

Universität für Bodenkultur
Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt
Institut für Abfallwirtschaft



Ordnungsgemäßer Umgang mit den problematischen Abfallströmen Brandschutt, extrudiertes Polystyrol und Teerabfällen im Sinne der Kreislaufwirtschaft

Masterarbeit
Zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht von
Lukas Treiber, BSc.
Stud.-Kennz.: 067/427; Matr. Nr.: 01340008

Tulln, 4. Juni 2021

Danksagung

Mein Dank gilt Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Marion Huber-Humer und Dipl.-Ing. Dr. Florian Part für die Betreuung dieser Masterarbeit. Danke Florian, für deine fachlichen Anregungen und deine Unterstützung.

Besonderer Dank gebührt meinen Eltern und meiner Partnerin, die mich während des gesamten Schreibprozess und darüber hinaus begleitet haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Freunden und StudienkollegInnen für die gemeinsame Zeit, Hilfsbereitschaft und Unterstützung bedanken. Namentlich möchte ich hier Maria, Anna, Robert und Peter erwähnen – danke.

Ebenso möchte ich mich bei meiner Chefin bedanken, die den Anstoß zum Thema dieser Masterarbeit gab.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüferin/ keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht.

Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandeln geahndet wird („Verwendung unerlaubter Hilfsmittel“) und weitere rechtliche Schritte nach sich ziehen kann.

Unterschrift:  (Lukas Treiber)

Abstract

Resource-conserving economic activity can only succeed through a paradigm shift away from a linear to a circular economic model. Relevant here is the economical and careful use of raw materials in order not to disadvantage our future generations and to preserve an intact environment. In the course of economic activities waste is produced, the quantity of which is constantly increasing and the composition of which is becoming more and more complex. This leads to an increasing number of problematic waste streams, which cause great difficulties for waste management companies due to a lack of efficient treatment methods.

This master thesis deals with the topic of the correct handling of the problematic waste streams fire debris, extruded polystyrene and tar waste, in the sense of circular economy.

In progress of the master thesis, selected legal principles and the individual waste streams as well as related problems are explained. In addition, in the course of the research questions, hazard-relevant properties, reasons for the constant increase of their amount as well as treatment and recycling methods for these are examined in more detail. Furthermore, the Directive 2012/18/EU of July 4, 2012 is considered for possible support in dealing with these waste streams. Finally, recommendations for the operational practice of waste management companies are formulated from the researched results, own expert knowledge, and assigned technical experiences.

The results show that Directive 2012/18/EU does not provide any relevant content for the handling of problematic waste streams and that, in principle, all three waste streams can pose serious risks to humans and the environment if handled inadequately. In addition, the lack of adequate treatment facilities limits or prevents the recycling of fire debris and extruded polystyrene. As a suggestion for Austrian waste management companies, an alliance of all representatives is recommended in order to convince the politicians of the high risk of such waste streams within a future-oriented and circular waste treatment. For this, technological know-how already available in other countries would have to be implemented in Austria. Eco-design of source products/materials and technical adaptations of treatment plants could lead to a reduction in the volume of waste streams such as fire debris, XPS and tar waste. The use of alternative insulation materials will reduce the amount of extruded polystyrene, but fire debris and tar waste will continue to be generated. Material recyclability of fire debris could be achieved through innovative processes. In the CreaSolv©-process, for example, XPS waste is first collected separately, dissolved using solvents, and then the material polystyrene is selectively extracted. The recovered recycle can be fed back into the manufacturing process and used again.

Kurzfassung

Ressourcenschonendes Wirtschaften kann nur durch einen Paradigmenwechsel, weg von einem linearen hin zu einem zirkulärem Wirtschaftsmodell, gelingen. Relevant dabei ist die haushaltende und schonende Nutzung der Rohstoffe, um unsere nachfolgenden Generationen nicht zu benachteiligen und eine intakte Umwelt zu erhalten. Im Zuge wirtschaftlicher Tätigkeiten fallen Abfälle an, deren Menge stetig zunimmt und deren Zusammensetzung laufend komplexer werden. So kommt es vermehrt zu problematischen Abfallströmen, die Entsorgungsunternehmen große Schwierigkeiten, aufgrund fehlender Behandlungsmethoden, bereiten.

Diese Masterarbeit behandelt das Thema des richtigen Umgangs mit den problematischen Abfallströmen Brandschutt, extrudiertem Polystyrol und Teerabfällen, im Sinne der Kreislaufwirtschaft.

Im Verlauf der Arbeit werden ausgewählte rechtliche Grundlagen und die einzelnen Abfallströme ebenso deren Problematiken erläutert. Dazu werden im Zuge der Forschungsfragen gefahrenrelevante Eigenschaften, Gründe für den stetigen Anstieg sowie Behandlungs- und Verwertungsmethoden für diese näher beleuchtet. Weiters wird die Richtlinie 2012/18/EU vom 4. Juli 2012 auf deren Relevanz und mögliche Unterstützung im Umgang mit diesen Abfallströmen betrachtet. Abschließend werden aus den recherchierten Ergebnissen, eigenem Fachwissen und Praxiserfahrungen sowie zugetragener fachspezifischer Erfahrungen Empfehlungen für die betriebliche Praxis der Entsorgungsunternehmen formuliert.

Die Ergebnisse sind, dass die Richtlinie 2012/18/EU keine relevanten Inhalte für den Umgang mit problematischen Abfallströmen bietet und prinzipiell können alle drei Abfallströme, bei inadäquatem Umgang, gravierende Risiken für Mensch und Umwelt bergen. Außerdem beschränkt bzw. verhindert der Mangel an geeigneten Behandlungsanlagen die stoffliche Verwertung von Brandschutt und extrudiertem Polystyrol. Als Anregung für österreichische Entsorgungsunternehmen wird ein Zusammenschluss aller Vertreter empfohlen, um die Politik von der Brisanz einer zukunftssträchtigen und kreislaufwirtschaftlichen Abfallbehandlung zu überzeugen. Dazu müsste bereits in anderen Ländern vorhandenes technologisches Know-how in Österreich umgesetzt werden.

Durch Ökodesign der Ausgangsprodukte/-materialien und technische Adaptionen im Bereich der Behandlungsanlagen könnte es zur Mengenreduktion der Abfallströme Brandschutt, XPS und Teerabfälle kommen. Durch den Einsatz von alternativen Dämmstoffen kann das Aufkommen von extrudiertem Polystyrol verringert werden, Brandschutt und Teerabfälle fallen jedoch weiterhin an. Die stoffliche Verwertbarkeit von Brandschutt könnte durch innovative Prozesse erreicht werden. So werden beispielsweise beim CreaSolv©-Verfahren XPS-Abfälle zuerst separat gesammelt, mittels Lösungsmittel aufgelöst und anschließend erfolgt eine selektive Extrahierung des Ausgangsstoffes Polystyrol. Das rückgewonnene Rezyklat kann wieder in den Herstellungsprozess rückgeführt und eingesetzt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation und Problemstellung	1
1.2	Forschungsfragen.....	4
2	Methode	5
3	Rechtliche Grundlagen für den Umgang mit gefährlichen Abfällen.....	6
3.1	Berührungspunkte der IE-Richtlinie und POP-Verordnung mit der Abfallwirtschaft	6
3.2	Seveso-III-RL, ihre Umsetzung in Österreich und mögliche Beurteilung der Seveso-Relevanz von Abfällen.....	7
4	Fallbeispiel: Brandschutt	9
4.1	Materialbeschreibung	9
4.2	Brandschutt als Abfall.....	10
4.2.1	Problematik	11
4.2.1.1	Dioxine.....	12
4.2.1.2	Polychlorierte Biphenyle	13
4.2.1.3	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	14
4.2.1.4	Löschmittel.....	16
4.2.2	Mengen	19
4.2.3	Vermeidung und Behandlung.....	19
4.2.3.1	Vermeidung und Wiederverwendung	19
4.2.3.2	Verwertung und Beseitigung.....	19
5	Fallbeispiel: Extrudiertes Polystyrol.....	21
5.1	Materialbeschreibung	23
5.2	XPS-Abfälle	25
5.2.1	Problematik	25
5.2.1.1	Hexabromcyclododekan	25
5.2.1.2	Dicumylperoxid	27
5.2.1.3	Dioxine.....	28
5.2.1.4	Polychlorierte Biphenyle	28
5.2.2	Mengen	28
5.2.3	Vermeidung und Behandlung.....	29
5.2.3.1	Vermeidung	31
5.2.3.2	Wiederverwendung und stoffliche Verwertung	31
5.2.3.3	Thermische Verwertung und Beseitigung.....	35

6	Fallbeispiel: Bituminöse Baustoffe	36
6.1	Materialbeschreibung	36
6.1.1	Bitumen	36
6.1.2	Asphalt	40
6.1.3	Pech/Teer	41
6.1.4	Straßenaufbruch.....	42
6.2	Teerabfälle.....	43
6.2.1	Problematik	44
6.2.1.1	Phenole.....	45
6.2.1.2	BTEX	46
6.2.1.3	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	46
6.2.2	Mengen	46
6.2.3	Vermeidung und Behandlung.....	46
6.2.3.1	Bitumen.....	47
6.2.3.2	Pech/Teer	48
6.2.3.3	Straßenaufbruch/Ausbauasphalt	48
7	Zusammenschauende Diskussion	53
7.1	Gefahrenrelevante Eigenschaften und Gründe für den stetigen Anstieg der Gesamtmengen von Brandschutt, extrudiertem Polystyrol und Teerabfällen	53
7.2	Behandlungs- und Verwertungsmaßnahmen für Brandschutt, XPS und Teerabfälle im Sinne der Kreislaufwirtschaft	57
7.3	Abhilfe durch die Richtlinie 2012/18/EU im Umgang mit problematischen Abfallströmen.....	59
8	Schlussfolgerung und Empfehlungen.....	60
9	Literaturverzeichnis	63
10	Abbildungsverzeichnis.....	73

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

2,3,7,8-TCDD	2,3,7,8-Tetrachlor-Dibenzo-p-Dioxin
µg	Mikrogramm (=10 ⁻⁶ g)
µm	Mikrometer (=10 ⁻⁶ m)
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
AGES	österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit
Asphaltene	Mizelle umgeben mit Schutzschicht aus Asphaltharz
AWG 2002	Abfallwirtschaftsgesetz
B[a]p	Benzo[a]pyren
BGHM	Berufsgenossenschaft Holz und Metall
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BNT	Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus
BTEX	Abkürzung für aromatische Kohlenwasserstoffe: Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole
BVT	beste verfügbare Technik
CLP-VO	Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischschem (CLP = Classification, Labelling, Packaging)
DCP	Dicumylperoxid
DVO	Deponieverordnung
EGGBI	Europäische Gesellschaft für Bauen und Innenraumhygiene
EPS	expandiertes Polystyrol
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlen-Wasserstoffe
Fraunhofer IVV	Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV
GewO	Gewerbeordnung
HBCD/HBCDD	Hexabromcyclododekan
HFCKW	teilhalogenierte ozonabbauende Kältemittel
HFKW	teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
IE-RL	Industrieemissionsrichtlinie
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control RL (=IVU RL)

IVU	Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung RL (=IPPC-RL)
J/(kgK)	Joule pro Kilogramm und Kelvin
Kongenere	Einzelverbindungen
kWh/m ³	Kilowattstunde pro Kubikmeter (1 kWh = 1.000 Wh)
Land OÖ	Land Oberösterreich
LfU Bayern	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LUBW	Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Maltene	Oxidbitumen mit Harzanteilen
mbar	Millibar
ng	Nanogramm
Ozokerit	Erdwachs
ÖXPS	Österreichische Fachvereinigung Polystyrol Extruderschaum
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD	Polychlorierte Dibenzopara-Dioxine
PCDF	polychlorierte Dibenzofurane
PE	Polyethylen
PFAS	per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
PFC	per- und polyfluorierte Chemikalien
PFOA	Perfluoroktansäure
PFOS	Perfluorooctansulfonat
pg	Picogramm (= 10 ⁻¹² g)
PmB	Polymermodifizierte Bitumen
ppb	parts per billion (= 10 ⁻⁹)
POP	persistente organische Schadstoffe (Chemikaliengruppe mit gefährlichen Eigenschaften)
POP-VO	Persistente organische Schadstoffe Verordnung
PS	(Standard-)Polystyrol
PSA	persönliche Schutzausrüstung
PVC	Polyvinylchlorid
BG RCI	Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie
REACH	EU-Chemikalienverordnung
Retardant	Verzögerungsmittel

RL	Richtlinie
SN	Schlüsselnummer
SP	Spezifizierung
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
TEQ	Toxizitäts-Äquivalent“
VO	Verordnung
WHO	Weltgesundheitsorganisation
W/(mK)	Watt pro Meter und Kelvin
ZAW	Zweckverband Abfallwirtschaft Westsachsen

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Dem Axiom der Kreislaufwirtschaft ist der nachhaltige Gedanke übergeordnet. Das bedeutet, rücksichtsvolles Handeln im Umgang mit Rohstoffen und Umwelt, um zukünftige Generationen nicht zu benachteiligen. Hierbei spielt die Abfallhierarchie (siehe Abb.1), die im Zuge der Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL) eingeführt wurde, und der Einsatz von Sekundärrohstoffen (siehe Abb.2.) eine zentrale Rolle (Müller, et al., 2020).



Abbildung 1: 5-stufige Abfallhierarchie (Umweltamt Stadt Graz, s.a.)

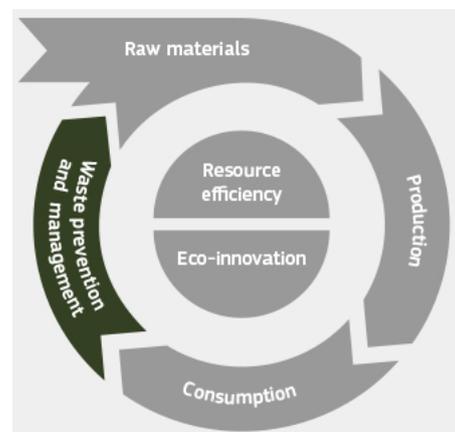


Abbildung 2: Waste prevention and management (European Commission, s.a.)

Ein wesentlicher Punkt im Konzept der Kreislaufwirtschaft (siehe Abb.3) ist die effiziente und effektive Nutzung von Ressourcen, bei gleichzeitigem sozioökonomischem Wirtschaften innerhalb der umweltverträglichen Belastbarkeitsgrenzen. Dem zugrunde liegt das Vorsorgeprinzip, das neben Ressourcenschonung auch den Schutz von Klima, menschlicher Gesundheit und Umwelt anstrebt (Müller, et al., 2020).

2014 wurde das Kreislaufwirtschaftspaket (eng. *circular economy package*) von der Europäischen Kommission vorgeschlagen, um die europäische Wirtschaft nachhaltiger und konkurrenzfähiger zu gestalten. Ziel ist es, das vorherrschende lineare Wirtschaftssystem, das mit „take – make – consume – throw away“ kurz zusammengefasst werden kann, zu einem nachhaltigen kreisläufigen System zu wandeln (Bourguignon, 2016). Die EU fordert im ersten Aktionsplan der Kreislaufwirtschaft, mittels der Richtlinie 2008/98/EG (AbfRRL), die Umsetzung der 5-stufigen Abfallhierarchie von seinen Mitgliedsstaaten. Dafür war ein verpflichtendes Abfallvermeidungsprogramm zu erstellen, das Vermeidung und ReUse von Abfällen forciert. Die AbfRRL definiert Haupt- und Unterziele (siehe Art.1 f AbfRRL) für das Abfallvermeidungsprogramm (Dehoust, et al., 2013).

Zusätzlich sollen die EU-Richtlinie über Abfalldeponien und das Europäische Abfallpaket zur Wende beitragen, da nur mehr 10% der Siedlungsabfälle ab 2035 deponiert werden dürfen. In der EU-RL über Abfalldeponien sind Kriterien für die Annahme von Abfällen und den Umgang mit diesen formuliert. Das Europäische Abfallpaket wurde im Zuge des Kreislaufwirtschaftspakets beschlossen, welches 2018 zur Änderung und Konkretisierung der EU-Abfallrahmenrichtlinie, EU-Richtlinie über Abfalldeponien, EU-Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle, EU-Richtlinie über Altfahrzeuge, über Altbatterien und über Elektroaltgeräte führte. Abfallrechtlich ergaben sich durch die Ergänzungen klarere Definitionen, neue verbindliche Ziele und vor allem, bezüglich Recycling bis 2025, 2030 und 2035, konsequentere Anforderungen an die getrennte Abfallsammlung und Umsetzung der 5-stufigen Abfallhierarchie sowie erweiterte Herstellerverantwortung (*Circular Futures, s.a.*).

Die österreichische Abfallwirtschaft ist auf der juristischen Basis des AWG 2002 begründet. Dieses Gesetz wird durch Landesgesetze, EU-Verordnungen (z. B. REACH) und EU-Richtlinien (z. B. AbfRRL) unterstützt (*BMK, 2020*). Mit dem AWG 2002 soll sichergestellt sein, dass das Vorsorgeprinzip sowie die Nachhaltigkeit in der Abfallwirtschaft im Vordergrund stehen (*Abfallwirtschaftsgesetz, 2002*).

All diese Regularien wurden notwendig, da die Abfallmengen immer stärker zunahmen, die Zusammensetzung der Abfälle komplexer und dadurch problematischer wurden. Gleichzeitig geben sie Hilfestellung, um diese Abfallströme einer entsprechenden Abfallbehandlung zuzuführen.

Die vorliegende Diplomarbeit fokussiert auf aktuell problematische Abfallströme, speziell für Entsorgungsunternehmen, wie Brandschutt, extrudiertes Polystyrol und Teerabfälle, über welche derzeit noch wenig bekannt ist. Diese fallen unter anderem bei Brandereignissen, Sanierungs-/Renovierungs- und Abbruch-/Rückbauarbeiten an. Brandschutt sind Überreste aus Bränden, die ein heterogenes Sammelsurium von diversen Komponenten abbilden. XPS-Abfälle entstehen speziell im Zuge von Arbeiten an der thermischen Außenhülle (Dämmung) und beim Abbruch wie Rückbau von Gebäuden. Nebensächlich sind Produktionsabfälle bei der Erzeugung von XPS-Dämmplatten, da diese in den Herstellungsprozess rückgeführt werden können. Teerabfälle entstehen hauptsächlich beim Abtrag von Asphalt-/ Bitumenschichten im Straßenbau, bei Sanierung von alten Dächern, in Form von Teerpappe, oder beim Austausch von Eisenbahnschwellen.

Primär ergeben sich für Entsorgungsunternehmen Problematiken im Bereich Lagerungs- und Entsorgungslogistik, aufgrund potentiell enthaltener Schadstoffe und materialabhängiger gefährlicher Eigenschaften, ebenfalls mangelt es an verfügbaren Behandlungsmethoden. Folglich nimmt mit steigendem Lagerbestand das Gefahrenpotenzial und -ausmaß zu.

In diesem Zusammenhang könnten die Seveso-III-Richtlinie - RICHTLINIE 2012/18/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen - und die Industrieemissionsrichtlinie - RICHTLINIE 2010/75/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) - einen Beitrag zur Minimierung bzw. zur Vermeidung von Störfällen, mit Beteiligung problematischer Abfälle, leisten. Des Weiteren könnte die (Vor-)Behandlung von problematischen

Abfällen, die Lagerprobleme lösen. Betreiber von Verbrennungsanlagen sind mit der Annahme von XPS-Dämmplatten, aus wirtschaftlichen Gründen, sehr zögerlich. Dies führt, hinsichtlich fehlender Alternativen zur thermischen Verwertung, zu Problemen in der Entsorgungslogistik und wiederum zu Lagerschwierigkeiten - es ergibt sich ein „Teufelskreis“. Dieser kann nur mittels alternativer und innovativer Lösungsmöglichkeiten durchbrochen werden, um einen ordnungsgemäßen und kreislaufwirtschaftlichen Umgang mit diesen Abfallströmen zu gewähren.

Gegenwärtig sehen sich Entsorgungs-/Produktionsunternehmen im betrieblichen Alltag mit eben genannten Herausforderungen konfrontiert. Diese Tatsache bildet die Grundlage der formulierten Forschungsfragen.

1.2 Forschungsfragen

Diese Masterarbeit soll allgemeine Empfehlungen im Umgang mit den problematischen Abfallströmen Brandschutt, extrudiertem Polystyrol und Teerabfällen (XPS-Platten) aufzeigen. Gleichzeitig wird der enge Bezug zur Seveso-III-RL (*Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2012*), IE-RL (*Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2010*), ehemals IPPC-RL/IVU-RL, und zur *VERORDNUNG (EU) 2019/1021 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe (Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2019)* kurz aufgezeigt.

Im Zuge dessen werden folgende Forschungsfragen beantwortet:

- Welche gefahrenrelevanten Eigenschaften bergen Brandschutt, extrudiertes Polystyrol und Teerabfälle? Welche Gründe führen zum stetigen Anstieg dieser drei Abfallströme?
- Welche Behandlungs- und Verwertungsmaßnahmen können im Sinne der Kreislaufwirtschaft für die gefährlichen Abfälle Brandschutt, XPS sowie Teerabfälle angewandt werden?
- Inwiefern bietet die Richtlinie 2012/18/EU vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen hinsichtlich des Umgangs mit diesen problematischen Abfallströmen Abhilfe?
- Was kann generell für Entsorgungsunternehmen im Umgang mit diesen drei Abfallströmen empfohlen werden? Was bedeutet dies für die betriebliche Praxis?

2 Methode

Diese Masterarbeit ist das Resultat einer Literaturrecherche. Es wurden keine Experteninterviews oder -befragungen durchgeführt, jedoch floss eigenes Erfahrungswissen mit ein.

Unter Literaturrecherche versteht man, für die Forschungsarbeit relevante Literatur auf die wichtigsten Fragestellungen zu reduzieren und diese wiederzugeben. Grundlage dafür bilden wissenschaftliche Journale/Papers, Forschungsberichte, Bücher, Periodika, Internet und sonstige Quellen (*Wytrzens, et al., 2014*).

Für die Literaturfindung wurde das Schneeballprinzip angewandt. Hauptsächlich wurden die Suchplattformen BOKU Lit-Search und Ecosia.org mit folgenden Schlagworten in deutscher und englischer Sprache, für die Literaturrecherche verwendet: „extrudiertes Polystyrol“, „XPS“, „Brandschutt“, „fire debris“, „Teerabfälle“, „tar waste“, „Seveso-III-Richtlinie“, „IE-Richtlinie“, „AWG 2002“ u. v. m. Die mittels der Schlagworte aufgefundene Literatur wurde erst gescreent, wesentliche Passagen/Inhalte gesichtet und teilweise exzerpiert. Weiters wurden auch rechtliche Quellen, wie z. B. das Abfallwirtschaftsgesetz, die Abfallverzeichnisverordnung, die Abfallverbrennungsverordnung, u. v. m. für die Recherche herangezogen.

3 Rechtliche Grundlagen für den Umgang mit gefährlichen Abfällen

3.1 Berührungspunkte der IE-Richtlinie und POP-Verordnung mit der Abfallwirtschaft

Die Industrieemissionsrichtlinie (IE-RL) folgte der „Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung“ Richtlinie (IVU-RL) bzw. „Integrated Pollution Prevention and Control“ Richtlinie (IPPC-RL) nach und regelt den Emissionsschutz in der EU. Diese Richtlinie bildet die Basis für den Umgang von umweltrelevanten Industrieanlagen. Primäres Ziel ist der Umweltschutz, indem einheitliche Umweltstandards und Wettbewerbsbedingungen, innerhalb der EU, definiert werden. Sekundär sollen auch, ähnlich der Seveso-RL, Unfälle im Zusammenhang mit Industrieanlagen verhindert werden. Es sind rund 52.000 Anlagen erfasst, die von der IE-RL betroffen sind, darunter auch im Bereich der Abfallbehandlung und -verbrennung (*Umweltbundesamt, 2019*). BVT-Merkblätter (siehe Art. 13 Abs. 1 IE-RL) sollen den Stand der Technik in den relevanten Bereichen gewähren. Die Umsetzung der IE-RL und BVT-Merkblätter erfolgte in Österreich durch die Novellierung des AWG u. A. Entsprechende Emissionsgrenzwerte sind in der Abwasseremissionsverordnung 1996, der Abfallverbrennungsverordnung 2013 und der Gewerbeordnung 1994 angeführt (*Umweltbundesamt, s.a.*). Laut AWG 2002 werden für die Abfallbehandlung Vorgaben und Grenzwerte, für IPPC-Behandlungsanlagen (siehe § 2 Abs. 7 Z 3 AWG) mittels Bescheides (§ 47 AWG) erteilt.

Aus den Ergebnissen der Stockholmer-Konvention resultierte die europäische Rechtsgrundlage der Verordnung über persistente organische Schadstoffe (*Wurbs, et al., 2017*). Inhalt des Übereinkommens sind Herstellungs-, Verwendungs- und Handelsverbot für gefährliche Chemikalien sowie das Ausfuhrverbot von Abfällen, ausgenommen zur umweltgerechten Entsorgung. Ausnahmen dieser Verbote sind begrenzt. Nicht für den Einsatz zugelassene persistente organische Schadstoff-Lagerbestände sind als gefährlicher Abfall anzusehen. Die Behandlung dieser Abfälle muss die Vernichtung bzw. Unumkehrbarkeit der POP-Substanzen zur Folge haben und für die Endlagerung in Untertagedeponierung (in Österreich nicht vorhanden) gelten POP-Konzentrationshöchstmengen. Verunreinigung von Abfällen mit POP-Stoffen sind durch den Abfallerzeuger und -eigentümer zu unterbinden. Die Staaten, die sich der Stockholmer-Konvention verpflichtet haben, müssen unter anderem unabsichtlich gebildete POPs (z. B. Dioxine, Furane, PAKs) in einem Verzeichnis auflisten und Aktions- und Maßnahmenpläne, für die Reduzierung dieser POPs, erstellen (*BMLFUW, 2012*). Laut der POP-VO sind nur drei Verwertungs- und Beseitigungsmethoden zulässig:

- Chemisch/physikalische Behandlung
- Thermische Verwertung an Land
- Energetische Verwertung, ausgenommen PCB-haltige Materialien (*Eibensteiner, 2016*)

Die Voraussetzung für die Beseitigung ist die Zerstörung bzw. dauerhafte Umwandlung der gefährlichen Schadstoffe, andernfalls ist die Deponierung durch die

POP-VO untersagt (*Eibensteiner, 2016*). Im Zusammenhang mit der POP-VO kann die REACH-VO erwähnt werden. Es handelt sich um eine europäische Verordnung hinsichtlich Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von chemischen Stoffen (*BMLFUW, 2012*).

Eine weitere Richtlinie, die den Umgang mit gefährlichen Stoffen und Störfälle in Industrieanlagen innerhalb der EU regeln soll, ist die Seveso-Richtlinie.

3.2 Seveso-III-RL, ihre Umsetzung in Österreich und mögliche Beurteilung der Seveso-Relevanz von Abfällen

1976 ereignete sich ein schwerer Chemieunfall in Seveso (Italien), der zur Freisetzung einer großen Menge Dioxine führte. 2.000 Menschen wurden gesundheitlich gefährdet und die Umwelt kontaminiert. Auf diesen Vorfall wurde im Juni 1982 mit der Seveso-I-RL reagiert, diese wurde in den Folgejahren, aufgrund weiterer Chemieunfälle, weiterentwickelt. Da die Seveso-I-RL ausschließlich auf Industrietätigkeiten abzielte, wurde zusätzlich die Lagerung gefährlicher Stoffe integriert (*Scheidmann, 2012*).

Die Seveso-II-RL entstand 1996 nach ausführlicher Überarbeitung der Seveso-I-RL. Implementiert wurden (z. B. höhere Ansprüche an Sicherheitsmanagementsysteme, Notfallpläne, etc.). 2003 wurde sie aufgrund schwerer Unfälle, hinsichtlich Risiken bei Lagerung von gefährlichen Stoffen und Nutzung gefährlicher Stoffe im Bergbau, adaptiert. Die Anforderungen der Seveso-II-RL wurden als gestaffeltes System kreiert, je mehr gefährliche Stoffe in einem Betrieb verwendet werden bzw. entstehen, desto höher die Anforderungen bezüglich Pflichten und Kontrollen. Im Zeitraum von 2000 bis 2008 konnte, durch das Sicherheitskonzept der Seveso-Richtlinien, die Anzahl an schweren Unfällen um rund 20 % reduziert werden (*Scheidmann, 2012*).

Ein wesentlicher Grund für die Einführung der Seveso-III-RL waren Anpassungen an neue Einstufungsvorgaben für gefährliche Stoffe und Gemische, durch die CLP-VO. Im Zuge dessen wurde 2008 die Seveso-II-RL überprüft. Ergebnis war eine überarbeitete und bezüglich CLP-VO adaptierte Seveso-Version, die 2012 als Seveso-III-RL erlassen wurde. Die Änderungen inkludierten Anpassungen an die CLP-VO, verbesserten Informationszugang für die Öffentlichkeit und strengere Vorgaben für die Überwachung (*Scheidmann, 2012*).

