



# **Schutz und Nutzung von Senken durch die Zürcher Abfall- und Ressourcenwirtschaft**

Ein zukunftsgerichteter Ansatz  
zur Steuerung von Entsorgungssystemen

Bericht

Ulrich Kral  
Dana Vyzinkarova  
Paul H. Brunner

Auftraggeber

Baudirektion Kanton Zürich  
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft  
Abteilung für Abfallwirtschaft und Betriebe

Wien, im Dezember 2015

## **IMPRESSUM**

### **Auftraggeber**

Baudirektion Kanton Zürich  
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)  
Abteilung für Abfallwirtschaft und Betriebe  
Weinbergstrasse 34  
8090 Zürich  
Dr. Elmar Kuhn

### **Projektgruppe AWEL, Abteilung Abfallwirtschaft und Betriebe**

Franz Adam	Abteilungsleiter
Dr. Elmar Kuhn	Sektion Abfallwirtschaft, Sektionsleiter (Projektleitung)
Dr. Leo Morf	Sektion Abfallwirtschaft, Teilbereichsverantwortlicher thermische Abfallbehandlung
Dr. Beat Stäubli	Sektion Abfallwirtschaft, zuständig für Statistik und Systembildung
Christian Sieber	Sektion Abfallwirtschaft, zuständig für Deponien, Kies und Aushub

### **Weitere Auskünfte seitens Fachstellen der Baudirektion**

Simon Schwarzenbach	Abt. Abfallwirtschaft & Betriebe, Sektion Abfallwirtschaft
Charlotte Lock	
Jean-Claude Hofstetter	Abt. Abfallwirtschaft & Betriebe, Sektion Altlasten
Dr. Bettina Flury	
Dr. Bernhold Hahn	
Manuel Stark	
Dr. Jörg Egestorff	
Joachim Hanke	
Dr. Peter Dell'Ava	Abt. Abfallwirtschaft & Betriebe, Sektion Betrieblicher Umweltschutz und Störfallvorsorge
Dr. Pius Niederhauser	Abt. Gewässerschutz, Sektion Oberflächengewässer
Kuno Strassmann	Abt. Lufthygiene, Sektion Massnahmenplanung und Grundlagen
Angelo Papis	Abt. Lufthygiene, Sektion Emissionskontrolle
Dr. Thomas Flüeler	Abteilung Energie

### **Auftragnehmer**

Technische Universität Wien (TU Wien)  
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft  
A-1040 Wien, Karlsplatz 13/226  
Univ. Prof. Dr. Paul H. Brunner

### **Projektgruppe TU Wien**

Univ. Prof. Dr. Paul H. Brunner	Projektleitung, Konzeptentwicklung
Dr. Ulrich Kral	Konzept- und Modellentwicklung, Sachbearbeitung (Güter, Kupfer, Zink)
Dana Vyzinkarova MSc	Sachbearbeitung (Güter, PAK, DecaBDE)
Inge Hengl	Grafische Gestaltung und Layout

### **TU Wien interner Projekttitle**

Senken und letzte Senken im Kanton Zürich (SEKAZ)

## Bearbeitungsverlauf

Dokument Name	Versionsdatum	Kommentar	Status	Bearbeiter
SEKAZ_20140912.docx	12.9.2015	Besprechung mit AG am 24.9.2015 in Zürich.	Entwurf	UK
SEKAZ_20141123.docx	23.11.2015	Review durch AG.	Entwurf	AWEL
SEKAZ_20151218.docx	18.12.2015	Übergabe Bericht	Endfassung	TU Wien

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Volltext
ak	..... Ausserkantonale
akB	..... Ausserkantonaler Bereich
ARA	..... Abwasserreinigungsanlage
ChemRRV	..... Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung
Cu	..... Kupfer
DecaBDE	..... Decabromdiphenylether
ik	..... Innerkantonale
ikB	..... Innerkantonaler Bereich
KVA	..... Kehrichtverbrennungsanlage
PAK	..... Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PBDE	..... Polybromierte Diphenylether
RRR	..... Rauchgasreinigungsrückstände
SdT	..... Stand-der-Technik
StoV	..... Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung)
TVA	..... Technische Verordnung über Abfälle
UTD	..... Untertagedeponie
VarK	..... Variationskoeffizient
VBo	..... Verordnung über Belastungen des Bodens
Zn	..... Zink



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>11</b>
2.1	Ausgangslage und Problemstellung.....	11
2.2	Zielsetzung und Fragestellung.....	12
<b>3</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>13</b>
3.1	Begriffsklärungen "Senke".....	13
3.1.1	Die „Senke“ als Prozess.....	13
3.1.2	„Senken“ und ihre Klassifizierung.....	14
3.2	Vorgangsweise zur Beurteilung der Senkenbelastung.....	16
3.3	Inventar.....	17
3.3.1	Systembilder.....	17
3.3.1.1	<i>Integration der Systembilder</i> .....	17
3.3.1.2	<i>Teilsysteme (aggregiert)</i> .....	24
3.3.1.3	<i>Gesamtsystem (disaggregiert)</i> .....	26
3.3.2	Modellbildung.....	27
3.3.2.1	<i>Modellgleichungen</i> .....	27
3.3.2.2	<i>Datenqualität und Unsicherheiten</i> .....	27
3.3.2.3	<i>Bilanzgleichungen</i> .....	32
3.3.3	Datenbeschaffung und Datenquellen.....	32
3.4	Wirkungsabschätzung.....	32
3.4.1	Vorgangsweise und Begriffe.....	32
3.4.2	Aktuelle Flüsse.....	33
3.4.3	Kritische Flüsse.....	34
3.4.3.1	<i>Vorgangsweise</i> .....	34
3.4.3.2	<i>Zielanalyse</i> .....	34
3.4.3.3	<i>Zielkriterien</i> .....	34
3.4.4	Indikator.....	38
<b>4</b>	<b>Resultate</b> .....	<b>40</b>
4.1	Welche Senken sind vorhanden, um die Abstoffe zu verbringen?.....	40
4.2	Wie groß sind die Belastungen dieser Senken?.....	40
4.2.1	Überblick.....	40
4.2.2	Güter.....	42
4.2.2.1	<i>Senkenbelastung</i> .....	42
4.2.2.2	<i>Sektoren und deren Flüsse in Senken</i> .....	44

4.2.2.3	<i>Regionale Verteilung der Senkenbelastung</i> .....	47
4.2.3	Kupfer .....	49
4.2.3.1	<i>Senkenbelastung</i> .....	49
4.2.3.2	<i>Sektoren und deren Flüsse in Senken</i> .....	51
4.2.4	Zink .....	55
4.2.4.1	<i>Senkenbelastung</i> .....	55
4.2.4.2	<i>Sektoren und deren Flüsse in Senken</i> .....	57
4.2.5	PAK.....	60
4.2.5.1	<i>Senkenbelastung</i> .....	60
4.2.5.2	<i>Sektoren und deren Flüsse in Senken</i> .....	62
4.2.6	DecaBDE .....	64
4.2.6.1	<i>Senkenbelastung</i> .....	64
4.2.6.2	<i>Sektoren und deren Flüsse in Senken</i> .....	66
4.3	Sind Engpässe zu erwarten? .....	67
4.3.1	Güter .....	67
4.3.2	Kupfer .....	68
4.3.3	Zink .....	70
4.3.4	PAK.....	72
4.3.5	DecaBDE .....	74
4.4	Können allfällige Engpässe überwunden werden? .....	75
4.4.1	Güter .....	75
4.4.2	Kupfer & Zink .....	81
4.4.3	PAK.....	87
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen und Diskussion</b> .....	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>Glossar</b> .....	<b>97</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>100</b>
<b>8</b>	<b>Anhänge</b> .....	<b>104</b>

## 1 Kurzfassung

In der Schweiz werden jährlich rund 15 Tonnen pro Einwohner an mineralischen, metallischen, biogenen und fossilen Materialien umgesetzt. Hinzu kommen große Mengen an Wasser und Verbrennungsluft. Nach ihrem Einsatz gelangen diese Materialien als Abstoffe in Form von

### Ausgangslage

- a) Abfall in die Abfall- und Ressourcenwirtschaft und in weiterer Folge in anthropogene oder natürliche Senken. Anthropogene Senken stehen für zu verwertendes Material in der Produktions- und Nutzungsphase (z.B. Gebäude für verwertete Rückbaustoffe) zur Verfügung. Für zu entsorgendes Material bieten sich thermische Anlagen (z.B. Kehrichtverbrennungsanlagen für organische Stoffe) und Deponien als anthropogene Senken an.
- b) Abwasser in die Abwasserwirtschaft und in weiterer Folge als gereinigtes Abwasser in die natürliche Senke Oberflächengewässer bzw. als Klärschlamm in die Abfall- und Ressourcenwirtschaft.
- c) Emissionen in die natürliche Senke Umwelt, wobei hier Abgase, Abriebe-, Korrosions- und Verwitterungsprodukte, sowie landwirtschaftliche Einträge eine Rolle spielen.

Allgemein formuliert, bezeichnen wir in dieser Arbeit eine Senke als einen Prozess, der Stoffe innerhalb eines festgelegten Zeitraumes aufnimmt und/oder umwandelt (z.B. Anreicherung anorganische Stoffe im Prozess „Deponie“, oder Mineralisierung organischer Stoffe im Prozess „thermische Anlagen“). Jede Volkswirtschaft hat ihren charakteristischen Bedarf an Senken; er ist einerseits vom Güterumsatz und andererseits von der Art und Bewirtschaftung der Stoffe abhängig.

Das Problem besteht darin, dass die Aufnahmekapazitäten von Senken in der Regel beschränkt sind. Anthropogene Senken sind sowohl quantitativ (z.B. Deponievolumen) als auch qualitativ (z.B. Stör- und Schadstoffe in Recyclinggütern) limitiert. Natürliche Senken wie Boden, Wasser und Luft sind in erster Linie aufgrund von Umweltqualitätszielen in der Aufnahme von Stoffen begrenzt. Die Herausforderung liegt darin, anthropogene Stoffflüsse so zu lenken, dass Senken auch langfristig nicht überlastet werden.

### Problem

Um die Funktionsfähigkeit der Senken als notwendigen Bestandteil der Volkswirtschaft langfristig zu erhalten, verfolgt das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) im Kanton Zürich (Kt. ZH) eine proaktive Strategie. Diese ist im aktuellen „Massnahmenplan der Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2015-2018“ des Kt. ZH festgelegt. Sie sieht vor, Rückstände der Volkswirtschaft entweder als marktfähige Ressourcen zu nutzen, oder sie in sicheren Senken zu verbringen. Die vorliegende Studie unterstützt diese Strategie und verfolgt das Ziel, die Senkenbelastung durch im Kt. ZH anfallende Abstoffe (Abfälle, Abwasser, Abgase inklusive Emissionen, Erosion und Abrieb, sowie Verwitterungs- und Korrosionsprodukte) zu beurteilen. Die Beurteilung der Senkenbelastung dient der Optimierung der Materialflüsse und abfall- und abwasserwirtschaftlichen Prozesse im Rahmen der umwelt- und ressourcenpolitischen Ziele des Kt. ZH. Es ergeben sich folgende Fragestellungen:

- (1) Welche Senken sind vorhanden, um die Abstoffe zu verbringen?
- (2) Wie groß sind die Belastungen dieser Senken durch volkswirtschaftliche Tätigkeiten und welchen Anteil hat der Sektor Abfallwirtschaft? [Analyse]
- (3) Sind Engpässe bei der Verbringung von Abstoffen in Senken zu erwarten? [Bewertung]
- (4) Können allfällige Engpässe durch quellenorientierte und/oder alternative abfallwirtschaftliche Verfahren überwunden werden? [Gestaltung]

Die Analyse wird mittels Materialflussanalysen auf der Güterebene durchgeführt. Zusätzlich werden exemplarisch für das Jahr 2013 die Stoffflüsse von ausgesuchten Schwermetallen (Kupfer (Cu) & Zink (Zn)) und organischen Schadstoffen (Decabromdiphenylether (DecaBDE) sowie die Stoffgruppe polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)) mit einem regionalen Ansatz von der Quelle zur Senke dargestellt. Bewertet werden die Flüsse in die Senken aufgrund von Zielkriterien, die aus den umwelt-, abfall- und ressourcenpolitischen Zielvorgaben des aktuellen Umweltschutzes sowie des Zürcher „Massnahmenplans der Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2015-2018“ abgeleitet werden. Anhand der Kombination von Analyse- und Bewertung wird ein dimensionsloser Indikator  $\omega$  ermittelt, der als aktueller Fluss dividiert durch den kritischen Fluss definiert ist. Ein kritischer Fluss ist die gemäss umwelt-, abfall- und ressourcenpolitischen Zielen maximal zulässige Fracht in Masse pro Zeit. Der Indikator  $\omega$  erlaubt eine Klassifizierung der aktuellen Senkenbelastung in 3 Bereiche: „kritisch“, „subkri-

tisch“ und „unkritisch“. Ausgehend von dieser Klassifizierung werden prioritäre Massnahmen vorgeschlagen um die Engpässe (Flüsse im „kritischen“ und „subkritischen“ Bereich) zu überwinden.

Zur Bestimmung der Unsicherheit wird die Datenqualität für jeden Fluss anhand von fünf festgelegten Kategorien mittels einer Punktezahl von 1 bis 4 qualitativ beurteilt. Die Punktezahl wird mittels Exponentialfunktionen in Variationskoeffizienten übersetzt, welche die quantitative Unsicherheit für jeden Fluss beschreibt. Damit wird es möglich, für den Indikator  $\omega$  einen Unsicherheitsbereich anzugeben.

Die Resultate beantworten die eingangs formulierten Fragen:

### **Resultate**

Für die Verwertung und Entsorgung von festen, flüssigen und gasförmigen Abfällen sowie von Abrieb, Korrosions- und Verwitterungsprodukte sind folgende Senken vorhanden:

***Welche Senken sind vorhanden?***

- a) Die Produktions- und Nutzungsphase für die Aufnahme von Sekundärrohstoffen, die von der Abfall- und Ressourcenwirtschaft produziert werden (z.B. Bauwerke wie Strassen oder Hochbauten für recycelte Rückbaustoffe)
- b) Thermische Behandlungsanlagen wie Kehrichtverbrennungsanlagen, Sonderabfallverbrennungsanlagen, Rest- und Altholzfeuerungen und Zementwerke für die Reduktion des Abfallvolumens und organische Schadstoffe.
- c) Kiesgruben, Ober- und Untertagedeponien für feste Rückstände aus der Abfall- und Ressourcenwirtschaft.
- d) Fahrweg (z.B. Unterbau) der Eisenbahn bzw. Strassenbankette und angrenzender Boden, welche Abriebe-, Korrosions- und Verwitterungsprodukte aus dem Schienen- bzw. Strassenverkehr aufnimmt.
- e) Umweltmedien nehmen beispielsweise Einträge aus der Landwirtschaft, diffuse Emissionen aus dem Gebäudepark und dem Verkehrssektor, Abwasser aus der Abwasserwirtschaft und Abgase aus Verbrennungsprozessen auf.
- f) Unbekannte Senken für jene Abfälle, deren Verbleib im Rahmen der Studie nicht geklärt werden konnte.

Die totale Senkenbelastung des Kt. ZH (=Summe der Jahresfrachten in alle Senken) beträgt im Jahr 2013 rund 2'400 Millionen Tonnen (inklusive Abluft und Abwasser). Davon sind 18 Mio. Tonnen feste und flüssige Abfälle 13 t/E.a). Auf der Ebene der ausgewählten Stoffe fließen jährlich rund 9'400 t Cu, 4'000 t Zn, 160 t PAK und 22 t DecaBDE in Senken (vgl. Tabelle 1).

**Wie groß sind die Belastungen der Senken?**

*Tabelle 1: Senkenbelastung durch Abstoffe im Jahr 2013. Die Werte sind auf 2 signifikanten Stellen gerundet.*

Senken	Güter [Mio. t/a]	Cu [t/a]	Zn [t/a]	PAK [t/a]	DecaBDE [t/a]
Produktions- und Nutzungsphase (Senken für rezirkulierte Sekundärrohstoffe)	2.5	7'000	610	62	3.1
Thermische Anlagen	6.8 <sup>1)</sup>	1'400 <sup>1)</sup>	1'800 <sup>1)</sup>	6.3	19
Kiesgruben, Deponien	9.9	1'800	2'900	88	0.31
Fahrweg Bahn	80*10 <sup>-6</sup>	1	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>
Unbekannte Senken	74*10 <sup>-3</sup>	590	330	0.71	0
Umweltmedien	2'400	63	180	5.1	0.001
<b>Totale Senkenbelastung</b>	<b>2'400</b>	<b>9'400</b>	<b>4'000</b>	<b>160</b>	<b>22</b>

*Anmerkung: 1) Um Doppelzählungen bei der Ermittlung der totalen Senkenbelastung zu vermeiden, werden auf der Güter-, Kupfer- und Zinkebene die Frachten in thermische Anlagen nicht bei der Summenbildung für die totale Senkenbelastung berücksichtigt. 2) Diese Flüsse wurden im Rahmen der Studie nicht quantifiziert.*

Rund 81% des Kupfers bzw. 24% des Zinks werden in rezirkulierte Sekundärrohstoffe transferiert, 19% bzw. 71% werden in Kiesgruben und Deponien abgelagert, und rund 1% bzw. 5% gehen als Emission in die Umwelt verloren. Kupfer und Zink wird zwar in Sekundärrohstoffe transferiert, erfährt dort aber nur zum Teil eine funktionelle Nutzung. Vom Gesamtanfall (9'400 t Cu/a bzw. 4'000 Zn/a) wird geschätzt, dass rund 50% des Kupfers und 5% des Zinks aufgrund seiner Stoffeigenschaften weiter genutzt wird.

Von den 160 t PAK/a werden 4% in thermischen Anlagen zerstört, 55% werden in Kiesgruben und Deponien abgelagert, 38% kommen erneut in die Nutzungsphase (Grossteils in Strassenbelägen) und rund 3% werden in die Umwelt eingetragen. Von den jährlich 22 t DecaBDE werden rund 85% in thermischen Anlagen zerstört, etwa 14% werden in Sekundärkunststoffen rezirkuliert und 1% gelangt auf Deponien. Die Einträge von DecaBDE in die Umwelt sind mit rund 0.001 t/a minimal.

Die Ergebnisse zeigen die Relevanz der Sekundärrohstoffe als temporäre Senke für einzelne Schwermetalle und für organische Schadstoffe.

Auch die aktuelle, zukünftig noch höhere Bedeutung thermischer Prozesse als letzte Senke für organische Schadstoffe wird deutlich. Deponien sind nach wie vor eine wichtige, langfristige Senke für viele Stoffe.

Ein Engpass entsteht, wenn ein Fluss in eine Senke einem Zielkriterium widerspricht. Das jeweilige Zielkriterium wird aus dem aktuellen Umweltrecht sowie dem Zürcher „Massnahmenplan der Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2015-2018“ (AWEL 2015) abgeleitet. Der Engpass lässt sich anhand des dimensionslosen Indikators  $\omega$  ( $\omega = \text{Aktueller Fluss} / \text{kritischer Fluss}$ ) erkennen. Der Engpass wird als kritisch ( $\omega > 1.0$ ), subkritisch ( $0.8 < \omega < 1.0$ ) oder unkritisch ( $\omega < 0.8$ ) eingestuft. Unter Anwendung der Zielkriterien ergeben sich die kritischen Engpässe für Güter, Kupfer, Zink, PAK und DecaBDE zusammenfassend in Tabelle 2.

**Sind Engpässe zu erwarten?**

*Tabelle 2: Kritische ( $\omega > 1$ ) und subkritische ( $0.8 < \omega < 1.0$ ) Bereiche für Flüsse in die Senken.*

Ebene	Material	Senke	$\omega$	Kriterium
Güter	Entsorgter Aushub	Kiesgruben im ausserkantonalen Bereich (akB)	$+\infty$ 1)	Aushub soll im Kt. ZH entsorgt werden.
	Rückbaustoffe	Deponien im Kt. ZH und ausserhalb davon	4	Reduktion der deponierten Mengen, da die Verwertungsquote erhöht werden soll.
Cu	Hofdünger, Mineraldünger, Gülle & Gärgut (flüssig), Kompost & Gärgut (fest), Pflanzenschutzmittel, Bahnabriebe in den Boden.	Landwirtschaftlicher Boden	4	Der Eintrag ist grösser als der Entzug durch Pflanzen.
	KVA Schlacke	Deponien im Kt. ZH	2	Reduktion der deponierten Cu-Mengen, da Cu rückgewonnen werden soll.
	KVA-E-Filterasche	Deponien und Untertagedeponien	2-3	
	KVA-Schrott	Stahlwerk mit Schrotteinsatz (Produktion / Nutzung)	2	Qualitätsanforderungen an den KVA-Schrott.
	Entlastungsvolumen aus der Mischwasserkanalisation, Regenwassereinleitung vom Trennsystem	Oberflächengewässer	0.9	Verdünnungsverhältnis 1:10 als Annahme damit die Anforderungen für Fließgewässer eingehalten werden ( $\rightarrow 0,05 \text{ mg Cu/l}$ ).
Zn	Hofdünger, Mineraldünger, Gülle & Gärgut (flüssig), Kompost & Gärgut (fest)	Landwirtschaftlicher Boden	1.1	Der Eintrag ist grösser als der Entzug durch Pflanzen.
	Deponierte Schlacke	Deponien im Kt. ZH	1.2	Grenzwert für Deponierung (Annahme: 5'000 mg Zn/kg TS)

	(Verfestigte) KVA-RRR-Rückstände	Deponien im Kt. ZH & ausserhalb davon	1.4 bis $\infty$ <sup>2)</sup>	Reduktion der deponierten Zn-Mengen, da Zn rückgewonnen werden soll.
	KVA-RRR-Rückstände	Untertagedeponie	2	
PAK	Rückbaustoffe (Ausbauasphalt)	Deponien im Kt. ZH	1.1	PAK-Gehalt für die Ablagerung auf Deponien
Deca-BDE	Recyclinggüter vom Shredder	Produktions- und Nutzungsphase	-	DecaBDE enthaltende Kunststoffe müssen vor dem Recycling aus E&E Geräten und Altfahrzeugen abgetrennt und verbrannt werden.

**Anmerkung:** <sup>1)</sup> Der Indikatorwert ist unendlich ( $\infty$ ), da der Nenner der Division «Null» ist. <sup>2)</sup> Der Indikatorwert ist 1.4 (unter bestimmten Annahmen zur Rückgewinnung von Zink) bzw. unendlich ( $\infty$ ), da aktuell das Potential zur Rückgewinnung nicht vollständig ausgenützt wird und die zu erreichende Rückgewinnungsrate nicht bekannt ist.

**Abkürzungen:** KVA=Kehrichtverbrennungsanlage; RRR=Rauchgasreinigungsrückstände.

Die Vorschläge zur Überwindung der Engpässe sind in Tabelle 3 angeführt.

**Können allfällige Engpässe überwunden werden.**

Tabelle 3: Überwindung der Engpässe.

Ebene	Material	Vorschlag zur Überwindung des Engpasses
Güter	Entsorgter Aushub	a) Volle Ausnützung der freien Restvolumina in Kiesgruben des Kt. ZH, ohne den Grubenbetrieb beim Abbau von Kies zu behindern. b) Bereitstellung von geeigneten Aushubdeponien in Regionen in denen die Kapazität von Kiesgruben aufgrund geringer Kiesabbautätigkeit zur Verfüllung von Aushub nicht ausreicht. Dadurch können die Transportdistanzen und die damit verbundenen Umweltauswirkungen minimiert werden. c) Erhöhung der Auffüllkoten bei Kiesgruben im Kt. ZH, und d) Überschüssigen Aushub für landchaftsgestalterische Zwecke verwenden und/oder weiterhin im ausserkantonalen Bereich entsorgen.
	Rückbaustoffe	a) Erhöhung der Verwertungsquote durch Steigerung der Produktqualität von aufbereiteten Rückbaustoffen. b) Aktuell gibt es bei den ak deponierten Rückbaustoffen mengenmäßig große Unsicherheiten. Eine Feststellung der tatsächlich deponierten Mengen wird empfohlen. c) Aktuell werden für die Ermittlung der Verwertungsquote die ak deponierten Mengen nicht berücksichtigt. Werden diese in Zukunft berücksichtigt und die Vorgabe der Verwertungsquote beibehalten, so müssen allenfalls neue Massnahmen entwickelt werden.
Cu	Bahnabriebe in den Boden, Hofdünger, Mineraldünger, Gülle & Gärgut (flüssig), Kompost & Gärgut (fest), Pflanzenschutzmittel.	a) Die Studie hat ein vereinfachtes Bewertungsverfahren verwendet. Daraus lässt sich ein Hinweis auf einen potentiellen Engpass ableiten, es lässt sich aber keine regionale oder bewirtschaftungsspezifische Aussage treffen. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Ergebnisse der aktuell am Agroscope laufenden Studie zu den kantonalen Stoffbilanzen für landwirtschaftliche Böden für weiterführende Massnahmen heranzuziehen. b) Kupfer und Zink gelangen in erheblichem Ausmass in den Boden und müssen überwacht werden. Für die Beobachtung empfiehlt sich die Kombination aus Stoffbilanz-Modellen (z.B. jährliche Intervalle, da

	KVA Schlacke	kostengünstig) und langfristigen Bodenbeobachtungsprogrammen (grosse Intervalle, da teuer). Vorgabe der angestrebten Rückgewinnungsrate (z.B. 95% Cu (metallisch)) für KVA-Anlagenbetreiber.
	KVA-E-Filterasche	Unterstützung von Aktivitäten zur Dekontamination von KVA-Filteraschen.
	KVA-Schrott	Unterstützung von Aktivitäten zur Cu-Entfrachtung von KVA-Schrott. Derzeit laufen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten am Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung (ZAR), um das Potential zur Cu-Entfrachtung zu identifizieren.
	Entlastungsvolumen aus der Mischwasserkanalisation, Regenwassereinleitung vom Trennsystem	Um Massnahmen zu planen, wird eine kantonsweite, räumlich verortete Analyse (auf Einzugsgebietsebene) der relevanten Kupfer- und Zink-quellen und deren Eintragspfade in die Oberflächengewässer empfohlen.
Zn	KVA-RRR-Rückstände	Umsetzung der angestrebten Rückgewinnungsrate (z.B. 35% betreffend Zn im KVA-Input bzw. umgerechnet auf die KVA-Filteraschen rund 80% Rückgewinnung) mit praxistauglichen Verfahren zur Aufbereitung von KVA-Filterasche und Rückgewinnung von Zink.
PAK	Rückbaustoffe (Ausbauasphalt)	Neuer Grenzwert (TVA Revision), Umleitung des PAK-Flusses in thermische Anlagen.
Deca-BDE	Recyclinggüter vom Shredder	Vor der Erhöhung von Recyclingquoten für Elektro- und Elektronikabfälle (E&E Abfälle) oder vor der Förderung der stofflichen Verwertung der RESH Fraktion müssen Massnahmen, die die Ausschleusung respektive die Verhinderung der Dissipation von DecaBDE in Recyclingprodukte zur Folge haben, getroffen werden.

Die Ergebnisse erlauben allgemeine Schlussfolgerungen:

- Der Bedarf an anthropogenen und natürlichen Senken ist gross und beträgt 1'700 Tonnen pro Einwohner und Jahr (t/E.a) - inklusive Abluft und Abwasser - bzw. 13 t/E.a. - exklusive Abluft und Abwasser. Insbesondere für Aushubmaterialien (8 t/E.a) müssen heute und auch in Zukunft große Volumina an Senken bereitgestellt werden. Die Planung genügender Senkenkapazitäten ist eine wichtige abfallwirtschaftliche Aufgabe.
- Recyclingprodukte sind geeignete Senken für Wertstoffe, die dem Produkt einen Nutzen bringen. Schadstoffe sind aus qualitativ hochwertigen Kreisläufen aus zu schleusen und in geeigneten Senken (thermischen Prozessen und Deponien) zu entsorgen.
- Thermische Behandlungsanlagen wie KVA, Zementwerke und Sondermüllverbrennungsanlagen mit bestimmten Prozessbedingungen sind geeignete Senken für organische Schadstoffe. Im Jahr 2013 wurden 4% der PAKs und 85% der DecaBDEs in

**Schlussfolgerungen**

thermischen Anlagen zerstört. Der Rest gelangte in Sekundärrohstoffe mit weiterführender Nutzung bzw. wurde in Deponien eingelagert. Die Umsetzung der TVA Revision wird aufgrund geänderter Entsorgungswege von Ausbauasphalt den Anteil der PAKs, die in thermischen Anlagen zu behandeln sind, auf über 80% ansteigen lassen.

- Kiesgruben und Deponien sind geeignete Senken für anorganische mineralische Abfälle mit beschränktem und immobilem Schadstoffgehalt. Besteht das Ziel im Sinne des Kantonalen Richtplanes in der vollständigen Verwertung von Aushub innerhalb des Kt. ZH, so sind bis zum Jahr 2035 weiterführende Massnahmen zur Unterbindung des Aushubexportes in andere Kantone sowie zur Erhöhung der Senkenkapazitäten im Ausmass von rund 30 Mio. m<sup>3</sup> (bei statischer Betrachtung 1.5 Mio. m<sup>3</sup>/a) erforderlich.
- Deponien werden derzeit noch als Senke genutzt, wenngleich der Bedarf aufgrund bereits eingeleiteter Massnahmen abnimmt. Beispielweise ergibt die Umsetzung SdT bei der Behandlung der KVA-Filterasche eine Reduktion der in KVA-Filteraschen deponierten Zn-Frachten von rund 80%.
- Bei Bodenrekultivierungen ist Boden eine geeignete Senke für Material, das den Bodenschutzkriterien genügt, zumal dies agronomischen Nutzen generieren und für künftige Generationen erhalten bleiben kann. Auf stofflicher Ebene sind die Senkenkapazitäten der Umweltmedien begrenzt; sie werden z.T. über lange Zeiträume aufgefüllt. Um deren Überlastung zu vermeiden, sind Stoffflüsse in Senken, deren Kapazität und Zustand zu beobachten und rechtzeitig Massnahmen zur Überwindung von Engpässen vorzusehen.

Der Zürcher „Massnahmenplan der Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2015 bis 2018“ legt – abgestützt auf das aktuelle Umweltrecht - konkrete umwelt-, abfall- und ressourcenpolitische Ziele fest. Zur Beurteilung der Zielerreichung in den einzelnen Fachbereichen dienen ausgewählte Indikatoren (in der Studie „Kriterien“ genannt), die im Sinne eines Controlings und einer Früherkennung beobachtet werden müssen. Abweichungen von den Zielvorstellungen werden so erkannt, und Abhilfemassnahmen können entwickelt und umgesetzt werden.

## **Bedeutung der Resultate**

Die vorliegende Studie unterstützt diesen Analyse- Bewertungs- und Handlungsansatz des AWEL mit einer systematischen Betrachtung der

Abstoffflüsse in die Senken. Der entwickelte Ansatz wurde exemplarisch für die Stoffe Kupfer, Zink, DecaBDE und für die Stoffgruppe PAK angewandt; er ist auf weitere Kantone, Zeiträume und Stoffe übertragbar. Die Klassifizierung der Flüsse in „kritisch“, „subkritisch“ und „unkritisch“ erlaubt auf einfache Art und Weise ein laufendes Monitoring und Berichtswesen (Controlling) über die Effektivität von Massnahmen im Hinblick auf den Schutz und die Nutzung von Senken durch die Zürcher Abfall- und Ressourcenwirtschaft.



## 2 Einleitung

### 2.1 Ausgangslage und Problemstellung

In volkswirtschaftlich hoch entwickelten Regionen wie dem Kanton Zürich (Kt. ZH) entstehen aus sozioökonomischen und technischen Gründen zahlreiche ‚Abstoffe‘ wie Abfälle, Abwasser, Abgase inklusive Emissionen, Erosions-, Abriebs-, sowie Verwitterungs- und Korrosionsprodukte. Diese zum grösseren Teil unvermeidbaren Abstoffe müssen in sogenannten Senken verbracht werden. Senken sind Prozesse, in denen Abstoffe kurz-, mittel- oder langfristig verbleiben („akkumulieren“) oder zerstört (mineralisiert) werden (Abbildung 1). Wird der Fluss der Abstoffe verfolgt, so landen diese entweder in anthropogenen oder natürlichen Senken. Anthropogene Senken finden sich in der Produktion- und Nutzungsphase, z.B. in Form von Gebäuden, die verwertete Rückbaustoffe aufnehmen. Es sind aber auch thermische Anlagen, die organische Schadstoffe mineralisieren oder Deponien, die abgelagerte Abfälle aufnehmen. Natürliche Senken sind die Umweltmedien Boden, Wasser und Luft.

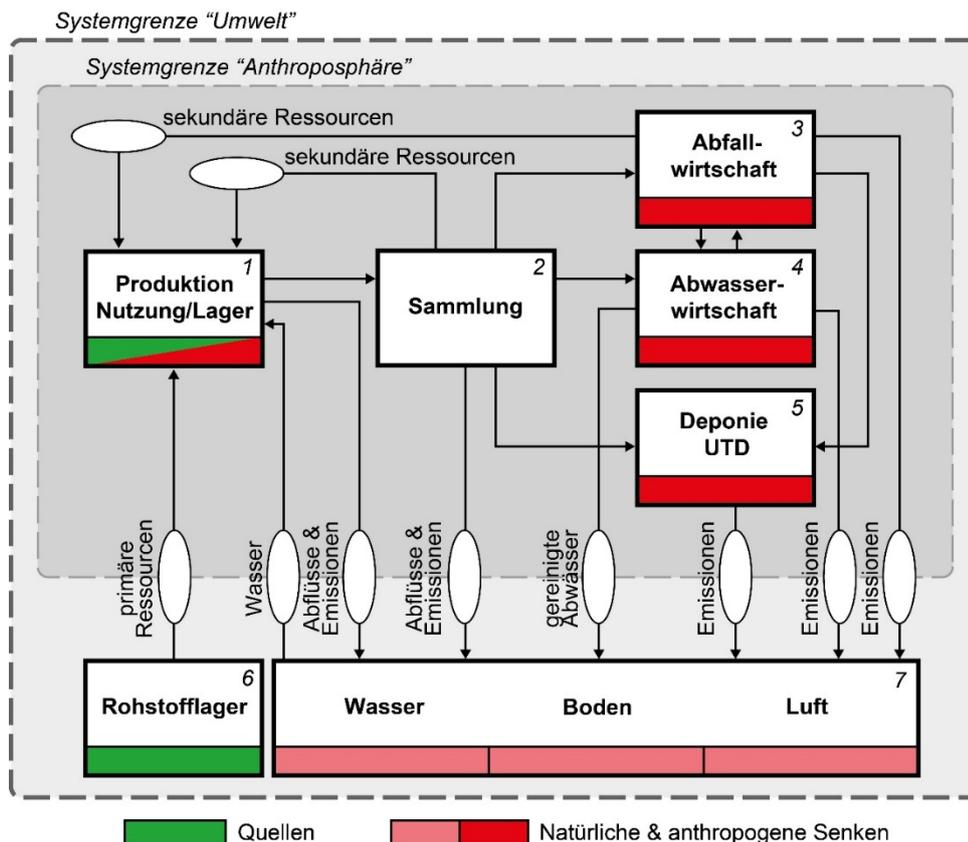


Abbildung 1: Materialflüsse einer Volkswirtschaft und deren Akkumulation oder Mineralisation in natürlichen und anthropogenen Senken.

Jede Senke hat aber eine beschränkte Aufnahmekapazität. Als sichere Senken werden nur jene Prozesse verstanden, die die Verträglichkeit für Mensch und Umwelt gewährleisten.

Für abfallwirtschaftliche und umweltpolitische Entscheide im Kt. ZH ist deshalb von Bedeutung, in welchem Ausmaß die Senken derzeit und zukünftig belastet werden, beziehungsweise ob Engpässe bei der Verbringung von Abstoffen vorliegen.

Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) spricht sich im Massnahmenplan der Abfall- und Ressourcenwirtschaft aktiv für eine umfassende Bewirtschaftung des anthropogenen Stoffhaushaltes unter Berücksichtigung der Engpässe bei den Senken aus (AWEL 2014). Umwelt- und ressourcenpolitische Zielsetzungen (1. Ressourcen schonen, Ressourcen nutzen. 2. Ökoeffizienz und Energieeffizienz. 3. Optimierte Entsorgungssicherheit. 4. Schutz von Umwelt und Bevölkerung) bieten dafür eine klare Orientierung. Zur Beurteilung der Zielerreichung dienen ausgewählte Indikatoren in den einzelnen Fachbereichen. Abweichungen von den Zielvorstellungen werden somit erkannt und haben die Entwicklung von Massnahmen zur Folge.

Der Zürcher Massnahmenplan beschreibt im „Kapitel Senken und Risiken“ einzelne konkrete Herausforderungen im Umgang mit beschränkten Senkenkapazitäten (z.B. Sedimente für Kupfer und Zink, Untertagedeponien für Abfälle). Eine systematische Betrachtung der vorhandenen Senkenkapazitäten und potentieller Engpässe liegt aber bis dato nicht vor. Aus diesem Grund zielt die vorliegende Studie auf die systematische Darstellung potentieller Engpässe ab um darauf aufbauend Empfehlungen zur Überwindung dieser Engpässe zugeben. Damit wird ein Beitrag zum Erhalt der für Volkswirtschaften unverzichtbaren Senkenfunktionen zur Aufnahme unvermeidbarer Abstoffe geleistet.

## **2.2 Zielsetzung und Fragestellung**

Ziel der Studie ist die Beurteilung der Senkenbelastung, die durch die im Kt. ZH vorhandenen Abstoffflüsse (Abfälle, Abwasser, Abgase inklusive Emissionen, Erosion und Abrieb, sowie Verwitterungs- und Korrosionsprodukte) entsteht.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

- (1) Welche Senken sind vorhanden, um Abstoffe zu verbringen?
- (2) Wie groß sind die Belastungen dieser Senken durch volkswirtschaftliche Tätigkeiten und welchen Anteil hat der Sektor Abfallwirtschaft?
- (3) Sind Engpässe bei der Verbringung von Abstoffen in Senken zu erwarten?
- (4) Können allfällige Engpässe durch quellenorientierte (z.B. veränderte Prozesse bei Industrie- und Gewerbebetrieben) und oder alternative abfallwirtschaftliche Verfahren überwunden werden?

Die Fragen sollen sowohl auf der Güter- als auch exemplarisch auf der Stoffebene für ausgewählte Schwermetalle (Kupfer & Zink) bzw. organische Stoffe (DecaBDE & PAK) beantwortet werden.

### 3 Methodik

#### 3.1 Begriffsklärungen "Senke"

##### 3.1.1 Die „Senke“ als Prozess

Im Sinne der Stoffflussanalyse als Werkzeug zur Analyse regionaler Stoffhaushaltssysteme (Baccini und Brunner 2012) ist ein Materialfluss die physische Bewegung von Materialien zwischen einzelnen Prozessen (ÖWAV 2003). Ein Prozess ist räumlich und zeitlich begrenzt und erfüllt im Sinne von Formel 1 die Massenbilanzgleichung. Ein Prozess wird als "Senke" bezeichnet, wenn die Bilanzgleichung eines Prozesses einen Senkenterm  $S$  größer Null enthält.

$$0 = I - O + Q - S \qquad \text{Formel 1}$$

wobei die einzelnen Terme wie folgt entstehen:

- $I$  (=Inputterm) entsteht durch das Eintreten eines Materials in den Prozess (Prozessfunktion Input),
- $O$  (=Outputterm) entsteht durch die Ausscheidung eines Materials aus dem Prozess (Prozessfunktion Output),
- $Q$  (=Quellterm) entsteht durch den Abbau eines Materials aus einem Lagerbestand innerhalb des Prozesses (Prozessfunktion Lagerabbau) oder durch die Materialumwandlung (Prozessfunktion Transformation) von Vorläufermaterialien innerhalb des Prozesses.
- $S$  (=Senkenterm) entsteht durch die Anreicherung eines Materials innerhalb des Prozesses (Prozessfunktion Lageraufbau) oder durch die Materialumwandlung (Prozessfunktion Transformation) vorhandener Materialien innerhalb des Prozesses.

Beispiel für eine organische Stoffgruppe mit fiktiven Zahlen (Abbildung 2): Holzfeuerungen im Kt. ZH haben im Jahr 2013 einen Input von 10 t PAK/a. Davon werden 6 t PAK/a aufgrund des thermischen Prozesses mineralisiert und somit zerstört. Aufgrund von Vorläufersubstanzen im Input und den Prozessbedingungen entstehen 1 t PAK/a. Die Abstoffe, welche die Anlagen in die Atmosphäre verlassen, enthalten 5 t PAK/a.

