dass der PE aus dem Rückbau über 50% des gesamten PE ausmacht. Somit ist es sinnvoll in einem ersten Schritt in diesem Bereich allfällige Optimierungsmassnahmen zu definieren. Der Transport hat einen Anteil von rund einem Drittel. Zudem ist erkennbar, dass die PE-Werte stark variieren können. Wie bereits erwähnt, führen die Vorgaben betreffend den Transporten zu tieferen PE-Werten (siehe WS Rautistrasse, WS Kehlhof, WS Werdwies usw.). Beim Aufbereitungsprozess leisten allfällige Optimierungsmassnahmen aufgrund des geringen Anteils am totalen PE nur einen kleinen Beitrag zur Reduzierung des totalen PE. Gerade bei dieser Prozessstufe wäre es schwierig, Vorgaben in den Ausschreibungsunterlagen zu definieren. Noch schwieriger wäre eine Überprüfung der Umsetzung der Vorgaben.

### 4.5 Analysen zur Entsorgung von Altholz

Die Entsorgung des Altholzes wirft immer wieder Fragen auf, weil ein relativ grosser Teil des in der Schweiz anfallenden Altholzes exportiert und im Ausland entweder der stofflichen Verwertung oder Altholzverbrennungsanlagen zugeführt wird. Die Transporte ins Ausland erfolgen per Bahn und LKW. Um Entscheidungsgrundlagen für die Entsorgung des Altholzes zu haben, muss die entsprechende Datenbasis vorhanden sein. Nachfolgend werden die Resultate aus der Abschätzung des PE der drei Prozessstufen Rückbau, Transport bis zur regionalen Aufbereitungsanlage und Aufbereitung analog dem vorangegangenen Kapitel 4.4 beschrieben. Anschliessend wird eine Methodik vorgestellt, mit der die mit den Exporten verbundenen PE in Abhängigkeit der Transport- und Verwertungsoptionen (Szenarien) abgeschätzt werden kann.

#### 4.5.1 Primärenergieaufwand (PE) Rückbauprozess

Die Abschätzung des PE für den Rückbau der Holzfraktionen basiert auf den Daten zum PE zum gesamten Rückbauprozess. Dabei wird der PE für den Rückbau der Holzfraktionen aus

## Resultate

---

dem Massenanteil der total anfallenden Rückbaumaterialien (siehe Tabelle 2, zweitletzte Spalte) berechnet.

In der Tabelle 9 sind die PE für der drei Rückbauvorhaben WS Werdwies, WS Brunnenhof und Schulhaus Falletschen (grün markiert) aufgeführt. Der PE für die restlichen Projekte wurde aus dem Mittelwert der Projekte WS Brunnenhof und WS Werdwies berechnet. Es handelt sich um sehr grobe Abschätzungen, da es keine spezifischen Daten zum PE aus dem Rückbau einzelner Fraktionen gibt.

Tabelle 9: Primärenergieaufwand (PE) in Megajoule pro Tonne Altholz für die Rückbauvorhaben WS Werdwies, WS Brunnenhof und Schulhaus Falletschen (jeweils grün markiert), sowie für die weiteren Projekte (Mittelwert der PE der Projekten WS Brunnenhof und WS Werdwies).

Bauprojekt	Rückbau in MJ/t
WS Rautistrasse	19.2
WS Kehlhof	2.9
WS Brunnenhof	6.1
WS Werdwies	1.4
VZ Werd	3.9
Amtshaus Parkring	4.6
SH Falletschen	1.5
SH Milchbuck	3.2
RZ OIZ I	1.5
RZ OIZ II	0.0
PZ Witikon	1.8
AH Dorflinde	7.0
<b>Mittelwert</b>	<b>4.4</b>

Wie bereits beim Beton- und Mischabbruch beschrieben, liesse sich eine Reduktion des PE beim Rückbau mittels Vorgaben in den Ausschreibungen betreffend des einzusetzenden Maschinenparks erreichen.

### 4.5.2 Primärenergieaufwand Transporte

Die Abschätzung des PE für den Transport des Altholzes von der Baustelle zum Aufbereitungsort basiert auf der im Kapitel 4.4.2 beschriebenen Methodik.

Die Auswertung nach Projekten zeigt wiederum grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Projekten (Tabelle 10). Der PE für die Transporte bewegt sich zwischen 9 MJ/t (WS Kehlhof) und 162 MJ/t. Der Mittelwert liegt bei 63 MJ/t und die Standardabweichung liegt bei 48 MJ/t. Das Projekt Schulhaus Milchbuck sticht wiederum mit 162 MJ/t besonders hervor. Das Altholz wurde zum gleichen Standort, welcher 50 km von der Baustelle entfernt lag, wie der Beton- und Mischabbruch geführt. Aus diesem Grund resultiert der gleich PE wie beim Beton- und Mischabbruch.

## Resultate

Tabelle 10: Berechnung des PE in MJ pro Tonne Altholz für die Transporte von den Baustellen bis zu den Altholzaufbereitungsanlagen. Annahmen: Auslastung LKW 80%; Transportmittel: LKW 20 bis 28t

	Altholz in t	Distanz zur Altholz- Aufbereitung in km	Transport Altholz tkm	PE Total Hinfahrt MJ	Transport Altholz PE Total MJ/t
WS Rautistrasse	666	8.5	5661	18'342	<b>28</b>
WS Kehlhof	11	2.8	31	100	<b>9</b>
WS Brunnenhof	348	13	4524	14'658	<b>42</b>
WS Werdwies	294	7	2058	6'668	<b>23</b>
VZ Werd	106	18.3	1940	6'285	<b>59</b>
Amtshaus Parkring	36	14	504	1'633	<b>45</b>
SH Falletschen	89	43	3827	12'399	<b>139</b>
SH Milchbuck	56	50	2800	9'072	<b>162</b>
RZ OIZ I	153	10.4	1591	5'155	<b>34</b>
RZ OIZ II	1	34	34	110	<b>110</b>
PZ Witikon	75	18.1	1358	4'398	<b>59</b>
AH Dorflinde	131	14	1834	5'942	<b>45</b>
<b>Mittelwert</b>					<b>63</b>
<i>Standardabweichung</i>					<i>48</i>

### 4.5.3 Primärenergieaufwand Aufbereitung

Für die Abschätzung des PE der Altholzaufbereitung konnten die Daten der Holz- und Stockrecycling AG in Otelfingen genutzt werden. Die Anlage bereitet ausschliesslich Altholz im Umfang von rund 28'000 Tonnen pro Jahr auf. Der Betreiber erfasst dabei den jährlichen Diesel- und Stromverbrauch für die Shredderanlagen und die Pneuclader bzw. Bagger. In der Tabelle 11 ist der aus diesen Daten abgeschätzte PE aufgeführt.