Die drei Seveso-Richtlinien dienen als europäisches Instrument um Störfälle in Industrieanlagen, welche mit gefährlichen Stoffen hantieren, zu verhindern. Gemeinsames Ziel ist es schwere Unfälle, im Beisein großer Mengen gefährlicher Stoffe/Gemische, bzw. deren Folgen für Mensch und Umwelt zu vermeiden respektive abzuschwächen. Notwendige Sicherheitskonzepte müssen in einem angemessenen Verhältnis vorliegen, je größer die Gefahr eines Unfalls, desto umfassender und effizienter müssen die Konzepte ausgearbeitet sein. Mitgliedsstaaten haben wirksame, verhältnismäßige und abschreckende Sanktionen zu setzen, um Verstöße, bezüglich verpflichtender Maßnahmen der Seveso-III-RL, entsprechend zu ahnden (*Scheidmann, 2012*).

Österreich hat die Seveso-RL in das AWG (Anhang 6) und die GewO (Anlage 5) eingearbeitet (*Götz, et al., 2016*). Es werden einige Begriffe neu definiert und erklärt. Eine wesentliche Neuerung ist die gesetzliche Unterscheidung in „Betriebe der unteren Klasse“ und „Betriebe der oberen Klasse“ (*Scheidmann, 2012*), abhängig von gelagerten/verwendeten Menge an gefährlichen Stoffen (siehe *AWG Anhang 6 Teil 1*).

Die Gefahrenkategorien der Seveso-Stoffe sind im *AWG Anhang 6 Teil 1* aufgelistet und namentlich sind diese im *AWG Anhang 6 Teil 2* angeführt. Gefährliche Abfälle, sind laut *AWG 2002* Abfälle die in der *AbfRRL* als gefährlich ausgewiesen sind und Seveso relevante Begriffsbestimmungen sind in § 2 Abs. 9 *AWG 2002* aufgelistet.

Die Seveso-III-RL bietet keine klare und eindeutige Grundlage für die Anwendbarkeit der Seveso-RL bezüglich der Einstufung von Abfällen. Selbst jahrelange Diskussionen führten zu keinem Ergebnis, somit gibt es aktuell ausschließlich Praxisbehelfe und praxisorientierte Anleitungen für die Umsetzung. Eine sinnvolle Anwendung und Realisierung der Seveso-III-RL in Betrieben ist abhängig davon, ob gefährliche Stoffe/Gemische in den entsprechenden Seveso-Behandlungsanlagen und /oder Abfalllager vorhanden sind (Götz, et al., 2016).

Abfälle sind mittels der Kriterien der Seveso-RL auf ihre Seveso-Relevanz zu überprüfen. Dazu muss die Seveso-Einstufung vereinfacht und die Methodik praxistauglich adaptiert werden. Beurteilungsverfahren des Chemikalienrechts können nicht bzw. nur teilweise auf Abfälle umgelegt werden. Gründe dafür sind die oft komplexe Zusammensetzung des Abfalls und nicht Durchführbarkeit ausführlicher Analysen, aus Zeitgründen (Götz, et al., 2016).

Eine Möglichkeit der Klassifizierung von Abfällen hinsichtlich der Seveso-Relevanz wäre, den Kennzeichnungsschlüssel von (Gefahrgut-)Transporten auf die Abfalleinstufung umzulegen. Denn die Erläuterungen der SN und Abfallbezeichnungen alleine sind oftmals zu oberflächlich, um daraus das tatsächliche Gefahrenpotential abzuleiten, z. B. fehlende Konzentrationsangaben (Götz, et al., 2016).

Abfallanlagenbetreiber können bewilligte Abfallmengen verringern oder die Charakterisierung der Abfalleigenschaften so definieren, dass diese Abfälle aus den Seveso-Gefahrenkategorien ausscheiden (Götz, et al., 2016).

4 Fallbeispiel: Brandschutt

4.1 Materialbeschreibung

Überreste aus Bränden werden als Brandschutt bezeichnet (ZAW, s.a.), hingegen werden brandschutfreie Gebäudeüberreste als Bauschutt deklariert.

Weitere Bezeichnungen für Brandschutt sind:

- Brandabfall
- Brandrückstand
- verrußte Baustoffe
- angebranntes oder durch Löschmittel unbrauchbar gewordenes Inventar (Schmederer, 2015)

Brandschutt setzt sich eher aus mineralischen und Brandrückstände aus organischen Komponenten zusammen (Schmederer, 2015).

Für die Einstufung von Brandschutt als Abfall ist der Abfallerzeuger/-besitzer verantwortlich, falls notwendig in Kooperation mit Sachverständigen o.Ä. (ZAW, s.a.). Um diese Arbeit zu erleichtern und die Gefährlichkeit von Brandschutt einfacher einschätzen zu können (Schmederer, 2015), werden Brände in vier Gefahrenbereiche unterteilt:

Tabelle 1: Übersicht und Beschreibung der Gefahrenbereiche von Brandereignissen (eigene Darstellung nach Schmederer, 2015)

Gefahrenbereich (GB)	Ausdehnung Größe	Kennzeichen	Brand-Beispiele
GB 0	$\leq 1 \text{ m}^2$	- räumlich eng begrenzt - sichtbarer/stark brandverschmutzter Bereich	- Papierkorb - Kerzengesteck - Kochstelle
GB 1	$\geq 1 \text{ m}^2$	- größere Ausdehnung als GB 0 - deutlich sichtbare Brandverschmutzung - kaum relevante Schadstoffkontamination	- Kunststoffe in Haushaltsmenge
GB 2	k.A.	- sehr starke Brandverschmutzung - hohe Mengen an kunststoffhaltigen Materialien, auch chlor- und bromorganische Stoffe - gravierende Schadstoffkontamination durch Brandverlauf	- Kabeltrassen - Lagermaterialien

Gefahrenbereich (GB)	Ausdehnung Größe	Kennzeichen	Brand-Beispiele
GB 3	k.A.	- große Mengen an Biostoffen, Gefahrenstoffe oder gefährstoffhaltige Produkte	- biologische Labors - Roh-/Hilfs-/Betriebsstoffe

Nach Freigabe der Brandstelle, durch die Einsatzkräfte, wird Brandschutt zu Abfall. Dieser kann diverseste Komponenten, Materialien und Bestandteile beinhalten, z. B. un- bzw. teilverbrannte Baustoffe (mineralisch/brennbar) und Mobiliar, sowie Asche (Schmederer, 2015; ZAW, s.a.). Primäres Bestreben der Entfernung des Brandschuttes vom Brandschauplatz liegt darin, das Schadstoffpotenzial zu beseitigen bzw. möglichst zu reduzieren (Schmederer, 2015).

4.2 Brandschutt als Abfall

Brandschutt wird im Abfallverzeichnis des „Elektronischen Datenmanagement-Systems“ (EDM) als „Brandschutt oder Bauschutt mit schädlichen Verunreinigungen“ und den Schlüsselnummern „31441 g“, „31441 19“ bzw. „31441 91 g“ angeführt (BMK, 2016). Die Spezifizierung „91“ kennzeichnet einen verfestigten, immobilisierten und stabilisierten Abfall und die Spezifizierung „19“ steht für „Brandschutt von nicht gewerblichen Objekten, nicht gefährlich bei Ablagerung auf Massenabfalldeponien“ (vgl. § 1 Abs. 3 AbfallverzeichnisVO).

Tabelle 2: Übersicht von Brandschutt im Abfallverzeichnis (in Anlehnung an BMK, 2016)

SN	SP	Abfallgefahrlichkeit	Abfallart: Bezeichnung	Abfallspezifizierung: Beschreibung	SN, falls ausgestuft bzw. ungefährlich	Anmerkung
31441		g	Brandschutt oder Bauschutt mit schädlichen Verunreinigungen		31409	
31441	19		Brandschutt oder Bauschutt mit schädlichen Verunreinigungen	Brandschutt von nicht gewerblichen Objekten, nicht gefährlich bei Ablagerung auf Massenabfalldeponien	31409	Ablagerung von Brandschutt nach Aussortierung der organischen Anteile auf Massenabfalldeponien
31441	91	g	Brandschutt oder Bauschutt mit schädlichen Verunreinigungen	verfestigt oder stabilisiert	31409 91	

4.2.1 Problematik

Weitere Komponenten von Brandschutt können toxische organische Schadstoffe sein, wie PAKs, PCB und PCDD/F, die sich durch Adsorption an Rußpartikel binden oder in Form von Kondensat an kalten Oberflächen ablagern. Diese Schadstoffe sind bioverfügbar, wenn sie durch Inhalation aufgenommen werden und Kondensate können eine ätzende Wirkung aufweisen (*Schmederer, 2015*). Um mögliche Gefahren, durch z. B. PAKs oder Dioxine, besser abschätzen zu können, werden chemische Analysen durchgeführt (*ZAW, s.a.*).

Tabelle 3: Relevante Schadstoffe auf abgekühlten Brandstellen und deren Vorläufersubstanzen (*LfU Bayern, 2011*)

Schadstoff	Vorläufer	Enthalten in / Anmerkungen
Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F)	PVC und andere organochlorhaltige Materialien, insbesondere bei Gegenwart von Kupfer oder anderen Schwermetallen	z. B. Kabelisolierungen, Kunstleder, Fußbodenbeläge, Fensterrahmen
	Chlorparaffine	Flammschutzmittel und Weichmacher für PVC; Kühlschmiermittel in der Metallbearbeitung
	Pentachlorphenol (PCP) und andere Chlorphenole und deren Salze	Holzschutzmittel und Lederimprägnierung vor ca. 1985
	Polychlorierte Biphenyle (PCB)	bis in die 1980er Jahre als Isolierflüssigkeit in Kondensatoren, Transformatoren und Hydraulikflüssigkeiten bis ca. 1980 als Weichmacher bzw. Flammschutzmittel in dauerelastischen Dichtungsmassen, Farben und Beschichtungen
Polybromierte Dibenzodioxine und -furane (PBDD/F)	Bromorganische Stoffe, z. B. polybromierte Diphenylether, Hexabromcyclododecan	Flammschutzmittel für Kunststoffe, vor allem für Leiterplatten und Gehäuseteile von Elektrogeräten (z. B. für Fernseher und Computer), Polstermöbel und Textilien, Dämmmaterialien aus Polystyrol
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	organisches Material, z. B. Holz, Fett, Wolle	Sie entstehen beim Brand und lagern sich überwiegend an Rußteilchen an.
Schadstoff	Vorläufer	Enthalten in / Anmerkungen
Dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB)	technische Mischungen von polychlorierten Biphenylen (PCB)	Isolierflüssigkeit in Starterkondensatoren alter Leuchtstoffröhren bis ca. 1980 als Weichmacher bzw. Flammschutzmittel in dauerelastischen Dichtungsmassen, Farben und Beschichtungen

4.2.1.1 Dioxine

Als Dioxine werden hauptsächlich polychlorierte PCDDs/PCDFs und Furane bezeichnet. In Summe gibt es 210 Kongenere (75 PCDD und 135 PCDF), davon haben 17 eine toxische und bioakkumulierende Wirkung (Behnke, et al., 2018). PCDDs/PCDFs entstehen bei unvollständiger Verbrennung von PVC, wie z. B. Fensterrahmen, Kabel, Kunstleder, Rollläden, usw. (Schmederer, 2015).

Die Eigenschaften sind von der Anzahl der Chloratome abhängig, je mehr Cl-Atome vorhanden sind, desto höher die Dichte, Fettlöslichkeit und Persistenz in der Umwelt. Zugleich nimmt die Flüchtigkeit-, Wasserlöslichkeit- und chemische Reaktionsfreudigkeit ab. Dadurch ist 2,3,7,8-TCDD, auch unter der Bezeichnung „Seveso-Gift“ (siehe Abb. 3) geläufig, akut toxisch (Behnke, et al., 2018).

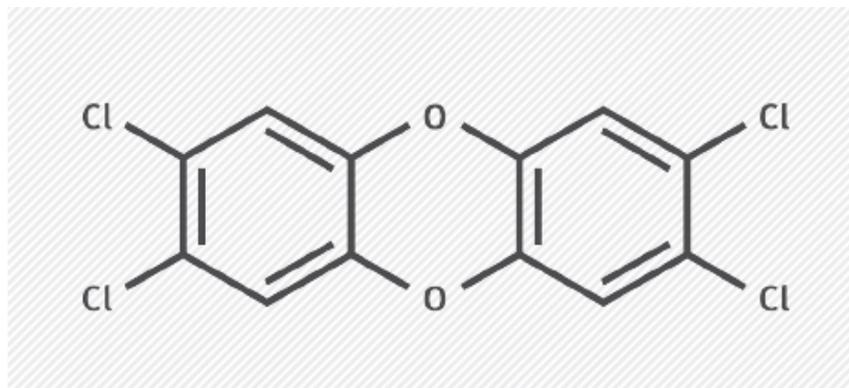


Abbildung 4: Strukturformel von 2,3,7,8-TCDD auch als Seveso-Gift bezeichnet (Behnke, et al., 2018)

Dioxine entstehen ungewollt bei Verbrennungsprozessen (z. B. Abfallverbrennung, Wiederverwertungsprozesse, Hausbrand, etc.) bei einer Temperatur von 300°–400°C im Beisein von Chlor und organischen Kohlenstoff. Des Weiteren wird die Bildung durch verunreinigtes Brennmaterial, wie z. B. Bauschutt oder Asphalt, begünstigt. Bei Temperaturen > 900°C werden Dioxine zerstört (Rauscher-Gabernig & Mihats, 2011).

Die Gefährlichkeit von Dioxinen zeigt sich anhand ihrer negativen Wirkungen auf Lebewesen. Unter anderem können folgende Körperfunktionen bzw. Prozessabläufe beeinflusst werden:

- Proteinsynthese des Stoffwechsels
- Zellwachstum
- Östrogenproduktion
- Hemmung des Immunsystems
- Rezeptor des Schilddrüsenhormons Thyroxin (Rauscher-Gabernig & Mihats, 2011)

Der menschliche Körper toleriert eine Menge von 14 pg WHO-TEQ/kg Körpergewicht an Dioxinen und dl-PCB (Rauscher-Gabernig & Mihats, 2011). Bei Aufnahme sehr hohen Mengen an Dioxin durch z. B. Vergiftung und Unfälle können akute Wirkungen auftreten. Folgen können Chlorakne (Hautschädigungen) und das Auszehrungssyndrom, das Gewichtsverlust, Leberschäden, Stoffwechsellentgleisungen und folglich den Tod hervorruft, sein (Behnke, et al., 2018).

Der Abbau von Dioxinen in der Umwelt erfolgt äußerst langsam, da die Halbwertszeit im Boden, von Dioxinen und PCB, sechs Monate bis mehrere Jahrzehnte beträgt (Behnke, et al., 2018).

Furane

Furan ist eine farblose, klare und leicht entflammbare Flüssigkeit (Brück, 2015), die in Ölen von harzhaltigen Nadelgehölzen zu finden ist, ebenso gasförmig in Zigarettenrauch und es kann künstlich, z. B. für die Harz- und Lackherstellung, hergestellt werden. Die WHO weist diesen Stoff als kanzerogen und mutagen aus (AGES, 2020).

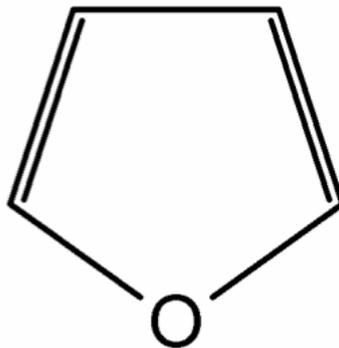


Abbildung 5: Strukturformel von Furan (Brück, 2015)

4.2.1.2 Polychlorierte Biphenyle

PCB ist ein dioxinähnlicher POP, der reproduktions- und immunotoxisch sowie kanzerogen wirken kann. Es sind 209 chlorierte Verbindungen bekannt, deren Unterschiede sich einzig in Menge und Position der Chloratome zeigen (Potrykus, et al., 2020).

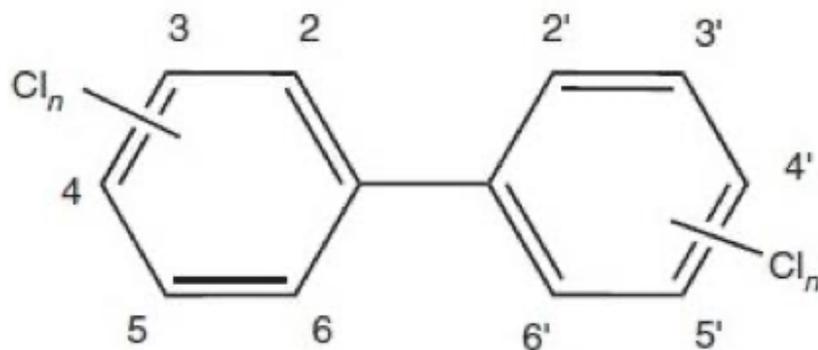


Abbildung 6: Strukturformel von PCB (Potrykus, et al., 2020)

12 PCB gelten, auf Grund der Grundstruktur, als dioxinähnlich und werden als dioxin-like PCB (dl-PCB) bezeichnet. Die toxischste Wirkung wird dem PCB 126 (siehe Abb.9) zugeschrieben (Behnke, et al., 2018).

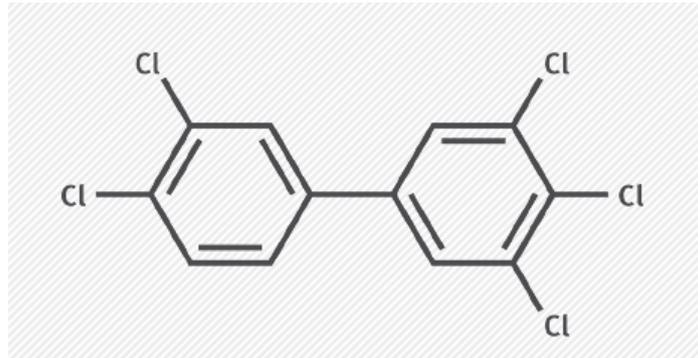


Abbildung 7: Strukturformel von PCB 126 (Behnke, et al., 2018)

Bis Mitte der 1980er-Jahre wurde PCB als technisches Gemisch produziert und fand Anwendung in Transformatoren, elektrischen Kondensatoren, Hydraulikflüssigkeiten und als Weichmacher (z. B. Kunststoffe und Lacke). Es kann auch bei chemischen Prozessen, wie der Synthese von Organochlor-Verbindungen, die im Zuge der Farbpigment-, Pestizid- und Chlorparaffinherstellung erfolgt, zur ungewollten Bildung kommen (Potrykus, et al., 2020).

PCB ist biologisch schwer abbaubar, persistent und in fast allen Bereichen der Umwelt nachzuweisen. Grund dafür sind seine resistenten Eigenschaften. Dazu gehören Stabilität gegen (UV-) Licht, Beständigkeit gegenüber Korrosion und es ist eine kaum flüchtige Substanz (Potrykus, et al., 2020). Des Weiteren ist PCB hitzestabil, schwer entflammbar und ein guter elektrische Isolator. Deshalb fand es bis zum Verbot von PCB durch die POP-VO (2001) Anwendung in Produkten (Rauscher-Gabernig & Mihats, 2011), wie z. B. Dichtungsmassen und Kondensatoren (Schmederer, 2015).

4.2.1.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

PAK sind feste, farblose Verbindungen (AGES, 2020) aus Kohlen- und Wasserstoffatomen, die ringförmig angeordnet sind und es können zwischen zwei bis sieben Ringe vorliegen. Die Anzahl der Kohlenwasserstoff-Ringe definiert die Eigenschaften der PAK, besonders die Fettlöslichkeit. Es gilt, je mehr Kohlenwasserstoff-Ringe vorhanden sind, desto lipophiler und desto besser akkumulieren PAK in Fettgeweben. Des Weiteren gelten sie als kanzerogen, mutagen, fortpflanzungsgefährdend, persistent, bioakkumulativ und toxisch. PAK bestehen aus mehreren Komponenten und liegen immer in Gemischen vor (EGGBl, s.a.).

PAK werden bei unvollständigen Verbrennungsprozessen, mit geringer Temperatur und wenig Sauerstoff, von organischem Material (Holz, Kohle, Erdöl) gebildet. Ebenso im Zuge natürlicher Vorgänge (Waldbrände, Vulkanausbrüche) und anthropogener Aktivitäten (Kleinfeuerungsanlagen, industrielle Prozesse, Tabakrauch, Raffination, etc.). Nebenprodukte aus diesen technischen Prozessen, wie z. B. Schlacken aus Raffination von Kohle oder Teeröle aus der Veredelung von Erdöl, gelangen über deren Verarbeitung, im Straßenbau bzw. als Weichmacher in der Gummiproduktion, in die Umwelt (EGGBl, s.a.).

Um diese Stoffe leichter analysieren zu können, wurden 16 PAK von der US-Umweltbehörde „EPA“ (1977) definiert, die sehr toxisch und leicht aufzuzeigen sind. PAK können auch in Produkten (z. B. Autoreifen) nachgewiesen werden. Hierzu wird bei der Analyse nach, der sogenannte Leitsubstanz, Benzopyren (siehe Abb.11)

gesucht. Ist dieser Stoff vorhanden, wird das Produkt als PAK-haltig und dadurch bedenklich eingestuft (EGGBl, s.a.).

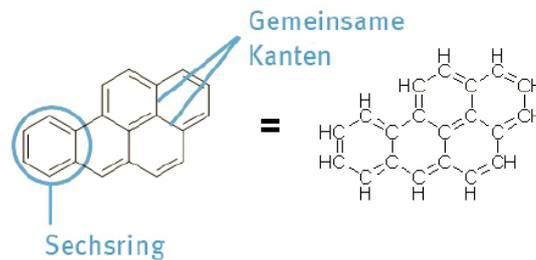


Abbildung 8: Aufbau von PAK anhand der Strukturformel von Benzopyren (Brandt & Einhenkel-Arle, 2016)

Nicht nur minderwertige Erzeugnisse und Lebensmittel (z. B. geräuchert/gegrillte Speisen) können durch PAK belastet sein, ebenso Gewässer (z. B. Eintrag durch Kläranlagen) und die Luft (z. B. Gummiabrieb von Autoreifen). Bei Lebensmitteln gibt es in Summe vier PAK-Indikatoren, neben Benzopyren noch Benzanthracen, Benzofluoranthen und Chrysen (EGGBl, s.a.).

Im Jahr 2004 gelangten 530.000 t von diesen 16 EPA-PAK, durch Verbrennungsprozesse, in die Atmosphäre. Daran waren China mit 114.000 t, Indien mit 90.000 t und die USA mit 32.000 t beteiligt (EGGBl, s.a.).

Der Zielwert von PAK (Benzopyren) in der Luft beträgt 1 ng/m³. 2013 wurde dieser Zielwert in ca. 13 EU-Mitgliedsstaaten überschritten (Brandt & Einhenkel-Arle, 2016). Bislang wurde kein Grenzwert für bereits verbaute PAK-haltige Materialien definiert, jedoch werden Richtwerte zw. 10–30 µg/m³ empfohlen (EGGBl, s.a.).

Seit 1958 wurde die Umwelt mit 1,5 Mio. t Öl bzw. 3.000–105.000 t an umweltschädlich PAK belastet. Alleine das Unglück der BP-Bohrplattform „Deepwater Horizon“ (Golf von Mexiko) setzte 600.000 t Öl bzw. 1.200–45.000 t PAK frei (Brandt & Einhenkel-Arle, 2016).

PAK fanden und finden noch heute in einigen Produkten Anwendung:

- Farben und Beschichtungen (Teerpech)
- Korrosionsschutz
- Holzschutzmittel
- Kohlebriketts, z. B. aus Koks oder Torf → in EU verboten
- Tontauben
- Teerklebstoffe (bis 1950er-Jahre)
- Teer/Bitumen (Bitumen geringer mit PAK belastet als Teer)
- Straßenbeläge, z. B. Asphalt
- Dachbeläge, z. B. Teerpappe (Brandt & Einhenkel-Arle, 2016)

Der Umgang mit PAK wird in der REACH und der POP-VO geregelt (Brandt & Einhenkel-Arle, 2016). In Anhang 1 der BaustoffrecyclingVO werden jene Abfallarten aufgezeigt, die als Recycling-Baustoff geeignet sind. In Anhang 2 werden einzuhaltende Grenzwerte aufgelistet, unter anderem der PAK-Gehalt, der je nach Material zwischen 12 und 20 mg/kg TM beträgt (Recycling-Baustoffverordnung, 2015).

Grenzwerte für Dioxine, polychlorierte Biphenyle und fluorhaltige Tenside sind im Anhang nicht angeführt.

4.2.1.4 Löschmittel

Löschmittel sind Stoffe mit Löschwirkungen/-effekten, die chemisch-physikalische Verbrennungsprozesse unterbrechen bzw. blockieren (Pfeiffer, 2016).

Es gibt verschiedene Arten von Bränden, die in Brandklassen (Tab.4) zusammengefasst werden. Diese Einteilung ist abhängig von den beteiligten brennbaren Stoffen:

Tabelle 4: Übersicht der Brandklassen (eigene Darstellung nach Pfeiffer, 2016)

Brandklasse	Material	Beispiele
A	Feste Stoffe	Holz, Kohle, Papier, Kunststoffe, Textilien
B	Flüssige/flüssig werdende Stoffe	Benzin, Mineralöl, Alkohol
C	Gase	Wasserstoff, Erdgas
D	Metalle	Natrium, Kalium, Calcium
F	Hoch siedende flüssige Stoffe	Speiseöle, -fette

Für die Bekämpfung der unterschiedlichen Brandklassen, stehen eine Vielzahl von unterschiedlichen Löschmitteln zur Verfügung. Hauptsächlich werden Wasser, Luftschaum, Löschpulver und Löschgase als Löschmittel angewendet. Eine Übersicht bietet Tab.5:

Tabelle 5: Eignung von Löschmittel für entsprechende Brandklassen (Pfeiffer, 2016)

Löschmittel	A	B	C	D	F
Wasser (+ Zusätze)	+	(+)	-	-	-
Schaum	+	+	-	-	-
Fettbrandlöschmittel	+	(+)	-	-	+
BC Pulver	-	+	+	-	-
ABC Pulver	+	+	+	-	-
Metallbrandpulver	-	-	-	+	-
Kohlendioxid	-	+	+	-	-
Chem. Löschgase	+	+	+	+	+
Inertgase	+	+	+	+	+

In Bezug auf mögliche Problematiken, die von Brandschutt ausgehen können und in Zusammenhang mit Löschmitteln gebracht werden, sind heutzutage Löschschaumen zuzuordnen.

Löschschaum

Löschschaume können in fluorhaltig und fluorfrei eingeteilt werden. Beide Schaumarten haben negative Umweltauswirkungen, jedoch sind fluorfreie

Löschsäume, aufgrund ihrer guten biologischen Abbaubarkeit, fluorhaltigen immer vorzuziehen (Ulrich, et al., 2019).

Fluorhaltige Löschschaummittel

Fluorhaltige Löschschaummittel enthalten PFC, dabei handelt es sich um Kohlenwasserstoffe, wobei Fluoratome die H-Atome teilweise oder zur Gänze ersetzen. C-F-Bindungen sind die stabilsten in der organischen Chemie und dadurch sehr umweltsensibel und akkumulierend. PFC kann in Gewässern, Atmosphäre, Tieren und Mensch nachgewiesen werden. Sie binden nicht im Fettgewebe, sondern in Blutproteinen, Leber, Niere oder Gallenblase (Ulrich, et al., 2019). Die Reinigung von, mit PFC, kontaminierten Grundwasser und Boden ist aufwendig und kostspielig. Es soll versucht werden, PFC-haltige Schäume zu vermeiden und Alternativen einzusetzen. Besonders wichtig ist das Auffangen und die ordnungsgemäße Entsorgung von Löschmitteln (Umweltbundesamt, 2014).

Einige fluorhaltige Tensidverbindungen, wie PFAS und PFOS, die heutzutage durch PFC ersetzt werden, haben das Potential kanzerogen zu sein. Jedoch stehen auch PFC unter Verdacht persistent, bioakkumulativ und toxisch zu wirken. Dadurch wurden sie in die EU-Chemikalienverordnung REACH (Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2006) aufgenommen und sind somit zulassungs- und beschränkungspflichtig (Ulrich, et al., 2019). PFOS dürfen in Löschmitteln eine Konzentration von < 10 mg/kg nicht überschreiten und die Grenzwerte für PFOA (PFAS-Verbindung) betragen 25 ppb bzw. 1.000 ppb für PFOA-ähnliche Verbindungen (Umweltbundesamt, 2014). PFOS fanden Anwendung in Löschsäumen und Skiwachsen (BMLFUW, 2012).

Der Einsatz von PFC-haltigen Schäumen kann von leichten bis zu gravierenden Umweltschäden führen. Eine eindeutige, durch Studien unterstützte, Gefahreinschätzung für PFC ist aktuell noch nicht möglich (Ulrich, et al., 2019).

Fluorfreie Löschschaummittel

Diese Löschsäume enthalten Tenside, somit ist eine akute Toxizität für das aquatische Ökosystem gegeben, zugleich ist er aber auch biologisch gut abbaubar. Bei Anwendung weiterer Zusätze, können ebenfalls andere Bereiche der Umwelt in Mitleidenschaft gezogen werden (Ulrich, et al., 2019).