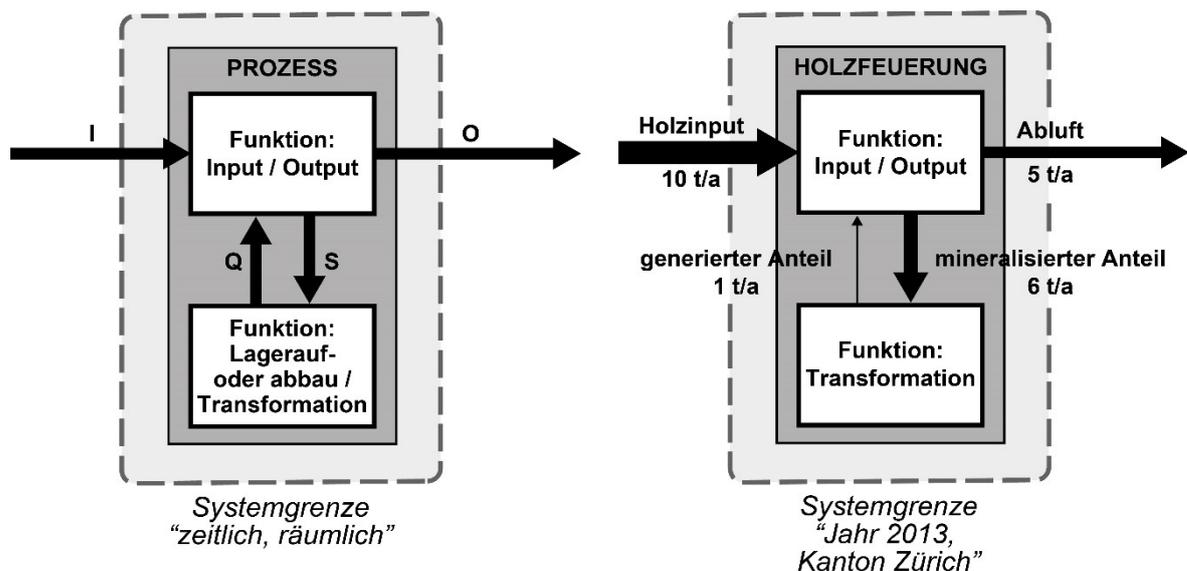


Abbildung 2: Generischer Prozess mit seinen Funktionen in einem zeitlich und räumlich definierten Materialflusssystem sowie ein fiktives Stofffluss-Beispiel für PAKs in Holzfeuerungen.

### 3.1.2 „Senken“ und ihre Klassifizierung

Die Klassifizierung der Senken erfolgt in 2 Dimensionen (Abbildung 3). Erstens, nach Lage der Senke in der Anthroposphäre oder in der Umwelt. Zweitens, nach der Verweilzeit des Materials in der Senke, wobei zwischen temporär und dauerhaft unterschieden wird. Anthropogene temporäre Senken sind Konsum- und Investitionsgüterbestände wie Gebäude oder Gegenstände, in denen Rückbaustoffe und Recyclingprodukte eingebaut wurden, oder Deponien, deren abgelagerte Abfälle in Zukunft als Sekundärrohstoff zur Verfügung stehen. Dauerhafte oder sogenannte „letzte Senken“ sind thermische Behandlungsanlagen, die organische Stoffe praktisch vollständig umwandeln oder mineralisieren, sowie Umweltmedien mit einer Verweilzeit für Stoffe von über 10'000 Jahren.

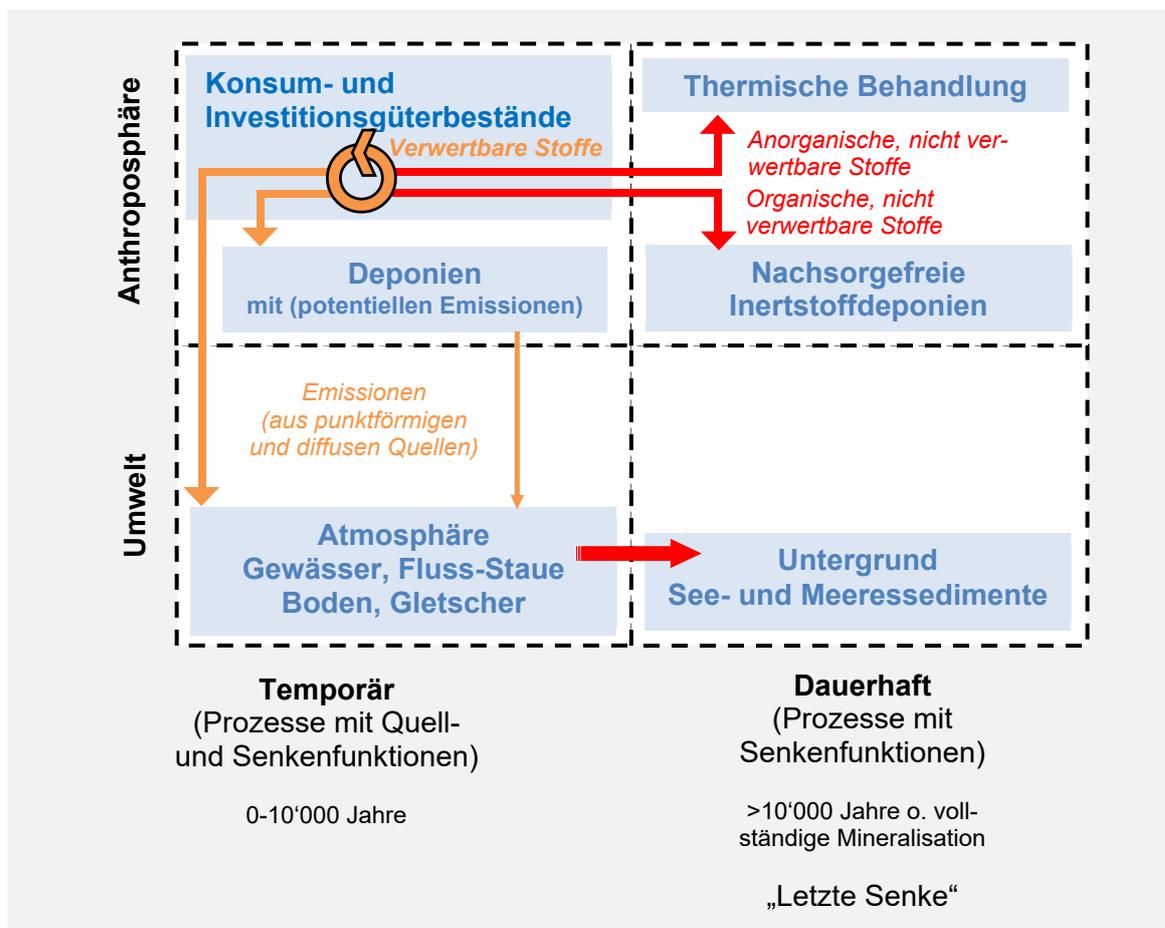


Abbildung 3: Schema zur Klassifizierung von Senken (Blau = Senken, Orange = Flüsse in temporäre Senken, Rot=Flüsse in dauerhafte Senken).

In geologischen Zeiträumen wandert jeder Stoff zu den letzten Senken in der Umwelt und stellt dann eine minimale Gefährdung für Mensch und Umwelt dar. Ansätze bestimmte Stoffe nach der Nutzung direkt dorthin zu verlagern gibt es zwar (Bsp.: Tiefenspeicher für CO<sub>2</sub> oder nukleare Abfälle), die Beurteilung der Endlagerfähigkeit der Abstoffe im Sinne einer dauerhaften Isolation innerhalb der Biogeosphäre unterliegt aber noch keinem wissenschaftlichen und gesellschaftspolitischen Konsens. Um die Umweltverträglichkeit der Abstoffe dennoch zu ermöglichen, stellt die Abfall- und Ressourcenwirtschaft sowie die Umwelt temporäre Senken zu Verfügung.

Eine Senke wird als "sicher" verstanden, wenn von einem Stoff in einer Senke keine Gefährdungen von Schutzgütern (z.B. Mensch, Tier, Biodiversität) ausgeht. Der Ansatz zur Ermittlung der sicheren Senken ist im Kapitel 3.4 Wirkungsabschätzung auf Seite 32ff dargestellt. Demnach gilt eine Senke als «sicher», wenn der Fluss in eine Senke nicht dazu führt, dass ein kritischer Schwellenwert der Konzentration eines Stoffes nicht überschritten wird.

### 3.2 Vorgangsweise zur Beurteilung der Senkenbelastung

Die Beurteilung der Senkenbelastung dient der Optimierung der Materialflüsse und abfall- und abwasserwirtschaftlichen Prozesse im Rahmen der umwelt- und ressourcenpolitischen Ziele im Kanton Zürich. Kern des methodischen Vorgehens in 5 Schritten ist ein Abstand-zum-Ziel Ansatz bei dem die aktuelle Senkenbelastung der kritischen Senkenbelastung gegenüber gestellt wird (Abbildung 4).

Die aktuelle Senkenbelastung ist das Ergebnis der Inventarisierung der Materialflüsse (Schritt 1). Die kritische Senkenbelastung leitet sich von umwelt- und ressourcenpolitischen Zielsetzungen ab. Dabei werden die Ziele mit Hilfe von Zielkriterien operationalisiert (Schritt 2a, 2b), welche in weiterer Folge der Ermittlung kritischer Flüsse dienen (Schritt 3). Um einzelne abfallwirtschaftliche Prozesse in Hinblick auf Senkenbelastung beurteilen zu können, wird eine Maßzahl - der sogenannte - Senke-Indikator  $\omega$  definiert und berechnet (Schritt 4). Dieser dividiert den aktuellen Fluss durch den kritischen Fluss. Er beschreibt die Effektivität der Abfall- und Ressourcenwirtschaft im Hinblick auf die umwelt- und ressourcenpolitischen Zielvorgaben.

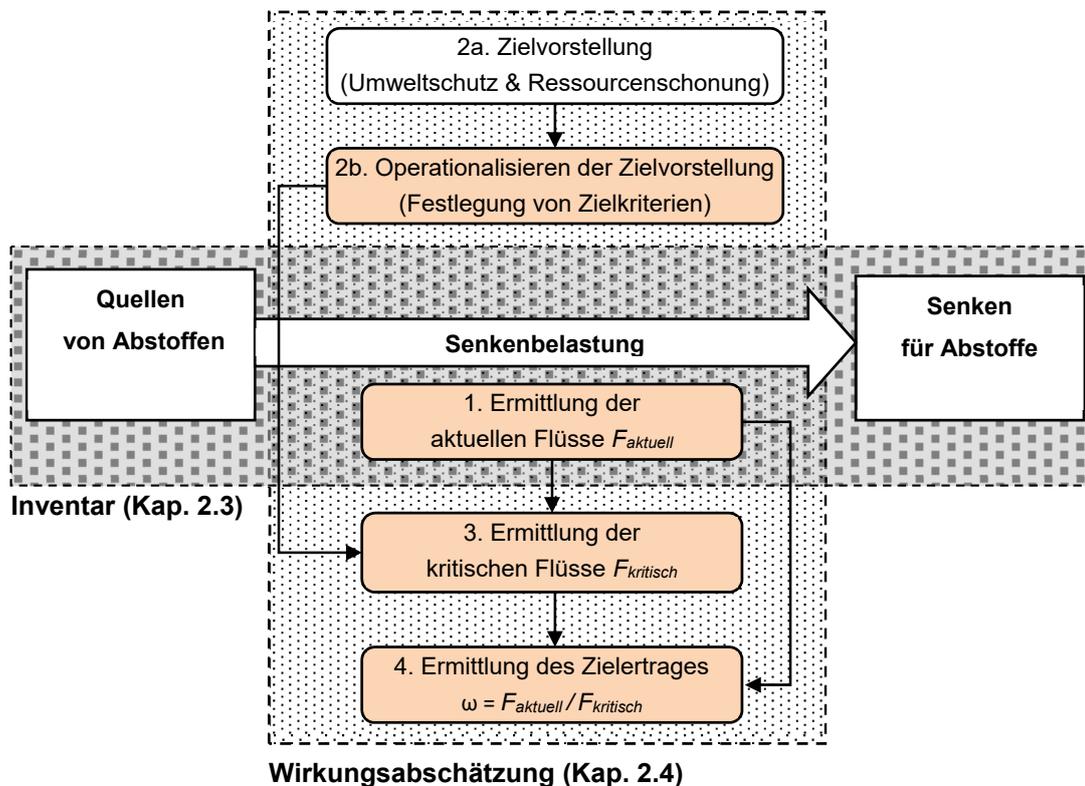


Abbildung 4: Methodischer Rahmen und Vorgehensweise zur Beurteilung der Senkenbelastung für Abstoffe, die im Kanton Zürich anfallen.

### 3.3 Inventar

Das Inventar an Materialflüssen wird mit dem Instrument „Materialflussanalyse“ erstellt. Dabei werden die Materialien (Güter und Stoffe) von der Quelle bis zur Senke erfasst und in Sankey-Diagrammen dargestellt. Die Vorgangsweise orientiert sich an der BUWAL Anleitung „Stoffflussanalyse Schweiz“ (von Schulthess und Ziegler 1996) und dem ÖWAV Regelblatt 514 zur Anwendung der Materialflussanalyse in der Abfallwirtschaft (ÖWAV 2003) bzw. dem „Practical Handbook of Material Flow Analysis“ (Brunner und Rechberger 2004). Die Durchführung der Materialflussanalyse erfolgt in 3 Schritten:

1. Erstellung der Systembilder
2. Modellbildung
3. Datenbeschaffung und Beurteilung der Datenqualität

#### 3.3.1 Systembilder

##### 3.3.1.1 Integration der Systembilder

Insgesamt gibt es bei den Systembildern 3 verschiedene Aggregationsstufen, die sich je nach Anzahl der Prozesse und Flüsse unterscheiden (Abbildung 5). Auf der untersten Stufe befindet sich das detaillierte Gesamtsystem "Produktion, Nutzung, Entsorgung" (Abbildung 10). Mit 61 Prozessen und 158 Flüssen ist es das umfangreichste Systembild (Tabelle 4). Es ist die Datengrundlage für die Aggregation der Prozesse und Flüsse der 3 Teilsysteme:

1. „Produktion / Nutzung“ (Abbildung 9)
2. „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ (Abbildung 7)
3. „Abwasserwirtschaft“ (Abbildung 8)

Das Gesamtsystem (disaggregiert) ist die Datengrundlage für die höchste Aggregationsstufe, dem *aggregierten Gesamtsystem "Produktion, Nutzung, Entsorgung"*. Mit 9 Prozessen und 17 Flüssen weist es den geringsten Grad an Komplexität auf und gibt eine kompakte Übersicht über die Materialflüsse von den Quellen zu den Senken.

**Anhang:** Das Systembild des Gesamtsystems (disaggregiert) findet sich im Anhang A.

*Tabelle 4: Charakterisierung der Systembilder anhand der Anzahl an Flüssen und Prozessen*

Systembild	Bezeichnung	N° Flüsse	N° Prozesse
Gesamtsystem (aggregiert)	„Produktion, Nutzung und Entsorgung“	17	9
Teilsysteme	„Produktion / Nutzung“	3	3
	„Abwasserwirtschaft“	26	12
	"Abfall- und Ressourcenwirtschaft"	42	13
Gesamtsystem (disaggregiert)	„Produktion, Nutzung und Entsorgung“	158	61

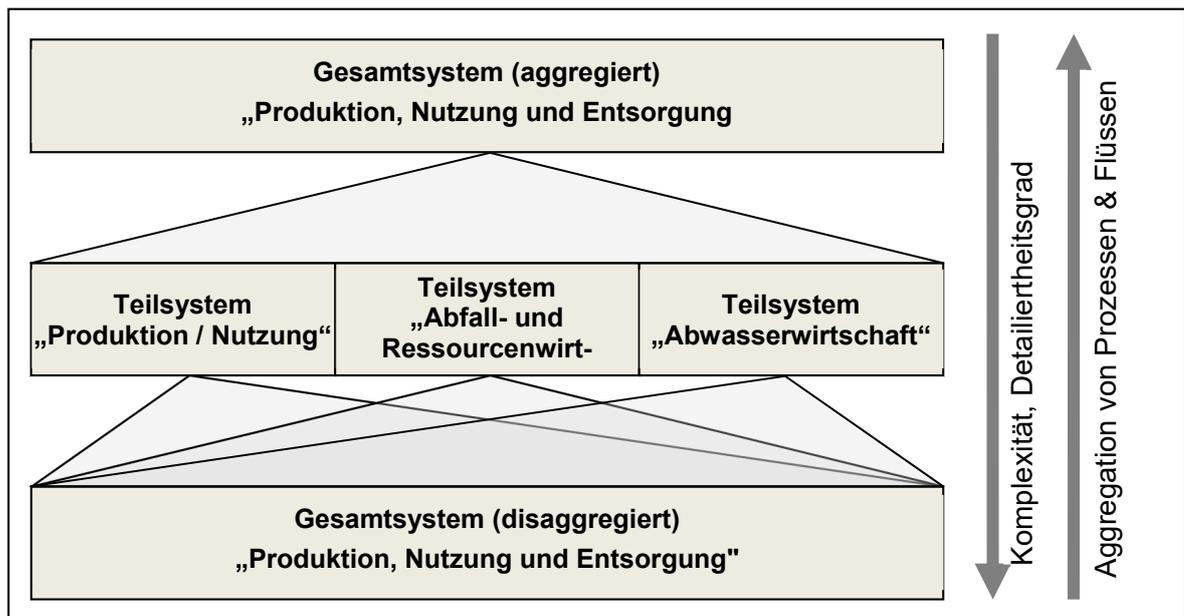


Abbildung 5: Schematischer Aufbau und Zusammenhang der einzelnen Systembilder.

Legende für Systembilder (Tabelle 5): In den Systembildern sind die Prozesse farblich hinterlegt. Grün symbolisiert Quellen, grau Transferprozesse, die physisch existieren (z.B. Sammlung), weiß Transferprozesse, die physisch nicht existieren aber als Hilfsprozess für die Modellierung oder vereinfachte Darstellung erforderlich sind, dunkelrot anthropogene Senken, und hellrot natürliche Senken. Da auf der Güterebene jeder Prozess eine Transformationsfunktion hat, wird dies generell in der farblichen Darstellung nicht berücksichtigt.

Tabelle 5: Legende für die farbliche Darstellung von Prozessen in den Systembildern.

	Quellprozesse				Transferprozesse		Senkenprozesse				
	Lagerabbau		Transform.		Güter	Stoffe	Lageraufbau		Transform.		
	Güter	Stoffe	Güter	Stoffe			Güter	Stoffe	Güter	Stoffe	
Anthropogene oder natürliche Quelle	X	X		X							
Sammlungs- und Behandlungsprozesse					X	X					
Hilfsprozess <sup>1)</sup>					X	X					
Anthropogene Senke							X	X			X
Natürliche Senke							X	X			X

Legende: <sup>1)</sup> Ein Hilfsprozess ist ein virtueller Prozess, der vereinfachten Modellentwicklung und in der Praxis physisch nicht existiert.

Gesamtsystem (aggregiert):

Abbildung 6 zeigt das Gesamtsystem „Produktion, Nutzung und Entsorgung“. Das Systembild hat den Zweck, alle im Kt. ZH existierenden Materialflüsse mit Senkenbedarf (Fluss 1, 2, 3 und 8) abzubilden. Das Angebot an Senken zur Verbringung der Materialien wird durch anthropogene Senken (III, IV, V, VI) und natürliche Senken (VII) im innerkantonalen Bereich und im Hinterland (ausserkantonaler Bereich) abgedeckt.

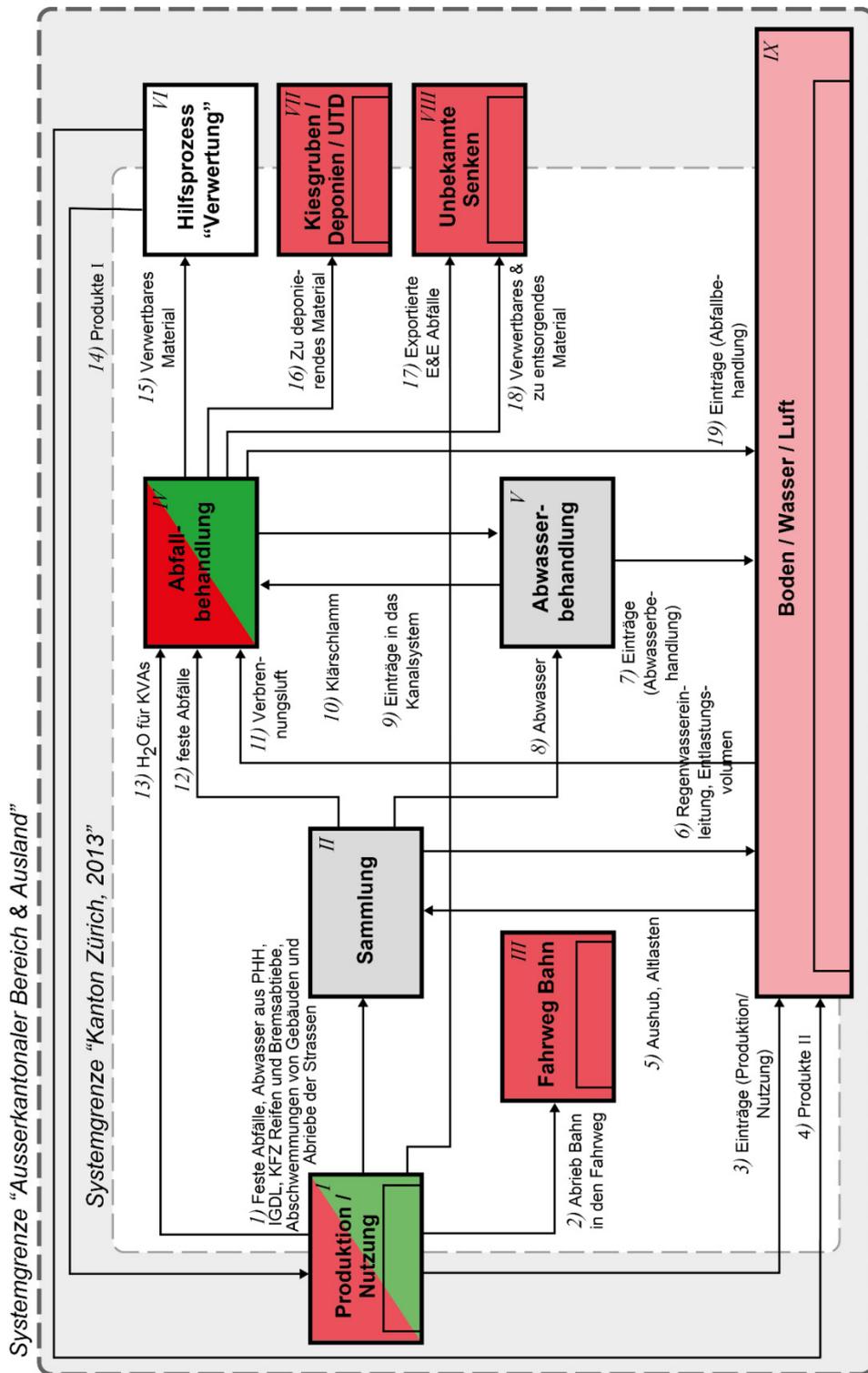


Abbildung 6: Systembild für Gesamtsystem "Produktion, Nutzung und Entsorgung".

### Räumliche und zeitliche Systemgrenze:

Die räumliche Systemgrenze (innere gestrichelte Linie) ist die administrative Grenze des Kantons Zürich. Das Hinterland beinhaltet den ausserkantonalen Bereich innerhalb der Schweiz und das Ausland. Die Prozesse innerhalb der Systemgrenze „Kanton Zürich“ werden im Sinne der Bilanzgleichungen vollständig bilanziert. Die Prozesse auf der Systemgrenze finden sich sowohl im Kt. ZH als auch im Hinterland. Sie werden nicht vollständig bilanziert. Dass Prozesse auf der Systemgrenze liegen ist dem Umstand geschuldet, dass kein regionaler Bezug aus der bestehenden Datenlage hervorgeht. Beispielweise ist unklar, wo die aus Kraftfahrzeugen ausgebauten und wiederverwendeten oder recycelten Fahrzeugteile letztendlich verbleiben.

Die zeitliche Systemgrenze bezieht sich auf ein Jahr, wobei die Daten aus unterschiedlichen Jahren stammen und allfällige Abweichungen zum Referenzjahr (2013) durch das verwendete Konzept zur Beschreibung der Unsicherheit berücksichtigt werden.

### Prozesse und Flüsse

Das Systembild geht vom Bedarf und Angebot an Senken aus.

- Bedarf an Senken besteht für alle im Kanton vorhanden Abstoffe (fest, flüssig, gasförmig). Sie stammen aus inner- und ausserkantonalen, primären und sekundären Quellen sowie aus der Anthroposphäre und der Umwelt.
- Das Angebot an Senken, auf das der Kt. ZH zur Verbringung der Abstoffe zurückgreift, erstreckt sich sowohl auf inner- und ausserkantonale Senken als auch auf anthropogene und natürliche Senken. Ob ein Prozess eine Senke ist, hängt vom betrachteten Stoff und dessen Eigenschaften ab. So ist beispielweise eine Verbrennungsanlage eine Senke für die organische Stoffgruppe Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Transformationsprozess), aber keine Senke für Kupfer (Transportprozess). Die Deponie hingegen ist eine Senke für Kupfer (Akkumulationsprozess), die allerdings bei Betrachtung längerer Zeiträume zur Quelle werden kann (Kupfer im Sickerwasser, resp. „Landfill-Mining“). Auf der Güterebene werden nur jene Prozesse als Senke bezeichnet, in denen Güter akkumulieren.

Tabelle 6 bzw. Tabelle 7 enthalten eine Kurzcharakteristik der Prozesse bzw. Flüsse

*Tabelle 6: Beschreibung der Prozesse.*

N°	Kurzcharakteristik
I	Die Produktion- und Nutzungsphase im inner- und ausserkantonalen Bereich hat sowohl eine Quellen- als auch Senkenfunktion: <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Quellenfunktion: Vom ausserkantonalen Bereich (akB) werden Abfälle aus Primär- und Sekundärquellen berücksichtigt, die in den Kt. ZH gelangen und dort behandelt werden. Importierte Recyclinggüter sind nicht berücksichtigt. Vom innerkantonalen</li> </ol>

Bereich (ikB) werden Primärquellen in allen Sektoren der Volkswirtschaft berücksichtigt (z.B.: Haushalte, Industrie und Gewerbe, Verkehr, Landwirtschaft). Das sind a) Feste Primärabfälle wie z.B. Siedlungsabfälle (Kehricht, Separatabfälle, Strassenabfälle), Bauabfälle, Bodenaushub, diverse Abfälle, Rückstände aus der Industrie. b) Flüssige Abfälle wie Abwasser aus Haushalten, Gewerbe und Industrie, Oberflächenwasser von versiegelten Flächen. c) Gasförmige Abfälle wie Abgas aus Verbrennungs- und Vergärungsprozessen inklusive Luftemissionen. d) Diffuse Stoffflüsse aufgrund dissipativer Anwendungen (z.B. Dünger auf landwirtschaftlichen Boden) e) Abriebs-, Korrosions- und Verwitterungsprodukte aus dem Schienen- und Straßenverkehr und von Gebäuden. f) Altlasten von belasteten Standorten.

- b) Senkenfunktion: Der Prozess ist auch eine Senke (Gebäude und Infrastruktur, Konsumgüterbestand), v.a. für die Abfall- und Ressourcenwirtschaft, die verwertbare Abfälle in die Produktion (z.B. Schrott, Ersatzbrennstoffe, Altreifengranulat) und als Produkt weiter in die Nutzung (z.B. Zementklinker) oder direkt in die Nutzungsphase (z.B. Rückbaustoffe) schickt.
- II Sammlung von festen Abfällen wie innerkantonale Primärabfälle und importierte Abfälle aus dem ausserkantonalen Bereich und dem Ausland.  
Sammlung von Niederschlags- und Trockenwetterfrachten sowie Abrieben aus dem KFZ Verkehr durch Trenn- und Mischkanalisation.
- III Fahrweg Schienenverkehr (Gleisschotter, Unterbauplanum, Sicker- bzw. Verdunstungsbekken entlang von Eisenbahntrassen): Der Gleiskörper bzw. Entwässerungsanlagen können Stoffe zurückhalten, welche durch Abriebe der Oberleitung (Kupfer) und der Bremsbeläge eingetragen werden. (Anmerkung: Die Emissionen des Strassenverkehrs sind in der Modellbildung ebenfalls berücksichtigt. Die Fahrweg Strasse ist aber keine Senke, da die Einträge auf die Strassenoberfläche innerhalb des betrachteten Jahres weitertransportiert werden und in weiterer Folge in das Strassenbankett (Senke Boden) bzw. über das Entwässerungssystem in die Kläranlage und weiter in den Vorfluter (Senke Oberflächengewässer inkl. Sedimente) bzw. über den Klärschlamm und dessen Verbrennung via Asche in die Deponie (Senke Deponie) gelangen).
- IV Behandlung fester Abfälle durch abfallwirtschaftliche Behandlungsanlagen innerhalb des Kt. ZH sowie im ausserkantonalen Bereich (Kehrichtverbrennungsanlagen, Sonderabfallverbrennungsanlagen, Behandlung und Verfestigung von Rauchgasreinigungsrückständen, Behandlung der Rohschlacke, Zementwerke, Shredderanlagen für Altfahrzeuge, Triage und Aufbereitung von Rückbaustoffen/Bauabfällen (RBS/BA), Triage von Aushubmaterial, Triage und Feuerung von Alt- und Restholz, Aufbereitung von Separatabfall, Kompostier- und Vergärungsanlagen, Triage/Behandlung von Altlasten, Triage von Altfahrzeugen)
- V Behandlung von Abwasser im innerkantonalen Bereich (Abwasserreinigungsanlagen).
- VI Stoffliche Verwertung im inner- und ausserkantonalen Bereich. Der Prozess kommt physisch in der Praxis nicht vor. Er dient lediglich als Hilfe, um die verwertbaren Materialien aus Abfallbehandlungsanlagen auf den Prozess „Produktion / Nutzung“ und Umwelt zu verteilen.
- VII Kiesgruben und Deponien im inner- und ausserkantonalen Bereich, Untertagedeponien im Ausland.

VIII Unbekannte Senken sind Prozesse, wo zwar der Input bekannt ist, aber die genaue Bezeichnung des Zielprozesses nicht bekannt ist. Beispiel: Nutzung, Verwertung oder Entsorgung von exportierten Altfahrzeugen in das Ausland.

IX Wasser (Fließgewässer, Stehende Gewässer inklusive der Sedimente): Fließgewässer nehmen sowohl die Emissionen der Direkteinleiter (z.B.: Kläranlagen) als auch flüchtige Stoffeinträge (z.B.: aus der Landwirtschaft, Verkehr) auf.

Flusssedimente nehmen Stoffe auf, wobei im Kt. ZH vor allem Kupfer und Zink aufgrund der Akkumulationsraten von Relevanz sind (Känel, Steinmann et al. 2012). Seesedimente nehmen einerseits Stoffe auf, die über den Oberlauf in den See eingebracht werden, andererseits werden die Stoffe über Direkteinleitungen und Oberflächenabfluss im ufernahen Bereich eingetragen (z.B. Boller, Steiner et al. 2009)

Luft: Die Luft nimmt Abgase von Verbrennungsprozessen und Abriebe aus dem Verkehr auf.

Boden ( Stadtböden, Böden entlang von Eisenbahnstrecken, Strassenbankette, Wein- und Obstbaugebiete, Agrarböden, Waldböden): Die flächenhaften Stoffeinträge über die Deposition werden durch anthropogenen Einträge in besonders exponierten Flächen überlagert. Die Austräge erfolgen über Ernteentzug, Bodenerosion und Transport in unterliegende Bodenschichten. Die Akkumulation ist standortspezifisch.

---

*Tabelle 7: Beschreibung der Materialflüsse.*

N°	Kurzcharakteristik
1	Primärabfälle, Trockenwetterfrachten und dissipative Emissionen von der innerkantonalen Volkswirtschaft sowie importierte Primär- und Sekundärabfälle von der ausserkantonalen Abfallwirtschaft. Abriebe, Korrosion- und Verwitterungsprodukte aus der Nutzungsphase (z.B. KFZ Abriebe auf versiegelte Oberflächen) in das Kanalsystem, Abflusswirksamer Niederschlag auf versiegelte Flächen in das Kanalsystem.
2	Abriebe der Bahn in deren Fahrweg.
3	Direkte Einträge in natürliche Senken. Beispiel: Abgas von Verbrennungsprozessen, Abschwemmung von versiegelten Oberflächen in den Boden inkl. der Abriebe aus dem Strassenverkehr, Einträge aus der Landwirtschaft in Boden (z.B. Dünger in der Landwirtschaft).
4	Die Einträge die Umwelt beinhalten Produkte aus dem Verwertungsprozess (z. B: Bodenaushub, Gärgülle).
5	Material aus Boden und Untergrund (A-, B- und C-Horizont) inkl. Altlasten
6	Der Fluss beinhaltet die gesammelten Wässer, die als Regenwassereinleitung vom Trennsystem und als Entlastungsvolumen aus der Mischwasserkanalisation (=Überlauf) in die Vorfluter münden.
7	Gereinigtes Abwasser von Abwasserreinigungsanlagen im innerkantonalen Bereich.
8	Abwasser, dass den Abwasserreinigungsanlagen zugeführt wird.
9	Einträge in das Kanalsystem aufgrund der Behandlung von Strassenabfällen.
10	Klärschlamm aus Abwasserreinigungsanlagen im innerkantonalen Bereich.
11	Verbrennungsluft für KVA's.

- 12 Feste Abfälle die einer Behandlungsanlage im inner- und ausserkantonalen Bereich zugeführt werden.
  - 13 Wasser für die Rauchgasreinigung und Abkühlung der Schlacke (Nassaustrag) in Kehrichtverbrennungsanlagen.
  - 14 Produkte, die aufgrund der Behandlung, Aufbereitung von und Verwertung von Abfällen entstehen und der Produktion- und Nutzungsphase im inner- und ausserkantonalen Bereich zugeführt werden.
  - 15 Verwertungsprozessen zugeführte Abfälle.
  - 16 Abfälle die Entsorgungsprozessen (Kiesgruben, Deponien, Untertagedeponien) zugeführt werden.
  - 17 Direkt von den Nutzern exportierte Elektro- und Elektroabfälle.
  - 18 Verwertbares oder zu entsorgendes Material, wo der Fluss bekannt ist, aber keine nähren Informationen über den Zielprozess (Bsp.: Altlasten mit grauer Entsorgung)
  - 19 Einträge in die Umwelt von abfallwirtschaftlichen Behandlungsanlagen (z.B. Abgas aus KVAs).
-

### 3.3.1.2 Teilsysteme (aggregiert)

Um den Anteil der "Abfall- und Ressourcenwirtschaft" an der gesamten Senkenbelastung darzustellen, werden für jedes Teilsystem eigene Systembilder erstellt (Abbildung 7 bis Abbildung 9) und die Flüsse auf Güter- und Stoffebene quantifiziert. Datengrundlage für die Quantifizierung der Flüsse ist das detaillierte Gesamtsystem.

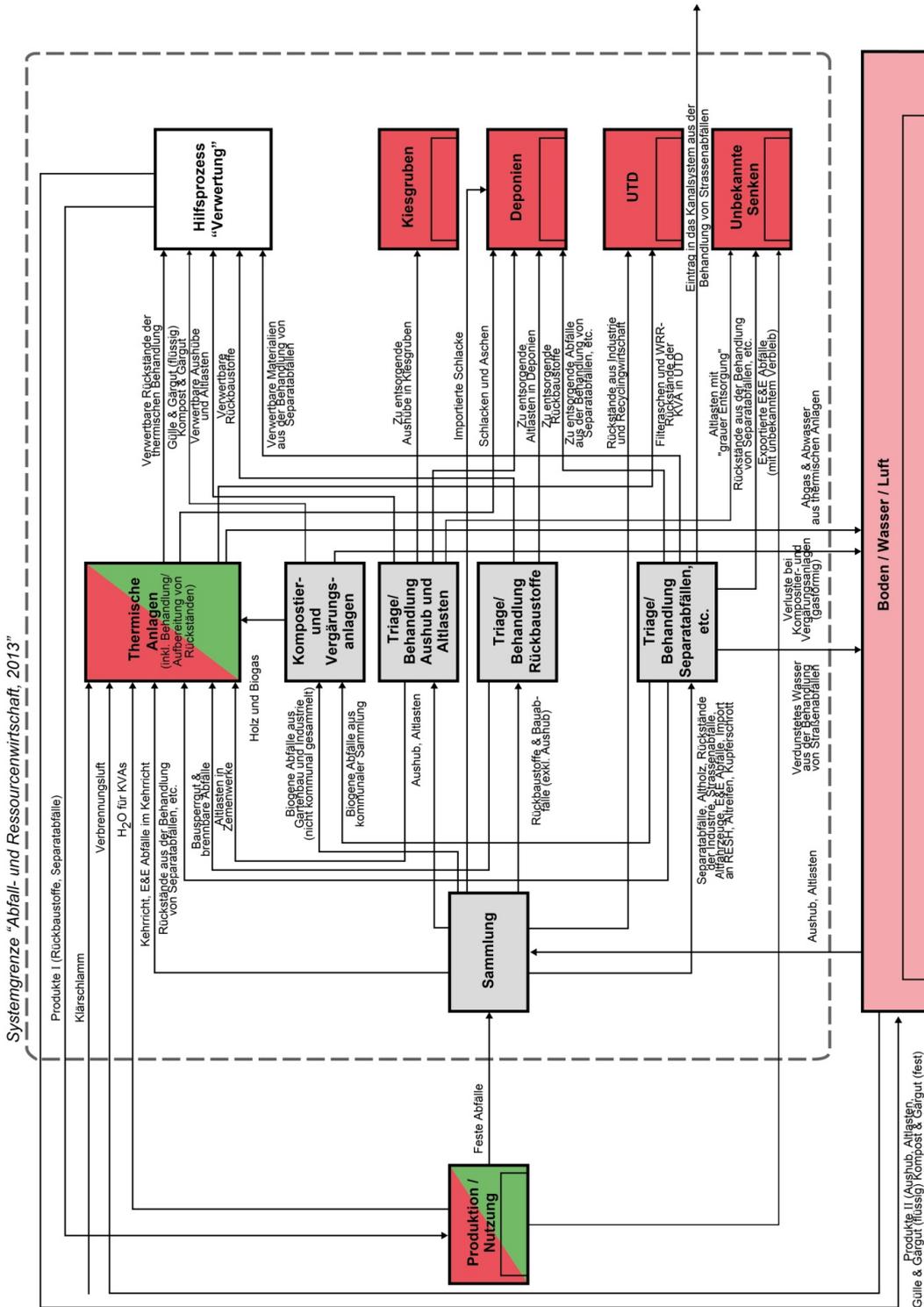


Abbildung 7: Systembild für das Teilsystem " Abfall- und Ressourcenwirtschaft"

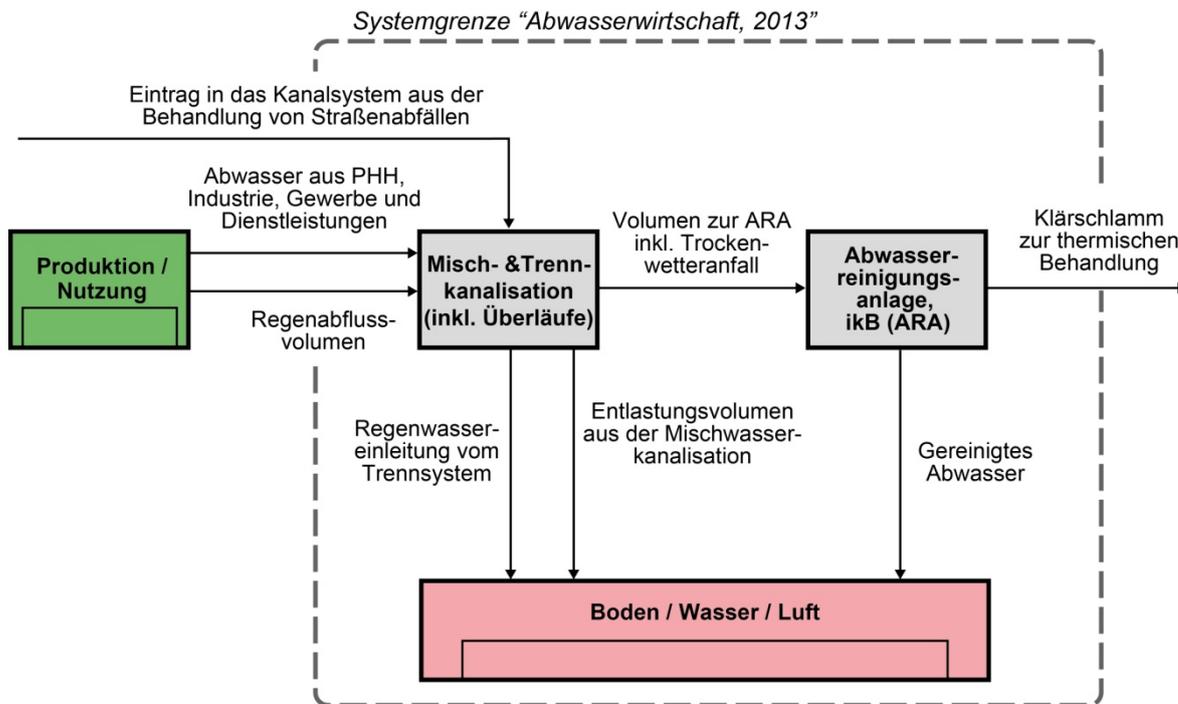


Abbildung 8: Systembild für das Teilsystem "Abwasserwirtschaft"

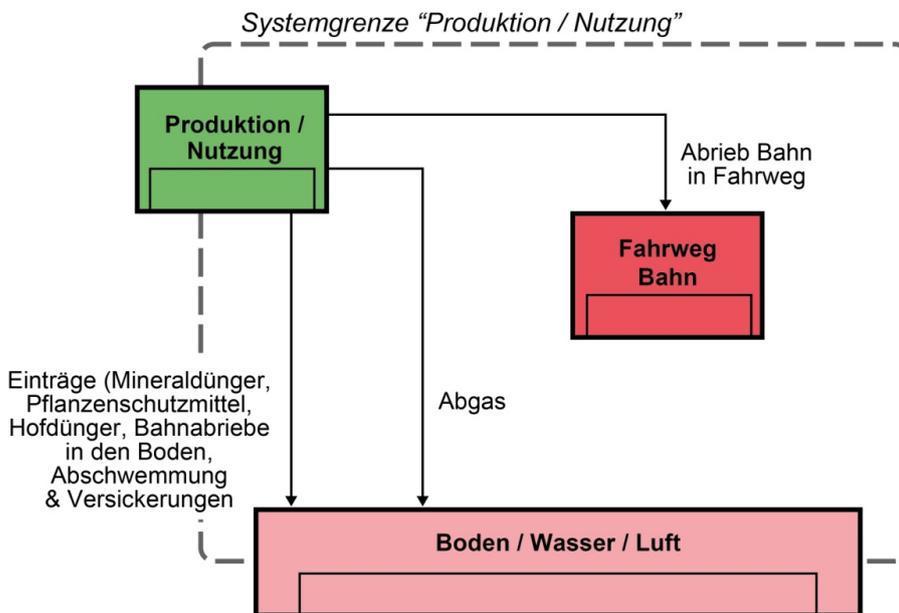


Abbildung 9: Systembild für das Teilsystem "Produktion / Nutzung".