Tabelle 11: Abschätzung des PE für die Altholzaufbereitung in MJ pro Tonnen Altholz basierend auf den Angaben der Holz- und Stockrecycling AG in Otelfingen.

Shreddern Altholz							Primärenergie	
Maschinentyp	Leistung kW	Betriebsstunden h/a	Stromverbrauch kWh/a	Dieserverbrauch Liter/a	Altholzmenge t/a	Total MJ/t	MJ/t	
Shredder Doppstadt AK 430	310	1100		41201	28274	52.4	64.4	
Shredder Komptech Crambo	200	1150	224760		28274	28.6	89.9	
<b>Total (Shredder)</b>				<b>41201</b>			<b>154.3</b>	
Bezugsjahr 2012								Primärenergie MJ/t
								154.3
								42.2
								196.5
Pneuclader							Primärenergie	
Maschinentyp	Leistung kW	Betriebsstunden h/a	Stromverbrauch kWh/a	Dieserverbrauch Liter/a	Altholzmenge t/a	Total MJ/t	MJ/t	
Pneuclader I (OK)	239	1300		13985	28274	17.8	21.9	
Bagger (Liebherr LH 24)	105	1100		13021	28274	16.6	20.4	
<b>Total (Brechen Sieben)</b>				<b>27006</b>	<b>28274</b>	<b>34.3</b>	<b>42.2</b>	

### 4.5.4 Primärenergie für Rückbau, Transport und Aufbereitung

In der Tabelle 12 ist der PE der Altholzentsorgung differenziert nach den drei Prozessstufen und nach den begleiteten Projekten aufgeführt. Der totale PE für den Rückbau, Transport und die Aufbereitung beträgt durchschnittlich rund 264 MJ/t. Damit liegt der Werte etwas höher als beim Beton- und Mischabbruch (Tabelle 8). Der höhere Wert im Vergleich zum PE beim Beton- und Mischabbruch dürfte auf die geringe Materialdichte des Altholzes zurückzuführen sein. So werden beispielsweise ähnliche Pneuclader/Bagger wie bei der Aufbereitung der mineralischen Baumaterialien eingesetzt. Der Dieserverbrauch dürfte aber in etwa gleich hoch sein, was dazu führt, dass der Dieserverbrauch pro Tonnen Material deutlich höher liegt als bei den mineralischen Baumaterialien. Gleiches gilt auch für die Shredder. Diese müssen in der Lage



## Resultate

---

sein, Bahnschwellen, Balken usw. zu zerkleinern, was entsprechend Leistungen erfordert. Die Maschinenleistungen der Shredder (Tabelle 11) liegen dann auch im Bereich der Leistungen der Brechanlagen (Tabelle 6).

Tabelle 12: PE differenziert nach Rückbau, Transport und Aufbereitung sowie dem Total in MJ pro Tonne Altholz für die verschiedenen Controllingprojekte.

Bauprojekt	Rückbau in MJ/t	Transport in MJ/t	Aufbereitung in MJ/t	Total in MJ/t
WS Rautistrasse	19.2	28	197	243
WS Kehlhof	2.9	9	197	209
WS Brunnenhof	6.1	42	197	245
WS Werdwies	1.4	23	197	221
VZ Werd	3.9	59	197	260
Amtshaus Parkring	4.6	45	197	246
SH Falletschen	1.5	139	197	337
SH Milchbuck	3.2	162	197	362
RZ OIZ I	1.5	34	197	232
RZ OIZ II	0.0	110	197	307
PZ Witikon	1.8	59	197	257
AH Dorflinde	7.0	45	197	249
<b>Mittelwert</b>	<b>4.4</b>	<b>63</b>	<b>197</b>	<b>264</b>

Im Vergleich zur Beton- und Mischabbruchaufbereitung unterscheidet sich die Verteilung des PE auf die drei Prozessstufen bei der Altholzaufbereitung deutlich. Hier ist vor allem der Aufbereitungsprozess energieintensiv. Falls Optimierungsmassnahmen definiert werden sollen, müsste bei diesem Prozess angesetzt werden. Allerdings gilt auch hier: Die Überprüfung der Umsetzung von in der Ausschreibung definierten ökologischen Vorgaben ist kaum bzw. nur mit erheblichem Aufwand möglich.

### 4.5.5 Szenarien zum PE der Altholzentsorgung/-aufbereitung im In- und Ausland

Wie erwähnt, beschränkt sich die Altholzentsorgung nicht nur auf die Schweiz. Vielmehr werden rund 50% des anfallenden Altholzes ins Ausland exportiert und dort stofflich oder thermisch verwertet. Aus diesem Grund ist eine weitergehende Auswertung unter Einbezug der grösseren Transportdistanzen sowie der Verwertungsoptionen sinnvoll.

#### 4.5.5.1 Szenarien thermische Verwertung

Für die thermische Verwertung des Altholzes wurden drei verschiedene Szenarien gerechnet:

1. Verwertung des Altholzes in einer lokalen Altholzverbrennungsanlage
2. Verwertung des Altholzes in einer ausländischen Altholzverbrennungsanlage mit Bahnanschluss.
3. Verwertung des Altholzes in einer ausländischen Altholzverbrennungsanlage, die mit LKWs angefahren wird.

Es wurden die folgenden Annahmen bzw. Rahmenbedingungen festgelegt:

- Die Transportdistanz zwischen Aufbereitungsanlage und den Altholzverbrennungsanlagen im Ausland beträgt 600 km.
- Die LKW-Transporte ins Ausland erfolgen mittels LKW >28 Tonnen.
- Die Bahn-Transporte ins Ausland erfolgen mit Schweizer Güterzügen.