Löschschaum kann bereits fertig vorliegen oder durch Zugabe eines Schaumzusatzes zum Löschwasser erzeugt werden. Schaum weist im Gegensatz zu Wasser eine bessere Löschwirkung auf. Es gibt diverse Arten von Löschschaummittel:

- Protein-/Schwerschaummittel (Proteine, Stabilisatoren und Konservierungsmittel)
- Wasserfilmbildende Schaummittel (synthetische Fluorcarbon-Netzmittel, hydrolysierte Proteine, perfluorierte Kohlenwasserstoffe)
- Fluor-Proteinschaummittel (Proteinschaummittel, Fluortenside)
- Filmbildende Fluor-Proteinschaummittel
- Mehrbereichsschaummittel/Synthetisches Schaummittel (Fettalkohole)
- Class-A-Foam-Schaummittel (Spezialschaummittel): gänzlich umweltverträglich (Pfeiffer, 2016)

Die Anwendung von Löschschaum ist für Lebewesen abhängig vom gewählten Schaummittel weitgehend ungefährlich und Brandmaterial wird kaum aus der Brandstelle ausgeschwemmt (*Pfeiffer, 2016*).

Entsprechende Alternativen für Löschschäume (siehe Tab.5) und weitere Löschmittel werden nachfolgend beschrieben.

Wasser/wässrige Löschmittel

Grundsätzlich wird Wasser als Löschmittel eingesetzt, ist die Löschwirkung von reinem Wasser unzureichend kommen Löschwasserzusätze zum Einsatz, wie z. B.:

- Frostschutzmittel
- Konservierungsmittel
- Korrosionshemmende Zusätze
- Löschwirksame Zusätze
- Gelbildner: bilden eine gelartige Schicht auf dem Brandmaterial
- Netzmittel: Verringern die Oberflächenspannung des Wassers (geringere H₂O-Verbrauch und bessere Benetzungsfähigkeit)
- Retardant (*Pfeiffer, 2016*)

Wässrige Löschmittel sind ungiftig und ungefährlich (*Pfeiffer, 2016*).

Löschpulver

Löschpulver besteht aus Natrium-, Kaliumcarbonat und weiteren Zusätzen, die Anwendung ist weitestgehend umweltfreundlich. Arten von Löschpulver sind:

- BC-Brandpulver
- ABC-Brandpulver (Ammoniumhydrogenphosphat, Ammoniumsulfat)
- Metallbrandpulver (Natrium-, Kaliumchlorid): Entstehung toxischer Gase und Stäube möglich (*Pfeiffer, 2016*)

Chemische Löschgase/Halone

Löschgase sind eine Kombination aus Methan oder Ethan in Verbindung mit Fluor, Brom, Chlor und Iod (*Pfeiffer, 2016*).

Halon bezeichnet halogenierte Kohlenwasserstoffe, dies wiederum sind Kohlenwasserstoffe bei denen H-Atome durch Halogenatome ersetzt wurden. Einem Großteil der Halone konnte 1970 eine zerstörende Wirkung der Ozonschicht nachgewiesen werden und 1991 wurden viele verboten. Unter anderem hatten diese Halone korrosive, toxische und klimaschädigende Eigenschaften. Ersetzt wurden diese schädlichen Stoffe durch Inertgase und andere Innovationen, unter anderem Inergen, das aus 40 % Argon, 52 % Stickstoff und 8 % CO₂ besteht. Diese Alternativen unterliegen Halon in Effektivität und Kostenaufwand. Sie sind für Menschen größtenteils ungiftig und unbedenklich. Alte Halone sind ozonschichtschädigend und leisten einen Beitrag zum Treibhauseffekt, im Gegensatz zu modernen Halonen, welche keine negativen Auswirkungen auf die Ozonschicht haben (*Pfeiffer, 2016*).

Inertgas Kohlenstoffdioxid

Hier erfolgt die Löschwirkung durch die erstickende Eigenschaft von CO₂. Es bildet keine Rückstände auf dem Brandmaterial, wirkt jedoch als Atemgift (*Pfeiffer, 2016*).

Sonstige Lösch- und Behelfsmittel

- Sand
- Graugussspäne
- Schweröl
- Kochsalz
- Inertgase (Stickstoff, Argon)
- Wasserdampf
- Mizellen-Einkapselungs-Verfahren
- Fettbrandlöschmittel (*Pfeiffer, 2016*)

Die angeführten Lösch-/Behelfsmittel haben keine gefahrenrelevanten Auswirkungen auf Brandgut, ausgenommen Schweröl, dieses wird heutzutage ausschließlich für Kühlvorgänge in Industrieprozessen eingesetzt (*Pfeiffer, 2016*).

4.2.2 Mengen

Im österreichischen Bundesabfallwirtschaftsplan von 2017 (*BNT, 2017*) werden nur Mengen von Bauschutt, aus dem Jahre 2015, mit der SN „31409“ (...) bzw. „31409 18“ (...) angegeben. Für die SN „31409“ wird ein Aufkommen von 2,307 Mio. t angeführt, die ebenso einer Verwertung zugeführt wurden. Der SN „31409 18“ werden 0,320 Mio. t zugeschrieben, davon wurden 0,219 Mio. t verwertet. In Summe sind 2015 ca. 2,6 Mio. t an Bauschutt angefallen und rund 2,5 Mio. t wurden verwertet (*BNT, 2017*).

2018 ist eine Menge von etwa 0,013 Mio. t, für die SN „31441“ „Brandschutt oder Bauschutt mit schädlichen Verunreinigungen“, angegeben, dies entspricht etwa 1 % des Gesamtvolumens an gefährlichen Abfällen (*BMK, 2020*).

4.2.3 Vermeidung und Behandlung

Prinzipiell muss Brandschutt einer Entsorgung zugeführt werden. Stammt dieser aus dem gewerblichen Bereich, kann Brandschutt in genehmigten Einzelfällen auch einer stofflichen Verwertung (z. B. Dachziegel) zugeführt werden. Aktuell ist jedoch keine Verwertungsmethode bekannt, die ein unbeschadetes Rezyklat zur Folge hätte (*ZAW, s.a.*). Ebenso kann Brandholz in Ausnahmefällen thermisch/energetisch verwertet werden. Um die zu entsorgende Menge an Brandschutt zu reduzieren, stehen Vermeidung, Wiederverwendung, thermische und fallweise stoffliche Verwertung im Vordergrund (*Schmederer, 2015*).

4.2.3.1 Vermeidung und Wiederverwendung

Brandvorsorge kann Brandereignissen minimieren. Kommt es dennoch zu einem Brand, wird versucht wiederverwendbare Elemente aus dem Brandschutt zu „retten“. Im Zuge des selektiven Rückbaues, steht der Erhalt des Bauwerks im Vordergrund. Es soll versucht werden, einen möglichst großen Anteil des Gebäudes, z. B. Wände und Fenster, für den Neu-/Wiederaufbau zu erhalten. (*Schmederer, 2015*).

4.2.3.2 Verwertung und Beseitigung

Brandrückstände, die hauptsächlich aus organischen Materialien bestehen, können einer herkömmlichen Abfallverbrennung zugeführt werden. Metalle sowie andere wertvolle und verwertbare Materialien können, für den möglichen Verkauf bzw. die stoffliche Verwertung, aufbereitet werden. Hingegen Brandschutt, der von qualifizierten Personen (z. B. Sachverständigen) oder durch Laboranalysen, aufgrund von Grenzwertüberschreitungen, als gefährlicher Abfall eingestuft wurde, ist einer

Einzelfallprüfung zu unterziehen. Anschließend ist dieser entsprechend thermisch zu verwerten bzw. zu beseitigen (Schmederer, 2015), in Österreich auf Massenabfalldeponien (vgl. § 1 Abs. 3 AbfallverzeichnisVO).

Tabelle 6: Entsorgungswege von Brandabfällen (LfU Bayern, 2011)

Brandabfälle	Entsorgungsweg
Mineralischer Bauschutt <ul style="list-style-type: none"> Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen, Keramik mit Aschen Asbesthaltige Baustoffe, Glaswolle (je-weils gefährlich), i.d.R. nicht bei GB 0/1 	Deponierung nach Deponieverordnung in Absprache mit der kommunalen Abfallberatung.
Angebrannte oder verkockte Kunststoff- oder Holzprodukte, teilverbrannte Reste und Verbrennungsrückstände: <ul style="list-style-type: none"> Bodenbeläge Wand- oder Deckenverkleidung Möbel Haushaltsgegenstände Teilverbrannte Reste und Verbrennungsrückstände/Asche 	Entsorgung über eine kommunale Müllverbrennungsanlage. Anlieferung in Absprache mit der kommunalen Abfallberatung. Staubende Abfälle müssen verpackt sein.
Lebensmittel	Entsorgung über die kommunale Müllabfuhr.
Elektrische und elektronische Geräte: <ul style="list-style-type: none"> Haushaltsgroß- und -kleingeräte Informations- und Telekommunikationsgeräte Geräte der Unterhaltungselektronik Gasentladungslampen 	Sortierung in noch als E-Schrott verwertbare und in zu beseitigende Geräte. Verwertung in Behandlungsanlagen für Elektro- und Elektronik-Altgeräte oder, falls keine Verwertung mehr möglich ist, thermische Behandlung in der kommunalen Müllverbrennungsanlage. Spezifische Verwertungsverfahren für bestimmte Gerätekategorien beachten (z. B. FCKW-haltige Kühlgeräte, Gasentladungslampen)
Feste Rückstände aus Reinigungsmaßnahmen: <ul style="list-style-type: none"> Schutzkleidung Staubsaugerbeutel und Inhalt aus gekapselten Staubsaugern Einweg-Wischtücher 	Entsorgung über die kommunale Müllverbrennungsanlage. Staubende Abfälle müssen verpackt sein.
Flüssige Rückstände aus Reinigungsmaßnahmen, nach Vorreinigung mit feuchten Wischtüchern: <ul style="list-style-type: none"> Verwendete Reinigungsflüssigkeiten z. B. Spülmittellösung 	Reinigungswässer aus den Gefahrenbereichen 0 und 1 können mit dem Sanitärabwasser über die öffentliche Kanalisation entsorgt werden, insbesondere wenn mit feuchten Einweg-Wischtüchern eine Vorreinigung erfolgte.

5 Fallbeispiel: Extrudiertes Polystyrol

Exkurs: Polystyrol

Umgangssprachlich wird Styrol-Homopolymer (Normal-Styrol) als Polystyrol bezeichnet und bildet gleichzeitig einen von vielen Handelsnamen (*Schade, 2012*).

Die ersten Aufzeichnungen über Polystyrol, aus dem Jahre 1839, stammen von E. Simon, einem Berliner Apotheker. Erstmals wurde Polystyrol 1911 von F. E. Matthews als Werkstoff erwähnt und die „I. G. Farbenindustrie AG“ schaffte 1930, im Werk Ludwigshafen, ein Herstellungsverfahren, dessen Prinzip bis heute gültig ist. Gleichzeitig wurde auch ein Spritzgussverfahren, in Kooperation mit der „Dynamit Nobel AG“, entwickelt, damit wurde Polystyrol marktreif. 1930 lag die Weltproduktionsmenge pro Monat bei ca. 6 t Polystyrol, 1936 bereits bei 600 t und 1939 bei 6.000 t/a.

Ursprünglich war PS immer spröde und glasklar, bis 1934 versucht wurde Polystyrolschaum zu erzeugen, dessen Herstellungsprozess jedoch erst 1950 erfolgsversprechend war. Die Weiterentwicklung von Polystyrol stagnierte mit Beginn des 2. Weltkrieges, da Styrol zur Herstellung von Synthesekautschuk benötigt wurde. Die Wiederaufnahme der Entwicklung von Polystyrol wurden durch die enormen Styrol-Kapazitäten, die alleine 1945 in den USA bei 270.000 t/a lagen, beeinflusst. Gleichzeitig fand eine „Ressourcenwende“ statt, Kohle wurde durch Erdöl als Ressourcenfundament ersetzt, somit konnte Styrol und dadurch auch Polystyrol billiger produziert werden. Folglich wurde 1970 eine Produktionsmenge von über 2,1 Mio. Tonnen und 1980 mehr als sechs Mio. Tonnen erreicht (*Echte, et al., 1981*).

Polystyrol oder auch Styrol-Homopolymer wird mittels der Ausgangsstoffe Benzol bzw. Ethylen durch Polymerisation hergestellt. Die Eigenschaften sind abhängig von Ver- und Bearbeitungsprozessen. Aufgrund der hohen Steifigkeit und Härte ist PS relativ spröde und zerbrechlich. Die Farbgebung ist transparent, die Oberfläche glänzend und die chemische Beständigkeit ist, gegenüber einiger organischen Produkte, eingeschränkt. Die Wasseraufnahmefähigkeit ist niedrig, jedoch sind die elektrischen sowie dielektrischen Eigenschaften sehr gut. Eine sehr negative Charakteristik von PS ist die leichte Entflammbarkeit, die rußende Flamme ist hell und es verbreitet sich ein süßlicher Geruch. Die erwähnten Eigenschaften können durch Beimengung von diversen Zusatzstoffen adaptiert werden, somit ist PS vielseitig einsetzbar. Es wird im Haushalt (z. B. Blumentöpfe, Kleiderbügel), Sanitärbereich (z. B. WC-Spülkästen, Duschkabinenwände), in der Spielzeugherstellung, in der Elektro-, Elektronik und Fotoindustrie (z. B. Fernschränke/-gehäuse, Fotozubehör) und der Verpackungsindustrie (z. B. Verpackung für Molkereiprodukte, geschäumte Trays für Fleischverpackungen) verwendet (*Schade, 2012*).

Exkurs: EPS

EPS wird bereits seit Mitte der 1950er-Jahre hergestellt, zählt zu den thermoplastischen Kunststoffen und wird auch als „Styropor“ bezeichnet. Es besteht aus:

- PS-Granulat
- Treibmittel (Pentan) und
- Additiven für Flammenschutz
 - aktuell: HBCD
 - zukünftig: Polymer-FR (*Sprengard, et al., 2013*)

Das PS-Granulat wird mit Treibmittel versetzt und expandiert. Hierbei wird das Granulat mit Wasserdampf, bei einer Temperatur von $> 90^{\circ}\text{C}$, behandelt. Dadurch bläht das Granulat auf das 20–50-fache Volumen auf. Es wird abgekühlt und erneut einer Heißdampfbehandlung, bei $110\text{--}120^{\circ}\text{C}$, unterzogen. Homogenes Material entsteht, welches zu Platten, Blöcken oder Formteilen verarbeitet wird (*Nierobis, 2003; Sprengard, et al., 2013*).

„Graues EPS“ entsteht, wenn EPS Graphit beigemischt wird. Eine gräuliche Verfärbung und eine geringere Wärmeleitfähigkeit (ca. 20 %) sind die Folge (*Sprengard, et al., 2013*).

EPS findet Anwendung als Trittschalldämmung (*Sprengard, et al., 2013*), Dämmmaterial für Dach (Flachdach), Wand und Decke sowie als Perimeterdämmung für den Kellerbereich (*Nierobis, 2003*).

Tabelle 7: Unterschiede EPS und XPS (Eigene Darstellung nach *Nierobis, 2003*)

	EPS	XPS
Wärmeleitfähigkeit	0,035–0,04 W(mK)	0,035–0,045 W(mK)
Wärmespeicherkapazität [c]	1.500 J/(kgK)	1.500 J/(kgK)
Wasserdampfdiffusionswiderstand [μ]	20–100	80–200
Baustoffklasse	B1 - schwerentflammbar	B1 - schwerentflammbar
Temperaturbeständigkeit	70–85°C (langfristig) 100°C (kurzzeitig)	75°C (langfristig)
Rohdichte [ρ]	10–35 kg/m ³	25–45 kg/m ³
Druckfestigkeit: Druckspannung (Stauchung 10 %) Dauerdruckbelastung (Stauchung < 2 %)	0,07–0,26 N/mm ² 0,012–0,062 N/mm ²	0,15–0,7 N/mm ² 0,06–0,25 N/mm ²
Ausdehnungskoeffizient [1/K]	5–7*10 ⁻⁵	6–8*10 ⁻⁵

	EPS	XPS
Primärenergiegehalt	200–760 kWh/m ³	450–1.000 kWh/m ³
Positive Umweltaspekte	<ul style="list-style-type: none"> - Pentan biologisch neutral; gelangt nicht in Stratosphäre - Für Lebensmittelverpackung zugelassen - teilweise recyclebar 	<ul style="list-style-type: none"> - Downrecycling möglich (energetische Verwertung)
Negative Umweltaspekte	<ul style="list-style-type: none"> - Downrecycling bedingt möglich - Im Brandfall Gefahrstoffe freigesetzt - Ausgangsstoffe toxisch - Erschöpfbare Ressourcen für Herstellung Herstellung emittiert Pentan → geringer Beitrag zu Sommersmog 	<ul style="list-style-type: none"> - Im Brandfall Gefahrstoffe freigesetzt - Ausgangsstoffe toxisch - Erschöpfbare Ressourcen für Herstellung - Verwendung von HFCKW (Importe)

5.1 Materialbeschreibung

Ausgangsmaterial für Polystyrol und sein Treibmittel (Co-Treibmittel) bilden fossile Ressourcen, wie Erdöl bzw.-gas (*Institut Bauen und Umwelt e.V., 2010*). Die Entwicklung von extrudiertem Polystyrol findet seit 1941 statt, vermarktet wird es seit 1948 und setzt sich aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

- 90 % Polystyrol
- 5–8 % Treibmittel (davon 60–80 % CO₂ und 20–40 % Co-Treibmittel)
- 0,5–3 % HBCD und
- < 1 % Additive (*Daxbeck & Buschmann, 2012*)

Bei der Herstellung wird granuliertes Polystyrol mit Hilfsstoffen (z. B. Farbstoffe, Verarbeitungshilfsstoffe, Flammschutzmittel) in einem Extruder aufgeschmolzen, die Schmelze mit Treibmittel versetzt und durch eine Düse gepresst. Das Material schäumt durch diesen Prozess auf, kühlt ab, härtet aus (*Institut Bauen und Umwelt e.V., 2010*) und kann danach zugeschnitten werden (*Eibensteiner, 2016*).

Vor dem FCKW-Verbot wurden XPS-Platten mit eben diesem geschäumt. Hauptsächlich waren diese Platten im Zeitraum von 1960–1990 in Verwendung. Somit enthalten alle XPS-Platten, die vor 1990 erzeugt und verbaut wurden, mit hoher Wahrscheinlichkeit FCKWs (*Daxbeck & Buschmann, 2012*). Der Anteil an FCKWs konnte damals bis zu 11 % ausmachen (*Eibensteiner, 2016*).

Mit Beginn der 1990er-Jahre wurden die FCKWs von HFCKWs abgelöst, die wiederum Mitte der 90er durch HFCKWs und CO₂, als Treibmittel, ersetzt wurden. Seit dem Jahr

2000 werden FCKW/HFKW-freie XPS-Platten angeboten, die jedoch noch immer das Flammschutzmittel HBCD aufweisen (*Daxbeck & Buschmann, 2012*). XPS-Platten, die vor 2004 in Österreich produziert bzw. bis 2009 importiert wurden, werden als gefährliche Abfälle eingestuft (*ÖXPS, 2019*).

Ab 2004 wurde in Österreich ausschließlich CO₂ (5–6 %) in Verbindung mit Isobutan (5–10 % des CO₂-Gehalts) als Treibmittel verwendet (*Eibensteiner, 2016*). Das eingeblasene CO₂ diffundiert aus dem Material und Umgebungsluft nimmt dessen „Platz“ ein. Dieser Vorgang kann den Materialverbrauch, bezüglich der Plattenstärke, bei gleichbleibendem Wärmeschutz, um etwa 15 % reduzieren. Zusätzlich werden zukünftig Additive eingesetzt, welche die Wärmestrahlungsfähigkeit verringern (*Bunge & Merkel, 2011*).

Tabelle 8: Abschätzung von eingesetzten Treibmitteln in XPS und deren Halbwertszeiten, im Zeitraum bis 2010 (in Anlehnung an *Obernosterer, et al., 2007*)

Periode	Marktanteile der Treibmittel	Treibmit- telgehalt im Schaum	Halbwerts- zeit
bis 1990	100% FCKW-12	9 M%	45
1991-1992	30% FCKW-12	9 M%	55
	35% HFCKW-142b	11 M%	50
	35% HFCKW-22	11 M%	20
1993-1994	50% HFCKW-142b	11 M%	50
	50% HFCKW-22	11 M%	20
1995-1999	35% HFCKW-142b	11 M%	70
	35% HFCKW-22	11 M%	25
	15% CO ₂	9 M%	n.r.
	15% HFKW-134a	6-7 M%	60
2000-2005	30% CO ₂	9 M%	n.r.
	10% HFKW-134a	6-7 M%	85
	60% HFKW-152a	6-7 M%	25
2005-2008	70% CO ₂	9 M%	n.r.
	10% HFKW-134a	6-7 M%	85
	20% HFKW-152a	6-7 M%	25
2008-2010	80% CO ₂	9 M%	n.r.
	10% Alternativen	n.r.	n.r.
	10% HFKW-152a	6-7 M%	25

Zwischen 2004–2016 erzeugte bzw. importierte XPS-Dämmplatten gelten als nicht gefährlich, da diese FCKWs/HFKWs/HFCKWs frei sind. Doch aufgrund der POP-VO und des Vernichtungsgebots von HBCD-haltigen Materialien, müssen diese thermisch/energetisch verwertet werden. Die ab dem 1. Jänner 2016 erzeugten XPS-Platten, können zur Gänze stofflich verwertet bzw. wiederverwendet werden, da oben genannte Stoffe nicht mehr eingesetzt werden dürfen.

In Österreich erzeugte XPS-Platten werden vom Hersteller codiert und sind dadurch rückzuverfolgen (*ÖXPS, 2019*).

XPS ist chemisch neutral und wasserunlöslich (*Institut Bauen und Umwelt e.V., 2010*). Zusätzlich ist es feuchtigkeitsunempfindlich, weist eine hohe mechanische Festigkeit und eine geringe Wärmeleitfähigkeit, von 0,034–0,04 W/(mK), auf. Der U-Wert von

XPS-Platten beträgt 0,25–0,35 W/(m²K), je nach Stärke des Materials (*Bunge & Merkel, 2011*)

Anwendung findet XPS als Wärme- und Perimeterdämmung für Dach, Decke (innen/außen) und Wand (innen/außen). Es dient zur Rohrisolierung für technische Anlagen und als Kernmaterial für Sandwichelemente. Früher wurde es Blumenerde und Estrich als Auflockerungsmaterial beigemischt oder als Schüttmaterial eingesetzt (*Daxbeck & Buschmann, 2012; Institut Bauen und Umwelt e.V., 2010; Eibensteiner, 2016*).

5.2 XPS-Abfälle

Extrudiertes Polystyrol wird im Abfallverzeichnis des „Elektronischen Datenmanagement-Systems“ (EDM) auch als Polystyrolschaum bezeichnet und unter den Schlüsselnummern „57108“ bzw. „57108 77 g“ angeführt. Die Schlüsselnummer dient der Zuordnung und Identifikation von Abfällen (*BMK, 2016*). Der Zusatz „g“ sowie die Spezifizierung „77“ kennzeichnen einen gefährlich kontaminierten Abfall (*vgl. § 1 Abs. 3 AbfallverzeichnisVO*).

5.2.1 Problematik

Im Brandfall fördert enthaltenes HBCD die Bildung von giftigen Substanzen, wie z. B. Dioxine und Furane. FCKWs/HFKWs diffundieren aus dem Material und bilden persistente Stoffe, die treibhauswirksam bzw. ozonschichtabbauend wirken (*Daxbeck & Buschmann, 2012*). Zusätzlich zu HBCD kann auch Dicumylperoxid enthalten sein, welches die Flammenschutzwirkung des HBCDs unterstützen soll, indem es das Dämmmaterial, im Brandfall, rascher verflüssigt. Beide Zusatzstoffe müssen im Zuge der Verwertung/Beseitigung abgetrennt werden (*Eibensteiner, 2016*) und können im Ausmaß von 1–3 Gew. % vorliegen. DCP wird in Zukunft weiterhin beigemischt werden (*Leisewitz & Schwarz, 2000*).

5.2.1.1 Hexabromcyclododekan

HBCD/HBCDD war eines der wesentlichsten Flammenschutzmittel für Polystyrol-Dämmstoffe. 2013, im Zuge der Stockholmer-Konvention, wurde HBCD als persistent und toxisch, für Gesundheit sowie Umwelt, deklariert. Somit wurde ein generelles Handels- und Verwendungsverbot festgelegt, einzig für EPS besteht eine Ausnahme. Zugleich ist die Herstellung von Produkten, mit einem HBCD-Gehalt von > 100 mg/kg, innerhalb der EU untersagt (*Wurbs, et al., 2017*). Bis 2014 enthielten XPS-Dämmplatten rund 2 % HBCD (*Eibensteiner, 2016*). Es kann als Vorbote für Dioxine und Furane fungieren, die in weiterer Folge entstehen können (*Leisewitz & Schwarz, 2000*).

HBCD unterbindet oder verlangsamt das Entzünden von Kunststoffen, bzw. dämmt die Ausbreitung der Flammen ein. Diese wichtige Eigenschaft resultiert aus der ringförmigen Struktur des bromierten Kohlenwasserstoffmoleküls (*Wurbs, et al., 2017*).

Abfälle die HBCD enthalten müssen verwertet oder beseitigt werden, wenn der Grenzwert von 1000 mg/kg überschritten wird. Dabei ist darauf zu achten, dass persistente organische Schadstoffe zerstört oder dauerhaft unschädlich gemacht werden (*Wurbs, et al., 2017*). Dieser Grenzwert ist ein Richtwert, denn die EU-Mitgliedsstaaten sind berechtigt eigene Grenzwerte zu definieren. In Österreich liegt

bislang keine Einstufung als „gefährlicher Abfall“, für Abfälle mit einem HBCD-Gehalt von > 3 %, vor (Eibensteiner, 2016).

Die POP-VO definiert den HBCD-Grenzwert für gefährliche Abfälle mit 3 %. XPS weist einen HBCD-Gehalt von ca. 1,5 % auf, kann somit als ungefährlicher Abfall betrachtet werden und zusammen mit Siedlungsabfällen thermisch/energetisch verwertet werden (Wurbs, et al., 2017). Es besteht ein Vermischungs- und Verdünnungsverbot von gefährlichen mit ungefährlichen Abfällen, um so geltende Grenzwerte zu unterschreiten (Eibensteiner, 2016).

Alternativ zur Verbrennung werden Methoden getestet, die HBCD aus Polystyrolabfällen selektiv abtrennen sollen. Hersteller und Händler müssen über die Verwendung von HBCD in ihren Produkten informieren. Liegt jedoch keine Information vor, z. B. von rückgebautem Dämmmaterial, so ist eine chemische Analyse durchzuführen. HBCD werden weitestgehend durch andere Flammschutzmittel ersetzt (Wurbs, et al., 2017).

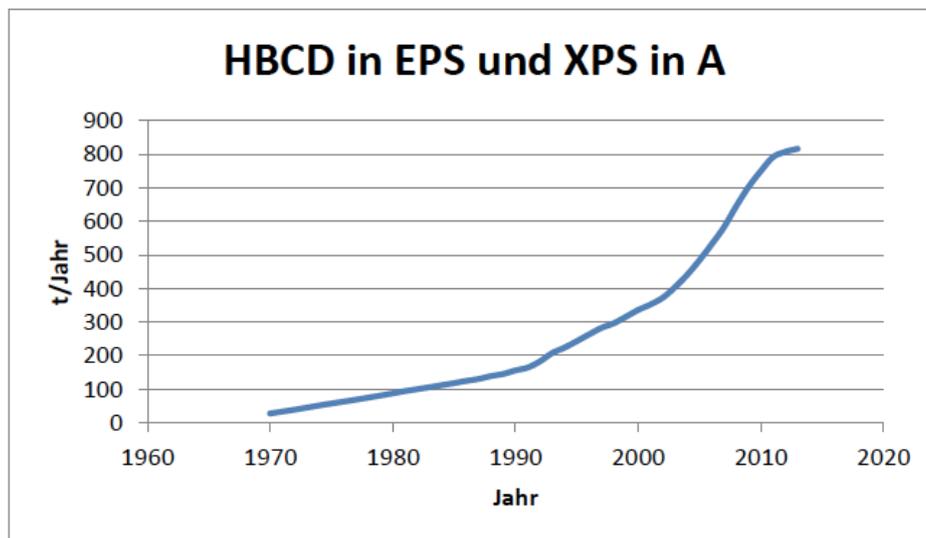


Abbildung 9: Einsatz von HBCD in EPS und XPS (Eibensteiner, 2016)

In Abb. 1 ist die in Dämmmaterialien eingesetzte HBCD-Menge für Österreich, bis zum Jahr 2013, ersichtlich. Klar zu erkennen ist das Abflachen der Kurve ab 2011, da HBCDD der Liste der POP hinzugefügt wurde (BMLFUW, 2012).

