

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
Laboratorio federale di prova dei materiali e di ricerca
Istituto federal da controlla da material e da retschertgas
Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

EMPA
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
Tel. +41-1-823 55 11
Fax +41-1-821 62 44



Abteilung Luftfremdstoffe / Umwelttechnik

Bericht Nr. 880'002/1

Emissionen und Stoffflüsse von (Rest-)Holzfeuerungen

Messverfahren, Auswertung und Resultate

Das Projekt wurde von den folgenden Institutionen finanziert:

BUWAL
Schweiz. Vereinigung für Holzenergie
IG-Altholz
Kantone (AG, BE, BS/BL, GE, TG, ZG, ZH)
Anlagenbetreiber
EMPA

S SCHWEIZERISCHER PRÜFSTELLENDIENST
T SERVICE SUISSE D'ESSAI
S SERVIZIO DI PROVA IN SVIZZERA
S SWISS TESTING SERVICE

Nach EN SN 45'001 akkreditierte
**Prüfstelle für Emissionsmessungen von
Luftfremdstoffen an stationären Anlagen**
STS 066



Verdankungen

Zum Gelingen dieses Projekts haben zahlreiche Personen und Interessengruppen beigetragen:

Das Konzept des Projekts wurde von den folgenden Institutionen erarbeitet: BUWAL Abt. Luftreinhaltung (U. Jansen), Schweizerische Vereinigung für Holzenergie (W. Vock), EMPA Dübendorf (T. Bühler).

Die Auswahl der Anlagen, die Verbindung zu den beteiligten Kantonen und zur Holzkampagne 98 erfolgte durch W. Vock (Ingenieurbüro Abfall und Recycling).

Die Probenahme wurde von Mitarbeitern der Abteilung 134 (T. Bühler, P. Graf, P. Honegger, H. Gilomen, T. Berchtold, T. Pham) der EMPA Dübendorf durchgeführt.

Die anorganischen Analysen wurden von Mitarbeitern der Abteilung 131 (R. Figi, O. Nagel, C. Schreiner), die organischen Analysen von Mitarbeitern der Abteilung 132 (E. Gujer, R. Haag, P. Mattrel, P. Schmid, C. Seiler, M. Zennegg) und die Brennstoffuntersuchungen von Mitarbeitern der Abteilung 133 (E. Steinhauer) der EMPA Dübendorf durchgeführt.

Die Daten der Holzkampagne 98 wurden durch R. Schuler (Labor der Urkantone) bereitgestellt.

Der Entwurf der vorliegenden Publikation wurde von D. Noger (EMPA St. Gallen), W. Vock (Ingenieurbüro Abfall und Recycling) und L. Emmenegger (EMPA Dübendorf) überarbeitet.

Dem BUWAL, der IG Altholz, der Schweiz. Vereinigung für Holzenergie, den beteiligten Kantonen und den Anlagenbetreibern für ihren Beitrag zur Finanzierung des Projekts.

Dank auch allen Betreibern von Holzfeuerungen, die sich bereit erklärten, in diesem Projekt mitzuwirken.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Résumé.....	5
Kurzfassung	7
1. Einleitung	21
1.1 Problematik der Restholzverbrennung	21
1.2 Projektziele.....	21
1.3 Projektaufbau	22
1.4 Konzept und Organisation.....	23
2. Messtechnik.....	24
2.1 Übersicht über das Messprogramm.....	24
2.2 Detaillierte Beschreibung der verwendeten Verfahren.....	26
2.3 Messunsicherheiten / typische Nachweisgrenzen (Einzelwerte)	32
3. Messergebnisse der einzelnen Anlagen.....	35
3.1 Anlage A	36
3.2 Anlage C	42
3.3 Anlage D	48
3.4 Anlage E	54
3.5 Anlage F	60
3.6 Anlage G	66
3.7 Anlage I	72
3.8 Anlage J.....	78
3.9 Anlage K.....	84
3.10 Anlage L	90
4. Zusammenstellungen der Messergebnisse	97
4.1 Gehalte der 10 Anlagen im Vergleich.....	97
4.2 Transferkoeffizienten der 10 Anlagen im Vergleich.....	104
5. Diskussion und Wertung der Ergebnisse.....	109
5.1 Brennstoffe und Aschen.....	110
5.2 Abgas.....	131
6. Resultat.....	141
6.1 Auswirkungen der Schadstofffrachten im Brennstoff Holz auf die Emissionen	141
6.2 Transferkoeffizienten.....	147
6.3 Unterscheidung von naturbelassenem Holz, Restholz und Altholz auf Grund der Schadstoffbelastung des Brennstoffs und der Aschen.....	148
Anhang 1: Messtechnik.....	150
Anhang 1.1: Probenvorbereitung	150
Anhang 1.2: Angaben zu einzelnen Messverfahren.....	151
Anhang 2: Ergänzende Messdaten.....	159
Anhang 2.1 Anlage A	159
Anhang 2.2 Anlage C	161
Anhang 2.3 Anlage D	163
Anhang 2.4 Anlage E	165
Anhang 2.5 Anlage F.....	167
Anhang 2.6 Anlage G	169
Anhang 2.7 Anlage I	171

Anhang 2.8 Anlage J	173
Anhang 2.9 Anlage K	175
Anhang 2.10 Anlage L.....	177
Literatur.....	179

Abstract

Die Luftreinhalte-Verordnung definiert für die thermische Nutzung von Holz vier Kategorien:

- Naturbelassenes Holz (stückig oder Schnitzel)
- Restholz (Baustellen, Produktionsabfälle aus holzverarbeitenden Industrien)
- Altholz (Gebäudeabbrüche, Möbel, hölzerne Verpackungen)
- Problematische Holzabfälle (intensiv mit Holzschutzmittel behandelt, halogenorg. beschichtet)

In der vorliegenden Untersuchung wurde Holz der unterschiedlichen Kategorien auf seine Belastung mit Schwermetallen, organischen Holzschutzmitteln und Halogenen untersucht. Zudem wurde die Schadstoffbelastung des Abgases aus der Verbrennung der einzelnen Holz-Sortimente ermittelt und mit den Grenzwerten der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und dem Dioxin-Grenzwert für KVAs verschiedener europäischer Länder verglichen.

Für die im Brennstoff enthaltenen Schwermetalle wurde eine Stoffflussanalyse durchgeführt. Es konnten Transferkoeffizienten bestimmt werden, die angeben welcher Anteil eines Schwermetalls ins Abgas bzw. in die Aschen transferiert wird.

Weiter wurden mögliche Einfüsse der Brennstoffzusammensetzung auf die Bildung von Dioxin untersucht. Bei Brennstoffen mit erhöhten Gehalten an Chlor und chlorierten Holzschutzmitteln wurde zumeist eine erhöhte Dioxin-Bildung festgestellt. Auf Grund der unterschiedlichen Verbrennungsbedingungen in den untersuchten Anlagen konnte jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Brennstoff und Dioxinmissionen hergestellt werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Klassierung gemäss LRV im Falle des naturbelassenen Holzes und des Altholzes in der Praxis bewährt. Probleme ergaben sich bei Restholz - Sortimenten (von Schreinereien und von Baustellen), da deren Schadstoffbelastung teilweise ähnlich hoch wie jene des Altholzes ist.

Naturbelassenes Holz (Waldhackschnitzel) enthält wenig Schwermetalle und organische Holzschutzmittel und kann in modernen Holzfeuerungen mit tiefen Emissionen verbrannt werden. Die bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz entstehenden Aschen weisen markant niedrigere Schadstoffgehalte auf als jene von Rest- und Altholz und lassen sich von diesen gut unterscheiden.

Restholz von Schreinereien und von Baustellen weist deutlich höhere Schadstoffgehalte als naturbelassenes Holz auf. Bei der Verbrennung dieses Restholzes wurden problematische Dioxin- und Schwermetallemissionen gefunden. Dies hängt vermutlich auch damit zusammen, dass unbekannte Anteile an Altholz mitverbrannt wurden. Infolge der erhöhten Belastung vieler Resthölzer

mit Chlor- und organischen Holzschutzmitteln kann es ausserdem zu erheblichen Dioxin-Freisetzungen kommen. Eine eindeutige Unterscheidung von Restholz und Altholz auf Grund der Schadstoffkonzentration im Brenngut und den Aschen ist unter diesen Umständen nicht möglich.

Altholz aus Verpackungen und Abbrüchen kann in Holzfeuerungen (ohne weitgehende Abgasreinigung) im allgemeinen nicht LRV-konform verbrannt werden. Dies trifft auch für Altholz zu, das keine sichtbaren Spuren von Behandlungen (Farben oder Lacke) oder Beschichtungen aufweist. Eine Ausnahme bilden Einwegpaletten, wenn diese unter Berücksichtigung strenger Kriterien sortiert werden (keine grauen Presspanfüsse).

Résumé

Pour l'utilisation thermique du bois, l'Ordonnance sur la protection de l'air définit 4 catégories de bois:

- Bois à l'état naturel (morceaux, bois déchiqueté)
- Résidus de bois (chantiers, résidus de l'industrie du bois)
- Bois usagé (bois de démolition, meubles, emballages)
- Déchets de bois problématiques (traités avec des produits de conservation ou avec revêtement renfermant des composés organo-halogénés)

Le présent travail est consacré à l'étude de la contamination de ces différentes catégories de bois par les métaux lourds, les produits de conservation organiques et les halogènes. En plus de cela, il traite aussi de la contamination des effluents gazeux issus de la combustion de ces différentes catégories de bois et la compare avec les valeurs limites de l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) ainsi qu'avec les valeurs limites fixées pour les émissions de dioxine des UIOM dans différents pays d'Europe.

Pour les métaux lourds contenus dans ces combustibles, on a procédé à une analyse des flux de matière et on a déterminé des coefficients de transfert qui indiquent quel pourcentage d'un métal lourd est transféré dans les effluents gazeux et dans les cendres.

On a encore étudié l'influence possible de la composition du combustible sur la formation de dioxine. Pour les combustibles présentant une teneur élevée en chlore et en produits de conservation du bois chlorés, on constate le plus souvent une augmentation de la formation de dioxine. Du fait de la variation des conditions de combustion sur les installations examinées, il n'a toutefois pas été possible de mettre en évidence une relation nette entre combustible et émissions de dioxine.

Les études effectuées montrent que, pour le bois à l'état naturel et pour le bois usagé, le classement de l'OPair est approprié à la pratique. Des problèmes se posent pour la catégorie des résidus de bois des menuiseries et des chantiers car leur contamination par des polluants est parfois aussi élevée que celle du bois usagé.

Le bois à l'état naturel (bois déchiqueté de forêt) contient peu de métaux lourds et de produits de conservation du bois et sa combustion dans les installations de chauffage modernes ne provoque que de faibles émissions de polluants. Les cendres résultant de la combustion du bois à l'état naturel présentent des teneurs en polluants notablement plus basses que celles de la combustion des résidus de bois et du bois usagé et se différencient nettement de ces dernières.

Les résidus de bois des menuiseries présentent des teneurs en polluants nettement plus élevées que celle du bois à l'état naturel. La combustion de ces résidus de bois provoque des émissions problématiques de dioxine et de métaux lourds. Cela tient probablement au fait qu'une proportion inconnue de bois usagé est brûlée avec ces résidus. La contamination plus élevée des nombreux résidus du bois par des produits de conservation organiques et chlorés peut conduire à des émissions considérables de dioxine. Dans ces circonstances, une différenciation nette sur la base de la concentration de polluants dans le combustible et dans les cendres entre les résidus du bois et le bois usagé n'est pas possible.

Le bois usagé provenant des emballages et de la démolition ne peut pas être brûlé de manière conforme à l'OPair dans les installations de combustion au bois sans une épuration poussée des effluents gazeux. Cela est également valable pour le bois usagé qui ne présente aucune trace visible de traitement (peinture ou vernis) ni de revêtement. Les palettes à usage unique constituent une exception, cela à condition qu'ils ne contiennent pas de pieds gris en bois aggloméré).

Dübendorf, Februar 2000

Der Projektleiter:

i. A. Dr. J. Mohn

EMPA Dübendorf
Luftfremdstoffe/Umwelttechnik
Der Abteilungsleiter:

Dr. P. Hofer

Sachbearbeiter:

Probenahme: T. Bühler, P. Graf, P. Honegger, H. Gilomen, O. Nagel,
T. Berchtold, T. Pham,

Analytik: R. Figi, P. Graf, E. Gujer, R. Haag, P. Honegger, P. Mattrel,
O. Nagel, P. Schmid, C. Schreiner, C. Seiler, E. Steinhauer,
M. Zennegg

Auswertung: T. Bühler, J. Mohn, P. Graf, P. Honegger

Abkürzungen:

DDT:	Dichlordiphenyltrichlorethan
p,p-DDT	1,1'-(2,2,2-trichloroethylidene)bis[4-chloro-Benzene]
o,p-DDT	1-chloro-2-[2,2,2-trichloro-1-(4-chlorophenyl)ethyl]-Benzene
EOX:	extrahierbare organische Halogenverbindungen
HCB:	Hexachlorbenzol
HCH:	1,2,3,4,5,6-Hexachlorcyclohexan (α , β , γ , δ) Konfigurationsisomere des Hexachlorcyclohexans
IC:	anorganisch gebundener Kohlenstoff
I-TEQ:	Internationales 2,3,7,8-TCDD-Toxizitätsäquivalent
KVA:	Kehrichtverbrennungsanlage
LRV:	Luftreinhalte-Verordnung
NG:	Nachweisgrenze
PAK:	polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB:	polychlorierte Biphenyle
PCDD/F:	polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane
TCDD/F	Tetrachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane
PeCDD/F	Pentachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane
HxCDD/F	Hexachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane
HpCDD/F	Heptachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane
OCDD/F	Octachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane
PCP:	Pentachlorphenol
RH:	Restholz
TC:	gesamter Kohlenstoff
TOC:	gesamter organisch gebundener Kohlenstoff

Kurzfassung

Einleitung

In den letzten Jahren wurde Holz als wertvoller Rohstoff und als erneuerbarer Energieträger stark gefördert. Für die thermische Nutzung bzw. Entsorgung von Holz werden durch die Luftreinhalteverordnung vier Kategorien definiert:

- Naturbelassenes Holz (stückig oder Schnitzel)
- Restholz (Baustellen, Produktionsabfälle aus Holzverarbeitenden Industrien)
- Altholz (Gebäudeabbrüche, Möbel, hölzerne Verpackungen)
- Problematische Holzabfälle (intensiv mit Holzschutzmittel behandelt, halogenorganisch beschichtet)

Insbesondere die Abgrenzung zwischen Restholz und Altholz wird auf Grund eines Informationsdefizits in der Praxis nicht immer korrekt durchgeführt.

Dieses Projekt ist mit der Holzkampagne 98 koordiniert, bei welcher, in Zusammenarbeit mit den kantonalen Labors, ausgewählte Holzproben auf deren Schadstoffgehalt untersucht wurden. Die Ergebnisse beider Untersuchungen sollen fachliche Grundlagen für eine Unterscheidung des Restholz und des Altholz-Sortimentes liefern.

Ziele

Das vorliegende Projekt konzentriert sich auf die thermische Nutzung und soll zeigen wie sich die Schadstofffrachten im Brennstoff Holz auf die emittierten Abgase und Aschen auswirken. Dabei sind die folgenden Fragen zu beantworten:

- 1) Wie wirken sich die Schadstofffrachten im Brennstoff Holz (Input) auf die verschiedenen Emissionen (Abgas und Aschen) aus? Insbesondere sollen typische Restholzsortimente (Schreiner- und Baurestholz) und Altholzsortimente, die scheinbar gering belastet sind und gelegentlich ins Restholz gelangen, untersucht werden.
 - Mit den Methoden der Stoffflussbilanzierung sollen die Transferkoeffizienten verschiedener anorganischer Verbindungen (z. B. Blei, Zink, Chlor) bestimmt werden.
 - Unter welchen Bedingungen können sich problematische organische Verbindungen wie Dioxine und Furane bilden? Ein besonderes Interesse gilt in diesem Zusammenhang den sogenannten Vorläufersubstanzen (z. B. chlorierte Holzschutzmittel).
- 2) Ist eine Abgrenzung von naturbelassenem Holz zu Restholz und von Restholz zu Altholz auf Grund der Schadstoffgehalte im Brennstoff und den Holzaschen möglich?

Vorgehensweise

Zur Bestimmung der Schadstoffströme wurde bei zehn, auf Grund ihres Brennstoffsorimentes ausgewählten Feuerungsanlagen gleichzeitig der Brennstoff (Holzanalyse), die festen Rückstände (Ascheanalyse) und der Abgasstrom (Emissionsmessungen) untersucht. Die Messungen wurden jeweils über 3-4 Stunden durchgeführt.

Während dieser Zeit wurde die Abgaskonzentration verschiedener Schwermetalle (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg), der Halogene (Chlor, Brom, Fluor) und verschiedener organischer Inhaltsstoffe (PCB, PCDD/F, PAK, HCH, HCB, PCP, DDT) bestimmt. Der Massenstrom der Verbindungen wurde über den ebenfalls ermittelten Volumenstrom berechnet.

Für die Probenahme des Brennguts wurde die Verweilzeit im Fördersystem und im Ofen abgeschätzt und berücksichtigt. Die Gehalte an Schwermetallen, Halogenen und organischen Inhaltsstoffen (DDT, HCB, HCH, PCB und PCP) wurden im Brennstoff bestimmt. Der Massenstrom des Brennstoffs wurde über die Kohlenstoffbilanz berechnet.

Die Probenahme der Aschefractionen wurde nach Beendigung der Abgasmessungen durchgeführt. Neben den Schwermetallen und den Halogenen wurden in den Aschen PAK, PCDD/F und PCB analysiert. Die anfallende Aschenmenge (Massenstrom) wurde aus der Brennstoffmenge und dem Aschengehalt des Brennstoffs berechnet.

Resultate

1. Auswirkungen der Schadstofffrachten im Brennstoff auf die Emissionen (Abgas und Aschen) – Vergleich mit den Grenzwerten der LRV

1.1 Transferkoeffizienten

Der Transferkoeffizient eines Elementes gibt an zu welchem Anteil dieses in die festen Rückstände (Rost- bzw. Zyklonasche) oder ins Abgas (gasförmiger und partikelgebundener Anteil) gelangt. Der Transferkoeffizient und die Konzentration im Brennstoff bilden die Grundlage, um Schicksal des Schadstoffs und dessen Gefährdungspotential zu beurteilen. Die Transferkoeffizienten einer Verbindung berechnen sich aus der Masse (bzw. dem Volumen) der Stoffströme (Rost-, Zyklonasche, Abgas) und der Konzentration der Verbindung in der entsprechenden Fraktion. Da die Konzentration gewisser Elemente im Brennstoff unter der Bestimmungsgrenze liegt werden die Transferkoeffizienten in dieser Untersuchung auf die Summe der Ausgangsströme (Aschen + Abgas) bezogen. Für Rostfeuerungen und Unterschubfeuerungen wurden vergleichbare Transferkoeffizienten gefunden, daher werden die Ergebnisse beider Anlagentypen gemeinsam aufgeführt (Tab. 1).

Die teilweise erhebliche Streuung der Transferkoeffizienten beruht sowohl auf anlagenspezifischen Unterschieden der Holzfeuerungen als auch auf Unsicherheiten bei der Bestimmung der Gehalte und der Massenströme der verschiedenen Fraktionen (Abgas und Aschen). Die relative Messunsicherheit der Transferkoeffizienten wurde je nach Element und Fraktion mit 20 - 40% abgeschätzt.

Tab. 1: Transferkoeffizienten der Rost- und Unterschubfeuerungen

	Transferkoeffizienten (%)					
	Rostasche		Zyklonasche		Abgas ¹⁾	
	Mittelwert	Messbereich	Mittelwert	Messbereich	Mittelwert	Messbereich
Arsen	61	37-92	4	0-12	36	5-59
Blei	27	4-50	6	1-13	67	45-89
Cadmium	<u>39</u>	<u>8-84</u>	11	1-27	51	32-83
Chrom	81	34-95	5	1-17	<u>14</u>	<u>1-62</u>
Kupfer	82	56-99	3	0-13	16	1-39
Nickel	77	72-97	<u>4</u>	1-12	<u>19</u>	<u>1-45</u>
Quecksilber	<u>9</u>	<u>1-33</u>	<u>2</u>	<u>0-5</u>	<u>90</u>	<u>66-99</u>
Zink	33	12-50	6	1-20	61	33-85
Chlor	<u>38</u>	<u>3-77</u>	15	1-36	<u>47</u>	<u>13-78</u>

Kursiv gedruckte und unterstrichene Werte beziehen sich auf Gehalte, die in mindestens einer der Anlagen unter der Nachweisgrenze liegen.

¹⁾ partikelgebundener (Flugasche) und gasförmiger Anteil.

Die schwer flüchtigen Metalle **Chrom, Kupfer und Nickel** werden vor allem in der Rostasche wiedergefunden und sind daher für die Schwermetallbelastung des Abgases in dieser Untersuchung von geringer Bedeutung. **Arsen** gelangt in dieser Untersuchung ebenfalls überwiegend in die Rostasche, womit die Arsen-Belastung des Abgases auch auf Grund der geringen Arsen-Gehalte der Brennstoffe (Holzkampagne 98) gering ist.

Die leichter flüchtigen Elemente **Blei, Zink, Cadmium und Chlor** werden nur zu ca. einem Drittel in die Rostasche transferiert während der überwiegende Teil im Abgas wiedergefunden wird (Blei: 45-89%; Zink: 33-85%; Cadmium: 32-83%; Chlor: 13-78%). Da die Blei- und Zink-Belastung der verschiedenen Brennstoffe in einem weiten Bereich variiert, stellen die Gehalte dieser beiden Schwermetalle eine wichtige Grösse zur Beurteilung eines Brennstoffs dar. Der Cadmium-Gehalt liegt in den Brennstoffen der Holzkampagne 98 meist unter der Nachweisgrenze, Cadmium ist daher für die Schwermetallbelastung des Abgases zumeist von geringer Bedeutung. Der ins Abgas transferierte Anteil des Chlors ist sehr variabel, daher ist die Chlor-Belastung des Abgases bei einem gegebenen Brennstoff-Gehalt schwer abzuschätzen. Aufgrund der erhöhten Chlor-Gehalt mancher Brennstoffe (Holzkampagne 98) kann die Abgasbelastung allerdings stark ansteigen.

Quecksilber gelangt ebenfalls überwiegend ins Abgas, wobei der Gehalt in den Brennstoffen (Holzkampagne 98) meist unter der Nachweisgrenze liegt und die Konzentration des Quecksilbers im Abgas daher gering ist.

1.2 Auswirkungen der Schadstofffrachten im Brennstoff auf die Abgasbelastung

Die Schadstoff-Belastung der untersuchten Brennstoff-Sortimente wurde mit Ergebnissen der Holzkampagne 98 verglichen, um die Aussagekraft der Resultate auf dem Hintergrund einer grösseren Probenmenge zu erhöhen. Die Schwermetallbelastung des Abgases wurde durch einen Vergleich mit den allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen (Anh. 1 LRV) der Luftreinhalte-Verordnung für stationäre Anlagen und dem Konzentrationsgrenzwert für die Summenkonzentration Blei und Zink (5 mg/m^3) für Altholzfeuerungen (Anh. 2 Ziffer 72 LRV) beurteilt. Die Dioxinkonzentration des Abgases wurde mit dem Dioxin-Grenzwert für KVAs (0.1 ng I-TEQ/m^3) verschiedener europäischer Länder (Deutschland, Österreich, Niederlande) verglichen (Tab. 2).

Tab. 2: Einhaltung (x) bzw. Überschreitung (* fache des Grenzwertes) der Konzentrationsgrenzwerte der LRV bezüglich Schwermetallemissionen und des Dioxingrenzwertes verschiedener europäischer Länder für KVAs.

Brennstoff	Schwermetalle ¹⁾	Pb + Zn ²⁾	Dioxin ³⁾
<i>Naturbelassenes Holz</i>			
Waldhackschnitzel	x	x	x
<i>"Typisches" Restholz</i>			
Bau-RH (auf der Baustelle sortiert)	x	4 * fach	15 * fach
Schreinerei-RH (wenig Spanplatten)	x	x	9 * fach
Schreinerei-RH (viel Spanplatten)	x	x	64 * fach
<i>Altholz (in Restholzfeuerungen verbrannt)</i>			
Verpackungsholz und Baurestholz	x	x	1 * fach
Einwegpaletten ohne graue Pressspanfüsse	x	x	x
Balken aus Abbruchholz	x	2 * fach	15 * fach
sortiertes Altholz	5 * fach ⁴⁾	16 * fach	8 * fach
<i>Altholz (in Altholzfeuerungen verbrannt)</i>			
Abbruchholz	x	x	30 * fach

¹⁾ Allgemeine vorsorgliche Emissionsbegrenzungen für anorganische, vorwiegend staubförmige Stoffe (Anh. 1 LRV). Bezugssauerstoff je nach Anlagengrösse 11 bzw. 13 Vol-% O₂.

²⁾ Emissionsgrenzwert für Altholzfeuerungen (5 mg/m^3) (Anh. 2, Ziffer 72) (üblicherweise mit Abgasreinigung). Hier auch angewandt auf Restholzfeuerungen. Bezugssauerstoff 11 Vol-% O₂.

³⁾ Dioxin-Grenzwert: 0.1 ng I-TEQ/m^3 . Bezugssauerstoff 11 Vol-% O₂.

⁴⁾ der Grenzwert für die Summenkonz. Pb + Cr + Cu (5 mg/m^3) wurde überschritten.

a) Naturbelassenes Holz

Schwermetall-Emissionen

Naturbelassenes Holz sowohl der vorliegenden Studie als auch der Holzkampagne 98 enthält geringe Schwermetallgehalte.

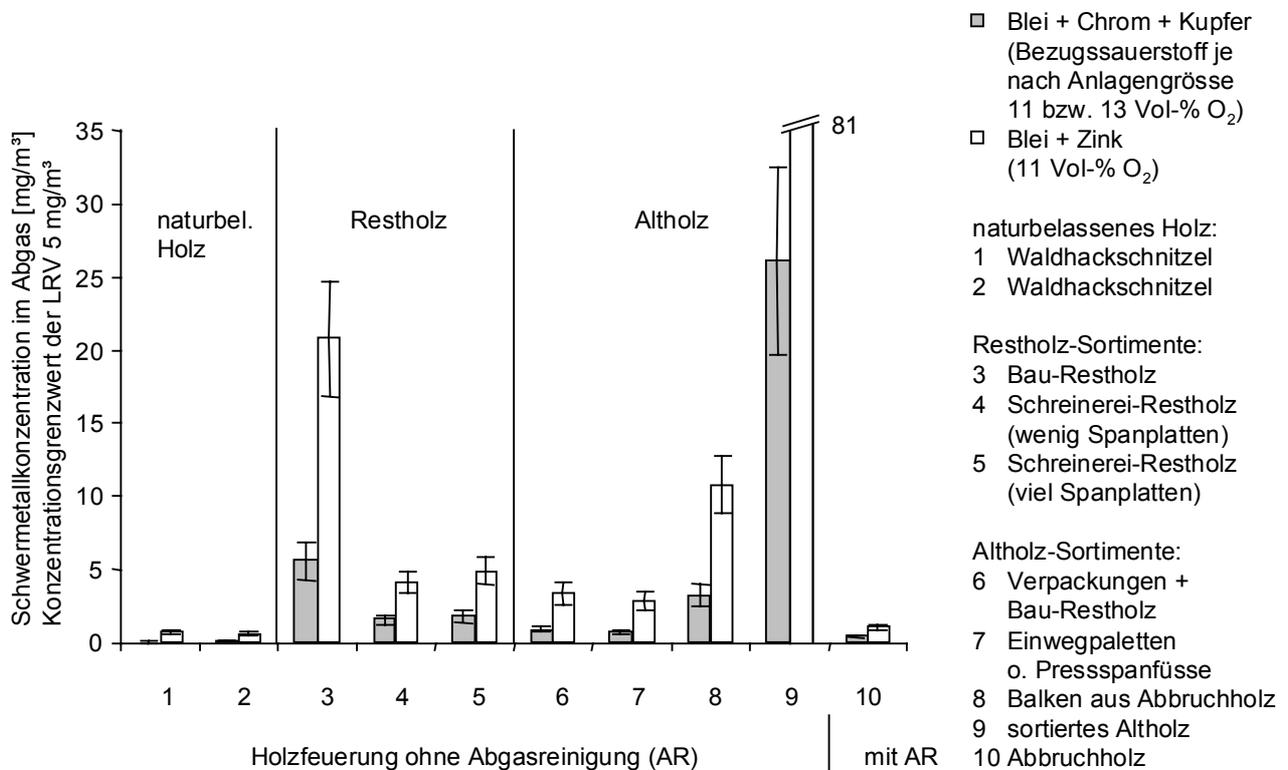
- Die allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen für stationäre Anlagen (Anh. 1 LRV) bezüglich Schwermetallemissionen werden beim Verbrennen von naturbelassenem Holz eingehalten (Abb. 1).

Dioxin-Emissionen

Naturbelassenes Holz enthält geringe Gehalte an organischen Verunreinigungen (Lindan, Pentachlorphenol, polychlorierte Biphenyle, DDT) und Chlor (Abb. 2). Dies führt zu geringen Dioxin-Emissionen.

- Der Grenzwert für Kehrriechverbrennungsanlagen verschiedener europäischer Länder (0.1 ng I-TEQ/m³) wird bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz eingehalten.