### 3.3.1.3 Gesamtsystem (disaggregiert)

Das detaillierte Gesamtsystem (Abbildung 10) geht vom Bedarf und Angebot an Senken aus. Es berücksichtigt alle im Kt. ZH vorhandenen Abstoffe mit Senkenbedarf und bildet ihr Schicksal auf dem Weg zu den Senken auf.

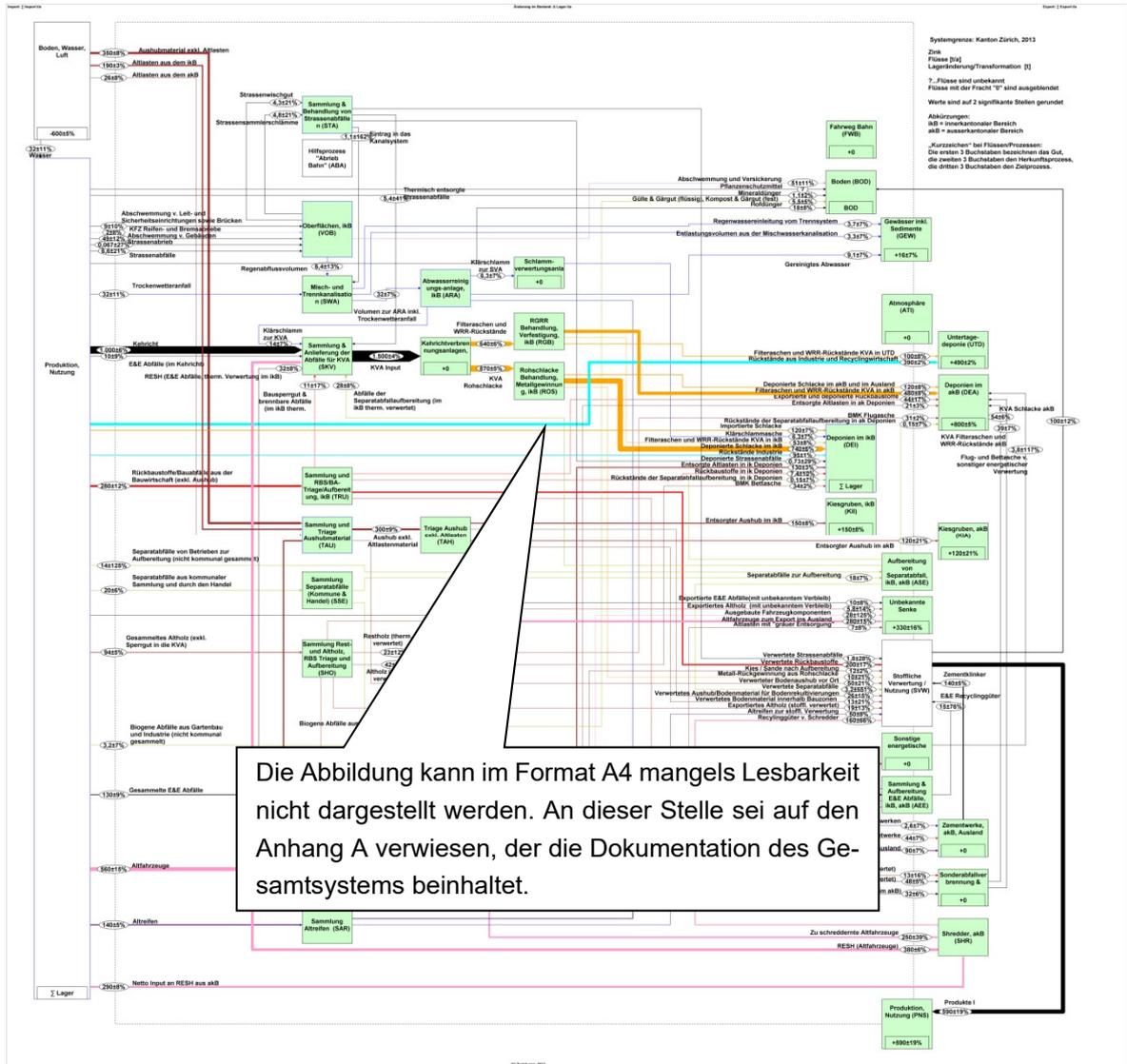


Abbildung 10: Systembild für das Gesamtsystem (disaggregiert).

### 3.3.2 Modellbildung

#### 3.3.2.1 Modellgleichungen

Die Modellgleichungen beschreiben die Flüsse im Gesamtsystem (disaggregiert) als normalverteilte Größen, wobei  $\dot{m}_i$  der Erwartungswert des in Masse pro Zeit ist und  $VarK_i$  der Variationskoeffizient von  $Fluss_i$  ist (Formel 2).

$$Fluss_i = f(\dot{m}_i, VarK_i) \quad \text{Formel 2}$$

$$\dot{m}_i = f(p_{i,1}, p_{i,2}, p_{i,3} \dots, p_{i,j}) \quad \text{Formel 3}$$

Im "Gesamtsystem (disaggregiert)" hat jeder Fluss ein Kurzzeichen  $i$ , das mit den ersten 3 Buchstaben den Materialfluss bezeichnet, mit den zweiten 3 Buchstaben den Herkunftsprozess und die dritten und letzten 3 Buchstaben den Zielprozess. Die Inputparameter  $p_j$  dienen der Berechnung des Erwartungswertes, wobei  $j$  ein laufender Index ist.

Beispiel: Berechnung des Erwartungswertes  $\dot{m}_i$  für die Klärschlammfracht (KLS) vom Herkunftsprozess "Abwasserreinigungsanlage (ARA)" zum Zielprozess "Zementwerk (ZEW)".

Tabelle 8: Inputparameter zur Berechnung des Erwartungswertes der Klärschlammfracht.

j	Bezeichnung des Inputparameters	Inputparameter
1	Gesamtanfall Klärschlamm	$p_{KLS\ ARAZEW,1} = 89'000\ \text{t/a}$
2	Anteil, der im Zementwerk behandelt wird	$p_{KLS\ ARAZEW,2} = 0,11$

$$p_{KLS\ ARAZEW} = 89'000\ \text{t/a} * 0,11 = 9'970\ \text{t/a}$$

Der Variationskoeffizient  $VarK_i$  ist das relative Streuungsmaß des normalverteilten Flusses  $i$  und wird in Kap. 3.3.2.2 "Datenqualität und Unsicherheiten" beschrieben.

#### 3.3.2.2 Datenqualität und Unsicherheiten

Die Unsicherheitsbetrachtung dient zur Ermittlung der quantitativen Unsicherheit des Indikator-Mittelwertes (siehe Kap. 3.4.4, S. 38) anzugeben.

**Anhang:** Datenqualität und Unsicherheiten wurden für das Gesamtsystem (disaggregiert) festgelegt. Die Dokumentation findet sich im Anhang C.

Die Beurteilung der Datenqualität und der Unsicherheit erfolgt nach dem Konzept von Laner, Feketitsch et al. (2015) in zwei Schritten:

##### 1. Datenqualität:

Die Datenqualität wird für jeden Fluss anhand von fünf festgelegten Kategorien mittels einer Punktezahl von 1 bis 4 qualitativ beurteilt (Tabelle 9 für voneinander unabhängige

Inputparameter und Tabelle 10 für Expertenschätzungen). Bei den Inputparametern werden in Abwandlung zum Konzept von Laner, Feketitsch et al. (2015) nicht die einzelnen Inputparameter (z.B.: Emissionsfaktor und funktionelle Einheit), durch deren Verrechnung der eigentliche Fluss (z.B. Emissionsfracht) bestimmt wird, beurteilt, sondern das gesamte Set an signifikanten Inputparametern für den jeweiligen Fluss. Die vereinfachte Vorgangsweise wird durch den stark reduzierten Aufwand gerechtfertigt<sup>1</sup>. Zusätzlich zu den Punktezahlen werden bei den Kategorien II bis IV die Sensitivitäten der signifikanten Inputparameter in Hinblick auf den Mittelwert des jeweiligen Flusses qualitativ beurteilt.

Beispiel für Kupfer im Zulauf der Kläranlage: Zur Ermittlung des Flusses gibt es 4 *Inputparameter*:

- (1) Die *Transferkoeffizienten für Schwermetalle in einer Abwasserreinigungsanlage* im Kt. ZH wurden im Jahr 1995 durch Probenahme und chemische Analytik anhand von stündlichen Einzelmessungen über einen Zeitraum von einem Monat in den Outputflüssen der Anlage (gereinigtes Abwasser, Klärschlamm) gemessen. Die Vorgangsweise und die Ergebnisse sind in einem öffentlich zugänglichen Bericht dokumentiert.
- (2) Die *jährliche Fracht an gereinigtem Abwasser*, welche in statistischen Jahrbüchern öffentlich einsehbar ist.
- (3) Die mit chemischen Analysen im Betrachtungsjahr 2013 gemessenen *Schwermetallkonzentrationen in der Klärschlammasche*.
- (4) Der *Trockensubstanzgehalt* des Klärschlammes wird routinemässig in der Kläranalyse ermittelt.

Die Datenqualität wird wie folgt beurteilt:

Kat.	Pkt.	Sensitivität	Begründung
I	1	-	Die Methode der Datengenerierung ist gut dokumentiert und nachvollziehbar. Es handelt sich um qualitätsgesicherte Daten.
II	2	Hoch	Die Inputparameter erlauben keine vollständige Berechnung des Flusses, da die Messungen der Schwermetallkonzentrationen eventuell nicht repräsentativ sind und den Schwermetallfluss somit entweder unter- oder überschätzen. Das Ausmass einer potentiellen Abweichung wird mit 20 Prozentpunkten abgeschätzt. Die Sensitivität der Inputparameter auf den Mittelwert des Flusses wird als hoch beurteilt, weil ein linearer Zusammenhang zwischen den Inputparametern und dem gesuchten Mittelwert besteht.

<sup>1</sup> Der Nutzen einer Inputparameter-spezifischen Betrachtung ergibt sich z.B. wenn eine Inputparameter-spezifischen Sensitivitätsbetrachtung durchgeführt wird. Diese wird in der Studie allerdings nicht angestrebt. In diesem Fall müssten, unter der konservativen Annahme von 3 Inputparametern je Fluss, für die Güter, Kupfer, Zink, PAK und DecaBDE Ebene insgesamt rund 2'400 Inputparameter qualitativ beurteilt werden.

III	4	Mittel	Die Bestimmung der Transferkoeffizienten liegt > 10 Jahre zurück. Die Sensitivität wird als "mittel" beurteilt, da die Transferkoeffizienten aufgrund aktueller Untersuchungen ähnlich sind.
IV	1	Mittel	Die Inputparameter wurden bei einer Anlage bestimmt, die innerhalb der räumlichen Systemgrenze (Kt. ZH) der Studie liegt. Den Inputparametern wird eine "mittlere" Sensitivität zugeschrieben, da aufgrund der geografischen Lage innerhalb des Untersuchungsgebietes (Stadt vs. Land) Abweichungen einzelner Inputparameter auftreten können.
V	2	Mittel	Die Inputparameter stammen von einer Technologie (ARA), die mit jener in der Studie vergleichbar ist. Die Signifikanz der Technologie wird als "mittel" eingestuft, da die Abwasserreinigungsverfahren von Anlage zu Anlage variieren und damit auch Unterschiede in den Transferkoeffizienten. möglich sind.

---

**2. Unsicherheiten:**

Um auf den Variationskoeffizienten<sup>2</sup> des gesuchten Flusses  $VarK_i$  zu kommen, werden die Variationskoeffizienten der einzelnen Kategorien  $VarK_{I-V}$  mit dem Gausschen Fehlerfortpflanzungsgesetz laut Formel 4 aufsummiert. Die Variationskoeffizienten  $VarK_{I-V}$  ergeben sich durch die Exponentialfunktionen (Abbildung 11), welche als Funktion der Punktezahlen 1 – 4 in Abhängigkeit von der jeweiligen Kategorie und den Sensitivitäten definiert ist.

$$VarK_i = \sqrt{VarK_I^2 + VarK_{II}^2 + VarK_{III}^2 + VarK_{IV}^2 + VarK_V^2} \quad \text{Formel 4}$$

Beispiel für Kupfer im Zulauf der Kläranlage: Der VarK ergibt sich für jede Kategorie laut Abbildung 11 wie folgt:

Kat.	Pkt.	Sens.	VarK <sub>I-V</sub> [%]
I	1	-	2.3
II	2	Hoch	4.5
III	4	Mittel	20.6
IV	1	Mittel	0.0
V	2	Mittel	2.3

Der VarK für den gesuchten Fluss ergibt sich zu:

$$\sqrt{2.3^2 + 4.5^2 + 20.6^2 + 0.0^2 + 2.3^2} = 21\%$$

---

<sup>2</sup> Der Variationskoeffizient VarK ist eine statistische Kenngröße der deskriptiven Statistik und bezeichnet ein relatives Streuungsmaß.

Tabelle 9: Festlegung der Datenqualität und qualitative Beurteilungskriterien für die Anwendung der Punktzahlen 1 bis 4.

N°	Kategorie	Definition	Punktzahl: 1	Punktzahl: 2	Punktzahl: 3	Punktzahl: 4
I	Zuverlässigkeit	Fokus auf die Datenquelle: Dokumentation der Datengenerierung der Inputparameter. Bsp.: Beurteilung der Probenahme, Verifizierung der Methode.	Die Methode der Datengenerierung ist gut dokumentiert und nachvollziehbar. Es handelt sich um qualitätsgesicherte Daten.	Die Methode der Datengenerierung ist vorhanden, aber intransparent.	Die Methode der Datengenerierung ist nicht vollständig beschrieben.	Die Methode der Datengenerierung ist nicht vorhanden und dokumentiert.
II	Vollständigkeit	Ausmass, mit dem die Inputparameter den gesuchten Fluss mengenmäßig abbilden können. Mögliche Unter- und Überschätzungen werden beurteilt.	Die Inputparameter erlauben eine mengenmäßig vollständige Berechnung des Flusses.	Die Inputparameter erlauben keine vollständige Berechnung des Flusses; es wird ein Anteil von rund 80-120% erfasst. Es liegt eine geringfügige Unter- oder Überschätzung vor.	Die Inputparameter erlauben keine vollständige Berechnung des Flusses; es wird ein Anteil von rund 50-150% erfasst. Es liegt eine deutliche Unter- oder Überschätzung vor.	Die Inputparameter erlauben keine vollständige Berechnung des Flusses; es wird ein Anteil von <50% bzw. >150% erfasst. Es liegt eine starke Unter- oder Überschätzung vor.
III	Zeitliche Korrelation	Übereinstimmung der vorhandenen Inputparameter mit den idealen Inputparametern in Bezug zur zeitlichen Systemgrenze.	Starke Übereinstimmung, da sich alle Inputparameter auf die ideale, zeitliche Systemgrenze beziehen.	Ausgeprägte Übereinstimmung, da bei den signifikanten Inputparametern eine Abweichung von 1 - 5 Jahren vorliegt.	Schwache Übereinstimmung, da bei den signifikanten Inputparametern eine Abweichung von 5 - 10 Jahren vorliegt.	Schwache Übereinstimmung, da bei den signifikanten Inputparametern eine Abweichung von >10 Jahren vorliegt.
IV	Geografische Korrelation	Übereinstimmung der vorhandenen Inputparameter mit den idealen Inputparametern in Bezug zur geografischen Systemgrenze.	Starke Übereinstimmung, da sich alle Inputparameter auf die ideale räumliche Systemgrenze beziehen.	Ausgeprägte Übereinstimmung, da sich die signifikanten Inputparameter auf eine Region mit sozio-ökonomisch vergleichbaren Daten (z.B. Bruttosozialprodukt, Konsummuster) beziehen.	Schwache Übereinstimmung, da sich die signifikanten Inputparameter auf eine Region mit kaum vergleichbaren sozio-ökonomischen Daten beziehen.	Keine Übereinstimmung, da sich die signifikanten Inputparameter auf eine Region mit nicht vergleichbaren sozio-ökonomischen Daten beziehen.
V	Andere Korrelation	Übereinstimmung der vorhandenen Parameter mit den idealen Parametern zu einem Produkt, einer Technologie oder anderem.	Starke Übereinstimmung, da sich alle Inputparameter auf das gleiche Produkt, die gleiche Technologie, etc. beziehen.	Ausgeprägte Übereinstimmung, da sich signifikante Inputparameter auf ein ähnliches Produkt, eine ähnliche Technologie, etc. beziehen.	Schwach Übereinstimmung, da sich signifikante Inputparameter auf ein deutlich unterschiedliches Produkt, eine deutlich unterschiedliche Technologie, etc. beziehen.	Keine Übereinstimmung, da sich signifikante Inputparameter auf ein völlig anderes Produkt, eine völlig andere Technologie, etc. beziehen.

Tabelle 10: Zuverlässigkeit von Expertenschätzungen und qualitative Beurteilungskriterien für die Anwendung der Punktzahlen 1 bis 4.

Punktzahl: 1	Punktzahl: 2	Punktzahl: 3	Punktzahl: 4
Formelle Datenerhebung durch Experten mit (empirischer) Datenbasis; Transparente Erhebungsmethode und vollständig informierten Experten.	Strukturierte Expertenschätzung auf Basis zahlreicher empirischer Daten oder transparenter Konsensfindungsprozesse mit gut informierten Experten.	Expertenschätzung mit beschränkter Dokumentation und ohne empirische Daten.	Expertenschätzung basierend auf spekulativen oder nicht verifizierbaren Annahmen.

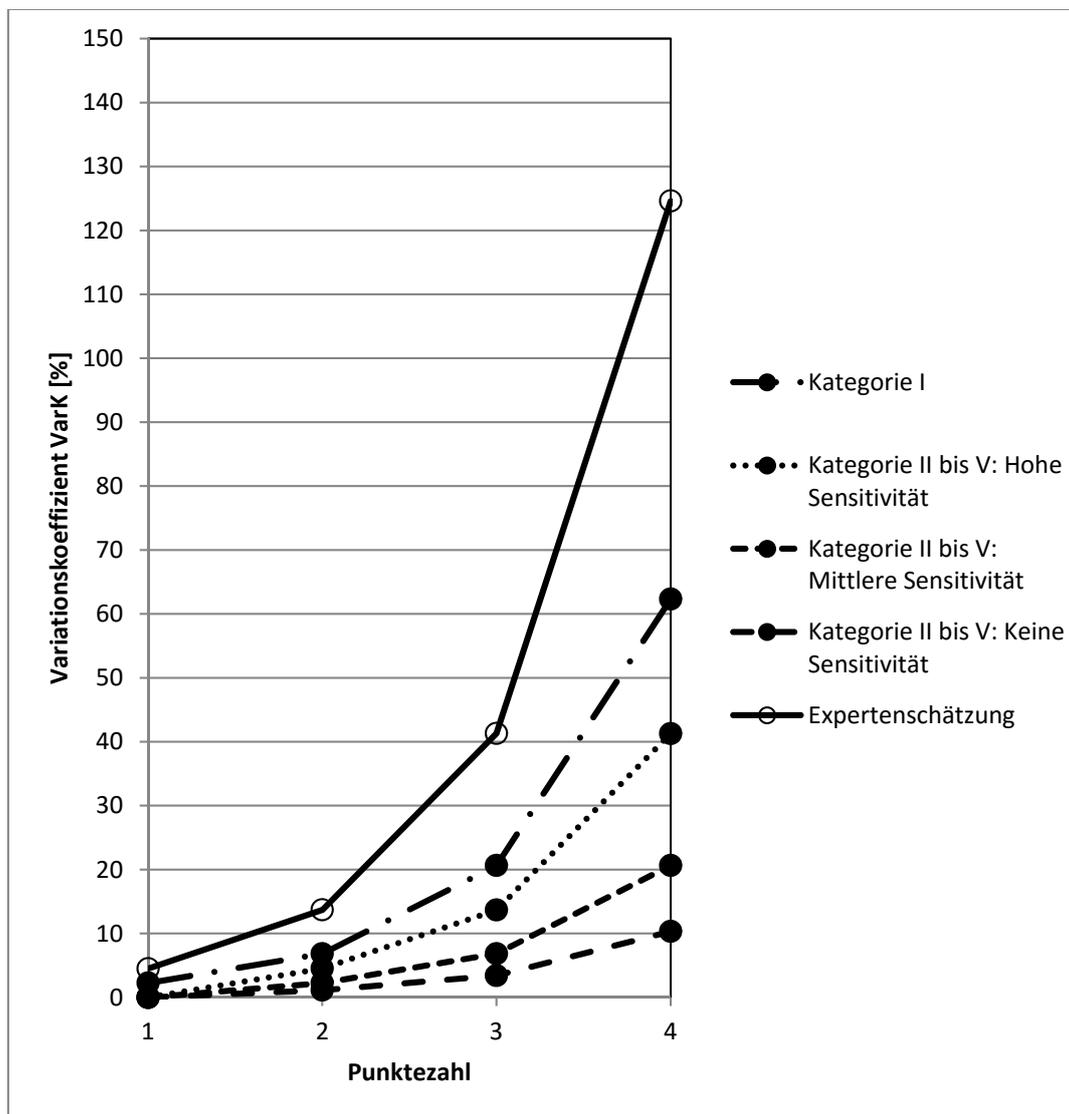


Abbildung 11: Exponentialfunktionen zur Interpretation der Punktezahl der qualitativen Beurteilungskriterien mittels Variationskoeffizienten

**Anhang:** Datenqualität und Unsicherheiten wurden für das Gesamtsystem (disaggregiert) festgelegt. Die Dokumentation findet sich im Anhang C.

### 3.3.2.3 Bilanzgleichungen

Die Bilanzgleichung (Formel 1) gilt für jeden Prozess innerhalb der Systemgrenze. Prozesse auf der Systemgrenze konnten mangels Information nicht eindeutig geografisch zugeordnet werden und werden nicht vollständig bilanziert. Prozesse ausserhalb der Systemgrenze liegen ausserhalb des Kt. ZH im ausserkantonalen Bereich oder im Ausland, und werden nicht vollständig bilanziert.

### 3.3.3 Datenbeschaffung und Datenquellen

Die Datenbeschaffung dient der Quantifizierung der Modellgleichungen im detaillierten Gesamtsystem. Es wurde ein Bottom-up-Ansatz verfolgt, bei dem für jeden einzelnen Fluss bzw. Prozess verfügbare Daten recherchiert wurden. Es wurde ausschließlich auf Sekundärdaten zurückgegriffen, wie zum Beispiel:

- Interne Daten des AWEL (z.B. Altlastendatenbank, Daten zu Kehrichtverbrennungsanlagen im Kt. ZH, Transferkoeffizienten für Schwermetalle in Abwasserreinigungsanlagen)
- Expertenschätzungen von MitarbeiterInnen des AWEL
- Amtliche Statistiken (z.B. Areal-Statistik, Länge des SBB-Schienennetzes, Einsatz von Pflanzenschutzmitteln)
- Berichte von Branchenverbänden (z.B. Stiftung Autorecycling Schweiz, SWICO)
- Literaturdaten
- Güter- und Stoffbilanzen in der Schweiz (z.B. Bader, Scheidegger et al. 2011)

**Anhang:** Datengrundlagen und Berechnung der einzelnen Flüsse sind im Anhang A vollständig dokumentiert.

## 3.4 Wirkungsabschätzung

### 3.4.1 Vorgangsweise und Begriffe

Eine Senke wird als "sicher" verstanden, wenn von einem Stoff in einer Senke keine Gefährdungen für Schutzgüter ausgehen. Eine Gefährdung wird dann ausgeschlossen, wenn die festgelegten Zielkriterien eingehalten werden. Zielkriterien können prinzipiell an jeder Stelle der Ursache-Wirkungs-Kette eines Stoffes festgelegt werden (Abbildung 4 bzw. vgl. Kral (2014)).

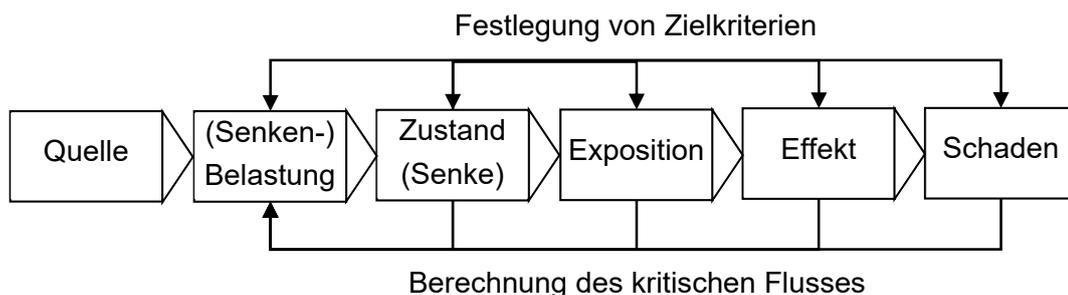


Abbildung 12: Ursache-Wirkungs-Kette eines Stoffes.

In der vorliegenden Studie basiert die die Wirkungsabschätzung auf eine Abstand-zum-Ziel Methode. Dabei wird jeder aktuelle Fluss  $F_{i,aktuell}$  einem kritischen Fluss  $F_{i,kritisch}$  gegenüber gestellt, wobei sich der jeweilige kritische Fluss aus den Zielkriterien ermitteln lässt. Die Grundlagen der Methode wurden laut Frischknecht (2009) bereits in den 1970-er Jahren durch Müller-Wenk gelegt (Müller-Wenk 1978). Zwischenzeitlich wurde die Methode mehrmals aktualisiert, wobei die für die vorliegende Studie die Letztfassung herangezogen wird (Frischknecht und Büsser-Knöpfel 2013). Die Bezeichnung der Flüsse orientiert sich an der Methode und ist in adaptierter Form in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Begriffe und ihre Beschreibung

Akronym	Flussname	Beschreibung
$F_{i,aktuell}$	Aktueller Fluss	Aktueller jährlicher Fluss $i$ eines Materials (Gut oder Stoff), bezogen auf den Kt. ZH.
$F_{i,kritisch}$	Kritischer Fluss	Kritischer jährlicher Fluss $i$ eines Materials (Gut oder Stoff), bezogen auf den Kt. ZH. Ein kritischer Fluss ist der im Rahmen von umwelt-, abfall- und ressourcenpolitischen Zielen als maximal zulässig erachteter Fluss.

Im Gegensatz zur Methode der Ökologischen Knappheit (Frischknecht, Steiner et al. 2009) erfolgt in der vorliegenden Wirkungsabschätzung keine Ermittlung der Ökopunkte. Es wird lediglich ein vereinfachter Gewichtungsansatz verfolgt.

### 3.4.2 Aktuelle Flüsse

Das Inventar (Kap. 3.3) beinhaltet die aktuellen Flüsse ( $Fluss_i$ ), welche im Systembild in Form eines Sankey-Diagramms dargestellt werden. Die aktuellen Flüsse  $Fluss_{i,aktuell}$  sind eine Auswahl der Flüsse, nämlich jene die in die Senken gehen. Ein Prozess gilt als Senke, wenn die Bilanzgleichung des Prozesses einen Senkenterm größer "0" aufweist (s. Kap. 3.1). Die Summe der Frachten in eine Senken wird als aktuelle Senkenbelastung  $F_{aktuell}$  bezeichnet (Formel 5).

$$F_{aktuell} = \sum_{i=1}^n F_{i,aktuell} \quad \text{Formel 5}$$

### 3.4.3 Kritische Flüsse

#### 3.4.3.1 Vorgangsweise

Zur Bestimmung der kritischen Flüsse  $F_{i,kritisch}$  wird die Methode der Ökologischen Knappheit (Frischknecht, Steiner et al. 2009) sinngemäß angewendet, wobei die Ziele und Zielkriterien zur Bestimmung der kritischen Flüsse an die Gegebenheiten im Kt. ZH angepasst werden.

#### 3.4.3.2 Zielanalyse

Die übergeordneten Ziele der Abfall- und Ressourcenwirtschaft im Kt. ZH wurden als Führungsinstrument konzipiert und dienen den Teilplanungsbereichen als Grundlage zur Formulierung konkreter Ziele, Indikatoren und Strategieelemente (AWEL 2015).

Die übergeordneten Ziele sind:

1. Ressourcen schonen, Ressourcen nutzen.
2. Ökoeffizienz und Energieeffizienz.
3. Optimierte Entsorgungssicherheit.
4. Schutz von Umwelt und Bevölkerung.

Die Ziele werden anhand der Zielkriterien in Kap. 3.4.3.3 operationalisiert, wobei das Ziel 2 aufgrund der Relevanz für die Fragestellungen nicht berücksichtigt wurde.

#### 3.4.3.3 Zielkriterien

Zielkriterien dienen der Ermittlung der kritischen Flüsse. Beispielweise gilt der in der Technischen Verordnung für Abfälle (Schweizer Bundesrat 2011) festgelegte Grenzwert für Kupfer (Gesamtgehalt) als Zielkriterium zur Ermittlung des kritischen Flusses für Kupfer in Schlacken, welche auf der Schlackendeponie verbracht werden.

Die Zielkriterien sind der kantonalen und schweizerischen Politik und Gesetzgebung im Bereich Umwelt und Ressourcen entnommen. Es handelt sich um gesetzlich verbindliche Zielkriterien und um – teils provisorische – Zielkriterien, die von Seiten des AWEL im Zürcher „Massnahmenplans der Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2015-2018“ oder im Rahmen von Projektbesprechungen festgelegt worden sind.

Die Zielkriterien sind in Abhängigkeit von den Zielen Tabelle 12 bis Tabelle 14 dargestellt.

**Anhang:** Die konkrete Zuordnung der Zielkriterien zu den einzelnen aktuellen Flüssen findet sich im Anhang B.

Tabelle 12: Ziel 1 - Ressourcen schonen, Ressourcen nutzen.

Ebene	Zielkriterien
Güter	<ul style="list-style-type: none"> <li>In Zukunft sollen 95% der Rückbaustoffe stofflich/energetisch verwertet werden (Kuhn 2015). Da die Recyclingrate bei Rückbaustoffen im Jahr 2013 bei 82% lag, müssen die Mengen an zu deponierenden Rückbaustoffe um 72% reduziert werden, um eine Recyclingquote von 95% zu erreichen. Das Zielkriterium wurde bei den deponierten Rückbaustoffen (Ziel Schutz von Umwelt und Bevölkerung) berücksichtigt, da es eine Beschränkung für die deponierten Rückbaustoffe darstellt.</li> </ul>
Cu & Zn	<ul style="list-style-type: none"> <li>Von dem im KVA-Input enthaltenen Zink sollen zukünftig 35% zurückgewonnen werden (Morf 2015). Damit wird dem Bestreben nach einer Reduktion der Untertage deponierten E-Filterstäube Rechnung getragen. Es wird angenommen, dass durch die Zn-Rückgewinnung aus KVA-Filterstäuben bis zu 50% der Abfälle von der UTD ferngehalten werden können.</li> <li>In Zukunft soll Kupfer aus der KVA-Schlacke rückgewonnen werden. Für eine Szenariobetrachtung werden drei Kriterien festgelegt: 1) Aus der KVA-Schlacke sollen zukünftig 95% des metallischen Kupfers zurückgewonnen werden (Morf 2015). 2 &amp; 3) Es gelten die Grenzwerte für die Deponierung von Abfällen auf einer Reaktordeponie (Totalgehalt: 5'000 mg Cu/kg) bzw. auf einer Inertstoffdeponie (Totalgehalt: 500 mg Cu/kg) (Kuhn 2015).</li> <li>Der Schrott als Rückstand der Kehrichtverbrennungsanlagen entspricht aufgrund der Kupferverunreinigungen nicht den Qualitätsanforderungen für den Wiedereinsatz im Stahlwerk. Es wird eine angestrebte Kupfer-Entfrachtung von 50% angenommen.</li> </ul>
PAK & DecaBDE	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es wurden keine Kriterien festgelegt.</li> </ul>

Tabelle 13: Ziel 3 – Optimierte Entsorgungssicherheit

Ebene	Zielkriterien
Güter	<ul style="list-style-type: none"> <li>Für die Kapazitätsplanung von Deponien wurde im Rahmen der vorliegenden Studie ein Planungshorizont von 20 Jahren angenommen. Für diesen Zeitraum soll die Ablagerung der Abfälle gesichert sein. Die Restvolumina sind im kantonalen Richtplan festgelegt und nach Kompartimenten aufgeschlüsselt (Baudirektion Kanton Zürich 2015, Sieber 2015). Inertstoffkompartimente: 9 Mio. m<sup>3</sup>; Rest-, Reaktor- und Schlackedeponie: 11 Mio. m<sup>3</sup>). Die Restvolumina werden durch 20 Jahr dividiert und aliquot den aktuellen Flüssen auf die kritischen Flüsse aufgeteilt.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Verbringung des Aushubes in innerkantonalen Kiesgruben wird anhand des auffüllbarem, offenen Volumen (ohne den Grubenbetrieb zu behindern) und der jährlichen Kiesentnahme beurteilt (Sieber 2014).</li> <li>• Der im ak Bereich in Kiesgruben abgelagerte Aushub soll zukünftig im innerkantonalen Bereich abgelagert werden (Baudirektion Kanton Zürich 2015, Kuhn 2015).</li> </ul>
Cu & Zn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Kriterien festgelegt.</li> </ul>
PAK & DecaBDE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Kriterien festgelegt.</li> </ul>

*Tabelle 14: Ziel 4 – Schutz von Umwelt und Bevölkerung*

Ebene	Zielkriterien
Güter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Kriterien festgelegt.</li> </ul>
Cu & Zn	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Für gereinigtes Abwasser in die Vorfluter gibt es keine gesetzlichen Grenzwerte. Es wird angenommen, dass bei einem Verdünnungsverhältnis von 1:10 die Anforderungen für Oberflächengewässer laut Gewässerschutzverordnung (Schweizer Bundesrat 1998) eingehalten werden können (Niederhauser 2015). Der Grenzwert für die Einleitung von Industrieabwasser in Oberflächengewässer wurde nicht für die Beurteilung herangezogen, da keine Informationen über die Frachten vorlagen.</li> <li>• Für die Einleitung der Abwässer aus Kehrrichtverbrennungsanlagen in das Kanalsystem gelten die Grenzwerte laut Gewässerschutzverordnung (Schweizer Bundesrat 1998).</li> <li>• Für den Austrag von Organischen Düngern, Recyclingdünger und Hofdünger gelten die Qualitätsanforderungen laut ChemRRV (Schweizer Bundesrat 2014).</li> <li>• Die Verwertung von Bodenaushub (A- und B-Horizonte) ist in der Bundeswegleitung Bodenaushub, basierend auf der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo), geregelt. Massgebend sind die darin aufgeführten Richt- und Prüfwerte, wobei als Kriterium die Richtwerte verwendet (Schweizer Bundesrat 1998). Für den Aushub (C-Horizonte) gilt die VBBo nicht. In der vorliegenden Studie wurde der Richtwert der VBBo dennoch als Kriterium herangezogen.</li> <li>• Der in Kiesgruben abgelagerte Aushub wird anhand der TVA-Grenzwerte (Gesamtgehalte) für unverschmutzten Aushub beurteilt (Schweizer Bundesrat 2011).</li> <li>• Für die deponierten Abfälle gelten die Grenzwerte (Gesamtgehalte) laut TVA (Schweizer Bundesrat 2011).</li> </ul>

---

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einträge in den landwirtschaftlichen Boden werden im Sinne der Methode der ökologischen Knappheiten beurteilt (Frischknecht, Steiner et al. 2009). Demnach entspricht der kritische Eintrag in den Boden jenem Kupfer- und Zinkfluss, der durch Pflanzen dem Boden entzogen wird.</li></ul>
PAK	<ul style="list-style-type: none"><li>• In Zukunft sollte der Grenzwert für das Recycling von PAK-haltigem Ausbaupflaster aus Gründen des Arbeitnehmerschutzes für das Heissmischverfahren von heute 20'000 mg auf neu 5'000 mg PAK pro kg Bindemittel sinken. Dies wird gemäss aktuellem Vorschlag des BAFU in der revidierten TVA (1.1.2016) nach einer Übergangsfrist von 10 Jahren der Fall. 20'000 mg/kg PAK ist nur erlaubt, wenn es auf 5'000 mg/kg verdünnt wird. Als Zielwert gilt demnach 5'000 mg/kg bereits heute.</li><li>• In der revidierten TVA darf voraussichtlich kein Ausbaupflaster mit einem Gehalt von mehr als 5'000 mg PAK pro kg Bindemittel auf Deponien abgelagert werden.</li><li>• Auf Inertstoffdeponien dürfen laut TVA Bauabfälle abgelagert werden, wenn sie keinen Ausbaupflaster mit einem Gehalt von mehr als 250 mg PAK pro kg (entspricht 5'000 mg pro kg Bindemittel) enthalten. Andere Abfälle können auf den Inertstoffdeponien abgelagert werden, wenn deren Gesamtgehalt den Grenzwert von 25 mg/kg Trockener Abfall nicht überschreitet (Schweizer Bundesrat 2011). Es sind auch Grenzwerte für die Ablagerung in den Reststoff-, Reaktorstoff- und Schlackenkompartimenten festgelegt (Schweizer Bundesrat 2011).</li><li>• Der in Kiesgruben abgelagerte Aushub wird anhand der TVA-Grenzwerte (Gesamtgehalte) für unverschmutzten Aushub beurteilt. Aushubmaterial gilt als unverschmutzt, wenn der PAK-Grenzwert von 3 mg/kg eingehalten wird (Schweizer Bundesrat 2011).</li><li>• Für Kompost, Gärgut und Presswasser gilt ein Richtwert von 4 mg/kg TS (StoV).</li></ul>
DecaBDE	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gemäss der RoHS EU-Richtlinie dürfen im homogenen Werkstoff in neuen E&amp;E-Geräten maximale Konzentrationen von 0.1% für DecaBDE nicht überschritten werden.</li><li>• DecaBDE enthaltende Kunststoffe müssen vor dem Recycling von E&amp;E abgetrennt werden (WEEE Richtlinie).</li></ul>

---

### 3.4.4 Indikator

Der Indikator ist ein Verhältnis zweier Flüsse und wird laut Formel 6 definiert:

$$\omega = \frac{F_{i,aktuell}}{F_{i,kritisch}} \quad \text{Formel 6}$$

wobei  $F_{i,aktuell}$  der aktuelle Fluss in Mass pro Zeit und  $F_{i,kritisch}$  der kritische Fluss in Masse pro Zeit in eine Senke ist. Die Variable  $i$  ist ein Index für jeden Fluss.

Er bezieht sich stets auf:

- ein umwelt- oder ressourcenpolitisches Ziel und das daraus abgeleitete Zielkriterium
- auf die Güter- oder eine der Stoffebenen (Kupfer, Zink, PAK, DecaBDE),
- einen konkreten Fluss in eine Senke,
- eine Periode (z.B. Jahr 2013).

Der Indikator  $\omega$  ist dimensionslos und liegt zwischen "0" und " $+\infty$ ". Abbildung 13 zeigt die Wertebereiche des Indikators, welche in „kritisch“, „subkritisch“ und „unkritisch“ unterteilt werden und Tabelle 15 interpretiert die Wertebereiche.

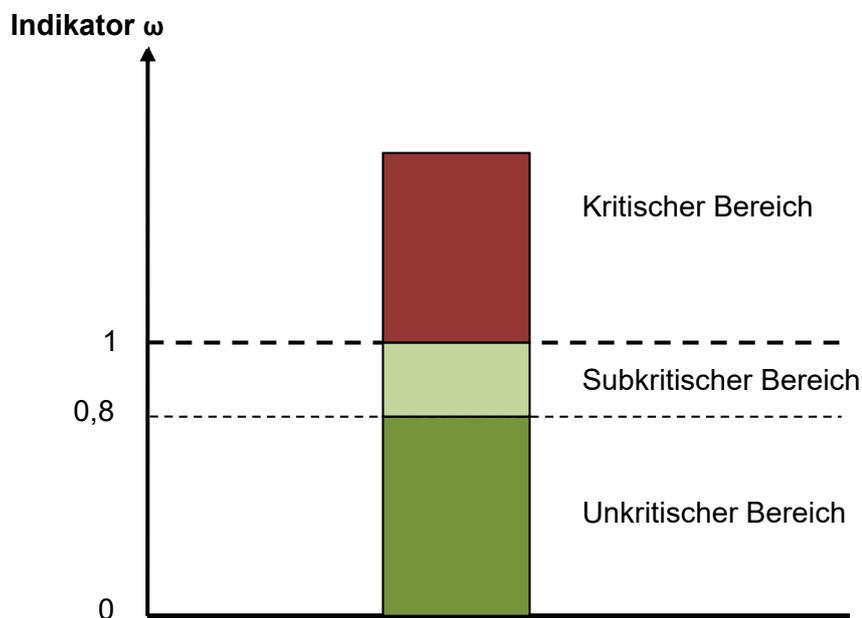


Abbildung 13: Wertebereiche des Indikators  $\omega$  und seine Interpretation.

*Tabelle 15: Interpretation der Wertebereiche des Indikators.*

Bereichsname	Wertebereich	Interpretation
Kritisch	$\omega > 1$	Die Zielkriterien werden nicht eingehalten. Es besteht Handlungsbedarf.
Subkritisch	$0.8 < \omega < 1$	Die Zielkriterien werden zwar eingehalten, potentielle Überschreitungen werden aber nicht ausgeschlossen. Der untere Schwellenwert des Wertebereichs wurde als praktikabel angenommen. Es besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf.
Unkritisch	$\omega < 0$	Die Zielkriterien werden eingehalten. Es besteht kein Handlungsbedarf.