## Resultate

- Bei den Bahntransporten erfolgt ein zusätzlicher Ablad inkl. Verschiebung des Materials (Pneulader +Bagger).
- Es wird mit den PE-Faktoren der KBOB-Liste gerechnet.

Die aufgeführten Rahmenbedingungen können im Excelsheet verändert und damit weitere Szenarien gerechnet werden.

In der Tabelle 13 sind die Resultate dieser Szenarienrechnungen dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass der PE durch die grosse Transportdistanz stark zunimmt. Werden die Altholzschnitzel mit dem LKW transportiert verdoppelt sich der PE im Vergleich zum Bahntransport. Somit ist eine thermische Verwertung des Altholzes im Ausland nicht zu empfehlen.

Tabelle 13: Vergleich des PE für die Entsorgung des Altholzes in einer lokalen Altholzverbrennungsanlage, in einer ausländischen Altholzverbrennungsanlage mit Bahnanschluss und in einer ausländischen Altholzverbrennungsanlage die mit LKWs angefahren wird. Annahmen: Distanz 600 km; LKW über 28t; Güterzug; PE-Faktoren aus KBOB-Liste.

Szenario in lokale Altholzverbrennungsanlage							Total PE MJ/t
Istzustand	Rückbau	Transport	Aufbereitung				
	MJ/t	MJ/t	MJ/t				
alle Baustellen	4.4	62.9	196.5				264
Szenario in ausländische Altholzverbrennungsanlage mit Bahn							Total PE MJ/t
Istzustand	Rückbau	Transport	Aufbereitung	Auflad Bahn	Transport Bahn	Ablad Bahn	
alle Baustellen	4.4	62.9	196.5	21.9	488.4	42.2	816
Szenario in ausländische Altholzverbrennungsanlage mit LKW							Total PE MJ/t
Istzustand	Rückbau	Transport	Aufbereitung	Auflad LKW	Transport LKW		
alle Baustellen	4.4	62.9	196.5	21.9	1410		1696

### 4.5.5.2 Szenarien stoffliche Verwertung

Bei der stofflichen Verwertung muss eine weitergehende Bilanzierung erfolgen. Hier wird Primärmaterial (luftgetrocknetes Rundholz) ersetzt. Da das Altholz einen tieferen Feuchtigkeitsgehalt als das luftgetrocknete Rundholz aufweist, muss weniger oder keine Energie für die Trocknung des Altholzes eingesetzt werden. Die Bilanzierung der gesamten Entsorgung bis zur stofflichen Verwertung des Altholzes vom Rückbau bis zur Verwertung werden die folgenden Bilanzierungsgrenzen gezogen und Vereinfachungen vorgenommen:

- Bei der Verwertung wird bis zu jener Prozessstufe bilanziert, bei der die aufbereiteten Altholzspäne und die Späne aus dem Rundholz gleichwertig sind. Das heisst, die Späne sind in Bezug auf deren Funktionalität für die Spanplattenproduktion und bezüglich des Feuchtigkeitsgehalts gleichwertig.
- Zur Vereinfachung wird angenommen, dass der PE für das Shreddern und Zerspanen des Rundholzes bis zu geforderten Spangrösse gleich gross ist. Vermutlich ist der PE für diesen Prozess beim Altholz etwas tiefer, weil sich beispielsweise alte Spanplatten leichte Shreddern und Zerspanen lassen als Rundholz. Der Unterschied dürfte aber vernachlässigbar sein.
- Nicht berücksichtigt werden die Umweltbelastungen aus der Altholzverbrennung, weil das stofflich verwertete Altholz zu einem späteren Zeitpunkt ebenfalls einer thermischen Verwertung zugeführt wird. Allerdings wird die Lebensdauer des Holzes

## Resultate

bei einer stofflichen Verwertung verlängert. Da es sich aber um eine nachwachsende Ressource handelt, dürfte dieser Beitrag eher vernachlässigbar sein.

- Auch der Beitrag der mit der Ernte des Rundholzes verbundenen PE wird vernachlässigt.

Somit kann der Energieaufwand für die Trocknung des Rundholzes aus den physikalischen Grundlagen berechnet, und der PE mittels den entsprechenden PE-Faktoren abgeschätzt werden (Tabelle 14). Für die Berechnung des PE für die Trocknung der Rundholzspäne wurde angenommen, dass der durchschnittliche Feuchtegehalt von Rundholz 63% und jener des Altholzes 15% beträgt. Somit müssen 480 kg Wasser pro Tonne Rundholz entfernt werden. Weiter wird angenommen, dass die Trocknung zu 20% mittels Wärme aus Gaskesseln und zu 80% aus der Holzfeuerung erfolgt und der thermische Wirkungsgrad bei 42% liegt. Diese Parameter können bei Bedarf verändert werden. Die PE-Faktoren für den Heizkessel mit Gas bzw. für den Heizkessel mit Holzschnitzeln wurden der KBOB-Liste entnommen.

Somit ergibt sich ein PE von 3'821 Megajoule pro Tonne Rundholz. Dies bedeutet, dass pro Tonne Altholz 3,812 MJ/t PE eingespart werden kann. Diese Gutschrift kann nun für die Bilanzierung berücksichtigt werden. In der Tabelle 15 sind die PE für die gleichen Grundscenarien wie in der Tabelle 13 enthalten. Zusätzlich sind aber die Gutschriften aus der Spanplattenproduktion mit berücksichtigt, wobei bei den ersten beiden Szenarien mit einer Substitution des Rundholzes mit Altholz von 100% ausgegangen wird. Bei den unteren beiden Szenarien beträgt der Altholzanteil in der Spanplattenproduktion 10%.

Tabelle 14: Berechnung des PE für die Trocknung des Rundholzes bis zum durchschnittlichen Feuchtegehalt von Altholz.