Abb. 1: Summenkonzentration von Blei, Chrom + Kupfer sowie Blei + Zink im Abgas bei Verbrennung der verschiedenen Brennstoffe (Konzentrationsgrenzwert der LRV für Pb + Cr + Cu und Pb + Zn: 5 mg/m³)



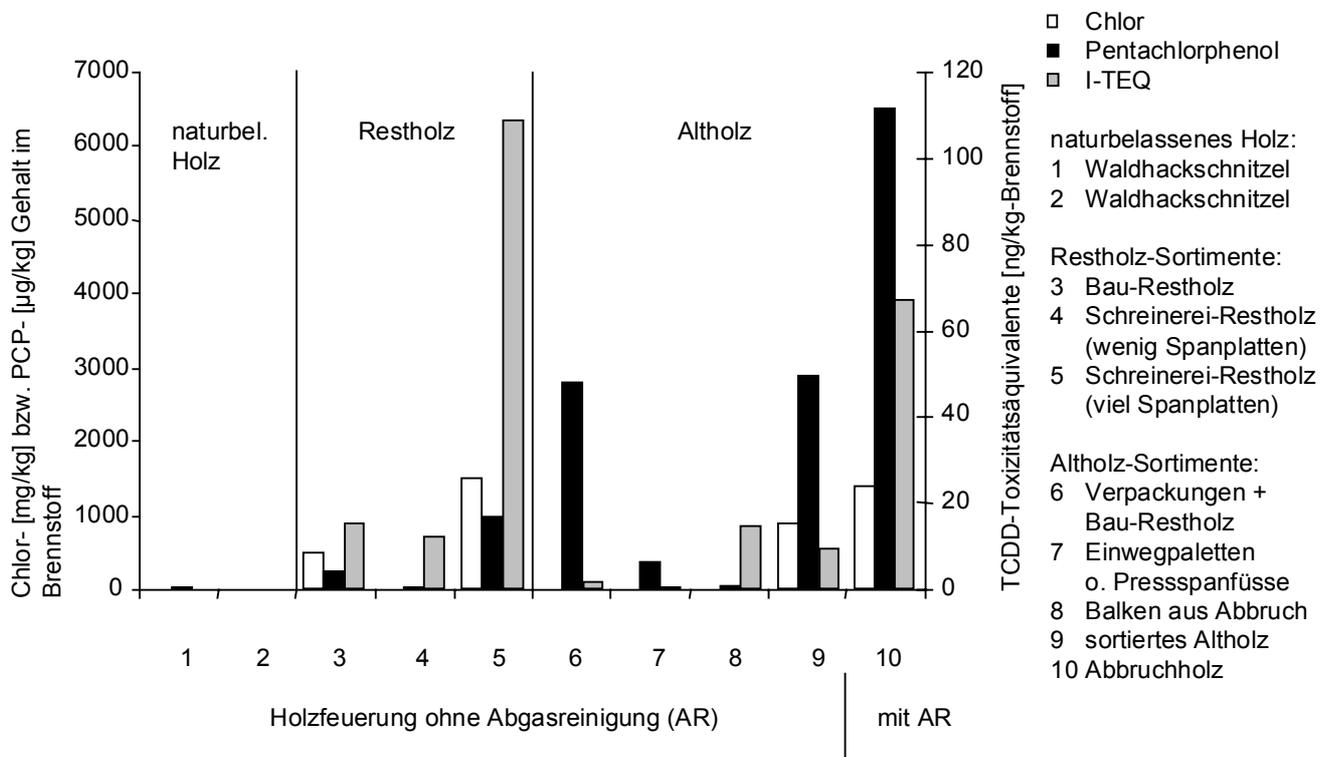
- Blei + Chrom + Kupfer (Bezugssauerstoff je nach Anlagengrösse 11 bzw. 13 Vol-% O₂)
- Blei + Zink (11 Vol-% O₂)

naturbelassenes Holz:
 1 Waldhackschnitzel
 2 Waldhackschnitzel

Restholz-Sortimente:
 3 Bau-Restholz
 4 Schreinerei-Restholz (wenig Spanplatten)
 5 Schreinerei-Restholz (viel Spanplatten)

Altholz-Sortimente:
 6 Verpackungen + Bau-Restholz
 7 Einwegpaletten o. Pressspanfüsse
 8 Balken aus Abbruchholz
 9 sortiertes Altholz
 10 Abbruchholz

Abb. 2: Chlor- und PCP- Gehalt der verschiedenen Brennstoffe (CI-Gehalte unter der NG sind nicht angegeben) und die Summe der in Abgas und Aschen enthaltenen TCDD-Toxizitätsäquivalente (I-TEQ)



b) "Typisches" Restholz

Es wurden drei Brennstoffe untersucht, die als "typische" Restholz-Sortimente verwendet werden:

- auf der Baustelle sortiertes Baurestholz
- Schreinerei-Restholz mit geringem Spanplattenanteil
- Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil

Schwermetall-Emissionen

Die Schwermetallgehalte der untersuchten Restholz-Brennstoffe liegen im Messbereich vergleichbarer Brennstoff-Sortimente der (Baurestholz, Spanplatten) wobei einzelne Brennstoffproben der Sortimente der Holzkampagne 98 sehr viel höhere Gehalte aufweisen (Kanthölzer, beschichtete Spanplatten).

- Die allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen der LRV für stationäre Anlagen (Anh. 1 LRV) bezüglich Schwermetallemissionen werden beim Verbrennen "typischer" Restholz-Sortimente eingehalten. Die Summenkonzentration Pb + Cr + Zn liegt einzig für Bau-Restholz im Bereich des Grenzwertes. Bei allen drei betrachteten Restholz-Sortimenten ist jedoch der kritische Massenstrom um mindestens einen Faktor 10 unterschritten. Die LRV sieht zudem für Altholz einen Grenzwert für Pb + Zn vor (Anh. 2, Ziffer 72 LRV). Dieser wird beim Verbrennen des Bau-Restholzes deutlich überschritten (Abb. 1).

➤ Dioxin-Emissionen

Die untersuchten Restholz-Sortimente weisen teilweise auffallend hohe Gehalte an Holzschutzmitteln auf (Abb. 2). Die Chlor-Gehalte von zwei der untersuchten Brennstoffe waren erhöht. Ähnliche Sortimente der Holzkampagne 98 (Baurestholz, Spanplatten) wiesen vergleichbare, einzelne Brennstoff-Proben auch sehr viel höhere Chlor-Gehalte auf.

- Beim Verbrennen von Resthölzern mit einem erhöhten Chlor-Gehalt und einem erhöhten Gehalt an organischen Holzschutzmitteln entstehen Abgase, die die Grenzwerte für KVAs verschiedener europäischer Länder (0.1 ng I-TEQ/m^3) erheblich überschreiten.

c) Altholz (in Restholzfeuerungen verbrannt)

Es wurden vier Brennstoffe untersucht, die zwar zum Sortiment Altholz gehören, über deren tatsächliche Schadstoffbelastung jedoch Zweifel bestanden:

- Verpackungsholz und Baurestholz
- Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse
- Aus Abbruchholz separierte saubere Balken
- Sortiertes Altholz (Einwegpaletten, naturbelassenes Holz, Schreinerei-RH, Bau-RH, rohe Spanplatten und Fruchtkisten aus Altholz aussortiert)

Altholz mit geringer Schadstoffbelastung

Die Sortimente Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse und Verpackungsholz + Bau-Restholz wiesen eine geringe Schadstoffbelastung im Brennstoff auf.

Schwermetall-Emissionen

Die Schwermetallgehalte der Sortimente Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse und Verpackungsholz + Baurestholz sind gering. Die vergleichbaren Brennstoff-Sortimente der Holzkampagne 98 weisen jedoch nur teilweise eine ähnlich geringe Schwermetallbelastung auf (Massivholz von Einwegpaletten, Harassen, Fruchtkisten, Schalungstafeln) und beinhalten auch deutlich höherbelastete Sortimente (graue Presspanfüsse von Einwegpaletten, Kanthölzer).

- Abgase aus der Verbrennung schwachbelasteter Altholz-Sortimente weisen geringe Schwermetallkonzentrationen auf und halten die allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen der LRV für stationäre Anlagen (Anh. 1 LRV) und den Grenzwert für Altholzfeuerungen (Anh. 2, Ziffer 72 LRV) bezüglich Schwermetallemissionen ein (Abb. 1).

Dioxin-Emissionen

Die Belastung an organischen Holzschutzmitteln der Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse ist gering (Abb. 2). Das Verpackungsholz + Baurestholz weist einen deutlich erhöhten Gehalt an PCP auf (Abb. 2). Die Chlor-Gehalte der beiden schwachbelasteten Altholz-Sortimente liegen unter der Nachweisgrenze. Ähnliche Sortimente der Holzkampagne 98 (Bau-Restholz, Einwegpaletten, Verpackungsholz) weisen ebenfalls tiefe Chlor-Gehalte auf, es wurden aber auch höherbelastete Brennstoff-Proben gefunden (Presspanfüsse von Einwegpaletten).

- Die Dioxin-Emissionen bei Verbrennung von Verpackungsholz + Baurestholz und der Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse liegen trotz eines erhöhten Gehaltes an organischen Holzschutzmitteln als potentiellen Dioxinvorläufern im Bereich bzw. unter dem Grenzwert für KVAs verschiedener europäischer Länder (0.1 ng I-TEQ/m^3).

Altholz mit erhöhter Schadstoffbelastung

Die aus Abbruchholz separierten Balken wiesen einen erhöhten Schadstoff-Gehalt auf, das Sortiment sortiertes Altholz war stark belastet.

Schwermetall-Emissionen

Die Schwermetallbelastung der aus Abbruchholz separierten sauberen Balken entspricht der von Dachbalken der Holzkampagne 98.

- Die allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen der LRV für stationäre Anlagen (Anh. 1 LRV) bezüglich Schwermetallemissionen werden beim Verbrennen von aus Abbruchholz separierten Balken eingehalten. Dagegen wird der Grenzwert der LRV für Altholzfeuerungen für die Summenkonz. Blei und Zink (Anh. 2, Ziffer 72 LRV) deutlich überschritten (Abb. 1).

Die Schwermetallbelastung des sortierten Altholzes ist mit der der darin enthaltenen höherbelasteten Sortimente der Holzkampagne 98 vergleichbar (Bau-RH) während andere Sortimente (Einwegpaletten, naturbelassenes Holz, Spanplatten, Fruchtkisten) deutlich geringer belastet sind.

- Die Schwermetallkonzentrationen im Abgas bei Verbrennung des sortierten Altholzes überschreiten sowohl die allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen der LRV für stationäre Anlagen (Pb + Cr + Cu, Anh. 1 LRV) als auch den Schwermetallgrenzwert für Altholzfeuerungen (Pb + Zn, Anh. 2, Ziffer 72 LRV) deutlich (Abb. 1).

Dioxin-Emissionen

Die Belastung der aus Abbruchholz separierten Balken an organischen Holzschutzmitteln ist, mit Ausnahme von DDT, gering (Abb. 2). Der Chlor-Gehalt des Brennstoffs liegt unter der Nachweisgrenze, während Dachbalken der Holzkampagne 98 teilweise erhöhte Chlor-Gehalte aufweisen. Das sortierte Altholz weist deutlich erhöhte Gehalte an PCP auf (Abb. 2). Ausserdem wurden im Brennstoff DDT und ein erhöhter Lindan-Gehalt nachgewiesen. Der Chlor-Gehalt des sortierten Altholzes ist erhöht. Ähnliche Sortimente der Holzkamp. 98 (Bau-RH, Einwegpaletten, rohe Spanplatten, Fruchtkisten) weisen vergleichbare Chlor-Gehalte auf, es wurden aber auch höherbelastete Brennstoff-Proben gefunden (Presspanfüsse von Einwegpaletten).

- Beim Verbrennen der aus Abbruchholz separierten sauberen Balken und des sortierten Altholzes entstehen Abgase, die den Dioxin-Grenzwert für KVAs verschiedener europäischer Länder von 0.1 ng I-TEQ/m^3 überschreiten.

d) Altholz (in Altholzfeuerungen verbrannt)Schwermetall-Emissionen

Die Schwermetallgehalte des Altholzes (Abbruchholz) liegen im Messbereich der Schadstoffgehalte von Altholzschnitzeln der Holzkampagne 98.

- Bei der Verbrennung auch hochbelasteter Altholz-Sortimente in Holzfeuerungen mit einer geeigneten Abgasreinigung werden die Konzentrationsgrenzwerte der LRV für Altholzfeuerungen (Anh. 1 und Anh. 2, Ziffer 72 LRV) bezüglich Schwermetall-Emissionen eingehalten.

Dioxin-Emissionen

Das verwendete Altholz (Abbruchholz) weist einen hohen Gehalt an PCP auf (Abb. 2). Eine Brennstoff-Probe der Altholz-Schnitzel der Holzkampagne 98 weist einen ähnlich hohen Gehalt an PCP auf, die übrigen Gehalte bleiben unter der sehr hohen Nachweisgrenze. Die Lindan- und DDT-Gehalte des Abbruchholzes der vorliegenden Untersuchung sind ebenfalls erhöht. Der Chlor-Gehalt ist erhöht, liegt jedoch im Messbereich des Gehalts von Altholz-Schnitzeln der Holzkampagne 98.

- Infolge der hohen Holzschutzmittel- bzw. Chlor-Gehalte kommt es zu einer verstärkten Dioxin-Bildung. Die Dioxin-Gehalte überschreiten den Grenzwert für KVAs verschiedener europäischer Länder (0.1 ng I-TEQ/m³).

2. Unterscheidung von naturbelassenem Holz, Restholz und Altholz auf Grund der Schadstoffbelastung des Brennstoffs und der Aschen

2.1 Abgrenzung naturbelassenes Holz - Restholz

Beim naturbelassenem Holz handelt es sich um einen Brennstoff dessen Schwermetall- und Chlorgehalte sehr gering sind. Die Schwermetallgehalte der untersuchten Restholz-Sortimente liegen teilweise deutlich über denen des naturbelassenen Holzes (Tab. 3). Beim Verbrennen von naturbelassenem Holz wurden immer Rost- und Zyklonaschen mit geringer Schwermetallbelastung erhalten (Tab. 4). Aschen mit höherem Schwermetallgehalt deuten deshalb darauf hin, dass auch verunreinigte d. h. nicht naturbelassene Hölzer verbrannt wurden.

Tab. 3: Schwermetallgehalte der Brennstoffe

Brennstoff		Naturbel. Holz ¹⁾	Restholz ²⁾	Altholz ³⁾
Arsen	mg/kg	< 1	< 0.5-1	< 0.5-22
Blei	mg/kg	< 0.1-4.7	0.2-390	3-18'500
Cadmium	mg/kg	< 0.05-0.3	< 0.1-0.63	< 1-24
Chrom	mg/kg	< 0.2-2.4	< 0.2-580	1.7-3'100
Kupfer	mg/kg	< 1-5.1	0.9-60	< 1-900
Nickel	mg/kg	< 1-1.3	< 1-150	< 1-39
Quecksilber	mg/kg	< 1	< 1	< 1
Zink	mg/kg	3.4-28	1.4-1'300	15-18'500
Chlor	mg/kg	< 400	< 100-27'000	66-4'500

Ergebnisse mit, gegenüber den anderen Untersuchungen, erhöhter Nachweisgrenze sind nicht aufgeführt

¹⁾ Diese Untersuchung (n=2), Holzk. 98 (n=9), HARVE-Projekt (n=7)

²⁾ Diese Untersuchung (n=3), Holzk. 98 (n=109-119), HARVE-Projekt (n=5)

³⁾ Diese Untersuchung (n=5), Holzk. 98 (Altholzschnitzel) (n=14), HARVE-Projekt (n=6)

2.2 Abgrenzung Restholz - Altholz

Die Schadstoffbelastung der hochbelasteten Restholz-Sortimente (Schreinerei- und Bau-Restholz) dieser Untersuchung ist mit der von Altholz vergleichbar (Tab. 3). Möglicherweise resultiert diese erhöhte Schadstoffbelastung des Restholzes auch aus einer unvollständigen Abtrennung vorhandener Altholz-Sortimenten. Bei der Verbrennung dieser Restholz-Sortimente entstehen Aschen deren Schwermetallbelastung der von Altholzaschen entspricht (Tab. 4). Eine Abgrenzung zwischen Rest- und Altholz, auf Grund der Schwermetallbelastung des Brennstoffs und der Rost- und Zyklonaschen, ist auf Grund dieser Ergebnissen nicht sinnvoll.

Tab. 4: Schwermetallgehalte der Rostaschen

Rostasche		naturbel. Holz ¹⁾	Restholz ³⁾	Altholz ⁴⁾
Arsen	mg/kg	8.4-10 ²⁾	21-24 ²⁾	4-40
Blei	mg/kg	< 0.1-42	10-1'600	150-5'300
Cadmium	mg/kg	0.1-12	< 0.5-39	0.8-83
Chrom	mg/kg	13-87	200-1'600	180-730
Kupfer	mg/kg	95-260	60-1'800	860-7'600
Nickel	mg/kg	20-110	43-150	84-240
Quecksilber	mg/kg	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Zink	mg/kg	9-950	90-4'500	1'800-22'000
Chlor	mg/kg	< 100-2'000	< 100-30'000	75-19'000

Ergebnisse mit, gegenüber den anderen Untersuchungen, erhöhter Nachweisgrenze sind nicht aufgeführt

¹⁾ Diese Untersuchung (n=2), HARVE-Projekt (n=13)

²⁾ nur Erg. dieser Untersuchung

³⁾ Diese Untersuchung (n=3), HARVE-Projekt (n=4)

⁴⁾ Diese Untersuchung (n=5), HARVE-Projekt (n=8)

1. Einleitung

1.1 PROBLEMATIK DER RESTHOLZVERBRENNUNG

In den letzten Jahren wurde Holz als wertvoller Rohstoff und als erneuerbarer Energieträger stark gefördert. Für die thermische Nutzung definiert die Luftreinhalte-Verordnung [1] vier Kategorien, welche auch im Merkblatt "Holzfeuerungen richtig betreiben" [2] ausführlich beschrieben sind:

- Naturbelassenes Holz (stückig oder Schnitzel)
- Restholz (Baustellen, Produktionsabfälle aus holzverarbeitenden Industrien)
- Altholz (Gebäudeabbrüche, Möbel, hölzerne Verpackungen)
- Problematische Holzabfälle (intensiv mit Holzschutzmittel behandelt, halogen-organisch beschichtet)

Im Rahmen des Aktionsprogrammes Energie 2000 sind ausführliche Abklärungen über naturbelassenes Holz und Altholz [3] durchgeführt worden. Das Restholz eignet sich sowohl für die stoffliche Nutzung (Kriterien siehe Stoff-Verordnung [4]), wie für die thermische Nutzung (Kriterien siehe Luftreinhalte-Verordnung [1]). Beim Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung bestehen einige Schwierigkeiten. Insbesondere bezüglich der Unterscheidung von Restholz und Altholz scheint in der Praxis ein Informationsdefizit zu herrschen, für dessen Behebung die Ergebnisse dieses Projektes eine fachliche Grundlage liefern können.

1.2 PROJEKTZIELE

Die hier beschriebenen Arbeiten sind mit der HOLZKAMPAGNE 98 [5] koordiniert, bei welcher in Zusammenarbeit mit den kantonalen Labors ausgewählte Holzproben auf deren Schadstoffgehalte, im Hinblick auf die stoffliche und thermische Nutzung, untersucht wurden. Das vorliegende Projekt konzentriert sich auf die thermische Nutzung und soll zeigen wie sich die Schadstofffrachten im Brennstoff auf die verschiedenen Emissionen auswirken. Dabei sind die folgenden Fragen zu beantworten:

- Wie wirken sich die Schadstofffrachten im Brennstoff Holz (Input) auf die verschiedenen Emissionen (Abgas und Aschen) aus? Insbesondere sollen typische Restholzsortimente (Schreiner- und Baurestholz) und Altholzsortimente, die scheinbar gering belastet sind und gelegentlich ins Restholz gelangen, untersucht werden.
 - a) Mit den Methoden der Stoffflussbilanzierung sollen die Transferkoeffizienten verschiedener anorganische Verbindungen (z. B. Blei, Zink, Chlor) bestimmt werden.

- b) Unter welchen Bedingungen können sich problematische organische Verbindungen wie Dioxine und Furane bilden? Ein besonderes Interesse gilt in diesem Zusammenhang den sogenannten Vorläufersubstanzen (z. B. chlorierte Holzschutzmittel).
- Ist eine Abgrenzung von naturbelassenem Holz zu Restholz sowie von Restholz zu Altholz auf Grund der Schadstoffgehalte im Brennstoff und den Holzaschen möglich? Es sollen Beurteilungsgrundlagen für die Abgrenzung der drei Kategorien erarbeitet werden.

1.3 PROJEKTAUFBAU

Bei zehn auf Grund ihres Brennstoffsortimentes ausgewählten Feuerungsanlagen werden, zur Bestimmung der Schadstoffströme, der Brennstoff (Holzanalysen), die festen Rückstände (Ascheanalysen) und der Abgasstrom (Emissionsmessungen) gleichzeitig untersucht.

Die Dokumentation des Projektes besteht aus zwei Teilberichten:

- 1. Teil Messtechnik, Messergebnisse der einzelnen Anlagen (Kapitel 2-4)
- 2. Teil Diskussion und Wertung der Ergebnisse (Kapitel 5-6)

Messtechnik, Messergebnisse der einzelnen Anlagen

Neben der Dokumentation der angewandten Messverfahren und der technischen Beschreibung der Feuerungsanlagen sind die Resultate der zehn Anlagen tabellarisch zusammengestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind ausgedrückt als Schadstoffgehalte, Massenströme und Transferkoeffizienten. Diese Angaben bilden die Grundlage für die weiteren Auswertungen, die im zweiten Teil beschrieben sind.

Diskussion und Wertung der Ergebnisse

Diese Daten und die Resultate der HOLZKAMPAGNE 98 bilden eine breite Grundlage für die Beurteilung des Restholz- und spezieller Altholz-Sortimente. Die Kenntnis der Transferfunktionen soll es ermöglichen, bei bekannter Holzzusammensetzung, die Emissionen via Kamin und die Belastung der Asche abzuschätzen.

1.4 KONZEPT UND ORGANISATION

Die Auswahl der Anlagen, die Verbindung zu den Fachstellen der beteiligten Kantone und zur Holzkampagne 98, sowie die Begleitung des Projektes erfolgt durch das Ingenieurbüro ABFALL und RECYCLING, Maschwanden; Projektleitung, Emissionsmessungen, Probenahmen, Probenvorbereitung, Analysen sowie die Auswertung und Berichterstattung werden von der EMPA-Dübendorf ausgeführt.

Die EMPA hat einen Teil der entstehenden Kosten des Projektes übernommen, insbesondere die Methodenentwicklung zur Bestimmung derjenigen organischen Verbindungen, für die noch keine Messverfahren bestanden. Es ist für die Interpretation der Resultate von grosser Bedeutung, zusätzlich zu den Vorläufersubstanzen, auch die effektiven Dioxin- und Furanemissionen zu kennen. Aus diesem Grund führte die EMPA parallel zum Projekt auf eigene Kosten Dioxin- und Furanuntersuchungen durch. Die entsprechenden Ergebnisse werden deshalb ausschliesslich durch die EMPA veröffentlicht.

2. Messtechnik

2.1 ÜBERSICHT ÜBER DAS MESSPROGRAMM

Die zeitliche Basis für die Bilanzierung bilden ca. drei bis vier Stunden über welche die Messungen gemittelt werden. Während die Resultate der kontinuierlich im Abgas messenden Geräte mit Hilfe des Computers über beliebige Zeitintervalle gemittelt werden können, dauern die anreichernden Probenahmen eine Stunde, mit einem anschliessenden Unterbruch für den Wechsel der Sammelphasen. Die Bilanzierung wird mit den Mittelwerten dieser drei Proben durchgeführt, wobei die Streuung der Einzelwerte eine wertvolle Information über die zeitliche Konstanz des Prozesses gibt.

Um eventuell vorhandene Inhomogenitäten des Brennstoffes möglichst gut zu erfassen, werden mehrere Einzelproben aus dem Brennstoffstrom möglichst nahe beim Ofen entnommen. Die restliche Verweilzeit im Fördersystem und im Ofen wird abgeschätzt und beim Vergleich mit den Emissionsmessungen korrigiert. Zur Vereinfachung sind nur die Zeiten der anreichernden Abgasprobenahmen angegeben, die Probenahmen der Brennstoffe fanden entsprechend früher, jene der Aschefractionen entsprechend später statt.

Pro Anlage werden je 3 Proben über die Dauer von ca. 60 Minuten, gemäss den Anforderungen in den Emissions-Messempfehlungen (BUWAL) [6], erhoben. Die organischen Komponenten werden in so tiefen Konzentrationen erwartet, dass über die ganze Probenahmedauer nur eine Sammelprobe erhoben wird. Für diese Komponenten wird deshalb i. allg. auch vom Brennstoff und der Aschefractionen aus den drei Proben eine Mischprobe hergestellt und analysiert.

Die Wahl der Anlagen erfolgte vor allem auf Grund des Brennstoffsortimentes, was zur Folge hat, dass auch einzelne kleine Anlagen in das Projekt mit einbezogen worden sind, deren Infrastruktur nicht für diese breite Palette von Messungen vorgesehen ist. Bei den Probenahmen mussten deshalb zum Teil Kompromisse eingegangen und das Messkonzept den örtlichen Begebenheiten angepasst werden. Dies kann eine erhöhte Unsicherheit der Resultate zur Folge haben.

Von der anfallenden Asche (Rost und Zyklon) wurde, soweit dies technisch möglich war, die effektiv anfallende Menge erfasst. Falls dies aus technischen Gründen nicht möglich war, wurde, während der Beprobung des Abgases, eine möglichst repräsentative Sammelprobe der Aschen für die Analysen entnommen und mit dem Aschegehalt des Brennstoff hochgerechnet. Detaillierte Angaben zu den verwendeten Messverfahren und den verwendeten Abkürzungen sind im Abschnitt 2.2 und im Anhang 1 enthalten. Eine Zusammenfassung der Messgrössen wird in der folgenden Tabelle gegeben:

Tabelle 2.1: Angabe der erhobenen Messgrössen

	Brennstoff	Asche (Rost- und Zyklonasche separat)	Abgas
Durchsatz	Massenstrom (Feuchtegehalt) ev. Verbrennungstemp. ev. Leistung der Anlage	Massenstrom	Volumenstrom (Temperatur, Druck, Wassergehalt, Sauerstoff, Kohlendioxid)
anorg. Inhaltsstoffe ①	Cl (ges), F, Br As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg Na, K, Ca, Mg; P ②	Cl (ges), F, Br As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg Na, K, Ca, Mg; P ②	Feststoff, Cl (ges), F, Br As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg Na, K, Ca, Mg; P ②
org. Inhaltsstoffe	DDT, HCB, HCH, PCB und PCP ③	PCB, PAK; PCDD/F ④ ⑤	DDT, HCB, HCH, PCB, PCP, PAK und PCDD/F ⑤
Zusätzliche Grössen	Brenn- und Heizwert Wassergehalt ② Aschegehalt ② C-, N- und H-Gehalt ② EOX	TC, IC, TOC	Kohlenmonoxid, Stickoxide, gasf. org. geb. Kohlenstoff, Feuerungswärmeleistung

Bemerkungen:

- ① für Sn gibt es keine validierten Emissions-Messverfahren, da schwerlösliche Sn-Verbindungen zu Problemen bei den quantitativen Analysen führen (→ keine Bestimmungen)
- ② zur Kontrolle der Bilanz werden einzelne Hauptelemente (Na, K, Mg, Ca, P), die Asche, der Kohlenstoff und das Wasser herangezogen
- ③ in der Asche werden aufgrund des hohen Dampfdruckes keine HCB, HCH und PCP erwartet (→ keine Analysen)
- ④ EMPA-eigene Untersuchungen
- ⑤ im Brennstoff werden keine PAK bestimmt, da keine Bilanzierung möglich ist

2.2 DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER VERWENDETEN VERFAHREN

Die untenstehende Zusammenstellung ist möglichst kurz gehalten und deshalb sind nicht alle Detailangaben enthalten (weitere Informationen sind bei der EMPA archiviert).

2.2.1 Brennstoffuntersuchungen

Falls nicht anders vermerkt, beziehen sich in diesem Untersuchungsbericht alle Konzentrationsangaben auf den trockenen Brennstoff.

Tabelle 2.2: Untersuchte Messgrössen im Brennstoff und verwendete Messverfahren

Messgrösse	Messverfahren
Massenstrom	Berechnet via Kohlenstoffbilanz
Probenahme	alle 10 Min entsprechend der Gasprobenahme (zeitliche Verzögerung berücksichtigt) → Erstellen von Mischproben
Vorbereiten der Proben	Homogenisierung und Zerkleinern (siehe Anhang 1.1)
Feuchtegehalt	Trocknen bei 105 °C (24 Std.)
Cl (gesamt), F, Br	Aufschluss: O ₂ -Druckaufschluss Analytik: Ionenchromatographie (IC) oder ionenselektive Elektrode (ISE) (siehe Anhang 1.2)
As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg	Aufschluss: Mikrowelle-Salpetersäure Analytik: Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) oder Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) (Anhang 1.2)
Na, K, Mg, Ca, P	gleicher Aufschluss wie für Spurenelemente Analytik: Flammen-AAS (siehe Anhang 1.2)
Hexachlorbenzol	HCB *) (siehe Anhang 1.2)
Hexachlorcyclohexan	HCH *) (siehe Anhang 1.2)
polyaromatische Kohlenwasserstoffe	PAK (siehe Anhang 1.2)
polychlorierte Biphenyle	PCB (siehe Anhang 1.2)
Pentachlorphenol	PCP *) (siehe Anhang 1.2)
extrahierbare organische Halogene	EOX Bestimmung nach DIN Nr. 38'414-17
Aschegehalt	Bestimmung nach DIN Nr. 51'719
Kohlen- und Wasserstoffgehalt	ASTM D 5291
Brenn- und Heizwert	Bestimmung nach DIN Nr. 51'900-1 bis 51'900-3

*) Für die oben erwähnten Komponenten und Verbindungen gibt es keine allgemein anerkannte standardisierte Probenahme- und Bestimmungsverfahren. Da die Entwicklungsarbeiten im Rahmen des Projektes als Eigenleistung EMPA ausgeführt wurden, sind diese Verfahren nicht vollständig im akkreditierten Bereich und weisen z. T. eine grösser Unsicherheit auf. Die Festlegungen erfolgten nach Rücksprache mit dem Auftraggeber.