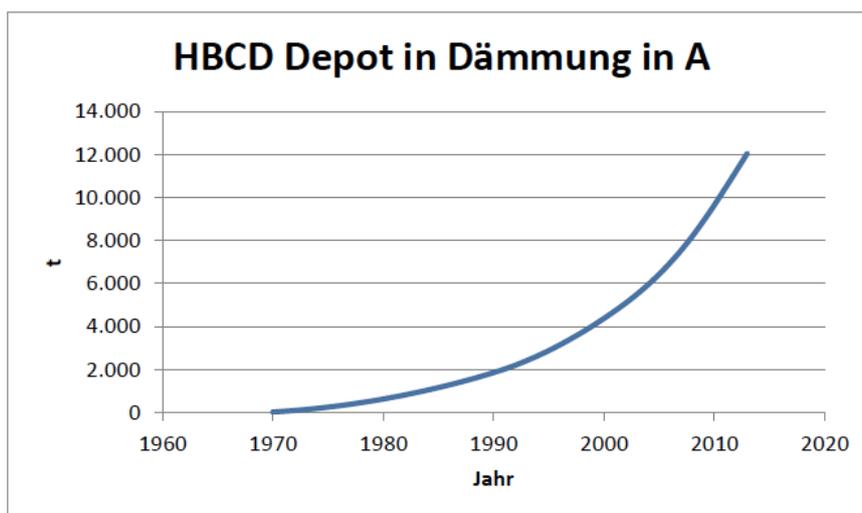


Abbildung 10: Das HBCD-Depot in Dämmungen in Österreich (Eibensteiner, 2016)

Abb. 2 zeigt, dass im Zeitraum von 1970–2013 in Österreich, rund 12.000 t HBCD in Form von XPS/EPS-Dämmmaterial, exklusive der Rücklaufmengen aus Abriss und Sanierung, akkumuliert wurde. Für Europa liegt das HBCD-Depot alleine im Jahr 2006 bei ca. 12.000 t und 2013 bereits bei rund 600.000–650.000 t (Eibensteiner, 2016).

Seit 22. Juni 2016 ist das Inverkehrbringen von neuem XPS, das HBCD enthält, durch die POP-VO untersagt (Wurbs, et al., 2017).

5.2.1.2 Dicumylperoxid

DCP gehört zu der Gruppe der organischen Peroxide und ist ein schlecht wasserlösliches weißlich-gelbes Pulver. Es ist jedoch in anderen Flüssigkeiten, wie z. B. Alkoholen, Estern, gut löslich. Im Verkauf wird DCP, unter den Handelsnamen Peroxan, Perkadox, Luperox, DI-CUP sowie Varox, in Form von Pellets, Pulver und Granulat angeboten (BG RCI & BGHM, 2020).

Anwendung findet DCP bei der Kunststoffherstellung und -anpassung, als Initiator und Vernetzer bei der Gummierzeugung sowie in Polyesterharzen. Wiederum kann es Gummi, Polystyrol und Polyvinylchlorid beeinträchtigen (BG RCI & BGHM, 2020).

Durch Zugabe von DCP, kann die Menge an Bromverbindungen in XPS, bei gleichbleibender flammhemmender Wirkung, auf ein Zehntel reduziert werden. Im Brandfall bewirkt es eine unmittelbare Auflösung der XPS- bzw. Kunststoff-Polymere, führt somit zur Verflüssigung des Materials und erhöht den Flammschutz (Leisewitz & Schwarz, 2000).

Bei einer Temperatur von 60–70°C setzt langsam ein Zersetzungsprozess des Pulvers ein, der bei Temperaturen über 80°C gefährlich schnell ablaufen kann. Der Schmelzpunkt von DCP liegt bei 39°C und Explosionsgefahr besteht bei einer Menge von 30g/m³(untere Explosionsgrenze von DCP > 95 %). Explosionsgefahr besteht ebenso, wenn DCP mit Aminen, Schwermetallsalzen, Staub, Asche, Rost und Schmutz zersetzt wird. In Kombination mit starken Säuren/starken Laugen reagiert DCP stark exotherm (BG RCI & BGHM, 2020).

Die Grenzwerte für staubförmige Emissionen von DCP liegen bei einem Massenstrom von 0,2 kg/h oder bei einer Massenkonzentration von 20 mg/m³. Ein geringeren oder

entsprechendem Massenstrom von 0,2 kg/h, darf die Massenkonzentration, im Abgas, max. 150 mg/m³ betragen (BG RCI & BGHM, 2020).

DCP kann bei Kontakt Haut-, Augen- und Atemwegsreizungen auslösen, auch kann es Veränderungen im Blutbild bewirken (BG RCI & BGHM, 2020).

5.2.1.3 Dioxine

Siehe 4.2.1.1

5.2.1.4 Polychlorierte Biphenyle

Siehe 4.2.1.2

5.2.2 Mengen

An Gebäuden in Österreich befinden sich rund 390.000 t XPS (Eibensteiner, 2016).

2018 sind 170.317 t an sortenreinen Kunststoffen angefallen, davon entfallen 2 %, etwa 3.406 t, auf Polystyrol und Polystyrolschaum (BMK, 2020).

Die folgenden Diagramme zeigen einen Spitzenverbrauch von rund 24.000 t und einen Gesamtverbrauch von etwa 390.000 t XPS, für den Zeitraum von 1970–2015. Markant sind die Schätzungen, die einen raschen und deutlichen Rückgang des XPS- und EPS-Verbrauches, für die Phase ab 2010 prophezeien.

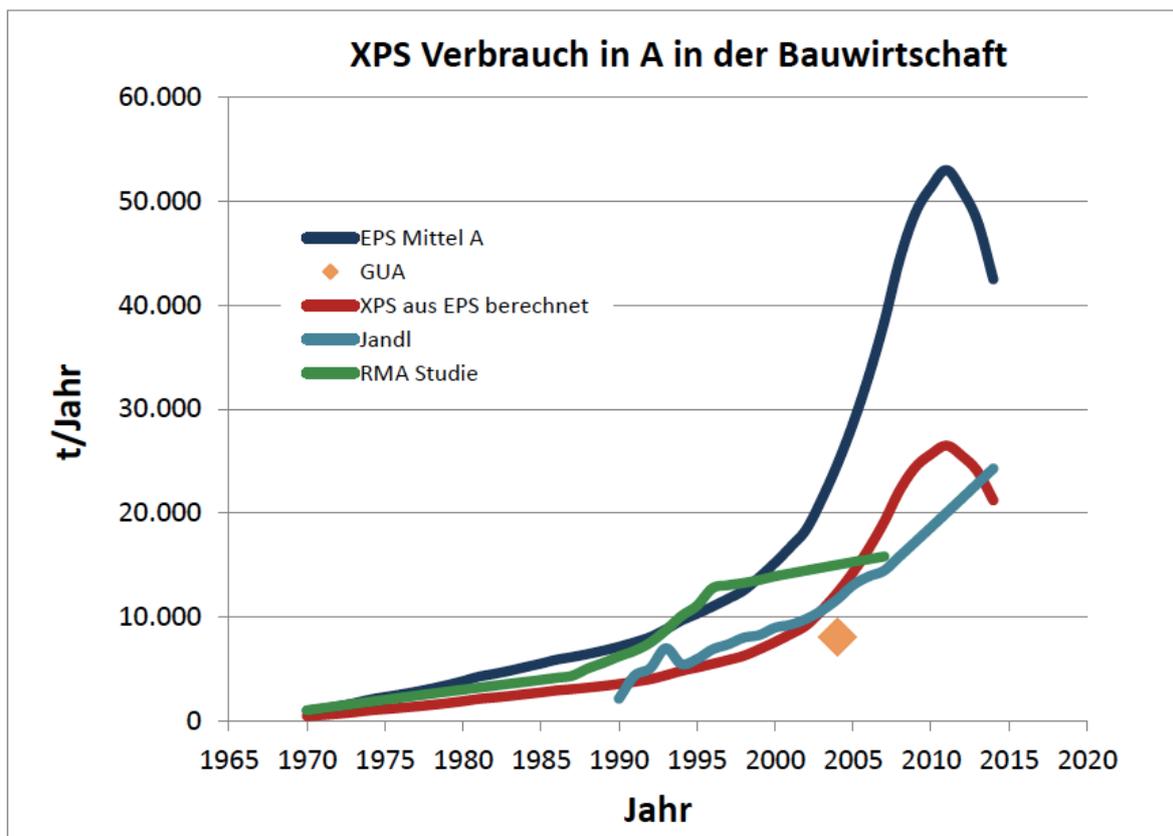


Abbildung 11: In der Bauwirtschaft genutzte XPS-Mengen, errechnet aus diversen Datenquellen, inkl. EPS-Mengen zum Vergleich (Eibensteiner, 2016).

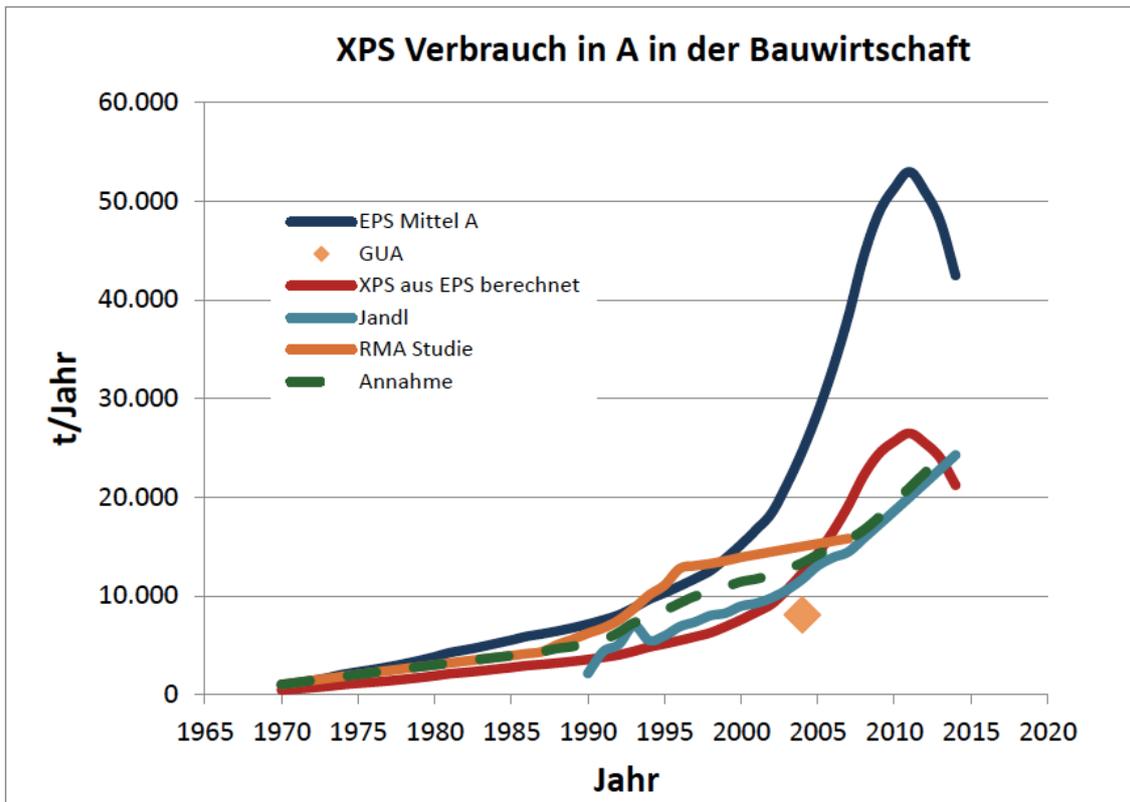


Abbildung 12: Verbrauch an XPS in Österreich, erstellt mittels Daten und Annahmen (Eibensteiner, 2016)

Laut Daxbeck & Buschmann (2012) wird das Aufkommen von XPS-Platten in Zukunft stagnieren.

5.2.3 Vermeidung und Behandlung

Vor Schleifung eines Bauwerks müssen (H)FCKW-haltige Dämm- und Störstoffe entfernt werden, erst danach darf ein maschineller Rückbau erfolgen (vgl. § 5 Absatz 1 Recycling-BaustoffVO). Somit muss verbautes XPS-Material behutsam rückgebaut und einer entsprechenden Wiederverwendung bzw. Verwertung zugeführt werden (Daxbeck & Buschmann, 2012). Dazu stehen diverse Rückbaumethoden zur Verfügung. Eine Möglichkeit wäre eine Abfolge von demolieren, brechen und trennen mittels Windsichter. Jedoch entspricht dieses Vorgehen nicht den Vorgaben für einen ordnungsgemäßen Rückbau. Überdies können Wandteile aufwändig zersägt, mit viel entstehendem Feinanteil abgefräst oder mit einem Bagger abgeschält werden. Die manuelle Abnahme stellt dennoch die effektivste Methode dar (Eibensteiner, 2016).

Die Effizienz des Rückbaus von XPS-Dämmplatten ist vom Einsatzgebiet sowie der Montageart abhängig, wie nachfolgende Tabelle zeigt.

Tabelle 9: Rückbaufähigkeit/Sortenreinheit von XPS-Dämmplatten in Abhängigkeit des Einsatzgebiets und der Montageart (in Anlehnung an Daxbeck & Buschmann, 2012).

Einsatzgebiet		Montageart	Rückbaufähigkeit Sortenreinheit
Dach/Decke			
innen	X	lose verlegt geklebt	niedrig bis hoch
außen	X	lose verlegt geklebt	hoch niedrig
Wand			
innen	X	geklebt	niedrig
außen	X	geklebt	niedrig
Perimeter			
Wand	X	punktweise geklebt	niedrig
Boden	X	punktweise geklebt	niedrig

Die Vorreinigung von verschmutzten Dämmplatten kann mit nachstehenden stationären und mobilen Verfahren erfolgen:

- Manuelle Sichtung
- Windsichtung
- Wäscher/Nassabtrennung
- Pressen/Pressen und Hitze (*Eibensteiner, 2016*)

Die eben erwähnten Verfahren, wie zerkleinern und pressen, sowie diverse Auflöse-Verfahren, sollten im Falle von XPS ausgesetzt oder nur unter den Voraussetzungen durchgeführt werden, dass schädliche Treibmittel abgesaugt und gesammelt, bzw. zerstört werden (*Eibensteiner, 2016*).

Gegenwärtig enthalten fünf Prozent der Bau- Abbruchabfälle XPS, die jedoch nicht separat erfasst werden. Diese Bau- Abbruchabfälle werden in einen Brecher verfrachtet und die Leichtfraktion XPS bzw. EPS wird mittels Windsichter abgetrennt. Die Sammlung der XPS wird vorrangig mittels (Mulden-)Container abgewickelt. Da XPS-Material FCKWs enthalten kann, muss dieses fachgerecht verwertet und entsorgt werden (*Eibensteiner, 2016*).

Die Abfallrahmenrichtlinie gibt eine Verwertungsquote von 70 % bis 2020 vor, wobei die stoffliche Verwertung höchstwahrscheinlich nicht miteinberechnet wurde. XPS-

und EPS-Abfälle werden hauptsächlich in Abfallverbrennungsanlagen verwertet (Eibensteiner, 2016).

Bei der thermischen Verwertung wird ein niedriger Heizwert mit hohem Tonnendurchsatz angestrebt. Im Gegensatz dazu wird bei der energetischen Verwertung, ein niedriger Tonnendurchsatz mit hohem Heizwert bevorzugt. Somit lässt sich mit thermischer Verwertung ein höherer Gewinn generieren als mit Energiegewinnung (Eibensteiner, 2016).

In Österreich gibt es neun Abfallverbrennungsanlagen, mit einer Gesamt-Kapazität von ca. 2,5 Mio. t/a und 55 Mitverbrennungsanlagen (keine Angaben zu Gesamt-Kapazität). In diesen Anlagen spielt die Rückgewinnung von Brom, aus HBCD, keine wesentliche Rolle (Eibensteiner, 2016).

5.2.3.1 Vermeidung

Um das Aufkommen von XPS-Abfällen zu vermeiden bzw. zu reduzieren ist der Einsatz alternativer Dämmstoffe, aus mineralischen und nachwachsenden Rohstoffen, zu priorisieren.

Table 10: Auflistung mineralischer und nachwachsender Dämmstoffe (eigene Darstellung nach Wurbs, et al., 2017)

Mineralische Dämmstoffe	Nachwachsende Dämmstoffe
Mineralwolle	Holzfasern
Mineralschaum	Holzspäne
Schaumglas	Zellulose
Blähton	Hanf

5.2.3.2 Wiederverwendung und stoffliche Verwertung

Die Wiederverwendung von XPS-Dämmplatten ist dann gegeben, wenn der Dämmstoff unbeschädigt und verunreinigungsfrei rückgebaut werden kann (Daxbeck & Buschmann, 2012). Nicht verunreinigte XPS-Baustellenabfälle können als Porosierungsmittel in der Ziegelsteinherstellung Verwendung finden (Daxbeck & Buschmann, 2012).

Grundvoraussetzung für die stoffliche Verwertung von HBCD-haltigen Materialien ist, dass Rezyklate den Grenzwert von 100 mg HBCD pro kg Werkstoff bzw. Erzeugnis unterschreiten (Wurbs, et al., 2017). Eine weitere wesentliche Konstante für die Verwertung, ist die Rückflussquote/-menge von rückgebauten XPS-Dämmplatten. 2015 lag die Quote in Österreich bei ca. 2.000 t und im Jahre 2050 wird der Peak bei rund 7.500 t liegen (Eibensteiner, 2016).

Die stoffliche Verwertung von Polystyrol ist technisch möglich, jedoch bringt dieses Thema einige Schwierigkeiten mit sich. Es ist keine einheitliche Sammel- und Rückführungslogistik vorhanden, deshalb werden zurzeit nur Produktionsabfälle in den Herstellungsprozess rückgeführt. Der Transportaufwand ist, aufgrund des hohen Materialvolumen bei niedrigem Plattengewicht, besonders unwirtschaftlich. Hinzukommt, dass innerhalb Europas nur wenige XPS-Produzenten vertreten sind. Der Rückbau ist aufgrund möglich enthaltener FCKWs/HFKWs mit Vorsicht

durzuführen und bei der Aufbereitung sind diese gefährlichen Stoffe abzuscheiden (Daxbeck & Buschmann, 2012).

Die Problematik der Transportlogistik könnte durch Auflösen (verflüssigen) der XPS-Platten mittels kennzeichnungsfreien spezifischen Lösungsmittels umgangen werden (Fraunhofer IVV, 2020).

Eine Variante der stofflichen Verwertung ist die selektive Extraktion mittels CreaSolv®-Verfahren. Hierbei wird das Ausgangsmaterial mittels Lösungsmittel zurückgewonnen (Brupbacher & Rubli, 2016), bei gleichzeitiger Reduktion des Volumens um das Hundertfache, ohne die Polymerketten des Materials zu zerstören (Garcia, et al., 2009). Der CreaSolv®-Prozess (Abb.12) besteht aus sechs Schritten: lösen, reinigen, fällen, trocknen, Lösungsmittelaufbereitung und Rückführung in Produktionsprozess (Fraunhofer IVV, 2020).

Das gewünschte Polymer wird in hoher Qualität, mit einem umweltverträglichen Lösungsmittel, aus dem Kunststoff-/gemisch extrahiert. Störstoffe werden abgeschieden und zurück bleibt eine Lösung mit enthaltenen Makromolekülen des angestrebten Polymers, die dem Ausgangsmaterial gleichwertig sind. Mittels Fällung werden die Makromoleküle aus dem Lösungsmittel abgetrennt. Das gewonnene Kunststoff-Rezyklat wird getrocknet und kann wieder in den Herstellungsprozess eingespeist werden. Das Lösungsmittel wird aufbereitet und in den CreaSolv®-Prozess rückgeführt (Fraunhofer IVV, 2020).

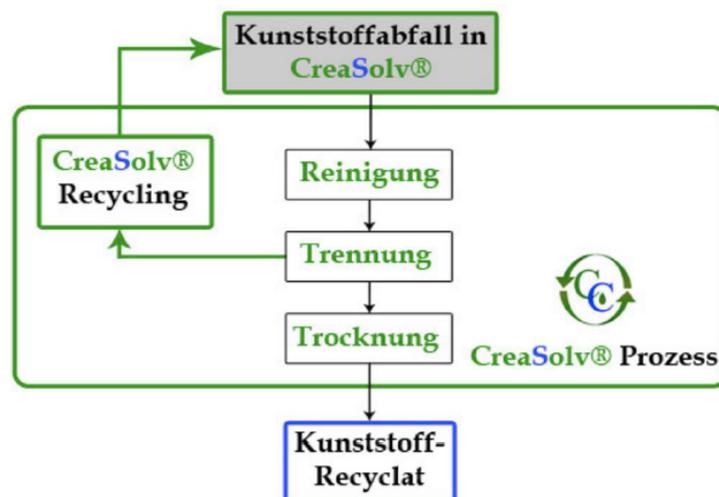


Abbildung 13: CreaSolv®-Prozess-Kreislauf (Eibensteiner, 2016)

Das Besondere an dieser Art der stofflichen Verwertung ist, dass Kunststoffgemische und Verbundmaterialien recycelt werden können. Zusätzlich werden unerwünschte Stoffe (z. B. Schadstoffe) abgeschieden (Fraunhofer IVV, 2020). Weiters können Rezyklat- und Sickerplatten (Dämmplatten mit niedriger Qualität) aus nicht verunreinigten Teil-/Reststücken hergestellt werden. Ebenso ist die Anwendung als Leichtzuschlag für Beton möglich (Brupbacher & Rubli, 2016).

Aktuell gibt es keine weiteren Alternativen, um HBCD und Dicumylperoxid abzuscheiden. CreaSolv®-Anlagen erzielen ihre Gewinne durch den Weiterverkauf des Kunststoffrezyklates (Eibensteiner, 2016). Mit einer qualitativen Rückgewinnung von Brom, könnte ein zusätzlicher Gewinn von etwa 4.400–5.400 USD/t Brom (Preis von 2017, laut Schnebele, 2020) erwirtschaftet werden. Zuvor ist ein relativ hoher

finanzieller Aufwand zu tätigen. Die Kosten für die Verwertung in CreaSolv®-Anlagen betragen rund 600 EUR/t bei einer Jahreskapazität von 2.000 t und ca. 490 EUR/t bei einer Jahreskapazität von 5.000 t. Zuzügender Transportkosten, die je nach Transportbehältnis, Volumenkapazität, Stundenaufwand und Tagesmiettarifen variieren. So lägen die Transportkosten, für einen Mulden-/Container mit 7 m³, einem Stundensatz von 65 EUR (inkl. Fahrt und Ladetätigkeiten) und einer ein Tages Miete von 1 EUR/Tag, bei etwa 66 EUR (Eibensteiner, 2016).

Weltweit gibt es gegenwärtig nur vier dieser Anlagen. Die Pilotanlage (Unilever Beutel Recycling), für Polyethylen-Beutelverpackungen, befindet sich in Indonesien und wurde 2015 errichtet. Darauf folgte 2016 eine Demonstrationsanlage (PolyStyrene Loop) für das Recycling von EPS mit POP-Ausschleusung, in den Niederlanden. 2018 wurden zwei Projekte gestartet. Das „MultiCycle“ Projekt soll Verpackungs- und Kfz-Verbundwerkstoffe und das Vorhaben „Circular Packaging“ soll Kunststoffverpackungsabfälle zukünftig, mit dem CreaSolv®-Verfahren, stofflich verwertbar machen (CreaCycle GmbH, s.a.).

Eibensteiner (2016) schlägt zwei Szenarien, für die stoffliche Verwertung von XPS bzw. EPS mittels CreaSolv®-Verfahren in Österreich, vor. Erstens, eine einzige zentral gelegene CreaSolv®-Anlage mit einer Jahreskapazität von mind. 5.000 t (Abb.13) oder zweitens, vier regionale Anlagen mit mind. je 2.000 t/a (Abb.14).

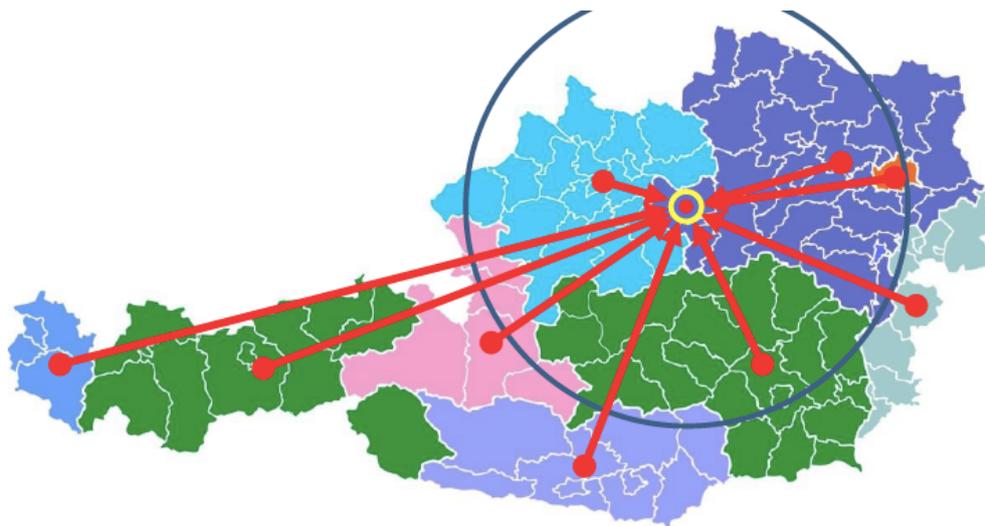


Abbildung 14: Optimaler Standort für eine zentral gelegene Crea®Solv-Anlage (Kapazität: ≥ 5.000 t/a) in Österreich (Eibensteiner, 2016)

Die durchschnittlichen Entfernungen der Punkte (Anm. jeweilige Hauptstadt) beträgt 130 km Luftlinie und 195 km über die Straßen (Eibensteiner, 2016).

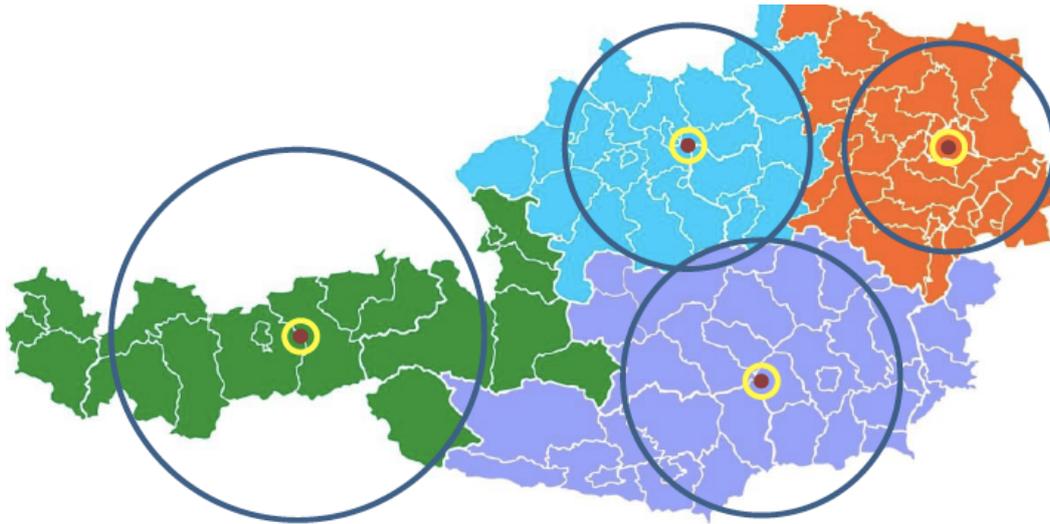


Abbildung 15: Optimierte Standorte für vier regionale CreaSolv©-Anlagen (Kapazität je ≥ 2.000 t/a) in Österreich (Eibensteiner, 2016)

Für das zweite Szenario ergeben sich für die jeweiligen Regionen, die in Tab.11 ersichtlichen Entfernungen.

Tabelle 11: Geschätzte Entfernungen für vier regionale CreaSolv©-Anlagen in Österreich (eigene Darstellung nach Eibensteiner, 2016)

Region	Entfernung: Luftlinie	Entfernung: Straße
Oberösterreich	68 km	102 km
Steiermark	77 km	115 km
Tirol	103 km	154 km
Wien	58 km	87 km
Österreich	X	110 km

Ein möglicher regional und zentral organisierter Rücklaufprozesses für diese zwei Szenarien (Abb.15) könnte wie folgt aussehen: Das XPS-Material wird zuerst auf der Baustelle schadlos rückgebaut und fraktioniert. Um das Volumen für den Transport zu reduzieren, werden die Dämmstoffabfälle verdichtet. Per LKW wird das Material in einem (Mulden-)Container zu einer Sammelstelle befördert. Von dort wird es entweder zu einer von vier regionalen oder einer zentral gelegenen CreaSolv©-Anlage befördert. Nach der stofflichen Verwertung wird das Rezyklat für den Wiedereinsatz oder Verkauf abtransportiert.