		Wasser zu	Verdampfungs	Wirkungsgrad	Anteil	Anteil	Energie-	Primär-
Feuchte	Feuchte	Verdampfen	enthalpie	Trocknung	Gas	Holz	bedarf	energie
Schnittholz in %	Altholz in %	t/t	MJ/t		%	%	MJ/t	MJ/t
63	15	0.48	2'256	0.42	20	80	2'578	3'821
				PE in MJ/MJ	1.17	1.56		

Die Resultate zeigen den grossen Einfluss der stofflichen Verwertung auf die Bilanzierung des PE (Tabelle 15, oben). Bei einer 100%igen Substitution des Rundholzes sind die Gutschriften so gross, dass sich eine stoffliche Verwertung im Ausland gegenüber einer thermischen Verwertung im Inland auch bei Transporten mit dem LKW über grosse Distanzen lohnen würde.

Der Altholzanteil in Spanplattenwerken beträgt jedoch meist nur rund 10%, weil die Altholzspäne feiner sind als die Rundholzspäne. Geht man nun von diesem Anteil aus, dann sieht das Resultat etwas anders aus (Tabelle 15, unten). Nun liegt der PE beim Szenario mit den Bahntransporten bei 434 MJ/t und mit den LKW-Transporte bei 1'314 MJ/t. Damit schneidet die lokale thermische Verwertung besser ab (Tabelle 13). Würde Altholzanteil in der Spanplattenproduktion bei rund 15% liegen und die Altholzschnitzel per Bahn transportiert, dann würde der PE für die stoffliche Verwertung im Ausland in etwa der lokalen thermischen Verwertung entsprechen.

## Resultate

Tabelle 15: Vergleich des PE mit einer stofflichen Verwertung des Altholzes in einem ausländischen Spanplattenwerk. Annahmen: Distanz 600 km; LKW über 28t; Güterzug; PE-Faktoren aus KBOB-Liste.

Szenario in ausländische stoffliche Verwertung mit Bahn und Einsparung für Trocknung								Total PE
Istzustand	Rückbau	Transport	Aufbereitung	Auflad Bahn	Transport Bahn	Ablad Bahn	Gutschrift wenn 100% Altholz in Spanplattenprod.	MJ/t
alle Baustellen	4.4	62.9	196.5	21.9	488.4	42.2	-3821	-3004.6
Szenario in ausländische stoffliche Verwertung mit LKWn und Einsparung für Trocknung								Total PE
Istzustand	Rückbau	Transport	Aufbereitung	Auflad LKW	Transport LKW		Gutschrift wenn 100% Altholz in Spanplattenprod.	MJ/t
alle Baustellen	4.4	62.9	196.5	21.9	1410.0		-3821	-2125.2
<b>Anteil Altholz in Spanplattenproduktion: 10%</b>								Total PE
Szenario in ausländische stoffliche Verwertung mit Bahn und Einsparung für Trocknung bei 10% Altholzanteil in Spanplatten								MJ/t
Istzustand	Rückbau	Transport	Aufbereitung	Auflad Bahn	Transport Bahn	Ablad Bahn	Gutschrift wenn 10% Altholz in	
alle Baustellen	4.4	62.9	196.5	21.9	488.4	42.2	-382	434.3
<b>Anteil Altholz in Spanplattenproduktion: 10%</b>								Total PE
Szenario in ausländische stoffliche Verwertung mit Bahn und Einsparung für Trocknung bei 10% Altholzanteil in Spanplatten								MJ/t
Istzustand	Rückbau	Transport	Aufbereitung	Auflad LKW	Transport LKW		Gutschrift wenn 10% Altholz in Spanplattenprod.	
alle Baustellen	4.4	62.9	196.5	21.9	1410.0		-382	1313.7

Die Szenarien zur Bilanzierung des PE für die Entsorgung des Altholzes zeigen sehr gut auf, wie schwierig eine Beurteilung hinsichtlich einer Entscheidung, ob das Altholz einer lokalen thermischen Verwertung oder einer stofflichen Verwertung im Ausland zugeführt werden soll, ist.

Dennoch ergibt sich die folgende Erkenntnis aus der groben Abschätzung des Primärenergieaufwandes in der stofflichen Verwertung:

**Für den Entscheid, ob das Altholz einer stoffliche Verwertung im Ausland zugeführt werden soll, ist der Altholzanteil in der Spanplattenproduktion der relevante Parameter. Ab einem Anteil von über 20% dürfte die stoffliche Verwertung beim Trockenverfahren (siehe nachfolgendes Kapitel) besser abschneiden, als die Verbrennung in einer lokalen Altholzverbrennungsanlage.**

### 4.5.5.3 Aufbereitungsverfahren für Altholzrecycling in der Spanplattenproduktion

Die Industrie ist bestrebt, den Altholzanteil in der Spanplattenproduktion künftig zu erhöhen. Dazu wurden bereits verschiedene Versuche und Studien zu neuen Aufbereitungsverfahren durchgeführt. Nachfolgend werden die verschiedenen Aufbereitungsverfahren für ein Altholzrecycling in der Spanplattenproduktion kurz beschrieben, um einen ersten Überblick zu vermitteln und das Potenzial des Altholzrecyclings darzustellen. Teile der Beschreibungen wurden in der Dissertation von R. Frank entnommen (Frank, 1999)

#### Trockenverfahren

Beim Trockenverfahren wird das Altholz zunächst in langsam rotierenden Vorbrechern in größere Stücke vorgebrochen und anschließend mit feinschneidenden Hackern zu Spänen nachzerkleinert. Späne aus Altholz weisen veränderte chemisch-physikalische Eigenschaften (z.B. höhere Sprödigkeit aufgrund der niedrigeren Feuchte) gegenüber konventionellen Rohstoffen auf (Haider 2011). Dadurch fallen bei der Zerspannung Späne mit ungünstigerer Form an. Je nach Verunreinigungsgrad folgen noch einige Stufen der Störstoffreinigung

(Buermann et al. 1998). Eine anschließende Trocknung ist normalerweise nicht erforderlich. Sie wird jedoch vorgenommen, da die Recyclingspäne dem frischen Spangut vor der Trocknerstufe zugegeben werden. Die Späne können zu gewissen Anteilen in der Mittelschicht neuer Spanplatten verwendet werden. In Deutschland und Österreich liegt dieser Anteil bei rund 10% (Windesperger 2010), in manchen Ländern werden auch wesentlich höhere Mengen Sekundärspäne aus Altholz für die Herstellung von Spanplatten verwendet. Allerdings kann ein hoher Altholzanteil in der Spanplattenherstellung zu nicht unwesentlichen Belastungen mit Schadstoffen führen, was vor allem beim Import von Spanplattenabfällen aus Ländern ein Problem darstellen kann, in denen nicht ausreichend auf die Qualität des eingesetzten Sekundärmaterials geachtet wird (Speckels 2001). Das Verfahren ist für Spanplatten geeigneter als für Faserplatten.