2.2.2 Ascheuntersuchungen

Falls nicht anders vermerkt, beziehen sich in diesem Untersuchungsbericht alle Konzentrationsangaben auf trockene Asche.

Tabelle 2.3: Untersuchte Messgrössen in den Aschen und verwendete Messverfahren

Messgrösse	Messverfahren
Massenstrom	Probenahme: ganze anfallende Menge Analytik: Gravimetrie Alternative: Berechnung aus dem Aschegehalt des Brennstoffes
Probenahme	erstellen einer oder drei Mischprobe
Vorbereiten der Proben	Homogenisierung und Mahlen (siehe Anhang 1.1)
Cl (gesamt), F, Br	Aufschluss: O ₂ -Druckaufschluss Analytik: Ionenchromatographie oder ionenselektive Elektrode (siehe Anhang 1.2)
As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg	Aufschluss: Mikrowelle-Salpetersäure Analytik: Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) oder Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) (Anhang 1.2)
Na, K, Mg, Ca, P	gleicher Aufschluss wie für Spurenelemente Analytik: Flammen-AAS (siehe Anhang 1.2)
Total Organic Carbon (TOC)	Differenz aus TC (katalytische Verbrennung) und Carbonatgehalt ergibt TOC (siehe Anhang 1.2)
polyaromatische Kohlenwasserstoffe	PAK (siehe Anhang 1.2)
polychlorierte Biphenyle	PCB (siehe Anhang 1.2)
polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane	PCDD/PCDF (siehe Anhang 1.2)

2.2.3 Untersuchungen im Abgas

Wo immer möglich, kamen die i«Empfehlungen über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen» des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) zur Anwendung [7]. Falls nicht anders vermerkt, beziehen sich in diesem Untersuchungsbericht alle Konzentrationsangaben auf trockenes Abgas im Normzustand (0°C und 1013 mbar). Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschliesslich auf die bei den Messungen herrschenden Bedingungen.

Tabelle 2.3: Untersuchte Messgrössen im Abgas und verwendete Messverfahren

Messgrösse		Messverfahren
Abgastemperatur	kontin.	thermoelektrisch
Abgasdruck	Einzelwert	Schrägrohrmanometer
Abgasgeschwindigkeit	Einzelwert	Anemometer oder Staurohr
Volumenstrom	Stundenm.	berechnet aus Geschwindigkeit, Kanalquerschnitt, Temperatur, Druck, O ₂ , CO ₂ , H ₂ O
Feuerungswärmeleistung		berechnet aus der Abgas- und der Holzzusammensetzung
Sauerstoff	kontin.	Suszeptibilitätsmessung
Kohlendioxid	kontin.	NDIR-Spektrometrie
Wasser	kontin. oder Stundenm.	Taupunktspiegelverfahren volumetrisch; auskondensieren des Wasseranteils
Feststoff (Staub)	Stundenm.	Probenahme: aussenliegendes, bzw. innenliegendes Filter; Messempfehlungen BUWAL (1996), Kapitel 4 Aufarbeitung: Konditionierung im Trockenschrank/Exsikkator Analytik: Gravimetrie
Schwermetalle anreichernde Probenahme (As, Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Zn; Hg) (siehe Anhang 1.2)	Stundenm.	<u>feststoffgebundener Anteil:</u> Probenahme: Feststoff (siehe oben) Aufarbeitung: Mahlen der Feststoffproben und Säureaufschluss Analytik: ICP-MS <u>filtergängige Metalle (ausser Hg):</u> VDI 3868 Bl. 1/2; Probenahme: Absorption in H ₂ O ₂ /HNO ₃ Analytik: ICP-MS

Tabelle 2.3: Untersuchte Messgrössen im Abgas und verwendete Messverfahren (Fortsetzung)

Messgrösse		Messverfahren
		<u>filtergängiges Hg</u> : VDI 3868 Bl. 2; Probenahme: in KMnO ₄ /H ₂ SO ₄ -Lösung Analytik: AAS
Na*), Ka*), Mg*), Ca*), P*) (siehe Anhang 1.2)	Stundenm.	Probenahme: gleich wie für Spurenelemente (sowohl für feststoffgebundenen wie für gasförmigen Anteil) Analytik: Flammen-AAS
Stickoxide	kontin.	Chemilumineszenzverfahren
gasförmige Chloride (ausnahmsweise angegeben als Cl, statt als HCl; Vergleichbarkeit der Massenströme)	Stundenm.	VDI 3480 Bl. 1 (1984) Probenahme: Absorption in deion. Wasser Analytik: Ionenchromatographie (siehe Anhang 1.2)
gasförmige Fluoride (ausnahmsweise angegeben als F, statt als HF; Vergleichbarkeit der Massenströme)	Stundenm.	Probenahme: Absorption in verd. Natronlauge Analytik: Potentiometrie mit ionenselektiver Elektrode (siehe Anhang 1.2)
gasförmige Bromide*) (ausnahmsweise angegeben als Br, statt als HBr; Vergleichbarkeit der Massenströme)	Stundenm.	Probenahme: Absorption in verd. Natronlauge Analytik: Ionenchromatographie (siehe Anhang 1.2)
Kohlenmonoxid	kontin.	NDIR-Spektrometrie
gasf. organischer Kohlenstoff	kontin.	Flammenionisationsdetektor (FID)
Hexachlorbenzol	4-Std.mit.	HCB *) (siehe Anhang 1.2)
Hexachlorcyclohexan	4-Std.mit.	HCH *) (siehe Anhang 1.2)
polyaromatische Kohlenwasserstoffe	4-Std.mit.	PAK (siehe Anhang 1.2)
polychlorierte Biphenyle	4-Std.mit.	PCB (siehe Anhang 1.2)
polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane	4-Std.mit.	PCDD/F (siehe Anhang 1.2)
Pentachlorphenol	4-Std.mit.	PCP *) (siehe Anhang 1.2)

*) Für die oben erwähnten Komponenten und Verbindungen gibt es keine allgemein anerkannte standardisierte Probenahme- und Bestimmungsverfahren. Da die Entwicklungsarbeiten im Rahmen des Projektes als Eigenleistung EMPA ausgeführt wurden, sind diese Verfahren nicht vollständig im akkreditierten Bereich und weisen z. T. eine grösser Unsicherheit auf. Die Festlegungen erfolgten nach Rücksprache mit dem Auftraggeber.

2.2.4 Berechnung der Transferkoeffizienten und der Wiederfindungsrate

Der Transferkoeffizient eines Elementes gibt an zu welchem Anteil dieses in die festen Rückstände (Rost-, Zyklonasche) bzw. in die gasförmigen Emissionen (inklusive Flugasche) gelangt. Zur Ermittlung eines Transferkoeffizienten wird die Masse der Stoffströme (Rost-, Zyklonasche, Abgas) und die Konzentration des Stoffes in den entsprechenden Fraktionen benötigt. Da die Konzentration einzelner Elemente im Brennstoff im Bereich oder unter der Nachweisgrenze liegt werden die Transferkoeffiziente in dieser Untersuchung auf die Summe der Ausgangsströme bezogen. Die Summe der Ausgangsströme setzt sich zusammen aus den Stoffströmen in die Aschen und ins Abgas:

$$\sum out = \sum cij \cdot mij + cia \cdot Va$$

$\sum out$: Summe der Ausgangsströme

cij : Konzentration des Stoffes i in der Asche j [mg/kg]

mij : Massenstrom der Asche j [kg/h]

cia : Konzentration des Stoffes i im trockenen Abgas unter Normbedingungen [mg/m³]

Va : Volumenstrom des trocknen Abgases unter Normbedingungen [m³/h]

Die Definition des Transferkoeffizienten k eines Stoffes i in die Asche j (Rost- bzw. Zyklonasche) lautet:

$$kij = \frac{cij \cdot mij}{\sum out}$$

kij : Transferkoeffizient des Stoffes i in die Asche j

Der Transferkoeffizient eines Stoffes i ins Abgas ist folgendermassen definiert:

$$kia = \frac{cia \cdot Va}{\sum cij \cdot mij}$$

kia : Transferkoeffizient des Stoffes i in das Abgas

Die Wiederfindungsrate r eines Stoffes i berechnet sich als Quotient aus der Summe der Ausgangsströme (Rost-, Zyklonasche, Abgas) und dem Eingangstrom (Brennstoff). Mit ihrer Hilfe ist eine qualitative Beurteilung der Stoffströme möglich:

$$r_i = \frac{\sum out}{c_{iB} \cdot m_B}$$

r_i : Wiederfindungsrate des Stoffes i

c_{iB} : Konzentration des Stoffes i im Brennstoff [mg/kg]

m_B : Massenstrom des Brennstoffs [kg/h]

2.2.5 Auswertung

Details und Abweichungen vom allgemeinen Konzept sind bei den einzelnen Anlagen beschrieben.

2.3 MESSUNGSICHERHEITEN / TYPISCHE NACHWEISGRENZEN (EINZELWERTE)

Die angegebenen Messunsicherheiten und Nachweisgrenzen beziehen sich auf das vollständige Messverfahren d. h. Probenahme, Probeaufbereitung und Analytik.

2.3.1 Gehalte

Die relative Unsicherheiten bzw. Nachweisgrenzen in Klammern gelten nur für die Anlage G und sind höher, da die Analysen als Vorversuche durchgeführt wurden.

Tabelle 2.4: Relative Unsicherheiten und Nachweisgrenzen

Gehalte	Brennstoff		Rostasche		Zyklonasche		Abgas	
	rel. U [%]	NG [mg/kg]	rel. U [%]	NG [mg/kg]	rel. U [%]	NG [mg/kg]	rel. U [%]	NG [mg/m ³]
Calcium	10	70	10	400	10	400	25	0.3
Kalium	10	200	10	400	10	400	25	0.2
Magnesium	10	30	10	200	10	200	25	0.2
Natrium	25	500	10	400	10	400	25	0.4
Arsen	25	0.5	10	5 (20)	10	5 (20)	25	0.0003
Blei	25	2 (8)	15	6 (40)	10	6 (40)	25	0.002
Cadmium	25	0.05 (2)	20	5	10	5	25	0.0002
Chrom	25	20	15	10	10	10	25	0.008
Kupfer	20	5	15	10	10	10	25	0.002
Nickel	20	10	15	6 (150)	15	6 (150)	25	0.002
Phosphor	15	30	10	20	10	20	25	0.02
Quecksilber	25	0.3	25	0.1	25	0.1	25	0.0007
Zink	20	10	10	10	10	10	25	0.01
Brom	20	100	20	100	25	100	15	0.2
Chlor	20	400	20	400	15	400	15	0.2
Fluor	20	100	25	100	25	100	20	0.1
EOX	30	3	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	k.M.	10	1000	10	1000	k.M.	k.M.
	[%]	[µg/kg]	[%]	[µg/kg]	[%]	[µg/kg]	[%]	[ng/m ³]
PCP	30	1	30	1	30	1	30	1
α-HCH	30	0.1	30 ¹⁾	1 ¹⁾	30 ¹⁾	0.3 ¹⁾	30	1
β-HCH	30	1					30	1
γ-HCH	30	0.1					30	1
δ-HCH	30	1					30	1
HCB	30	0.1	30	0.1	30	0.1	30	0.1
DDT	30	5	30	5	30	5	30	5
p,p-DDT	30	5	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	30	k.M.
o,p-DDT	30	5	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	30	k.M.
PCB Einzelwert	30	1	30	1	30	1	30	1
	[%]	[µg/kg]	[%]	[µg/kg]	[%]	[µg/kg]	[%]	[µg/m ³]
PAK Einzelwert	k.M.	k.M.	30	0.06	30	0.06	30	0.0003
PCDD/F (Einzelwert)	k.M.	k.M.	30	0.10-22	30	0.5-39	30	1.2-280

k.M. keine Messung

¹⁾ Messunsicherheit für die Summe aller HCHs (α-HCH, β-HCH, γ-HCH, δ-HCH)

2.3.2 Messunsicherheiten der Massenströme

Tabelle 2.5: Relative Messunsicherheiten der Massenströme

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	% relativ	% relativ	% relativ	% relativ
Calcium	18	22	22	27
Kalium	18	22	22	27
Magnesium	18	22	22	27
Natrium	29	22	22	27
Arsen	29	22	22	27
Blei	29	25	22	27
Cadmium	29	28	22	27
Chrom	29	25	22	27
Kupfer	25	25	22	27
Nickel	25	25	25	27
Phosphor	21	22	22	27
Quecksilber	29	32	32	27
Zink	25	22	22	27
Brom	25	28	32	18
Chlor	25	28	25	18
Fluor	25	32	32	22
EOX	34	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	22	22	k.M.
PCP	34	36	36	32
α -HCH	34	36 ¹⁾	36 ¹⁾	32
β -HCH	34			32
γ -HCH	34			32
δ -HCH	34			32
HCB	34	36	36	32
DDT	34	36	36	32
p,p-DDT	34	k.M.	k.M.	32
o,p-DDT	34	k.M.	k.M.	32
PCB Einzelwert	34	36	36	32
PAK Einzelwert	k.M.	36	36	32
PCDD/PCDF Einzel-Isomer	k.M.	36	36	32

k.M. keine Messung

¹⁾ Messunsicherheit für die Summe aller HCHs (α HCH, β HCH, γ HCH, δ HCH)

2.3.3 Messunsicherheiten der Transferkoeffizienten

Tabelle 2.6: Relative Messunsicherheiten der Transferkoeffizienten

	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	% relativ	% relativ	% relativ
Calcium	30	30	33
Kalium	28	28	32
Magnesium	30	30	34
Natrium	28	28	32
Arsen	28	28	32
Blei	32	30	33
Cadmium	34	29	33
Chrom	33	31	34
Kupfer	35	33	36
Nickel	34	34	35
Phosphor	28	28	32
Quecksilber	41	41	37
Zink	29	29	33
Brom	32	35	24
Chlor	31	28	22
Fluor	38	38	30

3. Messergebnisse der einzelnen Anlagen

Um die Anonymität sicherzustellen, sind die Anlagen mit einem Buchstaben-Code gekennzeichnet und die genauen Typenbezeichnungen weggelassen worden. Die Codierung ist den Auftraggebern und den entsprechenden Behörden bekannt gegeben worden. Die weiteren Informationen sind bei der EMPA archiviert.

Die Untersuchungen der Anlagen B und H konnten aus technischen Gründen nicht ausgeführt werden, darum sind von diesen Anlagen keine Resultate vorhanden.

Die Aufzeichnungen der On-Line-Messgeräte und weitere Angaben zu den Dioxin- und PAK-Analysen sind im Anhang 2 dargestellt.

TOC ist bezogen auf die Kohlenstofffracht klein und wird in der C-Bilanz vernachlässigt.

Die Gehalte der Schadstoffe im Abgas wurde wegen der besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen Anlagen auf 11 Vol-% O₂ bezogen.

< unter der Nachweisgrenze

Die Resultate sind auf eine sinnvolle Anzahl signifikanter Stellen gerundet, dies kann geringe Differenzen zur Folge haben, die jedoch bedeutend kleiner als die Messunsicherheit der entsprechenden Resultate sind.

3.1 ANLAGE A

3.1.1 Beschreibung der Anlage A und der Probenahmestellen

Tabelle 3.1: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Restholz ¹⁾	Baurestholz (von Neubaustellen; Anteil ca. 1/5) u. Verpackungsholz (von Betrieben; Anteil ca. 4/5)
	Klassierung nach LRV	Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c Altholz Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a
	Entnahmestelle	Fallschacht nach dem ersten Kratzförderer alle 10 Min ca. 1 kg (zeitliche Verzögerung korrigiert); 3 Sammelproben
Anlagentyp	Unterschubfeuerung	automatisch geregelt, Leistung ca. 1.8 MW
Rostasche	Austrag	automatisch; 950 g/h
	Entnahmestelle	nach Schneckenförderer, Eintritt Sammelkontainer (zeitliche Verzögerung korrigiert); 3 Sammelproben der gesamten anfallenden Asche
Abgasreinigung	DeNOx	Eindüsung von Harnstoff
	Multizyklon	67 g/h
	Entnahmestelle	nach Schneckenförderer, Eintritt Sammelkontainer 1 Sammelprobe der gesamten anfallenden Asche
Abgas	Entnahmestelle	runder, leicht ansteigender Kanal hinter dem Ofen (D _i = 38 cm) ca. 1 m vor Kamineintritt (strömungstechnisch eher ungünstige Messstelle)

¹⁾ gemäss Klass. der Behörden, Abgasbehandlung entspricht den Anford. einer Restholzfeuerung

3.1.2 Resultate der Anlage A

Tabelle 3.2: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (A)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	13'000 ± 700	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	52.1 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	5.8 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	0.22 ± 0.01	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	0.55 ± 0.10	Gew-%
Wassergehalt	29 ± 1	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	1.5 ± 0.2	MW

Messwerte im Abgas (A)

Tabelle 3.3: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (A)

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
11:25	12:25	128	14.0	5'720	3'350	9.7
12:40	13:40	122	14.0	5'720	3'360	10.9
14:00	15:00	128	14.0	5'720	3'240	12.8
Mittelwerte		126	14.0	5'720	3'320	11.2
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand

²⁾ Normzustand, trocken

Tabelle 3.4: Konzentration der trockenen Abgase (A) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
11:25	12:25	11.9	8.7	327	358	171	188
12:40	13:40	12.1	8.4	394	443	191	215
14:00	15:00	11.2	9.3	350	357	218	223
Mittelwerte		11.7	8.8	357	386	193	208
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 11 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.5: Konzentration der trockenen Abgase (A) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
11:25	- 12:25	142	156	-	-	< 2	< 2
12:40	- 13:40	122	138	-	-	< 2	< 2
14:00	- 15:00	97	99	-	-	2.6	2.7
Mittelwerte		120	131	-	-	< 2	< 2
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10				

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 11 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.6: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (A) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 11 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	11.7 ± 0.4	
Kohlendioxid	Vol-%	8.8 ± 0.9	
Temperatur	°C	126 ± 3	
Wassergehalt	Vol-%	11.2 ± 0.6	
Feststoff	mg/m ³	193 ± 19	208 ± 21
Kohlenmonoxid	mg/m ³	357 ± 36	386 ± 39
Stickoxide	mg/m ³	120 ± 12	131 ± 13
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	< 2	< 2
Summe Blei + Zink	mg/m ³	3.1 ± 0.7	3.4 ± 0.7

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.7: Übersichtstabelle der Gehalte (A)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	1'400	206'000	194'000	39
Kalium	610	25'000	34'000	29
Magnesium	200	19'000	24'000	5.4
Natrium	< 500	15'000	17'000	7.1
Arsen	< 0.5	16	17	0.0054
Blei	2.9	150	1'800	0.62
Cadmium	0.18	< 5	18	0.0095
Chrom	< 20	230	440	0.13
Kupfer	< 5	860	440	0.17
Nickel	< 10	110	180	0.030
Phosphor	37	3'200	7'200	1.6
Quecksilber	< 0.3	< 0.1	0.38	< 0.0008
Zink	23	2'600	5'300	2.8
Brom	< 100	< 100	< 100	< 0.2
Chlor	< 400	< 400	7'500	0.66
Fluor	< 100	< 100	140	< 0.1
EOX	< 3	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	19'000	121'000	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	2800	k.M.	k.M.	58
α-HCH	1.0	k.M.	k.M.	< 1
β-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 1
γ-HCH	5.0	k.M.	k.M.	4.1
δ-HCH	< 1	k.M.	k.M.	1.3
HCB	0.52	k.M.	k.M.	4.6
DDT	< 5	k.M.	k.M.	< 5
Σ PCB	12	7.2	2.9	8.0
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	7.9	370	0.38
Σ Karzinogene EPA	k.M.	1.9	9.1	0.078
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	0.71	4.9	0.063
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	k.M.	n.n.	3.0	2.4
Σ PCDF	k.M.	n.n.	4.2	4.6
Σ I-TEQ	k.M.	n.n.	0.12	0.14

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.8: Übersichtstabelle der Massenströme (A)

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
Calcium	422'000	195'000	13'000	120'000
Kalium	184'000	24'000	2'300	90'000
Magnesium	60'000	18'000	1'600	17'000
Natrium	< 151'000	14'000	1'100	22'000
Arsen	< 150	15	1.1	17
Blei	890	140	120	1'900
Cadmium	54	< 4.7	1.2	29
Chrom	< 6'000	220	29	400
Kupfer	< 1'500	810	29	530
Nickel	< 3'000	100	12	93
Phosphor	11'000	3'000	480	4'800
Quecksilber	< 90	< 0.094	0.025	< 2.3
Zink	7'000	2'500	350	8'500
Brom	< 30'000	< 94	< 6.7	< 660
Chlor	< 121'000	< 380	500	2'000
Fluor	< 30'000	< 94	9.3	< 330
EOX	< 900	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	18'000	8'100	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	844'000	k.M.	k.M.	180
α-HCH	290	k.M.	k.M.	< 3.3
β-HCH	< 300	k.M.	k.M.	< 3.3
γ-HCH	1'500	k.M.	k.M.	13
δ-HCH	< 300	k.M.	k.M.	4.0
HCB	160	k.M.	k.M.	14
DDT	< 1'500	k.M.	k.M.	< 17
Σ PCB	3'500	6.8	0.19	25
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	7.4	25	1'200
Σ Karzinogene EPA	k.M.	1.8	0.61	240
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	0.67	0.33	200
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	k.M.	n.n.	0.20	7.5
Σ PCDF	k.M.	n.n.	0.28	14
Σ I-TEQ	k.M.	n.n.	0.0079	0.42

k.M. keine Messung

n.n. nicht nachweisbar

Tabelle 3.9: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (A)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	57%	4%	39%	
Calcium	59%	4%	37%	78%
Kalium	21%	2%	77%	63%
Magnesium	49%	4%	46%	61%
Natrium	38%	3%	59%	<u>25%</u>
Arsen	46%	3%	51%	<u>22%</u>
Blei	6%	6%	88%	243%
Cadmium	<u>13%</u>	3%	83%	65%
Chrom	34%	5%	62%	<u>11%</u>
Kupfer	59%	2%	39%	<u>91%</u>
Nickel	49%	6%	45%	<u>7%</u>
Phosphor	36%	6%	58%	75%
Quecksilber	<u>4%</u>	1%	<u>95%</u>	<u>3%</u>
Zink	22%	3%	75%	162%
Brom	<u>12%</u>	<u>1%</u>	<u>87%</u>	<u>3%</u>
Chlor	<u>13%</u>	17%	69%	<u>2%</u>
Fluor	<u>22%</u>	2%	<u>76%</u>	<u>1%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (A)

Infolge einer schlechten Messstrecke war nur eine ungenaue Volumenmessung möglich, deshalb nur eine ungenaue Bestimmung der C-Bilanz und damit auch der Brennstoff- und der Aschemenge.

3.2 ANLAGE C

3.2.1 Beschreibung der Anlage C und der Probenahmestellen

Tabelle 3.10: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Altholz	Abbruchholz
	Klassierung nach LRV	Altholz Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a
	Entnahmestelle	Trichter Anfangs Fallschacht (zeitl. Verzögerung korrigiert); alle 10 Min. ca. 1 kg; 3 Sammelproben
Anlagentyp	Rostfeuerung	automatisch geregelt, Leistung ca. 2 MW
Rostasche	Nassaustrag	manueller Kettenförder; 16'600 g/h
	Entnahmestelle	Abwurf zum Container für Rostasche und Zyklon (zeitliche Verzögerung korrigiert); 1 Sammelprobe der gesamten anfallenden Asche
Abgasreinigung	Zyklon	450 g/h
	Elektrofilter	manuelles Klopfen vor und nach der Messung; 830 g/h
	Entnahmestellen	Zyklonasche wie Rostasche, separat; 1 Sammelpr. E-Filteraustrag nach Fallrohr im EG; 1 Sammelprobe
Abgas	Temperatur und online Messgeräte	runder, horizontaler Abgaskanal nach Abzweigung der Rezirkulation (D_i ca. 50 cm)
	Staub und offline gem. Schadstoffe und Dioxine	Kamin auf Dach ($D_i = 57$ cm)

3.2.2 Resultate der Anlage C

Tabelle 3.11: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (C)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	14'300 ± 700	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	49.1 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	5.7 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	1.02 ± 0.03	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	4.7 ± 0.1	Gew-%
Wassergehalt	19 ± 1	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	1.9 ± 0.2	MW

Messwerte im Abgas (C)**Tabelle 3.12: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (C)**

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
10:40	11:30	160	8.4	7'680	4'270	6.9
11:50	12:40	163	9.5	8'700	4'720	8.4
13:00	13:30	164	9.4	8'590	4'610	9.2
Mittelwerte		162	9.1	8'320	4'530	8.1
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand²⁾ Normzustand, trocken**Tabelle 3.13: Konzentration der trockenen Abgase (C) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub**

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
10:40	11:30	11.8	8.6	104	113	3.1	3.4
11:50	12:40	13.5	6.9	68	91	2.2	3.0
13:00	13:30	13.0	7.4	66	83	3.0	3.7
Mittelwerte		12.8	7.7	79	96	2.8	3.4
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 11 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.14: Konzentration der trockenen Abgase (C) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
10:40	- 11:30	310	337	-	-	8.1	8.8
11:50	- 12:40	321	429	-	-	k.M.	k.M.
13:00	- 13:30	304	380	-	-	< 2	< 2
Mittelwerte		311	382	-	-	4.9	5.5
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10			2 mg/m ³	2 mg/m ³

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 11 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.15: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (C) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 11 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	12.8 ± 0.4	
Kohlendioxid	Vol-%	7.7 ± 0.8	
Temperatur	°C	162 ± 3	
Wassergehalt	Vol-%	8.1 ± 0.4	
Feststoff	mg/m ³	2.8 ± 0.3	3.4 ± 0.3
Kohlenmonoxid	mg/m ³	79 ± 8	96 ± 10
Stickoxide	mg/m ³	311 ± 31	382 ± 38
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	4.9 ± 2.0	5.5 ± 2.0
Summe Blei + Zink	mg/m ³	0.90 ± 0.17	1.1 ± 0.2

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.16: Übersichtstabelle der Gehalte (C)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	10'000	133'000	102'000	4.2
Kalium	960	9'700	14'000	< 0.2
Magnesium	1'300	14'000	12'000	< 0.2
Natrium	1'200	9'900	10'000	3.9
Arsen	1.5	25	37	< 0.0004
Blei	1'900	3'800	46'000	0.35
Cadmium	2.2	< 5	94	< 0.0002
Chrom	64	270	200	< 0.01
Kupfer	16	4'800	370	0.10
Nickel	39	140	57	< 0.002
Phosphor	80	860	2000	0.46
Quecksilber	< 0.3	< 0.1	1.0	< 0.0009
Zink	1'700	9'300	61'000	0.74
Brom	< 100	< 100	< 100	< 0.2
Chlor	1'400	< 400	21'000	7.0
Fluor	< 100	< 100	300	0.51
EOX	29	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	91'000	415'000	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	6'500	k.M.	k.M.	49
α-HCH	3.1	k.M.	k.M.	< 1
β-HCH	1.3	k.M.	k.M.	< 1
γ-HCH	240	k.M.	k.M.	5.2
δ-HCH	3.3	k.M.	k.M.	< 1
HCB	0.39	k.M.	k.M.	25
DDT		k.M.	k.M.	< 6
p,p-DDT	180			
o,p-DDT	66			
Σ PCB	380	0.75	18	22
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	170	14'000	150
Σ Karzinogene EPA	k.M.	51	380	38
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	32	200	25
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	k.M.	3.3	30	53
Σ PCDF	k.M.	0.17	80	170
Σ I-TEQ	k.M.	0.070	1.8	3.0

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.17: Übersichtstabelle der Massenströme (C)

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
Calcium	3'800'000	2'210'000	46'000	16'000
Kalium	365'000	161'000	6'300	< 910
Magnesium	494'000	233'000	5'400	< 910
Natrium	456'000	165'000	4'500	15'000
Arsen	570	410	17	< 1.4
Blei	722'000	63'000	21'000	1'300
Cadmium	830	< 83	43	< 0.91
Chrom	24'000	4'500	91	< 36
Kupfer	5'900	80'000	170	360
Nickel	15'000	2'300	26	< 9.1
Phosphor	30'000	14'000	910	1'700
Quecksilber	< 110	< 1.7	0.44	< 3.2
Zink	646'000	155'000	28'000	2'800
Brom	< 38'000	< 1'700	< 45	< 910
Chlor	530'000	< 7'000	9500	26'000
Fluor	< 38'000	< 1'700	140	1'900
EOX	11'000	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	1'510'000	188'000	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	2'470'000	k.M.	k.M.	180
α-HCH	1'190	k.M.	k.M.	< 4.5
β-HCH	490	k.M.	k.M.	< 4.9
γ-HCH	91'000	k.M.	k.M.	19
δ-HCH	1'260	k.M.	k.M.	< 5.0
HCB	150	k.M.	k.M.	92
DDT		k.M.	k.M.	< 23
p,p-DDT	68'000	k.M.	k.M.	
o,p-DDT	25'000	k.M.	k.M.	
Σ PCB	144'000	12	8.00	81
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	2'800	6'300	544'000
Σ Karzinogene EPA	k.M.	860	170	141'000
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	530	91	93'000
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	k.M.	55	14	200
Σ PCDF	k.M.	2.8	36	630
Σ I-TEQ	k.M.	1.2	0.84	11

k.M. keine Messung

Tabelle 3.18: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (C)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	EF-Asche ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	93%	3%	0%	5%	
Calcium	88%	2%	1%	10%	66%
Kalium	93%	4%	<u>1%</u>	3%	47%
Magnesium	97%	2%	<u>0%</u>	0%	49%
Natrium	73%	2%	7%	18%	49%
Arsen	78%	3%	<u>0%</u>	19%	92%
Blei	34%	11%	1%	54%	25%
Cadmium	<u>21%</u>	11%	<u>0%</u>	68%	48%
Chrom	95%	2%	<u>1%</u>	2%	20%
Kupfer	99%	0%	0%	0%	1371%
Nickel	97%	1%	<u>0%</u>	1%	16%
Phosphor	80%	5%	10%	5%	59%
Quecksilber	<u>13%</u>	3%	<u>24%</u>	60%	<u>12%</u>
Zink	36%	6%	1%	57%	67%
Brom	<u>61%</u>	<u>2%</u>	<u>32%</u>	5%	<u>7%</u>
Chlor	<u>16%</u>	22%	61%	<u>0%</u>	8%
Fluor	<u>39%</u>	3%	43%	15%	<u>12%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (C)

Die entnommene Menge Rostasche war wegen Nassaustrag nicht direkt quantifizierbar und wurde über den Aschegehalt des Brennstoffs berechnet.