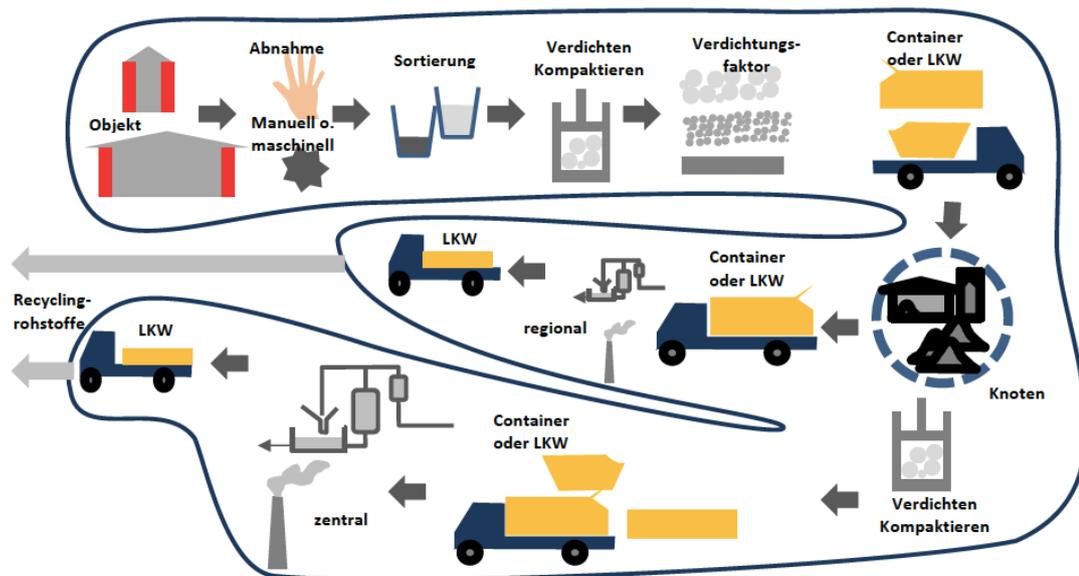


Abbildung 16: Abfolge eines möglichen Rücklaufprozesses für XPS-Dämmmaterial (Eibensteiner, 2016)

5.2.3.3 Thermische Verwertung und Beseitigung

Findet keine stoffliche Verwertung von XPS statt, so muss es in Abfallverbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen thermisch/energetisch verwertet werden. Bei unsachgemäßer Verbrennung kann es zur Bildung von Schadstoffen, wie Bromwasserstoffen, bromierten Dioxinen und Furanen, kommen (Daxbeck & Buschmann, 2012). Die Verbrennungstemperatur für gefährliche Abfälle mit einem Anteil von > 1 Gew.-% an halogenierten organischen Stoffen, muss für mind. zwei Sekunden 1100°C betragen (Eibensteiner, 2016).

Die Kosten für die thermische Verwertung von XPS, liegen zwischen 150–200 EUR/t exkl. Transport, (Daxbeck & Buschmann, 2012) bis zu 350 EUR/t (Eibensteiner, 2016).

Ca. 40 % der für die Verbrennung eingesetzten Energie kann über den Heizwert zurückgewonnen werden. Der Heizwert von XPS liegt bei 47 MJ/kg (Daxbeck & Buschmann, 2012), dies ist mit dem Heizwert von 1,1 L Heizöl gleichzusetzen (Institut Bauen und Umwelt e.V., 2010). Im Zuge der Verbrennung wird das HBCD zerstört und Brom in Form von Salz abgetrennt, das in alten Salzstollen verfüllt wird (Wurbs, et al., 2017).

XPS darf nur nach einer thermischen/energetischen Behandlung deponiert werden (Daxbeck & Buschmann, 2012).

6 Fallbeispiel: Bituminöse Baustoffe

Der Begriff „bituminös“ ist nicht einheitlich definiert und veraltet, es wurden damit Pech, Teer, Bitumen und Asphalt bezeichnet (LUBW, 2017).

Die Basis von fossilen Ressourcen (z. B. Erdölen), Naturasphalten und Bitumen bilden Jahrmillionen alte organische Rückstände, die sich am Meeresboden abgelagert haben. Physikalische Einflüsse, wie unter anderem Druck und Temperatur, führten über lange Zeit zur Bildung von Erdölen. Es gibt diverse Unterschiede bei Erdölen, die für die Bitumenproduktion relevant sind (Thienel, 2018).

Bitumenähnliche Materialien können auch durch natürliche Prozesse (entweichen von flüchtigen Stoffen inkl. chem. Änderungen) entstehen, diese Produkte werden Erdpech (Natur-/Asphalt) und Ozokerit genannt. In diesem Zusammenhang bezeichnet Asphalt ein Gemisch von Asphaltenen und Maltene (siehe Abb.16). Diese Substanz fand bereits 3200 v. Chr. Anwendung als Baustoff (Thienel, 2018).

6.1 Materialbeschreibung

6.1.1 Bitumen

Bitumen ist ein Nebenprodukt der Erdöldestillation. Es besteht aus Kohlenwasserstoffgemischen und -derivaten, die dunkel gefärbt und halbfest bis mittelhart sind. Es ist ein Thermoplast mit öligen Phasen (Matrix), den Maltene, und festen Phasen (Füller), den Asphaltene. Ebenso können auch Schwefel, Sauerstoff und Stickstoff beteiligt sein (Thienel, 2018).

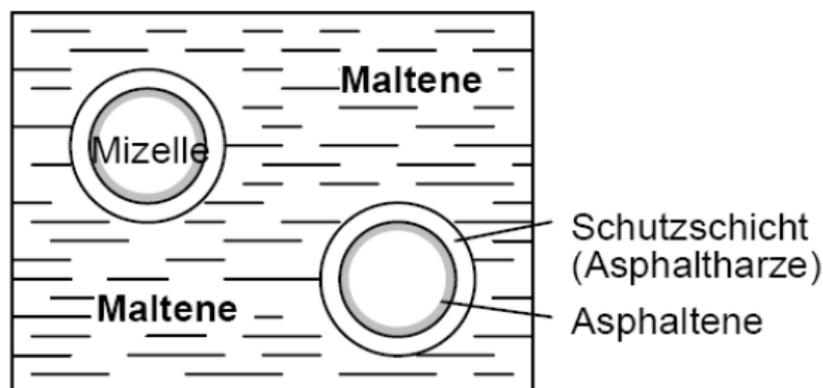


Abbildung 17: Aufbau von Bitumen (Thienel, 2018)

Bitumen wird mittels Destillation von Rohöl erzeugt. Der Röhrenofen wird auf 350–400°C aufgeheizt, dies führt dazu, dass die Öle in Form eines Dampf-Flüssigkeitsgemisch vorliegen, die wiederum in einen Turm geleitet werden und dort ca. 50 m hoch aufsteigen. In diesem Turm befinden sich mehrere Ebenen (Trennböden), die zur Ableitung der entstehenden Fraktionen dienen (Thienel, 2018).

Methan, Ethan, Butan sowie Propan zählen zu den leichtesten Stoffen und werden am höchsten Punkt des Turms abgeschieden. Die restlichen Fraktionen fallen, je nach Siedepunkt, in unterschiedlichen Höhen im Turm an und werden von oben nach unten abgezogen (Thienel, 2018).

Am untersten Ende des Turms (am Boden) wird der atmosphärische Rückstand gesammelt. Dieser Rest wird nochmals eigens in einem Röhrenofen erhitzt und bei einem Druck von 50 mbar destilliert. Nach diesem Vorgang entstehen Vakuumgasöle, diverse Destillate und Vakuumrückstände, die für die Herstellung von Heizöl oder Bitumen verwendet werden (Thienel, 2018).

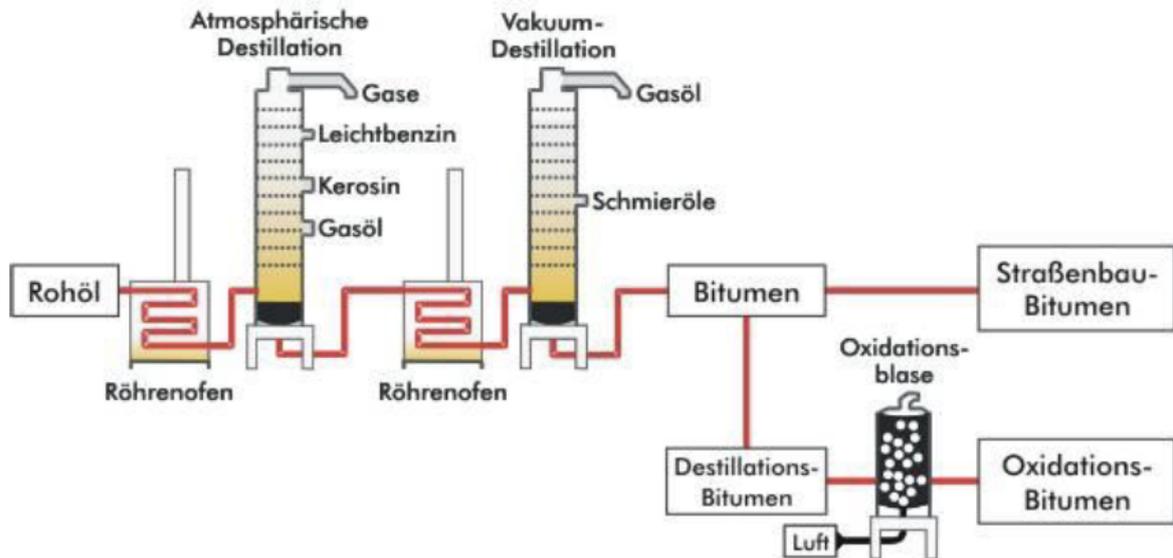


Abbildung 18: Phasen der Bitumenherstellung (Thienel, 2018)

Bitumen können auf Grund ihrer Eigenschaften in drei Gruppen und diese wiederum in Untergruppen eingeteilt werden:

- Heißbitumen
- Verschnittbitumen
- Bitumenemulsionen (Thienel, 2018).

Heißbitumen

Diese Bitumenart muss vor der Verwendung/Bearbeitung erhitzt werden und es wird, je nach Erweichungspunkt, in folgende Untergruppen eingeteilt:

- Destillationsbitumen
- Hochvakuumbitumen und
- Oxidationsbitumen (Thienel, 2018).

Destillationsbitumen

Destillationsbitumen wird auch als Straßenbaubitumen bezeichnet und wird mittels Destillation sowie nachfolgender Oxidation, falls notwendig, fabriziert. Es können Bitumen mit verschiedenen Härtegraden hergestellt werden, die vorwiegend im Asphaltstraßenbau, zur Herstellung von Bitumenpappen/-papiere und als Basis für Bitumenemulsionen/-lösungen verwendet werden. Bei Modifikation im Destillationsprozess, kann Destillationsbitumen gegebenenfalls unmittelbar im Straßenbau eingesetzt werden (Thienel, 2018).

Hochvakuumbitumen

Zur Herstellung von sehr harten Hochvakuumbitumen werden schwere Schmieröldestillate bei niedrigem Druck, in einem eigenen nachgeschalteten Prozesse, destilliert. Der Erweichungspunkt ist höher als der von Destillationsbitumen, jedoch ist der Ölanteil geringer. Anwendung findet dieser als Gussasphalt (Estrich) in Innenbereich (*Thienel, 2018*).

Oxidationsbitumen

Einblasen von Luft in heißes und flüssiges Destillationsbitumen bewirkt die Transformation zu Oxidationsbitumen. Dieser Vorgang erhöht die Plastizitätsspanne, das bedeutet höhere Resistenz gegenüber Erweichung/Abfließen und Versprödung bei niedrigen Temperaturen. Es wird, im Bauwesen, zum Beschichten/Verkleben von Dachbahnen und als Fugenvergussmasse verwendet, ebenso als Weichmacher in der Gummiindustrie (*Thienel, 2018*).

Verschnittbitumen

Bitumen kann durch Beimengung von Verschnittölen kalt eingebaut werden, da die Zugabe dieses Lösungsmittels den Erweichungspunkt deutlich senkt. Nach dem Einbau verdunstet das Lösungsmittel langsam und das Bitumen erhärtet (*Thienel, 2018*).

Weitere Untergruppen bilden:

- Fluxbitumen
- Polymermodifizierte Bitumen (*Thienel, 2018*).

Fluxbitumen

Hierbei handelt es sich um weiche Bitumenlösungen, die bereits bei leichtem Erwärmen verarbeitet werden können. Dies wird durch Zugabe von hoch viskosen Ölen (Fluxölen) ermöglicht. Fluxbitumen ist für den Straßenbau angedacht, heute wird es jedoch kaum verwendet (*Thienel, 2018*).

Polymermodifizierte Bitumen

Wird Destillationsbitumen mit 3–5 % natürlichen bzw. synthetischen Polymeren, wie z. B. PE, versetzt, entsteht viskoelastisches PmB. Die Veränderung führt zu einem höheren Erweichungspunkt und verbessert das Haftungsvermögen gegenüber Gesteinskörnung (*Thienel, 2018*).

Bitumenemulsion

Bitumenemulsionen sind wässrige Lösungen, in denen Emulgatoren fein verteiltes Bitumen stabilisieren (*Thienel, 2018*).

Die Herstellung kann durch Emulgieren von PmB oder durch modifizieren von Bitumenemulsion erfolgen. Der Ladungscharakter der Bitumenteilchen definiert, ob die Emulsion kat-, an-, oder nichtionisch ist. Wird die Emulsion mit Gesteinskörnungen vermengt, bricht dieses Fluid, das Bitumen fällt aus und verklebt das Gesteinsmaterial (*Thienel, 2018*).

Eine Polymermodifizierung ist ebenso möglich, dazu wird eine wässrige Natur- oder Kunstkautschuk-Dispersion verwendet (*Thienel, 2018*).

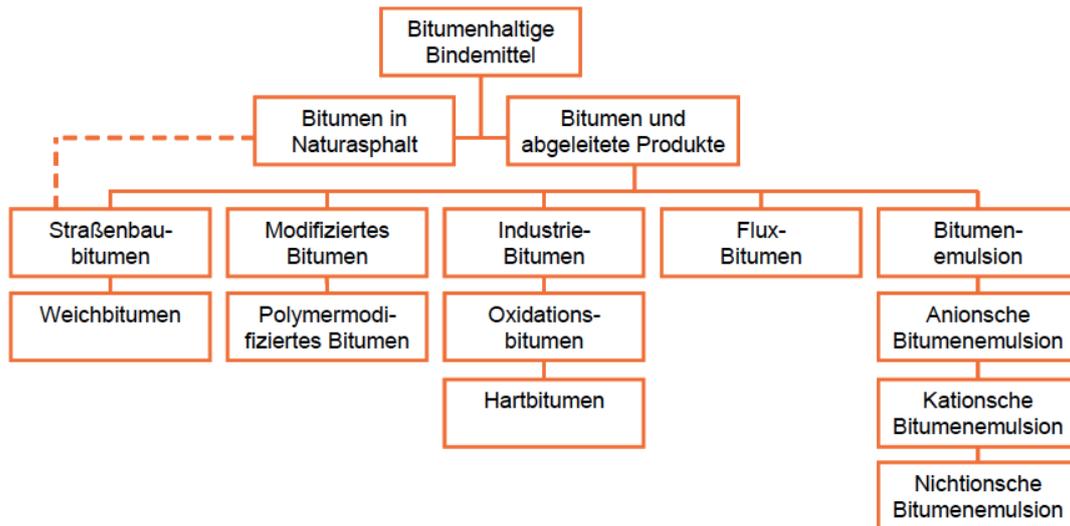


Abbildung 19: Zusammenhänge zwischen Bitumenprodukten, -bezeichnung und Herstellung (Thienel, 2018)

Asphalene und Maltene sind im Zusammenspiel mit der Temperatur für die Eigenschaften des Materials verantwortlich. Je nach Temperatur schwankt die Verteilung der Phasen und dieses Verhältnis definiert die Festig-, Verform- und Temperaturbeständigkeit. Bitumen hat einen Erweichungspunkt und einen variablen Schmelzpunkt. Wird die Temperatur des Erweichungspunktes unterschritten ist Bitumen spröde, wird diese überschritten ist es verformbar und viskos. Es weist mit zunehmendem Härtegrad, eine steigende Widerstandsfähigkeit gegen anorganische Säuren, Salze, aggressive Wässer, Kohlensäure und Alkalien auf. Jedoch spielen hierbei die Temperaturabhängigkeit und oxidierende Wirkung der Säuren eine Rolle. Problematisch sind hingegen Kraftstoffe (Benzin, Diesel), Öle, Fette und organische Lösemittel. Alle Bitumenarten besitzen eine Wärmeleitfähigkeit von 0,16 W/(mK), die elektrische Leitfähigkeit ist minimal und sie besitzen eine hohe Durchschlagfestigkeit. Bitumen ist ein umweltfreundlicher und, laut WasserschutzVO, ein nicht wassergefährdender Baustoff. Ebenso schädigen diverse Herstellungsprozesse und Anwendungen, im Straßenbau, die Umwelt nicht (Thienel, 2018).

Bitumen und Bitumenprodukte finden im Straßenbau sowie Hoch- und Wasserbau Verwendung, dabei wird in Spritz- und Mischverfahren unterteilt. Der Einsatz im Straßenbau erfolgt in Form von Oberflächenschutzschichten, Kompressionsbelägen, bei der die Verdichtung mit der Zeit zunimmt, kornstabiler Beläge und Tragschichten. Im Hoch- und Wasserbau werden sie als Kleb-, Tränk- und Deckmassen für Bitumen-Dachbahnen/-Dichtungsbahnen, Fugenvergussmassen (möglichen Zusätzen: Kunststoffe, natürliche Elastomere, Weichmacher, mineralische Füllstoffe), Korrosionsschutzmittel für Metalle und Bindemittel für Estrich bzw. Bodenbeläge verwendet (Thienel, 2018). Bitumen wird auch für bitumenhaltige Dachbahnen verwendet, die als reine Bitumenbahnen oder in kombinierter Form, als Glasfaser-, Polyester oder Jute-Gewebe mit Bitumen oder Polymerbitumenbeschichtung, vorliegen können (LUBW, 2017). Für außergewöhnliche Herausforderungen wurden Spezialbitumen bzw. Sonderbindemittel entwickelt, die transparent, eingefärbt oder gummimodifiziert sind (Thienel, 2018).

6.1.2 Asphalt

Asphalt setzt sich aus Straßenbaubitumen bzw. bitumenhaltigen Bindemitteln, Gesteinsmischungen und diversen Additiven zusammen (Bernhardt, et al., 2019).

Mitte der 1980er Jahre wurde Teer als sehr gesundheitsschädlich eingestuft und der Einsatz verboten, davor wurde er als Bindemittel verwendet. Das größte Schadstoffpotential, beim Rückbau von Altasphalten, beherbergt die Teerasphaltschicht (Bernhardt, et al., 2019).

Die Erzeugung von Asphalten erfolgt in stationären oder mobilen Mischanlagen (siehe Abb. 19), in denen Gesteinskörnungen mit Bitumen verschnitten werden. Die Eigenschaften des Asphalts werden durch die Art der Gesteinskörnungen beeinflusst. Gesteinskörnungen können aus ungebrochenen Gesteinen (z. B. Kies, Schotter), gebrochenen Gesteinen (z. B. Splitt, Brechsand), Hochofenschlacke oder Abfallverbrennungsschlacke bestehen. Ebenfalls müssen diese Gesteinskörnungen gewissen Ansprüchen standhalten, dazu müssen Eigenschaften wie Witterungs- und Frostbeständigkeit, Schlag- und Druckfestigkeit, Hitzebeständigkeit, gedrungene Kornform, Polierresistenz und Affinität zu Bitumen gegeben sein (Thienel, 2018).

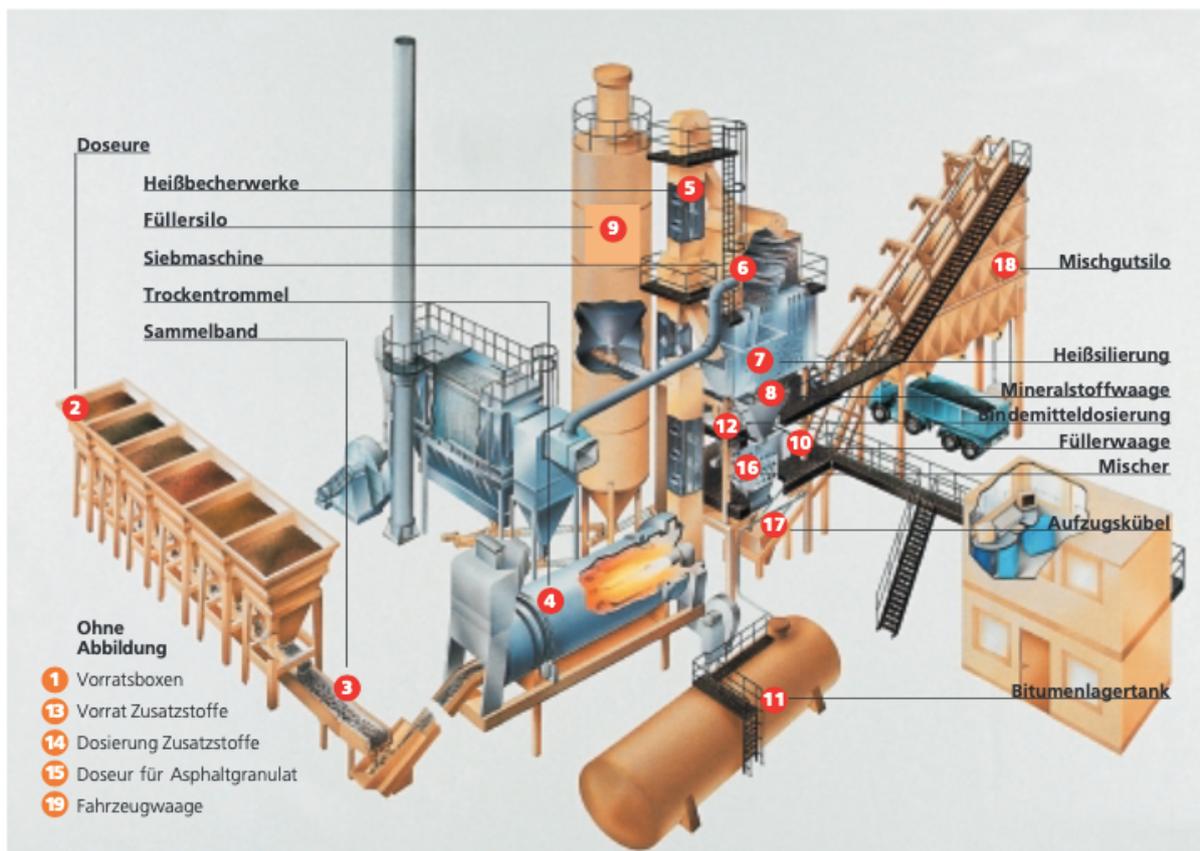


Abbildung 20: Aufbau einer Asphaltmischanlage (Riechert & Nolle, 1999)

Die Eigenschaften von Asphalt sind grundsätzlich abhängig von Härte und Menge des Bitumens sowie Art und Zusammensetzung der Gesteinskörnung. Zuzüglich ist der Umstand ausschlaggebend, ob der Asphalt bereits verbaut ist oder erst, in Form von frischem „flüssigen“ Asphalt, eingebaut wird (Thienel, 2018).

Die Ansprüche, die an Asphalt gestellt werden, sind abhängig davon, ob er bereits verbaut oder frisch vorliegt. Verbauter Asphalt soll Standfestigkeit, Rissicherheit, Dichtigkeit, Verschleißfestigkeit, Griffigkeit und Recyclingfähigkeit. Hingegen spielen bei frischem Asphalt Verarbeitbarkeit (z. B. Verdichtungswilligkeit) und Verarbeitungsfrist (Zeitspanne der Verarbeitbarkeit) eine wesentliche Rolle. Ersteres ist abhängig von der Zusammensetzung und Temperatur, zweites hängt von der Bitumensorte, Einbaudicke und Witterung ab (Thienel, 2018).

Grundsätzlich werden Asphalte im Straßen- und Verkehrsflächenbau verwendet, um Straßenbefestigungen, Parkflächen, Rad-/Gehwege, Sportplatzflächen, Flugplätze und landwirtschaftliche Wege zu errichten. Im Wasserbau werden Mischungen aus Bitumen und Asphalt in Dämmen, als Oberflächenschutz- und Dichtschichten verwendet. Ähnliche Mischungen werden auch für die Errichtung von Deponieabdichtungen eingesetzt (Thienel, 2018).

Tabelle 12: Anwendung von Asphalt im Wasserbau (in Anlehnung an Thienel, 2018)

	Erosionsschutz	Dichtung
Uferschutz	X	
Hochwasserschutzdeiche	X	X
Be-, Entwässerungs- und Kraftwerkskanäle	X	X
Schifffahrtskanäle	X	X
Staudämme, Speicherbecken		X

6.1.3 Pech/Teer

Teer, heute als Pech bezeichnet, ist ein Rückstandsprodukt und wird vorwiegend mittels thermischer Zersetzung (Temperatur von 1200-1300°C) von Stein- bzw. Braunkohle hergestellt. Im Zuge dieses Prozesses fallen Pyrolyseprodukte (z. B. PAK) an, die krebserregend wirken können (Thienel, 2018). Aus Kohle gewonnene Peche, Teere und Öle sind Aromatengemische mit hoher Konzentration an PAK und Phenole. Phenole stehen ebenso unter Verdacht, krebserregend zu wirken (Bernard & Schmeling-Braz, 2014).

Tabelle 13: Gegenüberstellung der Unterschiede von Pech/Teer und Bitumen (in Anlehnung an Thienel, 2018)

Pech/Teer	Bitumen
Herstellungsmethode: chemisch	Herstellungsmethode: physikalisch
Enthält Benzo(a)pyren Konzentration: 5.000–10.000 ppm krebserregend	Enthält Benzo(a)pyren Konzentration: 1–5 ppm
Keine Heißverarbeitung	Keine Beeinträchtigung der Umwelt durch Emissionen von Asphaltmischwerken

Pech/Teer	Bitumen
Eluierbarkeit von kritischen Stoffen bei Wiederverwendung beachten	Kann im heißen Zustand dem Recycling beigefügt werden
	<ul style="list-style-type: none"> - kein Gefahrenstoff - keine Kennzeichnungspflicht - keine sekundären Arbeitsschutzmaßnahmen notwendig

Ausgangsstoffe zur Gewinnung von Teerpech sind Rohteer, Holz, Braun- und Steinkohle. Rohteer besteht aus Wasser und Leichtölen. Bei der Destillation dieses Stoffes fallen Teeröle als Destillate und Teerpeche als Destillationsrückstände an. Wird Teer aus den übrigen Rohstoffen erzeugt, so erfolgt dies durch thermische Zersetzung. Der Teer wird nach seinem Ausgangsmaterial benannt:

- Holzteer
- Braunkohleteer
- Steinkohleteer (*Thienel, 2018*)

Am bedeutendsten ist Steinkohleteerpech. Unter Luftausschluss und bei einer Temperatur von $> 1000^{\circ}\text{C}$ wird Steinkohle verkocht, dabei entweichen Wasser und Leichtöle. In einem weiteren Destillationsprozess werden Teeröle und Pech getrennt (*Thienel, 2018*).

Pech ist flüssig bis halbfest, kann in Farbabstufungen von braun bis schwarz vorkommen und ist stark riechend. Es beinhaltet gesundheits-/schädliche Stoffe, dies trifft ebenso auf Teere zu. Gewisse Pecharten wirken fungi- und insektizid. Entweichen flüchtige Bestandteile aus dem Pech, so wird dieses spröde. O_2 - und Lichteinwirkung führen zur Alterung. Gegenüber Bitumen hat Pech eine niedrigere Temperaturspanne (erweichen/verspröden), einen geringeren Verarbeitungsbereich, es ist bei Raumtemperatur weicher/verformbarer und ebenso chemisch beständig (*Thienel, 2018*).

Pech wird im Bautenschutz, aufgrund seiner fungi-/insektiziden Wirkung, für z. B. Eisenbahnschwellen und Strommasten, als Dichtungs-/Sperrmittel im Wasser- und Hochbau sowie Bindemittel im Straßenbau verwendet (*Thienel, 2018*). Der Einsatz im Straßenbau erfolgte bis ca. 1980. Es wurde bzw. wird noch heute, in einigen Staaten, in Form von Dachbahnen/-pappen verwendet (*LUBW, 2017*).

6.1.4 Straßenaufbruch

Als Straßenaufbruch wird Material bezeichnet, das aus bestehenden Verkehrsflächen abgetragen wurde. Weitere Synonyme sind:

- pechhaltiger Straßenaufbruch
- teerhaltiger Straßenaufbruch
- bituminöser Straßenaufbruch
- kohlenteeerhaltiges Bitumengemisch
- Straßenpech oder
- Teer (*Bernard & Schmeling-Braz, 2014*).

Er setzt sich aus Asphaltaufbruch, Beton und Tragschichtenmaterial zusammen. Bestandteile sind Stahl-/Beton (hydraulisch gebunden), Altasphalt (bituminös gebunden) und ungebundenes Schüttmaterial (Sand, Kies, Schotter). Gegebenenfalls können teerhaltige Straßenmaterialien, Rand- und Pflastersteine vorhanden sein (Bernhardt, et al., 2019).

Pechhaltiger Straßenaufbruch besitzt aufgrund enthaltener PAK und Phenolen wassergefährdende sowie krebserregende Eigenschaften (Bernard & Schmeling-Braz, 2014).