## 4 Resultate

In diesem Kapitel werden die eingangs formulierten Fragestellungen sowohl für Güter als auch exemplarisch für die Stoffe Kupfer und Zink und die Stoffgruppen PAK und DecaBDE beantwortet.

### 4.1 Welche Senken sind vorhanden, um die Abstoffe zu verbringen?

Das Angebot an Senken für die im Kt. ZH angefallenen Abstoffe, besteht aus natürlichen und anthropogenen Senken. Zu den natürlichen Senken zählen die Umweltmedien Boden, Wasser und Luft. Diese nehmen zum Beispiel Abgase aus Verbrennungsprozessen, gereinigte Abwässer und diffuse Emissionen aus dem Straßen- und Schienenverkehr sowie Abschwemmungen von Gebäuden und Infrastrukturanlagen auf. Zu den anthropogenen Senken zählen die thermischen Anlagen (für organische Stoffe), Kiesgruben für unverschmutzten Aushub, Deponien für feste Abfälle sowie der Fahrweg der Bahn, welcher Abriebe des Schienenverkehrs aufnimmt.

### 4.2 Wie groß sind die Belastungen dieser Senken?

Die Belastung der Senken entspricht den jährlichen Frachten in Masse pro Zeit, die im Jahr 2013 in die Senken gelangen. Ein Überblick über die Senkenbelastung auf Güter- und Stoffebene wird gegeben (Kap. 4.2.1) und in weitere Folge für jede Ebene separat behandelt (Kap. 0 bis 4.2.6).

#### 4.2.1 Überblick

Die Senkenbelastung beträgt im betrachteten Jahr 2013 auf der Güterebene rund 2'400 Millionen Tonnen. Auf der Stoffebene werden die Senken mit rund 9'400 t Cu/a, 4'000 t Zn/a, 160 t PAK/a und 22 t DecaBDE/a belastet (Tabelle 16).

Von den 9'400 t Cu/a bzw. 4'000 t Zn/a gelangen rund 80.4% bzw. 23.5% in Sekundärrohstoffe, 18.9% bzw. 72.0% werden in Kiesgruben und Deponien abgelagert und rund 0.7% bzw. 4.5% geht durch den Eintrag in die Umwelt verloren. Von den 160 t PAK/a werden 4% in den thermischen Anlagen zerstört, 55% werden in Kiesgruben, Ober- und Untertagedeponien abgelagert, 38% werden in der Nutzungsphase - zu größtem Teil in Belägen - wieder auftreten und rund 3% geht durch den Eintrag in die Umwelt verloren. Von den 22 t DecaBDE/a werden rund um 85% in den thermischen Anlagen zerstört, rund 14% werden in die Sekundärkunststoffe transferiert und 1% gelangt auf Deponien. Die Einträge von DecaBDE in die Atmosphäre sind mit rund 0.001 t/a minimal und werden aus toxikologischer Sicht als vernachlässigbar eingeschätzt.

*Tabelle 16: Senkenbelastung des Gesamtsystems „Produktion, Nutzung und Entsorgung“ in Tonnen pro Jahr auf 2 signifikante Stellen gerundet.*

<b>Senken <sup>1)</sup></b>	<b>Güter [t/a]</b>	<b>Kupfer [t/a]</b>	<b>Zink [t/a]</b>	<b>PAK [t/a]</b>	<b>DecaBDE [t/a]</b>
<b>Boden / Wasser / Luft</b>	2'400'000'000	63	180	5.1	0.001
<b>Thermische Anlagen</b> (Kehricht-, Klärschlamm-, Sonderverbrennungsanlagen, Alt- und Restholzfeuerungen, Energetische Verwertung, Zementwerke)	6'800'000	1'400	1'800	6.3	19
<b>Kiesgruben / Deponien / UTD</b>	9'900'000	1'800	2'900	88	0.31
<b>Produktions- und Nutzungsphase</b> (Senken für Recyclinggüter wie Kunststoffe, Altmetalle etc.)	2'500'000	7'000	610	62	3.1
<b>Fahrweg Bahn</b>	80	1	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>	- <sup>2)</sup>
<b>Unbekannte Senken</b>	75'000	590	330	0.71	0
<b>Totale Senkenbelastung</b>	2'400'000'000	9'400	4'000	160	22

*Anmerkung: 1) Um Doppelzählungen bei der Ermittlung der totalen Senkenbelastung zu vermeiden, werden auf der Güter-, Kupfer- und Zinkebene die Frachten in thermische Anlagen nicht bei der Summenbildung für die totale Senkenbelastung berücksichtigt. 2) Diese Flüsse wurden im Rahmen der Studie nicht quantifiziert.*



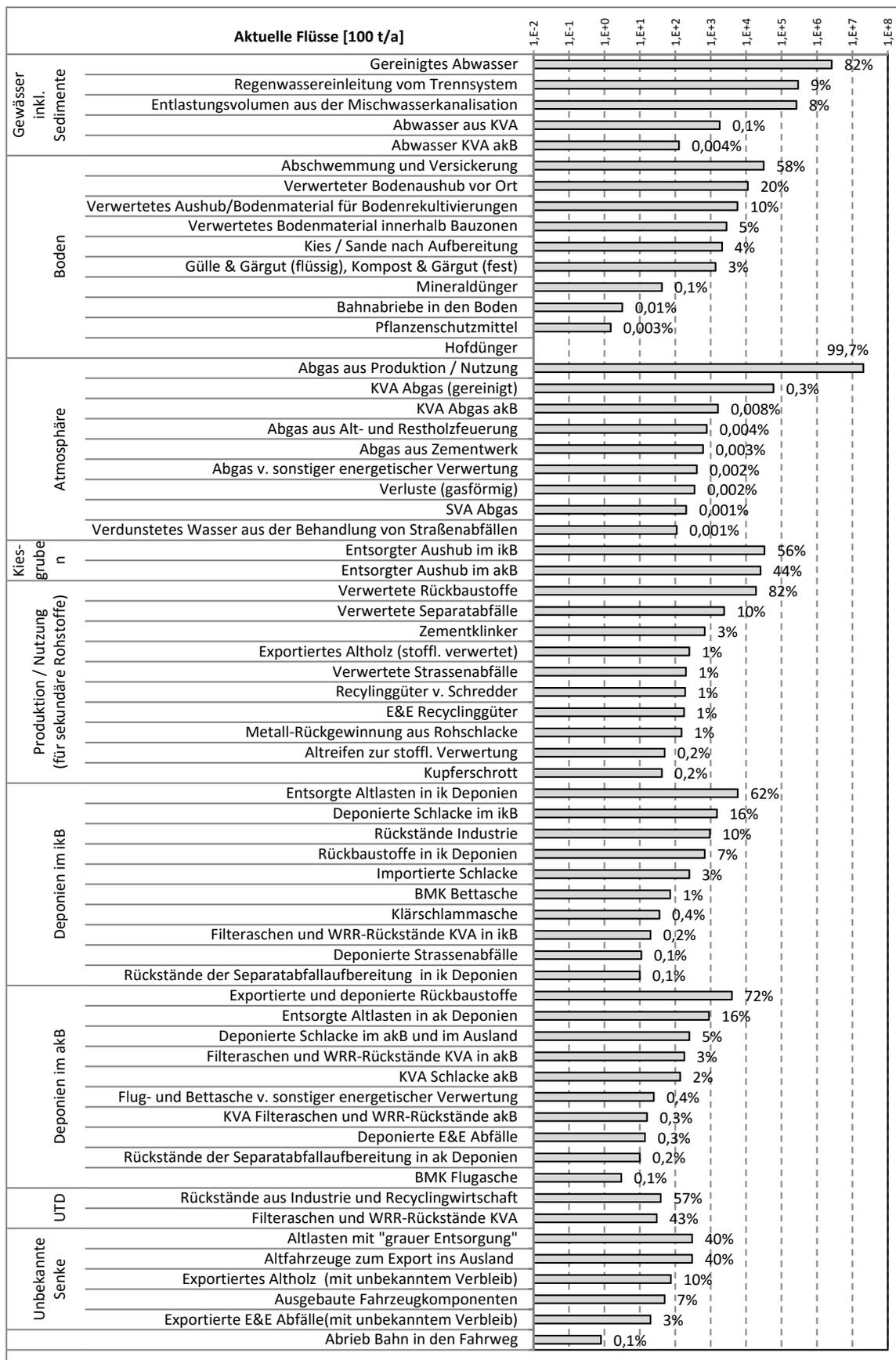


Abbildung 15: Güterflüsse in die Senken (Die relativen Anteile je Fluss beziehen sich auf die Summe der Frachten in die jeweilige Senke; „Hofdünger“ wurde nicht berechnet).

#### 4.2.2.2 Sektoren und deren Flüsse in Senken

Insgesamt werden 2.4 Mrd. t Güter/a (1'700 t/E.a) in Senken verbraucht (Tabelle 17):

- g) 86% (1'460 t/E.a) der Güter stammen aus der volkswirtschaftlichen Produktion und der Nutzungsphase (ohne Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Abwasserwirtschaft). Der Großteil gelangt in Form von Abgas aus Verbrennungsprozessen in die natürliche Senke Atmosphäre (1'460 t/E.a). Zusätzlich fallen Niederschlagswässer auf versiegelte Flächen und gelangen als Abschwemmung wie in den Boden. Die Abschwemmungen beinhalten Reifen- und KFZ Abrieben, Erosions- und Korrosionsprodukte und Strassenabriebe. Ebenso in den Boden gelangen die Einträge aus der Landwirtschaft wie Hofdünger, Mineraldünger, Tierarzneimittel und weitere landwirtschaftliche Hilfsstoffe sowie Abriebe der Bahn (2 t/E.a).
- h) 13% (230 t/E.a) der Güter gelangen in die Abwasserwirtschaft und in weiterer Folge als gereinigtes Abwasser gemeinsam mit den Überläufen aus der Misch- und Trennkana-lisation in die natürliche Senke „Gewässer“ (230 t/E.a).
- i) 1% (15.0 t/E.a) der Güter werden in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft behandelt. In weiterer Folge gelangen diese als gereinigte Abgase in die Atmosphäre (4.5 t/E.a) als unverschmutztes Aushubmaterial in Kiesgruben (6.0 t/E.a), als verwertbares Mate-rial in die Produktions- und Nutzungsphase (1.8 t/E.a), als verwertbarer Bodenaushub in die Umwelt (1.6 t/a) , als zu entsorgendes Material in Deponien (1.1 t/E.a).

Tabelle 17: Güterflüsse in 1'000 t/a auf 2 signifikante Stellen gerundet.

Senke	Abfall- & Ressourcen- wirtschaft	Abwasser- wirtschaft	Produktion / Nutzung	total
Kiesgruben, Deponien & UTD	9'900	-	-	9'900
Produktion / Nutzung	2'500	-	-	2'500
Fahrweg	-	-	0.1	0.1
Atmosphäre	6'300	-	2'000'000	2'100'000
Gewässer inkl. Sedimente	190	320'000	-	320'000
Boden	2'100	-	3'200	5'300
Unbekannte Senken	75	-	-	75
total	21'000	320'000	2'000'000	2'400'000
Anteile	1%	13%	86%	100%

Legende: UTD=Untertagedeponie

In weitere Folge finden sich die Systembilder für die Teilsysteme "Abfall- und Ressourcenwirtschaft" (Abbildung 16), "Abwasserwirtschaft" (Abbildung 17) und "Produktion / Nutzung" (Abbildung 18).

**Anhang:** Das Systembild in Abbildung 18 basiert auf der Aggregation von Einzelflüssen des Gesamtsystems (disaggregiert). Die Aggregation ist in tabellarischer Form im Anhang D enthalten.

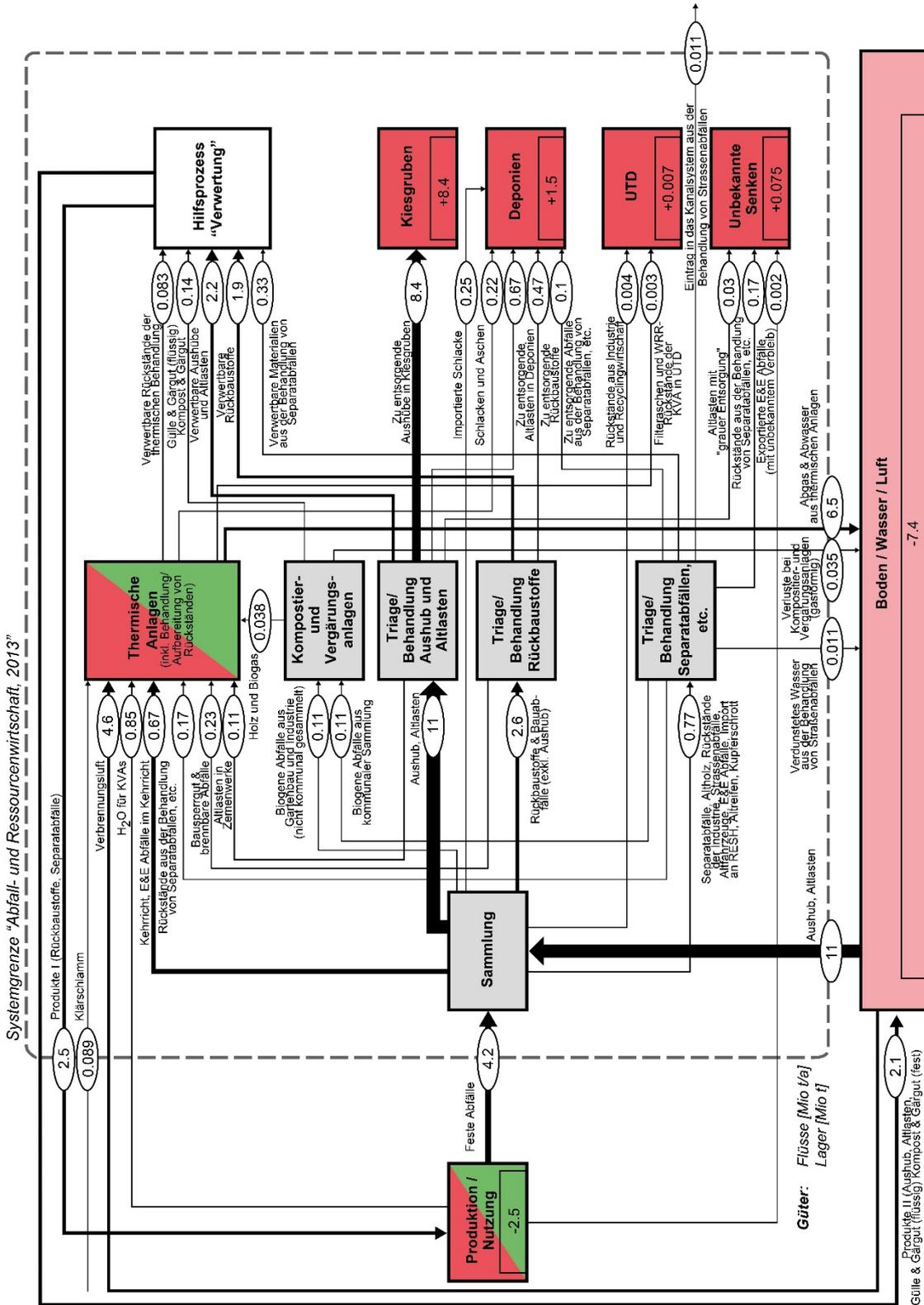


Abbildung 16: Teilsystem: „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ für Güter. Innerhalb der Systemgrenze (gestrichelte Linie) sind jene Prozesse, die Abstoffe aus dem Kt. ZH behandeln. Die Prozesse sind nicht verortet und können somit im inner- und/oder ausserkantonalen Bereich liegen.

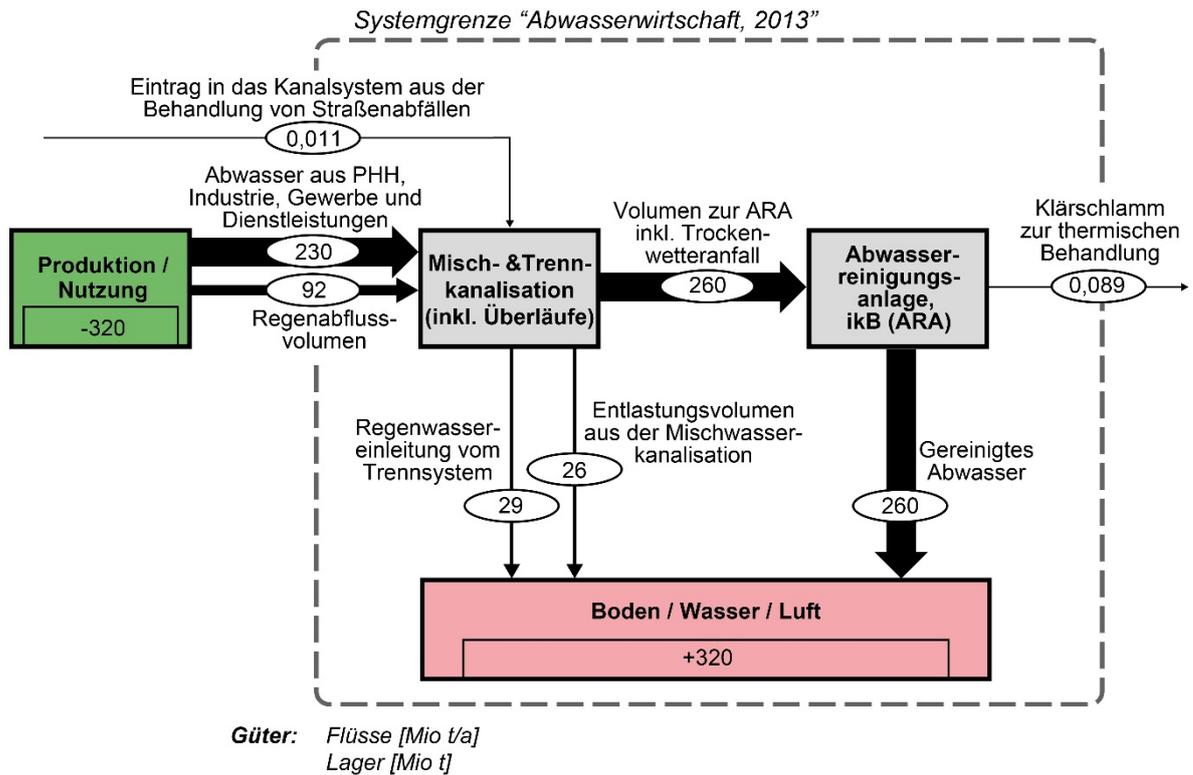


Abbildung 17: Teilsystem: „Abwasserwirtschaft“ für Güter.

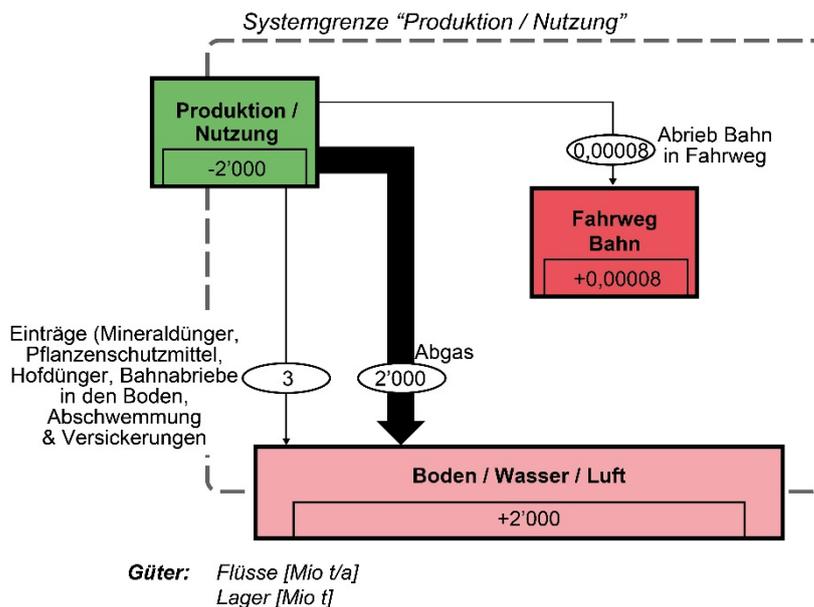


Abbildung 18: Teilsystem: „Produktion / Nutzung“ für Güter. Emissionen aus dem Strassenverkehr sind im Fluss "Abschwemmung und Versickerung" enthalten.

### 4.2.2.3 Regionale Verteilung der Senkenbelastung

Von den 12 Mio. t/a, die im Jahr 2013 in anthropogene Senken gelangen, verbleiben 59% in innerkantonalen, 38% in ausserkantonalen und ausländischen Senken (Abbildung 19). Bei 3% der Frachten war keine regionale Zuordnung möglich. Diese Frachten verteilen sich entweder auf inner- und/oder ausserkantonalen Senken sowie das Ausland. Bei der stofflichen Verwertung (2%) betrifft das die folgenden Flüsse: Verwertete Separatabfälle, E&E Recyclinggüter, Altreifen zur stofflichen Verwertung und Kupferschrott. Bei den unbekannt-ten Senken (1%) ist der eigentliche Zielprozess unbekannt, wobei dies folgende Flüsse betrifft: Altlasten mit grauer Entsorgung, Altfahrzeuge zum Export in das Ausland, exportiertes Altholz mit unbekanntem Verbleib und bei der Demontage von Altfahrzeugen ausgebaute Fahrzeugkomponenten.

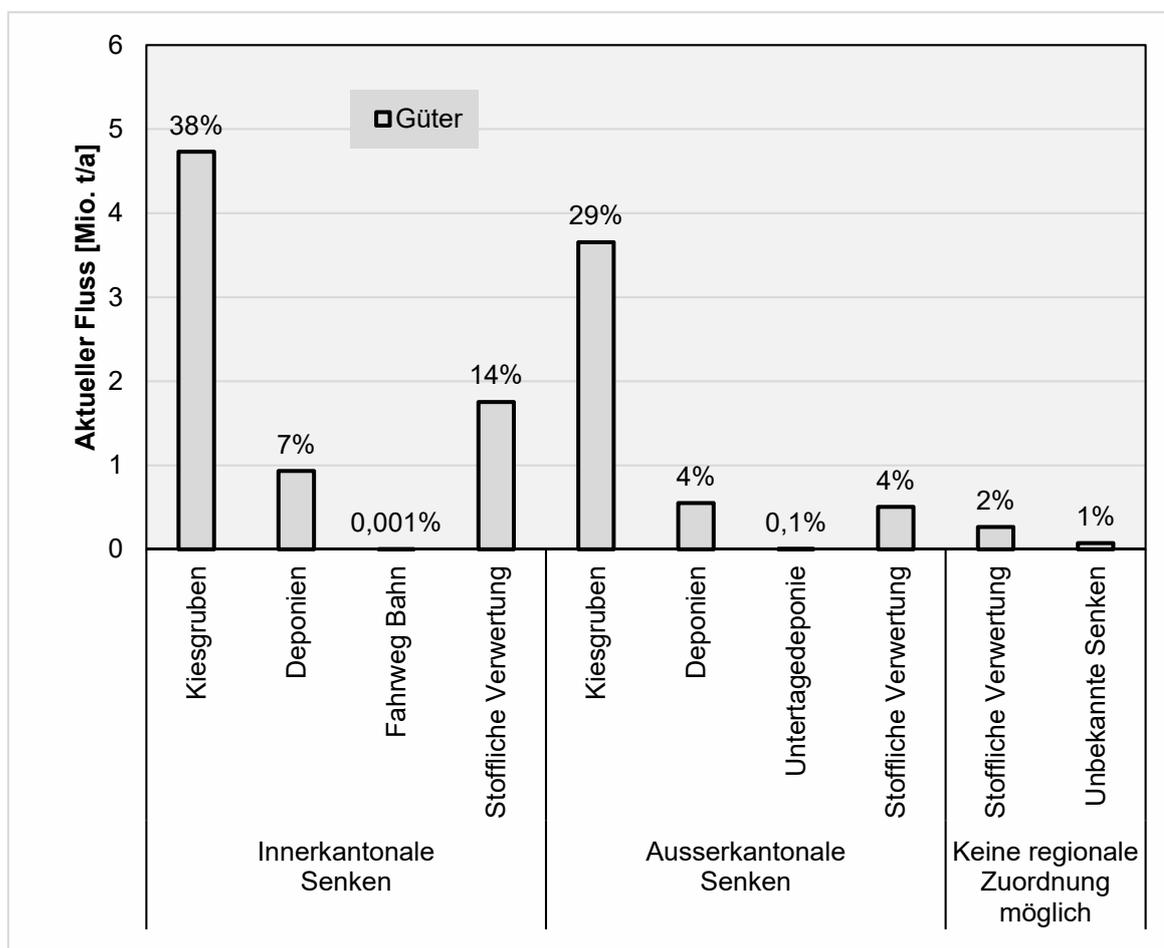


Abbildung 19: Regionale Verteilung der Abfälle in anthropogene Senken.

**Kiesgruben:** Von 8.4 Mio. t/a unverschmutzten Aushub gelangen 4.7 Mio. t/a (56%) in innerkantonale Kiesgruben (inkl. Geländeänderungen und Aufbereitung) und 3.7 Mio. t/a (44%) in ausserkantonale Kiesgruben (Zahlen für das Jahr 2013, siehe Schneider und Rubli (2015)).

Deponien: Im Jahr 2013 wurden 1.5 Mio. t an festen Abfällen deponiert. Davon gelangen

- 0.95 Mio. t auf innerkantonale Deponien. Die Zahl setzt sich zusammen aus 0.85 Mio. t Zürcher Material und 0.1 Mio. t Import aus anderen Kantonen. Die mengenmäßig größten Abfallströme sind dabei Altlasten (0.58 Mio. t), KVA-Schlacke (0.18 Mio. t), Rückstände der Industrie (0.1 Mio. t) und Rückbaustoffe aus dem Bauwesen (0.07 Mio. t).
- 0.55 Mio. t auf ausserkantonale Deponien. Die mengenmäßig größten Abfallströme sind Rückbaustoffe aus dem Kt. ZH (0.4 Mio. t)<sup>3</sup>, Altlasten (0.08 Mio. t), KVA-Schlacke (0.05 Mio. t) und Industrieabfälle inklusive KVA-E-Filterasche und KVA-Rauchgasreinigungsrückstände (0.02 Mio. t).

Untertagedeponien: Von den im Jahr 2013 6'900 t deponierten Abfällen stammen 57% aus der Industrie und Recyclingwirtschaft und 43% von den KVAs im Kt. ZH.

Stoffliche Verwertung: Von den 2.5 Mio. t an verwerteten Abfällen entfallen 1.9 Mio. t auf die verwerteten Rückbaustoffe, 0.2 Mio. t auf verwertete Separatabfälle, weitere 0.2 Mio. t auf Kies/Sand aus der Aufbereitung von Altlastenmaterial. Die verbleibenden 0.2 Mio. t verteilen sich zum Beispiel auf Altlasten, die im Zementwerk thermisch behandelt werden und in den Klinker gelangen, recycliertes Altholz, verwertete Strassenabfälle und E&E Recyclinggüter.

---

<sup>3</sup> Zur Menge an exportierten und deponierten Rückbaustoffen gibt es 2 Datenquellen, die stark voneinander abweichen. Schneider und Rubli (2015) geben die Menge mit 200'000 t/a an, Stäubli (2015) mit 400'000 t/a (vgl. Anhand A, Abbildung 9 und 10). Nach Rücksprache mit dem AWEL wird in der Studie der Wert mit 400'000 t/a verwendet.

## 4.2.3 Kupfer

### 4.2.3.1 Senkenbelastung

Die Senkenbelastung beträgt im Jahr 2013 rund 9'400 Tonnen (Abbildung 20). Davon gelangt der mengenmäßig größte Anteil als Recyclingmaterial in die Produktions- und Nutzungsphase (7'000 t/a). Darin enthalten sind der gesammelte Kupferschrott (4'100 t/a), E&E Recyclinggüter (1'300 t/a) und verwertete Rückbaustoffe (1'100 t/a). In die Kiesgruben, Deponien und die UTD gelangen rund 1'800 t/a. Davon sind rund 1'100 t Cu (64%) in der deponierten Schlacke enthalten. 590 t/a gelangen in unbekannte Zielprozesse und 60 t/a in die Umweltmedien.

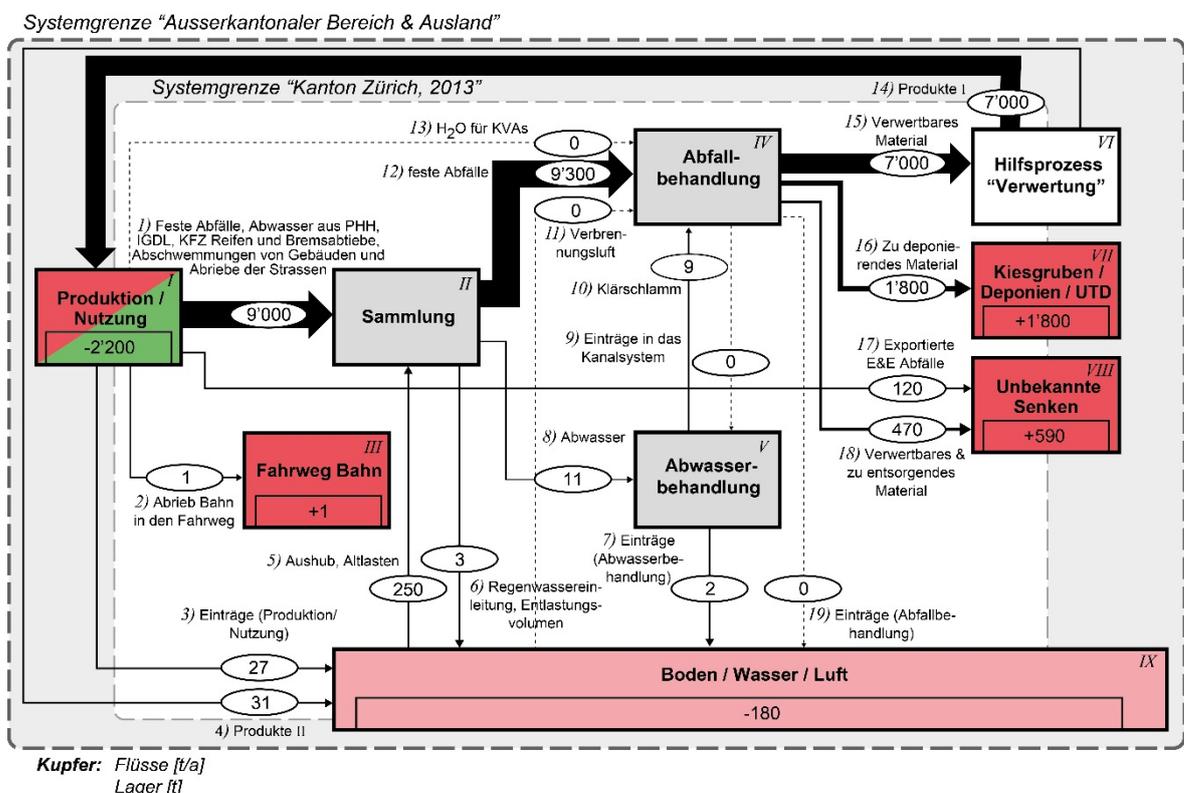


Abbildung 20: Gesamtsystem: „Produktion, Nutzung und Entsorgung“ für Kupfer. Die Flüsse sind in Tonnen pro Jahr (t/a) angegeben und auf 2 signifikante Stellen gerundet. Prozesse auf der Systemgrenze „Kanton Zürich, 2013“ sind im inner- und ausserkantonalen Bereich zu finden.

**Anhang:** Das Systembild in Abbildung 20 basiert auf der Aggregation von 158 Einzelflüssen, welche im Gesamtsystem (disaggregiert) enthalten sind. Die Aggregation ist in tabellarischer Form im Anhang D enthalten.

Abbildung 21 zeigt die aktuellen Kupferflüsse in die Senken. Die Werte stammen aus dem Gesamtsystem (disaggregiert), welches im Anhang A vollständig dokumentiert und im Systembild dargestellt ist.

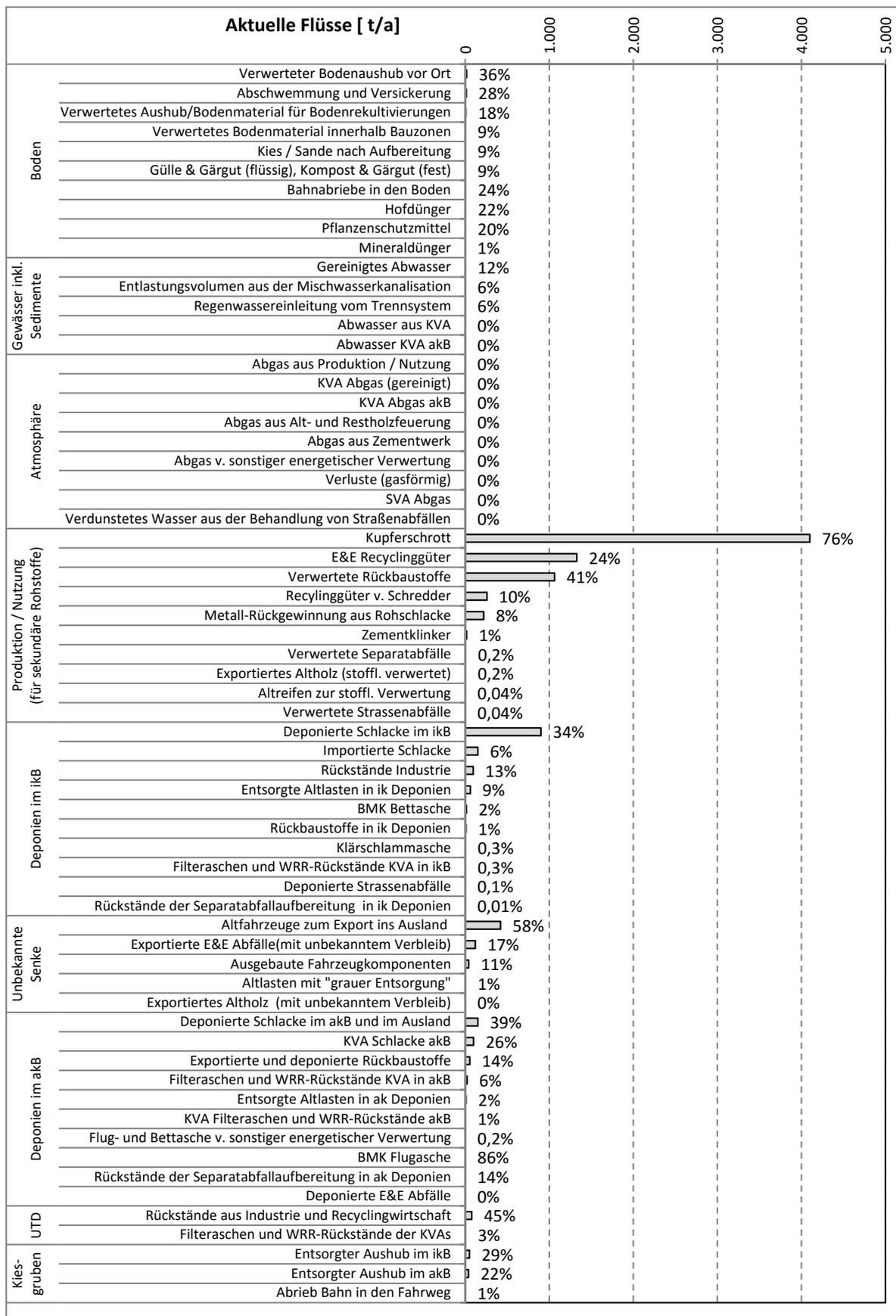


Abbildung 21: Aktuelle Kupferflüsse in die Senken (Die relativen Anteile je Fluss beziehen sich auf die Summe der Frachten in die jeweilige Senke).

#### 4.2.3.2 Sektoren und deren Flüsse in Senken

Insgesamt werden 9.400 t/a (6.7 kg/E.a) in Senken verbraucht:

- a) 99.6% (6.7 kg/E.a) des Kupfers gelangt in die Abfall- und Ressourcenwirtschaft. Dort werden rund 52% (3.5 kg/E.a) einer weiteren funktionellen Verwertung zugeführt (Kupferschrott, E&E Recyclinggüter, Recyclinggüter vom Schredder) und 48% (3.2 kg/E.a) des Kupfers werden nicht weiter funktionell eingesetzt. Das betrifft Produkte, wo Kupfer keine relevanten oder negativen Effekte auf die Materialqualität hat (z.B. Beton in das Bauwesen, Metallfraktionen aus der KVA in den Hochofen, Rückbaustoffe in das Bauwesen, Abfälle in Deponien, Abfälle die in nicht näher bekannte Zielprozesse gelangen, Aushub in Kiesgruben, Abfälle in die UTD, und Einträge in die Umwelt).
- b) 0.2% (13 g/E.a) des Kupfers gelangt in die Abwasserwirtschaft und von dort über Abschwemmungen in den Boden (9 g/E.a.) bzw. über die Abwässer in die Vorfluter (4 g/E.a.). Der Klärschlamm (7 g/E.a) wurde der Abfall- und Ressourcenwirtschaft zugeordnet, da er in thermischen Anlagen behandelt und die Rückstände in Deponien gelangen.
- c) 0.2% (11 g/E.a) des Kupfers gelangt in der Produktions- und Nutzungsphase als Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel, Hofdünger und Abrieben der Bahn in die Senke Umwelt (10 g/E.a). Von den Abrieben der Bahn gelangen rund 80% in die natürlichen Senken und lediglich 20% in den Fahrweg der Bahn (z.B. Gleisschotter).

Tabelle 18: Senken und deren Belastung durch Kupferflüsse in t/a.

	Abfall- & Ressourcenwirtschaft	Abwasserwirtschaft	Produktion / Nutzung	total
Kiesgruben, Deponien & UTD	1'800	-	-	1'800
Produktion / Nutzung	7'000	-	-	7'000
Fahrweg	-	-	1	1
Atmosphäre	-	-	-	0
Gewässer inkl. Sedimente	-	5	-	5
Boden	31	-	27	58
Unbekannte Senken	590	-	-	590
Total	9'400	5	28	9'400

Legende: UTD=Untertagedeponie

In weitere Folge finden sich die Systembilder für die Teilsysteme "Abfall- und Ressourcenwirtschaft" (Abbildung 22), "Abwasserwirtschaft" (Abbildung 23) und "Produktion / Nutzung" (Abbildung 24).

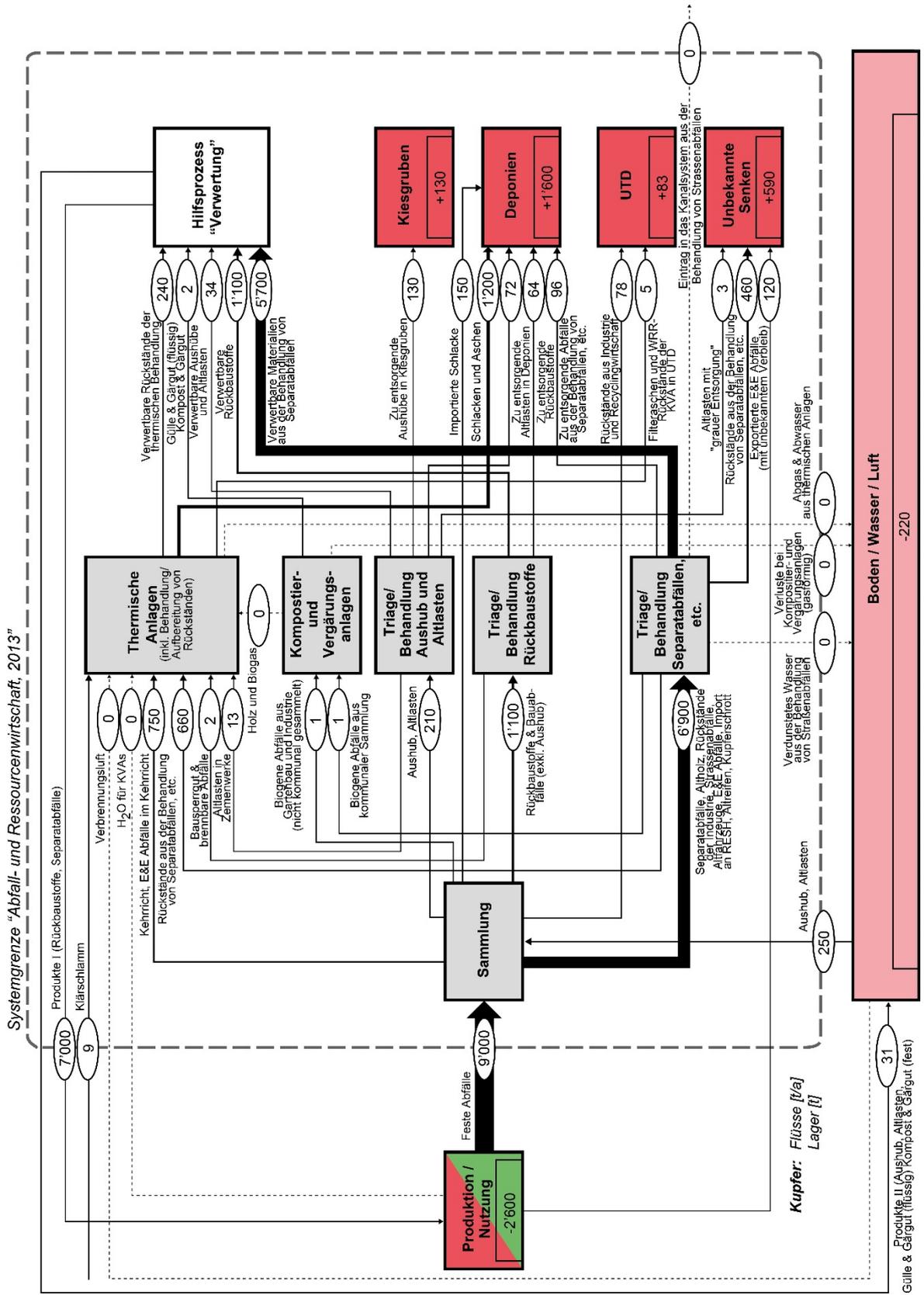


Abbildung 22: Teilsystem: „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ für Kupfer.