### Retro-Verfahren

Bei diesen Verfahren werden alte Holzwerkstoffe, die formaldehydhaltige, hydrolisierbare Bindemittel enthalten, mechanisch zu „Retrospänen“ zerkleinert (Forschungszentrum Karlsruhe 2001). Diese „Retrospäne“ werden anschliessend in Deck- und Mittelschichtspäne fraktioniert, mit kondensierten Tanninen beleimten und anteilig (10-15%) mit UF-Harzen beleimten frischen Spänen gemischt und verpresst. Durch die während des Pressvorganges herrschenden hohen Temperaturen und Feuchte wird das den „Retrospänen“ anhaftende alte UF-Harz durch Hydrolyse gespalten, wobei Formaldehyd freigesetzt wird. Dieses vernetzt sich in-situ mit den kondensierten Tanninen. Somit kann neben den Retrospänen auch das aus den alten Spanplatten stammende Bindemittel wieder aktiviert und genutzt werden. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die „Retrospäne“ nicht getrocknet werden müssen, womit Energie gespart und die Emissionen beim Trocknen reduziert werden können. In Labor- und Betriebsversuchen konnte gezeigt werden, dass bei einem Zusatz von bis zu 15% mit Tannin beleimten „Retrospänen“ keine negativen Auswirkungen auf die mechanisch-technischen Eigenschaften der Spanplatten festgestellt werden konnten.

### Thermohydrolytischer Aufschluss

Die Grundlage für dieses Verfahren bildet die Tatsache, dass bei der Spanplattenherstellung zu rund 90% Harnstoff-Formaldehyd-Harze (UF-Harz) als Bindemittel eingesetzt werden. Bei der Thermohydrolytischen Spaltung werden die aus der mechanischen Zerkleinerung von alten Spanplatten produzierten Bruchstücke einer gesättigten Wasserdampf-atmosphäre unter hohem Druck und hohen Temperaturen ausgesetzt. Unter diesen Bedingungen erfolgt die Hydrolyse des UF-Harzes, bei der das Bindemittel in seine Komponenten Harnstoff und Formaldehyd gespalten wird und so die einzelnen Späne freigelegt werden. Sämtliche Komponenten (Bindemittel und Späne) können für die Spanplattenproduktion verwendet werden. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die Geometrie der Späne durch den Aufschluss nur geringfügig verändert wird. Nachteilig wirkt sich die Tatsache aus, dass nicht das gesamte Bindemittel von den Spänen entfernt werden kann, womit bei der notwendigen Trocknung der Recyclingspäne die Formaldehydemissionen aus dem Trockner erhöht werden. Zudem braucht die Trocknung an sich mehr Energie im Vergleich zum Trockenverfahren.

Der Thermohydrolytische Aufschluss eignet sich nicht für Spanplatten, welche melamin-modifizierte UF-Harze enthalten, weil sich diese Bindemittel nicht vollständig hydrolisieren lassen. Neben den hier aufgeführten Verfahren gibt es noch weitere ähnliche Verfahren, wie beispielsweise das Sandberg-Verfahren, das Pfeleiderer-Batch-Verfahren oder das WKI-

Verfahren, welche auf dem gleiche Grundprinzip basieren und teilweise im begrenzten Umfang auch eingesetzt werden. All diese Verfahren funktionieren aber nur einwandfrei bei alten Spanplatten mit UF-Harzen, was dazu führt, dass oftmals nur die Produktionsausschüsse mit diesen Verfahren behandelt und der Produktion wieder zugeführt werden.

### Chemo-thermische Aufschluss (aus Frank, 1999)

Beim chemo-thermische Aufschluss handelt es sich um ein Verfahren, das sich an die chemischen Holzaufschlussverfahren anlehnt und Roffael und Dix (1995) als Patent erteilt wurde. Vorgebrochene Holzwerkstoffreste werden nach dem von Roffael und Dix entwickelten Verfahren zusammen mit einer Kochlauge in einen Hochdruckbehälter (Autoklaven) gegeben und für 2 - 6 h bei 180 - 200°C aufgeschlossen. Je nach Aufschlussdauer, Aufschluss-temperatur, Befüllungsgrad und Autoklavengrösse stellt sich ein Druck bis zu 25 bar ein. Die Aufschlussbedingungen können beispielsweise bei Spanplatten so variiert werden, dass man anschliessend ein Material erhält, das von Spänen bis hin zu einem zellstoffähnlichen Faserstoff reicht. Entsprechend erhält man bei MDF-Platten Holzfasern oder Zellstoff. Die spätere Anwendungspalette sieht ähnlich breit aus. Sie reicht von Spanplatten über MDF bis hin zu Papieren geringerer Qualität. Es können Platten aus 100 % Altmaterial hergestellt werden, jedoch ist es empfehlenswert, das Recyclingmaterial frischem Span- und Fasergut zuzusetzen. Nach dem Verfahren lassen sich UF-, MUF, PMDI- und PF-gebundene Holzwerkstoffe chemisch aufschliessen. Die Entlignifizierung kann durch eine vorgeschaltete biologische Behandlung der Platten mit Fäulepilzen beschleunigt werden (Roffael et al. 1997).

#### 4.5.5.4 Abschliessende Bemerkungen zu den Aufbereitungsverfahren

Die hier aufgeführten Verfahren zeigen die Vielfalt aber auch die Komplexität der Verfahren. Eine nachvollziehbare, transparente und fundierte Bewertung der Umweltauswirkungen der einzelnen Verfahren ist schwierig und sehr zeitaufwändig. Zudem werden die Verfahren zum heutigen Zeitpunkt nicht im Grossmassstab betrieben.