3.3 ANLAGE D

3.3.1 Beschreibung der Anlage D und der Probenahmestellen

Tabelle 3.19: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Naturbelas- senes Holz	Waldhackschnitzel (Referenzanlage)
	Klassierung nach LRV	Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. b
	Entnahmestelle	Sichtfenster vor Ofen, am Ende des Kratzförderers. Alle 10 Min ca. 1.2 kg (zeitliche Verzögerung korrigiert); 3 Sammelproben
Anlagentyp	Unterschubfeuerung	automatisch geregelt, Leistung 930 kW
Rostasche	Austrag	manuell nach Ende der Messungen; 3'800 g/h
	Entnahmestelle	Öffnung linke Ofenseite (4 Schrauben). Probenahmeort mit Alu-Folie ausgelegt; 1 Sammelprobe
Abgasreinigung	Zyklon	manueller Austrag; 110 g/h
	Entnahmestelle	Austrag vor Zellradschleuse; 1 Sammelprobe
Abgas	Temperatur und online Messgeräte	runder Abgaskanal nach Gebläse ($D_i = 47$ cm) mit 2½" Messstutzen
	Staub und offline gem. Schadstoffe	runder Abgaskanal ($D_i = 47$ cm) mit EMPA Stutzen ca. 50 cm vor 45° Krümmer
	Entnahmestelle für Dioxine	Inspektionsdeckel vor Staubmessstelle ($D_i = 47$ cm)

3.3.2 Resultate der Anlage D

Tabelle 3.20: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (D)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	10'100 ± 500	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	50.6 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	5.7 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	0.24 ± 0.01	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	3.2 ± 0.1	Gew-%
Wassergehalt	43 ± 1	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	0.62 ± 0.07	MW

Messwerte im Abgas (D)**Tabelle 3.21: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (D)**

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
9:10	10:10	144	3.1	1'950	1'050	14.1
10:30	11:30	149	3.2	2'010	1'080	13.3
12:07	13:07	156	3.3	2'080	1'080	14.5
Mittelwerte		150	3.2	2'010	1'070	14.0
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand²⁾ Normzustand, trocken**Tabelle 3.22: Konzentration der trockenen Abgase (D) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub**

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
9:10	10:10	10.3	10.5	131	98	142	106
10:30	11:30	10.3	10.6	104	78	150	112
12:07	13:07	9.1	11.8	62	42	186	125
Mittelwerte		9.9	11.0	99	73	159	114
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.23: Konzentration der trockenen Abgase (D) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
9:10	- 10:10	255	191	247	185	12.8	9.6
10:30	- 11:30	256	191	250	187	6.2	4.6
12:07	- 13:07	276	185	269	180	8.4	5.6
Mittelwerte		262	189	255	184	9.1	6.6
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10	10	10	2 mg/m ³	2 mg/m ³

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.24: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (D) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 13 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	9.9 ± 0.3	
Kohlendioxid	Vol-%	11.0 ± 1.1	
Temperatur	°C	150 ± 3	
Wassergehalt	Vol-%	14.0 ± 0.7	
Feststoff	mg/m ³	159 ± 16	114 ± 11
Kohlenmonoxid	mg/m ³	99 ± 10	73 ± 7
Stickoxide	mg/m ³	262 ± 26	189 ± 19
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	9.1 ± 2.0	6.6 ± 2.0
Summe Blei + Zink	mg/m ³	0.83 ± 0.20	0.60 ± 0.14

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.25: Übersichtstabelle der Gehalte (D)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	3'000	315'000	256'000	3.5
Kalium	1'500	132'000	74'000	47
Magnesium	290	30'000	25'000	< 0.2
Natrium	< 500	8'600	7'900	2.1
Arsen	< 0.5	8.4	9.5	0.0013
Blei	< 2	10	40	0.029
Cadmium	< 0.05	< 5	13	0.0019
Chrom	< 20	21	26	< 0.007
Kupfer	< 5	260	170	0.040
Nickel	< 10	20	20	0.012
Phosphor	130	16'000	14'000	0.50
Quecksilber	< 0.3	< 0.1	< 0.1	< 0.0006
Zink	11	260	1'200	0.72
Brom	< 100	< 100	< 100	< 0.2
Chlor	< 400	< 400	800	0.31
Fluor	< 100	< 100	< 100	< 0.1
EOX	< 3	k.M.	k.M.	k.M
TOC	k.M.	2'900	1'200	k.M
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	1.9	k.M.	k.M.	16
α-HCH	< 0.1	k.M.	k.M.	< 1
β-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 1
γ-HCH	0.41	k.M.	k.M.	3.4
δ-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 1
HCB	< 0.1	k.M.	k.M.	1.9
DDT	< 5	k.M.	k.M.	< 4
Σ PCB	n.n.	n.n.	4.0	48
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	28	17'000	k.M.
Σ Karzinogene EPA	k.M.	2.1	4'400	k.M.
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	1.3	3'500	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	k.M.	0.045	0.028	1.8
Σ PCDF	k.M.	0.042	0.032	2.4
Σ I-TEQ	k.M.	0.0017	0.0011	0.047

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.26: Übersichtstabelle der Massenströme (D)

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
Calcium	376'000	1'190'000	28'000	4'200
Kalium	188'000	499'000	8'200	55'000
Magnesium	36'000	113'000	2'800	< 210
Natrium	< 63'000	32'000	870	2'500
Arsen	< 63	32	1.0	1.6
Blei	< 250	38	4.4	34
Cadmium	< 6.3	< 19	1.4	2.2
Chrom	< 2500	79	2.9	< 8.6
Kupfer	< 630	980	19	47
Nickel	< 1300	80	2.2	14
Phosphor	16'000	60'000	1'500	600
Quecksilber	< 38	< 0.38	< 0.011	< 0.75
Zink	1'400	982	130	860
Brom	< 13'000	< 380	< 11	< 210
Chlor	< 50'000	< 1'500	88	360
Fluor	< 13'000	< 380	< 11	< 110
EOX	< 380	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	11'000	130	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	230	k.M.	k.M.	19
α-HCH	< 10	k.M.	k.M.	< 1
β-HCH	< 130	k.M.	k.M.	< 1
γ-HCH	50	k.M.	k.M.	3.7
δ-HCH	< 130	k.M.	k.M.	< 1
HCB	< 13	k.M.	k.M.	2.3
DDT	< 630	k.M.	k.M.	< 5
Σ PCB	n.n.	n.n.	0.44	57
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	110	1'900	k.M.
Σ Karzinogene EPA	k.M.	7.9	490	k.M.
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	4.9	390	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	k.M.	0.17	0.0030	2.1
Σ PCDF	k.M.	0.16	0.0036	2.9
Σ I-TEQ	k.M.	0.0063	0.00013	0.056

k.M. keine Messung

Tabelle 3.27: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (D)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	93%	3%	4%	
Calcium	97%	2%	0%	325%
Kalium	89%	1%	10%	299%
Magnesium	97%	2%	<u>0%</u>	322%
Natrium	90%	2%	7%	<u>56%</u>
Arsen	92%	3%	5%	<u>55%</u>
Blei	50%	6%	45%	<u>30%</u>
Cadmium	<u>84%</u>	6%	10%	<u>359%</u>
Chrom	87%	3%	<u>9%</u>	<u>4%</u>
Kupfer	94%	2%	4%	<u>166%</u>
Nickel	83%	2%	14%	<u>7%</u>
Phosphor	97%	2%	1%	388%
Quecksilber	<u>33%</u>	<u>1%</u>	<u>66%</u>	<u>3%</u>
Zink	50%	7%	44%	141%
Brom	<u>63%</u>	<u>2%</u>	<u>35%</u>	<u>5%</u>
Chlor	<u>77%</u>	5%	18%	<u>4%</u>
Fluor	<u>76%</u>	<u>2%</u>	<u>22%</u>	<u>4%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (D)

Die Rostaschemenge wurde über den Aschegehalt des Brennstoffs berechnet.

3.4 ANLAGE E

3.4.1 Beschreibung der Anlage E und der Probenahmestellen

Tabelle 3.28: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Naturbelas- senes Holz	Waldhackschnitzel (Referenzanlage)
	Klassierung nach LRV	Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. b
	Entnahmestelle	Fallschacht nach dem ersten Kratzförderer alle 10 Min ca. 1 kg (zeitliche Verzögerung korri- giert); 3 Sammelproben
Anlagentyp	Vorofen mit 2 stufiger Verbrennung	automatisch geregelt, Leistung ca. 160 kW
Rostasche	Austrag	automatisch; 300 g/h
	Entnahmestelle	Ascheschublade; 1 Sammelprobe
Abgasreinigung	Zyklon	2.3 g/h
	Entnahmestelle	Eimer unter Zyklon; 1 Sammelprobe.
Abgas	Temperatur und online Messgeräte	Inspektionsdeckel im Krümmer des runden Ab- gaskanals ($D_i = 27$ cm), zwischen Zyklon / Kamin
	Staub und offline gem. Schadstoffe	Erdgeschoss. Runder, vertikaler Abgaskanal ($D_i =$ 27 cm)
	Entnahmestelle; Dioxine	runder, vertikaler Abgaskanal ($D_i = 27$ cm) im Est- rich; rechteckiger Inspektionsdeckel

3.4.2 Resultate der Anlage E

Tabelle 3.29: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (E)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	9'600 ± 500	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	51.1 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	5.2 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	0.31 ± 0.01	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	1.1 ± 0.1	Gew-%
Wassergehalt	47 ± 1	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	0.17 ± 0.02	MW

Messwerte im Abgas (E)**Tabelle 3.30: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (E)**

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
9:05	10:05	145	3.2	650	360	11.7
10:30	11:30	142	3.4	690	390	10.2
11:45	12:45	148	2.9	600	340	9.4
Mittelwerte		145	3.1	650	360	10.4
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand²⁾ Normzustand, trocken**Tabelle 3.31: Konzentration der trockenen Abgase (E) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub**

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
9:05	10:05	10.1	9.3	890	650	117	86
10:30	11:30	11.2	8.3	1120	910	117	95
11:45	12:45	11.5	8.5	1080	910	131	110
Mittelwerte		10.9	8.7	1030	820	122	97
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.32: Konzentration der trockenen Abgase (E) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
9:05	- 10:05	319	233	-	-	23	16
10:30	- 11:30	273	222	-	-	42	34
11:45	- 12:45	306	259	-	-	36	30
Mittelwerte		300	238	-	-	33	27
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10			10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.33: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (E) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 13 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	10.9 ± 0.3	
Kohlendioxid	Vol-%	8.7 ± 0.9	
Temperatur	°C	145 ± 3	
Wassergehalt	Vol-%	10.4 ± 0.5	
Feststoff	mg/m ³	122 ± 12	97 ± 10
Kohlenmonoxid	mg/m ³	1030 ± 103	820 ± 82
Stickoxide	mg/m ³	300 ± 30	238 ± 24
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	33 ± 3	27 ± 3
Summe Blei + Zink	mg/m ³	0.61 ± 0.14	0.49 ± 0.11

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.34: Übersichtstabelle der Gehalte (E)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	5'400	304'000	242'000	19
Kalium	1'200	54'000	82'000	43
Magnesium	310	23'000	31'000	1.2
Natrium	< 500	16'000	12'000	3.0
Arsen	< 0.5	10	6.0	0.0026
Blei	< 2	10	70	0.068
Cadmium	< 0.05	< 5	6.2	0.0020
Chrom	< 20	32	30	< 0.008
Kupfer	< 5	180	170	0.044
Nickel	< 10	30	27	0.0094
Phosphor	190	9'600	9'800	0.66
Quecksilber	< 0.3	0.15	0.23	< 0.0007
Zink	< 10	110	810	0.54
Brom	< 100	< 100	< 100	< 0.2
Chlor	< 400	< 400	1'100	0.42
Fluor	< 100	< 100	< 100	< 0.1
EOX	< 3	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	96'000	83'000	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	12	k.M.	k.M.	15
α-HCH	0.24	k.M.	k.M.	< 1
β-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 1
γ-HCH	0.84	k.M.	k.M.	3.7
δ-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 1
HCB	0.15	k.M.	k.M.	0.9
DDT	< 5	k.M.	k.M.	< 5
Σ PCB	1.3	3.1	3.7	18
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	2.9	12'000	21
Σ Karzinogene EPA	k.M.	0.65	4'400	5.3
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	0.38	3'800	3.6
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	k.M.	0.031	0.21	0.093
Σ PCDF	k.M.	0.020	0.21	0.15
Σ I-TEQ	k.M.	0.00098	0.0081	0.0042

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.35: Übersichtstabelle der Massenströme (E)

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
Calcium	181'000	92'000	570	6'800
Kalium	40'000	16'000	190	16'000
Magnesium	10'000	7'000	72	420
Natrium	< 17'000	4'800	28	1'100
Arsen	< 17	3.0	0.014	1.0
Blei	< 70	3.0	0.16	25
Cadmium	< 2	< 1.5	0.014	0.7
Chrom	< 670	10	0.070	< 2.9
Kupfer	< 170	55	0.40	16
Nickel	< 340	9.1	0.063	3.4
Phosphor	6'400	2'900	23	240
Quecksilber	< 10	0.045	0.00054	< 0.25
Zink	< 340	33	1.9	196
Brom	< 3'400	< 30	< 0.23	< 72
Chlor	< 13'000	< 120	2.6	150
Fluor	< 3'400	< 30	< 0.23	< 36
EOX	< 110	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	29'000	190	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	400	k.M.	k.M.	5.6
α-HCH	8.0	k.M.	k.M.	< 0.36
β-HCH	< 34	k.M.	k.M.	< 0.36
γ-HCH	28	k.M.	k.M.	1.3
δ-HCH	< 34	k.M.	k.M.	< 0.36
HCB	5.0	k.M.	k.M.	0.31
DDT	< 170	k.M.	k.M.	< 1.8
Σ PCB	42	0.92	0.0086	6.6
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	0.87	28	7'600
Σ Karzinogene EPA	k.M.	0.20	10	1'900
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	0.12	8.9	1'300
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	k.M.	0.0093	0.00049	0.034
Σ PCDF	k.M.	0.0060	0.00050	0.053
Σ I-TEQ	k.M.	0.00030	0.000019	0.0015

k.M. keine Messung

Tabelle 3.36: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (E)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	81%	1%	12%	
Calcium	93%	1%	7%	55%
Kalium	50%	1%	50%	80%
Magnesium	93%	1%	6%	75%
Natrium	81%	0%	19%	<u>35%</u>
Arsen	76%	0%	24%	<u>24%</u>
Blei	11%	1%	89%	<u>40%</u>
Cadmium	<u>67%</u>	1%	32%	<u>135%</u>
Chrom	77%	1%	<u>23%</u>	<u>2%</u>
Kupfer	77%	1%	23%	<u>42%</u>
Nickel	72%	1%	27%	<u>4%</u>
Phosphor	92%	1%	8%	49%
Quecksilber	15%	0%	<u>85%</u>	<u>3%</u>
Zink	14%	1%	85%	<u>68%</u>
Brom	<u>30%</u>	<u>0%</u>	<u>70%</u>	<u>3%</u>
Chlor	<u>44%</u>	1%	55%	<u>2%</u>
Fluor	<u>46%</u>	<u>0%</u>	<u>54%</u>	<u>2%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (E)

Die Rostaschemenge wurde über den Aschegehalt des Brennstoffs berechnet.

Kondensatbildung in der Zyklonasche!

3.5 ANLAGE F

3.5.1 Beschreibung der Anlage F und der Probenahmestellen

Tabelle 3.37: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Schreinerei- Restholz ¹⁾	Spanplatten (20% beschichtet) aus eigener Pro- duktion mit hohem Produktionsanteil, alte Möbel
	Klassierung nach LRV	Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c z. T. Altholz Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a
	Entnahmestelle	Fallrohr nach Silo, Öffnung oberhalb Zellschleuse; alle 10 Min ca. 1 kg (zeitliche Verzögerung korri- giert); 3 Sammelproben
Anlagentyp	Unterschubfeuerung	automatisch geregelt, Leistung 450 kW
Rostasche	Austrag	automatisch; 750 g/h
	Entnahmestelle	Aschebehälter Container (zeitliche Verzögerung korrigiert); 1 Sammelproben
Abgasreinigung	DeNOx	Eindüsung von Harnstoff
	Zyklon	11 g/h
	Entnahmestelle	vor Zellradschleuse; manuell; 1 Sammelprobe
Abgas	Staub und gasf. Schad- stoffe	gemauertes Kamin ($D_i = 110$ cm) im 1 Stock mit 1 EMPA-Messstutzen
	Dioxine	Inspektionsdeckel im Krümmer des runden, verti- kalen Abgaskanals ($D_i = 19$ cm), zwischen Zyklon und Kamin (Keller)

¹⁾gemäss Klass. der Behörden, Abgasbehandlung entspricht den Anforder. einer Restholzfeuerung

3.5.2 Resultate der Anlage F

Tabelle 3.38: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (F)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	16'700 ± 840	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	49.8 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	6.4 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	2.5 ± 0.1	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	1.00 ± 0.10	Gew-%
Wassergehalt	8.4 ± 0.3	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	0.43 ± 0.05	MW

Messwerte im Abgas (F)**Tabelle 3.39: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (F)**

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
08:20	09:20	117	0.94	3'210	2'100	3.7
09:45	10:45	131	0.82	2'800	1'760	4.5
11:05	12:05	141	0.79	2'710	1'660	4.9
Mittelwerte		129	0.85	2'910	1'840	4.4
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand²⁾ Normzustand, trocken**Tabelle 3.40: Konzentration der trockenen Abgase (F) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub**

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
08:20	09:20	16.8	3.7	18	34	46	87
09:45	10:45	16.3	4.5	22	38	53	90
11:05	12:05	16.0	4.9	21	33	68	108
Mittelwerte		16.4	4.4	20	35	56	95
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.41: Konzentration der trockenen Abgase (F) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
08:20	- 09:20	34	64	-	-	2.2	4.2
09:45	- 10:45	-	-	-	-	2.0	3.5
11:05	- 12:05	-	-	-	-	2.6	4.2
Mittelwerte		34	64	-	-	2.3	4.0
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10			2 mg/m ³	2 mg/m ³

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.42: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (F) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 13 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	16.4 ± 0.5	
Kohlendioxid	Vol-%	4.4 ± 0.4	
Temperatur	°C	129 ± 3	
Wassergehalt	Vol-%	4.4 ± 0.2	
Feststoff	mg/m ³	56 ± 6	95 ± 10
Kohlenmonoxid	mg/m ³	20 ± 2	35 ± 3
Stickoxide	mg/m ³	34 ± 3	64 ± 6
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	2.3 ± 2.0	4.0 ± 2.0
Summe Blei + Zink	mg/m ³	2.3 ± 0.4	4.0 ± 0.7

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.43: Übersichtstabelle der Gehalte (F)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	1'900	183'000	135'000	< 1
Kalium	600	30'000	77'000	34
Magnesium	220	22'000	17'000	< 0.4
Natrium	< 500	22'000	35'000	17
Arsen	< 0.5	23	19	0.011
Blei	26	1'300	6'700	1.9
Cadmium	0.63	39	220	0.025
Chrom	< 20	250	290	< 0.02
Kupfer	< 5	560	810	0.37
Nickel	< 10	100	100	0.069
Phosphor	120	11'000	11'300	1.1
Quecksilber	< 0.3	0.24	1.6	< 0.002
Zink	55	3'100	13'000	3.0
Brom	< 100	< 100	190	< 0.4
Chlor	1'500	30'000	192'000	23
Fluor	< 100	340	810	< 0.2
EOX	4.5	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	28'000	67'000	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	1'000	k.M.	k.M.	130
α-HCH	1.8	k.M.	k.M.	< 2
β-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 2
γ-HCH	16	k.M.	k.M.	6.5
δ-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 2
HCB	0.18	k.M.	k.M.	100
DDT	< 5	k.M.	k.M.	< 11
Σ PCB	20	6.5	31	55
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	180	660	0.41
Σ Karzinogene EPA	k.M.	53	320	0.041
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	34	180	0.017
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	k.M.	120	1'200	97
Σ PCDF	k.M.	130	1'200	210
Σ I-TEQ	k.M.	4.7	34	6.4

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.44: Übersichtstabelle der Massenströme (F)

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
Calcium	163'000	136'000	1'500	< 550
Kalium	52'000	22'000	840	29'000
Magnesium	19'000	16'000	180	< 370
Natrium	< 43000	16'000	380	15'000
Arsen	< 43	17	0.21	10
Blei	2'200	970	73	1'600
Cadmium	54	29	2.4	22
Chrom	< 1700	190	3.2	< 15
Kupfer	< 430	420	8.8	320
Nickel	< 860	75	1.1	59
Phosphor	10'300	8'200	120	940
Quecksilber	< 26	0.18	0.018	< 1.3
Zink	4'800	2'300	140	2'600
Brom	< 8'600	< 75	2.1	< 370
Chlor	129'000	22'000	2'100	20'000
Fluor	< 8'600	250	8.8	< 180
EOX	380	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	21'000	730	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	86'000	k.M.	k.M.	110
α-HCH	160	k.M.	k.M.	< 2
β-HCH	< 86	k.M.	k.M.	< 2
γ-HCH	1'400	k.M.	k.M.	5.6
δ-HCH	< 86	k.M.	k.M.	< 2
HCB	16	k.M.	k.M.	88
DDT	< 430	k.M.	k.M.	< 9
Σ PCB	1'700	4.8	0.34	47
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	130	7.2	350
Σ Karzinogene EPA	k.M.	40	3.5	35
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	26	2.0	15
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	k.M.	89	13	83
Σ PCDF	k.M.	97	13	180
Σ I-TEQ	k.M.	3.5	0.37	5.5

k.M. keine Messung

Tabelle 3.45: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (F)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	87%	1%	12%	
Calcium	99%	1%	<u>0%</u>	85%
Kalium	42%	2%	56%	100%
Magnesium	97%	1%	<u>2%</u>	87%
Natrium	51%	1%	48%	<u>73%</u>
Arsen	64%	1%	35%	<u>63%</u>
Blei	37%	3%	61%	120%
Cadmium	55%	5%	41%	99%
Chrom	91%	2%	<u>7%</u>	<u>12%</u>
Kupfer	56%	1%	43%	<u>174%</u>
Nickel	56%	1%	44%	<u>16%</u>
Phosphor	89%	1%	10%	90%
Quecksilber	12%	1%	<u>87%</u>	<u>6%</u>
Zink	46%	3%	52%	105%
Brom	<u>17%</u>	0%	<u>83%</u>	<u>5%</u>
Chlor	50%	5%	45%	34%
Fluor	57%	2%	<u>41%</u>	<u>5%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (F)

Zwei unterschiedliche Messstellen für Dioxin / Volumenstrom und die übrigen im Abgas gemessenen Parameter, NOx Gerätedefekt ab Probe 2; die Rostaschemenge wurde über den Aschegehalt des Brennstoffs berechnet.

3.6 ANLAGE G

3.6.1 Beschreibung der Anlage G und der Probenahmestellen

Tabelle 3.46: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Restholz- schnittzel ¹⁾	Einwegpaletten (optisch sortiert, ohne problematische graue Presspanfüsse)
	Klassierung nach LRV	Altholz Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a
	Entnahmestelle	Fallschacht Siloaustrag vor Magnetabscheider (zeitliche Verzögerung korrigiert); 3 Sammel- und 1 Zwischenprobe
Anlagentyp	Rostfeuerung	automatisch geregelt, Leistung ca. 3 MW
Rostasche	Austrag	automatisch; 2'400 g/h
	Entnahmestelle	Sammelcontainer nach Schneckenförderer; (zeitliche Verzögerung korrigiert); 3 Sammelproben. Asche teilweise geschmolzen zusätzlich eine Stichprobe von den Ablagerungen auf der Ofenrückseite
Abgasreinigung	Zyklon	190 g/h
	Entnahmestelle	Container hinter dem Ofen
Abgas	Temperatur und online Messgeräte	Abgaskanal nach Gebläse vor Kamineintritt
	Staub und offline gem. Schadstoffe und Dioxine	Gemauerter Kamin (D _i = 53x98 cm) auf dem Dach

¹⁾ gemäss Klass. der Behörden, Abgasbehandlung entspricht den Anforder. einer Restholzfeuerung

3.6.2 Resultate der Anlage G

Tabelle 3.47: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (G)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	15'900 ± 800	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	50.6 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	5.6 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	0.45 ± 0.01	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	0.56 ± 0.10	Gew-%
Wassergehalt	17 ± 0.5	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	3.2 ± 0.4	MW

Messwerte im Abgas (G)**Tabelle 3.48: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (G)**

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
09:10	- 10:10	257	8.2	15'900	6'960	9.3
11:05	- 12:05	254	8.4	16'300	7'030	11.6
12:25	- 13:25	233	7.8	15'200	7'000	9.2
Mittelwerte		248	8.1	15'800	7'000	10.0
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand²⁾ Normzustand, trocken**Tabelle 3.49: Konzentration der trockenen Abgase (G) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub**

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
09:10	- 10:10	11.0	9.6	134	134	142	141
11:05	- 12:05	12.1	8.4	65	73	110	124
12:25	- 13:25	13.9	6.5	74	105	95	134
Mittelwerte		12.3	8.2	91	104	116	133
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 11 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.50: Konzentration der trockenen Abgase (G) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
9:10	- 10:10	237	236	226	226	3.2	3.2
11:05	- 12:05	192	216	181	203	3.1	3.5
12:25	- 13:25	134	190	138	195	2.8	3.9
Mittelwerte		188	214	182	208	3.0	3.5
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10	10	10	2 mg/m ³	2 mg/m ³

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 11 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.51: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (G) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 11 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	12.3 ± 0.4	
Kohlendioxid	Vol-%	8.2 ± 0.8	
Temperatur	°C	248 ± 5	
Wassergehalt	Vol-%	10.0 ± 0.5	
Feststoff	mg/m ³	116 ± 12	133 ± 13
Kohlenmonoxid	mg/m ³	91 ± 9	104 ± 10
Stickoxide	mg/m ³	188 ± 19	214 ± 21
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	3.0 ± 2.0	3.5 ± 2.0
Summe Blei + Zink	mg/m ³	2.5 ± 0.5	2.9 ± 0.6

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.52: Übersichtstabelle der Gehalte (G)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	880	208'000	255'000	2.4
Kalium	580	46'000	66'000	39
Magnesium	150	29'000	38'000	0.41
Natrium	< 500	23'000	34'000	11
Arsen	< 0.5	39	41	0.011
Blei	< 8.0	960	3'000	0.50
Cadmium	< 2	9.7	82	0.0072
Chrom	< 20	540	510	0.087
Kupfer	< 5	1'100	750	0.14
Nickel	< 10	170	<150	0.014
Phosphor	< 30	5'900	10'000	0.35
Quecksilber	< 0.3	< 0.1	< 0.1	< 0.0008
Zink	21	2'200	7'800	2.4
Brom	< 100	< 100	150	< 0.2
Chlor	< 3'000	< 3'000	11'200	< 0.2
Fluor	< 100	< 100	< 100	0.24
EOX	< 3	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	6'400	49'000	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	370	10	120	94
Σ HCH	3.0	< 1	< 0.3	4.5
HCB	0.33	< 0.10	4.7	100
DDT	< 5	< 5	< 5	< 5
Σ PCB	55	20	k.M.	n.n.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	37	57	0.042
Σ Karzinogene EPA	k.M.	13	16	0.010
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	10	11	0.0053
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	0.36	0.13	3.3	0.46
Σ PCDF	0.13	0.084	13	2.4
Σ I-TEQ	0.0044	0.0040	0.43	0.059

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.53: Übersichtstabelle der Massenströme (G)

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
Calcium	537'000	505'000	49'000	14'000
Kalium	354'000	112'000	13'000	237'000
Magnesium	92'000	70'000	7'300	2'500
Natrium	< 305'000	56'000	6'500	67'000
Arsen	< 310	96	8	69
Blei	< 4'900	2'300	580	3'000
Cadmium	< 1200	23	16	44
Chrom	< 12'000	1'300	98	530
Kupfer	< 3'100	2'700	140	860
Nickel	< 6'100	410	< 29	87
Phosphor	< 18'000	14'000	1'900	2'100
Quecksilber	< 180	< 0.24	< 0.019	< 4.9
Zink	13'000	5'300	1'500	15'000
Brom	< 61'000	< 240	29	< 1'400
Chlor	< 1'830'000	7'300	2'200	< 1'400
Fluor	< 61'000	< 240	< 19	1'500
EOX	< 1'800	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	16'000	9'400	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	226'000	25	23	570
Σ HCH	1'800	< 2.4	< 0.058	27
HCB	200	< 0.2	0.90	610
DDT	< 3100	< 12	< 1.0	< 35
Σ PCB	34'000	49	k.M.	n.n.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	90	11	250
Σ Karzinogene EPA	k.M.	32	3.1	60
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	25	2.1	32
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	220	0.30	0.63	2.8
Σ PCDF	77	0.20	2.4	14
Σ I-TEQ	2.7	0.010	0.083	0.36

k.M. keine Messung

Tabelle 3.54: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (G)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	71%	6%	24%	
Calcium	89%	9%	2%	106%
Kalium	31%	4%	65%	102%
Magnesium	88%	9%	3%	87%
Natrium	43%	5%	52%	<u>42%</u>
Arsen	55%	5%	40%	<u>56%</u>
Blei	39%	10%	51%	<u>120%</u>
Cadmium	28%	19%	53%	<u>7%</u>
Chrom	67%	5%	27%	<u>16%</u>
Kupfer	73%	4%	23%	<u>119%</u>
Nickel	78%	<u>5%</u>	17%	<u>9%</u>
Phosphor	78%	11%	12%	<u>100%</u>
Quecksilber	<u>5%</u>	<u>0%</u>	<u>95%</u>	<u>3%</u>
Zink	24%	7%	69%	168%
Brom	<u>14%</u>	2%	<u>84%</u>	<u>3%</u>
Chlor	68%	19%	<u>13%</u>	<u>1%</u>
Fluor	<u>14%</u>	<u>1%</u>	85%	<u>3%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (G)

Unverbranntes Holz in der Schlacke (Rostdurchfall) vorhanden.