Bis in die späten siebziger Jahre wurden pechhaltige Bindemittel im Straßenbau eingesetzt. Straßen haben eine „Lebenszeit“ von 15–30 Jahre, somit kommen bei Neuerrichtungen bzw. Sanierungen, die mit pechhaltigen Bindemitteln, belasteten Straßenschichten zu tage, die im Laufe der Zeit überlagert wurden (Bernard & Schmeling-Braz, 2014).

6.2 Teerabfälle

Bitumen- und Asphaltabfall (Asphaltaufbruch/Ausbauasphalt) fällt bei baulichen Vorgängen im Tief-, Wege- und Straßenbau sowie Abdichtungsarbeiten (z. B. Deponiebau) an. Im Abfallverzeichnis werden ihnen dieselbe Abfallbezeichnung und SN zugeordnet (Bernhardt, et al., 2019).

Bituminöse Baustoffabfälle bzw. Teerabfälle werden im Abfallverzeichnis des „Elektronischen Datenmanagement-Systems“ (EDM) mit diversen Abfallbezeichnungen und Schlüsselnummern angeführt (BMK, 2016). Die, für diese wissenschaftlichen Arbeit, relevanten SN und Abfallbezeichnungen werden in Tab.9 aufgezeigt.

Tabelle 14: Übersicht diverser Teerabfälle nach Schlüsselnummern (in Anlehnung an BMK, 2016)

SN	SP	Abfallge- fährlich- keit und - ausstuf- barkeit	Abfallart: Bezeichnung	Abfallspezifi- zierung: Beschreibung	SN, falls aus- gestuft bzw. ungefährlich	SN, falls gefährlich
17207	g		Eisenbahnschwellen			
18705			Teerpappe und bitumengetränktes Papier			54913 oder 31441
31410			Straßenaufbruch			31441
31410	91		Straßenaufbruch	verfestigt und stabilisiert		31441 91
31498	10		schlackenhaltiger Ausbauasphalt	Anhang 1 Tabelle 1 der Recycling- Baustoffverordnu ng		

SN	SP	Abfallge- fährlich- keit und - ausstuf- barkeit	Abfallart: Bezeichnung	Abfallspezifi- zierung: Beschreibung	SN, falls aus- gestuft bzw. ungefährlich	SN, falls gefährlich
54910	g		Pech			
54910			Pech	ausgestuft		
54911			Bitumenkoks			
54911	77	g	Bitumenkoks	gefährlich kontaminiert		
54912			Bitumen, Asphalt			
54912	77	g	Bitumen, Asphalt	gefährlich kontaminiert		
54913		g	Teerrückstände		18705 oder 54912	
54913	91	g	Teerrückstände	Verfestigt oder stabilisiert	54913 91	

6.2.1 Problematik

Früher wurden die mit Pech/Teer imprägnierten und mit, durch den Bahnbetrieb, gefährlichen Rückständen belasteten Bahnschwellen weiterverwendet. Nach deren Austausch fanden diese Anwendung im gewerblichen und privaten Landschaftsbau, als Stützmauern, Sichtschutzwände, Sitzgelegenheiten, u.v.m. Diese Weiternutzung stellte eine große Gefährdung für Gesundheit und Umwelt dar. Deshalb wurden im Jahre 1991 gesetzliche Vorschriften und Verwendungsbeschränkungen erlassen (Thienel, 2018).

Ein Grund für die Gefahr, die von Pech ausgeht, ist seinem hohen Gehalt an PAK geschuldet. Die Konzentration ist bis zu zehntausendmal höher als bei Bitumen (LUBW, 2017), genauer gesagt beträgt diese 50–250 g/kg bzw. 5–25 Gew. % (LfU Bayern, 2019). Im Gegensatz dazu weist Bitumen eine PAK-Konzentration von rund 2,5–100 mg/kg auf (LUBW, 2017). Reiner (nicht kontaminierter) Asphalt weist etwa 3–5 mg/kg PAK auf und ist somit nicht wassergefährdend. Wiederum können externe Faktoren (z. B. Verkehr) die PAK-Belastung auf 20 mg/kg anheben (LfU Bayern, 2019).

Die Identifizierung von pechhaltigem Material wird durch, die Ende der 70er-Jahre verwendeten, Pech-Bitumen Mischbindemitteln erschwert. Ebenso wesentlich ist der ordnungsgemäße Umgang mit potentiell gefährlichen Materialien, hinsichtlich Lagerung, Aufbereitung und Verwertung. Werden diese Vorgänge nicht sachgemäß durchgeführt, besteht Wassergefährdungspotential durch Eintrag von Niederschlagswasser, welches wiederum zur Bildung von phenolhaltigem Eluat führt. Kontaminiertes Niederschlagswasser ist vor der direkten/indirekten Einleitung entsprechend zu reinigen (LfU Bayern, 2019).

Zur Orientierung sind entsprechende Einleitwerte gegeben:

- PAK (Summe): 2 µg/l
- BTEX: 50 µg/l (davon Benzol: 10 µg/l)
- Phenolindex: 150 µg/l (*LfU Bayern, 2019*).

Im Einzelfall sind diese Werte anzupassen und vor Einleitung ist die Genehmigung des Kläranlagenbetreibers einzuholen (*LfU Bayern, 2019*). Ein weiteres Problem können anhaftende problematischen Rückstände, wie z. B. EPS („Styropor“) und Aluminium darstellen. Ebenso kritisch sind asbesthaltige Pappen auf Bitumenbasis (*LUBW, 2017*), die als Asbestabfälle unter der SN „31437“ (Asbestabfälle, Asbeststäube) zu führen sind (*BMK, 2016*). Asbest ist gesundheitsgefährdend, da er krebserregend und auf Grund seiner, bis zu 2 µm, feinen Fasern lungengängig ist (*Umweltbundesamt, 2020*).

6.2.1.1 Phenole

Phenol ist eine feste, farblos bis rosafarbig, hygroskopische (feuchtigkeitsbindend) und süßlich (teerartig) riechende Substanz. Liegt Phenol in reiner Form vor, besteht es aus weißen bis zu klaren nadelförmigen Kristallen (*Umweltdatenbank, s.a.*).

Es kommt in Naturprodukten (z. B. Holz) und Lebewesen vor. Früher wurde es ausschließlich aus natürlichen Ressourcen (Holz, Braunkohle, Naturteer) gewonnen, nachdem die Nachfrage an Phenol anstieg, wurde es synthetisch hergestellt (*Nguyen, 2003*).

Ab Mitte des 19. Jahrhunderts fand es Anwendung als Desinfektionsmittel und wurde auch Seifen beigemischt. Aufgrund seiner korrosiven Wirkung gegenüber der Haut, wurde dieser Einsatz untersagt. Ab 1897 wurde daraus Ascorbinsäure, für Aspirin, synthetisiert. Heutzutage wird es hauptsächlich für die Kunststoffherstellung (Phenolharz) und aufgrund seiner toxischen Wirkung nur mehr sehr selten in der Pharmaproduktion verwendet (*Nguyen, 2003*).

Die Wirkung von Phenol auf Lebewesen kann unterschiedlich ausfallen. Von Veränderungen der Leber- und Blutparameter, über Hautausschlag bis hin zu Tod, nach oraler Aufnahme bzw. Hautkontakt. Auch bei dieser Substanz ist die Menge ausschlaggebend. Ein Phenolgehalt von > 1 mg im Trinkwasser führt zu Übelkeit, Durchfall, brennenden Schmerz und Entzündungen im Mund. Bei 5.000 ppm im Trinkwasser wurde, bei Tierversuchen, eine geringere Überlebenschance von Nachkommen festgestellt. Ebenso kann es bei Tieren zu Bildung von Tumoren kommen, jedoch ist eine kanzerogene Wirkung beim Menschen noch nicht eindeutig bestätigt. Der Geruchsschwellenwert von Phenol liegt bei einer Konzentration von 0,06 ppm. (*Umweltbundesamt, 2006*).

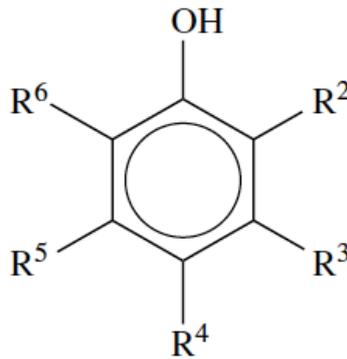


Abbildung 21: Strukturformel von Phenol (Kaftory, 2003)

6.2.1.2 BTEX

Die vier aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole bilden diese Stoffgruppe (LfU Bayern, 2020). Die problematischste Verbindung unter diesen Aromaten ist Benzol, da es kanzerogen und blutschädigend wirkt (Umweltdatenbank, s.a.).

BTEX sind mobile und leichtflüchtige Verbindungen, die aus Erdöl gewonnen werden, aber auch in Steinkohleteer zu finden sind. Sie werden in der chemischen Industrie als Rohstoff verwendet (Umweltdatenbank, s.a.) und sind in KFZ-Abgasen (Land OÖ, s.a.), Kraftstoffen, Löse- und Entfettungsmitteln enthalten. Durch diese Anwendungen kann BTEX zur Kontamination von Untergrund und Bausubstanz (z. B. Tankstellen, Lackiererei) führen (LfU Bayern, 2020). BTEX reichert sich aufgrund seiner Eigenschaften ausschließlich im Erdreich (Bodenluft) an und dringt nicht bis in den Grundwasserkörper vor (Umweltdatenbank, s.a.).

6.2.1.3 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

(siehe 4.2.1.3)

6.2.2 Mengen

Im Jahr 2018 sind in Österreich 2,003 Mio. t an Bitumen- und Asphaltabfällen angefallen, die der SN „54912“ zugeordnet wurden. 1,613 Mio. t wurden Behandlungsanlagen, mit einem Output von 0,571 Mio. t, zugeführt und 0,49 Mio. t deponiert. Darüber hinaus sind 0,722 Mio. t an Straßenaufbruch mit der SN „31410“ angefallen. Davon gelangten 0,716 Mio. t in Behandlungsanlagen, mit einem Output von 0,155 Mio. t, und 0,013 Mio. t wurden auf Deponien abgelagert. Im Statusbericht 2020 sind keine eigens ausgewiesenen Zahlen für das Abfallaufkommen von Pech/Teer angeführt. Ausgenommen für Eisenbahnschwellen mit der SN „17207 g“, deren Menge betrug 0,023 Mio. t. Teerpappen und bitumengetränktes Papier werden, falls gefährlich, zum Aufkommen von Brandschutt oder Bauschutt mit schädlichen Verunreinigungen (SN „31441“) gezählt (BMK, 2020).

6.2.3 Vermeidung und Behandlung

Straßen können, aufgrund des schichtweisen Aufbaus, sehr gut abgetragen werden und einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Hauptsächlich wird das Rezyklat, als Zuschlagstoff, in der Asphaltproduktion und im Straßenbau verwendet (Bernhardt, et al., 2019). Der rückgebaute, nicht verunreinigtem, Asphaltaufbruch wird zerkleinert und einer stofflichen Verwertung zugeführt. Das Rezyklat findet, als

Tragschicht, im Straßen- und Wegebau Verwendung. Ist das Material verunreinigt, z. B. ölverunreinigte Asphalte von Tankstellen, ist ein Recycling nicht möglich (Bernhardt, et al., 2019).

Die Recycling-Baustoff-VO gestattet die stoffliche Verwertung von schwach kontaminierten Recyclingmaterial, zu Rezyklat der Qualitätsklasse B-C, welches neuen Asphaltmischungen beigemischt wird (Bernhardt, et al., 2019).

In der Schweiz werden teer- bzw. bitumenhaltige Abfälle und Verbundmaterialien in Abfallverbrennungsanlagen verwertet. Großlieferungen werden oftmals abgelehnt oder in umliegende Länder exportiert und dort entsorgt (Brupbacher & Rubli, 2016).

Bituminöse Stoffe können mittels Heiß- oder Kaltmischverfahren stofflich verwertet, in mechanischen Aufbereitungsanlagen behandelt oder in thermischen Verwertungsanlagen verwertet werden. Deponierung ist unter Einhaltung der, in der DVO, festgelegten Grenzwerte und Anforderungen (LUBW, 2017), für die entsprechenden Deponiearten, möglich:

- Baurestmassendeponie:
 - TOC: 30.000 mg/kg TM
 - PAK: 30 mg/kg TM
 - BTEX: 6 mg/kg TM
 - u. a. (vgl. Anhang 1 DVO).
- Reststoffdeponie:
 - TOC: 50.000 mg/kg TM
 - PAK: 300 mg/kg TM
 - BTEX: 6 mg/kg TM
 - u. a. (vgl. Anhang 1 DVO).
- Massenabfalldeponien
 - TOC: 50.000 mg/kg TM
 - PAK: 300 mg/kg TM
 - BTEX: 6 mg/kg TM
 - u. a. (vgl. Anhang 1 DVO).

Der Unterschied zwischen Reststoff- und Massenabfalldeponie liegt im Wesentlichen in der Menge der zugelassenen Kohlenwasserstoffe und der erlaubten Grenzwerte im Eluat (vgl. Anhang 1 DVO). Bitumen, Asphalt und Straßenaufbruch können ohne analytische Untersuchungen in Baurestmassen- und Massenabfalldeponien eingebracht werden. Dabei dürfen bis zu zehn Volumsprozent an Metallen, Kunststoffen und organischen Bestandteilen (z. B. Holz, Papier) enthalten, aber keine Baustellenabfälle beigemischt, sein (vgl. Anhang 2 Abschnitt 2 DVO).

6.2.3.1 Bitumen

Ein mögliches Verfahren, um Bitumen zu behandeln, ist das Physitron Asphalt Recycling (siehe Punkt 6.2.3.3.). Die Alterung von Bitumen steht einem unerschöpflichen Recyclingprozess im Wege. Grund dafür, ist der Alterungsvorgang, der eine deutliche Materialbeeinträchtigung mit sich bringt und in weiterer Folge zu einem langsamen Materialverlust führt. Es gibt drei Varianten der irreversiblen Bitumenalterung. Die Verdunstungsalterung ist ein physikalischer Vorgang, bei dem flüchtige Ölanteile abgedampft werden und je härter das Bitumen, desto seltener dieser Prozess. Auslöser der oxidativen Alterung ist Luftsauerstoff, es handelt sich um

einen chemischen Alterungsvorgang. Strukturalterung entsteht durch die Vergrößerung von Asphaltenen und Maltenen (Thienel, 2018).

6.2.3.2 Pech/Teer

Beim Rückbau bzw. der Sanierung von alten Dächern können Bitumen-/teerhaltige Dachbahnen anfallen. Diese dürfen nicht deponiert werden, da der org. Anteil und Brennwert, die Vorgaben der Deponie-VO übersteigen. Somit kann die Verwertung ausschließlich energetisch und thermisch erfolgen, davon ausgenommen sind asbesthaltige Dachbahnen. Die thermische Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen ist zulässig, doch verhindert der niedrige Schmelzpunkt des Materials den Einsatz, großer Mengen. Der hohe Heizwert von 20.000–25.000 kJ/kg ermöglicht die Anwendung als Ersatzbrennstoff in z. B. Zementwerken (LUBW, 2017).

Das niederländische Unternehmen Recycling Combinatie B.V. (REKO) hat ein überaus effizientes und zukunftsweisendes Verfahren entwickelt um pechhaltigen Straßenaufbruch in seine Bestandteile Sand, Kies und Füller zu zerlegen. Gleichzeitig werden gefährliche und problematische Stoffe und Verbindungen (z. B. PAK, SO₂, NO₂) zerstört bzw. unschädlich gemacht. Im Zuge dieses Prozesses wird das Material bei 850–1.000°C verbrannt, gefährliche Stoffe (z. B. PAK) werden zerstört und als Rückstände bleiben nur mineralischen Komponenten, wie Sand, Kies sowie Füller, die als Sekundärrohstoffe eingesetzt werden können. Gleichzeitig wird die Abwärme zur Energieproduktion verwendet. Bei der Verbrennung entstehen Stickstoff- und Schwefeldioxid, die in weiterer Folge behandelt werden. Ein Katalysator trennt NO₂ in seine ungefährlichen Bestandteile. SO₂ reagiert mit Kalkwasser und bildet synthetischen Gips, der im Bauwesen Verwendung findet. Der Recyclinggrad der Anlage beträgt 100 % des eingesetzten Materials. Die erste Anlage (REKO I) wurde 2006 in Betrieb genommen (N.N., 2020) und bis 2018 wurden 600.000 t an Rückständen behandelt. Eine zweite Anlage (REKO II) mit einer Reinigungskapazität von 1,2 Mio. t pro Jahr wurde für 2020 geplant. Die Investitionskosten dafür betragen 125 Mio. EUR und mit der zusätzlich gewonnenen Energie soll der Jahresbedarf von 7.500 Haushalte gedeckt werden können (N.N., 2018).

6.2.3.3 Straßenaufbruch/Ausbauasphalt

Primär ist der Abtrag von pechhaltigen Straßenschichten zu vermeiden, gegebenenfalls sind diese zu überlagern und es ist für deren Verbleib im Straßenkörper Sorge zu tragen. Ist dennoch ein Abtrag von Nöten, müssen bestehende Unterlagen ausgewertet und die Schadstoffbelastung erhoben werden (z. B. organoleptische Prüfung, Lacksprühverfahren mit Fluoreszenz in UV-Licht). Zudem müssen die einzelnen Schichten der Verkehrsfläche separat entfernt werden, um zu verhindern, dass sich belastet und unbelastete Lagen vermengen. Dieses Vorgehen soll das Aufkommen von belastetem Material und somit Abfall reduzieren. Eine Vermischung hätte die Einstufung als „gefährlicher Abfall“, für das gesamte Material, zur Folge. Die Vermischung von Straßenaufbau und Ausbauasphalt ist untersagt (Bernard & Schmeling-Braz, 2014).

Asphaltaufbereitung ist zu forcieren, um finanzielle und natürlich Ressourcen einzusparen. Im Zuge des Recyclingprozesses wird alter Asphalt mittels Kaltfräse abgetragen/ausgebaut, passiert eine Brech- und Siebanlage, bevor er dem Herstellungsprozess von neuem Asphalt (Asphaltmischanlage), als Rezyklat, zugeführt wird. Der recycelte Asphalt wird wiederum im Straßenbau ausgebracht.

Beim Abtragen mittels Kaltfräßen, lässt sich der Wasserverbrauch um bis zu 20 % reduzieren. Indem die Wasseranlagen bei Bedarf automatisch zu- oder abgeschaltet werden. Die Restfeuchtereduktion beträgt dadurch nur 3–4 % und dies verkürzt den Trocknungsprozess. Somit wird der Heizölverbrauch, pro reduziertem Prozent an Feuchtigkeit, um 1 l/t Ausbaus asphalt gesenkt und die CO₂-Emissionen verringert. Um diesen Aufbereitungsprozess noch effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten, sollen zusätzlich die nachfolgende Sieblinie auf die gewünschte Menge, Größe und Zusammensetzung eingestellt werden (*Wirtgen Group, s.a.*).

Die Wiederverwendung von Ausbaus asphalt spielt eine immer wesentlichere Rolle in der Straßenbaubranche. 2018 wurden in Deutschland rund 41 Mio. t Asphalt produziert, davon entfielen etwa 10,5 Mio. t auf recycelte Ausbaus asphalt. In Summe wurden 12 Mio. t ausgebaut, das entspricht einer Wiederverwendungsquote von 87 % (*Wirtgen Group, s.a.*).

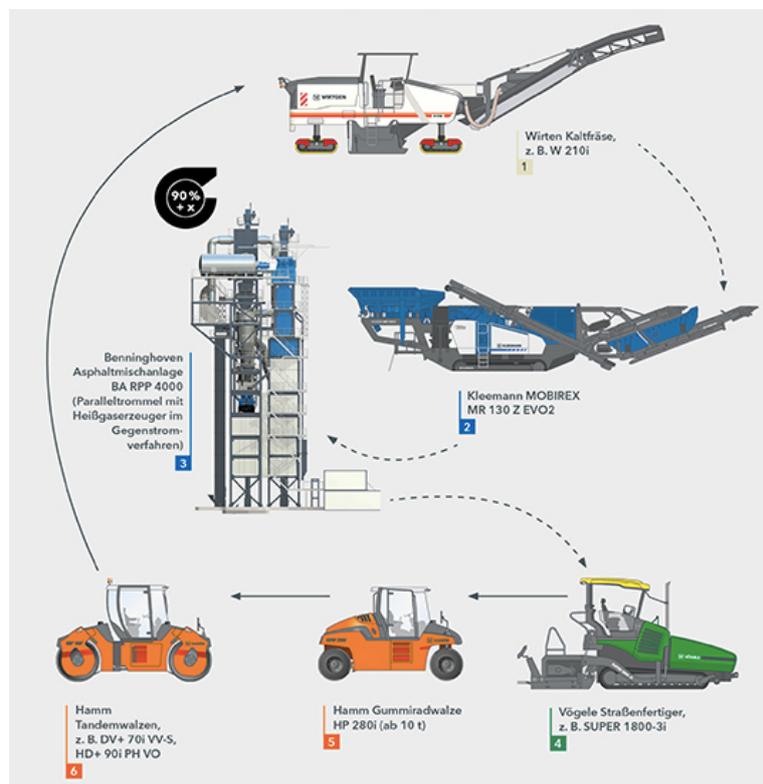


Abbildung 22: Prozesskette Asphaltrecycling

Um einen quantitativen Nachweis, betreffend der Schadstoffbelastung, zu erhalten, ist die im Feststoff vorhandene PAK-Konzentration und der Phenolgehalt im Eluat zu ermitteln. Anschließend kann die Einstufung des Straßenaufbruchs erfolgen (*Bernard & Schmeling-Braz, 2014*). Durch enthaltenes Bitumen bzw. Teer im Straßenaufbruch, kann ein organischer Anteil gegeben sein, der jedoch zu keiner Gasbildung führt (*LUBW, 2017*).

In Österreich wird gefährlicher/pechhaltiger Straßenaufbruch der SN 31441 g bzw. 31441 91 g (siehe Tab.14) zugeordnet. Eine Verwertung ist nur dann zulässig, wenn die Charakterisierung des Materials einer, in der Recycling-BaustoffVO enthaltenen, Qualitätsklasse entspricht. Oftmals ist dies bei teerhaltigem Asphalt nicht der Fall und dadurch ist eine Verwertung unzulässig (*Westermayer & Rosenberger, 2018*).

Tabelle 15: Einstufung von Straßenaufbruch nach PAK-Gehalt (in Anlehnung an Bernard & Schmeling-Braz, 2014)

PAK-Gehalt (mg/kg)	Bezeichnung	Folge
≤ 10	Ausbauasphalt	Behandlung/Verwertung ohne besondere Anforderungen möglich
> 10 bis ≤ 25	Ausbauasphalt, gering belastet	Einsatz in ungebundener Form, nur wenn Ausschwemmung verhindert wird (unter wasserundurchlässiger Schicht)
> 25	Pechhaltiger Straßenaufbruch	Aufbereitung nur im Kaltmischverfahren Erhöhte Anforderungen/Einschränkungen betreffend Verwertung
≥ 1.000	Pechhaltiger Straßenaufbruch (gefährlich)	Einstufung als gefährlicher Abfall

Nach Ausbau des Materials ist dieses, wenn möglich, zügigst ohne Zwischenlagerung in eine Recyclinganlage zu überführen. Ist eine Lagerung notwendig, so ist der Ausbaustoff vor Nässeeintrag zu schützen und auf einem stoffundurchdringlichen Untergrund zu lagern (Bernard & Schmeling-Braz, 2014), um einen möglichen Schadstoffeintrag in den Untergrund zu verhindern.

Ausbauasphalt kann ohne Bedenken recycelt werden. Dazu wird er, nach Anlieferung und Kontrolle bezüglich teerhaltiger Anteile, in der Asphaltmischanlage zerkleinert/gebrochen sowie nach Korngröße sortiert. Dieses Granulat kann der Asphaltherstellung im kalten oder heißen Zustand beigemischt werden (Thienel, 2018). Genauer gesagt, gibt es drei Recycling-Methoden:

- Heißmisch-Recycling: In stationären Asphaltmischanlagen wird Rückbauasphalt erhitzt und in Kombination mit frischen Materialien zur Herstellung von neuem Asphalt verwendet.
- Kaltmisch-Recycling: In stationären oder mobilen Anlagen wird nicht erhitztes Ausbauasphalt mit neuem Material zu frischem Asphalt.
- Oberflächen-Recycling: Diese Methode wird ausschließlich in-situ angewandt. Zunächst wird die alte Asphaltoberfläche erhitzt, abgefräst und erneut ausgebracht (Speight, 2016).

Im Zuge dieser Recycling-Prozesse werden organische Wirkstoffe beigemischt, um die Aufbereitung des alten Asphalt zu erleichtern und gegebenenfalls diverse Eigenschaften zu verändern (Speight, 2016).

Bei herkömmlichen Recyclingprozessen sind Temperaturen und Zugabemengen von Ausbauasphalten limitiert. Um optimalere Temperaturen (höheren Material- und gleichzeitig niedrigeren Abgastemperaturen) in diesem Vorgang zu erreichen und diesen auch effizienter zu gestalten, wird das Material indirekt erhitzt. Hierzu bewegt sich das Recyclingmaterial, in einer Recyclingtrommel mit Heißgaserzeuger, in

Ebenso ist die Verwendung im Deponiebau, unter Einhaltung der DVO und entsprechender deponiebautechnischer Maßnahmen, möglich. Das Einbringen von pechhaltigem Straßenaufbruch muss dokumentiert werden, unter anderem Ort des Einbaus, Herkunft des Straßenaufbruchs, Analyseergebnisse, eingebaute Menge, Einbauweise, hydrologische Verhältnisse und beteiligte Unternehmen (*Bernard & Schmeling-Braz, 2014*).

Es besteht ein Verbot für die Verwertung von pechhaltigem Straßenaufbruch auf Privatgelände. Die Verwendung eben dessen beim Anlegen von Privatwegen, die nicht auf Industrie-/Gewerbegebieten angelegt werden, Wirtschaftswegen und Lärmschutzwänden/-wällen, ist ebenfalls untersagt (*Bernard & Schmeling-Braz, 2014*).

Der Einbau, als Behandlungsmethode, von pechhaltigen Straßenaufbruch in neue Verkehrsflächen wird empfohlen. Grund dafür ist, dass die Effizienz der Wiederverwendung, hinsichtlich Kosten, Material-, Land- und Energieverbrauch sowie Luftverschmutzung, gegenüber Deponierung, biologischer Behandlung oder Verbrennung, überwiegt (*Andersson-Sköld, et al., 2007*).

7 Zusammenschauende Diskussion

Basis dieser Masterarbeit bildete eine Literaturrecherche. Ziel war es, den ordnungsgemäßen Umgang mit den drei Abfallströmen Brandschutt, extrudiertes Polystyrol und Teerabfällen sowie deren Berührungspunkte mit der Richtlinie 2012/18/EU (Seveso-III-RL) und der Richtlinie 2010/75/EU (IE-RL) aufzuzeigen. Dazu wurden mögliche Gefahren, durch Auflisten der Problemsubstanzen, Behandlungsmethoden und Entstehungsursachen dieser Abfälle, in Kombination mit denkbaren Komplikationen und Hindernissen, aufgezeigt. Um schlussendlich unterstützende und nachhaltige Empfehlungen für die Praxis von Entsorgungsunternehmen treffen zu können, war die obligatorische Verbindung zur zukunftsträchtigen Kreislaufwirtschaft wesentlich.

Die Beantwortung der Forschungsfragen erfolgte überwiegend anhand der vorangegangenen Kapitel. Um die Antworten auf die Fragen klarer und übersichtlicher darzustellen, wurden die Ergebnisse unter den entsprechenden Überschriften zusammengefasst und mit dem eigenen Wissensstand verknüpft bzw. ergänzt.

7.1 Gefahrenrelevante Eigenschaften und Gründe für den stetigen Anstieg der Gesamtmengen von Brandschutt, extrudiertem Polystyrol und Teerabfällen

Die Problematik der Abfallströme liegt primär in den enthaltenen oder entstehenden Substanzen, die sich negativ auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt auswirken. Die Zunahme von baulichen Tätigkeiten führen zum stetigen Anstieg der Abfallströme und die limitierte Anzahl bzw. fehlende Verwertungsanlagen lassen die zwischengelagerten Abfallmengen ebenso anwachsen. Zusätzlich ist der Aufwand, um wiederverwendbares Material zu erhalten, verhältnismäßig groß. Brandschutt muss manuell auf wiederverwendbare Bestandteile durchsucht und XPS-Dämmplatten entsprechend behutsam rückgebaut werden.