Allen nassen Verfahren gemeinsam ist, dass für die Aufbereitung der Späne oft mit hohen Temperaturen, Dampf und Drücken gearbeitet werden muss, was zu hohen PE bzw. Umweltbelastungen (erhöhte Formaldehydemissionen) führen dürfte. Die Verfahren beziehen sich meistens nur auf die Aufbereitung von alten Spanplatten und nicht auf die restlichen Altholzfraktionen. Diese könnten sich aber möglicherweise störend auf die Aufbereitungsprozesse auswirken. Zudem werden die alten Spanplatten heute nicht separat gesammelt.

Aus diesen Gründen ist bei einer ökologischen Bewertung der stofflichen Verwertung von Altholz die trockene Aufbereitung als Standardverfahren vorauszusetzen.

## 5 Diskussion

Die Auswertung der Daten aus den diversen Controllingprojekten des AHB liefern erste wichtige Erkenntnisse zu den Umweltbelastungen aus dem Rückbau, den Transporten, der Aufbereitung und Verwertung verschiedener Rückbaumaterialien. Bei den Materialkategorien Beton- und Mischabbruch sowie Altholz konnten mittels Analysen zum PE jene Prozessstufen identifiziert werden, bei denen noch zu definierende Massnahmen zur Reduktion der Umweltbelastungen die grösste Wirkung zeigen.

Nachfolgend sind zunächst die wichtigsten Aspekte und Erkenntnisse der einzelnen Arbeitsetappen in abgekürzter Form zusammengefasst.

### 5.1 Erkenntnisse aus den Auswertungen der ETH-Projektarbeit

- Die Zusammensetzung der anfallenden Rückbaumaterialien aus dem Rückbau und Sanierung unterscheidet sich relativ stark. Bei Sanierungsprojekten beträgt der durchschnittliche Anteil an Beton- und Mischabbruch am gesamten Rückbaumaterial beispielsweise 70 M%. Bei den Rückbauprojekten sind es 88 M%, da hier die tragende Betonkonstruktion zurückgebaut wird.
- Der Misch- und Betonabbruchanfall pro m<sup>2</sup> Nutzfläche liegt bei den Rückbauprojekten rund eine Grössenordnung höher als bei den Sanierungen. Bei den anderen Materialfraktionen sind die Unterschiede weniger markant, weil diese sowohl bei der Sanierung als auch beim Rückbau meist vollständig ausgebaut werden.
- Die Resultate aus der Ökobilanzierung zeigen, dass sich die Resultate stark unterscheiden können, je nachdem, welche funktionale Einheit zugrunde gelegt bzw. welche Wirkungskategorie eingesetzt wird.
- Der Bezug auf die Nutzfläche ist nicht sinnvoll, weil die Resultate grösstenteils die Materialintensität widerspiegeln. Sinnvoller ist der Bezug auf die Tonne Rückbaumaterial.
- Die Beiträge aus der Verbrennung und aus dem Recycling sind bei der Ökobilanzierung oft sehr gross. Hier stösst die verwendete Methodik bzw. Wirkungskategorie an Grenzen. Werden Wirkungskategorien wie Treibhausgasemissionen oder UBP verwendet, dann verursachen die mineralischen Materialien im Vergleich zu den brennbaren Materialien viel geringere Umweltbelastungen, weil die mineralischen Materialien kaum Emissionen verursachen. Hier müssten weitere Wirkungskategorien, wie die Landnutzung, der Kiesabbau usw. mit einbezogen werden.

### 5.2 Erkenntnisse aus Analysen der Transporte

- Mittels der Integration von ökologischen Vorgaben zu den Transporten bei Rückbau- und Sanierungsprojekten kann die Umweltbelastung durch die Transporte auf proaktive Weise reduziert werden. Der Standort der Baustelle spielt meistens eine untergeordnete Rolle.
- Für die Entsorgung der Inertstoffe und Gips werden grosse Distanzen von durchschnittlich 50 km (Inertstoffe) und 65 km (Gips) zurückgelegt. Eine Reduktion

könnte erreicht werden, indem ein noch grösserer Teil der Inertstoffe den Verwertungsprozessen in den näherliegenden Aufbereitungsanlagen zugeführt wird.

- Bei der Entsorgung von Gips wäre es wichtig, dass Rücknahmesysteme für Gipsabfälle entwickelt werden. Damit könnten die Distanzen reduziert und die Verwertungsquoten erhöht werden.

### **5.3 Erkenntnisse aus den Analysen der Beton- und Mischabbruchentsorgung**

- Die Abschätzungen zur Primärenergie (PE) aus Entsorgung des Beton- und Mischabbruchs ergeben einen durchschnittlichen PE von 200 MJ pro Tonne Beton- und Mischabbruchgranulat für den Rückbau, den Transport und die Aufbereitung.
- Der Rückbau beansprucht knapp 60% des total PE, der Transport 33% und die Aufbereitung den Rest. Somit kann mit Massnahmen im Bereich des Rückbaus die grösste Wirkung erzielt werden.
- Beim Rückbau scheint der eingesetzte Maschinenpark der Rückbauunternehmen einen wesentlichen Einfluss auf den PE des Rückbaus zu haben. Aus diesem Grund könnten Vorgaben betreffend des einzusetzenden Maschinenparks in den Ausschreibungsunterlagen definiert werden, um den PE für den Rückbau zu reduzieren.
- Bei den Transporten kann die heute bestehende Praxis bei den Ausschreibungen beibehalten werden. Diese ist sehr wirksam. Optimierungen sind über weitergehende Vorgaben bei den Emissionscodes der LKW möglich.
- Das Optimierungspotenzial bei der Aufbereitung von Beton- und Mischabbruch ist relativ gering. Aus diesem Grund sind Vorgaben in diese Bereich nicht sehr wirksam. Zudem ist eine Überprüfung der Umsetzung der Vorgaben in der Praxis kaum möglich.