Die Rostaschemenge war unsicher und wurde deshalb über den Aschegehalt des Brennstoffs berechnet.

3.7 ANLAGE I

3.7.1 Beschreibung der Anlage I und der Probenahmestellen

Tabelle 3.55: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Restholz- schnittzel ¹⁾	Baurestholz; auf der Baustelle sortiert (keine Kontrolle des unzerklein. Holzes)
	Klassierung nach LRV	Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c
	Entnahmestelle	aus Kratzförderer; alle 10 Min ca. 0.5 kg (zeitliche Verzögerung korrigiert); 3 Sammelproben
Anlagentyp	Unterschubfeuerung	automatisch geregelt, Leistung ca. 80 kW
Rostasche	Austrag	manuell; 200 g/h
	Entnahmestelle	nach Schneckenförderer (zeitliche Verzögerung korrigiert); 3 Sammelproben
Abgasreinigung	Zyklon	4 g/h
	Entnahmestelle	Austrag in Kessel 3 Sammelproben
Abgas	Temperatur und online Messgeräte	Bohrloch im runden, waagrechten Abgaskanal (D _i = 19 cm) vor Schalldämpfer
	Staub und offline gem. Schadstoffe	EMPA-Stutzen im runden, waagrechten Abgaskanal (D _i = 19 cm) nach Schalldämpfer
	Entnahmestelle; Dioxine	Inspektiondeckel im Krümmer des Abgaskanals zwischen Schalldämpfer und Kamin

¹⁾ gemäss Klass. der Behörden, Abgasbehandlung entspricht den Anforder. einer Restholzfeuerung

3.7.2 Resultate der Anlage I

Tabelle 3.56: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (I)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	15'500 ± 800	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	50.1 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	5.3 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	0.43 ± 0.01	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	1.9 ± 0.1	Gew-%
Wassergehalt	16.0 ± 0.5	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	0.059 ± 0.007	MW

Messwerte im Abgas (I)**Tabelle 3.57: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (I)**

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
08:25	- 09:25	185	2.5	260	130	7.5
09:40	- 10:40	189	2.5	260	130	7.1
10:55	- 11:55	187	2.5	260	130	8.0
Mittelwerte		187	2.5	260	130	7.6
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand²⁾ Normzustand, trocken**Tabelle 3.58: Konzentration der trockenen Abgase (I) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub**

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
08:25	- 09:25	12.8	8.2	143	139	123	119
09:40	- 10:40	13.5	7.5	135	144	106	113
10:55	- 11:55	12.4	8.6	162	150	138	128
Mittelwerte		12.9	8.1	147	145	122	120
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.59: Konzentration der trockenen Abgase (I) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
08:25	- 09:25	268	261	-	-	2.5	2.4
09:40	- 10:40	246	262	-	-	2.8	3.0
10:55	- 11:55	284	263	-	-	3.2	2.9
Mittelwerte		266	262	-	-	2.8	2.8
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10			2 mg/m ³	2 mg/m ³

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.60: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (I) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 13 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	12.9 ± 0.4	
Kohlendioxid	Vol-%	8.1 ± 0.8	
Temperatur	°C	187 ± 4	
Wassergehalt	Vol-%	7.6 ± 0.4	
Feststoff	mg/m ³	122 ± 12	120 ± 12
Kohlenmonoxid	mg/m ³	147 ± 15	145 ± 14
Stickoxide	mg/m ³	266 ± 27	262 ± 26
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	2.8 ± 2.0	2.8 ± 2.0
Summe Blei + Zink	mg/m ³	17 ± 3	17 ± 3

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.61: Übersichtstabelle der Gehalte (I)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	3'800	268'000	189'000	< 0.4
Kalium	1'000	38'000	36'000	35
Magnesium	290	23'000	20'000	< 0.2
Natrium	1'300	21'000	15'000	11
Arsen	0.93	24	18	0.056
Blei	67	770	2'300	6.6
Cadmium	0.56	6.3	29	0.029
Chrom	47	1'600	950	0.21
Kupfer	28	1'800	750	0.18
Nickel	< 10	65	63	0.020
Phosphor	54	3'900	3'900	0.36
Quecksilber	< 0.3	< 0.1	1.5	0.0055
Zink	130	3'700	6'800	14
Brom	< 100	< 100	< 100	< 0.2
Chlor	490	1'800	15'000	2.3
Fluor	< 100	110	420	0.26
EOX	< 3	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	32'000	98'000	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	260	k.M.	k.M.	37
α-HCH	0.71	k.M.	k.M.	< 1
β-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 1
γ-HCH	3.6	k.M.	k.M.	2.4
δ-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 1
HCB	0.10	k.M.	k.M.	9.3
DDT	< 5	k.M.	k.M.	< 6
Σ PCB	57	8.0	15	10
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	430	13'000	7.9
Σ Karzinogene EPA	k.M.	75	2'700	2.3
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	41	2'000	1.6
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	k.M.	0.91	24	9.6
Σ PCDF	k.M.	2.1	53	83
Σ I-TEQ	k.M.	0.063	0.86	1.5

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.62: Übersichtstabelle der Massenströme (I)

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
Calcium	44'000	53'000	750	< 39
Kalium	12'000	7'500	140	3'700
Magnesium	3'300	4'600	79	< 26
Natrium	15'000	4'200	60	1'100
Arsen	11	4.7	0.071	5.9
Blei	780	150	9.1	700
Cadmium	6.5	1.2	0.12	3.0
Chrom	540	317	3.8	22
Kupfer	320	360	3.0	19
Nickel	< 120	13	0.25	2.1
Phosphor	630	770	15	38
Quecksilber	< 3.5	< 0.02	0.01	0.58
Zink	1'500	730	27	1'500
Brom	< 1'200	< 20	< 0.40	< 26
Chlor	5'700	360	60	250
Fluor	< 1'200	22	1.7	27
EOX	< 38	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	6'300	390	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	3'000	k.M.	k.M.	3.9
α-HCH	8.2	k.M.	k.M.	< 0.13
β-HCH	< 12	k.M.	k.M.	< 0.13
γ-HCH	41	k.M.	k.M.	0.26
δ-HCH	< 12	k.M.	k.M.	< 0.13
HCB	1.2	k.M.	k.M.	1.0
DDT	< 58	k.M.	k.M.	< 0.65
Σ PCB	660	1.58	0.061	1.1
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	85	52	830
Σ Karzinogene EPA	k.M.	15	11	240
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	8.1	7.9	170
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	k.M.	0.18	0.10	1.0
Σ PCDF	k.M.	0.42	0.21	8.8
Σ I-TEQ	k.M.	0.012	0.0034	0.16

k.M. keine Messung

Tabelle 3.63: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (I)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	91%	2%	7%	
Calcium	99%	1%	<u>0%</u>	122%
Kalium	66%	1%	33%	95%
Magnesium	98%	2%	<u>1%</u>	143%
Natrium	78%	1%	21%	36%
Arsen	44%	1%	55%	100%
Blei	17%	1%	81%	110%
Cadmium	28%	3%	69%	68%
Chrom	92%	1%	6%	63%
Kupfer	94%	1%	5%	119%
Nickel	85%	2%	14%	<u>13%</u>
Phosphor	94%	2%	5%	131%
Quecksilber	<u>3%</u>	1%	96%	<u>17%</u>
Zink	32%	1%	66%	150%
Brom	<u>43%</u>	<u>1%</u>	<u>56%</u>	<u>4%</u>
Chlor	54%	9%	37%	12%
Fluor	43%	3%	54%	<u>4%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (I)

Die entnommene Menge Rostasche war unsicher und wurde deshalb über den Aschegehalt des Brennstoffs berechnet.

3.8 ANLAGE J

3.8.1 Beschreibung der Anlage J und der Probenahmestellen

Tabelle 3.64: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Restholz- schnittel ¹⁾	aus Abbruchholz werden Balken ohne sichtbare Behandlung separiert
	Klassierung nach LRV	Altholz Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a
	Entnahmestelle	Fallschacht im Ofenraum, direkt unter Siloaustrag; alle 10 Min ca. 1 kg (zeitliche Verzögerung korri- giert); 3 Sammelproben
Anlagentyp	Unterschubfeuerung	automatisch geregelt, Leistung ca. 186 kW
Rostasche	Austrag	automatisch; 350 g/h
	Entnahmestelle	nach Schneckenförderer; Behälter neben Ofen, (zeitliche Verzögerung korrigiert); 1 Sammelprobe zusätzliche 1 Sammelprobe aus Ofenraum
Abgasreinigung	Zyklon	19 g/h
	Entnahmestelle	Kessel unter Zyklon; 1 Sammelprobe
Abgas	Temperatur und online Messgeräte	Bohrloch im runden, waagrechten Abgaskanal (D _i = ca. 20 cm) vor Kamineintritt
	Staub und offline gem. Schadstoffe	gemauertes Kamin (D _i = 25x30 cm); obere Inspek- tionsklappe im Ofenraum
	Dioxine, Geschwindig- keit	gemauertes Kamin (D _i = 25x30 cm); EMPA-Stutzen auf dem Dach

¹⁾ gemäss Klass. der Behörden, Abgasbehandlung entspricht den Anforder. einer Restholzfeuerung

3.8.2 Resultate der Anlage J

Tabelle 3.65: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (J)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	13'400 ± 700	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	50.8 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	6.0 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	0.130 ± 0.003	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	0.84 ± 0.10	Gew-%
Wassergehalt	26 ± 1	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	0.26 ± 0.03	MW

Messwerte im Abgas (J)**Tabelle 3.66: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (J)**

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
09:30	- 10:30	196	4.7	1'270	650	8.0
10:55	- 11:55	135	4.8	1'300	740	11.2
13:50	- 14:50	127	5.4	1'440	860	8.3
Mittelwerte		153	5.0	1'340	750	9.2
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand²⁾ Normzustand, trocken**Tabelle 3.67: Konzentration der trockenen Abgase (J) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub**

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
09:30	- 10:30	13.9	7.0	109	124	109	123
10:55	- 11:55	13.8	7.1	100	111	68	75
13:50	- 14:50	15.5	5.4	104	152	56	82
Mittelwerte		14.4	6.5	104	129	78	94
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.68: Konzentration der trockenen Abgase (J) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
09:30	- 10:30	148	167	137	155	4.3	4.9
10:55	- 11:55	150	167	143	159	3.5	3.9
13:50	- 14:50	124	183	117	171	3.3	4.9
Mittelwerte		141	172	132	162	3.7	4.6
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10	10	10	2 mg/m ³	2 mg/m ³

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.69: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (J) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 13 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	14.4 ± 0.4	
Kohlendioxid	Vol-%	6.5 ± 0.7	
Temperatur	°C	153 ± 3	
Wassergehalt	Vol-%	9.2 ± 0.5	
Feststoff	mg/m ³	78 ± 8	94 ± 9
Kohlenmonoxid	mg/m ³	104 ± 10	129 ± 13
Stickoxide	mg/m ³	141 ± 14	172 ± 17
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	3.7 ± 2.0	4.6 ± 2.0
Summe Blei + Zink	mg/m ³	7.1 ± 1.3	8.7 ± 1.6

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.70: Übersichtstabelle der Gehalte (J)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	2'000	175'000	159'000	8.3
Kalium	710	33'000	44'000	8.9
Magnesium	170	13'000	16'000	1.0
Natrium	< 500	9'600	9'400	6.0
Arsen	< 0.5	27	44	0.019
Blei	24	3'800	8'800	4.0
Cadmium	0.14	< 5	37	0.010
Chrom	< 20	590	290	< 0.01
Kupfer	< 5	2'100	370	0.054
Nickel	< 10	84	98	< 0.003
Phosphor	35	2'700	4'400	0.51
Quecksilber	< 0.3	< 0.1	1.1	0.020
Zink	85	8'900	15'000	6.8
Brom	< 100	< 100	< 100	< 0.3
Chlor	< 400	< 400	7'800	2.0
Fluor	< 100	120	340	0.47
EOX	4.5	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	141'000	10'000	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	47	k.M.	k.M.	27
α-HCH	0.15	k.M.	k.M.	< 2
β-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 2
γ-HCH	3.0	k.M.	k.M.	4.3
δ-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 2
HCB	< 0.1	k.M.	k.M.	8.2
DDT		k.M.	k.M.	< 8
p,p-DDT	360			
o,p-DDT	130			
Σ PCB	3.1	4.9	11	27
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	46	260	k.M.
Σ Karzinogene EPA	k.M.	8.9	83	k.M.
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	6.0	49	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	k.M.	0.043	16	16
Σ PCDF	k.M.	0.081	21	69
Σ I-TEQ	k.M.	0.0015	0.46	1.5

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.71: Übersichtstabelle der Massenströme (J)

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
Calcium	103'000	62'000	3'000	4'100
Kalium	36'000	12'000	830	4'400
Magnesium	8'700	4'600	300	520
Natrium	< 26'000	3'400	180	3'000
Arsen	< 26	9.4	0.83	9
Blei	1'200	1'300	170	2'000
Cadmium	7.0	< 1.8	0.70	5.0
Chrom	< 1'000	210	5.5	< 6.0
Kupfer	< 260	740	7.0	26
Nickel	< 510	30	1.8	< 1.5
Phosphor	1'800	950	83	250
Quecksilber	< 15	< 0.04	0.020	10
Zink	4'300	3'100	280	3'400
Brom	< 5'100	< 35	< 1.9	< 150
Chlor	< 21'000	< 140	150	1'000
Fluor	< 5'100	42	6.4	230
EOX	230	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	50'000	189	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	2'414	k.M.	k.M.	13.4
α-HCH	7.9	k.M.	k.M.	< 0.75
β-HCH	< 51	k.M.	k.M.	< 0.75
γ-HCH	155	k.M.	k.M.	2.1
δ-HCH	< 51	k.M.	k.M.	< 0.75
HCB	< 5.1	k.M.	k.M.	4.0
DDT		k.M.	k.M.	< 3.75
p,p-DDT	19'000			
o,p-DDT	6'800			
Σ PCB	160	1.7	1.0	13
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	16	5.0	k.M.
Σ Karzinogene EPA	k.M.	3.1	1.6	k.M.
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	2.1	0.93	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	k.M.	0.015	0.30	8.0
Σ PCDF	k.M.	0.029	0.40	34
Σ I-TEQ	k.M.	0.00052	0.0087	0.75

k.M. keine Messung

Tabelle 3.72: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (J)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	82%	4%	14%	
Calcium	90%	4%	6%	67%
Kalium	70%	5%	26%	48%
Magnesium	85%	6%	10%	62%
Natrium	52%	3%	46%	<u>25%</u>
Arsen	48%	4%	48%	<u>76%</u>
Blei	37%	5%	58%	289%
Cadmium	<u>24%</u>	9%	67%	106%
Chrom	95%	2%	<u>3%</u>	<u>22%</u>
Kupfer	96%	1%	3%	<u>297%</u>
Nickel	90%	6%	<u>5%</u>	<u>6%</u>
Phosphor	74%	6%	19%	71%
Quecksilber	<u>0%</u>	0%	99%	<u>66%</u>
Zink	46%	4%	50%	158%
Brom	<u>19%</u>	<u>1%</u>	<u>80%</u>	<u>4%</u>
Chlor	<u>11%</u>	12%	78%	<u>6%</u>
Fluor	15%	2%	83%	<u>5%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (J)

Die Rostaschemenge war unsicher und wurde daher über den Aschegehalt des Brennstoffs berechnet.

3.9 ANLAGE K

3.9.1 Beschreibung der Anlage K und der Probenahmestellen

Tabelle 3.73: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Restholz- schnittzel ¹⁾	Schreinerei; geringer Spanplattenanteil, Mas- sivholz hat hohen Produktionsanteil (Betreiberan- gabe), sichtbarer Papieranteil
	Klassierung nach LRV	Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c Papier Anh.2 Ziff. 72 Abs. 1 Bst. b
	Entnahmestelle	Fallschacht nach Förderschnecke; alle 10 Min ca. 1 kg (keine Zeitkorrektur); 3 Sammelproben
Anlagentyp	Unterschubfeuerung	automatisch geregelt, Leistung ca. 210 kW
Rostasche	Austrag	z. T. automatisch; 440 g/h
	Entnahmestelle	Austrag in Kessel; 1 Sammelprobe zusätzlich 1 Probe seitlich neben der Retorte
Abgasreinigung	Zyklon	95 g/h
	Entnahmestelle	Austrag in Kessel; 1 Sammelprobe
Abgas	Temperatur und online Messgeräte	½" Stutzen im Abgaskanal (D _i = 18 cm) zwischen Ofen und Zyklon
	Staub und offline gem. Schadstoffe incl. Dioxine	gemauertes Kamin (D _i = 50x50 cm); Inspektions- klappe im Erdgeschoss

¹⁾ gemäss Klass. der Behörden, Abgasbehandlung entspricht den Anforder. einer Restholzfeuerung

3.9.2 Resultate der Anlage K

Tabelle 3.74: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (K)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	13'900 ± 700	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	49.5 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	6.0 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	0.66 ± 0.02	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	0.95 ± 0.10	Gew-%
Wassergehalt	23 ± 1	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	0.31 ± 0.03	MW

Messwerte im Abgas (K)**Tabelle 3.75: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (K)**

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
08:45	- 09:45	120	1.0	920	580	6.2
10:05	- 11:05	157	1.2	1'080	610	7.8
11:25	- 12:25	158	1.1	1'000	570	7.3
Mittelwerte		145	1.1	1'000	590	7.1
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand²⁾ Normzustand, trocken**Tabelle 3.76: Konzentration der trockenen Abgase (K) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub**

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
08:45	- 09:45	13.0	7.5	190	189	39	39
10:05	- 11:05	9.7	10.8	279	198	98	70
11:25	- 12:25	10.3	10.3	146	109	68	51
Mittelwerte		11.0	9.5	205	165	69	53
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.77: Konzentration der trockenen Abgase (K) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
08:45	- 09:45	425	423	381	380	< 2	< 2
10:05	- 11:05	568	403	542	384	7.1	5.0
11:25	- 12:25	561	418	532	397	3.8	2.8
Mittelwerte		518	415	485	387	4.2	3.2
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10	10	10	2 mg/m ³	2 mg/m ³

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 13 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.78: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (K) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 13 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	11.0 ± 0.3	
Kohlendioxid	Vol-%	9.5 ± 1.0	
Temperatur	°C	145 ± 3	
Wassergehalt	Vol-%	7.1 ± 0.4	
Feststoff	mg/m ³	69 ± 7	53 ± 5
Kohlenmonoxid	mg/m ³	205 ± 20	165 ± 17
Stickoxide	mg/m ³	518 ± 52	415 ± 41
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	4.2 ± 2.0	3.2 ± 2.0
Summe Blei + Zink	mg/m ³	4.2 ± 0.7	3.3 ± 0.6

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.79: Übersichtstabelle der Gehalte (K)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	2'400	247'000	230'000	5.1
Kalium	620	43'000	44'000	27
Magnesium	200	21'000	20'000	< 0.2
Natrium	840	22'000	21'000	5.5
Arsen	< 0.5	21	18	0.0044
Blei	34	1'600	2'800	1.8
Cadmium	0.12	27	58	0.0054
Chrom	< 20	320	320	< 0.008
Kupfer	11	970	820	0.12
Nickel	< 10	50	45	0.013
Phosphor	46	6'000	6'600	0.41
Quecksilber	< 0.3	< 0.10	0.64	0.0033
Zink	34	4'500	9'100	2.3
Brom	< 100	170	690	< 0.2
Chlor	< 400	5'400	21'000	1.8
Fluor	< 100	< 100	180	< 0.1
EOX	5.2	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	29'000	127'000	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	38	k.M.	k.M.	36
α-HCH	0.15	k.M.	k.M.	1.2
β-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 1
γ-HCH	1.3	k.M.	k.M.	2.4
δ-HCH	< 1	k.M.	k.M.	< 1
HCB	< 0.1	k.M.	k.M.	15
DDT	< 5	k.M.	k.M.	< 5
Σ PCB	36	1.7	13	17
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	3'500	14'000	46
Σ Karzinogene EPA	k.M.	930	2'400	4.6
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	680	1'600	3.5
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	k.M.	2.3	41	9.8
Σ PCDF	k.M.	3.0	67	47
Σ I-TEQ	k.M.	0.092	1.5	0.95

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.80: Übersichtstabelle der Massenströme (K)

	Brennstoff	Rostasche	Zyklonasche	Abgas
	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
Calcium	147'000	110'000	22'000	3'000
Kalium	38'000	19'000	4'200	16'000
Magnesium	12'000	9'300	1'900	< 120
Natrium	51'000	9'800	2'000	3'300
Arsen	< 31	9.3	1.7	2.6
Blei	2'100	710	270	1'100
Cadmium	7.4	12	5.5	3.2
Chrom	< 1200	140	30	< 4.7
Kupfer	670	430	78	73
Nickel	< 610	22	4.3	7.7
Phosphor	2'800	2'700	630	240
Quecksilber	< 18	< 0.04	0.061	1.9
Zink	2'100	2'000	860	1'400
Brom	< 6'100	76	65	< 120
Chlor	< 24'000	2'400	2'000	1'100
Fluor	< 6'100	< 44	17	< 61
EOX	320	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	13'000	12'000	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	2'300	k.M.	k.M.	21
α-HCH	9.3	k.M.	k.M.	0.69
β-HCH	< 61	k.M.	k.M.	< 0.6
γ-HCH	77	k.M.	k.M.	1.4
δ-HCH	< 61	k.M.	k.M.	< 0.6
HCB	< 6.1	k.M.	k.M.	< 8.9
DDT	< 310	k.M.	k.M.	< 3.0
Σ PCB	2'200	0.75	1.2	10
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	1'600	1'300	27'000
Σ Karzinogene EPA	k.M.	410	230	2'700
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	300	150	2'100
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	k.M.	1.0	3.9	5.8
Σ PCDF	k.M.	1.3	6.3	28
Σ I-TEQ	k.M.	0.041	0.14	0.56

k.M. keine Messung

Tabelle 3.81: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (K)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	77%	16%	7%	
Calcium	81%	16%	2%	92%
Kalium	48%	11%	41%	103%
Magnesium	82%	17%	<u>1%</u>	94%
Natrium	65%	13%	22%	30%
Arsen	68%	12%	19%	<u>45%</u>
Blei	34%	13%	53%	99%
Cadmium	58%	27%	15%	279%
Chrom	80%	17%	<u>3%</u>	<u>15%</u>
Kupfer	74%	13%	12%	87%
Nickel	65%	12%	22%	<u>6%</u>
Phosphor	76%	18%	7%	128%
Quecksilber	<u>2%</u>	3%	95%	<u>11%</u>
Zink	47%	20%	33%	203%
Brom	29%	25%	<u>46%</u>	<u>4%</u>
Chlor	44%	36%	20%	<u>23%</u>
Fluor	<u>36%</u>	14%	<u>50%</u>	<u>2%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (K)

Die Rostaschemenge war unsicher und wurde deshalb über den Aschegehalt des Brennstoffs berechnet.

3.10 ANLAGE L

3.10.1 Beschreibung der Anlage L und der Probenahmestellen

Tabelle 3.82: Anlagenbeschreibung

Brennstoff	Sortiment: Restholz- schnittzel ¹⁾	sortiertes Altholz (Einwegpaletten, naturbel. Holz, Schreinerei- und Bau-RH, rohe Spanplatten, Fruchtkisten), eventuell wurden andere Sortimente miterfasst; Holz extern aufbereitet (sichtbare Metall- und Kunststoffanteile)
	Klassierung nach LRV	Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c Altholz Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a ev. Anh. 2 Ziff 71
	Entnahmestelle	1. Stock; Austrag aus Vorsilo; alle 10 Min ca. 1 kg (zeitliche Verzögerung korrigiert); 3 Sammelproben
Anlagentyp	Rostfeuerung	automatisch geregelt, Leistung 4 MW
Rostasche	Austrag	automatisch; 9'000 g/h
	Entnahmestelle	Fallschacht nach Rost; 1 Sammelprobe
Abgasreinigung	Zyklon	1'600 g/h
	Entnahmestelle	Fallschacht: oberhalb Wasserbad; 1 Sammelprobe
Abgas	Entnahmestelle	Runder, horizontaler Abgaskanal (D _i = 70 cm), ca. 2 m über Ventilator, mit 3 EMPA Stützen

¹⁾gemäss Klass. der Behörden, Abgasbehandlung entspricht den Anforder. einer Restholzfeuerung

3.10.2 Resultate der Anlage L

Tabelle 3.83: Mittelwerte der Brennstoffanalysen (L)

Unterer Heizwert (verw. Brennst)	14'600 ± 700	kJ/kg
C-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	49.3 ± 0.4	Gew-%
H-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	6.1 ± 0.2	Gew-%
N-Gehalt Brennstoff (wasserfrei)	1.08 ± 0.03	Gew-%
Aschegehalt (wasserfrei)	2.0 ± 0.10	Gew-%
Wassergehalt	19 ± 1	Gew-%
Feuerungswärmeleistung	3.1 ± 0.3	MW

Messwerte im Abgas (L)**Tabelle 3.84: Temperatur, Geschwindigkeit, Volumenstrom und Wassergehalt der Abgase (L)**

Messzeiten		Temperatur [°C]	Geschwin- digkeit [m/s]	Volumenstrom		Wasserge- halt (Taup.) [Vol-%]
von	bis			BZ ¹⁾ [m ³ /h]	NZ ²⁾ [m ³ /h]	
06:30	07:20	162	8.6	9'990	5'400	9.1
07:45	08:35	157	8.6	9'960	5'430	9.1
08:55	09:45	157	9.1	10'600	5'750	9.2
Mittelwerte		159	8.8	10'200	5'530	9.1
Messunsicherheit						
Mittelwerte [%]		2	5	5	5	5

¹⁾ Betriebszustand²⁾ Normzustand, trocken**Tabelle 3.85: Konzentration der trockenen Abgase (L) an Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Staub**

Messzeiten		Sauerstoff [Vol-%]	Kohlen- dioxid [Vol-%]	Kohlenmonoxid [mg/m ³]		Staub [mg/m ³]	
von	bis			A	B	A	B
06:30	07:20	10.2	10.1	40	40	279	258
07:45	08:35	10.2	10.2	50	50	253	235
08:55	09:45	10.4	10.2	60	60	293	275
Mittelwerte		10.3	10.2	50	50	275	256
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		3	10	10	10	10	10

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 11 Vol-% Sauerstoff

Tabelle 3.86: Konzentration der trockenen Abgase (L) an Stickoxiden und gasförmigen, organischen Stoffen

Messzeiten		Stickoxide ¹⁾		Stickoxide ²⁾		gasf. org. Stoffe ³⁾	
		(NO _x als NO ₂)		(NO als NO ₂)			
von	bis	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]	[mg/m ³]
		A	B	A	B	A	B
06:30	- 07:20	487	452	-	-	5.7	5.3
07:45	- 08:35	473	438	-	-	4.5	4.2
08:55	- 09:45	466	438	-	-	3.8	3.5
Mittelwerte		475	443	-	-	4.7	4.3
Messunsicherheit							
Mittelwerte [%]		10	10			2 mg/m ³	2 mg/m ³

A gemessene Konzentration

B Konzentration, bezogen auf 11 Vol-% Sauerstoff

¹⁾ Summe von NO und NO₂, angegeben als Stickstoffdioxid²⁾ NO, angegeben als Stickstoffdioxid³⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)**Tabelle 3.87: Zusammenstellung der mittleren im Abgas (L) gemessenen Resultate**

		effektive Konzentration	Konzentration bei 11 Vol-% O ₂
Sauerstoff	Vol-%	10.3 ± 0.3	
Kohlendioxid	Vol-%	10.2 ± 1.0	
Temperatur	°C	159 ± 3	
Wassergehalt	Vol-%	9.1 ± 0.5	
Feststoff	mg/m ³	275 ± 27	256 ± 26
Kohlenmonoxid	mg/m ³	53 ± 5	50 ± 5
Stickoxide	mg/m ³	475 ± 48	443 ± 44
gasf. org. Stoffe ¹⁾	mg/m ³	4.7 ± 2.0	4.3 ± 2.0
Summe Blei + Zink	mg/m ³	87 ± 16	81 ± 15