Brandschutt kann Dioxine, Furane, polychlorierte Biphenyle (PCB), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS, PFOA, PFOS) enthalten. Dioxine, Furane und PAK entstehen ungewollt bei unvollständigen Verbrennungsprozessen. Wobei PCB, das dioxinähnliche Eigenschaften besitzt, ebenso im Zuge dieses Vorganges, durch die Verbrennung von Kunststoffteilen, entsteht. Hingegen werden PFC, PFOS und PFAS (PFOA) von außen, in Form von fluorhaltigem Löschschaummittel, in den Brandschutt eingebracht. PFC führen zu Umweltschäden und stehen unter Verdacht umweltsensibel, akkumulierend und toxisch zu sein (*Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2006*). Dioxine haben negative Auswirkungen auf Körperfunktionen/körperliche Prozessabläufe und Furane wirken kanzerogen sowie mutagen. PAK sind ebenfalls kanzerogen und mutagen, weiters noch fortpflanzungsgefährdend, persistent, bioakkumulativ und toxisch (*EGGBl, s.a.*). Solche Gefahren werden im Chemikalienrecht (REACH und CLP-Verordnung) als PBT-Eigenschaften – für persistent, bioakkumulativ und toxisch – bezeichnet. In folgenden Grafiken sind, in Bezug auf die gegenständlichen problematischen Abfallströme, potenzielle Expositionspfade (siehe Abb.24) mit Fokus auf die Entsorgungsphase zusammenfassend dargestellt.

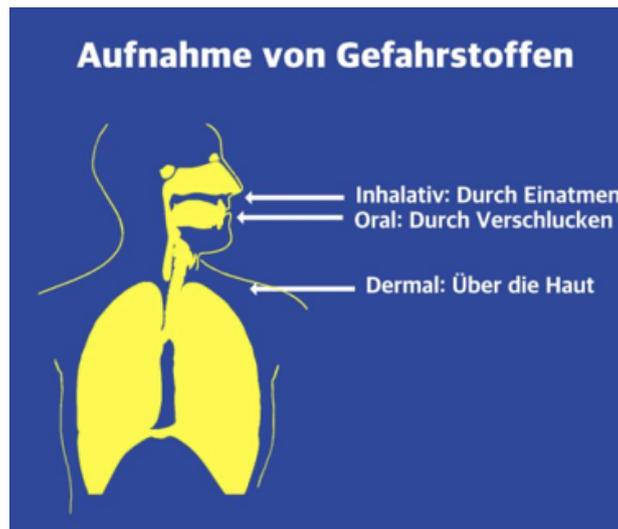


Abbildung 24: Aufnahmepfade von Gefahrstoffen (Liederer und Tenschert GbR, 2020)

Ein praktisches Beispiel einer Exposition mit einem Gefahrstoff in der Abfallwirtschaft ist z. B. die Inhalation von XPS-Abrieb oder Asbeststaub. Im Zuge des Rückbaues und des manuellen Sortiervorganges von XPS-Dämmplatten, können durch unsachgemäße Handhabung und fehlende persönliche Schutzausrüstung (PSA) lungengängige Partikel freigesetzt und eingeatmet werden, die zu gesundheitlichen Risiken führen. Ebengleiches kann durch orale und dermale Exposition mit anderen problematischen Stoffen erfolgen.

In der Literatur wird kein Grund für die Zunahme der Brandschuttmengen angeführt. Dennoch kann abgeleitet werden, dass eine Kombination aus nicht deponierbarem Material und fehlenden Behandlungsanlagen zur Anhäufung von Brandschutt, in den Zwischenlagern der Entsorgungsunternehmen, führt. Für die Deponierung schreibt die DVO einzuhaltende Grenzwerte vor, werden diese überschritten, ist eine Ablagerung untersagt. Auch wenn grundsätzlich die Möglichkeit zur Behandlung von Brandschutt besteht, müssen zuvor Voraussetzungen (z. B. Logistik, Anlagen) geschaffen werden bzw. gegeben sein. Ebenso wenig kann eine Aussage über die Zu- bzw. Abnahme der angefallenen Mengen an Brandschutt in Österreich, von 2015 bis 2018, getätigt werden. Grund dafür ist, dass im BAWP 2017, in dem die Zahlen für 2015 angegeben werden, ausschließlich Zahlen für Bauschutt (Anm.: inkl. Brandschutt) vorhanden sind (BNT, 2017). Hingegen ist im Statusbericht 2020 eine Menge von etwa 0,013 Mio. t (2018) an „Brandschutt oder Bauschutt mit schädlichen Verunreinigungen“ angeführt (BMK, 2020).

Gefährliche Stoffe, die im Zusammenhang mit extrudiertem Polystyrol erwähnt werden müssen, sind Hexabromcyclododekan (HBCD), Dioxine, Furane, PCB und Dicumylperoxid (DCP). HBCD und DCP dienen als Flammschutzmittel. Der Einsatz und Handel von HBCD wird durch die POP-VO, aufgrund seiner persistenten und toxischen Eigenschaften, untersagt. Eine Ausnahme besteht einzig für EPS. Durch die Zugabe von DCP kann der Anteil an HBCD, bei gleichbleibendem Flammschutz, um 90 % reduziert werden (Leisewitz & Schwarz, 2000). DCP kann zu Haut-, Augen- und Atemwegsreizungen führen sowie Veränderungen im Blutbild bewirken.

3.406 t Polystyrol und Polystyrolschaum wurden 2018 in Österreich gesammelt (BMK, 2020). XPS-Dämmplatten befinden sich überwiegend an Hausfassaden. Österreichweit liegt die Menge etwa bei 390.000 t, die künftig bei Sanierungs- und Abbrucharbeiten zum Vorschein kommen werden (Eibensteiner, 2016). Grundsätzlich müssen (H)FCKW-haltige Dämmplatten manuell entfernt werden, bevor maschinelle Abrissarbeiten erfolgen. Besonders problematisch sind Gebäude, die vor 1990 errichtet wurden. Grund dafür sind Dämmplatten, die neben HBCD, mit hoher Wahrscheinlichkeit, auch FCKW enthalten (Daxbeck & Buschmann, 2012). Dieses XPS ist als gefährlicher Abfall einzustufen und energetisch bzw. thermisch zu verwerten.

Problematische Substanzen in Bezug auf Teerabfälle, sind PAK, Phenole und die aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole (BTEX). PAK sind in Pech und Bitumen enthalten, wobei die Konzentration in Pech 50–250 g/kg, in Bitumen 2,5–100 mg/kg und in nicht kontaminierten Asphalt etwa 3–5 mg/kg beträgt (LfU Bayern, 2019). Phenol ist in Teer enthalten und hat, abhängig von der Dosis und Kontaktart, negative Einflüsse auf die menschliche Gesundheit, z. B. Leber-/Blutwertveränderungen, Hautausschlag oder Tod (Umweltbundesamt, 2006). BTEX kommen u. a. in Steinkohle vor und wird in der chemischen Industrie als Rohstoff verwendet. Besonders gefährlich ist der Bestandteil Benzol, da es kanzerogene und blutschädigende Eigenschaften besitzt (Umweltdatenbank, s.a.). Unsachgemäße Lagerung von Teerabfällen führt zur Bildung von schadstoffhaltigem Eluat, das umwelt- und gesundheitsschädigend wirken kann (LfU Bayern, 2019).

Unbelastete Teerabfälle aus dem Straßenbauwesen sind problemlos wiederzuverwenden bzw. stofflich zu verwerten. Belastetes oder pechhaltiges Straßenmaterial ist entsprechend, der enthaltenen Stoffmengen und vorgegebener Grenzwerte, auf Baurestmassen-, Reststoff- oder Massenabfalldeponien zu entsorgen (vgl. Anhang 1 DVO). Die Verwendung von Teer im Verkehrsflächenbau, war bis ca. 1980 gestattet (LUBW, 2017). Die Haltbarkeit dieser Flächen beträgt in etwa 15–30 Jahre, somit fielen und fallen bei Sanierungsarbeiten in den letzten Jahren verstärkt belastete Teerabfälle an (Bernard & Schmeling-Braz, 2014). 2018 wurden 2,003 Mio. t Bitumen- und Asphaltabfällen in Österreich gesammelt. 1,613 Mio. t wurden behandelt und 0,49 Mio. t deponiert. Straßenaufbruch ist in der Höhe von 0,722 Mio. t angefallen, 0,716 Mio. t davon wurden einer Behandlung zugeführt und lediglich 0,013 Mio. t deponiert. Pechhaltige Abfälle werden im Statusbericht 2020 nicht eigens und Dachbahnen zusammen mit „Brandschutt oder Bauschutt mit schädlichen Verunreinigungen“ erhoben (BMK, 2020). Ein Nachteil von Bitumen ist seine erschöpfliche Recyclingfähigkeit, aufgrund von Alterungsprozessen des Materials (Thienel, 2018).

Grundsätzlich kann daraus geschlossen werden, dass die drei Abfallströme beträchtliche negative Einflüsse auf Mensch und Umwelt haben können, besonders bei unsachgemäßer Handhabung. Problematisch sind an sich nicht die Materialien selbst, sondern die enthaltenen oder gebildeten Schadstoffe. Ziel muss die Substitution „benötigter“ schädlicher Substanzen (z. B. HBCD für Flammschutz) und die Unterbindung der Bildung dieser Stoffe sein. Die Freisetzung und Entstehung von Schadstoffen ist hauptsächlich auf Verbrennungsprozesse zurückzuführen sowie von enthaltenen Materialien (z. B. PVC) abhängig.

Die Zusammensetzung von Brandschutt ist sehr divers. Organische und mineralische Bestandteile liegen in unterschiedlichen Größen, Beschädigungs- und Verschmutzungsgraden vor. Um die Mengen an Brandschutt, die dadurch gesundheitlich und umweltschädigend sind, zu reduzieren bzw. den Lagerrückstau abzubauen, können ausschließlich Brandvorsorge, händisches Aussortieren wiederverwendbarer/stofflich verwertbarer Objekte und Innovation im Bereich der Behandlungsanlagen beitragen. Bis entsprechende Technologien verfügbar sind, die unbeschädigtes und nutzbares Rezyklat aus Brandschutt generieren, ist deponierbares Material zu beseitigen und der Rest ordnungsgemäß zwischenzulagern. Doch eine Lagerung auf ungewisse Zeit ist, anlässlich entstehender Lagerkosten und schwindender Lagerkapazitäten, utopisch.

Eben selbiges trifft auf XPS-Dämmplatten zu, wenn keine kontinuierlich verfügbaren und ordnungsgemäßen Verwertungsmöglichkeiten gegeben sind. Extrudiertes Polystyrol ist rückzubauen und zu sammeln. Die Recycling-BaustoffVO schreibt ein Entfernen von (H)FCKW-haltigen Dämmstoffen vor, bevor maschinelle Unterstützung (z. B. Bagger) erfolgen darf (*Recycling-Baustoffverordnung, 2015*). Durch behutsamen Rückbau ließe sich das Aufkommen von XPS-Abfällen reduzieren, da der wiederverwendbare Anteil zunehmen würde (*Daxbeck & Buschmann, 2012*). Erfolgen die Abbrucharbeiten von Beginn an maschinell, besteht größere Gefahr, belastetes Dämmmaterial zu beschädigen und enthaltene Schadstoffe freizusetzen. Gleichzeitig ist zu erwähnen, dass nicht jede XPS-Platte FCKW beinhaltet, doch ist bei „Unwissenheit“ das gesamte Material als gefährlich zu betrachten. Der Abrissprozess wird durch Maschineneinsatz erleichtert und beschleunigt. Im Nachhinein ist das XPS, mittels Windsichter o.Ä., aus dem Bau-Abbruchmaterial auszusortieren (*Eibensteiner, 2016*). Gemäß *Eibensteiner (2016)* befinden sich in 5 % der Baustellenabfällen und Abbruchmaterialien XPS-Abfälle. Eine separate Mengenerhebung von rückläufigem XPS aus dem Baugewerbe ist aktuell nicht verfügbar. Die chemische Analyse erfolgt ausschließlich gemeinsam mit Bau- und Abbruchabfällen sowie Baustellenabfällen. Diese „Verdünnung“ erschwert eine konkrete Aussage über tatsächliche Mengen von XPS-Abfällen (*Eibensteiner, 2016*). Ein weiteres Problem ist, wie erwähnt, die Verwertung, denn Anlagen für eine stoffliche Nutzung sind Mangelware. Weltweit gibt es gegenwärtig nur vier Anlagen und einzig eine davon ist „XPS-tauglich“ und befindet sich in den Niederlanden (*CreaCycle GmbH, s.a.*). Zusätzlich erschwert die reglementierte Annahmemenge von XPS in Verbrennungsanlagen, Entsorgungsunternehmen ihre Lagerbestände abzubauen und einer thermischen/energetischen Verwertung zuzuführen. Somit kommt es auch hier zur kontinuierlichen Zunahme des Lagerstockes.

Problemloser erscheint der ordnungsgemäße Umgang mit Teerabfällen, jedoch kann es bei falscher Lagerung von rückgebautem Material zur Bildung von belastetem Eluat kommen, das umweltschädigend wirken kann (*LfU Bayern, 2019*). Auch eventuell anhaftende problematische Verbundmaterialien (z. B. Asbest) können die Gefahrenrelevanz des Teerabfalls beeinflussen. Abläufe und Infrastrukturen hinsichtlich Wiederverwendung und stofflicher Verwertung dieser Materialien sind, im Gegensatz zu Brandschutt und XPS, praxistauglicher und bereits vorhanden. Die Notwendigkeit bezüglich des Ausbaus von belastetem Asphalt ist zu überdenken, denn die Verwertung von zu stark belastetem Material ist durch die Qualitätsklassen-Anforderung der Recycling-BaustoffVO untersagt (*Westermayer & Rosenberger, 2018*).

7.2 Behandlungs- und Verwertungsmaßnahmen für Brandschutt, XPS und Teerabfälle im Sinne der Kreislaufwirtschaft

Brandschutt ist grundsätzlich ordnungsgemäß zu deponieren. In genehmigten Ausnahmefällen darf er stofflich verwertet werden, doch gibt es gegenwärtig keine Technologien, um schadenfreies Rezyklat zu gewinnen (*Schmederer, 2015*). Die Qualitätsklassen der Recycling-Baustoffe sind in Anhang 1 und die Grenzwerte in Anhang 2 der Recycling-Baustoffverordnung angeführt. Ein Parameter der Grenzwerte ist unter anderem der PAK-Gehalt, der z. B. für die Qualitätsklasse U-A bei 12 mg/kg TM und für die Qualitätsklasse U-B bei 20 mg/kg TM (Gesteinskörnungen für ungebundenen, hydraulischen oder bituminösen gebundenen Einsatz) beträgt (*Recycling-Baustoffverordnung, 2015*). Es gibt jedoch keine Vorgaben für den Gehalt von Dioxinen, polychlorierten Biphenylen und fluorhaltigen Tensiden. Wiederverwendung von Brandschutt bedeutet derzeit, wiederverwendbare Teile auszusortieren bzw. unbeschadetes Mauerwerk und Gebäudekomponenten (z. B. Türen, Fenster), im Zuge des partiellen Rückbaues, für den Wiederaufbau zu erhalten. Metalle sind aufzubereiten und können stofflich verwertet oder weiterverkauft werden. Brandrückstände können gemeinsam mit Siedlungsabfällen, in einer konventionellen Abfallverbrennungsanlage, thermisch verwertet werden. Als gefährlich eingestuft Brandschutt ist nach einer Einzelprüfung thermisch zu verwerten/zu entsorgen. (*Schmederer, 2015*)

Extrudiertes Polystyrol kann in unbeschadetem Zustand wiederverwendet werden. Einzig die CreaSolv©-Methode macht eine stoffliche Nutzung von XPS möglich. Hierbei wird das Material mit einem umweltfreundlichen, kennzeichnungsfreien spezifischen Lösungsmittel versetzt, niedermolekulare Störstoffe werden abgetrennt und ein patentiertes Fällungsmittel beigegeben, um die Polystyrol-Makromoleküle auszufällen. Das gewonnene Rezyklat wird getrocknet und kann wieder in den Herstellungsprozess rückgeführt werden (*Fraunhofer IVV, 2020; Barner, et al., 2010*). Allerdings wird XPS derzeit hauptsächlich einer thermischen oder energetischen Verwertung zugeführt, die in Abfall- oder Mitverbrennungsanlagen erfolgen kann. Der Verbrennungsvorgang muss sachgemäß ablaufen, um einer Schadstoffentwicklung vorzubeugen (*Daxbeck & Buschmann, 2012*). Enthaltene HBCD wird zerstört und das Brom bleibt als Bromsalz zurück (*Wurbs, et al., 2017*).

Teerabfälle können mittels Heiß- oder Kaltmischverfahren stofflich verwertet, in mechanischen Aufbereitungsanlagen behandelt oder in thermischen Anlagen verwertet werden (*LUBW, 2017*). Für die Deponierung sind, die in der DVO geregelten, Grenzwerte und Anforderungen einzuhalten. Die stoffliche Verwertung von belastetem und verunreinigtem Material ist untersagt. Ausgenommen schwach belastetes darf, laut Recycling-BaustoffVO, als Rezyklat der Qualitätsklasse B-C in neue Asphaltmischungen eingebracht werden (*Recycling-Baustoffverordnung, 2015*). Nicht kontaminierter Bitumen- und Ausbausphalt können problemlos stofflich verwertet werden. Dazu stehen nach einem Zerkleinerungsprozess das Heißmisch-, Kaltmisch- und Oberflächen-Recycling zur Verfügung (*Thienel, 2018*). Ein innovatives Gegenstrom-Verfahren bietet das patentierte Physitron Asphalt Recycling, das neben Energie- und Emissionseinsparung eine Recyclingquote von über 90 % erreicht (*Wirtgen Group, s.a.*). Bitumen-/pechhaltige Dachbahnen dürfen nicht deponiert werden, da der org. Anteil und Brennwert die Zielvorgabe der DVO übersteigen, sondern müssen einer energetischen bzw. thermischen Verwertung zugeführt werden.

Dieses Vorgehen entspricht der Abfallmaßnahmenhierarchie, da die Verwertung in der Hierarchie über der Deponierung positioniert ist und ist dadurch „hochwertiger“ zu bewerten. Aufgrund des hohen Heizwertes ist die Beimischung in Abfallverbrennungsanlagen gestattet. Ebenso ist die Anwendung als Ersatzbrennstoff in Mitverbrennungsanlagen möglich (LUBW, 2017). Das niederländische Unternehmen Recycling Combinatie B.V. hat eine Reinigungsanlage entwickelt, um pechhaltigen Straßenaufbruch in seine Ausgangsmaterialien (z. B. Sand) zu demontieren und parallel dazu problematische Stoffe und Verbindungen zu vernichten (N.N., 2018). Die Deponierung von kontaminierungsfreiem Bitumen, Asphalt und Straßenaufbruch, ist auf Baurestmassen-, Reststoff- und Massenabfalldeponien möglich. Eine Ablagerung dieser Materialien darf ohne analytische Untersuchungen, für die Abfallcharakterisierung, auf Baurest- und Massenabfalldeponien erfolgen. Zusätzlich dürfen die Teerabfälle hier mit bis zu 10 Vol.-% an Metallen, Kunststoffen und organischen Bestandteilen versetzt sein, ausgenommen sind Baustellenabfälle (vgl. Anhang 2 DVO). Im Bauwesen ist es Usus unbelastete Ausbausphalte wiederzuverwenden oder zu recyceln. Pechhaltige und belastete Straßenschichten sind möglichst im Erdreich zu belassen und mit der neuen Bitumen-/Asphaltschicht zu überdecken. Bei einer Überschreitung des PAK-Gehalts von ≤ 10 mg/kg wäre das Straßenmaterial thermisch zu verwerten oder sachgemäß zu lagern (Bernard & Schmeling-Braz, 2014). Für die Verwertung von belastetem Asphaltaufbruch hat ein niederländische Unternehmen eine innovative Technologie entwickelt. Schadstoffe werden zerstört und gleichzeitig werden enthaltene Komponenten (Sand, Kies und Füller) für den stofflichen Einsatz aufbereitet (N.N., 2020).

Gäbe es entsprechende Behandlungsinfrastrukturen mit ausreichenden Kapazitäten, so wäre die Abfallzunahme in den Lagern bzw. auf den Sammelplätzen der Entsorgungsunternehmen, nur eine Auffälligkeit in den Statistiken. Vorgeschriebene Grenzwerte sowie verbotene Inhaltsstoffe schränken die obertägige Deponierung ein. Um den rechtlichen Rahmen einhalten zu können und die Zunahme der Lagerbestände an Brandschutt, XPS und Teerabfälle reduzieren, sind die dafür notwendigen technischen Voraussetzungen erforderlich. Betreffend Brandschutt, müsste eine Technologie entwickelt werden, die unbeschädetes Rezyklat hervorbringt und entsprechende Stör- und Schadstoffe abtrennt. Das ist bis dato nicht der Fall und auch ein Mitgrund dafür, dass Brandschutt ausschließlich thermisch verwertet und deponiert wird (Schmederer, 2015). Sollten die geltenden Grenzwerte jedoch überschritten werden, steht keine alternative Behandlungsform zur Verfügung. Weiters ist zu beanstanden, dass ausschließlich der PAK-Gehalt in der BaustoffrecyclingVO unter den Parametern und Grenzwerten angeführt ist. Hingegen für die Verwertung von Kunststoffen (XPS) wurden bereits Konzepte erdacht und in Anlagen umgesetzt bzw. geplant (CreaCycle GmbH, s.a.). Doch ist hier die äußerst limitierte Verfügbarkeit das zentrale Problem. Zusätzlich müssen ausreichende Kapazitäten gegeben und eine einheitliche Sammellogistik geschaffen werden. Dabei sind die ökonomischen Faktoren zu beachten. Die einzige Verwertungsanlage für Polystyrol-Dämmmaterial (CreaSolv©-Anlage) wurde bisher in den Niederlanden errichtet. (CreaCycle GmbH, s.a.)

7.3 Abhilfe durch die Richtlinie 2012/18/EU im Umgang mit problematischen Abfallströmen

Das Ziel der Seveso-III-RL ist es, Störfälle in Industrieanlagen zu verhindern, die mit gefährlichen Substanzen oder Gemischen hantieren (*Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2012*). Momentan sind Praxisbehelfe und praxisorientierte Anleitungen für die betriebliche Umsetzung verfügbar. Eine greifbare Unterstützung im Umgang mit bzw. für die Einstufung von Abfällen ist dadurch nicht gegeben. Die Anmerkungen im Abfallverzeichnis alleine sind für eine Gefahrenabschätzung unzureichend, da diese oft ungenau und unvollständig, hinsichtlich klarer Definitionen bzw. Konzentrationsmengen, sind (*Götz, et al., 2016*).

8 Schlussfolgerung und Empfehlungen

Wie einleitend erwähnt, sind Lagerung und Behandlung von problematischen Abfallströmen, im Sinne der Kreislaufwirtschaft, ein gewichtiges Problem für Entsorgungsunternehmen. Im Verlauf der Ausarbeitung dieser Masterarbeit konnten nur bedingt Lösungen, für die in der Einleitung angeführten Probleme, recherchiert werden.

Basierend auf einer Literaturrecherche werden in dieser Arbeit relevante gesetzliche Vorgaben und die ausgewählten Abfallströme Brandschutt, extrudiertes Polystyrol und Teerabfälle beleuchtet. Die zentralste Problematik dieser Abfallströme bilden die enthaltenen problematischen bzw. gefährlichen Substanzen, die eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Auch sind Alternativen und Verfügbarkeit von Behandlungsanlagen zu bemängeln, demzufolge auch die fehlenden Kapazitäten, für die ordnungsgemäße Verwertung dieser Abfallströme.

Es zeigte sich, dass die Richtlinie 2012/18/EU (Seveso-III-RL) und die Richtlinie 2010/75/EU (IE-RL) keine wesentliche Unterstützung im Umgang mit diesen Abfällen gewähren. Die Inanspruchnahme der Richtlinien würde sich bezahlt machen, sobald im Betrieb mit einer großen Menge an gefährlichen Stoffen hantiert wird oder regelmäßig hohe Emissionsbelastungen zu erwarten sind. Überraschende Erkenntnisse waren, dass die Seveso-III-RL sowie die IE-RL keine klare Hilfestellung hinsichtlich Abfalleinstufung bieten. Um die Seveso-Relevanz der problematischen Abfallströme Brandschutt, XPS und Teerabfälle zu prüfen, muss die Seveso-Einstufung und Methodik angepasst werden. Dazu könnte der Kennzeichnungsschlüssel des (Gefahrgut-)Transportes herangezogen werden, der auf die Abfallbewertung umgelegt wird. Die Seveso-III-RL kommt erst ab entsprechenden Mengenschwellen von „Seveso-Stoffen“ (siehe Anhang 6 AWG) zu tragen. Werden diese Mengen nicht erreicht oder die Eigenschaften von Abfällen so charakterisiert, dass diese nicht Seveso-relevant sind, ist die Seveso-III-RL hinfällig. Eine klare Hilfestellung und Unterstützung für die Bestimmung der Seveso-Relevanz von Abfällen bräuchte eine Novellierung der Seveso-III-RL, in der ein Absatz oder Anhang detaillierte Anhaltspunkte und Vorgaben für die Praxis beinhaltet. Ausreichend wäre ebenfalls ein Praxisbehelf o.Ä. für diesen Vorgang, der vom Umweltministerium oder Umweltbundesamt ausgearbeitet wird. Die Schwierigkeit dabei ist die inhomogene Zusammensetzung von Brandschutt, XPS und Teerabfällen. So könnten Abfälle aufgrund unterschiedlicher Konzentrationen, einmal als ungefährlich und ein anderes Mal als Seveso-relevant eingestuft werden, obwohl die gleichen Stoffe enthalten sind. Angesichts dieser Komplexität ist die Anwendung der Seveso-III-RL in diesem Zusammenhang zu reflektieren.

Brandschutt wird gegenwärtig ausschließlich thermisch verwertet oder auf Deponien abgelagert. Zuvor sollten manuelle Sortierungsprozesse vorgeschaltet werden, um wiederverwendbares, organisches und mineralisches Material zu separieren. Anfallendes Brandholz kann einer thermischen/energetischen Verwertung zugeführt werden. Das organische Material kann gemeinsam mit Siedlungsabfällen in Abfallverbrennungsanlagen verwertet und die mineralischen Bestandteile deponiert werden. Im Idealfall wird das zu deponierende Material thermisch vorbehandelt, um enthaltene Schadstoffe zu zerstören. Eine thermische Behandlung dieses Materials

wäre optimal, jedoch aus wirtschaftlichen und infrastrukturellen Gründen in der Realität derzeit kaum umsetzbar.

Der Zustand von XPS-Dämmplatten hängt von der Rückbauweise der Baufirmen und deren Umgang mit dem Baustoff ab:

- Manueller Rückbau hat einen höheren wiederverwendbaren Anteil zufolge als unvorsichtiger maschineller.
- Ebenso relevant ist die Trennung der Baustellenabfälle in diverse Fraktionen und die gewissenhafte Gefahreinstufung des Materials.

Entsorgungsunternehmen sollten an all diesen Faktoren Interesse haben und ihnen eine wichtige Rolle für den nachfolgenden Behandlungsverlauf zuweisen. Ein Ziel könnte sein, die Wichtigkeit des ordnungsgemäßen Umgangs mit XPS zu kommunizieren. Als Medium dafür, könnten Social-Media, Aussendungen, Werbeflyer oder Informationspassagen/Klauseln in Kundenverträgen dienen. Betont gehört, dass unversehrtes Material die Umwelt schont und die Entsorgung entlastet. Eine Optimierung der Transportlogistik könnte einen weiteren Vorteil für die Entsorger darstellen.

- Wiederverwendbare Dämmplatten sollten gesondert von beschädigtem gefährlichem und nicht gefährlichem Material gesammelt werden.
- Die Sammlung sollte platzsparend erfolgen, um die Wirtschaftlichkeit des Transportes zu gewährleisten. Dafür könnten unversehrte Platten auf Paletten oder in (Mulden-)Container gestapelt werden.
- Beschädigtes ungefährliches Material könnte in geschlossenen Presscontainern (Container mit inkludierter Presse) gesammelt werden, um das Volumen der XPS-Dämmplatten zu verringern.
- Gefährliches XPS müsste weiterhin behutsam in (Mulden-)Container gesammelt und transportiert werden.

Um einen Lagerrückstau des XPS, aufgrund Annahmemengenbeschränkungen in Verbrennungsanlagen, zu vermeiden, sollten Vereinbarungen mit den Anlagenbetreibern getroffen werden. Inhalt dieser könnten fixe Abnahmemengen pro definierte Zeiteinheit (z. B. Woche, Monat) sein. Dies würde zu einer besseren Planbarkeit für alle Beteiligten beitragen.

Für die Behandlung von Teerabfällen, besonders Ausbauasphalt/Straßenaufbruch, könnten Kooperationen mit Asphaltaufbereitungs- und Asphaltmischanlagen erfolversprechend sein. So würde sich die zu deponierenden Mengen, um jenen Anteil des unbelasteten Materials, reduzieren. Der Rest, also belastete und nicht stofflich verwertbare Teerabfälle (z. B. Teerpappe, Bitumen-/Pechbahnen) müssten wie bisher deponiert bzw. thermisch/energetisch verwertet werden. Im Umgang mit belastetem Teerabfall ist auf entsprechende Sorgfalt zu achten. Ein Kritikpunkt bezüglich der thermischen Verwertung von bitumen-/pechhaltigen Dachbahnen in Mitverbrennungsanlagen sind fehlende Parameter und Grenzwerte in der AbfallverbrennungsVO.