**Anhang:** Das Systembild in Abbildung 22 basiert auf der Aggregation von Einzelfläüssen des Gesamtsystems (disaggregiert). Die Aggregation ist in tabellarischer Form im Anhang D enthalten.

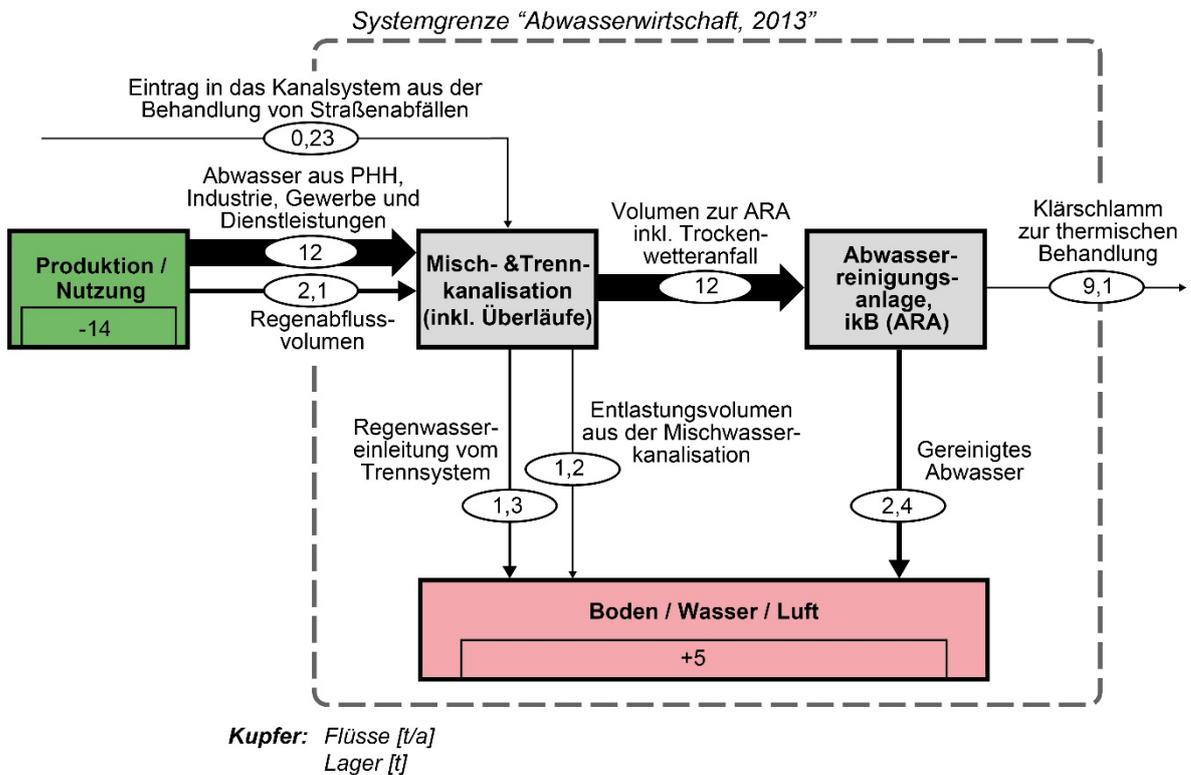


Abbildung 23: Teilsystem: „Abwasserwirtschaft“ für Kupfer.

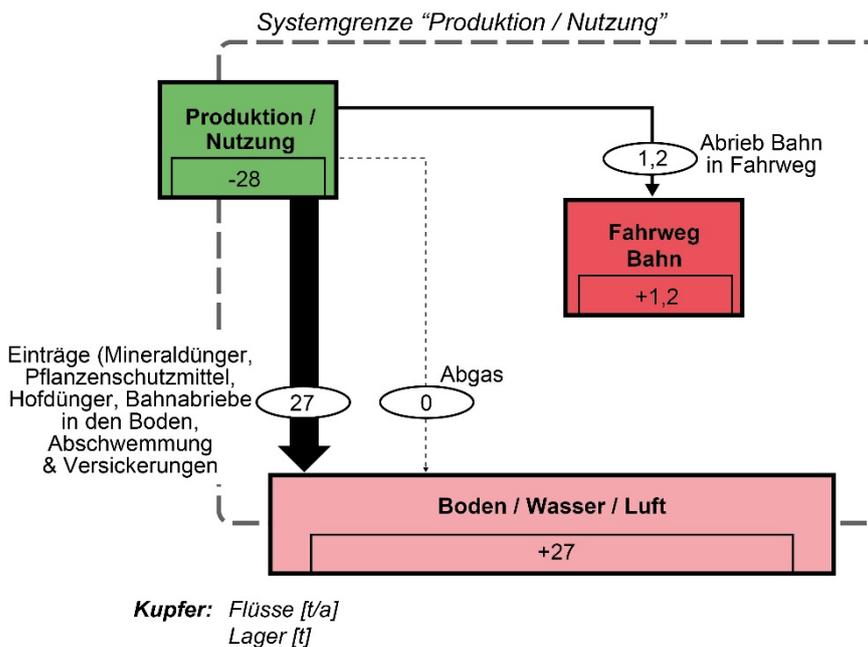


Abbildung 24: Teilsystem: „Produktion / Nutzung“ für Kupfer. Emissionen aus dem Strassenverkehr sind im Fluss "Abschwemmung und Versickerung" enthalten.

Die Anteile der Abfall- und Ressourcenwirtschaft stellen sich wie folgt dar (Abbildung 25):

**a) Natürliche Senken:**

- Gewässer inkl. Sedimente: Der Anteil der Abfall- und Ressourcenwirtschaft stammt vom gereinigten Abwasser aus KVAs und von Einträgen in das Kanalsystem aufgrund der Behandlung von Strassenabfällen.
- Boden: Der Anteil der Abfall- und Ressourcenwirtschaft (54%) ist auf den vor Ort verwerteten Bodenaushub, auf verwertetes Aushub/Bodenmaterial für Bodenre kultivierungen, verwertetes Bodenmaterial innerhalb Bauzonen, sowie auf Gülle & Gärgut (flüssig), Kompost & Gärgut (fest) zurückzuführen. Der Rest (46%) entfällt auch die Abschwemmung von versiegelten Oberflächen und die anschließende Versickerung im Boden sowie auf Einträge in der Landwirtschaft (Dünger, Hilfsstoffe) sowie Abriebe aus dem Schienenverkehr.
- Atmosphäre: Der Anteil der Abfall- und Ressourcenwirtschaft stammt ist Null, da angenommen wurde das keine relevanten Kupfermengen in der gereinigten Abgasfracht aus thermischen Anlagen zu finden ist.

**b) Anthropogene Senken:**

- Die in Kiesgruben und Deponien abgelagerten festen Abfälle stammen ausschließlich aus der Abfall- und Ressourcenwirtschaft.
- In der Produktions- und Nutzungsphase finden sich diverse Senken für die Aufnahme von Sekundärrohstoffen, die durch die Abfall- und Ressourcenwirtschaft produziert werden. Beispielweise gelangen die verwerteten Rückbaustoffe in die Senke „Gebäude und Infrastruktur“ und Schrott gelangt in Hochofen und in weiterer Folge in die Senke „Produkte“.
- Die Senke Fahrweg nimmt Emissionen der Eisenbahn auf (Reifen-, Brems-, Schienen-, und Oberleitungsabriebe).
- Unbekannte Senken sind ein Hilfsprozess, welcher all jene festen Abfälle aufnimmt, deren Verbleib im Rahmen der Studie nicht geklärt werden konnte.

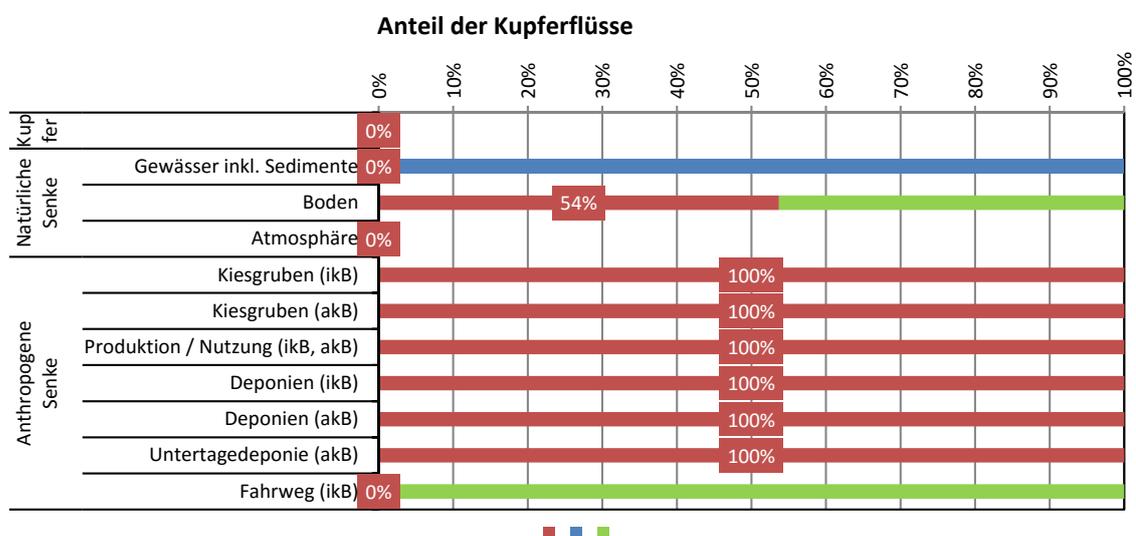


Abbildung 25: Senkenbelastung nach Sektoren (Kupfer).

## 4.2.4 Zink

### 4.2.4.1 Senkenbelastung

Die Senkenbelastung beträgt im Jahr 2013 rund 4'000 Tonnen (Abbildung 26). Davon gelangen 2'900 t/a in Kiesgruben, Deponien und Untertagedeponien. Dabei entfällt der größte Anteil auf KVA-Schlacken (36%) und KVA-Filterstäube (24%). 610 t/a gelangen über Sekundärrohstoffe in die Produktions- und Nutzungsphase, wobei 56% in die Bauwirtschaft gelangen und 26% als Recyclinggüter vom Schredder anfallen. Weitere 8% entfallen auf die stoffliche Verwertung von Altreifen. Bei 330 t/a ist der Zielprozess unbekannt. In die Umwelt gelangen rund 160 t/a, wobei der größte Anteil bei dem verwerteten Bodenmaterial liegt (54%), gefolgt von der Abschwemmung von Zinkoberflächen in der Bauwirtschaft und der Strasseninfrastruktur (31%) sowie Hofdünger (11%) und Gülle & Gärgut (flüssig), Kompost & Gärgut (fest) (3%)

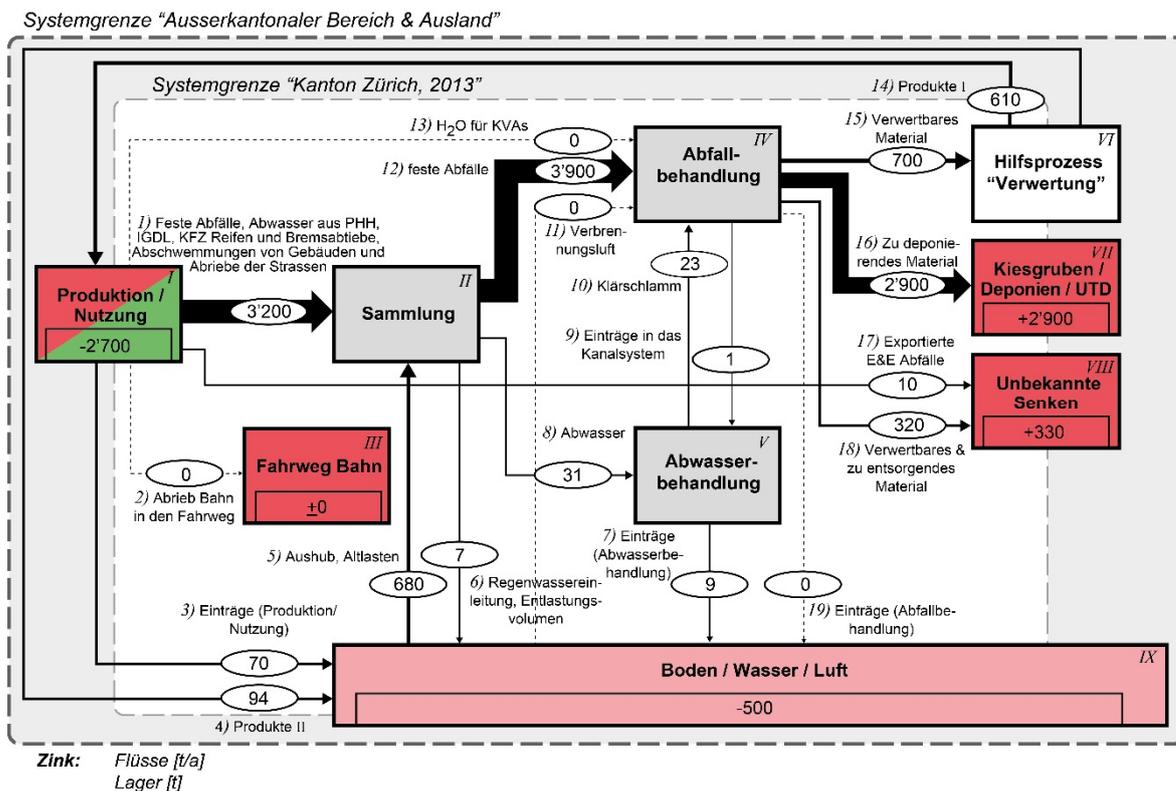


Abbildung 26: Gesamtsystem: „Produktion, Nutzung und Entsorgung“ für Zink. Die Flüsse sind in Tonnen pro Jahr (t/a) angegeben und auf 2 signifikante Stellen gerundet. Prozesse auf der Systemgrenze „Kanton Zürich, 2013“ sind im inner- und ausserkantonalen Bereich zu finden.

Abbildung 27 zeigt die aktuellen Zinkflüsse in die Senken. Die Werte stammen aus dem Gesamtsystem (disaggregiert), welches im Anhang A vollständig dokumentiert und im Systembild dargestellt ist.

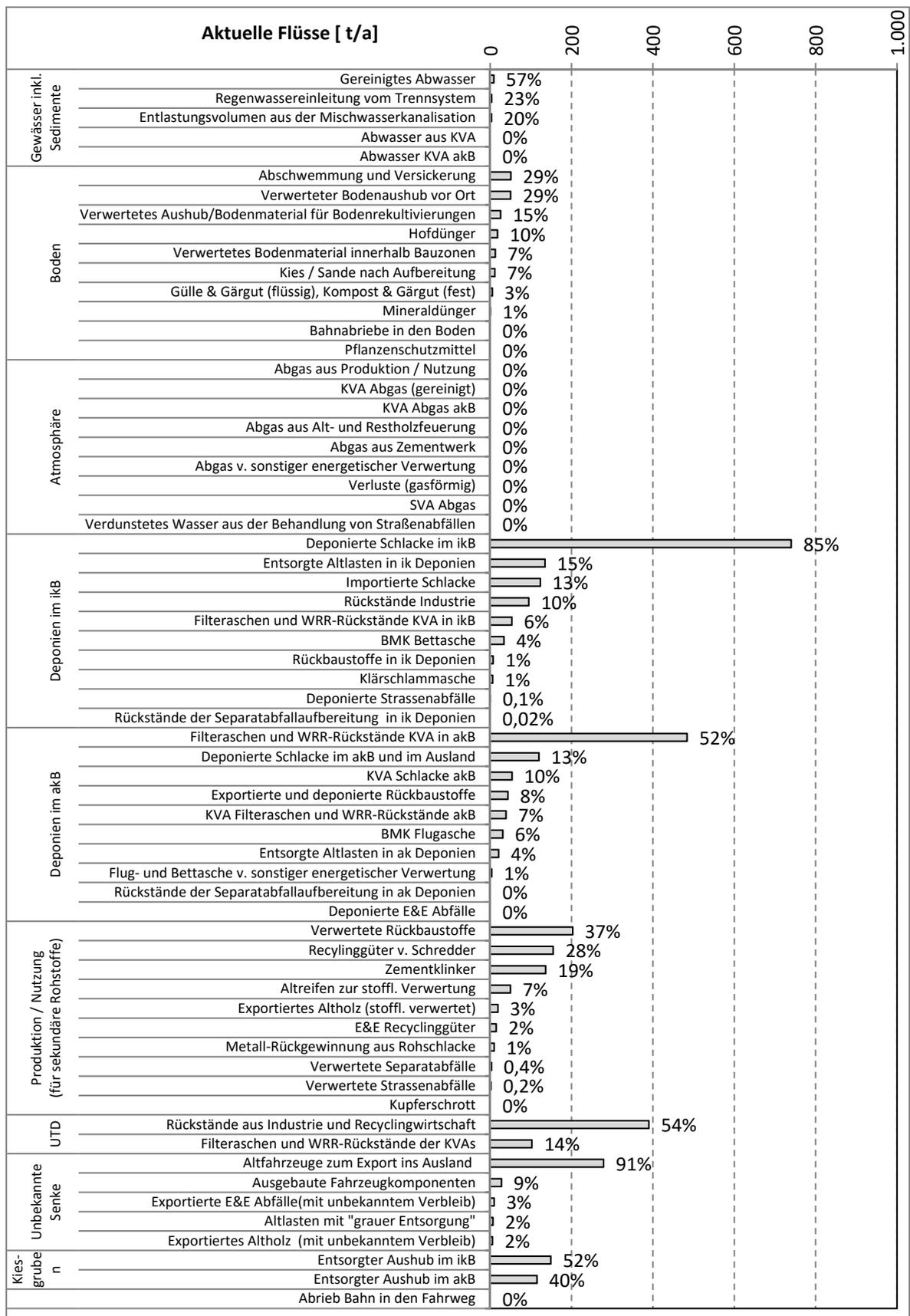


Abbildung 27: Aktuelle Zinkflüsse in die Senken (Die relativen Anteile je Fluss beziehen sich auf die Summe der Frachten in die jeweilige Senke).

#### 4.2.4.2 Sektoren und deren Flüsse in Senken

Insgesamt werden 4.000 t/a (2.8 kg/E) in Senken verbraucht:

- a) 97.8% (2.8kg/E.a) des Zinks erfasst die Abfall- und Ressourcenwirtschaft. Dort werden rund 5% (0.13 kg/E.a) einer weiteren funktionellen Verwertung zugeführt (E&E Recyclinggüter, Recyclinggüter vom Schredder) und 95% (2.64 kg/E.a) des Zinks werden nicht weiter funktionell eingesetzt. Das betrifft in erster Linie deponierte Abfälle (1.8 t/E.a), unverschmutztes Aushubmaterial in Kiesgruben (0.3 t/E.a), Abfälle mit unbekanntem Zielprozessen (0.2 t/E.a).
- b) 1.8% (50 g/E.a) des Zinks wird durch die Produktions- und Nutzungsphase in die natürlichen Senken Boden, Wasser und Luft emittiert.
- c) 0.4% (11 g/E.a) des Zinks erfasst die Abwasserwirtschaft, und leitet diese in die Vorfluter. Hinweis: Der Klärschlamm (17 g/E.a) wurde der Abfall- und Ressourcenwirtschaft zugeordnet, da er in thermischen Anlagen behandelt und die Rückstände in Deponien gelangen.

*Tabelle 19: Senken und deren Belastung durch Zinkflüsse in t/a. Die Werte sind auf 2 signifikante Stellen gerundet.*

Senke	Abfall- & Ressourcenwirtschaft	Abwasserwirtschaft	Produktion / Nutzung	total
Kiesgruben, Deponien & UTD	2'900	-	-	2'900
Produktion / Nutzung	610	-	-	610
Fahrweg	-	-	-	-
Atmosphäre	-	-	-	-
Gewässer inkl. Sedimente	-	16	-	16
Boden	94	-	70	160
Unbekannte Senken	330	-	-	330
total	3'900	16	70	4'000

**Anhang:** Das nachfolgende Systembild basiert auf der Aggregation von Einzelflässen des Gesamtsystems (disaggregiert). Die Aggregation ist in tabellarischer Form im Anhang D enthalten.

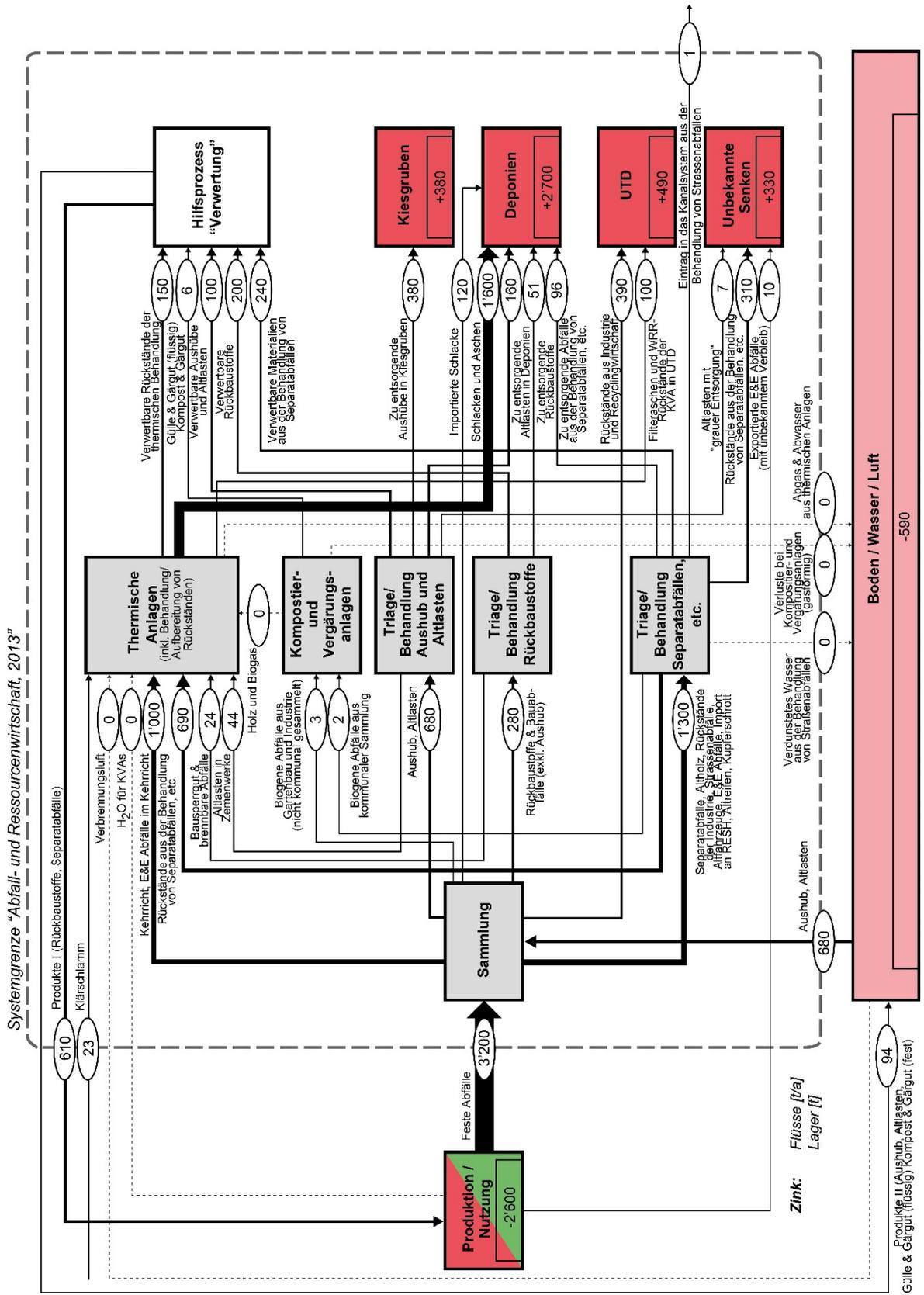


Abbildung 28: Teilsystem: „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ für Zink.

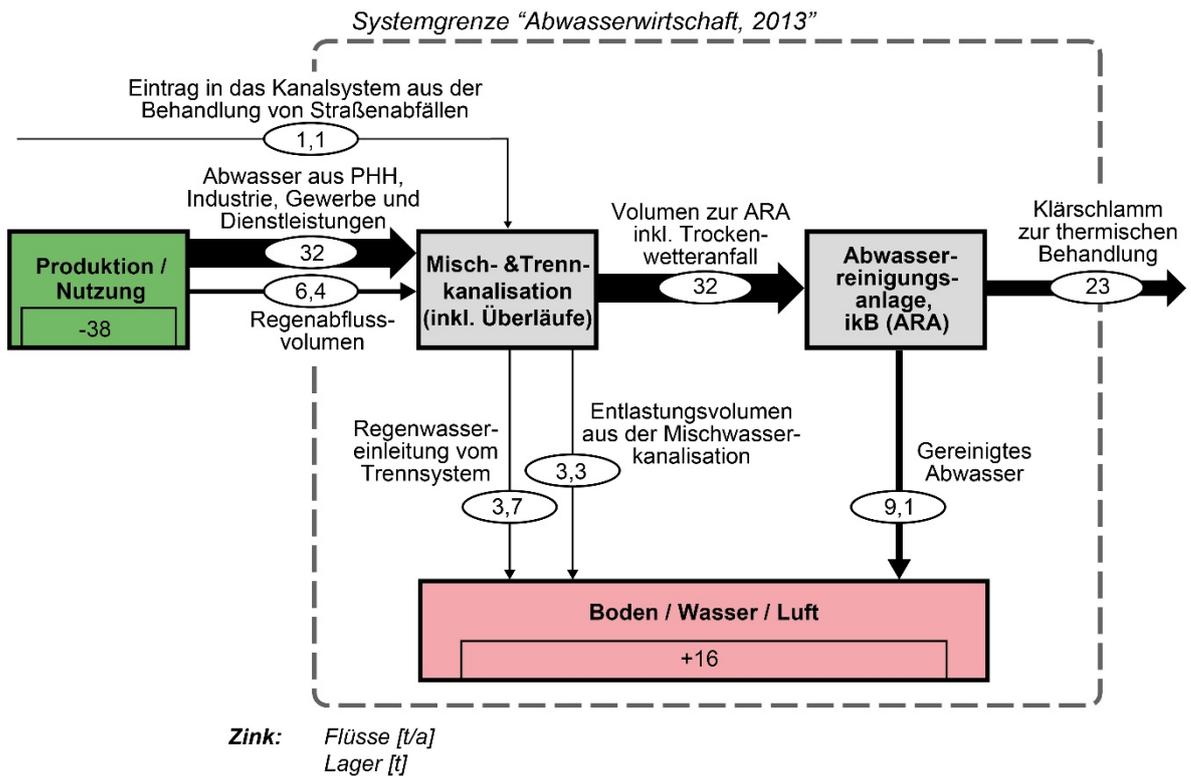


Abbildung 29: Teilsystem: „Abwasserwirtschaft“ für Zink. Quellen sind grün, anthropogene Senken sind dunkelrot und natürliche Senken sind hellrot eingefärbt. Die Flüsse sind in Tonnen pro Jahr (t/a) angegeben und auf 2 signifikante Stellen gerundet. Aufgrund dessen kann es bei einzelnen Prozessen zu Differenzen zwischen der Summe In- und Outputs kommen.

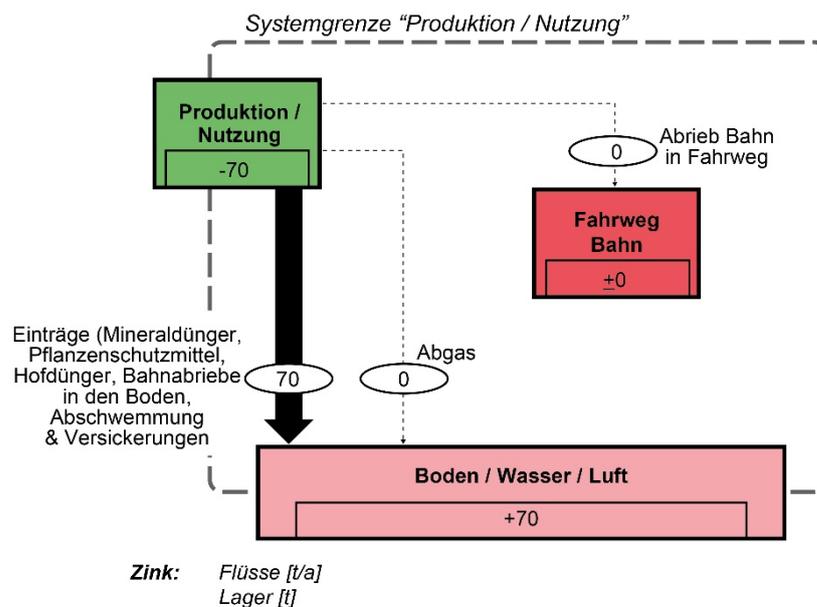


Abbildung 30: Teilsystem: „Produktion / Nutzung“ für Zink. Die Flüsse sind in Megatonnen pro Jahr (t/a) angegeben und auf 2 signifikante Stellen gerundet. Emissionen aus dem Straßenverkehr sind im Fluss "Abschwemmung und Versickerung" enthalten.

## 4.2.5 PAK

### 4.2.5.1 Senkenbelastung

Die Senkenbelastung beträgt im Jahr 2013 rund 160 Tonnen (Abbildung 31). Davon gelangt der mengenmäßig größte Anteil in die Kiesgruben und Deponien (110 t/a). 6.3 t/a werden in den thermischen Anlagen zerstört und 62 t/a werden in der Nutzungsphase - zu größtem Teil in Belägen - wieder auftreten. Die PAK Emissionen stammen hauptsächlich aus Verbrennungsprozessen (Nutzungsphase - Holzfeuerungen) (1.1 t/a). Die Abfallwirtschaft beiträgt mit rund 0.08 t/a zu den PAK-Emissionen.

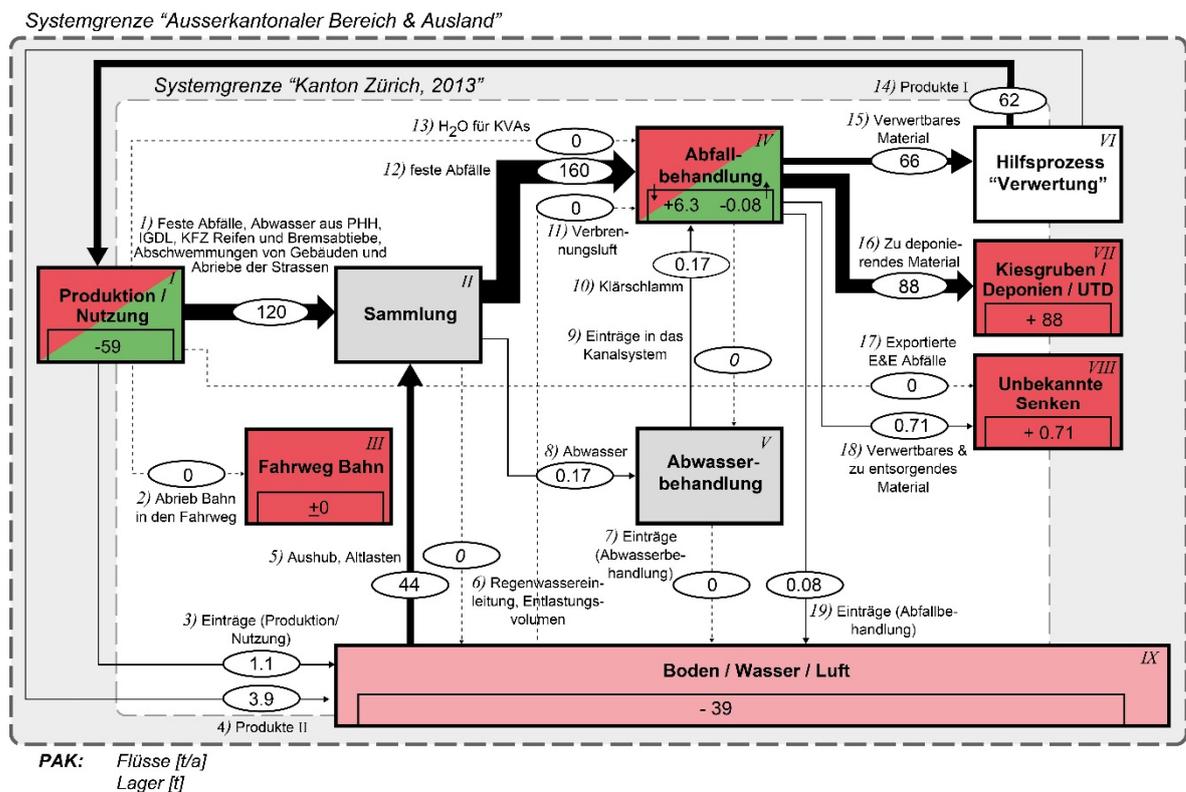


Abbildung 31: Gesamtsystem: „Produktion, Nutzung und Entsorgung“ für PAK. Die Flüsse sind in Tonnen pro Jahr (t/a) angegeben. Prozesse auf der Systemgrenze „Kanton Zürich, 2013“ sind im inner- und ausserkantonalen Bereich zu finden.

Abbildung 32 zeigt die aktuellen PAK-Flüsse in die Senken. Die Werte stammen aus dem Gesamtsystem (disaggregiert), welches im Anhang A dokumentiert und im Systembild dargestellt ist.

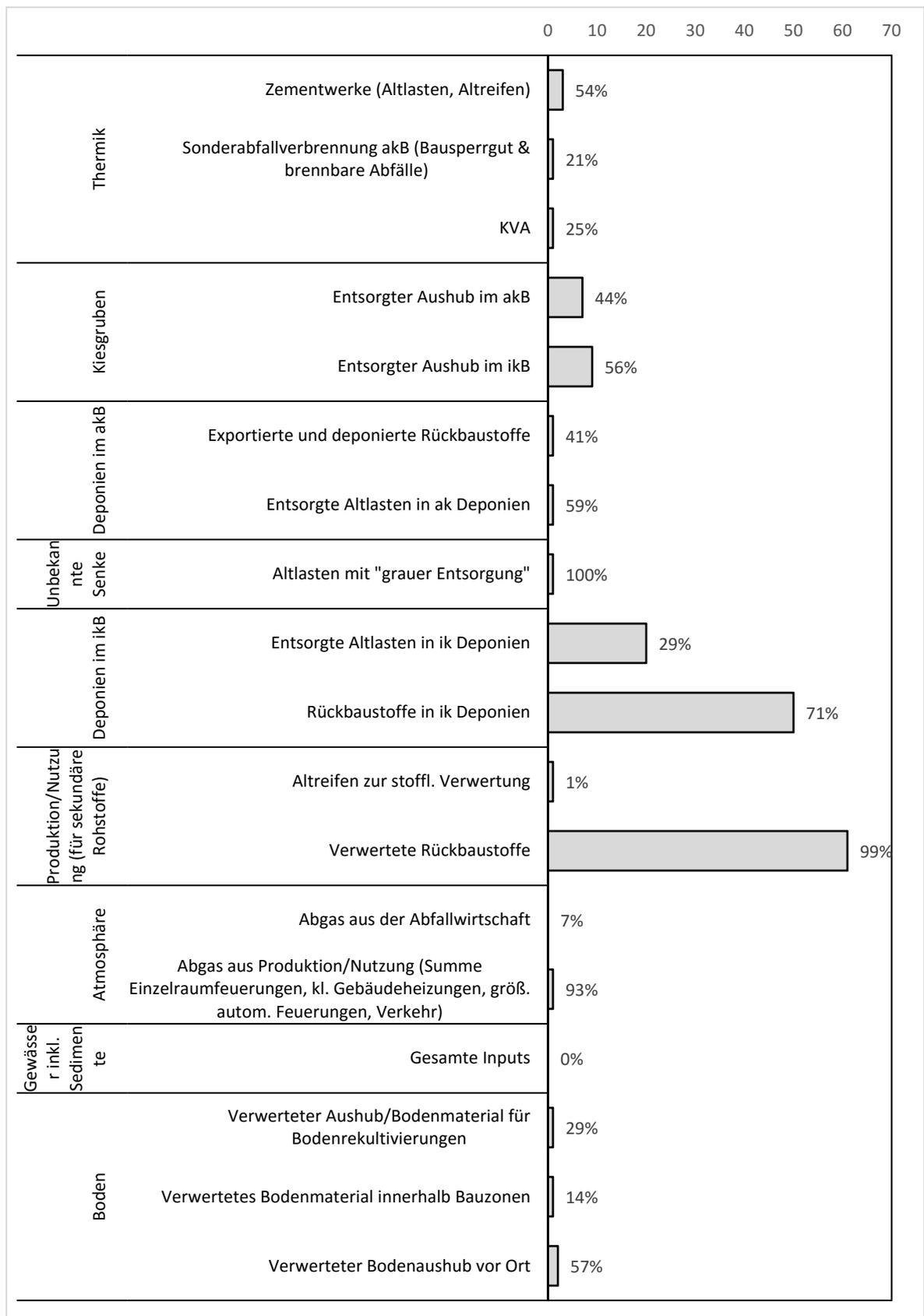


Abbildung 32: Aktuelle PAK-Flüsse in die Senken, in t/a.

#### 4.2.5.2 Sektoren und deren Flüsse in Senken

Insgesamt werden 160 t/a PAK in Senken verbracht:

- a) 99.3% der PAK gelangen in die Abfall- und Ressourcenwirtschaft.
- b) 0.7% der PAK gelangen in der Produktions- und Nutzungsphase als Emissionen aus Einzelraumfeuerungen und kleinen Gebäudeheizungen.
- c) Die Abwasserwirtschaft ist bei PAK unbedeutend, da die Flüsse sehr gering sind. Z.B. PAK im Klärschlamm <0.2 t/a

Die Flüsse von PAK in die natürlichen Senken stammen aus Emissionen von der Produktions- und Nutzungsphase, hauptsächlich aus Einzelraumfeuerungen, kleinen Gebäudeheizungen und größeren automatischen Feuerungen (1.10 t/a) (FOEN 2015); (ELK 2013). Die Emissionen vom Verkehr sind vergleichsweise unbedeutend (< 0.1 t/a) (ELK 2013). Der Pneuabrieb wurde nicht betrachtet, weil er nur geringfügig zu den Emissionen beiträgt (BAG 2012). Die Einträge in den Boden (3.9 t/a) sind verwerteter Bodenaushub vor Ort/Bodenrehabilitierung. Die Einträge in Gewässer wurden nicht ausführlich analysiert, da die Einträge in die Sedimente eher konstant oder kleiner sind (Bogdal, Bucheli et al. 2011). Die PAK-Mengen im Klärschlamm sind auch klein (<1 t/a). Die Einträge durch das Abflusswasser sind auch sehr gering (Boller, Steiner et al. 2009).

Table 20: Senken und deren Belastung durch PAK-Flüsse in t/a.

Senke		Abfall- & Ressourcenwirtschaft	Abwasserwirtschaft	Produktion / Nutzung	Total
Nat. Senke	Gewässer inkl. Sedimente	0	0	0	<b>0</b>
	Boden	5	0	0	<b>5</b>
	Atmosphäre	0	0	1	<b>1</b>
Ant. Senke	Kiesgruben, Deponien & UTD	88	-	-	<b>88</b>
	Produktion / Nutzung	62	-	-	<b>62</b>
	Thermik	6	-	-	<b>6</b>
	Unbekannte Senken	1	-	-	<b>1</b>
<b>total</b>		<b>162</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>163</b>

Legende: UTD=Untertagedeponie

In weiterer Folge findet sich das Systembild für das Teilsystem "Abfall- und Ressourcenwirtschaft" (Abbildung 33).



## 4.2.6 DecaBDE

### 4.2.6.1 Senkenbelastung

Die Senkenbelastung beträgt im Jahr 2013 rund 22 Tonnen (Abbildung 34). Von den 22 t DecaBDE/a werden rund 19 t in den thermischen Anlagen zerstört, rund um 3.1 t werden in Sekundärkunststoffe transferiert und 0.31 t gelangen auf Deponien. Die Einträge von DecaBDE in die Umwelt sind mit rund 0.001 t/a minimal. Die 0.001 t/a DecaBDE gelangen in die Atmosphäre und sind aus toxikologischer Hinsicht nicht signifikant.