¹⁾ angegeben als Gesamtkohlenstoff (C)

Tabelle 3.88: Übersichtstabelle der Gehalte (L)

Gehalte	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/m ³]
Calcium	4100	194'000	158'000	8.5
Kalium	930	16'000	26'000	31
Magnesium	400	20'000	15'000	< 0.2
Natrium	< 500	8'200	10'000	30
Arsen	2.7	25	17	0.063
Blei	350	830	9'400	26
Cadmium	3.1	< 5	82	0.069
Chrom	< 20	470	280	< 0.007
Kupfer	20	7'600	840	0.38
Nickel	< 10	220	51	< 0.002
Phosphor	227	8'500	16'000	3.7
Quecksilber	0.34	< 0.1	2.4	0.013
Zink	663	5'500	28'000	55
Brom	< 100	< 100	< 100	< 0.2
Chlor	880	480	25'000	17
Fluor	< 100	< 100	190	4.2
EOX	4.5	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	1'000	338'000	k.M.
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
PCP	2'900	k.M.	k.M.	64
α-HCH	1.3	k.M.	k.M.	13
β-HCH	1.2	k.M.	k.M.	< 1
γ-HCH	62	k.M.	k.M.	9.5
δ-HCH	3.0	k.M.	k.M.	< 1
HCB	0.46	k.M.	k.M.	150
DDT		k.M.	k.M.	< 5
p,p-DDT	120			
o,p-DDT	78			
Σ PCB	190	n.n.	6.8	6.1
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/m ³]
Σ PAK	k.M.	13	16	0.15
Σ Karzinogene EPA	k.M.	2.5	1.3	0.019
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	1.9	0.61	0.014
	[µg/kg]	[µg/kg]	[µg/kg]	[ng/m ³]
Σ PCDD	k.M.	0.020	8.4	23
Σ PCDF	k.M.	0.010	22	35
Σ I-TEQ	k.M.	0.0017	0.72	0.77

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Tabelle 3.89: Übersichtstabelle der Massenströme (L)

	Brennstoff [mg/h]	Rostasche [mg/h]	Zyklonasche [mg/h]	Abgas [mg/h]
Calcium	2'510'000	1'750'000	250'000	50'000
Kalium	570'000	144'000	41'000	184'000
Magnesium	245'000	180'000	24'000	< 1'100
Natrium	< 307'000	74'000	16'000	178'000
Arsen	1'650	230	27	370
Blei	215'000	7'500	15'000	153'000
Cadmium	1'870	< 45	130	410
Chrom	< 12'000	4'200	440	< 44
Kupfer	12'000	68'000	1'300	2'300
Nickel	< 6'100	2'000	80	< 11
Phosphor	139'000	76'000	25'000	22'000
Quecksilber	209	< 0.90	3.8	75
Zink	407'000	49'000	44'000	329'000
Brom	< 61'000	< 900	< 160	< 1'100
Chlor	< 613'000	< 9'000	40'000	100'000
Fluor	< 61'000	< 900	300	25'000
EOX	2'700	k.M.	k.M.	k.M.
TOC	k.M.	9'000	535'000	k.M.
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
PCP	1'780'000	k.M.	k.M.	380
α-HCH	780	k.M.	k.M.	75
β-HCH	720	k.M.	k.M.	< 5.5
γ-HCH	38'000	k.M.	k.M.	57
δ-HCH	1800	k.M.	k.M.	< 5.5
HCB	280	k.M.	k.M.	880
DDT		k.M.	k.M.	< 28
p,p-DDT	74'000			
o,p-DDT	48'000			
Σ PCB	117'000	N.N.	10.8	36
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PAK	k.M.	120	26	870
Σ Karzinogene EPA	k.M.	23	2.0	120
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	17	0.97	83
	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]	[µg/h]
Σ PCDD	k.M.	0.18	13	130
Σ PCDF	k.M.	0.092	35	210
Σ I-TEQ	k.M.	0.015	1.1	4.6

k.M. keine Messung

Tabelle 3.90: Übersichtstabelle mit den Transferkoeffizienten (L)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ¹⁾	Wiederfindungsrate ²⁾
Aschemenge	74%	13%	12%	
Calcium	85%	12%	2%	82%
Kalium	39%	11%	50%	65%
Magnesium	88%	12%	<u>1%</u>	84%
Natrium	28%	6%	66%	<u>87%</u>
Arsen	37%	4%	59%	38%
Blei	4%	9%	87%	82%
Cadmium	<u>8%</u>	22%	70%	31%
Chrom	90%	9%	<u>1%</u>	<u>39%</u>
Kupfer	95%	2%	3%	597%
Nickel	96%	4%	<u>1%</u>	<u>34%</u>
Phosphor	62%	20%	18%	88%
Quecksilber	<u>1%</u>	5%	94%	38%
Zink	12%	10%	78%	104%
Brom	<u>42%</u>	<u>7%</u>	<u>51%</u>	<u>4%</u>
Chlor	3%	28%	69%	27%
Fluor	<u>3%</u>	1%	95%	<u>43%</u>

¹⁾ die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Ausgangsströme

²⁾ Wiederfindungsrate: Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff)

Bemerkungen zu den Messungen (L)

keine

4. Zusammenstellungen der Messergebnisse

4.1 GEHALTE DER 10 ANLAGEN IM VERGLEICH

Tabelle 4.1: Gehalte im Brennstoff

Brennstoff	Anlage A	Anlage C	Anlage D	Anlage E	Anlage F	Anlage G	Anlage I	Anlage J	Anlage K	Anlage L
	BauRH + Verpak- kungen	Altholz	Waldhack- schnitzel (Referenz)	Waldhack- schnitzel (Referenz)	Schreine- rei-RH (viel Spanplatte)	sortierte Einwegpa- letten	Bau- Restholz	Balken o. sichtbare Behandl. Spanplatte)	Schreiner. RH (wenig Spanplatte)	sortiertes Altholz
	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾
Calcium	1'400	10'000	3'000	5'400	1'900	880	3'800	2'000	2'400	4'100
Kalium	610	960	1'500	1'200	600	580	1'000	710	620	930
Magnesium	200	1'300	290	310	220	150	290	170	200	400
Natrium	< 500	1'200	< 500	< 500	< 500	< 500	1'300	< 500	840	< 500
Arsen	< 0.5	1.50	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.93	< 0.5	< 0.5	2.7
Blei	2.9	1'900	< 2	< 2	26	< 8	67	24	34	350
Cadmium	0.18	2.2	< 0.05	< 0.05	0.63	< 2	0.56	0.14	0.12	3.1
Chrom	< 20	64	< 20	< 20	< 20	< 20	47	< 20	< 20	< 20
Kupfer	< 5	16	< 5	< 5	< 5	< 5	28	< 5	11	20
Nickel	< 10	39	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Phosphor	37	80	130	190	120	< 30	54	35	46	230
Quecksilber	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	0.34
Zink	23	1'700	11	< 10	55	21	130	85	34	660
Brom	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Chlor	< 400	1'400	< 400	< 400	1'500	< 3'000	490	< 400	< 400	880
Fluor	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
EOX als Cl	< 3	29	< 3	< 3	4.5	< 3	< 3	4.5	5.2	4.5

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

Tabelle 4.1: Gehalte im Brennstoff (Fortsetzung)

Brennstoff	Anlage A BauRH + Verpak- kungen µg/kg ¹⁾	Anlage C Altholz µg/kg ¹⁾	Anlage D Waldhack- schnittel (Referenz) µg/kg ¹⁾	Anlage E Waldhack- schnittel (Referenz) µg/kg ¹⁾	Anlage F Schrein.- RH (viel Spanplat.) µg/kg ¹⁾	Anlage G sortierte Einweg- paletten µg/kg ¹⁾	Anlage I Bau- Restholz µg/kg ¹⁾	Anlage J Balken o. sichtbare Behandl. µg/kg ¹⁾	Anlage K Schrein. RH (wenig Spanplat.) µg/kg ¹⁾	Anlage L sortiertes Altholz µg/kg ¹⁾
PCP	2'800	6'500	1.9	12	1'000	370	260	47	38	2'900
α-HCH	0.96	3.1	< 0.1	0.24	1.8	3.0	0.71	0.15	0.15	1.3
β-HCH	< 1	1.3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1.2
γ-HCH	5.0	240	0.41	0.84	16	< 1	3.6	3.0	1.3	62
δ-HCH	< 1	3.3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	3.0
HCB	0.52	0.39	< 0.1	0.15	0.18	0.33	0.10	< 0.1	< 0.1	0.46
DDT	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
p,p-DDT		180						360		120
o,p-DDT		66						130		78
Σ PCB	12	380	n.n.	1.3	20	55	57	3.1	36	190
Unterer Heizwert (roh) ³⁾	13'000	14'300	10'100	9'600	16'700	15'900	15'500	13'400	13'900	14'600
C Gehalt (wasserfrei)	52	49	51	51	50	51	50	51	49	49
H-Gehalt (wasserfrei)	5.8	5.7	5.7	5.2	6.4	5.6	5.3	6.0	6.0	6.1
N-Gehalt (wasserfrei)	0.22	1.0	0.2	0.3	2.5	0.5	0.4	0.1	0.7	1.1
Aschegehalt (wasserfrei)	0.55	4.7	3.2	1.11	1.0	0.56	1.9	0.84	0.95	2.0
Wassergehalt	29	19	43	47	8.4	17	16	26	23	19
Feuerungswärmeleistung MW	1.1	1.5	0.35	0.09	0.40	2.7	0.05	0.19	0.24	2.5

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

Tabelle 4.2: Gehalte in der Rostasche

Brennstoff	Anlage A		Anlage C		Anlage D		Anlage E		Anlage F		Anlage G		Anlage I		Anlage J		Anlage K		Anlage L	
	BauRH + Verpak- kungen	Altholz	Altholz schnitzel (Referenz)	Waldhack- schnitzel (Referenz)	Waldhack- schnitzel (Referenz)	Waldhack- schnitzel (Referenz)	Schrein- RH (viel Spanplat.)	Schrein- RH (viel Spanplat.)	sortierte Einweg- paletten	Restholz Behandl.	Balken o. sichtbare Behandl.	Bau- Restholz	sortiertes Altholz	Sortiertes Altholz	Schrein. RH (wenig Spanplat.)	Schrein. RH (wenig Spanplat.)	Sortiertes Altholz	Sortiertes Altholz	Sortiertes Altholz	Sortiertes Altholz
	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾
Calcium	206'000	133'000	315'000	304'000	304'000	183'000	183'000	208'000	208'000	268'000	268'000	175'000	175'000	247'000	247'000	194'000	194'000	194'000	194'000	194'000
Kalium	25'000	9'700	132'000	54'000	54'000	30'000	30'000	46'000	46'000	38'000	38'000	33'000	33'000	43'000	43'000	16'000	16'000	16'000	16'000	16'000
Magnesium	19'000	14'000	30'000	23'000	23'000	22'000	22'000	29'000	29'000	23'000	23'000	13'000	13'000	21'000	21'000	20'000	20'000	20'000	20'000	20'000
Natrium	15'000	9'900	8'600	16'000	16'000	22'000	22'000	23'000	23'000	21'000	21'000	9'600	9'600	22'000	22'000	8'200	8'200	8'200	8'200	8'200
Arsen	16	25	8.4	10	10	23	23	39	39	24	24	27	27	21	21	25	25	25	25	25
Blei	150	3'800	10	10	10	1'300	1'300	960	960	770	770	3'800	3'800	1'600	1'600	830	830	830	830	830
Cadmium	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	39	39	9.7	9.7	6.3	6.3	< 5	< 5	27	27	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Chrom	230	270	21	32	32	250	250	540	540	1'600	1'600	590	590	320	320	470	470	470	470	470
Kupfer	860	4'800	260	180	180	560	560	1'100	1'100	1'800	1'800	2'100	2'100	970	970	7'600	7'600	7'600	7'600	7'600
Nickel	110	140	20	30	30	100	100	170	170	65	65	84	84	50	50	220	220	220	220	220
Phosphor	3'200	860	16'000	9'600	9'600	11'000	11'000	5'900	5'900	3'900	3'900	2'700	2'700	6'000	6'000	8'500	8'500	8'500	8'500	8'500
Quecksilber	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.15	0.15	0.24	0.24	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Zink	2'600	9'300	260	110	110	3'100	3'100	2'200	2'200	3'700	3'700	8'900	8'900	4'500	4'500	5'500	5'500	5'500	5'500	5'500
Brom	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	170	170	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Chlor	< 400	< 400	< 400	< 400	< 400	30'000	30'000	< 3'000	< 3'000	1'800	1'800	< 400	< 400	5'400	5'400	480	480	480	480	480
Fluor	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	340	340	< 100	< 100	110	110	120	120	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
TOC	19'000	91'000	2'900	96'000	96'000	28'000	28'000	6'400	6'400	32'000	32'000	141'000	141'000	29'000	29'000	1'000	1'000	1'000	1'000	1'000
Σ PCB	7.2	n.n.	n.n.	3.1	3.1	6.5	6.5	20	20	8.0	8.0	4.9	4.9	1.7	1.7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Σ PAK	7.9	170	28	2.9	2.9	180	180	37	37	430	430	46	46	3'500	3'500	13	13	13	13	13
Σ PAK karz. EPA	1.9	51	2.1	0.65	0.65	53	53	13	13	75	75	8.9	8.9	930	930	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Σ PAK karz. IARC,WHO	0.71	32	1.3	0.38	0.38	34	34	10	10	41	41	6.0	6.0	680	680	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Σ PCDD	n.n.	3.3	0.045	0.031	0.031	120	120	0.13	0.13	0.91	0.91	0.043	0.043	2.3	2.3	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Σ PCDF	n.n.	0.17	0.042	0.020	0.020	130	130	0.084	0.084	2.1	2.1	0.081	0.081	3.0	3.0	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Σ I-TEQ	n.n.	0.070	0.0017	0.00098	0.00098	4.7	4.7	0.0040	0.0040	0.063	0.063	0.0015	0.0015	0.092	0.092	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

Tabelle 4.3: Gehalte in der Zyklonasche

Brennstoff	Anlage A		Anlage C		Anlage D		Anlage E		Anlage F		Anlage G		Anlage I		Anlage J		Anlage K		Anlage L		Anlage C	
	BauRH + Verpak- kungen	Altholz	Wald- hack- schnittel	Wald- hack- schnittel	Wald- hack- schnittel	Wald- hack- schnittel	Schrein- RH (viel Spanplat.)	Schrein- RH (viel Spanplat.)	Sortierte Einweg- paletten	Restholz Behandl. nig Span.)	Balken o. sichtbare Behandl.	Sortierte	Bau- Restholz	Schrein. RH (we- nig Span.)	Sortiertes Altholz	E-Filter						
	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾
Calcium	194'000	102'000	256'000	242'000	135'000	255'000	189'000	159'000	230'000	158'000	300'000	194'000	102'000	256'000	242'000	135'000	255'000	189'000	159'000	230'000	158'000	300'000
Kalium	34'000	14'000	74'000	82'000	77'000	66'000	36'000	44'000	44'000	26'000	5'600	34'000	14'000	74'000	82'000	77'000	66'000	36'000	44'000	44'000	26'000	5'600
Magnesium	24'000	12'000	25'000	31'000	17'000	38'000	20'000	16'000	20'000	1'000	1'000	24'000	12'000	25'000	31'000	17'000	38'000	20'000	16'000	20'000	15'000	1'000
Natrium	17'000	10'000	7'900	12'000	35'000	34'000	15'000	9'400	21'000	49'000	49'000	17'000	10'000	7'900	12'000	35'000	34'000	15'000	9'400	21'000	10'000	49'000
Arsen	17	37	10	6.0	19	41	18	44	18	17	120	17	37	10	6.0	19	41	18	44	18	17	120
Blei	1'800	46'000	40	70	6'700	3'000	2'300	8'800	2'800	9'400	119'000	1'800	46'000	40	70	6'700	3'000	2'300	8'800	2'800	9'400	119'000
Cadmium	18	94	13	6.2	220	82	29	37	58	82	330	18	94	13	6.2	220	82	29	37	58	82	330
Chrom	440	200	26	30	290	510	950	290	320	280	130	440	200	26	30	290	510	950	290	320	280	130
Kupfer	440	370	170	170	810	750	750	370	820	470	470	440	370	170	170	810	750	750	370	820	470	470
Nickel	180	57	20	27	100	< 150	63	98	45	51	32	180	57	20	27	100	< 150	63	98	45	51	32
Phosphor	7'200	2'000	14'000	9'800	11'000	10'000	3'900	4'400	6'600	1'200	1'200	7'200	2'000	14'000	9'800	11'000	10'000	3'900	4'400	6'600	1'200	1'200
Quecksilber	0.38	1.0	< 0.1	0.23	1.6	< 0.1	1.5	1.1	0.64	9.2	9.2	0.38	1.0	< 0.1	0.23	1.6	< 0.1	1.5	1.1	0.64	9.2	9.2
Zink	5'300	61'000	1'200	810	13'000	7'800	6'800	15'000	9'100	298'000	298'000	5'300	61'000	1'200	810	13'000	7'800	6'800	15'000	9'100	298'000	298'000
Brom	< 100	< 100	< 100	< 100	190	150	< 100	< 100	690	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	690	< 100	< 100	< 100
Chlor	7'500	21'000	800	1'100	192'000	11'000	15'000	7'800	21'000	< 120	< 120	7'500	21'000	800	1'100	192'000	11'000	15'000	7'800	21'000	< 120	< 120
Fluor	140	300	< 100	< 100	810	< 100	420	340	180	770	770	140	300	< 100	< 100	810	< 100	420	340	180	770	770
TOC	121'000	415'000	1'200	83'000	67'000	49'000	98'000	10'000	127'000	338'000	338'000	121'000	415'000	1'200	83'000	67'000	49'000	98'000	10'000	127'000	338'000	338'000
Σ PCB	2.9	18	4.0	3.7	31	k.M.	15	11	13	6.8	6.8	2.9	18	4.0	3.7	31	k.M.	15	11	13	6.8	6.8
Σ PAK	370	14'000	17'000	12'000	660	57	13'000	260	14'000	16	88'000	370	14'000	17'000	12'000	660	57	13'000	260	14'000	16	88'000
Σ PAK karz. EPA	9.1	380	4'400	4'400	320	16	2'700	83	2'400	1.3	7'900	9.1	380	4'400	4'400	320	16	2'700	83	2'400	1.3	7'900
Σ PAK karz. IARC,WHO	4.9	200	3'500	3'800	180	11	2'000	49	1'600	0.61	5'700	4.9	200	3'500	3'800	180	11	2'000	49	1'600	0.61	5'700
Σ PCDD	3.0	30	0.028	0.21	1'200	3.3	24	16	41	8.4	180	3.0	30	0.028	0.21	1'200	3.3	24	16	41	8.4	180
Σ PCDF	4.2	80	0.032	0.21	1'200	13	53	21	67	22	620	4.2	80	0.032	0.21	1'200	13	53	21	67	22	620
Σ I-TEQ	0.12	1.8	0.0011	0.0081	34	0.43	0.86	0.46	1.5	0.72	15	0.12	1.8	0.0011	0.0081	34	0.43	0.86	0.46	1.5	0.72	15

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

Tabelle 4.4: Gehalte im Abgas (bezogen auf 11 Vol-% O₂)

Brennstoff	Anlage A	Anlage C	Anlage D	Anlage E	Anlage F	Anlage G	Anlage I	Anlage J	Anlage K	Anlage L
BauRH + Verpak- kungen	Altholz	Altholz	Waldhack- schnitzel (Referenz)	Waldhack- schnitzel (Referenz)	Schrein- RH (viel Spanplat.)	sortierte Einweg- paletten	Bau- Restholz Behandl.	Balken o. sichtbare Behandl.	Schrein. RH (wenig Spanplat.)	sortiertes Altholz
mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}	mg/m ^{3 4)}
Calcium	39	4.2	3.5	19	0.65	2.4	0.37	8.3	5.1	8.5
Kalium	29	< 0.2	47	43	34	39	35	8.9	27	31
Magnesium	5.4	< 0.2	< 0.2	1.2	< 0.4	0.41	< 0.2	1.0	< 0.2	< 0.2
Natrium	7.1	3.9	2.1	3.0	17	11	11	6.0	5.5	30
Arsen	0.0054	< 0.0004	0.0013	0.0026	0.011	0.011	0.056	0.019	0.0044	0.063
Blei	0.62	0.35	0.029	0.068	1.9	0.50	6.6	4.0	1.8	26
Cadmium	0.0095	< 0.0002	0.0019	0.0020	0.025	0.0072	0.029	0.010	0.0054	0.069
Chrom	0.13	< 0.01	< 0.007	< 0.008	< 0.02	0.087	0.21	< 0.01	< 0.008	< 0.007
Kupfer	0.17	0.097	0.040	0.044	0.37	0.14	0.18	0.054	0.12	0.38
Nickel	0.030	< 0.002	0.012	0.0094	0.069	0.014	0.020	< 0.003	0.013	< 0.002
Phosphor	1.6	0.46	0.50	0.66	1.1	0.35	0.36	0.51	0.41	3.7
Quecksilber	< 0.0008	< 0.0009	< 0.0006	< 0.0007	< 0.002	< 0.0008	0.0055	0.020	0.0033	< 0.013
Zink	2.8	0.74	0.72	0.54	3.0	2.4	14	6.8	2.3	55
Brom	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.4	< 0.2	< 0.2	< 0.3	< 0.2	< 0.2
Chlor	0.66	7.0	0.31	0.42	23	< 0.2	2.3	2.0	1.8	17
Fluor	< 0.1	0.51	< 0.1	< 0.1	< 0.2	0.24	0.26	0.47	< 0.1	4.2
	µg/m ^{3 4)}	µg/m ^{3 4)}	µg/m ^{3 4)}	µg/m ^{3 4)}	µg/m ^{3 4)}	µg/m ^{3 4)}	µg/m ^{3 4)}	µg/m ^{3 4)}	µg/m ^{3 4)}	µg/m ^{3 4)}
Σ PAK	0.38	150	k.M.	21	0.41	0.042	7.9	k.M.	46	0.15
Σ PAK karz.	0.078	38	k.M.	5.3	0.041	0.0099	2.3	k.M.	4.6	0.019
Σ PAK karz.	0.063	25	k.M.	3.6	0.017	0.0053	1.6	k.M.	3.5	0.014

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

Tabelle 4.4: Gehalte im Abgas (bezogen auf 11 Vol-% O₂) (Fortsetzung)

Brennstoff	Anlage A		Anlage C		Anlage D		Anlage E		Anlage F		Anlage G		Anlage I		Anlage J		Anlage K		Anlage L	
	BauRH + Verpak- kungen	Altholz	Altholz	Waldhack- schnittel (Referenz)	Waldhack- schnittel (Referenz)	Waldhack- schnittel (Referenz)	Schrein- RH (viel Spanplat.)	Schrein- RH (viel Spanplat.)	sortierte Einweg- paletten	sortierte Einweg- paletten	Restholz	Bau- Restholz	Balken o. sichtbare Behandl.	Schrein. RH (wenig Spanplat.)	Schrein. RH (wenig Spanplat.)	sortiertes Altholz				
	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}	ng/m ^{3,4}
PCP	58	49	16	15	130	94	37	27	36	64										
α-HCH	< 1	< 1	< 1	< 1	< 2	4.5 ²⁾	< 1	< 2	1.2	13										
β-HCH	< 1	< 1	< 1	< 1	< 2		< 1	< 2	< 1	< 1										
γ-HCH	4.1	5.2	3.4	3.7	6.5		2.4	4.3	2.4	10										
δ-HCH	1.3	< 1	< 1	< 1	< 2		< 1	< 2	< 1	< 1										
HCB	4.6	25	1.9	0.86	100	100	9.3	8.2	15	150										
DDT	< 5	< 6	< 4	< 5	< 11	< 6	< 6	< 8	< 5	< 5										
Σ PCB	8.0	22	48	18	55	< 58	10	27	17	6.1										
Σ PCDD	2.4	53	1.8	0.093	97	0.46	9.6	16	9.8	23										
Σ PCDF	4.6	170	2.4	0.15	210	2.4	83	69	47	35										
Σ I-TEQ	0.14	3.0	0.047	0.0042	6.4	0.059	1.5	1.5	0.95	0.77										
Sauerstoff	Vol-%	11.7	12.8	9.9	10.9	16.4	12.3	12.9	11.0	10.3										
Kohlendioxid	Vol-%	8.8	7.7	11.0	8.7	4.4	8.2	8.1	9.5	10.2										
Temperatur	°C	126	162	150	145	129	248	187	145	159										
Wassergehalt	Vol-%	11.2	8.1	14.0	10.4	4.4	10.0	7.6	7.1	9.1										
Feststoff	mg/m ³	208	3.4	143	121	120	133	150	69	256										
Kohlenmonoxid	mg/m ³	386	96	89	1022	44	104	181	205	50										
Stickoxide	mg/m ³	131	382	236	297	73	214	328	518	443										
org geb. C	mg/m ³	< 2	6.0	8.2	33	5.0	3.5	3.5	4.2	4.3										
Σ Blei, Zink	mg/m ³	3.4	1.1	0.75	0.61	4.9	2.9	21	4.2	81										

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

Tabelle 4.5: Gehalte in der Flugasche

	Anlage A	Anlage C	Anlage D	Anlage E	Anlage F	Anlage G	Anlage I	Anlage J	Anlage K	Anlage L
Brennstoff	BauRH + Verpak- kungen	Altholz (Elektro- filter)	Waldhack- schnittel (Referenz)	Waldhack- schnittel (Referenz)	Schrein.- RH (viel Spanplat.)	sortierte Einweg- paletten	Bau- Restholz	Balken o. sichtbare Behandl.	Schrein. RH (wenig Spanplat.)	sortiertes Altholz
	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾	mg/kg ¹⁾
Calcium	182'000	300'000	18'000	57'000	8'700	17'000	5'600	58'000	53'000	17'000
Kalium	138'000	5'600	322'000	349'000	279'000	290'000	232'000	69'000	205'000	118'000
Magnesium	24'000	1'000	2'500	6'500	2'000	3'000	950	3'300	6'400	2'300
Natrium	30'000	49'000	5'500	17'000	125'000	60'000	64'000	34'000	68'000	105'000
Arsen	25	120	< 9.1	20	88	85	370	160	61	240
Blei	2'900	119'000	130	520	16'000	3'600	44'000	34'000	27'000	100'000
Cadmium	44	330	8.1	15	200	47	190	81	74	270
Chrom	510	130	22	25	200	510	1'200	130	260	95
Kupfer	790	470	240	330	2'900	1'000	1'200	380	1'700	1'500
Nickel	90	32	36	23	91	58	63	31	53	37
Phosphor	6'200	1'200	1'500	3'900	4'800	1'300	480	850	2'900	13'000
Quecksilber	< 0.23	9.2	< 0.18	12	< 0.80	< 1.0	2.8	1.4	< 0.63	15
Zink	13'000	298'000	4'800	4'000	24'000	18'000	94'000	57'000	33'000	216'000
Feststoff	193	182	159	122	56	116	122	78	69	275

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

4.2 TRANSFERKOEFFIZIENTEN DER 10 ANLAGEN IM VERGLEICH

Tabelle 4.6: Transferkoeffizienten in die Rostasche (bezogen auf die Summe der Ausgangsströme)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Anlage A	Anlage C	Anlage D	Anlage E	Anlage F	Anlage G	Anlage I	Anlage J	Anlage K	Anlage L	Min	Max	Mittel
BauRH + Altholz	93%	Wald- hack- schnitzel	Wald- hack- schnitzel	Wald- hack- schnitzel	Schrein- RH (viel Span.)	sortierte Einweg- paletten	Bau- Restholz	Balken o. sichtbare Behandl.	Schrein. RH (we- nig Span)	sortiertes Altholz			
Verpak- kungen	57%	93%	97%	93%	81%	87%	71%	91%	82%	77%	57%	93%	80%
Calcium	59%	88%	97%	93%	81%	99%	89%	99%	90%	81%	59%	99%	88%
Kalium	21%	93%	89%	50%	42%	31%	31%	66%	70%	48%	21%	93%	55%
Magnesium	49%	97%	97%	93%	97%	88%	88%	98%	85%	82%	49%	98%	87%
Natrium	38%	73%	90%	81%	51%	43%	43%	78%	52%	65%	28%	90%	60%
Arsen	46%	78%	92%	76%	64%	55%	55%	44%	48%	68%	37%	92%	61%
Blei	6%	34%	50%	11%	37%	39%	39%	17%	37%	34%	4%	50%	27%
Cadmium	<u>13%</u>	<u>21%</u>	<u>84%</u>	<u>67%</u>	<u>55%</u>	28%	28%	28%	<u>24%</u>	58%	8%	84%	39%
Chrom	34%	95%	87%	77%	91%	67%	67%	92%	95%	80%	34%	95%	81%
Kupfer	59%	99%	94%	77%	56%	73%	73%	94%	96%	74%	56%	99%	82%
Nickel	49%	97%	83%	72%	56%	78%	78%	85%	90%	65%	49%	97%	77%
Phosphor	36%	80%	97%	92%	89%	78%	78%	94%	74%	76%	36%	97%	78%
Quecksilber	<u>4%</u>	<u>13%</u>	<u>33%</u>	15%	12%	<u>5%</u>	<u>3%</u>	<u>3%</u>	<u>0%</u>	<u>2%</u>	0%	33%	9%
Zink	22%	36%	50%	14%	46%	24%	24%	32%	46%	47%	12%	50%	33%
Brom	<u>12%</u>	<u>61%</u>	<u>63%</u>	<u>30%</u>	<u>17%</u>	<u>14%</u>	<u>14%</u>	<u>43%</u>	<u>19%</u>	<u>29%</u>	12%	63%	33%
Chlor	<u>13%</u>	<u>16%</u>	<u>77%</u>	<u>44%</u>	50%	<u>68%</u>	<u>54%</u>	54%	<u>11%</u>	44%	3%	77%	38%
Fluor	<u>22%</u>	<u>39%</u>	<u>76%</u>	<u>46%</u>	57%	<u>14%</u>	43%	43%	15%	<u>36%</u>	3%	76%	35%

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

Tabelle 4.7: Transferkoeffizienten in die Zyklonasche (bezogen auf die Summe der Ausgangsströme)

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Anlage A		Anlage C		Anlage D		Anlage E		Anlage F		Anlage G		Anlage I		Anlage J		Anlage K		Anlage L		Anl. C	Min	Max	Mittel
	BauRH + Verpak- kungen	Altholz	hack- schnittel	Wald- hack- schnittel																				
Ascheanteil	4%	3%	3%	3%	1%	1%	1%	6%	6%	2%	2%	4%	4%	16%	16%	13%	5%	1%	16%	5%	1%	16%	5%	
Calcium	4%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	9%	9%	1%	1%	4%	4%	16%	16%	12%	10%	1%	16%	10%	1%	16%	5%	
Kalium	2%	4%	1%	1%	2%	2%	4%	4%	4%	1%	1%	5%	5%	11%	11%	11%	3%	1%	11%	3%	1%	11%	4%	
Magnesium	4%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	9%	9%	2%	2%	6%	6%	17%	17%	12%	0%	1%	17%	0%	1%	17%	6%	
Natrium	3%	2%	2%	2%	0%	1%	5%	5%	5%	1%	1%	3%	3%	13%	13%	6%	18%	0%	13%	18%	0%	13%	4%	
Arsen	3%	3%	3%	3%	0%	1%	5%	5%	5%	1%	1%	4%	4%	12%	12%	4%	19%	0%	12%	19%	0%	12%	4%	
Blei	6%	11%	6%	6%	1%	3%	10%	10%	10%	1%	1%	5%	5%	13%	13%	9%	54%	1%	13%	54%	1%	13%	6%	
Cadmium	3%	11%	6%	6%	1%	5%	19%	19%	19%	3%	3%	9%	9%	27%	27%	22%	68%	1%	27%	68%	1%	27%	11%	
Chrom	5%	2%	3%	3%	1%	2%	5%	5%	5%	1%	1%	2%	2%	17%	17%	9%	2%	1%	17%	2%	1%	17%	5%	
Kupfer	2%	0%	2%	2%	1%	1%	4%	4%	4%	1%	1%	1%	1%	13%	13%	2%	0%	0%	13%	0%	0%	13%	3%	
Nickel	6%	1%	2%	2%	1%	1%	5%	5%	5%	2%	2%	6%	6%	12%	12%	4%	1%	1%	12%	1%	1%	12%	4%	
Phosphor	6%	5%	2%	2%	1%	1%	11%	11%	11%	2%	2%	6%	6%	18%	18%	20%	5%	1%	20%	5%	1%	20%	7%	
Quecksilber	1%	3%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	0%	3%	3%	5%	60%	0%	3%	60%	0%	3%	2%	
Zink	3%	6%	7%	7%	1%	3%	7%	7%	7%	1%	1%	4%	4%	20%	20%	10%	57%	1%	20%	57%	1%	20%	6%	
Brom	<u>1%</u>	<u>2%</u>	<u>2%</u>	<u>2%</u>	<u>0%</u>	0%	2%	2%	2%	<u>1%</u>	<u>1%</u>	<u>1%</u>	<u>1%</u>	25%	25%	<u>7%</u>	5%	0%	25%	5%	0%	25%	4%	
Chlor	17%	22%	5%	5%	1%	5%	19%	19%	19%	9%	9%	12%	12%	36%	36%	28%	<u>0%</u>	1%	36%	<u>0%</u>	1%	36%	15%	
Fluor	2%	3%	<u>2%</u>	<u>2%</u>	<u>0%</u>	2%	<u>1%</u>	<u>1%</u>	<u>1%</u>	3%	3%	2%	2%	14%	14%	1%	15%	0%	14%	15%	0%	14%	3%	

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

Tabelle 4.9: Wiederfindungsrate (Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangsstrom (Brennstoff))

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter der Nachweisgrenze liegen.