Die Gefahren der einzelnen Abfallströme sind bereits bekannt und, durch ordnungsgemäße Handhabung, beherrschbar. Im Umgang mit Brandschutt bleibt, neben der Aussortierung von wiederverwendbarem/Re-Use-fähigem Material (z. B. unbeschädigte Fensterrahmen) derzeit nur die Beseitigung durch Deponierung. Verwertungsmethoden, die ein schadstoffreies Rezyklat zu Folge hätten, fehlen noch

gänzlich. Gegensätzlich dazu, sind bereits Behandlungsanlagen für extrudiertes Polystyrol und Teerabfälle vorhanden. XPS wird hauptsächlich thermisch verwertet, im Gegensatz dazu gibt es für Teerabfälle schon stoffliche Verwertungsmöglichkeiten, jedoch werden diese in Österreich weiterhin auch deponiert. Die stoffliche Verwertung von extrudiertem Polystyrol ist längst technisch umgesetzt, doch ist weltweit aktuell nur eine einzige Anlage, in den Niederlanden, verfügbar.

In Zukunft könnten Brandschutt, XPS und Teerabfälle weniger problematisch für österreichische Entsorgungsunternehmen sein, wenn entsprechende, z. B. die in dieser Arbeit erwähnten, Behandlungsanlagen/-technologien regional/national verfügbar sind. Ebenso werden die Abfallmengen von extrudiertem Polystyrol rückläufig sein, da zunehmend alternative Dämmmaterialien im Bauwesen Einsatz finden werden. Brandschutt und Teerabfälle werden unvermeidbar bleiben, doch auch hier sollte der Fokus auf stoffliche Verwertungsmethoden gelegt werden.

Die Empfehlungen für Entsorgungsunternehmen resultieren aus einer Kombination von abgeleiteten Ergebnissen der Literaturrecherche, eigenem Fachwissen, eigener und zugetragener fachspezifischer Erfahrungen.

Literatur zu dieser Thematik ist sehr differenziert verfügbar. Beispielsweise ist für Teerabfälle, besonders Asphalt und Teer, ausreichend Literatur vorhanden, wie auch für XPS. Im Gegensatz dazu, ist für Brandschutt so gut wie kein qualitatives Schriftmaterial präsent. Um einen noch klareren Einblick in diese Themenstellung zu erhalten, müsste eine verbesserte Verfügbarkeit an entsprechender Literatur und eventuell vertiefende Forschungsaktivitäten vorgenommen werden.

Grundsätzlich müssten sich alle österreichischen Entsorgungsunternehmen zusammenschließen, um auf politischer Ebene für die Förderung von innovativen Behandlungsanlagen einzustehen. Denn notwendiges Know-how und Technologien sind im Ausland, wie z. B. in den Niederlanden, verfügbar. Diese müssten nur eingeholt und dementsprechend umgesetzt werden. Dadurch ließe sich zu mindestens ein Großteil der gelagerten XPS- und Teerabfälle sowie das zu deponierende Material vermeiden. Aktuell werden diese Abfallströme thermisch oder energetisch verwertet oder auf Deponien eingebracht. Innovationen im Bereich der stofflichen Verwertung, die große Kapazitäten aufweisen, Schadstoffe zerstören und unversehrtes Recyclingmaterial als Output generieren, könnten dazu beitragen, schadenfreies Rezyklat aus Brandschutt zu gewinnen.

9 Literaturverzeichnis

- ÖXPS, 2019. *Kennzeichnung und Beurteilung von XPS-Dämmstoffplatten in Österreich*. Österreichischer Fachvereinigung Polystyrol-Extruderschäum (ÖXPS). [Online] Available at: [http://hec02-03.ebau.at/oexps/wp-content/uploads/2020/03/OXPS Schreiben zur XPS Entsorgung 2019.pdf](http://hec02-03.ebau.at/oexps/wp-content/uploads/2020/03/OXPS_Schreiben_zur_XPS_Entsorgung_2019.pdf) [Zugriff am 24 August 2020].
- Abfallverbrennungsverordnung, 2013. *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über die Verbrennung von Abfällen (Abfallverbrennungsverordnung – AVV)*. iFv: 27. April 2021 [Online] Available at: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002239> [Zugriff am 27 April 2021].
- Abfallverzeichnisverordnung, 2002. *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung)*. iFv: 27. April 2021 [Online] Available at: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002239> [Zugriff am 27 April 2021].
- Abfallwirtschaftsgesetz, 2002. *Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002)*. iFv: 27. April 2021. Rechtsinformationssystem des Bundes. [Online] Available at: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086> [Zugriff am 27 April 2021].
- AGES, 2019. *FAQ zu Furan*. Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES). [Online] Available at: <https://www.ages.at/themen/rueckstaende-kontaminanten/furan/> [Zugriff am 26 November 2020].
- AGES, 2020. *Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)*. Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES). [Online] Available at: <https://www.ages.at/themen/rueckstaende-kontaminanten/polyzyklische-aromatische-kohlenwasserstoffe-pak/> [Zugriff am 2 Dezember 2020].
- Allgemeine Abwasseremissionsverordnung, 1996. *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen (Allgemeine Abwasseremissionsverordnung – AAEV)*. iFv: 27. April 2021. Rechtsinformationssystem des Bundes. [Online] Available at: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002086>

setzesnummer=10010977

[Zugriff am 27 April 2021].

Andersson-Sköld, Y. et al., 2007. *Coal Tar-Containing Asphalt: Resource or Hazardous Waste?*, New Haven: Journal of Industrial Ecology.

Barner, L. et al., 2010. *Hochwertige technische Polymercompounds aus E/E-Altgeräten.* docplayer. [Online]

Available at: <http://docplayer.org/6708972-Hochwertige-technische-polymercompounds-aus-e-e-altgeraeten.html>

[Zugriff am 27 Mai 2021].

Behnke, A. et al., 2018. *Dioxine und dioxinähnliche PCB in Umwelt und Lebensmittelketten.* Umweltbundesamt. [Online]

Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018_10_uba_hg_dioxine_bf_neu.pdf

[Zugriff am 21 November 2020].

Bernard, C. & Schmeling-Braz, F., 2014. *Pechhaltiger Straßenaufbruch.* LfU Bayern. [Online]

Available at: https://www.baysf.de/fileadmin/user_upload/01-ueber_uns/05-standorte/FB_Berchtesgaden/PK_Kehlstein/09_aktuelles_Merkblatt_LfU_zu_teerhaltigem_Strassenaufbruch.pdf

[Zugriff am 30 Jänner 2021].

Bernhardt, A. et al., 2019. *Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen.* Umweltbundesamt [Online]

Available at: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0697.pdf>

[Zugriff am 18 Dezember 2020].

BG RCI & BGHM, 2020. *Dicumylperoxid (DCP).* GisChem. [Online]

Available at: https://www.gischem.de/download/01_0-000080-43-3-000000_1_1_209.PDF

[Zugriff am 11 Jänner 2021].

BMK, 2016. *Abfallverzeichnis.* Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). EDM Portal. [Online]

Available at: https://secure.umweltbundesamt.at/edm_portal/cms.do?get=/portal/informationen/abfallverzeichnis.main

[Zugriff am 19 November 2020].

BMK, 2020. *Allgemeines zur Abfallwirtschaft.* Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). österreich.gv.at. [Online]

Available at: https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/abfall/1/Seite.3790060.html

[Zugriff am 23 Februar 2021].

BMK, 2020. *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich.* Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und

- Technologie (BMK). [Online]
 Available at: <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/abfall/abfall-daten>
 [Zugriff am 13 August 2020].
- BMLFUW, 2012. *Nationaler Durchführungsplan 2012 samt Nationalem Aktionsplan für das Stockholmer Übereinkommen über Persistente Organische Schadstoffe sowie die EU-Verordnung über Persistente Organische Schadstoffe*, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW). [Online]
 Available at: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/chemiepolitik/international/pop.html
 [Zugriff am 15 Februar 2021].
- BMU, 2002. *Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). [Online]
 Available at: <https://www.bmu.de/gesetz/richtlinie-199931eg-ueber-abfalldeponien/>
 [Zugriff am 24 Februar 2021].
- BNT, 2017. *Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 (Teil 1)*, Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BNT)
- Bourguignon, D., 2016. *Closing the loop - new circular economy package*. European Parliament. [Online]
 Available at: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS_BRI%282016%29573899_EN.pdf
 [Zugriff am 24 Februar 2021].
- Brück, J., 2015. *Einflüsse von niedrig dosiertem Furan auf Leber in vivo und vitro*. KLUEDO. [Online]
 Available at: https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/deliver/index/docId/4194/file/Dissertation_Brueck.pdf
 [Zugriff am 30 November 2020].
- Brandt, M. & Einhenkel-Arle, D., 2016. *Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe*. Umweltbundesamt. [Online]
 Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/polyzyklische_aromatische_kohlenwasserstoffe.pdf
 [Zugriff am 2 Dezember 2020].
- Brupbacher, A. & Rubli, S., 2016. *Entsorgungssituation von Dämmmaterialien in der Schweiz*, Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Bunge, F. & Merkel, H., 2011. *Polystyrol-Extruderschaum mit verbesserten wärmetechnischen Eigenschaften – Entwicklung, Prüfung und Anwendung*, Berlin: Ernst & Sohn für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,.
- Circular Futures, s.a. *EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft*. Circular Futures. [Online]

- Available at:
<https://www.circularfutures.at/themen/kreislaufwirtschaftspolitik/eu-klw-aktionsplan-2020/>
 [Zugriff am 24 Februar 2021].
- Circular Futures, s.a. *EU-Abfallpaket 2018*. Circular Futures. [Online]
 Available at: <https://www.circularfutures.at/themen/stakeholderprozesse/abfall-und-recycling/>
 [Zugriff am 24 Februar 2021].
- CreaCycle GmbH, s.a.. *CreaCycle GmbH*. [Online]
 Available at: <https://www.creacycle.de/de/creasolv-werke.html>
 [Zugriff am 11 März 2021].
- Daxbeck, H. & Buschmann, H., 2012. *Aufkommen von Dämmstoffen im Öö. Wohnbau und künftige Anforderungen aus Sicht der Abfallwirtschaft*. Land Oberösterreich. [Online]
 Available at: https://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/projekt_ADOSA_Endbericht.pdf
 [Zugriff am 20 August 2020].
- Dehoust, G., Jepsen, D., Knappe, F. & Wilts, H., 2013. *Inhaltliche Umsetzung von Art. 29 der Richtlinie 2008/98/EG - wissenschaftlich-technische Grundlagen für ein bundesweites Abfallvermeidungsprogramm (Kurzfassung)*. Umweltbundesamt. [Online]
 Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/texte_38_2013_abfallvermeidungsprogramm_kurz_krause_0_0.pdf
 [Zugriff am 22 Februar 2021].
- Echte, A., Haaf, F. & Hambrecht, J., 1981. *Fünf Jahrzehnte Polystyrol - Chemie und Physik einer Pioniersubstanz im Überblick*, Weinheim: Verlag Chemie GmbH.
- EGGBI, s.a. *PAK*. Europäische Gesellschaft für Bauen und Innenraumhygiene (EGGBI). [Online]
 Available at: <https://www.eggbi.eu/forschung-und-lehre/zudiesemthema/pak/>
 [Zugriff am 2 Februar 2021].
- Eibensteiner, F., 2016. *EPS/XPS Recycling Baubereich Endbericht*. Land Oberösterreich. [Online]
 Available at: https://www.land-oberoesterreich.gv.at/Mediendateien/Formulare/Dokumente%20UWD%20Abt_US/us_AWBO_Endbericht_Studie_STREC_EPS_XPS_Recycling.pdf
 [Zugriff am 17 November 2020].
- Ellen MacArthur Foundation, 2019. *Ellen MacArthur Foundation*. [Online]
 Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/infographic>
 [Zugriff am 24 Februar 2021].
- Europäische Kommission, 2020. *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft - Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa*. EUR-Lex. [Online]

Available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF
[Zugriff am 24 Februar 2021].

Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2006. *VERORDNUNG (EG) Nr. 1907/2006 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission.* EUR-Lex. [Online]
Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006R1907-20140410&from=DE>
[Zugriff am 24 April 2021].

Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2010. *RICHTLINIE 2010/75/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung).* EUR-Lex. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:de:PDF>
[Zugriff am 24 April 2021].

Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2012. *RICHTLINIE 2012/18/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates.* EUR-Lex. [Online]
Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0018&from=EN>
[Zugriff am 24 April 2021].

Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2019. *VERORDNUNG (EU) 2019/1021 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe.* EUR-Lex. [Online]
Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1021&from=DE>
[Zugriff am 24 April 2021].

European Commission, s.a. *Waste prevention and management.* European Commission. [Online]
Available at: https://ec.europa.eu/environment/green-growth/waste-prevention-and-management/index_en.htm
[Zugriff am 23 April 2021].

Fink, G., 2006. *Kunststoffe - Synthese, Herstellungsverfahren, Apparaturen.* 1. Auflage Hrsg. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- Fraunhofer IVV, 2020. *Kunststoff-Recycling - CreaSolv® Prozess*. Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV. [Online] Available at: <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/kunststoff-recycling.html#creasolv> [Zugriff am 12 November 2020].
- Gewerbeordnung, 1994. *Gewerbeordnung 1994 – GewO 1994*. iFv: 27. April 2021. Rechtsinformationssystem des Bundes. [Online] Available at: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10007517> [Zugriff am 27 April 2021].
- Götz, H. et al., 2016. Einordnung von Abfällen in die Seveso III-Richtlinie: Empfehlung und Praxisbehelf, Wien: BMLFUW. [Online] Available at: <https://www.moew.government.bg/static/media/ups/tiny/промяна/GN-Einordnung%20Seveso%20III-RL%20Mai%202016%20barrierefrei.pdf> [Zugriff am 15 Februar 2021].
- Garcia, M. T. et al., 2009. *Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents*, Dordrecht: Springer.
- Institut Bauen und Umwelt e.V., 2010. *XPS - Extrudierter Polystyrolschaum*. [Online] Available at: <http://docplayer.org/39438164-Umwelt-produktdeklaration.html> [Zugriff am 24 August 2020].
- Kaftory, M., 2003. The structural chemistry of phenols. In: Z. Rappoport, Hrsg. *The chemistry of phenols*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, pp. 199-223.
- Karsten, W., s.a. PHYSITRON Asphalt Recycling. *G-Technology GmbH*. [Online] Available at: http://www.physitron.eu/joomla_2/index.php/de/forschung-und-entwicklung/physitron-asphalt-recycling [Zugriff am 11 Februar 2021].
- Land OÖ, s.a. *Leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX)*. Land-Oberösterreich. [Online] Available at: <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/154256.htm> [Zugriff am 9 Februar 2021].
- Leisewitz, A. & Schwarz, W., 2000. *Flammhemmende Ausrüstung ausgewählter Produkte - anwendungsbezogene Betrachtung: Stand der Technik, Trend, Alternativen*, in: Umweltbundesamt (Hrg.): *Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel*, Band II, Berlin [Online] Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/1966.pdf> [Zugriff am 18 Jänner 2021].
- LfU Bayern, 2011. *Schadstoffe bei Brandereignissen*. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU Bayern). ARGUK. [Online] Available at: <https://www.arguk.de/leistung/gebaeude/documents/Schadstoffe->

- bei-Brandereignissen.pdf
[Zugriff am 12 August 2020].
- LfU Bayern, 2019. *Umweltfachliche Beurteilung der Lagerung, Aufbereitung und Verwertung von Straßenaufbruch*. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU Bayern). [Online] Available at: https://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil3_grundwasser_und_boden/doc/nr_341.pdf
[Zugriff am 9 Februar 2021].
- LfU Bayern, 2020. *BTEX-Aromaten*. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU Bayern). [Online] Available at: https://www.lfu.bayern.de/abfall/schadstoffratgeber_gebaeuderueckbau/suchregister/doc/503.pdf
[Zugriff am 9 Februar 2021].
- Liederer und Tenschert GbR, 2020. *Unterweisung Gefahrstoffe – und ihr sicherer Umgang*. Schulungstool. [Online] Available at: <https://www.schulungstool.de/blog/unterweisung-gefahrstoffe/>
[Zugriff am 24 April 2021].
- LUBW, 2017. *Steckbrief: Bituminöser/teerhaltiger Abfall*. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW). [Online] Available at: https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/documents/10184/151537/Steckbrief+3_17-01-01.pdf/47496776-72d4-408f-b64b-b45acd2d6bff
[Zugriff am 2 Februar 2021].
- Müller, F. et al., 2020. *Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft*. Umweltbundesamt. [Online] Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_04_27_leitlinie_kreislaufwirtschaft_bf.pdf
[Zugriff am 25 Februar 2021].
- N.N., 2018. *REKO investiert EUR 125 Millionen in eine zweite Anlage zur thermischen Reinigung von teerhaltigem Asphaltgranulat*. Port of Rotterdam. [Online] Available at: <https://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemittelungen/reko-investiert-eur-125-millionen-in-eine-zweite-anlage-zur>
[Zugriff am 10 Februar 2021].
- N.N., 2020. *Thermische Behandlung von teerhaltigem Straßenaufbruch*. Recycling Portal. [Online] Available at: <https://recyclingportal.eu/Archive/55625>
[Zugriff am 11 Februar 2021].
- Nguyen, M. T., 2003. General and theoretical aspects of phenols. In: Z. Rappoport, Hrsg. *The chemistry of phenols*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1-199.
- Nierobis, L., 2003. *Wärmedämmstoffe*. [Online] Available at: <http://www.waermedaemmstoffe.com/htm/polystyrol.htm>
[Zugriff am 15 Februar 2021].
- Obernosterer, R., Smutny, R. & Jäger, E., 2007. *Nachhaltige FCKW Bewirtschaftung Österreich*. Ressourcen Management Agentur. [Online]

- Available at: <http://www.rma.at/sites/new.rma.at/files/FCKW-Rueckbau%20Endbericht.pdf>
[Zugriff am 25 November 2020].
- Pfeiffer, A., 2016. *Löschmittel in der Brandbekämpfung*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Potrykus, A. et al., 2020. *Untersuchung von Abfällen auf das Vorkommen nicht-technischer PCB-Kongenere und DecaBDE*. Umweltbundesamt. [Online] Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_111-2020_endbericht_nt-pcb_decabde.pdf
[Zugriff am 21 November 2020].
- Rauscher-Gabernig, E. & Mihats, D., 2011. *Bewertung der Ergebnisse des Monitorings zu Dioxinen und polychlorierten Biphenylen (2005–2011)*. AGES. [Online] Available at: https://www.ages.at/download/0/0/e140a869886fb4143f943ebc2d57ba57ee9eb995/fileadmin/AGES2015/Themen/Schaderreger/Bilder/Rückstände/Kontaminanten/Dateien/Kontaminantenbericht_zu_Dioxinen_PCBs_2005_2011_050315.pdf
[Zugriff am 26 November 2020].
- Rechtsanwaltskanzlei Battenstein & Battenstein, s.a. *Rechtshilfe - Suchen Sie einen Anwalt?*. Asbestmassenklage. [Online] Available at: <https://asbestmassenklage.de/wp-content/uploads/2014/04/inhalation-asbeststaub.png>
[Zugriff am 24 April 2021].
- Recycling-Baustoffverordnung, 2015. *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Pflichten bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten, die Trennung und die Behandlung von bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, die Herstellung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen (Recycling-Baustoffverordnung – RBV)*. Rechtsinformationssystem des Bundes. iFv: 27. April 2021 [Online] Available at: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212>
[Zugriff am 27 April 2021].
- Riechert, A. & Nolle, B., 1999. *Qualität organisieren*, Bonn: Deutscher Asphaltband e.V..
- Schade, C., 2012. *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*. 8. Auflage Hrsg. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Scheidmann, H., 2012. Seveso-III-Richtlinie: Änderungen im Störfallrecht. In: M. Appel, Hrsg. *Immissionsschutz, Band III*. Neuruppin-Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, pp. 111-122. [Online] Available at: https://www.vivis.de/wp-content/uploads/IS3/2012_IS_111_122_Scheidmann.pdf
[Zugriff am 11 Februar 2021].
- Schmederer, J., 2015. *Brandschutt*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. [Online] Available at:

- https://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/entsorgung_einzeln_abfallarten/doc/brandschutt.pdf
[Zugriff am 20 November 2020].
- Schnebele, E. K., 2020. *2017 Minerals Yearbook: Bromine*. USGS - science for a changing world. [Online] Available at: <https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2017-bromi.pdf>
[Zugriff am 5 März 2021].
- Speight, J. G., 2016. *Asphalt Materials Science And Technology*. Oxford - Waltham: Elsevier.
- Sprengard, C., Treml, S. & Holm, A. H., 2013. *Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe*, Gräfelfing: FIW München. [Online] Available at: https://www.ivh.de/wp-content/uploads/2019/09/metastudie_waermedaemmstoffe.pdf
[Zugriff am 15 Februar 2021].
- Thienel, K.-C., 2018. *Werkstoffe des Bauwesens: Bituminöse Baustoffe*, München: Universität der Bundeswehr München. [Online] Available at: <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/bachelorstudium/skriptewerkstoffe/bitumen-2018.pdf/view>
[Zugriff am 27 Jänner 2021].
- Ulrich, H., Gierig, M., Stockerl, R. & Schwarz, J., 2019. *Umweltschonender Einsatz von Feuerlöschschäumen*. Bayerische Staatsregierung. [Online] Available at: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000001?SID=1656410250&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27stmuv_all_00001%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000001?SID=1656410250&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27stmuv_all_00001%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27))
[Zugriff am 7 Dezember 2020].
- Umweltbundesamt, 2006. *Zusammenfassung des Technical Support Document (TSD) zu: Phenol* Umweltbundesamt. [Online] Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/515/dokumente/phenol.pdf>
[Zugriff am 2 Februar 2021].
- Umweltbundesamt, 2014. *PFC in Löschmitteln*. Umweltbundesamt [Online] Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-reach/stoffgruppen/per-polyfluorierte-chemikalien-pfc/pfc-in-feuerloeschmitteln>
[Zugriff am 9 Dezember 2020].
- Umweltbundesamt, 2017. *Dioxine*. Umweltbundesamt [Online] Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/dioxine#was-sind-dioxine-und-dioxinahnliche-pcb>
[Zugriff am 26 November 2020].

- Umweltbundesamt, 2019. *Industrieemissionsrichtlinie*. Umweltbundesamt. [Online]
Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/beste-verfuegbare-techniken/industrieemissionstichtlinie#undefined>
[Zugriff am 1 März 2021].
- Umweltbundesamt, 2020. *Asbest*. Umweltbundesamt. [Online]
Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/asbest#was-ist-asbest>
[Zugriff am 2 Februar 2021].
- Umweltbundesamt, s.a.. *EU Rahmenbedingungen für industrielle Anlagen*. Umweltbundesamt. [Online]
Available at: <https://www.umweltbundesamt.at/industrie/bvt>
[Zugriff am 1 März 2021].
- Umweltdatenbank, s.a. *BTEX* Umweltdatenbank. [Online]
Available at: <https://www.umweltdatenbank.de/cms/lexikon/28-lexikon-b/207-btex.html>
[Zugriff am 9 Februar 2021].
- Westermayer, A. & Rosenberger, R., 2018. *Baurestmassen - Verwertung und Entsorgung*. WKO. [Online]
Available at: <https://www.wko.at/branchen/gewerbe-handwerk/bau/broschuere-baurestmassen.pdf>
[Zugriff am 9 März 2021].
- Wirtgen Group, s.a.. *Beim Asphaltrecycling muss die gesamte Prozesskette stimmen*. Wirtgen Group. [Online]
Available at: <https://www.wirtgen-group.com/de-de/news-und-media/wirtgen-group/asphaltrecycling/>
[Zugriff am 10 Februar 2021].
- Wurbs, J. et al., 2017. *Hexabromcyclododecan (HBCD)*. Umweltbundesamt. [Online]
Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/faq_hbcd_de_17.pdf
[Zugriff am 14 August 2020].
- Wytrzens, H. K., Schauppenlehner-Kloyber, E., Sieghardt, M. & Gratzner, G., 2014. *Wissenschaftliches Arbeiten - Eine Einführung*. Wien: facultas.wuv Universitätsverlag.
- ZAW, s.a.. *Entsorgung von Brandschutt*. Zweckverband Abfallwirtschaft Westsachsen (ZAW). [Online]
Available at: https://www.zaw-sachsen.de/files/Abfallentsorgung/190208_Leitfaden_Entsorgung_Brandschutt.pdf
[Zugriff am 19 November 2020].

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 5-stufige Abfallhierarchie (Umweltamt Stadt Graz, s.a.)	1
Abbildung 2: Waste prevention and management (European Commission, s.a.)	1
Abbildung 3: Graphisches Konzept der Kreislaufwirtschaft (Ellen MacArthur Foundation, 2019).....	2
Abbildung 4: Strukturformel von 2,3,7,8-TCDD auch als Seveso-Gift bezeichnet (Behnke, et al., 2018).....	12
Abbildung 5: Strukturformel von Furan (Brück, 2015).....	13
Abbildung 6: Strukturformel von PCB (Potrykus, et al., 2020).....	13
Abbildung 7: Strukturformel von PCB 126 (Behnke, et al., 2018).....	14
Abbildung 8: Aufbau von PAK anhand der Strukturformel von Benzopyren (Brandt & Einhenkel-Arle, 2016)	15
Abbildung 9: Einsatz von HBCD in EPS und XPS (Eibensteiner, 2016).....	26
Abbildung 10: Das HBCD-Depot in Dämmungen in Österreich (Eibensteiner, 2016)	27
Abbildung 11: In der Bauwirtschaft genutzte XPS-Mengen, errechnet aus diversen Datenquellen, inkl. EPS-Mengen zum Vergleich (Eibensteiner, 2016).....	28
Abbildung 12: Verbrauch an XPS in Österreich, erstellt mittels Daten und Annahmen (Eibensteiner, 2016).....	29
Abbildung 13: CreaSolv®-Prozess-Kreislauf (Eibensteiner, 2016).....	32
Abbildung 14: Optimaler Standort für eine zentral gelegene Crea©Solv-Anlage (Kapazität: ≥ 5.000 t/a) in Österreich (Eibensteiner, 2016).....	33
Abbildung 15: Optimierte Standorte für vier regionale CreaSolv©-Anlagen (Kapazität je ≥ 2.000 t/a) in Österreich (Eibensteiner, 2016)	34
Abbildung 16: Abfolge eines möglichen Rücklaufprozesses für XPS-Dämmmaterial (Eibensteiner, 2016).....	35
Abbildung 17: Aufbau von Bitumen (Thienel, 2018)	36
Abbildung 18: Phasen der Bitumenherstellung (Thienel, 2018).....	37
Abbildung 19: Zusammenhänge zwischen Bitumenprodukten,-bezeichnung und Herstellung (Thienel, 2018).....	39
Abbildung 20: Aufbau einer Asphaltmischanlage (Riechert & Nolle, 1999).....	40
Abbildung 21: Strukturformel von Phenol (Kaftory, 2003).....	46
Abbildung 22: Prozesskette Asphaltrecycling	49
Abbildung 23: Prozessablauf Physitron Asphalt Recycling (Karsten, s.a.).....	51
Abbildung 24: Aufnahmepfade von Gefahrenstoffen (Liederer und Tenschert GbR, 2020).....	54

Tabelle 1: Übersicht und Beschreibung der Gefahrenbereiche von Brandereignissen (eigene Darstellung nach Schmederer, 2015)	9
Tabelle 2: Übersicht von Brandschutt im Abfallverzeichnis (in Anlehnung an BMK, 2016).....	10
Tabelle 3: Relevante Schadstoffe auf abgekühlten Brandstellen und deren Vorläufersubstanzen (LfU Bayern, 2011).....	11
Tabelle 4: Übersicht der Brandklassen (eigene Darstellung nach Pfeiffer, 2016)	16
Tabelle 5: Eignung von Löschmittel für entsprechende Brandklassen (Pfeiffer, 2016)	16
Tabelle 6: Entsorgungswege von Brandabfällen (LfU Bayern, 2011).....	20
Tabelle 7: Unterschiede EPS und XPS (Eigene Darstellung nach Nierobis, 2003)...	22
Tabelle 8: Abschätzung von eingesetzten Treibmitteln in XPS und deren Halbwertszeiten, im Zeitraum bis 2010 (in Anlehnung an Obernosterer, et al., 2007)	24
Tabelle 9: Rückbaufähigkeit/Sortenreinheit von XPS-Dämmplatten in Abhängigkeit des Einsatzgebiets und der Montageart (in Anlehnung an Daxbeck & Buschmann, 2012).....	30
Tabelle 10: Auflistung mineralischer und nachwachsender Dämmstoffe (eigene Darstellung nach Wurbs, et al., 2017).....	31
Tabelle 11: Geschätzte Entfernungen für vier regionale CreaSolv-Anlagen in Österreich (eigene Darstellung nach Eibensteiner, 2016)	34
Tabelle 12: Anwendung von Asphalt im Wasserbau (in Anlehnung an Thienel, 2018)	41
Tabelle 13: Gegenüberstellung der Unterschiede von Pech/Teer und Bitumen (in Anlehnung an Thienel, 2018).....	41
Tabelle 14: Übersicht diverser Teerabfälle nach Schlüsselnummern (in Anlehnung an BMK, 2016)	43
Tabelle 15: Einstufung von Straßenaufbruch nach PAK-Gehalt (in Anlehnung an Bernard & Schmeling-Braz, 2014)	50