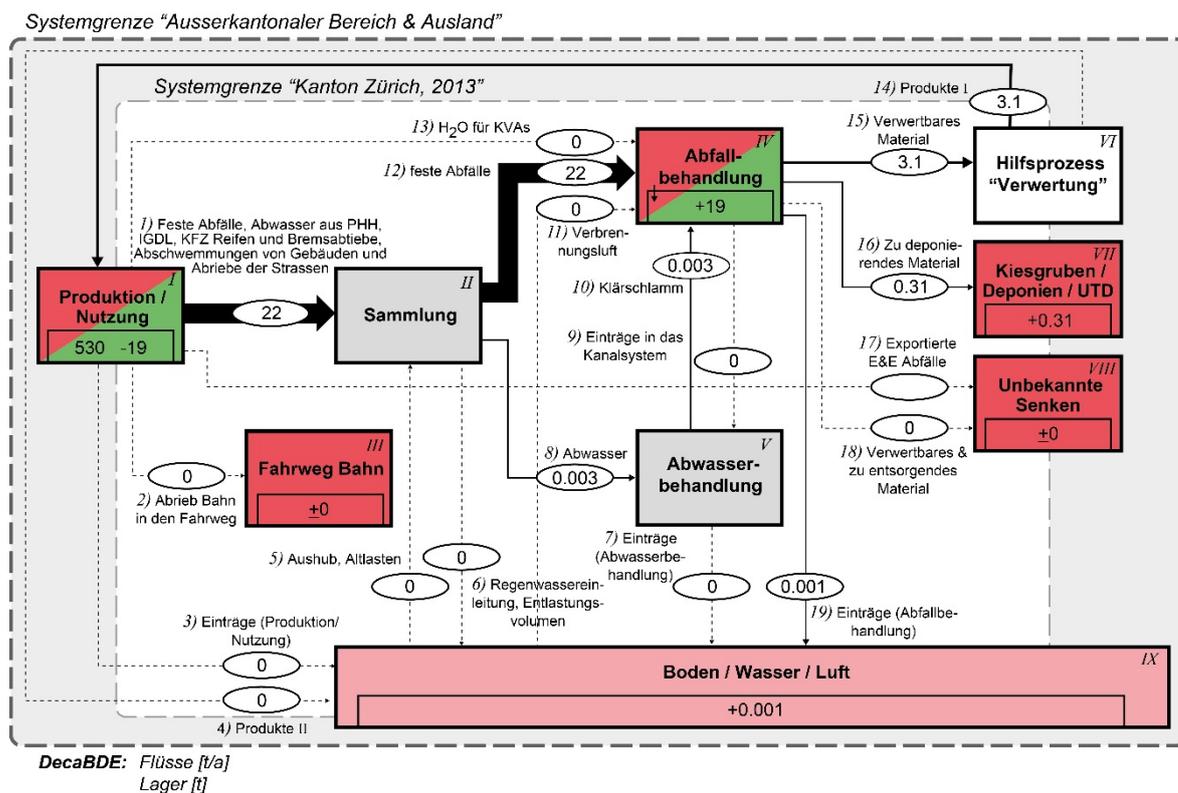


Abbildung 34: Gesamtsystem: „Produktion, Nutzung und Entsorgung“ für DecaBDE. Die Flüsse sind in Tonnen pro Jahr (t/a) angegeben. Prozesse auf der Systemgrenze „Kanton Zürich, 2013“ sind im inner- und ausserkantonalen Bereich zu finden.

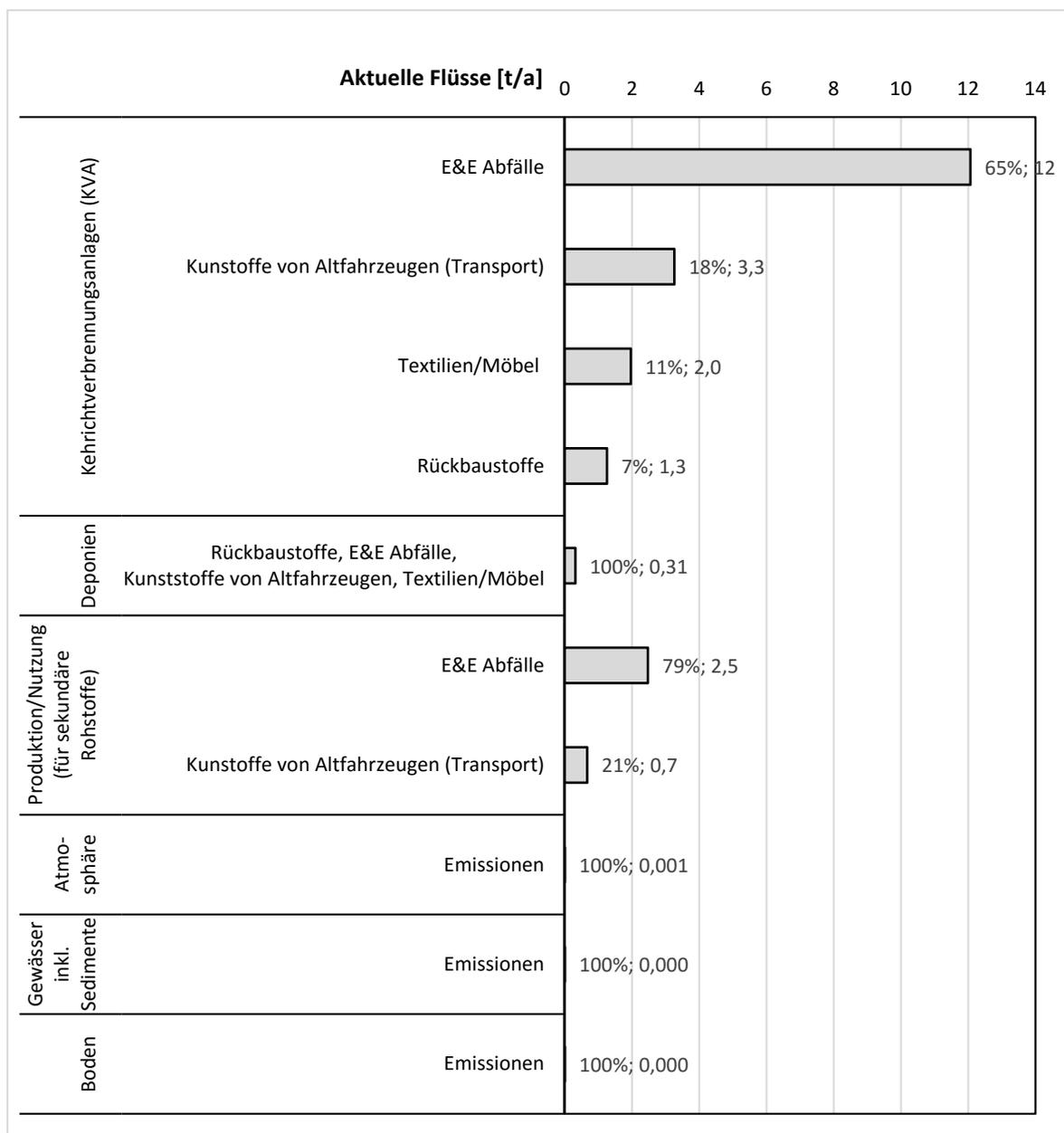


Abbildung 35: DecaBDE-Flüsse in die Senken, in t/a. (Anmerkung: ARW = Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Transport: DecaBDE in Kunststoffen von Altautos)

Abbildung 35 zeigt die aktuellen DecaBDE-Flüsse in die Senken. Die Werte wurden von den Daten für die gesamte Schweiz (Morf, Buser et al. 2007) abgeleitet, da es keine kantonspezifischen Daten gibt. Im Folgenden wurden Erkenntnisse über Kunststoffrecycling von Vyzinkarova und Brunner (2013) übernommen. Die DecaBDE-Daten stammen nicht aus dem detaillierten Systembild und sind nicht wie Cu, Zn und PAK im Anhang A dokumentiert.

### 4.2.6.2 Sektoren und deren Flüsse in Senken

Das Teilsystem "Abfall- und Ressourcenwirtschaft" ist in der Abbildung 36 dargestellt.

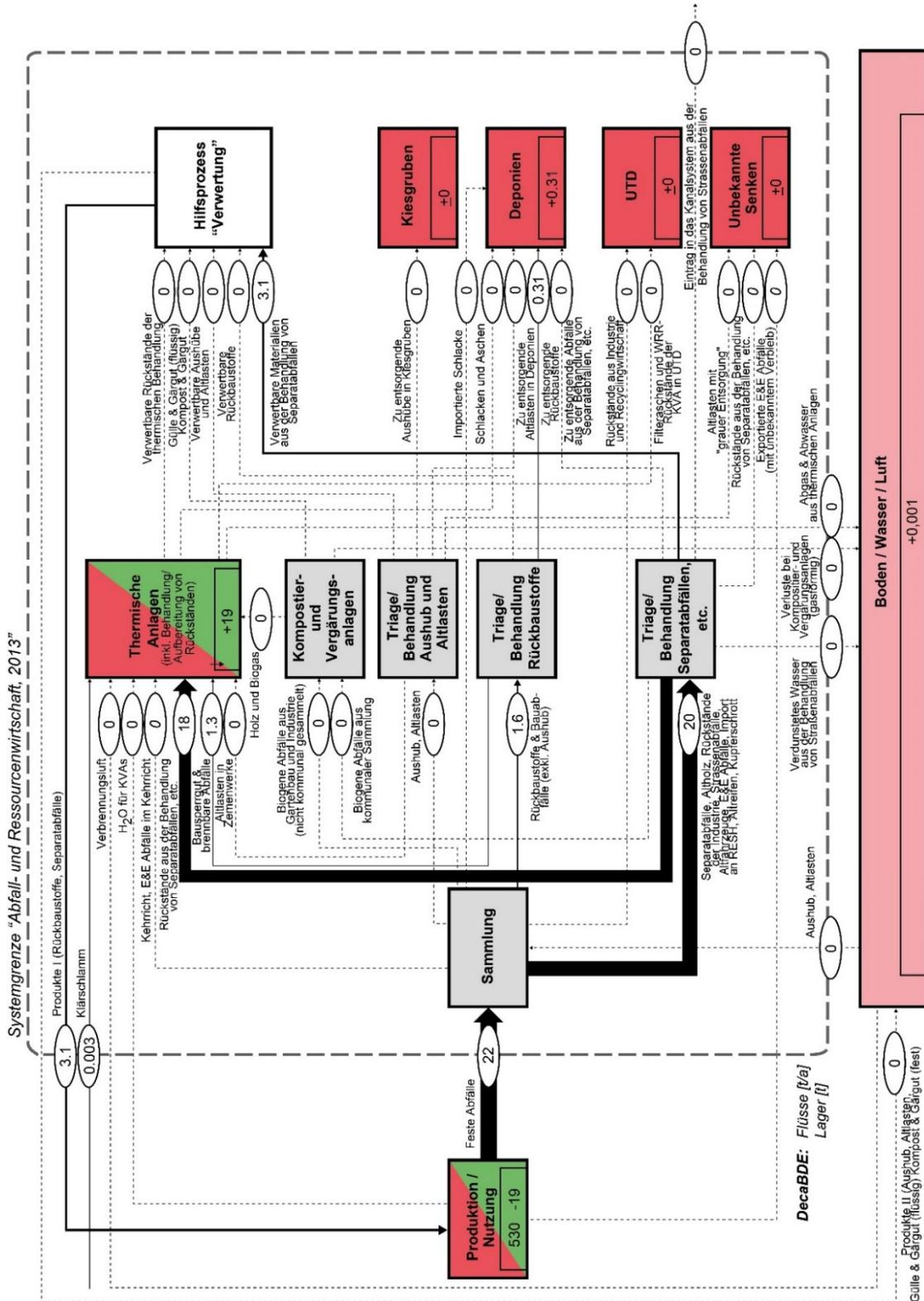


Abbildung 36: Teilsystem: „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ für DecaBDE. Quellen sind grün, anthropogene Senken sind dunkelrot und natürliche Senken sind hellrot eingefärbt. Die Flüsse sind in Tonnen pro Jahr (t/a) angegeben.

### 4.3 Sind Engpässe zu erwarten?

Engpässe treten bei der Verbringung von Abstoffen in Senken dort auf, wo bei den betreffenden Flüssen die formulierten Zielkriterien überschritten werden. Anhand der Wertebereiche des Indikators (Kap. 3.4.4) wird jeder Fluss dem Bereich „kritisch“, „subkritisch“ oder „unkritisch“ zugeordnet und in den folgenden Kapiteln für die Flüsse auf der Güter- und Stoffebene dargestellt. Möglichkeiten zur Überwindung der Engpässe sind in Kap. 4.4 dargestellt.

#### 4.3.1 Güter

Insgesamt gehen 69 Güterflüsse in die Senken, wovon 18 Güterflüsse von den in Kap. 3.4.3.3 definierten Zielkriterien betroffen sind. Unter den 18 Flüssen sind laut Abbildung 37 bzw. Tabelle 21:

- 4 Flüsse, deren Indikator im kritischen Bereich liegt ( $\omega > 1$ ). Diese Flüsse sind ein Engpass bei der Verbringung von Abfällen in Senken. Davon betroffen sind die Rückbaustoffe, für die höhere Recyclingquoten und damit einhergehende Reduktion der deponierten Mengen gefordert wird. Des Weiteren betrifft es den unverschmutzten Aushub, der in ak Kiesgruben abgelagert wird. Hier besteht die Zielvorstellung nach einer innerkantonalen Ablagerung.
- 2 Flüsse, deren Indikator im subkritischen Bereich liegt ( $0.8 < \omega < 1.0$ ). Das betrifft Altlasten und verfestigte Rückstände, die im ikB auf Inertstoffdeponien abgelagert werden.
- 12 Flüsse, deren Indikator im unkritischen Bereich liegt ( $\omega < 0.8$ ).

Für 51 von 69 Güterflüssen wurden keine Zielkriterien definiert, da es diesbezüglich keine konkreten Zielvorstellungen gibt.

*Tabelle 21: Güterflüsse im Widerspruch zu den umwelt- und ressourcenpolitischen Zielsetzungen. Die Werte sind auf 2 signifikante Stellen gerundet.*

Flussname <sup>1)</sup>	Senke	Aktueller Fluss [t/a]	Kritischer Fluss [t/a]	Indikator [-]	Bereich
1 Entsorgter Aushub im akB	Kiesgruben im akB	3'700'000	0	+ ∞	Kritisch
2 Rückbaustoffe I	Deponien im ikB (Inertstoff)	51'000	14'000	3,6	Kritisch
3 Rückbaustoffe II	Deponien im ikB (Reaktor)	17'000	4'800	3,6	Kritisch
4 Exportierte und deponierte Rückbaustoffe	Deponien im akB	400'000	110'000	3,6	kritisch
5 Altlasten I	Deponien im ikB (Inertstoff)	460'000	570'000	0.8	subkritisch
6 Verfestigte Rückstände, Übriges IV	Deponien im ikB (Schlacke)	150	180	0.8	subkritisch

Legende: 1) Die Flussnahmen korrespondieren mit den Bezeichnungen im Gesamtsystem (disaggregiert), welches im Anhang A dokumentiert ist. Die römischen Ziffern dienen der Zuordnung der Abfälle zu bestimmten Senken. Abkürzungen: ikB=Innerkantonaler Bereich, akB=Ausserkantonaler Bereich

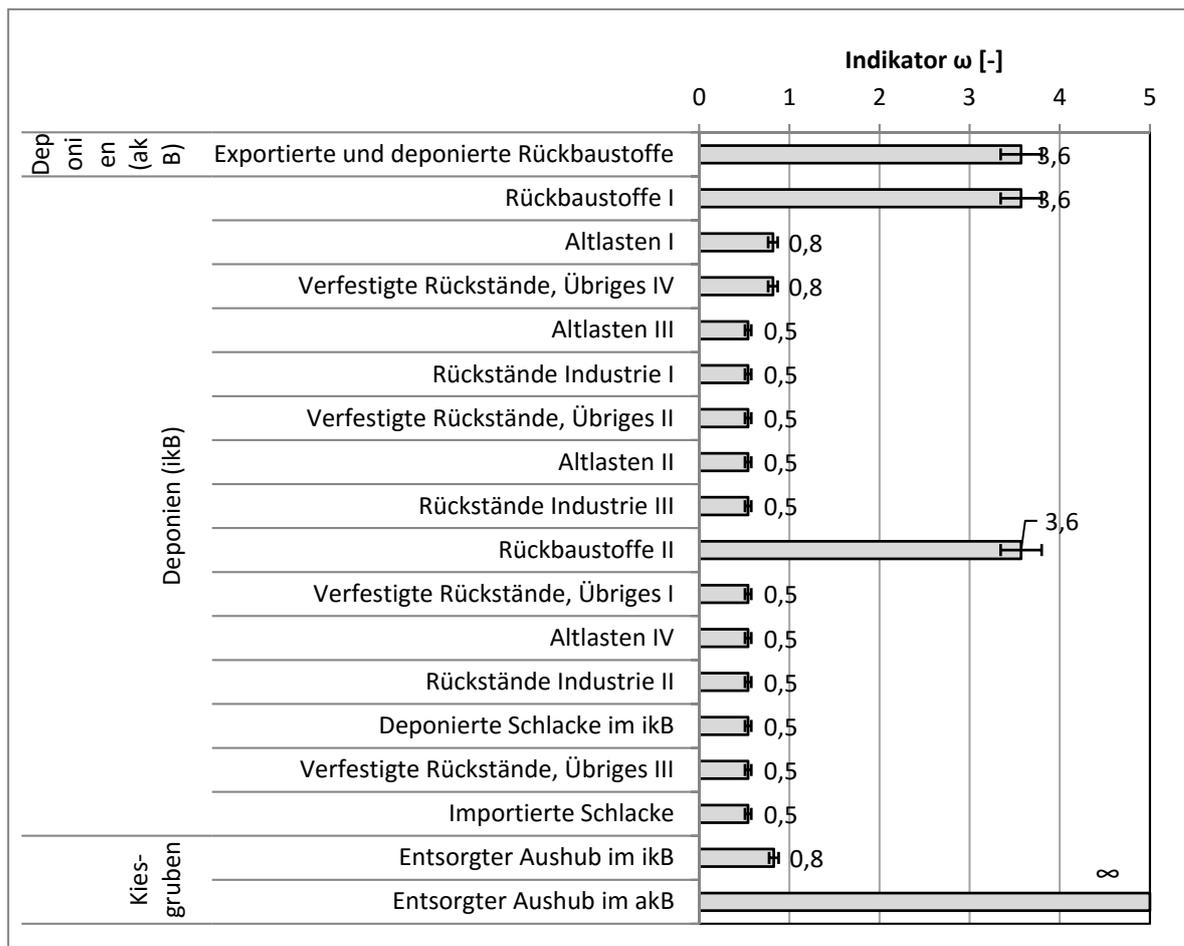


Abbildung 37: Indikator  $\omega$  für Güterflüsse in Senken unter Angabe der Unsicherheitsbereiche ausgedrückt als Variationskoeffizienten.

#### 4.3.2 Kupfer

Insgesamt gehen 69 Kupferflüsse in die Senken, wovon 30 Kupferflüsse von den in Kap. 3.4.3.3 definierten Zielkriterien betroffen sind. Unter den 30 Flüssen sind laut Abbildung 38 bzw. Tabelle 22:

- 10 Flüsse, deren Indikator im kritischen Bereich liegt ( $\omega > 1$ ). Diese Flüsse sind ein Engpass bei der Verbringung von Abfällen und Emissionen in die Senken. Davon betroffen sind Einträge in den landwirtschaftlichen Boden (Fluss 1-5), deponierte KVA-Schlacke (Fluss 9, 10), KVA-Filteraschen in die UTD (Fluss 11) sowie Schrott aus der Metall-Rückgewinnung bei der KVA-Schlacke (Fluss 12).
- 2 Flüsse, deren Indikator im subkritischen Bereich liegt ( $0,8 < \omega < 1,0$ ). Das betrifft die Einträge in die Oberflächengewässer aus den Überlaufbauwerken der Mischkanalisation (Fluss 6) und den Regenwassereinleitungen aus dem Trennsystem (Fluss 7).
- 18 Flüsse, deren Indikator im unkritischen Bereich liegt ( $\omega < 0,8$ ).

Für 39 von 69 Kupferflüssen wurden keine Zielkriterien definiert, da es diesbezüglich keine konkreten Zielvorstellungen gibt. Möglichkeiten zur Überwindung der Engpässe sind in Kap. 4.4 dargestellt.

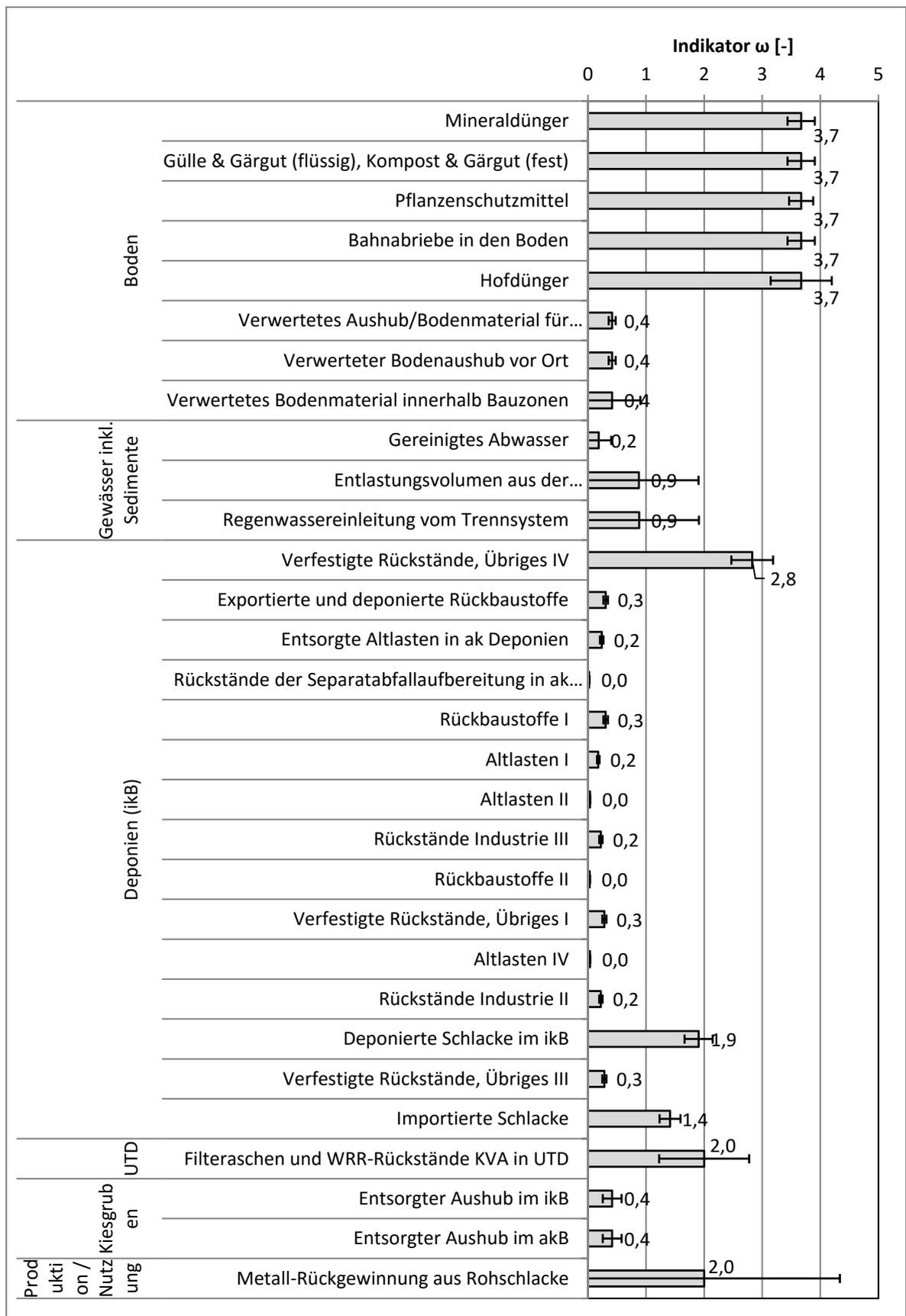


Abbildung 38: Indikator  $\omega$  für Kupferflüsse in Senken unter Angabe der Unsicherheitsbereiche ausgedrückt als Variationskoeffizienten.

*Tabelle 22: Aktuelle Kupferflüsse im Widerspruch zu den umwelt- und ressourcenpolitischen Zielsetzungen. Die Werte sind auf 2 signifikante Stellen gerundet.*

N°	Flussname <sup>1)</sup>	Senke	Aktueller Fluss [t/a]	Kritischer Fluss [t/a]	Indikator [-]	Bereich
1	Mineraldünger	Boden	0.2	0.054	3.7	Kritisch
2	Gülle & Gärgut (flüssig), Kompost & Gärgut (fest)	Boden	1.8	0.48	3.7	Kritisch
3	Pflanzenschutzmittel	Boden	4.2	1.1	3.7	Kritisch
4	Bahnabriebe in den Boden	Boden	4.9	1.3	3.7	Kritisch
5	Hofdünger	Boden	4.6	1.3	3.7	Kritisch
6	Entlastungsvolumen aus der Mischwasserkanalisation	Oberflächengewässer	1.2	1.3	0.9	Subkritisch
7	Regenwassereinleitung vom Trennsystem	Oberflächengewässer	1.3	1.5	0.9	Subkritisch
8	Verfestigte Rückstände, Übriges IV	Deponien im ikB (Inertstoff)	0.19	0.067	2.8	Kritisch
9	Deponierte Schlacke im ikB	Deponien im ikB (Schlacke)	900	470	1.9	Kritisch
10	Importierte Schlacke	Deponien im ikB (Schlacke)	150	110	1.4	Kritisch
11	Filteraschen und WRR-Rückstände KVA in UTD	Untertagedeponie	4.8	2.4	2.0	Kritisch
12	Metall-Rückgewinnung aus Rohschlacke	Produktion/Nutzung	220	110	2.0	Kritisch

Anmerkung zu Fluss 12: Abfälle aus dem Kt. ZH werden zum Teil in KVAs im akB verbrannt. Über die Verwertungs- und Entsorgungswege der dabei entstehenden Filteraschen und WRR-Rückstände liegen keine genauen Informationen vor. Es wurde angenommen, dass diese Frachten zu einer Deponie im akB gelangen.

Legende: 1) Die Flussnahmen korrespondieren mit den Bezeichnungen im Gesamtsystem (disaggregiert), welches im Anhang A dokumentiert ist.

Abkürzungen: ikB=Innerkantonaler Bereich, akB=Ausserkantonaler Bereich

### 4.3.3 Zink

Insgesamt gehen 69 Zinkflüsse in die Senken, wovon 28 Zinkflüsse von den in Kap. 3.4.3.3 definierten Zielkriterien betroffen sind. Unter den 28 Flüssen sind laut Abbildung 39 bzw. Tabelle 23:

- 10 Flüsse, deren Indikator im kritischen Bereich liegt ( $\omega > 1$ ). Diese Flüsse sind ein Engpass bei der Verbringung von Abfällen und Emissionen in die Senken. Davon betroffen sind KVA-Filteraschen (Fluss 4, 5, 6, 8, 10) sowie die Einträge in den landwirtschaftlichen Boden (Fluss 1-3) und die deponierte KVA-Schlacke (Fluss 7,9).
- 18 Flüsse, deren Indikator im unkritischen Bereich liegt ( $\omega < 0.8$ ).

Für 41 von 69 Zinkflüssen wurden keine Zielkriterien definiert, da es diesbezüglich keine konkreten Zielvorstellungen gibt.

Möglichkeiten zur Überwindung der Engpässe sind in Kap. 0 dargestellt.

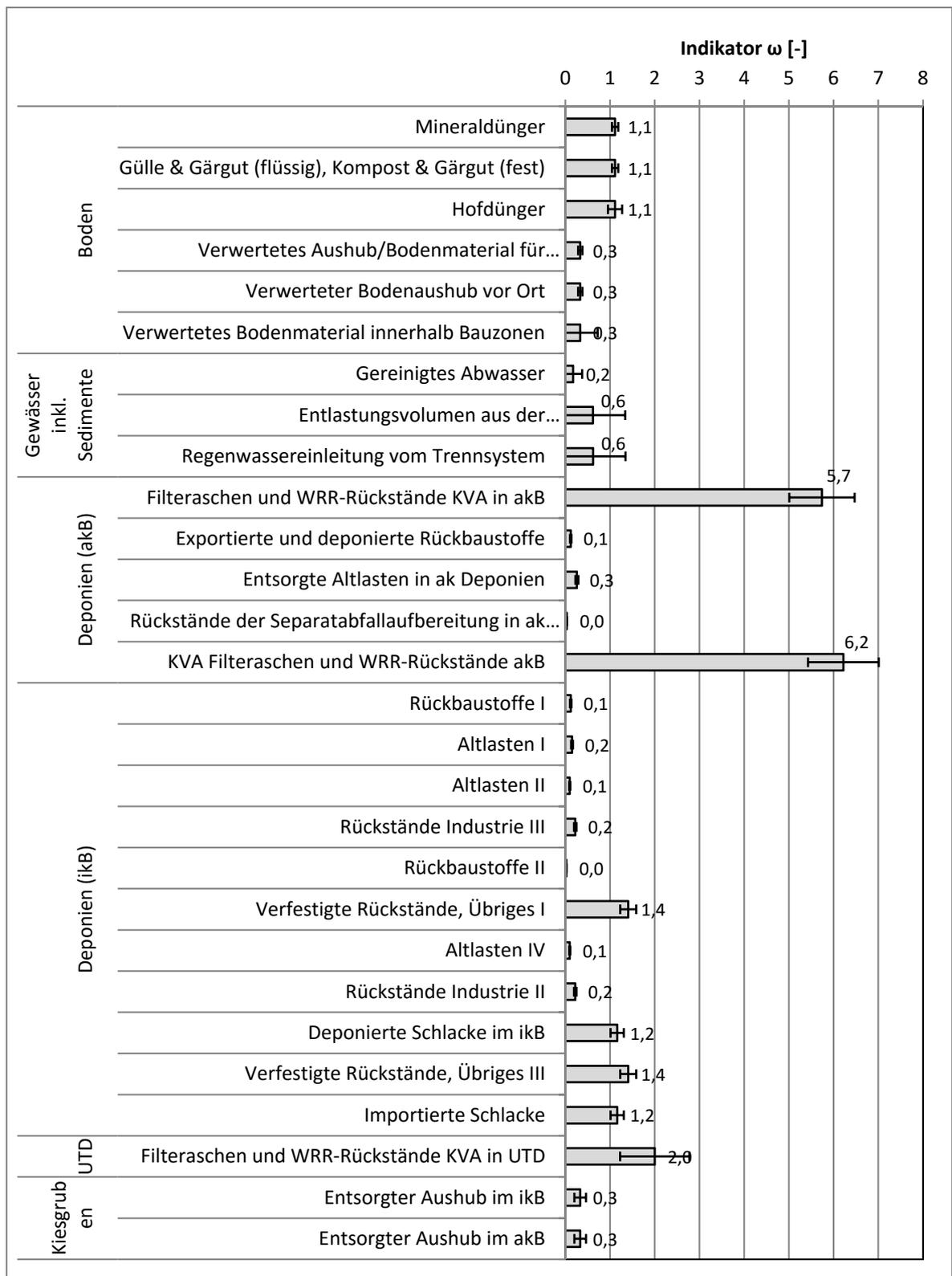


Abbildung 39: Indikator  $\omega$  für Zinkflüsse in Senken unter Angabe der Unsicherheitsbereiche ausgedrückt als Variationskoeffizienten.

*Tabelle 23: Aktuelle Zinkflüsse im Widerspruch zu den umwelt- und ressourcenpolitischen Zielsetzungen. Die Werte sind auf 2 signifikante Stellen gerundet.*

N°	Flussname	Senke	Aktueller Fluss [t/a]	Kritischer Fluss [t/a]	Indikator [-]	Bereich
1	Mineraldünger	Boden	1.1	0.94	1.1	Kritisch
2	Gülle & Gärgut (flüssig), Kompost & Gärgut (fest)	Boden	5.5	4.9	1.1	Kritisch
3	Hofdünger	Boden	18	16	1.1	Kritisch
4	Filteraschen und WRR-Rückstände KVA in akB	Deponien im akB	480	84	5.7	Kritisch
5	KVA Filteraschen und WRR-Rückstände akB	Deponien im akB	39	6.3	6.2	Kritisch
6	Verfestigte Rückstände, Übriges I	Deponien im ikB (Reaktor)	67	48	1.4	Kritisch
7	Deponierte Schlacke im ikB	Deponien im ikB (Schlacke)	740	640	1.2	Kritisch
8	Verfestigte Rückstände, Übriges III	Deponien im ikB (Schlacke)	9.4	6.7	1.4	Kritisch
9	Importierte Schlacke	Deponien im ikB (Schlacke)	120	110	1.2	Kritisch
10	Filteraschen und WRR-Rückstände KVA in UTD	Untertagedeponie	100	51	2.0	Kritisch

Anmerkung zu Fluss 5: Abfälle aus dem Kt. ZH werden zum Teil in KVAs im akB verbrannt. Über die Verwertungs- und Entsorgungswege der dabei entstehenden Filteraschen und WRR-Rückstände liegen keine genauen Informationen vor. Es wurde angenommen, dass diese Frachten einer Deponie im akB gelangen.

Legende: 1) Die Flussnahmen korrespondieren mit den Bezeichnungen im Gesamtsystem (disaggregiert), welches im Anhang A dokumentiert ist.

Abkürzungen: ikB=Innerkantonaler Bereich, akB=Ausserkantonaler Bereich

#### 4.3.4 PAK

Von allen PAK-Flüssen in die Senken sind 9 von den in Kap. 3.4.3.3 definierten Zielkriterien betroffen. Der Indikator für diese Flüsse ist in der Abbildung 40 dargestellt und zeigt:

- Alle bewerteten Flüsse in den Boden – der Aushub und der Kompost – liegen im unkritischen Bereich ( $\omega < 0.8$ ).
- Die im ikB deponierten Strassenabfälle liegen im unkritischen Bereich.
- Die Altlasten auf die Inertstoff-, Reststoff- und Reaktorstoffdeponie (I, II, III) liegen im unkritischen Bereich.
- Die in den ausserkantonalen Deponien entsorgten Altlasten und Rückbaustoffe liegen im unkritischen Bereich.
- Der in Kiesgruben entsorgter Aushub liegt im unkritischen Bereich.

### Ausbauasphalt<sup>4</sup>:

- Der stofflich verwertete Ausbauasphalt liegt im unkritischen Bereich und entspricht den aktuellen Zielvorstellungen ( $\omega=0.6$ ). Dies ist der Fall, auch wenn die PAK-belasteten Ausbauasphaltgranulate mit Gehalten von 5'000 – 20'000 ppm PAK im Bindemittel noch beigemischt sind. Die Erklärung dafür ist, dass der Hauptteil (rund 60%) der stofflich verwerteten Fraktionen einen PAK-Gehalt von <1'000 ppm haben. Die Unsicherheiten sind jedoch groß ( $\omega=0.2-1.0$ ). Wenn die Fraktionen mit Gehalten von 5'000 – 20'000 ppm PAK im Bindemittel nach der TVA Revision nicht mehr recycelt werden, wird der Indikator voraussichtlich einen Wert von rund  $\omega=0.3$  ( $\omega=0.1-0.5$ ) haben. Beim Recycling vom Ausbauasphalt sind keine Engpässe zu erwarten.
- Der in den innerkantonalen Deponien aktuell entsorgte Ausbauasphalt hat einen Indikatorwert zwischen  $\omega=0.4-1.8$  (Kriterium: 20'000 ppm). Aufgrund grosser Unsicherheiten ist es nicht möglich zu sagen, ob er im kritischen oder im unkritischen Bereich liegt. Die Unsicherheiten sind deswegen so gross, weil nur die Flüsse der Asphaltfraktionen <1'000 ppm, 1'000-5'000 ppm, 5'000-20'000 ppm und >20'000 ppm bekannt sind und nicht die PAK-Konzentrationen dieser Fraktionen. Es wurde mit den minimalen und maximalen Konzentrationen aller Fraktionen gerechnet. Als minimale Konzentration der <1'000 ppm-Fraktion wurde 100 ppm eingesetzt und als maximale Konzentration der >20'000 ppm-Fraktion wurde 100'000 ppm eingesetzt. Werte von 50'000 ppm, 60'000 ppm oder gar 100'000 ppm sind in den Schottertränken üblich. Möglichkeiten zur Überwindung des potentiellen Engpasses sind in Kap. 4.4.3 dargestellt.

Für die restlichen Flüsse wurden keine Zielkriterien definiert, da es diesbezüglich keine konkreten Zielvorstellungen gibt.

---

<sup>4</sup> Es wurde nicht der gesamte Fluss Rückbaustoffe bewertet, sondern nur der Hauptteil ( $\geq 90\%$ ) dieses Flusses „Ausbauasphalt“. Der Grund dafür ist, dass es Zielvorstellungen für Ausbauasphalt gibt und dass es bereits eine Materialflussanalyse des PAK-belasteten Ausbauasphalts für den Kanton Zürich vorliegt (Rubli 2013).

Die aktuelle Situation: Kein Materialfluss geht in die thermische Behandlung und die Fraktionen <20'000 ppm fließen zu sehr hohen Anteilen ( $\geq 90\%$ ) ins Recycling. Beläge mit PAK-Gehalten >20'000 ppm werden zu 100% deponiert.

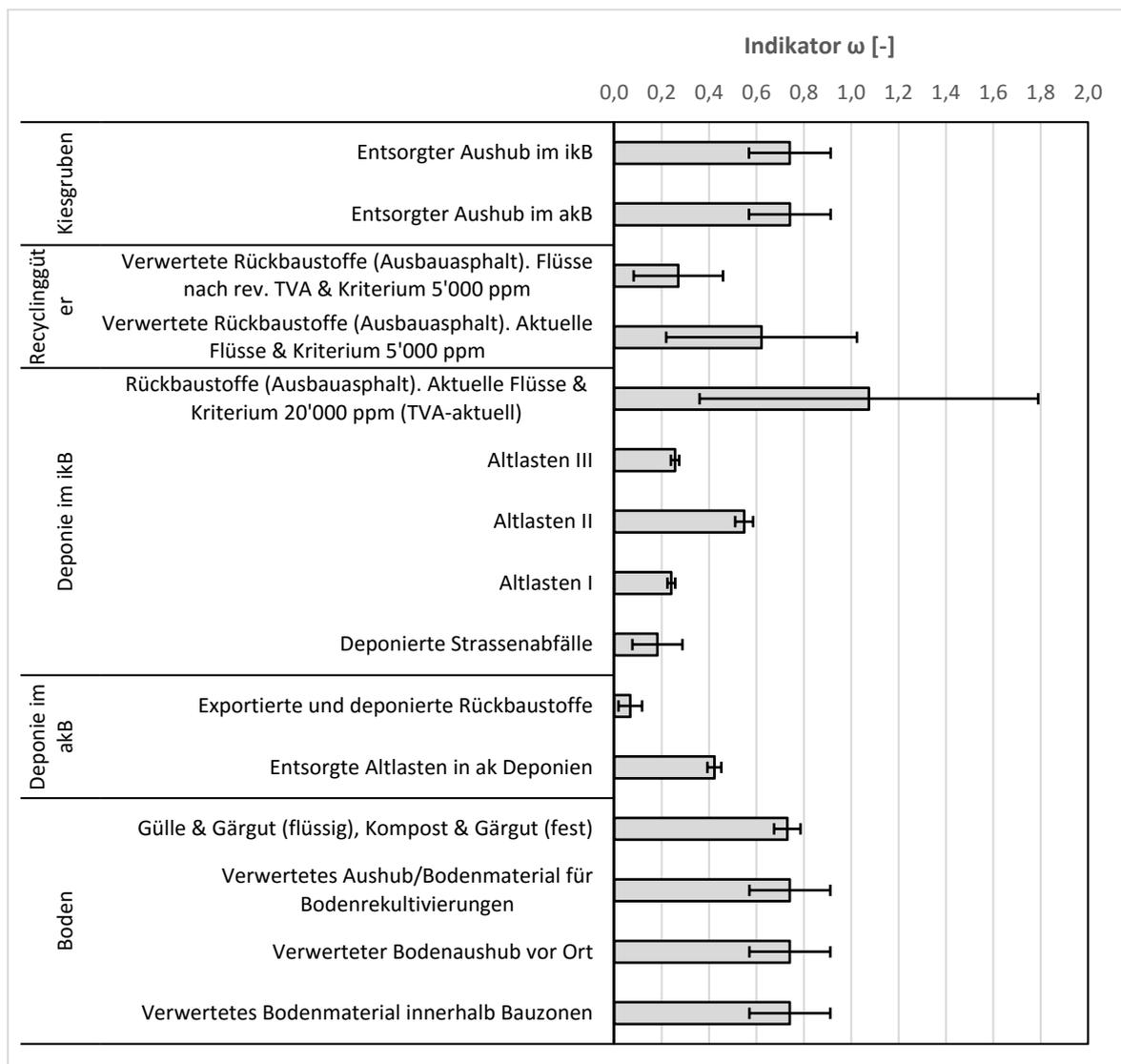


Abbildung 40: Indikator  $\omega$  für PAK-Flüsse in Senken unter Angabe der Unsicherheitsbereiche ausgedrückt als Variationskoeffizienten.

#### 4.3.5 DecaBDE

Für DecaBDE konnte kein kritischer Fluss ermittelt werden. Ein konkretes Zielkriterium ist, dass DecaBDE-haltige Kunststoffe vor dem Recycling aus E&E Geräten und Shredder abgetrennt werden sollen. Laut den ermittelten aktuellen Flüssen ist es nicht der Fall und DecaBDE verunreinigen Recyclingprodukte. Zwischenergebnisse einer schweizerischen Studie (2009) im Auftrag von SENS und SWICO zeigen, dass DecaBDE Grenzwertüberschreitungen vor allem in HIPS wahrscheinlich sind. Eine Förderung der stofflichen Verwertung (in WEEE Richtlinie festgelegten Recyclingquoten) der RESH Fraktion ohne weiteren Massnahmen kann eine weitere Dissipation von DecaBDE in Recyclingprodukte zur Folge haben.

#### 4.4 Können allfällige Engpässe überwunden werden?

Das Kapitel stellt die im Kap. 4.3 identifizierten Engpässe bei der Verbringung von Abstoffen zusammenfassend dar. In Hinblick auf die Überwindung der Engpässe dienen die flussspezifischen Zilerträge im kritischen und subkritischen Bereich als Ausgangspunkt für die Darstellung aktueller und zukünftiger Maßnahmen im Kt. ZH.