	Anlage A	Anlage C	Anlage D	Anlage E	Anlage F	Anlage G	Anlage I	Anlage J	Anlage K	Anlage L
Calcium	78%	66%	325%	55%	85%	106%	122%	67%	92%	82%
Kalium	63%	47%	299%	80%	100%	102%	95%	48%	103%	65%
Magnesium	61%	49%	322%	75%	87%	87%	143%	62%	94%	84%
Natrium	<u>25%</u>	49%	<u>56%</u>	<u>35%</u>	<u>73%</u>	<u>42%</u>	36%	<u>25%</u>	30%	<u>87%</u>
Arsen	<u>22%</u>	92%	<u>55%</u>	<u>24%</u>	<u>63%</u>	<u>56%</u>	100%	<u>76%</u>	<u>45%</u>	38%
Blei	243%	25%	<u>30%</u>	<u>40%</u>	120%	<u>120%</u>	110%	289%	99%	82%
Cadmium	65%	48%	<u>359%</u>	<u>135%</u>	99%	<u>7%</u>	68%	106%	279%	31%
Chrom	<u>11%</u>	20%	<u>4%</u>	<u>2%</u>	<u>12%</u>	<u>16%</u>	63%	<u>22%</u>	<u>15%</u>	<u>39%</u>
Kupfer	<u>91%</u>	1371%	<u>166%</u>	<u>42%</u>	<u>174%</u>	<u>119%</u>	119%	<u>297%</u>	87%	597%
Nickel	<u>7%</u>	16%	<u>7%</u>	<u>4%</u>	<u>16%</u>	<u>9%</u>	<u>13%</u>	<u>6%</u>	<u>6%</u>	<u>34%</u>
Phosphor	75%	59%	388%	49%	90%	<u>100%</u>	131%	71%	128%	88%
Quecksilber	<u>3%</u>	<u>12%</u>	<u>3%</u>	<u>3%</u>	<u>6%</u>	<u>3%</u>	<u>17%</u>	<u>66%</u>	<u>11%</u>	38%
Zink	162%	67%	141%	<u>68%</u>	105%	168%	150%	158%	203%	104%
Brom	<u>3%</u>	<u>7%</u>	<u>5%</u>	<u>3%</u>	<u>5%</u>	<u>3%</u>	<u>4%</u>	<u>4%</u>	<u>4%</u>	<u>4%</u>
Chlor	<u>2%</u>	8%	<u>4%</u>	<u>2%</u>	34%	<u>1%</u>	12%	<u>6%</u>	<u>23%</u>	27%
Fluor	<u>1%</u>	<u>12%</u>	<u>4%</u>	<u>2%</u>	<u>5%</u>	<u>3%</u>	<u>4%</u>	<u>5%</u>	<u>2%</u>	<u>43%</u>
Wasser	128%	108%	111%	99%	102%	137%	104%	134%	71%	88%
Mittel Na, K, Mg, Ca	57%	53%	251%	61%	86%	84%	99%	51%	80%	80%
Masseverhältniss der Aschen										
Zyklonasche 1 :	14	37	34	130	69	13	50	19	5	6
Abgas 1 :	1.6	1354	23	7.0	7.4	3.2	12.7	6.4	13	7.0

Die Legende befindet sich am Ende des Abschnittes

Bemerkungen:

Die Transferkoeffizienten beziehen sich auf die Summe der Massenströme im Output (Rost-, Zyklonasche, Abgas (bei Anlage C auch EF-Asche)). Die Wiederfindungsraten berechnen sich als Summe der Ausgangsströme (Aschen+Abgas) / Eingangstrom (Brennstoff). Da gewisse Komponenten nahe oder sogar unter der analytischen Nachweisgrenze vorliegen und auch die Unsicherheit der Probenahme nicht genau bestimmt werden kann, ergibt die Summe nicht den theoretischen Wert von 100 %. Probleme traten insbesondere bei der Quantifizierung der anfallenden Rost- und Zyklonamengen auf. Diese Zahlen liegen leider den meisten Anlagebetreibern auch nicht über ein längeres Intervall vor. Von dieser Unsicherheit ist auch das Verhältnis von Rost-asche zu Zyklonasche betroffen, das typischer Weise zwischen 10 und 100 liegt.

Diese Legende gilt für alle Tabellen dieses Kapitels

< Wert unter der Nachweisgrenze

Werte die unterstrichen und kursiv geschrieben sind, kennzeichnen Angaben, die sich auf Resultate beziehen, die unter oder nahe der Nachweisgrenze sind.

n.n. Komponenten nicht nachgewiesen, bei Summenwerten kann keine Nachweisgrenze angegeben werden.

k.M. keine Messung

¹⁾ bezogen auf trockenen Brennstoff bzw. Asche

²⁾ Summe aller HCHs angegeben (α HCH, β HCH, γ HCH, δ HCH)

³⁾ Unterer Heizwert des Holzes, wie es in der entsprechenden Anlage verbrannt wurde.

⁴⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

DDT Falls die Summe unter der Nachweisgrenze liegt wird diese angegeben, sonst werden p,p-DDT und o,p-DDT separat angegeben.

5. Diskussion und Wertung der Ergebnisse

In der vorliegenden Untersuchung kamen Anlagen zum Einsatz, die, gemäss der Luftreinhalteverordnung, zum Verbrennen von naturbel. Holz, von Restholz oder von Altholz zugelassen sind. Bei den Restholzfeuerungen ist eine weitere Unterteilung der Anlagen auf Grund des verwendeten Brennstoffs sortiments sinnvoll. In drei der Anlagen wurde ein "typisches" Restholz (Schreinerei-, Baurestholz) verbrannt, das aber nur bei einer der Anlagen tatsächlich der Luftreinhalteverordnung für Restholz (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c) entspricht. In den vier übrigen Restholzfeuerungen wurden Brennstoffe verwendet, die gemäss LRV zum Sortiment Altholz (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a) gehören, über deren tatsächliche Schadstoffbelastung jedoch Zweifel bestanden.

Tabelle 5.1: Einteilung der untersuchten Anlagen

	Anlage	Brennstoff (Klassierung gemäss LRV)
<i>Naturbelassenes Holz</i>		
	Anlage D und E	Waldhackschnitzel (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. b)
<i>"Typisches" Restholz</i>		
	Anlage I	Bau-Restholz auf der Baustelle sortiert (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c)
	Anlage K	Schreinerei-Restholz mit wenig Spanplatten (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c) sichtbarer Papieranteil (Anh. 2 Ziff. 72 Abs. 1 Bst. b)
	Anlage F	Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c), alte Möbel (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a)
<i>Altholz (in Restholzfeuerungen verbrannt)</i>		
	Anlage A	Verpackungsholz (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a) und Baurestholz (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c)
	Anlage G	Einwegpaletten ohne graue Pressspanfüsse (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a)
	Anlage J	Aus Abbruchholz separierte saubere Balken (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a)
	Anlage L	Sortiertes Altholz ¹⁾ (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c) (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a)
<i>Altholz (in Altholzfeuerungen verbrannt)</i>		
	Anlage C	Abbruchholz (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 2 Bst. a)

¹⁾ es wurde Einwegpaletten, naturbel. Holz, Schreinerei-RH, Bau-RH, rohe Spanplatten und Fruchtkisten aus Altholz aussortiert und verbrannt)

5.1 BRENNSTOFFE UND ASCHEN

Die Belastung der untersuchten Brennstoffe und Aschen wurde durch einen Vergleich der Schwermetallgehalte, des Chlorgehalts und des Gehalts an organischen Inhaltsstoffen (HCH, PCP, HCB, DDT, PCB, PAK, PCDD/PCDF) mit Literaturdaten abgeschätzt. Es wurden vor allem Ergebnisse der Holzkampagne 98 [5], des HARVE-Projekts [7] und des DIANE 8-Projekts [3] verwendet, die Aschen aus naturbelassenem Holz wurden ausserdem mit Ergebnissen einer österreichischen Studie von Obernberger verglichen [8]. Schwermetallgehalte in Rest- / Altholzbrennstoffen aus Untersuchungen von anderen Ländern konnten nur eingeschränkt zu einem Vergleich herangezogen werden, da die Einteilung der Brennstoffe nach anderen Kriterien erfolgt [9].

5.1.1 Schwermetall und Chlor-Gehalte

a) Naturbelassenes Holz (Anlage D, E)

Gehalte im Brennstoff

Die Gehalte aller Schwermetalle (As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg) sind, mit Ausnahme des Zink-Gehalts im Brennstoff der **Anlage D** (Waldhackschnitzel) (11 mg/kg), in beiden Brennstoffproben unter der Nachweisgrenze und unterhalb der in der DIN 51731 für Preßlinge aus naturbelassenem Holz festgelegten Grenzwerte [10] (bei Cr, Hg, Cl liegt die Nachweisgrenze über dem Grenzwert) (Tabelle 5.2). Die Analysenwerte liegen im Bereich der in der Holzkampagne 98 [5] und im HARVE-Projekt [7] gefundenen Schwermetallgehalte (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Schadstoffgehalte im naturbelassenen Holz im Vergleich mit den Gehalten des naturbelassenen Holzes der Holzkampagne 98, des HARVE-Projekts und den Grenzwerten für Preßlinge aus naturbel. Holz

		Naturbel. Holz (Anlage D, E) (n=2) Mittelwerte ¹⁾	Naturbel. Holz ²⁾ (Holzkamp. 98) (n=9) Messbereich ³⁾	Naturbelassene Holzschnitzel (HARVE) (n=7) Messbereich ⁴⁾	Grenzwerte für Preßlinge aus naturbel. Holz DIN 51731
Arsen	mg/kg	< 0.5	< 1		0.80
Blei	mg/kg	< 2	< 1-1.3	< 0.1-4.7	10
Cadmium	mg/kg	< 0.05	< 1	< 0.1-0.3	0.50
Chrom	mg/kg	< 20	< 1-2.4	< 0.2-1.9	8.0
Kupfer	mg/kg	< 5	< 1-3.9	1.0-5.1	5.0
Nickel	mg/kg	< 10	< 1-1.3	< 1.2	
Quecksilber	mg/kg	< 0.3	< 1		0.05
Zink	mg/kg	< 10	3.4-28	4.0-27	100
Chlor	mg/kg	< 400 ⁵⁾	34-110		300
EOX	mg/kg	< 3 ⁶⁾			< 3

¹⁾ HNO₃-Aufschluss im Hochdruckverascher

²⁾ Waldhackschnitzel (Querschnittprobe)

- ³⁾ Röntgenfluoreszenz (XRF)
⁴⁾ HNO₃-Druckaufschluss
⁵⁾ Verbrennen in Sauerstoffdruckbombe, Absorption in Natronlauge
⁶⁾ Extraktion mit Hexan

Gehalte in der Rost-, Zyklon- und Flugasche

Die Schwermetallgehalte der Rost- und der Zyklonaschen (Tabelle 5.3) von **Anlage D** und **E** (Waldhackschnitzel) liegen im Bereich der im HARVE-Projekt [7] bzw. der von Obernberger [8] für Aschen von Rinden, Hackgut und Spänen gefundenen Analysenwerte (mit Ausnahme der höheren Chrom-Gehalte bei Obernberger) (Tabelle 5.3). Die Schwermetallgehalte der Rostaschen liegen, mit Ausnahme des Kupfer-Gehalts, unterhalb der für eine Verwendung als Dünger angegebenen Grenzwerte [11]. Auf Grund der sinkenden Abscheidetemperatur und der zunehmenden Partikel-feinheit steigen die Gehalte der leichterflüchtigen Schwermetalle (Pb, Cd, Hg, Zn) von der Rost-zur Zyklon- und dann zur Flugasche an (Tabelle 5.3). Die Schwermetallgehalte der Flugaschen liegen, mit Ausnahme des Quecksilber-Gehalts, unter den von Obernberger gefundenen Werten [8].

Tabelle 5.3: Gehalte in der Rost-, Zyklonasche und Flugasche im Vergleich mit den Gehalten des HARVE-Projekts, von Obernberger und den Orientierungswerten für Dünger

Gehalte in der Rostasche		Naturbelasse- nes Holz (Anlage D, E) (n=2) Mittelwerte ¹⁾	Naturbel. Holzschnitzel (HARVE) (n=13) Messbereich ²⁾	Rinden, Hack- gut, Späne (Obernberger) (n=10) Mittelwerte ³⁾	Grenzwerte für eine Verwen- dung als Dün- ger
Arsen	mg/kg	9.2		4.1	
Blei	mg/kg	10	< 0.1-42	14	100
Cadmium	mg/kg	< 5	0.1-12	1.2	1.5
Chrom	mg/kg	27	13-87	330	100
Kupfer	mg/kg	220	95-220	170	130
Nickel	mg/kg	25	20-110	66	30
Quecksilber	mg/kg	< 0.1	< 0.5	0.01	1.5
Zink	mg/kg	185	9-950	430	540
Chlor	mg/kg	< 400 ⁴⁾	<100-2'000 ⁵⁾		

Tabelle 5.3: Gehalte in der Rost-, Zyklonasche und Flugasche im Vergleich mit den Gehalten des HARVE-Projekts, von Obernberger und den Orientierungswerten für Dünger (Fortsetzung)

Gehalte in der Zyklonasche		Naturbelassenes Holz (Anlage D, E) (n=2) Mittelwerte ¹⁾	Naturbel. Holzschnitzel (HARVE) (n=13) Messbereich ²⁾	Rinden, Hackgut, Späne (Obernberger) (n=10) Mittelwerte ³⁾
Arsen	mg/kg	7.8		6.7
Blei	mg/kg	55	< 0.1-56	58
Cadmium	mg/kg	9.6	2.0-28	22
Chrom	mg/kg	28	18-91	160
Kupfer	mg/kg	170	63-330	140
Nickel	mg/kg	24	24-84	60
Quecksilber	mg/kg	0.14	< 0.5-0.5	0.04
Zink	mg/kg	1'000	84-1'700	1'900
Chlor	mg/kg	950 ⁴⁾	400-4'900 ⁵⁾	
Gehalte in der Flugasche		Mittelwert ¹⁾		Mittelwerte ³⁾
Arsen	mg/kg	15		37
Blei	mg/kg	330		1'100
Cadmium	mg/kg	11		81
Chrom	mg/kg	23		230
Kupfer	mg/kg	290		390
Nickel	mg/kg	29		63
Quecksilber	mg/kg	6.2 ⁶⁾		1.5
Zink	mg/kg	4'400		13'000

¹⁾ Königswasser-Aufschluss im Hochdruckverascher

²⁾ HCl-Mikrowellenauszug

³⁾ HNO₃/HF-Mikrowellendruckaufschluss; Werte gerundet

⁴⁾ Verbrennen in Sauerstoffdruckbombe, Absorption in Natronlauge

⁵⁾ wasserlöslicher Anteil (n=17 (Rostasche); n=16 (Zyklonasche))

⁶⁾ eventuell Analysenfehler, da nur einer der Messwerte stark erhöht ist

b) "Typisches" Restholz (Anlage F, I, K)

Gehalte im Brennstoff

Die untersuchten "typischen" Restholz (RH)-Sortimente entsprechen nur im Fall der **Anlage I** (auf der Baustelle sortiertes Baurestholz) den Kriterien der Luftreinhalte-Verordnung für Restholz [1] (Anh. 5 Ziff. 3 Abs. 1 Bst. c), da Altholz aus Umbau und Abbruch zurückgenommen und mitverbrannt wird. Die Schwermetall- und Chlorgehalte der verschiedenen Brennstoffproben weisen eine grosse Variabilität auf und die Blei- und Zink-Gehalte aller drei Brennstoffe liegen über den Werten für Restholzbrennstoffe des HARVE-Projekts [7] (Tabelle 5.4 bzw. 5.5).

Die höchsten Schwermetallgehalte der drei Anlagen wurden im auf der Baustelle sortierten Baurestholz (Anlage I) gefunden (Tabelle 5.4). Ausser dem Blei- und Zink-Gehalt sind auch der Chrom- und der Kupfer-Gehalt des Brennstoffs erhöht und liegen im Messbereich von Altholz-Brennstoffen des HARVE-Projekts [7]. Gemäss den Empfehlungswerten des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen (LUA NRW) (für Holz ohne Holzschutzmittel-Behandlung) [13] deutet der erhöhte Kupfer-Gehalt auf eine Behandlung mit anorganischen Holzschutzmitteln hin [12]. Der Chrom-Gehalt überschreitet den vorgeschlagenen Grenzwert der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) [14] für Holz mit geringer chemischer Verunreinigung (Tabelle 5.5).

Die Schadstoffgehalte des Brennstoffs der Anlage I (auf der Baustelle sortiertes Baurestholz) liegen, mit Ausnahme eines höheren Kupfer-Gehalts, im Messbereich der Bau-RH-Sortimente der Holzkampagne 98 [5] (Schalungstafeln, Kanthölzer, Andere) (Tabelle 5.4). Einzelne Brennstoff-Proben des Baurestholzes der Holzkampagne 98 weisen aber auch deutlich höhere Schadstoffgehalte auf.

Beim Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil (**Anlage F**) ist vor allem der Chlor-Gehalt gegenüber dem der Restholz-Brennstoffe des HARVE-Projekts stark erhöht (Tabelle 5.4 und 5.5). Der Chlor-Gehalt liegt auch über dem vorgeschlagenen Schwellenwert des Landesumweltamtes NRW von 300 mg/kg [13], oberhalb dessen von einer halogenorganischen Beschichtung auszugehen ist (Tabelle 5.5). Der Chlor-Gehalt des Brennstoffs der Anlage F (Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil) liegt jedoch im Messbereich der Holzkampagne 98 [5] für verschiedene Span- und Sperrholzplatten (Tabelle 5.4). Der sehr hohe maximale Chlor-Gehalt (27'000 mg/kg) stammt von lediglich zwei Brennstoffproben während die übrigen 100 Proben höchstens einen Gehalt von 2'100 mg/kg Chlor aufweisen. Die Schwermetallgehalte der Brennstoffe der Anlage F (Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil) und **K** (Schreinerei-Restholz mit geringem Spanplattenanteil) liegen im Messbereich der unterschiedlichen Spanplatten-Sortimente der Holzkampagne 98 [5].

Tabelle 5.4: Schadstoffgehalte im Schreinerei-RH (Anlage F, K) und im Bau-RH (Anlage I) im Vergleich mit den Gehalten entsprechender Brennstoffe der Holzkampagne 98

		Bau-RH	Bau-RH ²⁾	Schreinerei-RH		Spanplatten ⁴⁾
		Anlage I	(Holzk. 98)	F	K	(Holzk. 98)
			(n=7)			(n=102-112)
		Messwerte ¹⁾	Messbereich ³⁾	Messwerte ¹⁾		Messbereich ³⁾
Arsen	mg/kg	0.93	< 1	< 0.5	< 0.5	< 1
Blei	mg/kg	67	1.4-390	26	34	< 1-91
Cadmium	mg/kg	0.56	< 1	0.63	0.12	< 1
Chrom	mg/kg	47	< 1-580	< 20	< 20	< 1-140
Kupfer	mg/kg	28	1.2-14	< 5	11	< 1-60
Nickel	mg/kg	< 10	< 1-150	< 10	< 10	< 1-25
Quecksilber	mg/kg	< 0.3	< 1	< 0.3	< 0.3	< 1
Zink	mg/kg	130	15-930	55	34	1.4-1'100
Chlor	mg/kg	490 ⁵⁾	54-570	1'500 ⁵⁾	<400 ⁵⁾	5.1-27'000
EOX	mg/kg	< 3 ⁶⁾		4.5 ⁶⁾	5.2 ⁶⁾	

¹⁾ HNO₃ im Hochdruckverascher

²⁾ Schalungstafeln, Kanthölzer, Andere (Querschnittprobe), Restholzschnitzel

³⁾ Röntgenfluoreszenz (XRF)

⁴⁾ rohe und beschichtete Span-, MDF-, Multiplex-, Faserplatten, Sperrholz (Querschnittprobe)

⁵⁾ Verbrennen in Sauerstoffdruckbombe, Absorption in Natronlauge

⁶⁾ Extraktion mit Hexan

Tabelle 5.5: Schadstoffgehalte in Restholz-Brennstoffen des HARVE-Projekts und Empfehlungswerte des LUA NRW bzw. der LAGA für Holz ohne HSM bzw. halogenorg. Behandlung

		Restholz (HARVE- Projekt) (n=5)	Maximalwerte für behandel- tes Holz ohne halogenorg. bzw. HSM- Behandlung ²⁾
		Messbereich ¹⁾	
Arsen	mg/kg	0.5-1 ³⁾	< 2 (\leq 4)
Blei	mg/kg	0.2-20	
Cadmium	mg/kg	< 0.1-0.3	
Chrom	mg/kg	< 0.2-7.0	(\leq 40) ⁴⁾
Kupfer	mg/kg	0.9-8.1	< 20 (\leq 30)
Nickel	mg/kg	< 1.2-5.0	
Quecksilber	mg/kg	< 0.5 ³⁾	< 0.4 (\leq 0.3)
Zink	mg/kg	11-21	
Chlor	mg/kg	< 100 ³⁾	< 300
EOX	mg/kg		

¹⁾ HNO₃-Druckaufschluss bzw. zwei Proben mit Totalaufschluss

²⁾ Empfehlungswerte des LUA NRW [13] bzw. der LAGA (Werte in Klammern) [14]

³⁾ diese Daten wurden nur an zwei Restholz-Proben gemessen, Totalaufschluss

⁴⁾ bei erhöhten Chrom-Werten allein kann nicht grundsätzlich auf HSM geschlossen werden

Gehalte in der Rost-, Zyklon- und Flugasche

Die Rostascheproben aller drei Anlagen weisen einen Zink-Gehalt auf, der über dem Messbereich für Restholzasche des HARVE-Projekts liegt [7] (Tabelle 5.6). Ausserdem ist der Kupfer-Gehalt in der Rost- und der Zyklonasche aller Anlagen erhöht.

Die Blei- und Zink-Gehalte der Zyklonascheproben der **Anlage F** (Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil) liegen bereits im Bereich der im HARVE-Projekt für Zyklonaschen aus Altholz-Brennstoffen gefunden Werte (Tabelle 5.6 und 5.10). In den Aschen der Anlage F werden ausserdem sehr stark erhöhte Chlor-Gehalte gemessen, die bereits über den Gehalten der entsprechenden Altholz-Aschen des HARVE-Projekts liegen.

In der Rost- und Zyklonasche der **Anlage I** (auf der Baustelle sortiertes Baurestholz) sind, wie schon im Brennstoff, der Chrom- und der Kupfer-Gehalt stark erhöht (Tabelle 5.6).

Bei **Anlage K** (Schreinerei-Restholz mit geringem Spanplattenanteil) ist ausser dem Kupfer-Gehalt der Rost- und Zyklonasche auch der Blei- und Zink-Gehalt der Rostasche, gegenüber den Restholzaschen des HARVE-Projekts erhöht (Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6: Schadstoffgehalte in der Rost, Zyklon- und Flugasche im Vergleich mit den Gehalten der Aschen des HARVE-Projekts

Gehalte in der Rostasche		"typisches" Restholz Anlage			Altholz Anlage				Restholz (HARVE) (n=4) Messbereich ²⁾
		F	I	K	A	G	J	L	
		Messwerte ¹⁾			Messwerte ¹⁾				
Arsen	mg/kg	23	24	21	16	39	27	25	
Blei	mg/kg	1'300	770	1'600	150	960	3'800	830	10-1'400
Cadmium	mg/kg	39	6.3	27	< 5	10	< 5	< 5	< 0.5-13
Chrom	mg/kg	250	1'600	320	230	540	590	470	200-290
Kupfer	mg/kg	560	1'800	970	860	1'100	2'100	7'600	60-420
Nickel	mg/kg	100	65	50	110	170	84	220	43-150
Quecksilber	mg/kg	0.24	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.5
Zink	mg/kg	3'100	3'700	4'500	2'600	2'200	8'900	5'500	90-1'600
Chlor	mg/kg	30'000 ³⁾	1'800 ³⁾	5'400 ³⁾	< 400 ³⁾	<3'000 ³⁾	< 400 ³⁾	480 ³⁾	< 100-1'700 ⁴⁾

Tabelle 5.6: Schadstoffgehalte in der Rost, Zyklon- und Flugasche im Vergleich mit den Gehalten der Aschen des HARVE-Projekts (Fortsetzung)

Gehalte in der Zyklonasche		"typisches" Restholz Anlage			Altholz Anlage				Restholz (HARVE) (n=4) Messbereich ²⁾
		F	I	K	A	G	J	L	
		Messwerte ¹⁾			Messwerte ¹⁾				
Arsen	mg/kg	19	18	18	17	41	44	17	
Blei	mg/kg	6'700	2'300	2'800	1'800	3'000	8'800	9'400	46-3'000
Cadmium	mg/kg	220	29	58	18	82	37	82	4.4-35
Chrom	mg/kg	290	950	320	440	510	290	280	30-420
Kupfer	mg/kg	810	750	820	440	750	370	840	40-410
Nickel	mg/kg	100	63	45	180	< 150	98	51	24-120
Quecksilber	mg/kg	1.63	1.5	0.6	0.38	< 0.1	1.1	2.4	< 0.5-1.5
Zink	mg/kg	13'000	6'800	9'100	5'300	7'800	15'000	28'000	810-11'000
Chlor	mg/kg	192'000	15'000 ³⁾	21'000 ³⁾	7'500 ³⁾	11'000 ³⁾	7'800 ³⁾	25'000 ³⁾	700-68'000 ⁴⁾
Gehalte in der Flugasche		Messwerte ¹⁾			Messwerte ¹⁾				
Arsen	mg/kg	88	370	61	25	85	160	240	
Blei	mg/kg	16'000	44'000	27'000	2'900	3'600	34'000	100'000	
Cadmium	mg/kg	200	190	74	44	47	81	270	
Chrom	mg/kg	200	1'200	260	510	510	130	95	
Kupfer	mg/kg	2'900	1'200	1'700	790	970	380	1'500	
Nickel	mg/kg	91	63	53	90	58	31	37	
Quecksilber	mg/kg	< 0.80	2.8	< 0.63	< 0.23	< 1.0	1.4	15	
Zink	mg/kg	24'000	94'000	33'000	13'000	18'000	57'000	216'000	

¹⁾ Königswasser-Aufschluss im Hochdruckverascher

²⁾ HCl-Mikrowellenauszug

³⁾ Verbrennen in Sauerstoffdruckbombe, Absorption in Natronlauge

⁴⁾ wasserlöslicher Anteil (n=6 (Rostasche) n=7 (Zyklonasche))

c) Altholz (in Restholzfeuerungen verbrannt) (Anlage A, G, J, L)

Gehalte im Brennstoff

Altholz mit einer geringen Belastung an Schwermetallen und Chlor, die der von Restholz-Brennstoffen des HARVE-Projekts [7] entspricht wurden in **Anlage A** (Verpackungsholz + Baurestholz) und **Anlage G** (Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse) verwendet (Tabelle 5.5 und 5.7).