### **5.4 Erkenntnisse aus den Analysen der Altholzentsorgung**

- Die Abschätzungen zur Primärenergie (PE) aus Entsorgung des Altholzes ergeben einen durchschnittlichen PE von 264 MJ pro Tonne Altholz für den Rückbau, den Transport und die Aufbereitung.
- Im Vergleich zur Beton- und Mischabbruchaufbereitung unterscheidet sich die Verteilung des PE auf die drei Prozessstufen bei der Altholzaufbereitung deutlich. Mit knapp 200 MJ/t ist vor allem der Aufbereitungsprozess energieintensiv. Aus diesem Grund müssten bei der Aufbereitung Massnahme definiert werden. Allerdings ist auch hier eine Überprüfung allfälliger Vorgaben in den Ausschreibungsunterlagen kaum möglich.
- Da ein grosser Teil des Altholzes exportiert wird, ist eine Beurteilung dieser Exporte von Interesse. Die Szenarienanalyse zeigt folgendes:
  - Wird das Altholz exportiert und gelangt es dort in eine thermische Verwertung, ist der PE um den Faktor 3 (Transport per Bahn) bis 6 (Transport per LKW) grösser als bei einer thermischen Verwertung in einer regionalen Anlage.



- Gelangt das Altholz im Ausland in eine stoffliche Verwertung, dann kann eine deutliche Reduktion des PE erfolgen. Allerdings beträgt der Altholzanteil in den neuen Spanplatten oft nur 10%. Wird dieser Anteil zur Berechnung des PE eingesetzt, schneidet die lokale thermische Verwertung besser ab.
- Bei rund 14% Altholzanteil in der Spanplattenproduktion (und Transport per Bahn) liegt der PE im gleichen Bereich wie die lokale thermische Verwertung.
- Die groben Abschätzungen des PE der stofflichen Verwertung zeigen, dass der Altholzanteil in der Spanplattenproduktion der wichtigste Parameter bei der Beurteilung der stofflichen Verwertung im Ausland ist. Dies dürfte auch der Fall sein, wenn die Analyse mittels anderer Wirkungskategorien erfolgt.
- Mit trockenen Aufbereitungsverfahren kann ein Altholzanteil von 10 - 20% in der Spanplattenproduktion erreicht werden. Höhere Anteile werden mit nassen Verfahren erzielt. Allerdings sind diese Verfahren deutlich energieintensiver, was zu einem höheren PE führt. Es müsste deshalb untersucht werden, ob die durch den höheren Altholzanteil resultierende Reduktion der Umweltlasten, grösser ist als die durch die nassen Verfahren produzierten Umweltlasten.
- Allerdings werden die nassen Verfahren aus logistischen, technischen und ökonomischen Gründen noch kaum im Grossmassstab eingesetzt.
- Heute lässt sich nicht überprüfen, ob das exportierte Altholz in die thermische oder stoffliche Verwertung gelangt. Solange die stoffliche Verwertung durch den Abnehmer nicht belegt werden kann, ist zu empfehlen, das anfallende Altholz den lokalen Altholzverbrennungsanlagen zuzuführen. Voraussetzung dazu ist, dass diese über einen hohen Gesamtwirkungsgrad verfügen.

### 5.5 Schlussfolgerungen

Die im Rahmen der ersten Projektetappe durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass eine vollständige Ökobilanzierung sämtlicher Prozesse vom Rückbau bis zur Verwertung in der Produktion sehr schwierig ist, weil vor allem bei den Produktionsprozessen oft zu pauschale Sachbilanzen vorliegen. Zudem müssten verschiedene Wirkungskategorien berücksichtigt werden. Aggregierte Wirkungskategorien wie die ökologische Knappheit (UBP) sind für den Vergleich der Entsorgungspfade eher ungeeignet, weil beispielsweise der Land- und Ressourcenverbrauch aber auch weitere Wirkungskategorien zu wenig Gewicht haben.

Eine sinnvolle Methode könnte sein, dass für jede Materialkategorie der Entsorgungspfad bis zur Verwertung des Materials bilanziert wird. Allerdings wird beim Verwertungsprozess nur bis zu jener Prozessstufe bilanziert, wo die Qualität des aufbereiteten Materials, der Qualität des Primärmaterials entspricht. Bei der Altholzverwertung bedeutet dies beispielsweise, dass bis zu jener Stufe bilanziert wird, wo die Altholzspäne bezüglich der Korngeometrie und vor allem bezüglich dem Feuchtegehalt den Holzspänen entsprechen. Diese Vereinfachung erlaubt es, die Umweltbelastung von verschiedenen Verwertungsvarianten auf einer vergleichenden Basis zu quantifizieren. Die davon ausgehende Beurteilung bildet anschliessend die Grundlage zur Entwicklung von Massnahmen zur Reduktion der Umweltbelastungen bzw. zu Empfehlungen, welcher Entsorgungspfad aus ökologischer Sicht bei Rückbauprojekten für die verschiedenen Materialkategorien zu wählen ist.

## 6 Ausblick bzw. Vorschlag zum weiteren Vorgehen

Die vorliegenden Resultate und Erkenntnisse zeigen, in welche Richtung eine allfällige Weiterentwicklung des Projekts gehen könnte.

### 6.1 Weitere Analysen zum PE

Ergänzend zu den bisherigen Abschätzungen des PE für den Rückbau, den Transport, die Aufbereitung und die Verwertung von Beton- und Mischabbruch sowie von Altholz könnte analoge Abschätzung für die folgenden Materialkategorien durchgeführt werden:

- Bausperrgut
- Metalle (Eisen, Alu und Kupfer)
- brennbare Bauabfälle
- evtl. Gips
- evtl. Inertstoffe in Deponie

Es handelt sich dabei um die mengenmässig wichtigsten Materialkategorien. Interessant sind diese Fraktionen aus folgenden Gründen:

#### Bausperrgut:

Die Aufbereitung von Bausperrgut in Sortieranlagen dürfte mit einem relativ hohen PE (Primärenergieaufwand) verbunden sein. Dieser könnte ebenfalls mit dem PE aus dem Rückbau, Transport und der Verwertung verglichen werden, um zu sehen, ob hier allenfalls Optimierungsmassnahmen sinnvoll wären.