##### 4.4.1 Güter

Die Überwindung der Engpässe wird für 1) Kiesgruben und 2) Deponien dargestellt:

**ad 1) Deponien im ikB:** Aufgrund der im kantonalen Richtplan ausgewiesenen Restvolumina von 19 Mio. m<sup>3</sup> (entsprechen 38 Mio. t) ist die Entsorgungssicherheit in Bezug auf deponierte Abfälle für die nächsten 20 Jahre gegeben, wenn

1. die abzulagernde Abfallmenge (mit Bezug auf 2013 rund 1.5 Mio. t) konstant bleibt,
2. kein Export von Abfällen mehr stattfindet, und
3. zwei Drittel des ausgewiesenen Deponievolumens auch tatsächlich realisiert werden können.

Es bestehen für keine Deponietypen Engpässe, da die im Richtplan ausgewiesenen Deponiestandorte in aller Regel für jeweils mehrere Deponietypen verwendet werden können.

Rückbaustoffe (Tabelle 21, Fluss N° 2-4): Um die Verwertungsquote von Rückbaustoffen von derzeit 82%<sup>5</sup> auf 95% anzuheben muss sich die Menge an deponierten Rückbaustoffen um rund 72% verringern (Tabelle 24). Neben der Umsetzung konkreter Massnahmen zur Erhöhung der Verwertungsquote gilt es zu klären welche Mengen an Rückbaustoffen aus dem Kt. ZH in den ausserkantonalen Bereich gelangen, um dort deponiert zu werden und ob diese Mengen in der Verwertungsquote für den Kt. ZH berücksichtigt werden sollen oder nicht. Bei der Frage nach den Mengen, weichen die beiden verfügbaren Datenquellen für die im akB deponierten Rückbaustoffe im Jahr 2013 um 0.95 Mio. t (1.2 Mio. t vs. 0.25 Mio. t) voneinander ab (Stäubli 2015). Werden die ausserkantonal deponierten Rückbaustoffe nicht bei der Berechnung der Verwertungsquote berücksichtigt oder anders formuliert, nur die bei ik Bauabfallanlagen produzierten Sekundärrohstoffe berücksichtigt, so liegt die Verwertungsquote bei rund 91%. Wird von dieser Quote ausgegangen so scheint die Zielvorgabe von 95% in ihrer Erreichung realistisch.

---

<sup>5</sup> Die Verwertungsquote von 82% errechnet sich aus dem Gesamtanfall an Rückbaustoffen im Kt. ZH und den im inner- und ausserkantonalen Bereich deponierten Rückbaustoffen.

*Tabelle 24: Verwertungs- und Entsorgungswege von Rückbaustoffen (t/a). Die Flusswerte sind auf 2 signifikante Stellen gerundet.*

Verwertungs- und Entsorgungswege	Flüsse im Jahr 2013	Flüsse bei 95%-Quote	Änderungsrate
Stoffliche Verwertung / Nutzung	1'900'000	2'200'000	+13%
Energetische Verwertung			
Bausperrgut (Fraktion Brennbares) & brennbare Bauabfälle (im ikB thermisch verwertet)	110'000	110'000	±0%
Bausperrgut (Fraktion Brennbares) & brennbare Bauabfälle (im akB thermisch verwertet)	130'000	130'000	±0%
Deponien im ikB	68'000	19'000	-72%
Deponien im akB	400'000	110'000	-72%
total [t/a]	2'600'000	2'600'000	
Verwertungsquote [-]	0.82	0.95	

Altlasten I (Tabelle 21, Fluss N° 6): Im Jahr 2013 wurden rund 0,5 Mio. t Altlasten auf Inertstoffdeponien abgelagert. Die im kantonalen Richtplan ausgewiesenen Restvolumina ermöglichen eine Fortschreibung der im Jahr 2013 deponierten Altlasten innerhalb des angesetzten Planungshorizontes von 20 Jahren.

Verfestigte Rückstände, Übriges IV (Tabelle 21, Fluss N° 6): Die Abfälle ergeben rechnerisch zwar einen Zielwert im subkritischen Bereich, praktisch wird diesem potentiellen Engpass aber keine besondere Relevanz in Hinblick auf eine Verknappung der Restvolumina zugeschrieben. Die Abfallart macht im Vergleich zu allen im ikB deponierten Abfällen lediglich 2% aus.

**ad 2) Kiesgruben (Tabelle 21, Fluss N° 1):** Sie dienen, neben dem Abbau von mineralischen Rohstoffen, der Entsorgung von Aushub. Von den insgesamt 4.2 Mio. m<sup>3</sup> Aushub, gelangen 2.4 Mio. m<sup>3</sup> (56%) in innerkantonale und 1.8 Mio. m<sup>3</sup> (44%) in ausserkantonale Kiesgruben. Um die Aushubmengen effektiv zu bewirtschaften hat Rubli (2012) Datengrundlagen über den zukünftigen Baustoffbedarf (relevant für den Kiesaushub und somit für die offenen Volumen) und den Anfall an Aushub erarbeitet. Er prognostiziert eine Änderungsrate beim Baustoffbedarfes von rund -1.86 % per anno (p.a.) (4 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2010 und 2.5 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2035), sowie eine Änderungsrate beim Aushub von -3.60 % p.a. (4.5 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2010 und 1.8 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2035). Die Prognosen des Baustoffbedarfs basieren auf den zukünftig zu erwartenden Neubau- und Sanierungsraten, welche im Szenario als konstant angenommen wurden. Jene für den Aushubanfall basieren ausschließlich auf den Neubau- und Ersatzneubauraten, die in Abhängigkeit von der Bevölkerungsentwicklung stark zurückgehen.

In weiterer Folge werden 3 Szenarien dargestellt:

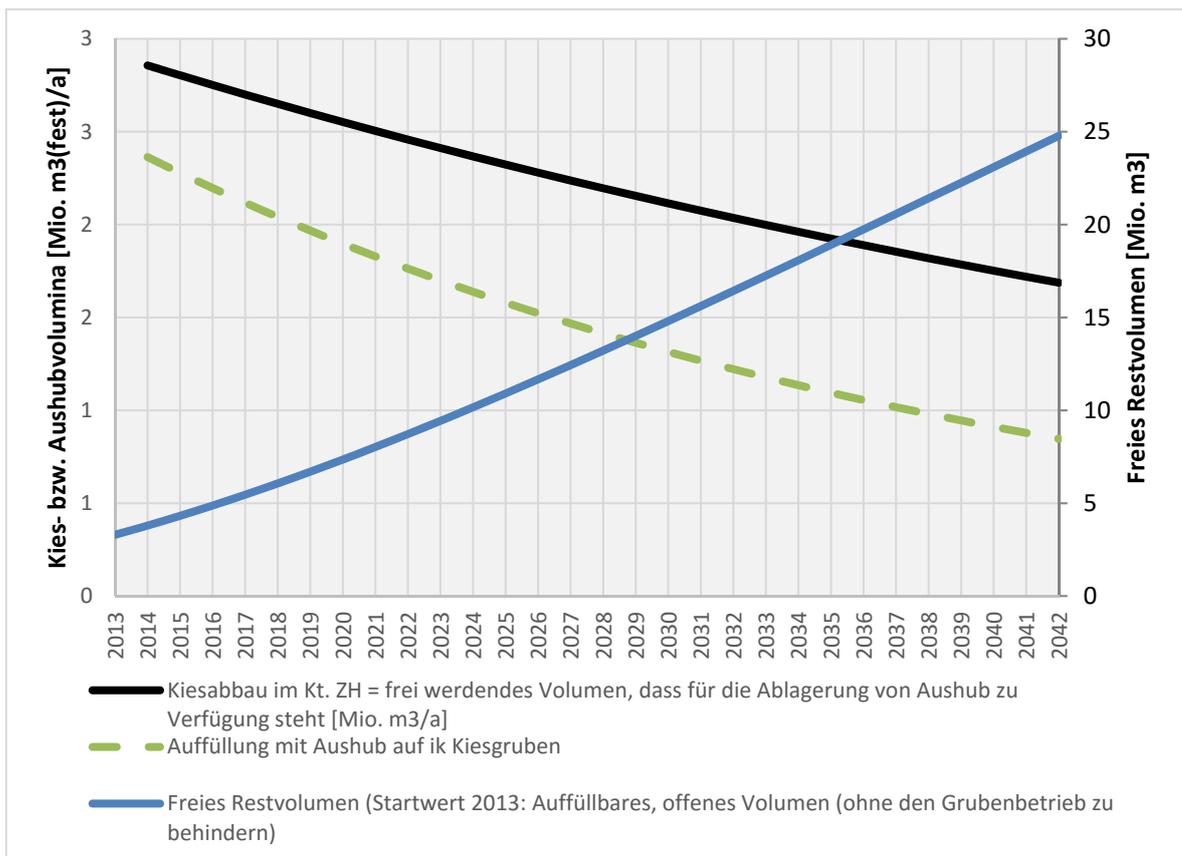
Bei Fortschreibung der Ist-Situation unter Berücksichtigung der Änderungsraten beim Baustoffbedarf und dem Aushub ergibt sich das **Szenario 1**: Ablagerung des Aushubes im ikB, wobei die bisher im akB abgelagerten Mengen weiterhin im akB abgelagert werden. Das Szenario ist aber sehr unwahrscheinlich. Laut Herrn Sieber (AWEL) werden die Exporte in den nächsten Jahren gegen Null tendieren, da die umliegenden Kantone ebenso wie der Kt. ZH einen Aushubüberschuss verzeichnen.

Mit Bezug auf Ziel 3 (Optimierte Entsorgungssicherheit) des Zürcher Massnahmenplanes wird deshalb als provisorisch langfristiges Ziel eine vollständige Verfüllung des gesamten Aushubmaterials im innerkantonalen Bereich formuliert (Baudirektion Kanton Zürich 2015, Kuhn 2015), welches derzeit in inner- und ausserkantonale Kiesgruben gelangt. In diesem Zusammenhang werden zwei weitere Szenarien dargestellt: **Szenario 2**: Ablagerung des gesamthaften Aushubes im ikB, wobei kein Aushub im akB abgelagert wird. **Szenario 3**: Optimierte Variante der Ablagerung von Aushub unter der Prämisse, dass das freie Restvolumen der Kiesgruben im ikB optimal genutzt wird.

**ad Szenario 1:** Ausgehend von

- a) den im Jahr 2013 im ikB abgelagerten Aushubvolumina von 2.364 Mio. m<sup>3</sup> und der prognostizierten Änderungsrate von -3.60 % p.a.,
- b) den im Jahr 2013 im ikB abgebauten Kiesvolumina von 2.857 Mio. m<sup>3</sup>/a und der prognostizierten Änderungsrate von -1.86 % p.a.,
- c) dem auffüllbaren, offenen Volumen (ohne den Grubenbetrieb zu behindern) im Jahr 2013 von 3.31 Mio. m<sup>3</sup>/fest,

erhöht sich das freie Restvolumen von 2,4 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2013 auf rund 25 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2042 (+ 750%). Das Szenario zeigt, dass bestimmte Anteile der bisher exportierten Aushubvolumina im Kt. ZH dank freier Kapazitäten untergebracht werden können.



**ad Szenario 2:** Werden die gleichen Annahmen wie im Szenario 1 getroffen und die Materialflüsse an Aushub in die ik Kiesgruben durch die gesamthaft anfallenden 4.123 Mio m3/fest ersetzt, so ist in den ik Kiesgruben innerhalb von 5 Jahren das verfügbare Volumen ausgeschöpft (Abbildung 41). Ab diesem Zeitpunkt kann nur mehr so viel Aushubvolumen abgelagert werden wie Kiesvolumen entnommen wird. Bis in das Jahr 2035 entsteht ein Überschuss an Aushub von rund 30 Mio. m3, was bei einer statischen Betrachtung 1.5 Mio. m3 t/a sind. Für dieses zusätzliche Volumen braucht es Kapazitäten im innerkantonalen Bereich.

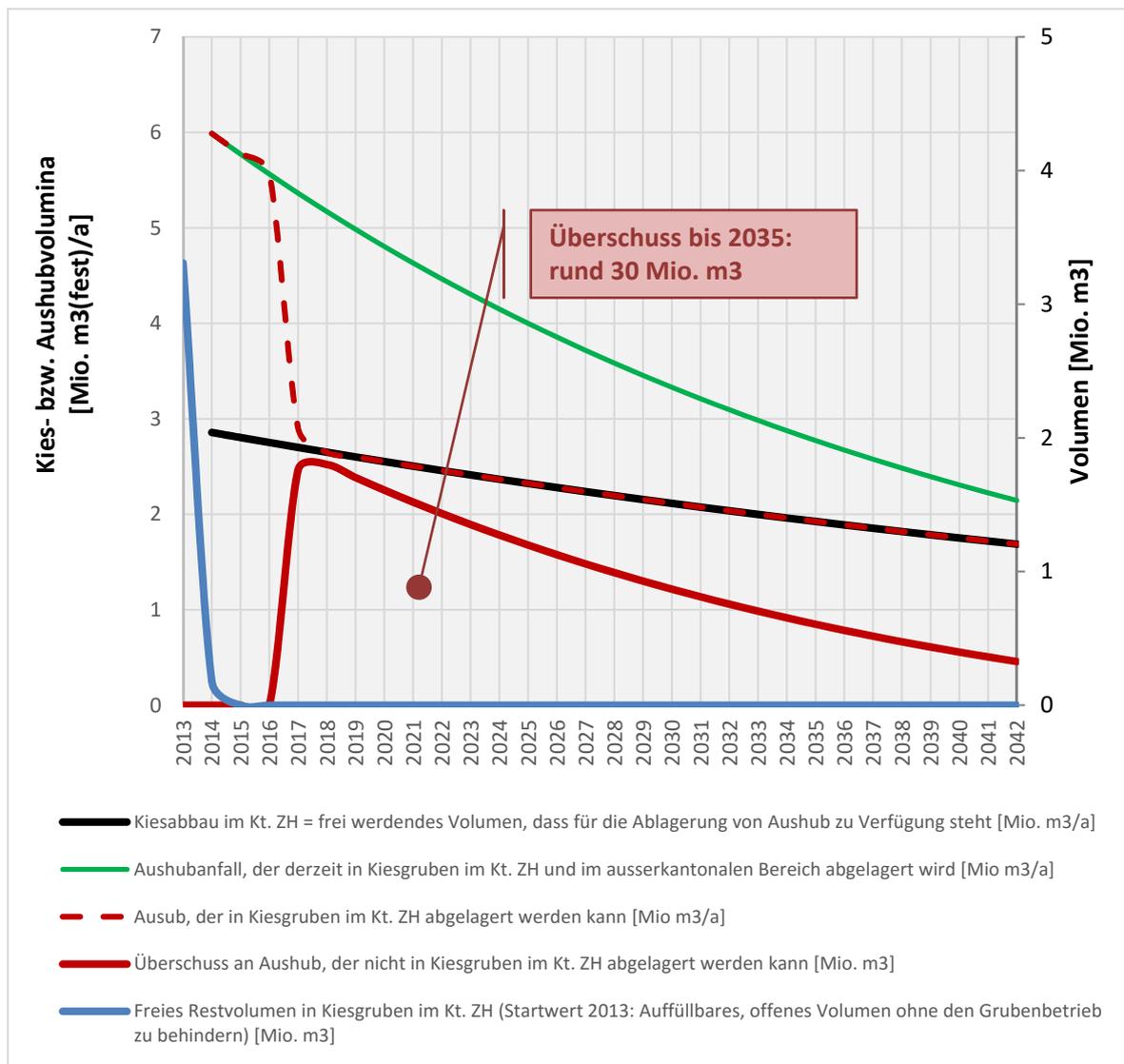


Abbildung 41: Kiesabbau vs. Aushubablagerung - Szenario 2

**ad Szenario 3:** Da die freien Volumina im ikB im Jahr 2013 nicht vollständig genützt werden, besteht die Möglichkeit, Aushub der derzeit in den akB gelangt, zum Teil im ikB abzulagern. Für das Szenario wurden 3 Bedingungen formuliert:

- 1) Die vorhandenen freien Volumina im ikB sollen vollständig ausgeschöpft werden,
- 2) der Grubenbetrieb soll durch die Verfüllung nicht behindern werden
- 3) Es soll ein Engpass an freien Volumina in Zukunft verhindert werden.

Unter Einhaltung der Bedingungen können im Jahr 2013 zusätzlich zu den bisher im ikB abgelagerten Volumina rund 40% mehr an Aushub entsorgt werden (Abbildung 42). Vorausgesetzt wird, dass sich die Kiesabbau- und Aushubvolumina im Sinne der Prognose von Rubli (2012) entwickeln. Im Jahr 2023 das Minimum an freiem Grubenvolumen von rund 0.6 Mio. m3 erreicht. Wird dieses freie Volumen über die Zeit konstant gehalten, so

kann ab dem Jahr 2023 genauso viel Aushubvolumen abgelagert werden wie Kiesvolumen entnommen wird.

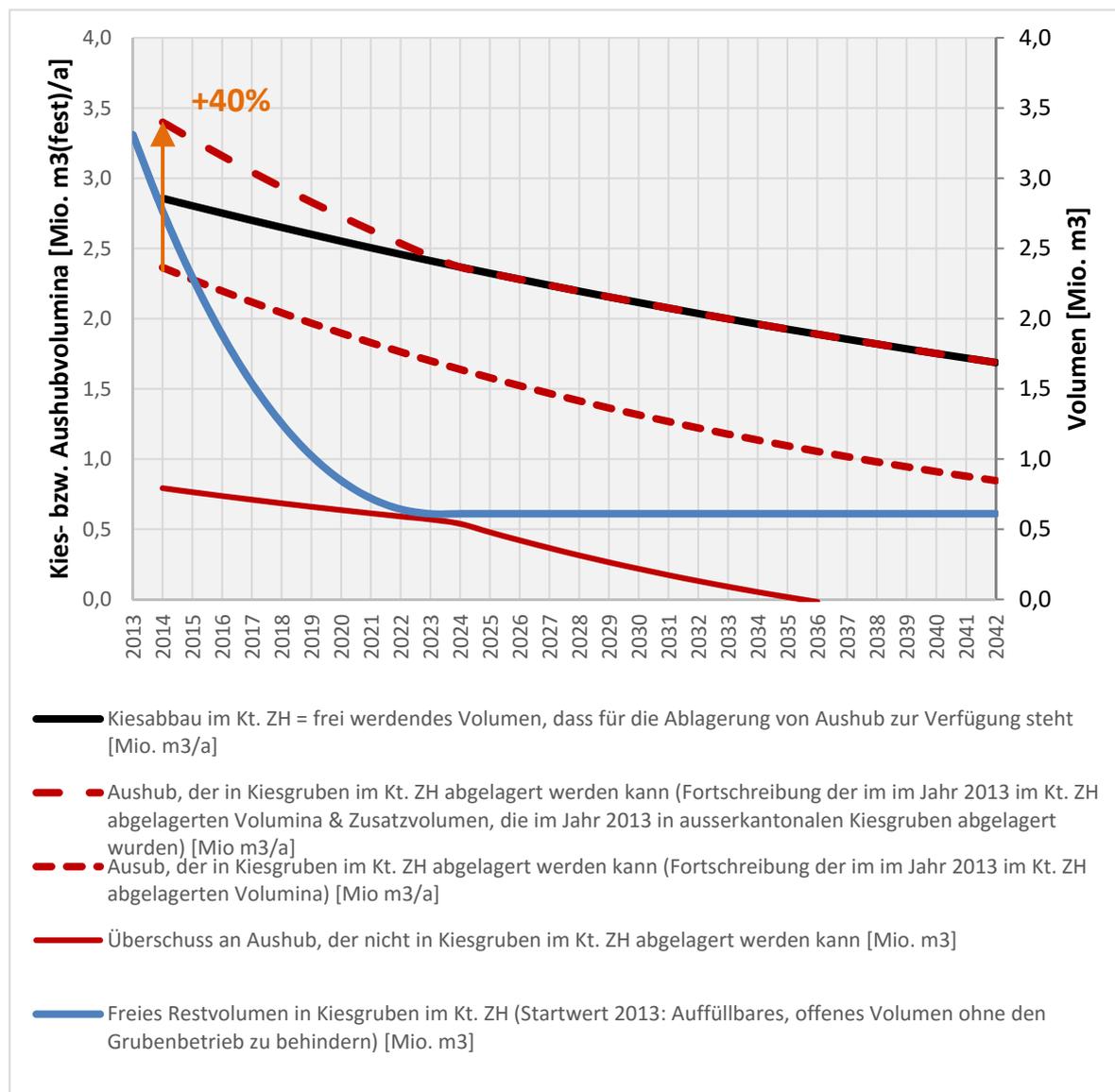


Abbildung 42: Kiesabbau vs. Aushubablagerung - Szenario 3

#### 4.4.2 Kupfer & Zink

In weiterer Folge wird die Überwindung der Engpässe für folgende Senken dargestellt:

- 1) Landwirtschaftlicher Boden
- 2) Gewässer inkl. Sedimente
- 3) Deponien im ikB
- 4) Deponien im akB
- 5) Untertagedeponien
- 6) Produktion / Nutzung (Stahlproduktion)

**ad 1) Landwirtschaftl. Boden (Tabelle 22, Fluss N° 1-5 & Tabelle 23, Fluss N° 1-3):**

Die Einträge in den landwirtschaftlichen Boden ergeben einen Zielwert von  $\omega=3,7$  und liegen somit im kritischen Bereich. Bei der Bewertung der Flüsse wurde ein stark vereinfachter Ansatz im Sinne der Methode der Ökologischen Knappheiten verwendet. Demnach wird die Summe an Einträgen auf die gesamte landwirtschaftliche Fläche im Kt. ZH umgelegt, ohne dabei auf unterschiedliche Nutzungs- und Bewirtschaftungsformen einzugehen. Das vorliegende Ergebnis zeigt auf, dass in diesem Bereich ein potentieller Engpass besteht, der mit regionalen Ansätzen näher untersucht werden muss. Um die Ermittlung des Zielwertes auf eine aussagekräftigere Grundlage zu stellen, können zukünftig die derzeit an eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Agroscope (Ansprechpartner: Dr. Keller), in Ausarbeitung befindlichen, kantonalen Stoffbilanzen landwirtschaftlicher Flächen herangezogen werden. Damit wird es möglich, zukünftige Engpässe zu erkennen und proaktive Massnahmen zu entwickeln. Nach Rücksprache mit Herrn Dr. Keller liegen noch keine Endergebnisse für den Kanton Zürich vor. Sobald diese verfügbar sind, können diese in den Analyse- und Bewertungsansatz der Studie übernommen werden um den Indikator erneut zu berechnen.

An dieser Stelle sei lediglich ein Detail erwähnt. Die Grenzwerte für Kupfer und Zink werden bei der Gärgülle (Output der Vergärungsanlagen) im Mittel zu über 90% ausgeschöpft (Schleiss 2015). Um Grenzwertüberschreitungen zu verhindern, ist das routinemäßige Monitoring der Rückstände aus Kompostier- und Vergärungsanlagen unabdingbar.

**ad 2) Gewässer inkl. Sedimente (Tabelle 22, Fluss N° 6-7):**

Im Kt. ZH entsprechen rund 40% der untersuchten Flussabschnitte nicht den Umweltqualitätsvorstellungen für Kupfer und Zink in den Sedimenten. Um den Umweltqualitätszustand zu verbessern, ist die Kenntnis über die Quellen und Eintragspfade von Kupfer und Zink in die Gewässer erforderlich. In der Vergangenheit wurden allerdings keine Studien oder Arbeiten erstellt, die für den Kt. ZH einen systematischen Überblick zu Kupfer- und Zinkeinträgen in die Gewässer geben (Boller 2015). Somit fehlte bisher auch eine Darstellung der Frachten von den Quellen zu

den Sedimenten als Senke. Die Studie leistet hier insofern einen Beitrag, als dass die Einträge von der Abwasserwirtschaft in die Oberflächengewässer und die Beiträge der einzelnen Quellen abgeschätzt wurden (Abbildung 43 und Abbildung 44).

Abbildung 43: Kupferflüsse in der Misch- und Trennwasserkanalisation.

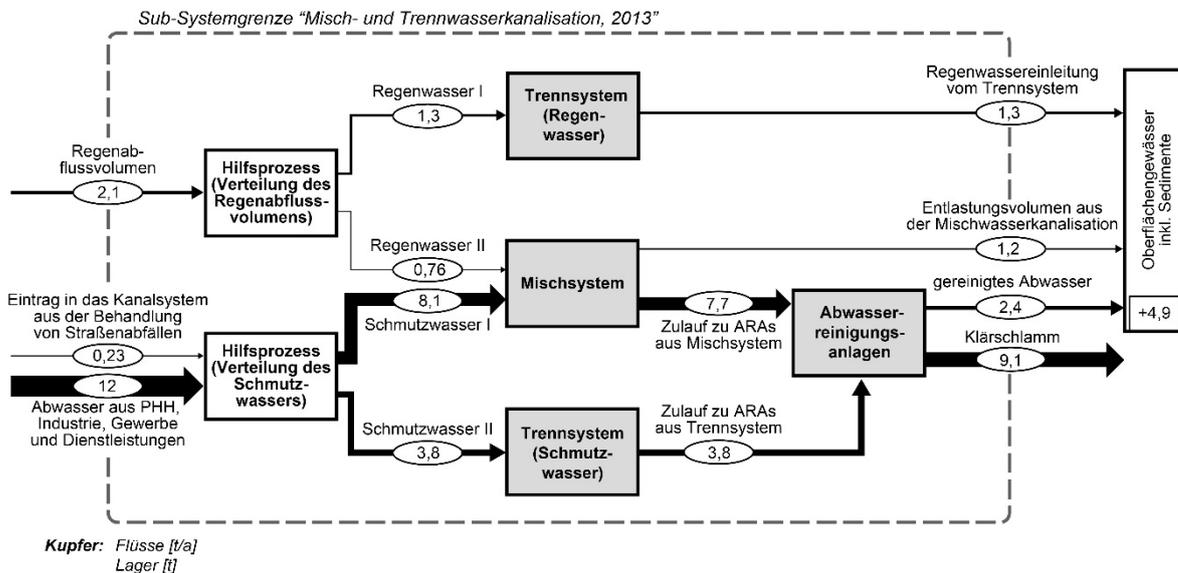
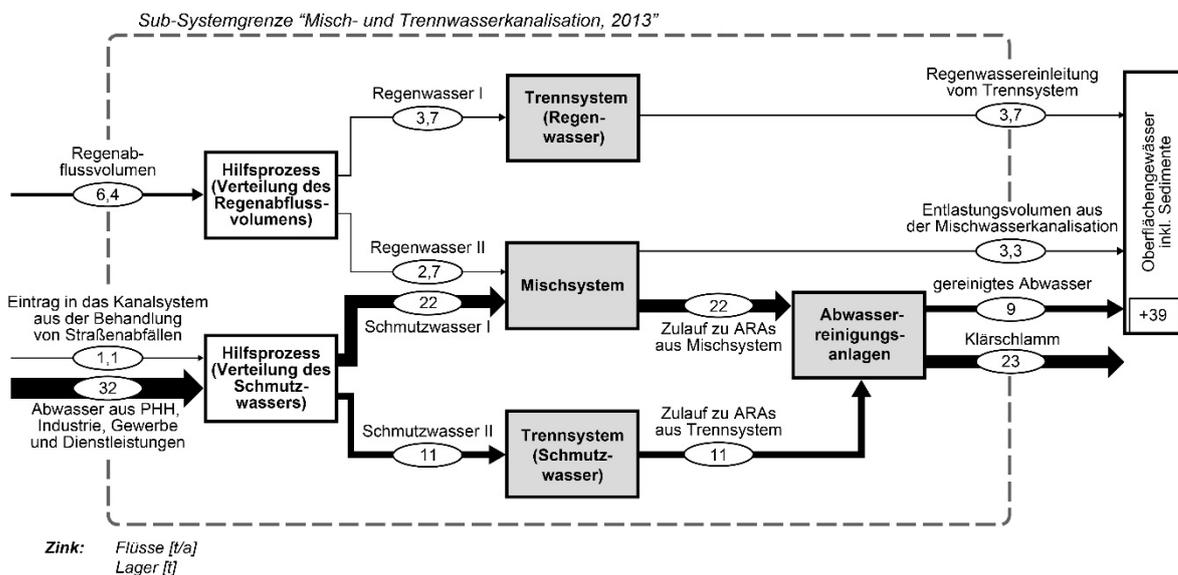


Abbildung 44: Zinkflüsse in der Misch- und Trennwasserkanalisation.



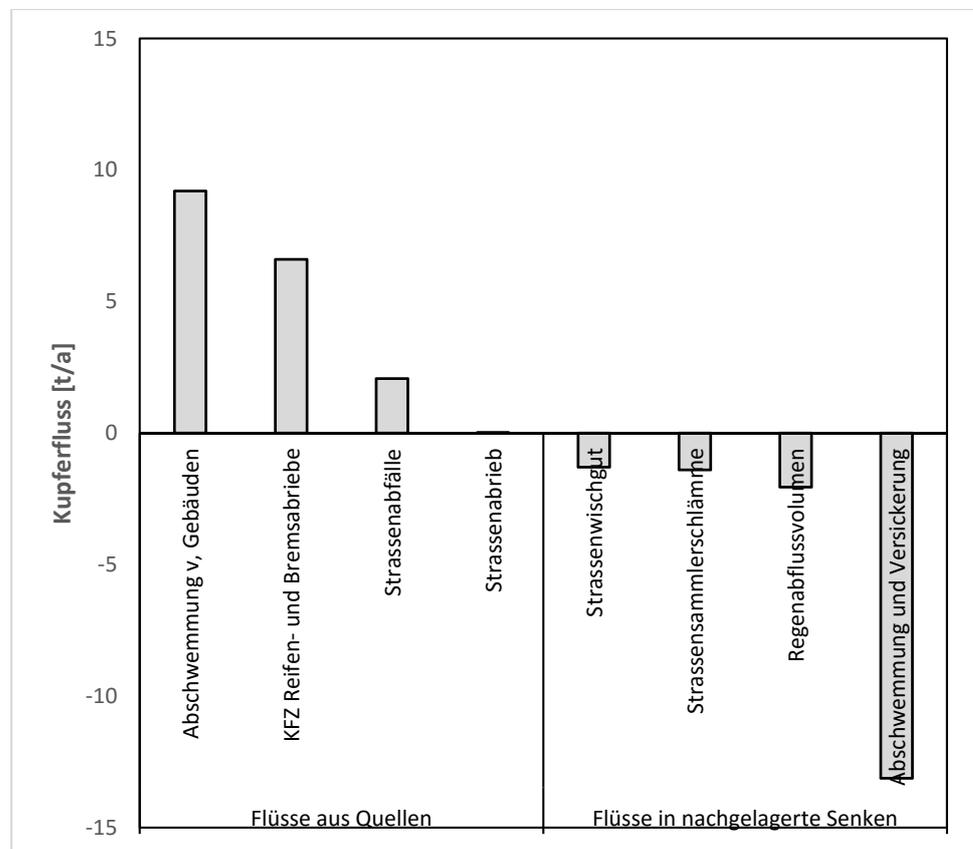
Die beiden Flüsse „Regenwassereinleitung vom Trennsystem“ und „Entlastungsvolumen aus der Mischwasserkanalisation“ haben einen Indikator von  $\omega=0,9$  und liegen somit im

subkritischen Bereich. Um die Einträge zu reduzieren können a) quellenorientierte Maßnahmen, oder b) Maßnahmen zum Transfer von Kupfer und Zink in den Klärschlamm forciert werden:

a) Bei den Quellen stammen rund

- 80% (Zn) aus dem Bereich Haushalte, Industrie und Gewerbe. Nähere Quellspezifikationen wurden im Rahmen der Studie nicht durchgeführt, sind aber zukünftig erforderlich, um das Reduktionspotential bewerten zu können und allenfalls Maßnahmen in die Wege zu leiten.
- 20% (Zn) aus diffusen Quellen. Von den 18 t Cu/a und 67 t Zn/a stammen 80-90% aus der Abschwemmung von metallischen Oberflächen im Gebäudepark und von KFZ Reifen- und Bremsabrieb. Reduktionsmaßnahmen in diesem Bereich sind deshalb besonders effektiv. Die Bedeutung der diffusen Emissionen zeigt sich auch an den Pfaden in die nachgelagerten Senken. Über die Abschwemmung der Gebäude und Verkehrsinfrastrukturen gelangen rund 70-80% des diffus emittierten Kupfers und Zinks direkt, ohne eine ARA zu durchlaufen, in den anstehenden Boden. Die restlichen 20-30% werden durch das Kanalsystem erfasst und (mit Ausnahme des Regenwassers im Trennsystem) einer ARA zugeführt.

Abbildung 45: Kupferflüsse diffuser Emissionsquellen und deren Pfade in nachgelagerte Senken.



- b) Um den Transfer von Kupfer und Zink in die Gewässer zu reduzieren können einerseits direkt an der Quelle Maßnahmen getroffen werden (z.B.: Rückhaltemaßnahmen von Schwermetallen bei Dachabläufen) oder die Abscheidegrade in den ARAs werden erhöht. Ein Vergleich der im Kt. ZH verwendeten Transferkoeffizienten (Spohn 2008) und jenen der Hauptkläranlage Wien (Kroiss, Morf et al. 2008) zeigt für Kupfer und Zink eine Abweichung von 5 bis 10 Prozentpunkten (Tabelle 25). Damit liegen die Transferkoeffizienten in einem ähnlichen Bereich. Der Unterschied zeigt aber auch ein Potential für die Erhöhung der Abscheideleistung auf. Die im Kt. ZH verwendeten Werte sind allerdings mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Sie gehen auf eine Interpretation von Mittelwerten, welche im Rahmen einer vom AWEL im Rahmen des Projektes SEA (Stoffwechsel im Einzugsgebiet von ARAs) bei der EPF-Lausanne in Auftrag gegebenen Literaturstudie ermittelt wurden, zurück (vgl. Spohn 2008). Die Werte aus Wien basieren auf einer umfassenden, anlagenbezogenen Stoffflussanalyse und sind deshalb von höherer Datenqualität. Da es aktuell für den Kt. ZH keine Transferkoeffizienten mit höherer Datenqualität gibt, empfiehlt sich eine Erhebung des Status-quo und darauf aufbauenden Einschätzungen zur gezielten Erhöhung der Transferkoeffizienten für Kupfer- und Zink in den Klärschlamm.

*Tabelle 25: Transferkoeffizienten bei Abwasserreinigungsanlagen in den Klärschlamm unter Bezug auf die Zulauffrachten.*

	Kt. ZH	Hauptkläranlage Wien, vor der Erweiterung	Hauptkläranlage Wien, nach der Erweiterung
Kupfer	0.79	0.68	0.84
Zink	0.72	0.54	0.83

**ad 3) Deponie im ikB (Tabelle 22, Fluss N° 8):**

Verfestigte KVA-Rückstände, Übriges (Tabelle 22, Fluss N° 8): Die Abfälle gelangen auf ik Deponien und weisen hohe Unsicherheitsbereiche auf, die potentielle Engpässe nicht ausschließen. Aufgrund dessen, dass die Frachten dieser Abfälle im Vergleich zu den total abgelagerten Abfällen im ikB relativ gering sind (Güter: 2%, Zink: 2%) wird diesen Abfällen keine besondere Relevanz in Hinblick auf die Gefährdung von Schutzziele zugeschrieben.

Deponierte Schlacke (Tabelle 22, Fluss N° 9): Im Jahr 2013 sind in den 150'000 t an deponierter KVA-Schlacke rund 900 t  $Cu_{total}$  enthalten. Für die Deponierung von KVA-Schlacke sind laut TVA keine Grenzwerte (Totalgehalte) festgelegt. Für eine Szenario-Betrachtung wird als Zielkriterium eine Rückgewinnungsrate von 95% des metallischen Kupfers angenommen. Bei einem Anteil von 50% metallischem Kupfer in der KVA-Schlacke und einem Feuchtegehalt der Schlacke von 15% müssten rund 430 t  $Cu_{metallisch}$  rückgewonnen werden, 470 t  $Cu_{total}$  verbleiben in der Schlacke. Das ergibt einen Gesamtgehalt von rund 3'700 mg

$Cu_{total}/kg$  TS Schlacke<sup>6</sup>. Für eine Szenariobetrachtung wird der Gesamtgehalt mit den Grenzwerten für Kupfer auf der Reaktor- und Inertstoffdeponie verglichen. Mit den 3'700 mg  $Cu_{total}/kg$  TS Schlacke würde der Grenzwert bei der Reaktordeponie (5'000 mg Cu/kg TS) um rund 30% unterschritten, jener von der Inertstoffdeponie (500 mg Cu/kg TS) um rund 700% überschritten werden.

**ad 4) Deponie im akB (Tabelle 22, Fluss N° 11-12):** KVA-Filteraschen und WRR-Rückstände fallen sowohl bei KVAs im ikB an, als auch bei KVAs im akB an die Abfälle aus dem Kt. ZH thermisch behandeln. Von den KVAs im ikB gelangt ein Anteil der Abfälle auf Deponien im akB (23 t Cu/a bzw. 484 t Zn/a). Bei den KVAs im akB wurde angenommen, dass die Anteile vollständig in Obertagedeponien gelangen (2 t Cu/a bzw. 39 t Zn/a). Unter Anwendung des Zielkriteriums (Rückgewinnung von 35% des Zinks im KVA-Input) ergibt sich im Umkehrschluss, dass die im Jahr 2013 deponierten Zinkfrachten um 83% reduziert werden müssen. Der Indikator lag im Jahr 2013 mit  $\omega=2,0$  im kritischen Bereich. Um den Engpass bei der Verbringung von Zink in ak Deponien zu überwinden, wird auf die Massnahmen im nächsten Absatz verwiesen.

**ad 5) Untertagedeponie (Tabelle 23, Fluss N° 13):** In die Untertagedeponie gelangten im Jahr 2013 Rückstände aus der Industrie- und Recyclingunternehmen sowie von Kehrichtverbrennungsanlagen im Kt. ZH. Der Kt. ZH strebt in seinem Massnahmenplan Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2015 bis 2018 eine Reduktion der Untertage deponierten KVA Rückstände an. Die Reduktion geht mit einer zukünftig geplanten Deponierung im Kt. ZH bzw. in der Schweiz einher und leistet einen Beitrag zum Ziel "Optimierte Entsorgungssicherheit" im Sinne des Massnahmenplans 2015 bis 2018. Um eine Deponierung in der Schweiz zu ermöglichen, müssen die hochbelasteten Abfälle dekontaminiert werden. Die Schadstoffentfrachtung ermöglicht auch ein derzeit ungenutztes Potential an Sekundärrohstoffen zu nutzen. Am "Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung" (ZAR) wird aktuell am Beispiel von Zink, aber auch an anderen Stoffen demonstriert, dass die Rückgewinnung von Rohstoffen und damit gleichzeitig eine Abreicherung der Schadstoffe möglich sind. Mit den aktuellen Entwicklungen verschiebt sich der Stand-der-Technik bei der Rückgewinnung von Wertstoffen und ist somit auch für andere KVA Betreiber relevant. Die Zürcher KVA-Betreiber haben, laut aktueller abfallrechtlicher Betriebsbewilligung, den SdT bis 2017 umzusetzen.

Im Jahr 2013 wurde kein Zink zurückgewonnen (Abbildung 46). Im Rahmen eines Szenarios wurde als provisorisches Zielkriterium eine Rückgewinnung von 35% des im KVA-Input enthaltenen Zinks festgelegt (Abbildung 47). Demnach müssten von den 1'500 t Zn im KVA-

---

<sup>6</sup>  $Cu$ -Gesamtgehalt in deponierter Schlacke =  $470 \cdot 10^9$  mg Cu / ( $150'000 \cdot 10^3$  Schlacke \* 0,85) = 3'700 mg  $Cu_{total}$  / kg Schlacke TS.

Input rund 530 t rückgewonnen werden. Wird angenommen, dass die im Jahr 2013 untertage deponierte Zinkfracht um 50% reduziert wird, so müssen zukünftig rund 540 t Zn/a der Aufbereitung und Rückgewinnung zugeführt werden<sup>7</sup>. Damit verbleiben rund 50 t/a für die Verfestigung der KVA-Filterstäube und deren Deponierung in der Schweiz. Bei dem Szenario wird im Vergleich zum Jahr 2013 um rund 80% weniger Zink deponiert (KVA-Filterstäube: 640 t Zn/a vs. 112 t Zn/a).

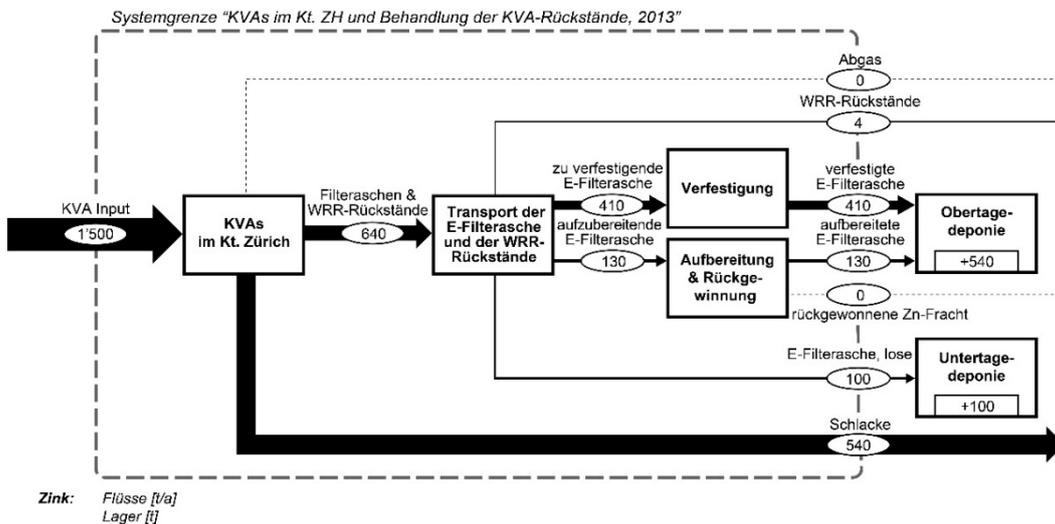


Abbildung 46: Zinkfluss bei der Behandlung von KVA Rückständen (Jahr 2013, keine Zn-Rückgewinnung). Die Zahlenwerte sind auf 2 signifikante Stellen gerundet.

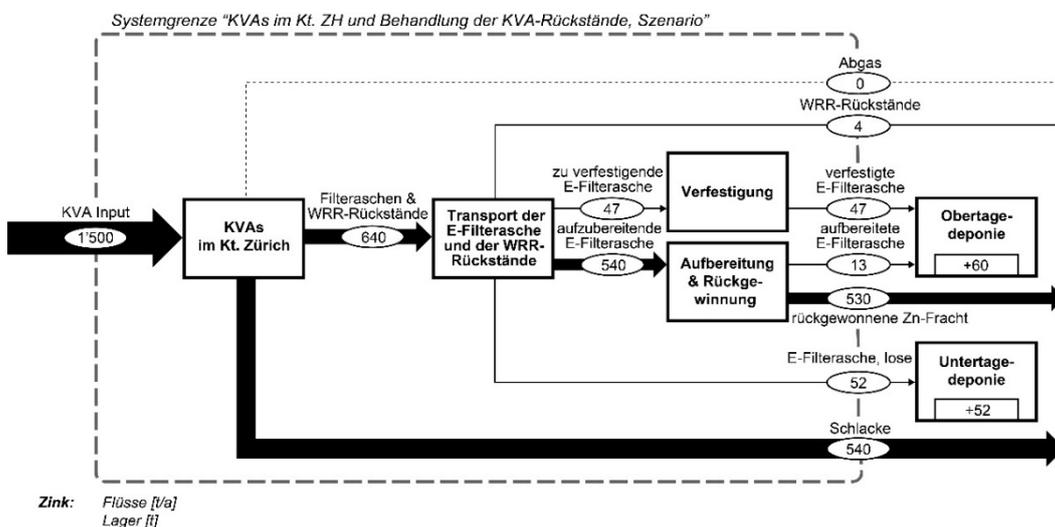


Abbildung 47: Zinkfluss bei der Behandlung von KVA-Rückständen (Szenario: Umsetzung Standard-Technik bis 2017). Die Zahlenwerte sind auf 2 signifikante Stellen gerundet.

<sup>7</sup> Annahme: Von dem in den E-Filterstäuben enthaltenen Zink können bei der Aufbereitung 90% rückgewonnen werden. 10% gehen als aufbereitete E-Filterasche weiterhin gemeinsam mit der Schlacke auf Obertagedeponien in der Schweiz.

**ad 6) Produktion / Nutzung (Tabelle 22, Fluss N° 13):** Der KVA Schrott wird im Stahlwerk als Sekundärrohstoff eingesetzt. In der Produktion gelangt das Kupfer in das Produkt Stahl. Kupfer gilt dort als Störstoff, weil es die Produktqualität mindert. Um in Zukunft marktfähigen, qualitativ hochwertigen KVA-Schrott als Sekundärrohstoff einsetzen zu können, muss er von Kupfer entfrachtet werden. Es wurde angenommen, dass die Qualitätsanforderungen mit einer Entfrachtungsquote von 50% erreicht werden. Ob mit dieser Quote die Qualitätsvorstellung erreicht werden können bzw. ob diese Quote mit Abscheidetechnologien zu erzielen ist, wird aktuell am Zentrum für nachhaltige Ressourcen (ZAR) Untersuchungen untersucht. Diesbezügliche Ergebnisse waren zum Zeitpunkt der vorliegenden Studie noch nicht verfügbar.

#### 4.4.3 PAK

Der in den innerkantonalen Deponien aktuell entsorgte Ausbauasphalt ergibt einen Wert von  $\omega=0.4-1.8$  (Kriterium: 20'000 ppm) und kann somit möglicherweise im kritischen Bereich liegen.

Der geplante Weg um diesen möglichen Engpass zu überwinden, ist eine Verordnungsänderung. Aktuell geht kein Materialfluss in die thermische Behandlung und Beläge mit PAK-Gehalten >20'000 ppm werden zu 100% deponiert. Nach der Übergangsfrist der in 2016 revidierten TVA darf kein Ausbauasphalt mit einem Gehalt von mehr als 5'000 ppm auf Deponien abgelagert werden. Solche Abfälle sind dann in der Regel thermisch zu behandeln, um die PAK zu zerstören. Die Ausbauasphaltfraktionen mit einem PAK-Gehalt von grösser 5'000 ppm werden einem thermischen Behandlungsprozess zugeführt.

Mit dem in der neuen TVA vorgesehenen Instrument der Schadstoffabklärung kann die Steuerung der PAK-haltigen Ausbauasphaltflüsse verbessert werden. Die voraussichtigen PAK-Flüsse in Senken sind in der Abbildung 48 dargestellt.

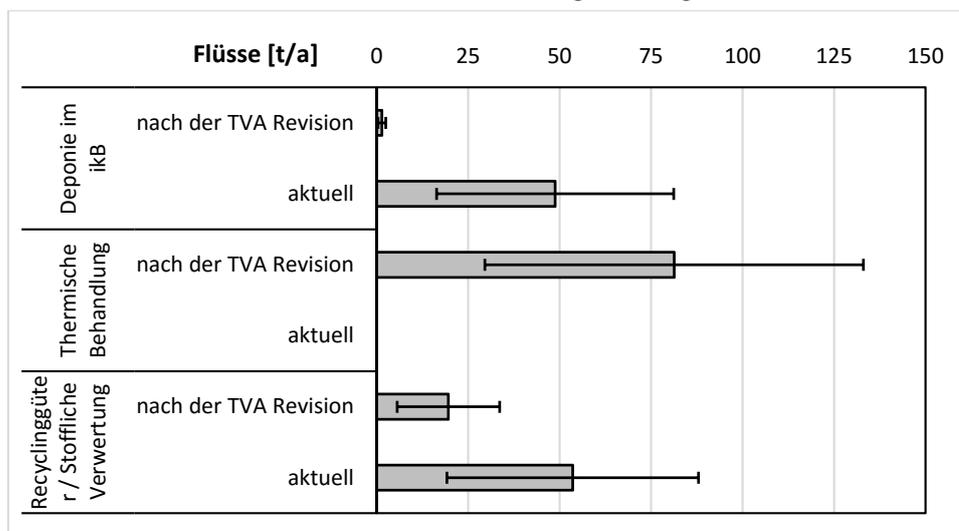


Abbildung 48: Aktuelle und künftige PAK-Flüsse, in t/a.

Infolge der geplanten Verordnungsänderung werden jährlich 74'000 t Ausbauasphalt in thermische Anlagen geliefert, wobei rund 80% der PAK aus dem Ausbauasphalt zerstört werden. Um ein Szenario zu erreichen, bei dem 95% der im Ausbauasphalt enthaltenen PAK zerstört wird, müsste der Grenzwert für die Ablagerung auf Deponien bei 1'000 ppm liegen und mehr als doppelt so viel - jährlich 173'000 t - Ausbauasphalt müsste in thermische Anlagen geliefert werden.

## 5 Schlussfolgerungen und Diskussion

Der entwickelte Ansatz wurde exemplarisch für die Stoffe Kupfer, Zink, DecaBDE und für die Stoffgruppe PAK angewandt; er ist im Bedarfsfall auf weitere Stoffe übertragbar.

Die Ergebnisse erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- (1) Verwertbare und nicht-verwertbare Abfälle müssen in geeignete Senken gelangen.
- (2) Die Produktions- und Nutzungsphase stellt Senken für qualitativ hochwertige Recyclingprodukte bereit.
- (3) Die thermische Behandlung ist eine geeignete Senke für organische Schadstoffe.
- (4) Kiesgruben und Deponien sind geeignete Senken für anorganische Abfälle mit beschränktem Schadstoffgehalt respektive langfristig beschränkter Mobilität.
- (5) Die Untertagedeponie wird derzeit noch als Senke genutzt, wenngleich der Bedarf aufgrund bereits eingeleiteter Massnahmen abnimmt.
- (6) Umweltmedien stellen begrenzte Senkenkapazitäten zur Verfügung.

Senken sind ein integrativer Bestandteil der Zürcher Volkswirtschaft. Sie sind nur zum Teil vermehrbar (anthropogene Senken ja, natürliche Senken nein). Sie sind in ihrer Aufnahmekapazität beschränkt und haben somit eine – auch langfristige - Auswirkung auf die Gestaltung der abfall- und abwasserwirtschaftlichen Sammelsysteme und die Behandlungs- und Verwertungsverfahren. Ziel ist es die Volkswirtschaft im Kt. ZH so zu gestalten, dass

- a) die verwertbaren Abfälle die Qualitätsanforderungen erfüllen, um sie wieder in kurz- und langfristig nutzbare Güter (Konsumprodukte und Investitionsgüter, insbesondere des Bauwesens) einbauen zu können (temporäre anthropogene Senken), und
- b) die nicht-verwertbaren Abfälle in anthropogene letzte Senken (organische Schadstoffe in thermische Behandlungsprozesse) oder, unter Einhaltung verträglicher Grenzfrachten, in natürliche Senken (Oberboden, Oberflächengewässer und Sedimente, Atmosphäre) zu verbringen. Dabei spielen Deponien (anthropogene temporäre Senke) eine entscheidende Rolle, da sie einerseits die Abfälle als potentielle zukünftige Ressource bevorraten und andererseits die Schadstoffmigration in die Umweltmedien kontrollieren, um die Umweltverträglichkeit sicherzustellen.

**(1) Verwertbare und nicht-verwertbare Abfälle müssen in geeignete Senken gelangen.**

Im Kt. ZH fallen im Jahr 2013 Abstoffmengen im Ausmass von 10.5 t Güter/E.a<sup>8</sup>, 6.7 kg Cu/E.a und 2.8 kg Zn/E.a an. Davon wurden rund 90% der Güter, 80% des Kupfers und 30% des Zinks verwertet (Tabelle 26). Der Anteil, der aufgrund der Stoffeigenschaften erneut genutzt liegt mit Bezug auf den Gesamtanfall bei Kupfer bei rund 50% und bei Zink bei rund 5%.

*Tabelle 26: Anteile der verwerteten (v) und nicht-verwerteten (nv) Abstoffe sowie die Anteile die nicht zugeordnet werden konnten (?).*

Abfälle und deren Zielprozesse	v/nv/?	Güter <sup>1)</sup>	Cu <sup>2)</sup>	Zn <sup>2)</sup>
Sekundärrohstoffe in die Produktions- und Nutzungsphase	v	17%	74%	16%
Abfälle in Kiesgruben und Sekundärrohstoffe in die Umwelt	v	72%	2%	12%
Abfälle in Deponien und Emissionen in die Umwelt	nv	10%	18%	64%
Materialien in unbekannte Senken	?	1%	6%	8%

Fussnote:

- 1) Teilsystem: Abfall- und Ressourcenwirtschaft ohne Abgase
- 2) Gesamtsystem: „Produktion, Nutzung, Entsorgung“

Die verursacherbezogene Aufschlüsselung der Senkenbelastung zeigt folgendes Bild (Abbildung 49):

- Bei den Gütern dominiert die Produktions- und Nutzungsphase mit dem Abgas aus Verbrennungsprozessen (86%), gefolgt von der Abwasserwirtschaft mit den Einträgen in die Oberflächengewässer (13%) und der Abfall- und Ressourcenwirtschaft mit gereinigtem Abgas aus KVAs und festen Abfällen (1%). In der Abfall- und Ressourcenwirtschaft werden 15 t/E.a. behandelt, wobei die mengenmäßig wichtigsten Senken die Kiesgruben und Deponien (47%; 7.0 t/E.a.) sind, gefolgt von der Atmosphäre (30%; 4.5 t/E.a), den Senken in der Produktions- und Nutzungsphase für Sekundärrohstoffe (12%; 1.8 t/E.a), dem Boden für verwertete Aushubmengen (10%; 1.5 t/E.a.) und den Oberflächengewässern für gereinigtes Abwasser aus KVAs (1%; 0.14 t/E.a).

---

<sup>8</sup> Teilsystem: Abfall- und Ressourcenwirtschaft ohne Abgas. Die Teilsysteme „Abwasserwirtschaft“ und „Produktion- und Nutzung“ werden auf der Güterebene durch das Abgas aus Verbrennungsprozessen bzw. die Wasserfrachten dominiert. Diese Flüsse sind für die Ermittlung des verwerteten und nicht-verwerteten Anteils irrelevant und wurden deshalb in der Betrachtung ausgeklammert.

- Bei Kupfer und Zink dominiert die Abfall- und Ressourcenwirtschaft. Von den insgesamt 6.7 kg Cu/E.a bzw. 2.8 kg Zn/E.a sammelt und steuert die Abfall- und Ressourcenwirtschaft 99.6% des Kupfers und 97.8% des Zinks in die Senken. Bei Kupfer sind die mengenmäßig wichtigsten Senken in der Produktions- und Nutzungsphase für Sekundärrohstoffe (75%), Deponien (18%), unbekannte Senken, bei denen der Verbleib der Abfälle im Rahmen der Studie nicht geklärt werden konnte (6%) und Kiesgruben (1%). Bei Zink sind die mengenmäßig wichtigsten Senken ebenso die Deponien (73%), gefolgt von Senken in der Produktions- und Nutzungsphase (16%), unbekannte Senken (9%) und Kiesgruben (7%).

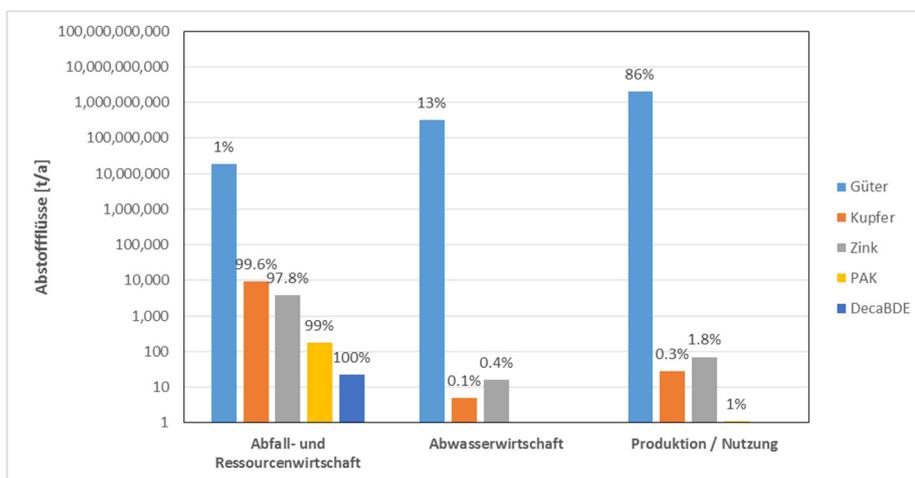


Abbildung 49: Verursacherbezogene Darstellung der Senkenbelastung.

Die Abfall- und Ressourcenwirtschaft steht vor der Herausforderung saubere Materialkreisläufe zu ermöglichen. Sekundärrohstoffe müssen von potentiellen Schadstoffen entfrachtet werden und einen einwandfreie Qualität aufweisen. Im Sinne des Vorsorgeprinzips gilt es die Kreislauf-führung möglichst von Schadstoffen zu unterbinden. Für die ausge-schleusten Schadstoffe werden sichere Senken benötigt.

- Güter: Im Jahr 2013 wurden rund 2.5 Mio. t Sekundärrohstoffe produziert, wobei der Großteil auf die Rückbaustoffe entfällt (1.9 Mio. t). Verwertete Separatabfälle und mineralische Rohstoffe aus der Aufbereitung von Altlasten machen jeweils rund 0,2 Mio. t aus. In der Studie wird die Qualität dieser Recyclingprodukte nicht weiter behandelt.

**(2) Die Produkti-  
ons- und Nut-  
zungsphase stellt  
Senken für quali-  
tativ hochwertige  
Recyclingpro-  
dukte bereit.**

- Kupfer: a) Kupfer soll in Zukunft vermehrt aus der KVA-Schlacke zurückgewonnen werden. Bei einer Quote von 95% (metallischem Kupfer) ergibt das rund 430 t Cu/a. Das sind rund 10% des gesammelten Kupferschrottes 4'200 t Cu/a). b) Bei Kupfer in KVA-Schrott zeigt sich, dass die Qualitätsanforderungen von Seiten des Stahlwerks im Jahr 2013 nicht erfüllt werden. Um die Qualität sicherzustellen, werden derzeit am ZAR Verfahren entwickelt um die KVA-Schrottqualität zu verbessern.
- PAK: Der gesamte Input an PAK in die Abfallwirtschaft in 2013 ist 160 t/a. Der größte Teil - 110 t PAK /a - fällt als Bestandteil der Rückbaustoffe an, davon stammen 100 t PAK /a aus dem Ausbausphalt. Von den 100 t PAK /a werden 52% in den Kreislauf zurückgeführt und 48% gelangen in die Deponie. Um die Schadstoffanreicherung in der Kreislaufführung zu unterbinden, ist in der TVA Revision eine neue Grenzwertsetzung für PAK in Recyclingasphalt und Deponien geplant. Bei Festlegung des Grenzwertes für das Recycling von PAK-haltigem Ausbausphalt und für die Ablagerung auf Deponien auf neu 5'000 mg PAK pro kg Bindemittel werden thermische Behandlungsanlagen rund 81 t PAK/a mineralisieren (thermisch zerstören). Mit dem neuen Grenzwert würden nur mehr rund 20% der PAK im Kreislauf geführt.
- DecaBDE: Im Jahre 2013 enthielten die Kunststoffabfälle von E&E Geräten, von der Bau- und Transportindustrie und von Textilien/Möbel 22 t DecaBDE. Davon wurden 14% im Kreislauf geführt, 1% gelangte in die Deponie und 84% wurden mineralisiert. Um den Anteil des mineralisierten DecaBDE zu erhöhen, ist es erforderlich, dass die DecaBDE-haltige Fraktion von E&E Geräten und Auto-Shredderrückständen in thermischen Anlagen, z.B. KVA, behandelt wird.

Die Beispiele lassen sich insofern verallgemeinern, als dass die Anwendung des Vorsorgeprinzips bedeutet, dass die Abfall- und Ressourcenwirtschaft unabhängig von der zukünftigen Weiterverbreitung und Nutzung der Sekundärrohstoffe, relevante Schadstoffe identifiziert, ausschleust und in geeignete Senken verbringt. Nur so wird langfristig sichergestellt, dass die Senken in der Produktions- und Nutzungsphase ausschließlich qualitativ hochwertige Sekundärrohstoffe erhalten. Aktuell gibt es diese Informationen im Kt. ZH - wie in anderen Kantonen auch -

nur punktuell für einzelne Schadstoffe und Abfallarten (z.B. Gips in Rückbaustoffen, Schadstoffe in Alt- und Restholzfraktionen). Zukünftig könnte im Kt. ZH der Aspekt der Produktqualität von Sekundärrohstoffen systematisch betrachtet werden, um potentiellen Handlungsbedarf für die Vollzugsbehörden im Kt. ZH zu identifizieren.

Im Kt. ZH sind im Jahr 2013 rund 160 t PAK und 22 t DecaBDE in Abstoffen enthalten. Von den PAK werden rund 4% und von den DecaBDE rund 85% in thermischen Anlagen mineralisiert.

- PAK: Die PAK sind in Rückbaustoffen, Altlasten und Aushubmaterial, Altholz und Altreifen enthalten und werden zum Teil in KVAs, Zementwerken und Sonderabfallverbrennungsanlagen verbrannt. Gleichzeitig entstehen in den kleinen Feuerungsanlagen (Abfallbehandlungsanlagen) aufgrund von Vorläufersubstanzen und der Prozessführung rund 0.08 t PAK/a, die in weiterer Folge über das Abgas in die Atmosphäre gelangen. Diese Emissionen aus den Abfallbehandlungsanlagen entsprechen 6% der gesamten anfallenden PAK-Emissionen im Kanton Zürich.
- DecaBDE: Die DecaBDEs sind in Kunststoffabfällen von E&E Geräten, von der Bau- und Transportindustrie und von Textilien/Möbel enthalten. Diese werden in KVAs vollständig mineralisiert, und sollen deshalb vorzugsweise dort behandelt werden.

**(3) Die thermische Behandlung ist eine geeignete Senke für organische Schadstoffe.**

Kiesgruben: Unverschmutztes Aushubmaterial wird in Kiesgruben abgelagert, wobei im Jahr 2013 rund 4.7 Mio. t (2.4 Mio. m<sup>3</sup>) im innerkantonalen Bereich und 3.7 Mio. t (1.8 Mio. m<sup>3</sup>) im ausserkantonalen Bereich abgelagert wurden. Der Kt. ZH strebt langfristig die vollständige Ablagerung des Aushubmaterials im innerkantonalen Bereich an. Unter Ausschöpfung der freien Restvolumina in den Kiesgruben zeigen die Szenarien einen Überschuss an Aushubmaterial, der nicht durch die abzubauenen Kiesvolumina gedeckt werden kann. Der Überschuss (rund 30 Mio. m<sup>3</sup> bis zum Jahr 2035) soll in Aushubdeponien abgelagert oder für landschaftliche Gestaltungszwecke unter Einhaltung der Umweltqualitätsziele eingesetzt werden. In jedem Fall benötigt es zusätzlicher Massnahmen um den Export einzudämmen.

**(4) Kiesgruben und Deponien sind geeignete Senken für anorganische Abfälle mit beschränktem Schadstoffgehalt.**

Deponien: Im Jahr 2013 wurden 0.9 Mio. t Abfälle im innerkantonalen und 0.6 Mio. t im ausserkantonalen Bereich deponiert. Bei den ik Depo-

nien entstehen bei mengenmässig konstanter Fortschreibung der deponierten Mengen keine Kapazitätsengpässe, da die Restvolumina im kantonalen Richtplan ausgewiesen sind. Aufgrund der Zielvorgaben zur Erhöhung der Verwertungsquoten ist von einer Entlastung der Senke Deponie auszugehen. Aufgrund der Bestrebungen Kupfer aus KVA-Schlacken rückzuholen, ist von einer Schadstoff-Entlastung der Senken auszugehen.

Im Jahr 2013 gelangen 6'900 t an Abfällen in Untertagedeponien ausserhalb der Schweiz. Rund die Hälfte davon sind Rückstände aus KVAs, die andere Hälfte stammt aus der privaten Abfall- und Ressourcenwirtschaft. Der Kt. ZH forciert die kontinuierliche Weiterentwicklung zur Aufbereitung und Dekontamination von KVA-E-Filteraschen, was laut Auskunft des AWEL bereits dem Stand-der-Technik entspricht. Wird dieser in der Praxis umgesetzt, können die Zn-entfrachteten E-Filteraschen auf inländische Oberflächendeponien abgelagert und somit ausländische Untertagedeponien entlastet werden.

Für Zink strebt der Kt. ZH eine Rückgewinnung von 35% des im KVA-Input enthaltenen Zinks an. Von den 1'500 t Zn im KVA-Input sollen 530 t Zn/a rückgeholt werden. Damit reduziert sich bei der KVA-Filterasche die deponierte Zn-Menge um rund 70%.

Der Boden ist eine geeignete Senke für verwertetes, intaktes Bodenmaterial für Bodenrekultivierungen, zumal dieses Material aktuell agronomischen Nutzen generiert und für künftige Generationen erhalten bleibt. Die Kupfer- und Zinkeinträge in den landwirtschaftlichen Boden werden als kritisch beurteilt. Der Analyse- und Bewertungsansatz basiert auf einer stark vereinfachten Methode, der auch bei der Methode der Ökologischen Knappheit verwendet wird. Ein differenzierteres Bild steht in Zukunft mit den kantonalen Stoffbilanzen landwirtschaftlicher Flächen, welche derzeit an der Forschungsanstalt Agroscope erarbeitet werden, zur Verfügung. In jedem Fall werden relevante Mengen an Kupfer und Zink in den Boden eingetragen, wobei die Einträge und Konzentrationen im Boden überwacht werden müssen. Für die Beobachtung empfiehlt sich die Kombination aus Modellen (z.B. jährliche Intervalle, da kostengünstig) und langfristigen Beobachtungsprogrammen (grosse Intervalle, da teuer). Aus der Kombination der beiden Ansätze lässt sich zeigen, welche Effizienz einzelne Massnahmen zur Reduktion der Schadstoffeinträge haben.

**(5) Die Untertagedeponie wird derzeit noch als Senke genutzt, wengleich der Bedarf aufgrund bereits eingeleiteter Massnahmen abnimmt.**

**(6) Umweltmedien stellen begrenzte Senkenkapazitäten zu Verfügung.**

Die Kupfer- und Zinkeinträge aus der Abwasserwirtschaft in die Oberflächengewässer werden als subkritisch eingestuft. Das ist von Relevanz, da in rund 40% der untersuchten Flussabschnitte die Qualitätszielvorstellungen nicht eingehalten werden und die Sedimentqualität im Zürichsee nicht den Qualitätszielvorstellungen für unverschmutzten Aushub entspricht. Um das Potential an quellenorientierten Massnahmen zur Reduktion der Kupfer- und Zinkemissionen abschätzen zu können, wurden die Kupfer- und Zinkfrachten der Entwässerung bilanziert. Die Ergebnisse zeigen, dass z.B. 80% des Zinks aus Haushalten, Industrie und Gewerbe stammen. 20% des Zinks stammt aus diffusen Quellen, wobei der Großteil (80-90%) vom Gebäudepark und dem Strassenverkehr stammt. In der vorliegenden Studie wurden die Anteile der diffusen Emissionen an den Gesamtemissionen von einer Untersuchung der Stofffrachten bei der Wiener Hauptkläranlage übernommen (Kroiss, Morf et al. 2008). Die Daten weichen von schweizerischen Stoffflussanalysen aus den 1990er Jahren ab. Boller (1997) hat anhand einer Fallstudie gezeigt, dass rund 50-80% der Schwermetalle im Abwasser aus diffusen Quellen stammen, und somit der Anteil der diffusen Einträge deutlich höher eingeschätzt als die vorliegende Studie mit rund 20%. Die Anteile der verschiedenen Quellen kann somit im Rahmen der Studie in Hinblick auf Massnahmen zur Reduktion der Kupfer- und Zinkeinträge in die Gewässer nicht hinreichend beantwortet werden. Um Massnahmen zu planen, wird eine kantonsweite, räumlich verortete Analyse (auf Einzugsgebietsebene) der relevanten Kupfer- und Zinkquellen und deren Eintragspfade in die Oberflächengewässer empfohlen. Beispiele für eine mögliche Vorgangsweise gibt es aus Deutschland (Fuchs, Scherer et al. 2010) oder auch für Österreich, wo im Jahr 2014 eine Emissionsmodellierung im Einzugsgebiet der Dornbirner Ach erfolgte (Clara, Hochedlinger et al. 2014).

Abgesehen von den Anteilen der unterschiedlichen Quellen zeigt die vorliegende Studie, dass non den diffusen Kupfer- und Zinkemissionen rund 70-80% über die Abschwemmung versiegelter Oberflächen in den angrenzenden Boden gelangen. Massnahmen zum Rückhalt der Schadstofffrachten bei Fallrohren und Schächten und der anschließenden Entsorgung des zurückgehaltenen Materials sind deshalb sinnvoll. Lediglich 20-30% werden durch das Kanalsystem erfasst und (mit Ausnahme des Regenwassers in der Trennkanalisation) einer Abwasserreinigungsanlage zugeführt.



## 6 Glossar

Begriff	Definition	Literaturquelle
Anthroposphäre	Die Anthroposphäre ist der vom Menschen geschaffene Lebensraum. Im Sinne von Baccini und Brunner (2012) wird der Lebensraum als komplexes System von Material-, Energie- und Informationsflüssen verstanden.	vgl. Wikipedia (2015)
anthropogen	Das Adjektiv anthropogen (altgriechisch <i>ánthropos</i> „Mensch“, mit dem Verbalstamm <i>gen-</i> „entstehen“) ist ein Fachbegriff für das durch den Menschen Entstandene, Verursachte, Hergestellte oder Beeinflusste. So sind beispielsweise Kunststoffe anthropogen, da sie nur vom Menschen hergestellt werden.	Wikipedia (2015)
System	Ein System bezeichnet die Menge an Elementen und deren Beziehung untereinander. Im Rahmen der Stoffflussanalyse bezeichnet man die Elemente eines Systems als Prozesse und Flüsse (Güter-, Stoff- und Materialflüsse). Durch die Bezeichnung der Elemente <i>im</i> System werden diejenigen, die nicht zum System gehören, ausgegrenzt und damit die Systemgrenzen (s. u.) definiert. Ein System kann z. B. ein Betrieb (Müllverbrennungsanlage), eine Region (z. B. Kremstal), eine Nation (z. B. Österreich) oder auch ein Privathaushalt sein. In einem Stoffhaushaltssystem ist jedes Gut durch je einen zugehörigen Herkunfts- und Zielprozess eindeutig identifiziert.	ÖWAV (2003)
Material	Material ist ein allgemeiner Begriff, der sowohl Güter als auch Stoffe umfassen kann und damit Rohmaterialien sowie alle bereits vom Menschen durch physikalische oder chemische Prozesse veränderten Stoffe einschließt. Der Begriff Material wird dann verwendet, wenn Güter und Stoffe betrachtet werden, oder wenn man sich noch nicht festlegen will, auf welcher Ebene (Güter oder Stoffe) eine Untersuchung durchgeführt werden soll.	ÖWAV (2003)
Gut	Ein Gut besteht aus einem oder mehreren Stoffen und ist handelbar. Der Wert von Gütern kann sowohl positiv (Heizöl, Mineralwasser) als auch negativ (Restmüll, Abwasser) sein. In besonderen Fällen gibt es Güter, die keinen monetären Wert aufweisen, d. h. sie verhalten sich wertmäßig neutral. Beispiele dafür sind Luft, Abluft oder Niederschlag.	ÖWAV (2003)

Begriff	Definition	Literaturquelle
Stoff	Ein Stoff besteht aus identischen Einzelteilen und ist demzufolge ein chemisches Element (Einzelteil Atom, z. B. Stickstoff, Kohlenstoff oder Kupfer) oder eine chemische Verbindung in reiner Form (Einzelteil Molekül, z. B. NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> oder Kupfersulfat). Keine Stoffe sind beispielsweise Trinkwasser, da es nicht nur aus reinem Wasser, sondern auch aus Kalzium und vielen Spurenelementen besteht, oder PVC, da es neben polymerisiertem Vinylchlorid auch Additive enthält.	ÖWAV (2003)
Fluss	Die Bewegung der untersuchten Güter und Stoffe zwischen einzelnen Prozessen wird als Fluss mit der Einheit Masse pro Zeit bezeichnet <sup>1</sup> . Materialflüsse in einen Prozess hinein werden als Inputs (Edukte), solche aus Prozessen hinaus als Outputs (Produkte) bezeichnet (Importe und Exporte vgl. „System“). In der Praxis werden zum Begriff "Fluss" auch die Synonyme "Fracht" und "Flux" verwendet.	ÖWAV (2003)
Prozess	Ein Prozess beschreibt die Umformung, den Transport oder die Lagerung von Gütern und Stoffen. Beispiele für Prozesse sind: der Stoffwechsel eines Organismus (z. B. Mensch, Kuh), eine Tätigkeit (z. B. Mülltrennung im Haushalt), Vorgänge in einer Anlage (z. B. Müllverbrennungsofen, Papierfabrik, Deponie) oder in einem Umweltmedium (z. B. Atmosphäre, Hydrosphäre, Boden) oder eine Dienstleistung (z. B. Müllsammlung). Ein Prozess wird oft als Black Box definiert, d. h. die Vorgänge innerhalb dieses Prozesses werden nicht betrachtet. Sollen diese näher untersucht werden, dann kann der Prozess in mehrere Subprozesse untergliedert werden. Materialflüsse in einen Prozess hinein werden als Inputs, solche aus Prozessen hinaus als Outputs bezeichnet (Importe und Exporte vgl. „System“).	ÖWAV (2003)
Transferfunktion	Die Transferfunktion beschreibt die Verteilung eines Inputs an Gütern oder Stoffen innerhalb eines Prozesses auf verschiedene Outputgüter des Prozesses. Eine Lagerveränderung ist in der Transferfunktion zu berücksichtigen und entsprechend zu vermerken.	ÖWAV (2003)
Transferkoeffizient	Der Transferkoeffizient $k_{x,j}$ bezeichnet die Fraktion des gesamten in den Prozess eingeführten Stoffes $x$ , die in das Outputgut $j$ transferiert wird. Die Summe der Transferkoeffizienten aller Outputgüter muss immer 1 ergeben, wobei davon ausgegangen wird, dass auch allfällige Transfers ins Lager („Lagerungen“) bei der Summenbildung als „Outputs“ berücksichtigt werden. Je	ÖWAV (2003)

Begriff	Definition	Literaturquelle
	nach Fragestellung kann in Einzelfällen für die Berechnung der Transferkoeffizienten nur ein Teilinput betrachtet werden: Beispielsweise wird für die Bestimmung der Effizienz der Oxidation bei der Restmüllverbrennung nur der Kohlenstoff im Restmüll berücksichtigt (ohne C in der zugeführten Verbrennungsluft).	

## 7 Literatur

- AWEL. 2014. *Bericht zum Massnahmenplan der Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2015...2018*. Zürich: Amt für Abfall Wasser Energie und Luft (AWEL).
- AWEL. 2015. *Massnahmenplan der Abfall- und Ressourcenwirtschaft 2015...2018*. Zürich: Amt für Abfall Wasser Energie und Luft (AWEL).
- Baccini, P. und P. H. Brunner. 2012. *Metabolism of the Anthroposphere: Analysis, Evaluation, Design (Second Edition)*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Bader, H. P., R. Scheidegger, D. Wittmer, et al. 2011. Copper flows in buildings, infrastructure and mobiles: a dynamic model and its application to Switzerland. *Clean Technologies and Environmental Policy* 13(1): 87-101.
- BAG. 2012. *Factsheet: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)*. Bern: Bundesamt für Gesundheit (BAG).
- Baudirektion Kanton Zürich. 2015. *Kanton Zürich Richtplan*. Zürich.
- Bogdal, C., T. D. Bucheli, T. Agarwal, et al. 2011. Contrasting temporal trends and relationships of total organic carbon, black carbon, and polycyclic aromatic hydrocarbons in rural low-altitude and remote high-altitude lakes. *Journal of Environmental Monitoring*.
- Boller, M. 1997. Tracking heavy metals reveals sustainability deficits of urban drainage systems. *Water Science and Technology* 35(9): 77-87.
- Boller, M. 2015. Auskunft zu regionalen Schwermetallbilanzen im Kanton Zürich. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 8. Juni 2015.
- Boller, M., M. Steiner und J. Mieleitner. 2009. *Belastung des Zürichsees durch die Straßentwässerung*. Zürich: Amt für Abfall Wasser Energie und Luft (AWEL).
- Brunner, P. H. und H. Rechberger. 2004. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Clara, M., G. Hochedlinger, S. Weiß, et al. 2014. *Emissionsmodellierung ausgewählter organischer und anorganischer Parameter im Einzugsgebiet der Dornbirner Ach*. Wien und Bregenz.
- ELK. 2013. *Feinstaub in der Schweiz 2013*. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL).
- FOEN. 2015. *Switzerland's Informative Inventory Report 2015 (IIR)*. Bern: Federal Office for the Environment (FOEN).
- Frischknecht, R. 2009. *Umweltverträgliche Technologien - Analyse und Beurteilung. Teil 2: Ökobilanzen (Skriptum)*. [Environmental technologies: Analysis and Evaluation. Part 2: Life cycle assessment (Lecture notes).] Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

- Frischknecht, R. und S. Büsser-Knöpfel. 2013. *Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit*. Bern: Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Frischknecht, R., R. Steiner und N. Jungbluth. 2009. *Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen*. Bern: Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Fuchs, S., U. Scherer, R. Wander, et al. 2010. *Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS: Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklischearomatische Kohlenwasserstoffe*. Dessau.
- Känel, B., P. Steinmann, J. Sinniger, et al. 2012. *Züricher Gewässer 2012. Entwicklung - Zustand - Ausblick*. Zürich: Amt für Abfall Wasser Energie und Luft (AWEL).
- Kral, U. 2014. *A new indicator to assess anthropogenic material flows to regional sinks*. PhD Thesis, Vienna: Vienna University of Technology.
- Kroiss, H., L. S. Morf, C. Lampert, et al. 2008. *Optimiertes Stoffflussmonitoring für die Abwasserentsorgung Wiens*. [Optimized substance flow monitoring for the waste water treatment plant in Vienna.] Wien: Technische Universität Wien.
- Kuhn, E. 2015. Einschätzung realistischer Recyclingquoten aufgrund des technischen Potentials. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 4. August 2015.
- Kuhn, E. 2015. Festlegung von Zielkriterien zur Deponierung von KVA-Schlacken zwecks Szenariobetrachtung. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 4. August 2014.
- Kuhn, E. 2015. Provisorische Zielvorstellung bei der Entsorgung von Aushub. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 4. August 2015.
- Laner, D., J. Feketitsch, H. Rechberger, et al. 2015. A Novel Approach to Characterize Data Uncertainty in Material Flow Analysis and its Application to Plastics Flows in Austria. *Journal of Industrial Ecology*: n/a-n/a.
- Morf, L. 2015. Einschätzung zum Stand-der-Technik bei der Behandlung von KVA-Filterstäuben. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 4. August 2015.
- Morf, L. 2015. Provisorische Zielvorgabe für die Cu-Rückgewinnung aus KVA-Schlacken. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 4. August 2015.
- Morf, L., A. Buser und R. Taverna. 2007. *Dynamic Substance Flow Analysis Model for Selected Brominated Flame Retardants as a Base for Decision Making on Risk Reduction Measures (FABRO)*.
- Müller-Wenk, R. 1978. *Die ökologische Buchhaltung. Ein Informations- und Steuerungsinstrument für umweltkonforme Unternehmenspolitik*. Frankfurt: Campus Verlag.
- Niederhauser, P. 2015. Qualitätsanforderung für gereinigte Abwässer. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 24. August 2015.

ÖWAV. 2003. Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft (ÖWAV-Regelblatt 514). [The application of the substance flow analysis tool in the waste management sector (ÖWAV - Standard 514)]. Wien: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV).

Rubli, S. 2012. *Modellierung der Bau-, Rückbau- und Aushubmaterialflüsse: Überregionale Betrachtung*. Zürich.

Rubli, S. 2013. *Dynamische Modellierung der Asphalt- sowie PAK-Lager und Flüsse in den Strassen der Region St. Gallen, Thurgau, Zürich und Fürstentum Liechtenstein*. [Dynamic modeling of asphalt and PAH-stocks and flows in roads of the districts St. Gallen, Thurgau, Zürich and the Principality of Liechtenstein.] Schlieren: Energie- und Ressourcen-Management GmbH.

Schleiss, K. 2015. Auskunft zu Kupfer und Zinkfrachten in biogenen Abfällen. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 21. Mai 2015.

Schneider, T. und S. Rubli. 2015. Das KAR-Modell: Eine Simulation der Kies-, Aushub- und Rückbaumaterialflüsse Abgerufen am 4. Dezember 2015, von <http://www.tinuschneider.ch/Software/KAR/kar-modell.ch> VORSCHAU.

Schweizer Bundesrat. 1998. *Gewässerschutzverordnung (Stand 1.1.2014)*.

Schweizer Bundesrat. 1998. *Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo)*.

Schweizer Bundesrat. 2011. *Technische Verordnung über Abfälle vom 10. Dezember 1990 (Stand am 1. Juli 2011)*. [Technical Waste Directive from 10th December 1990 (Status 1st July 2011).]

Schweizer Bundesrat. 2014. *Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV)*.

Sieber, C. 2014. *Kiesstatistik 2013*. Zürich.

Sieber, C. 2015. Restvolumina Inertstoffdeponien. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 24. August 2015.

Spohn, P. 2008. Überwachung der Klärschlammqualität im Kanton Zürich. Artikel präsentiert: Fachtagung 2008: Düngerkontrolle MARSEP- und VBBo-RingversucheLiebefeld.

Stäubli, B. 2015. Datenauskunft zu Rückbaustoffflüsse im Kanton Zürich. Persönliche Mitteilung an U. Kral vom 27. April 2015.

von Schulthess, C. und M. Ziegler. 1996. *Stoffflussanalyse Schweiz - Anleitung*.

Vyzinkarova, D. und P. H. Brunner. 2013. Substance Flow Analysis of Wastes Containing Polybrominated Diphenyl Ethers. *Journal of Industrial Ecology* 17(6): 900-9011.

Wikipedia. 2015. Seite „Anthropogen“. Abgerufen am 3. Dezember 2015, 09:54 UTC, von <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Anthropogen&oldid=148600390>.

Wikipedia. 2015. Seite „Anthroposphäre“. Abgerufen am 3. Dezember 2015, 10:04 UTC, von <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Anthroposph%C3%A4re&oldid=146022139>.

## 8 Anhang

Der Anhang zum vorliegenden Bericht befindet sich in einem separaten Dokument. Eine Übersicht zu den Inhalten findet sich in Abbildung 50.

*Abbildung 50: Übersicht zu den Anhängen.*

N°	Titel	Inhalt
A	Dokumentation des Gesamtsystems (dis-aggregiert)	(1) Systembilder (2) Prozesse und Flüsse (3) Ergänzende Hintergrunddaten (4) Literatur
B	Zielkriterien, aktueller Fluss, kritischer Fluss, Indikator	(1) Liste mit Zielkriterien zur Ermittlung der kritischen Flüsse. (2) Liste mit den quantifizierten aktuellen & kritischen Flüssen sowie dem Indikator für jeden Fluss.
C	Datenqualität und Unsicherheiten	(1) Aktuelle Flüsse (2) Kritische Flüsse (3) Plot Variationskoeffizienten
D	Integration der Systembilder & Senkenbelastung	(1) Integration der Systembilder (2) Senkenbelastung