#### Metalle (Eisen, Alu und Kupfer):

Bei den Metallen sind vor allem Analysen die Gutschriften durch den Ersatz von Primärressourcen durch die Altmetalle von Interesse. Die Arbeit von Boucher zeigt den grossen Beitrag der Metalle beim Vergleich der spezifischen Impacts und Benefits Primärenergien/ Umweltbelastungen (Abbildung 7). Werden diese in eine gesamthafte Bilanzierung der Rückbau- und Sanierungsprojekte mit einbezogen, sind hier weitere Erkenntnisse zu erwarten.

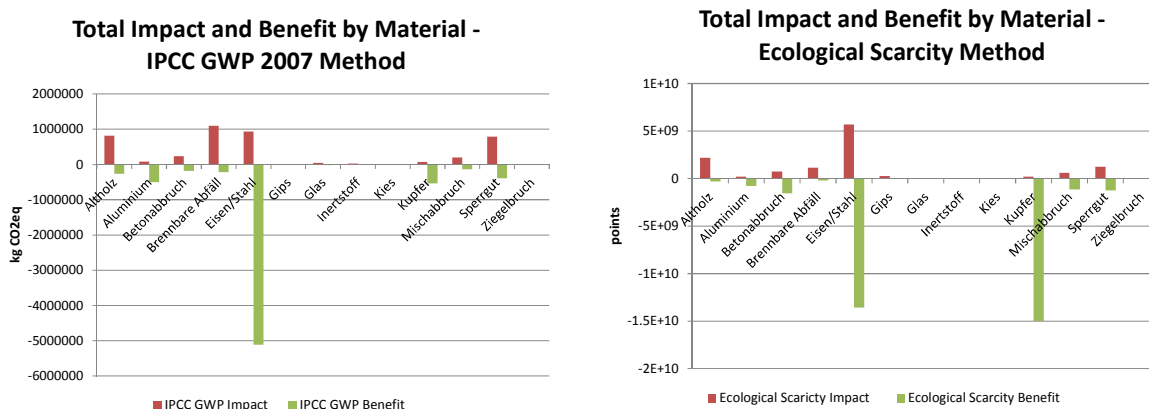


Abbildung 7: Vergleich der durchschnittlichen Treibhausgasemissionen (kg CO<sub>2</sub>eq, links) und der Umweltbelastungen (UBP, rechts) aus allen Controllingprojekten sowie der Gutschriften aus den eingesparten Primärenergie/Umweltbelastungen die bei der Produktion der jeweiligen Primärmaterialien entstehen (Quelle: Boucher, 2014).

#### Brennbare Bauabfälle:

Bei den brennbaren Bauabfällen wäre vor allem eine Analyse bezüglich des Rückbaus, Aufbereitung und Verwertung von Isolationsmaterial von Interesse. Leider liegen keine spezifischen Daten zum Anteil der Isolationsmaterialien an den gesamten brennbaren Bauabfällen vor. Aus diesem Grund müsste eine solche Analyse auf theoretischer Basis erfolgen.

#### Gips und Inertstoffe:

Die Gipsabfallmengen werden in Zukunft stark zunehmen. Dies hat eine Modellierung der Gipsflüsse in der Schweiz (AWEL 2014) gezeigt. Auf Basis dieser Daten könnte eine Analyse vom Rückbau bis zur Verwertung durchgeführt werden, um zu eruieren, bei welcher Prozessstufe die grössten Umweltlasten (PE, UBP usw.) zu erwarten und wo Optimierungsmassnahmen am sinnvollsten sind. Bei den Inertstoffen wäre interessant zu sehen, welche Umweltbelastungen durch die Ablagerung in Inertstoffdeponien ausgelöst werden. Eine solche Analyse würde auch die Grenzen der bewertenden Ökobilanzierung aufzeigen.

### **6.2 Weitere Umweltbelastungsindikatoren**

Die Daten sind grösstenteils so aufbereitet, dass neben dem PE beispielsweise auch die ökologische Knappheit (UBP) beziffert werden kann. Da die Methode der ökologischen Knappheit umfassender als die Bestimmung des PE ist, sind entsprechende Unterschiede bei den Resultaten zu erwarten.

### **6.3 Summierung und Vergleich des PE und UBP nach Materialkategorien**

Die Analysen gemäss Kapitel 6.1 und 6.2 würden es erlauben, die PE oder UBP der verschiedenen Materialkategorien einander gegenüberzustellen sowie aufzusummieren. Der Vergleich der PE/UBP der einzelnen Materialkategorien würde aufzeigen, welche Materialkategorien die höchste Relevanz haben. Damit könnten die materialspezifischen Optimierungsmassnahmen entsprechend gewichtet werden.

## 7 Literatur

Boucher J. 2014: *Assessing Waste Streams of Building Demolition and Renovation in the City of Zurich*. Projektarbeit ETH Zürich, Institute for Environmental Engineering, Zürich.

Forschungszentrum Karlsruhe 2001: *Recycling von Holzwerkstoffen durch das Verfahren der Thermohydrolytischen Spaltung*. Im Auftrag von Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH&Co.KG, FKZ-Bericht 0339859, Karlsruhe.

Frank R. 1999: *Zum Recycling von Holzspanplatten und mitteldichten Faserplatten*. Dissertation des Fachbereichs für Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität, Göttingen.

Haider A. 2011: *Ökobilanzierung von Altholzverwertungsalternativen; Ökologischer Vergleich von stofflicher und thermischer Verwertung mit Hausbrand und Wiederverwendung*. Masterarbeit, Institut für Abfallwirtschaft Universität für Bodenkultur. Wien.

Roffael, E., Kharazipour, A. und Hüttermann, A., 1997: *Verfahren zum Recyceln von Span- und Faserplatten*. DE-OS 195 26 667 A 1

Speckels L. 2001: *Ökologischer Vergleich verschiedener Verwertungs- und Entsorgungswege für Altholz*. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Hamburg.

Windesberger A. 2010: *Optimierung der Ressourceneffizienz der Holznutzung. Modellierung der Holzverarbeitungsprozesse zur Darstellung der Auswirkungen von Entwicklungen auf die Leistungscharakteristik*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung, BMVIT, Wien.