Die Schadstoffgehalte des Brennstoffs der Anlage G (Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse) liegen im Messbereich der Gehalte von Einwegpaletten (Massivholz) der Holzkampagne 98 [5] (Tabelle 5.7). Der Brennstoff der Anlage A (Verpackungsholz + Baurestholz) weist Schwermetallgehalte auf, die denen der leichtbelasteten Sortimente des Verpackungsholzes und des Baurestholzes der Holzkampagne 98 entsprechen (Einwegpaletten (Massivholz, Presspanholz), Harassen,

Fruchtkisten, Schalungstafeln) jedoch deutlich unter denen der höherbelasteten Sortimente (Presspanfüsse von Einwegpaletten, Kanthölzer) liegen.

Tabelle 5.7: Schadstoffgehalte im Verpackungsholz+Bau-RH (Anlage A), in Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse (Anlage G) im Vergleich mit den Gehalten entsprechender Brennstoffe der Holzkamp. 98

		Verpackungs- holz+Bau-RH	Bau-RH ²⁾ (Holzk. 98) (n=7) Messbereich ³⁾	Verpackungs- holz ⁴⁾ (Holzk. 98) (n=36-39) Messbereich ³⁾	Einweg- paletten (sortiert) Anlage G Messwerte ¹⁾
		Anlage A Messwerte ¹⁾			
Arsen	mg/kg	< 0.5	< 1	< 1	< 0.5
Blei	mg/kg	2.9	1.4-390	< 1-880	< 8
Cadmium	mg/kg	0.18	< 1	< 1	< 2
Chrom	mg/kg	< 20	< 1-580	< 1-110	< 20
Kupfer	mg/kg	< 5	1.2-14	< 1-160	< 5
Nickel	mg/kg	< 10	< 1-150	< 1-4.2	< 10
Quecksilber	mg/kg	< 0.3	< 1	< 1	< 0.3
Zink	mg/kg	23	15-930	3.1-770	21
Chlor	mg/kg	< 400 ⁷⁾	54-570	27-3'000	< 3'000 ⁷⁾
EOX	mg/kg	< 3 ⁸⁾			< 3 ⁸⁾
		Einweg- paletten ⁵⁾ (Holzk. 98) (n=5) Messbereich ³⁾	Presspanfüsse ⁶⁾ (Holzk. 98) (n=17-18) Messbereich ³⁾		
Arsen	mg/kg	< 1	< 1		
Blei	mg/kg	< 1-8.1	< 1-880		
Cadmium	mg/kg	< 1	< 1		
Chrom	mg/kg	< 1-4	< 1-110		
Kupfer	mg/kg	< 1-1.6	< 1-160		
Nickel	mg/kg	< 1	< 1-4.2		
Quecksilber	mg/kg	< 1	< 1		
Zink	mg/kg	3.1-31	4.5-770		
Chlor	mg/kg	27-150	26-1'200		
EOX	mg/kg				

¹⁾ HNO₃ im Hochdruckverascher

²⁾ Schalungstafeln, Kanthölzer, Andere (Querschnittprobe), Restholzschnitzel

³⁾ Röntgenfluoreszenz (XRF)

⁴⁾ Einwegpaletten (Massivholz, Pressspan), Presspanfüsse, Fruchtkisten, Harassen (Querschnittprobe)

⁵⁾ Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse (Massivholz) (Querschnittprobe)

⁶⁾ Presspanfüsse von Einwegpaletten (Querschnittprobe)

⁷⁾ Verbrennen in Sauerstoffdruckbombe, Absorption in Natronlauge

⁸⁾ Extraktion mit Hexan

Im sortierten Altholz (**Anlage L**) wurden gegenüber den anderen Altholz-Brennstoffen stark erhöhte Blei- und Zink-Gehalte gefunden, die im Messbereich der Gehalte von Altholz-Brennstoffen des HARVE-Projekts liegen [7] (Tabelle 5.8 und 5.10). Bei Anlage L wurden Einwegpaletten, naturbelassenes Holz, Schreinerei- und Bau-RH, rohe Spanplatten und Fruchtkisten aus Altholz aussortierte und verbrannt. Vergleicht man die Schwermetallgehalte im Brennstoff der Anlage L mit den Gehalten vergleichbarer Sortimente der Holzkampagne 98 (Spanplatten (Tabelle 5.4), Bau-RH, Einwegpaletten (Tabelle 5.7) und Fruchtkisten (Tabelle 5.8)) so liegen die Gehalte des sortierten Altholzes (Anlage L) im Bereich der höherbelasteten Sortimente wie des Bau-Restholzes (Tabelle 5.7). Die Schwermetallgehalte des Brennstoffs der Anlage L liegen deutlich über denen von Einwegpaletten (Tabelle 5.7), von Spanplatten (Tabelle 5.4) und von Fruchtkisten (Tabelle 5.8).

Der Arsen-Gehalt des sortierten Altholzes überschreitet den Empfehlungswert des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen (LUA NRW) für Holz ohne Holzschutzmittel-Behandlung [13]; der Quecksilber-Gehalt den vorgeschlagenen Grenzwert der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) [14] für Holz mit geringer chemischer Verunreinigung. Die Chlor-Gehalte des sortierten Altholz überschreiten den vorgeschlagenen Schwellenwert des Landesumweltamtes NRW von 300 mg/kg Chlor [13] für eine halogenorganische Behandlung (Tabelle 5.5 und 5.8).

Tabelle 5.8: Schadstoffgehalte in Balken aus Abbruchholz (Anlage J), in sortierten Altholz (Anlage L) im Vergleich mit den Gehalten entsprechender Brennstoffe der Holzkamp. 98

		Balken aus Abbruchholz Anlage J Messwerte ¹⁾	Dachbalken ²⁾ (Holzk. 98) (n=3) Messbereich ³⁾	Sortiertes Altholz ⁴⁾ Anlage L Messwerte ¹⁾	Fruchtkisten, Harassen ²⁾ (Holzk. 98) (n=8) Messbereich ³⁾
Arsen	mg/kg	< 0.5	< 1	2.7	< 1
Blei	mg/kg	24	3.1-12	350	< 1-86
Cadmium	mg/kg	0.14	< 1	3.1	< 1
Chrom	mg/kg	< 20	< 1-10	< 20	< 1-19
Kupfer	mg/kg	< 5	1.4-6.5	20	1-11
Nickel	mg/kg	< 10	< 1-3.1	< 10	< 1-1.3
Quecksilber	mg/kg	< 0.3	< 1	0.34	< 1
Zink	mg/kg	85	26-42	660	< 1-77
Chlor	mg/kg	< 400 ⁵⁾	400-2'000	880 ⁵⁾	53-3'000
EOX	mg/kg	4.5 ⁶⁾		4.5 ⁶⁾	

¹⁾ HNO₃ im Hochdruckverascher

²⁾ Querschnittprobe

³⁾ Röntgenfluoreszenz (XRF)

- 4) Einwegpaletten, naturbel. Holz, Schreinerei-RH, Bau-RH, rohe Spanplatten und Fruchtkisten wurden aus Altholz aussortiert und verbrannt, eventuell wurden andere Sortimente miterfasst
- 5) Verbrennen in Sauerstoffdruckbombe, Absorption in Natronlauge
- 6) Extraktion mit Hexan

Die in **Anlage J** verwendeten, aus Abbruchholz separierten sauberen Balken, weisen eine Schwermetallbelastung auf, die zwischen der von Restholz- und der von Altholz-Brennstoffen des HARVE-Projekts liegt (Tabelle 5.5 und 5.8). Die Schadstoffbelastung des Brennstoffs der Anlage J (aus Abbruchholz separierte saubere Balken) liegt, mit Ausnahme eines höheren Blei-Gehalts, im Messbereich der Schwermetallgehalte von Dachbalken der Holzkampagne 98 [5] (Tabelle 5.8).

Gehalte in der Rost-, Zyklon- und Flugasche

Die Aschen der **Anlage A** (Verpackungsholz + Baurestholz) und der **Anlage G** (Einwegpaletten ohne graue Pressanfüsse) weisen die geringsten Belastungen an Blei und Zink auf. Diese liegen, mit Ausnahme des Zink-Gehalts der Rostasche, im Messbereich der Restholzaschen des HARVE-Projekts [7] (Tabelle 5.6).

Vor allem die Blei- und Zink-Gehalte der Zyklonasche der **Anlage L** (sortiertes Altholz) sind stark erhöht, wobei der Zink-Gehalt sogar über dem von Altholz-Zyklonaschen des HARVE-Projekts liegt (Tabelle 5.6 und 5.10). Ausserdem ist der Kupfer-Gehalt der Rostasche und der Quecksilbergehalt der Zyklon- und der Flugasche gegenüber den Gehalten der entsprechenden Altholz-Aschen deutlich erhöht.

In den Aschen der **Anlage J** (aus Abbruchholz separierte saubere Balken) sind die Blei- und Zink-Gehalte erhöht und liegen im Bereich von Altholz-Aschen des HARVE-Projekts (Tabelle 5.6 und 5.10). Der Kupfer-Gehalt der Rostasche ist ebenfalls erhöht und übersteigt bereits den Gehalt von Altholz-Aschen des HARVE-Projekts.

d) Altholz (in Altholzfeuerung verbrannt) (Anlage C)

Gehalte im Brennstoff

Die Schwermetallgehalte des Brennstoffs der **Anlage C** (Abbruchholz) liegen im Messbereich der Schadstoffgehalte von Altholzschnitzeln der Holzkampagne 98 [5] (Tabelle 5.9). Die hohen maximalen Schwermetallgehalte (Pb, Cr, Cu, Zn) der Altholzschnitzel der Holzkampagne 98 stammen von zwei der 14 Proben während die übrigen Gehalte deutlich tiefer liegen. Die Schwermetallgehalte liegen auch, mit Ausnahme eines 2–3 fach höheren Blei, Nickel und Zink-Gehalts, im Bereich der im HARVE-Projekt [7] und der im DIANE 8-Projekt [15] gefundenen Werte (Tabelle 5.9). Die Schwermetallgehalte des Brennstoffs liegen, mit Ausnahme des Chrom-Gehalts, unter den empfohlenen Grenzwerten für Holz ohne Holzschutzmittelbehandlung (HSM) des Landesumweltamtes NRW [13] und der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [14]. Der erhöhte Gehalt an Chlor und extra-

hierbarem organischem Chlor (EOX) resultiert möglicherweise aus einer halogenorganische Beschichtung.

Tabelle 5.9: Schadstoffgehalte im Altholz (Anlage C) verglichen mit den entsprechenden Brennstoffen der Holzkampagne 98, des HARVE- und des DIANE 8-Projekts und Empfehlungswerte des LUA NRW bzw. der LAGA für Holz ohne HSM bzw. halogenorg. Behandlung

		Altholz (Anlage C)	Altholz- Schnitzel ²⁾ (Holzk. 98)	Altholz (HARVE)	Altholz (DIANE 8)	Maximalwerte für beh. Holz ohne halogen- org. bzw. HSM- Behandlung ⁶⁾
		Messwerte ¹⁾	(n=18) Messbereich ³⁾	(n=6) Messbereich ⁴⁾	(n=18) Messbereich ⁵⁾	
Arsen	mg/kg	1.5	< 1	1-22	0.7-22	< 2 (\leq 4)
Blei	mg/kg	1'900	1-4'100	140-690	43-690	
Cadmium	mg/kg	2.2	< 1	0.7-24	0.4-24	
Chrom	mg/kg	64	< 1-140	17-87	14-93	(\leq 40) ⁷⁾
Kupfer	mg/kg	16	< 1-39	13-51	11-85	< 20 (\leq 30)
Nickel	mg/kg	39	< 1-3.3	4-11	2-12	
Quecksilber	mg/kg	< 0.3	< 1	< 0.5	0.005-0.7	< 0.4 (\leq 0.3)
Zink	mg/kg	1'700	4-4'000	490-860	170-960	
Chlor	mg/kg	1'400 ⁸⁾	8-6'000	200-4'400	20-4400	< 300
EOX	mg/kg	29 ⁹⁾				

¹⁾ HNO₃-Aufschluss im Hochdruckverascher

²⁾ Querschnittprobe

³⁾ Röntgenfluoreszenz (XRF)

⁴⁾ Totalaufschluss

⁵⁾ Zusammenfassung mehrerer Untersuchungen. Altholz aus Abbruch, Baustellen und Möbeln.

⁶⁾ Empfehlungswerte des LUA NRW [13] bzw. der LAGA (Werte in Klammern) [14]

⁷⁾ bei erhöhten Chrom-Werten allein kann nicht grundsätzlich auf HSM geschlossen werden

⁸⁾ Verbrennen in Sauerstoffdruckbombe, Absorption in Natronlauge

⁹⁾ Extraktion mit Hexan

Gehalte in der Rost-, Zyklon- und Flugasche

Die Schwermetallgehalte der Rostasche von **Anlage C** (Abbruchholz) liegen, mit Ausnahme des Kupfer-Gehalts, im Bereich der im HARVE-Projekt gefundenen Werte (Tabelle 5.10) [7][16]. Die Gehalte der Zyklon- und der Flugasche weisen, wie schon der Brennstoff, einen erhöhten Blei und Zink-Gehalt auf. Ausserdem ist der Quecksilbergehalt der Flugasche gegenüber dem HARVE-Projekt erhöht.

Tabelle 5.10: Gehalte in der Rost-, Zyklon- und Flugasche im Vergleich mit den Gehalten der Aschen des HARVE-Projekts

Gehalte in der Rostasche		Altholz (Anlage C) (n=1) Messwerte ¹⁾	Altholz (HARVE- Projekt) (n=8) Messbereich ²⁾
Arsen	mg/kg	25	4-40
Blei	mg/kg	3'800	200-5'300
Cadmium	mg/kg	< 5	0.8-83
Chrom	mg/kg	270	180-730
Kupfer	mg/kg	4'800	1'200-1'500
Nickel	mg/kg	140	150-240
Quecksilber	mg/kg	< 0.1	< 0.5
Zink	mg/kg	9'300	1'800-22'000
Chlor	mg/kg	< 400 ³⁾	75-19'000
Gehalte in der Zyklonasche		Messwerte ¹⁾	(n=6) Messbereich ²⁾
Arsen	mg/kg	37	13-270
Blei	mg/kg	46'000	6'500-13'000
Cadmium	mg/kg	94	49-120
Chrom	mg/kg	200	310-4'400
Kupfer	mg/kg	370	190-1'000
Nickel	mg/kg	57	130-220
Quecksilber	mg/kg	1.0	< 0.5-1.0
Zink	mg/kg	61'000	10'000-23'000
Chlor	mg/kg	21'000 ³⁾	8'900-51'000
Gehalte in der Flugasche		Messwerte ¹⁾	(n=6) Messbereich ²⁾
Arsen	mg/kg	120	0.8-280
Blei	mg/kg	119'000	44-63'000
Cadmium	mg/kg	330	330-630
Chrom	mg/kg	130	110-820
Kupfer	mg/kg	470	340-530
Nickel	mg/kg	32	43-110
Quecksilber	mg/kg	9.2	< 0.5-1.0
Zink	mg/kg	298'000	130-180'000

¹⁾ Königswasser-Aufschluss im Hochdruckverascher

²⁾ Totalaufschluss

³⁾ Verbrennen in Sauerstoffdruckbombe, Absorption in Natronlauge

5.1.2 Organische Inhaltsstoffe

a) Naturbelassenes Holz

Gehalte im Brennstoff

Die Brennstoffe der **Anlagen D** und **E** (Waldhackschnitzel) weisen, mit Ausnahme eines leicht erhöhten PCP-Gehalts im Brennstoff der Anlage E, sehr geringe Gehalte an Lindan (γ -HCH), Pentachlorphenol (PCP), DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan) und an polychlorierten Biphenylen (Σ PCB) auf (Tabelle 5.11). Im naturbelassenen Holz der Holzkampagne 98 [5] wurde, bei einer sehr hohen Nachweisgrenze, keiner der analysierten organischen Inhaltsstoffe nachgewiesen. Die Gehalte an Lindan und Pentachlorphenol liegen weit unter den empfohlenen Grenzwerten des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen für naturbelassenes Holz [13] (Tabelle 5.11). Die Gehalte an polychlorierten Biphenylen (PCB) und Hexachlorcyclohexan (HCH) liegen im Bereich der Hintergrundwerte von Böden [17][18]. Der Gehalt an Hexachlorbenzol (HCB) liegt unter dem Grenzwert für Getreide und Kartoffeln in Deutschland [18].

Tabelle 5.11: Schadstoffgehalte im naturbelassenen Holz im Vergleich mit den Gehalten des naturbelassenen Holzes der Holzkampagne 98, den Empfehlungswerten für naturbel. Holz des LUA NRW und Gehalten in Pflanzen und Böden

		Naturbel. Holz Anlage D E Messwerte		Naturbel. Holz ¹⁾ (Holzkamp. 98) (n=19) Messbereich	Grenzwerte für naturbelassenes Holz ²⁾	Gehalte in Pflanzen (Bö- den)
α -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 0.1	0.24			(0-2.4 ³⁾)
β -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 1	< 1			
γ -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.41	0.84	< 1'000	< 250	
δ -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 1	< 1			
PCP	$\mu\text{g}/\text{kg}$	1.9	12	< 5'000	< 1'000	
HCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 0.1	0.15			< 10 ⁴⁾
DDT	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 5	< 5	< 1'000		
Σ PCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	n.n. ⁵⁾	1.3	< 5'000		(0.7-16 ⁶⁾)

¹⁾ Häcksel/Sägemehl/Schnitzel (Querschnittprobe)

²⁾ Empfehlungswerte des LUA NRW [13] für naturbelassenes Holz

³⁾ Gehalt der Summe der Isomere in unbelasteten Böden [18]

⁴⁾ Grenzwert für Getreide und Kartoffeln in Deutschland [18]

⁵⁾ Komponenten nicht nachgewiesen

⁶⁾ Hintergrundwert für Böden [17]

Gehalte in der Rost- und Zyklonasche

Die Dioxin-Gehalte in Rost- und Zyklonasche der **Anlagen D** und **E** (Waldhackschnitzel) liegen im Bereich der Werte des HARVE-Projekts [7] (Tabelle 5.12). Der Dioxine-Grenzwert für eine Verwendung der Aschen als Dünger (Σ I-TEQ: < 0.020 $\mu\text{g}/\text{kg}$) [11] wird von der Rost- und der Zyklonasche eingehalten.

Der Gehalt an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in der Rostasche liegt unterhalb des von Obernberger [8] für Rostaschen von Rinden, Hackgut und Spänen gefunden Messbereichs (Tabelle 5.12). Der Gehalt an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen in der Zyklonasche liegt im Messbereich der Studie von Obernberger [8].

Die Gehalte an polychlorierten Biphenylen (PCB) liegen im Bereich der Hintergrundwerte von Böden (0.7-16 $\mu\text{g}/\text{kg}$) [17]. Bei Anlage E, bei der schon im Brennstoff polychlorierte Biphenyle (PCB) nachgewiesen werden, werden auch in der Rostasche PCBs gefunden.

Tabelle 5.12: Schadstoffgehalte in der Rost- und Zyklonasche im Vergleich mit den Aschen des HARVE-Projekts und der Untersuchungen von Obernberger

Gehalte in der Rostasche		Naturbel. Holz		Naturbelassenes Holz (Literaturwerte) Messbereich
		D	E	
		Messwerte		
Σ PAK	$\mu\text{g}/\text{kg}$	28	2.9	1'300-21'000 ¹⁾
Σ Karz. EPA	$\mu\text{g}/\text{kg}$	2.1	0.65	
Σ Karz. IARC (WHO)	$\mu\text{g}/\text{kg}$	1.3	0.38	
Σ PCDD	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.045	0.031	0.019-0.47 ²⁾
Σ PCDF	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.042	0.020	0.019-0.58 ²⁾
Σ I-TEQ	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.0017	0.00098	0.001-0.009 ²⁾
Σ PCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	n.n. ³⁾	3.1	
Gehalte in der Zyklonasche		Messwerte		Messbereich
Σ PAK	$\mu\text{g}/\text{kg}$	17'000	12'000	2'000-151'000 ¹⁾
Σ Karz. EPA	$\mu\text{g}/\text{kg}$	4'400	4'400	
Σ Karz. IARC (WHO)	$\mu\text{g}/\text{kg}$	3'500	3'800	
Σ PCDD	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.028	0.21	0.10-0.19 ⁴⁾
Σ PCDF	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.032	0.21	0.052-0.13 ⁴⁾
Σ I-TEQ	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.0011	0.0081	0.002-0.004 ⁴⁾
Σ PCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	4.0	3.7	

¹⁾ Obernberger [8], Brennstoff: Rinden, Hackgut, Späne

²⁾ HARVE-Projekt (n=7)

³⁾ Komponenten nicht nachgewiesen

⁴⁾ HARVE-Projekt (n=3)

b) "Typisches" Restholz

Gehalte im Brennstoff

Der Brennstoff der **Anlage K** (Schreinerei-Restholz mit geringem Spanplattenanteil) weist die geringsten Gehalte an organischen Inhaltsstoffen der untersuchten "typischen" Restholz-Sortimente auf (Tabelle 5.13). Der Gehalt an Pentachlorphenol (PCP) ist geringfügig, der Gehalt an polychlorierten Biphenylen (PCB) etwas stärker, gegenüber naturbelassenem Holz (Tabelle 5.11) erhöht.

Das Schreinerei-Restholz der **Anlage F** (Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil) enthält deutlich erhöhte Gehalte an Holzschutzmitteln, sie bleiben jedoch deutlich unter den Schwellenwerten des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen für holzschutzmittelbehandeltes Holz [13] (Tabelle 5.14).

Der Brennstoff der **Anlage I** (auf der Baustelle sortiertes Baurestholz) weist geringe Spuren von Holzschutzmitteln (PCP, γ -HCH) auf.

Ein Vergleich mit den Gehalten der organischen Inhaltsstoffe ähnlicher Restholz-Sortimente (Spanplatten, Baurestholz) der Holzkampagne 98 [5] ist nicht möglich, da die Nachweisgrenze sehr hoch angegeben wurde (Tabelle 5.13).

Tabelle 5.13: Schadstoffgehalte im Schreinerei-RH (Anlage F, K) und im Bau-RH (Anlage I) im Vergleich mit den Gehalten entsprechender Brennstoffe der Holzkampagne 98

		Bau-RH	Bau-RH ¹⁾	Schreinerei-RH		Spanplatten ²⁾
		Anlage I	(Holzk. 98)	Anlage		(Holzk. 98)
			(n=8)	F	K	(n=89)
		Messwerte	Messbereich	Messwerte		Messbereich
α -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.71		1.8	0.15	
β -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 1		< 1	< 1	
γ -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	3.6	< 1'000	16	1.3	< 1'000
δ -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 1		< 1	< 1	
PCP	$\mu\text{g}/\text{kg}$	260	< 5'000	1'000	38	< 5'000
HCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.10		0.18	< 0.1	
DDT	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 5	< 1'000	< 5	< 5	< 1'000
Σ PCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	57	< 5'000	20	36	< 5'000

¹⁾ Schalungstafeln, Kanthölzer, Andere (Querschnittprobe)

²⁾ rohe und beschichtete Span-, MDF-, Multiplex-, Faserplatten, Sperrholz (Querschnittprobe)

³⁾ Querschnittprobe

Tabelle 5.14: Empfehlungswerte des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen bzw. der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (Werte in Klammern)

		Maximalwerte für behandeltes Holz ohne HSM- Behandlung
α -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	
β -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	
γ -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 500 (\leq 3'000)
δ -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	
PCP	$\mu\text{g}/\text{kg}$	< 2'000 (\leq 5'000)
HCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	
DDT	$\mu\text{g}/\text{kg}$	
Σ PCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	

Gehalte in der Rost- und Zyklonasche

Die Gehalte an Dioxinen und polyaromatischen Kohlenwasserstoffen der Rost- und der Zyklonaschen der verschiedenen Anlagen weisen grosse Unterschiede auf (Tabelle 5.15). Die Dioxingehalte der Aschen der "typischen" Restholz-Sortimente liegen über denen der Aschen des Altholzes. Die höchsten Dioxingehalte treten bei **Anlage F** (Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil) auf und liegen über denen des HARVE-Projekts [7]. Die Dioxingehalte der Aschen der **Anlagen I** (auf der Baustelle sortiertes Baurestholz) und **K** (Schreinerei-Restholz mit geringem Spanplattenanteil) sind ebenfalls erhöht, sie liegen jedoch im Messbereich des HARVE-Projekts [7]. Die Anwesenheit erhöhter Mengen Chlor und organischer Holzschutzmittel im Brennstoff sowie den Aschefraktionen der Anlagen F, I und K begünstigen möglicherweise die Dioxin-Bildung. Versuche mit Altholzbrennstoffen legen jedoch eine grössere Bedeutung der Verbrennungs- und Filterbedingungen gegenüber der Brennstoffzusammensetzung nahe [19]. Bei allen drei Anlagen sind auch die Gehalte der polyaromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) der Aschen gegenüber denen des Altholzes erhöht. Die Gehalte an polychlorierten Biphenylen (PCB) in der Rost- und Zyklonasche liegen unterhalb bzw. im unteren Bereich des PCB-Gehalts der Flugasche von Kehrichtverbrennungsanlagen (11-322 $\mu\text{g}/\text{kg}$) [17].

Gehalte 5.15: Schadstoffgehalte in der Rost- und Zyklonasche im Vergleich mit den Aschen des HARVE-Projekts

Gehalte in der Rostasche	"typisches" Restholz Anlage			Altholz Anlage				Restholz (HARVE-Projekt) (n=3) Messbereich
	F	I	K	A	G	J	L	
	Messwerte			Messwerte				
Σ PAK μg/kg	180	430	3'500	7.9	37	46	13	
Σ Karz. EPA μg/kg	53	75	930	1.9	13	8.9	2.5	
Σ Karz. IARC μg/kg	34	41	680	0.71	10	6.0	1.9	
Σ PCDD μg/kg	120	0.91	2.3	n.n. ¹⁾	0.13	0.043	0.020	
Σ PCDF μg/kg	130	2.1	3.0	n.n. ¹⁾	0.084	0.081	0.010	
Σ I-TEQ μg/kg	4.7	0.063	0.092	n.n. ¹⁾	0.0040	0.0015	0.0017	
Σ PCB μg/kg	6.5	8.0	1.7	7.2	20	4.9	n.n. ¹⁾	
Gehalte in der Zyklonasche	Messwerte			Messwerte				Messbereich
Σ PAK μg/kg	660	13'000	14'000	370	57	260	16	
Σ Karz. EPA μg/kg	320	2'700	2'400	9.1	16	83	1.3	
Σ Karz. IARC μg/kg	180	2'000	1'600	4.9	11	49	0.61	
Σ PCDD μg/kg	1'200	24	41	3.0	3.3	16	8.4	0.23-180
Σ PCDF μg/kg	1'200	53	67	4.2	13	21	22	0.67-140
Σ I-TEQ μg/kg	34	0.86	1.5	0.12	0.43	0.46	0.72	0.018-6.3
Σ PCB μg/kg	31	15	13	2.9	k.M. ²⁾	11	6.8	

¹⁾ Isomere nicht nachgewiesen

²⁾ keine Messung durchgeführt

c) Altholz (in Restholzfeuerungen verbrannt)

Gehalte im Brennstoff

Die Brennstoffe einzelner Anlagen weisen deutlich erhöhte Gehalte an organischen Inhaltsstoffen auf (Tabelle 5.16 und 5.17). So liegt der Gehalt an Pentachlorphenol (PCP) des Brennstoffs der **Anlagen A** (Verpackungsholz und Baurestholz) und **L** (sortiertes Altholz) über den vorgeschlagenen Schwellenwerten für holzschutzmittelbehandeltes Holz des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen [13], während der empfohlene Grenzwert der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [14] nicht erreicht wird (Tabelle 5.14). Der Brennstoff der Anlage L weist ausserdem einen erhöhten Lindan-Gehalt (γ -HCH) auf.

Im sortierten Altholz (Anlage L) und in den aus Abbruchholz separierten sauberen Balken (**Anlage J**) wurde DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan) nachgewiesen.

Die Belastung an organischen Holzschutzmitteln im Brennstoff der **Anlage G** (Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse) ist, mit Ausnahme des PCB-Gehalts, vergleichsweise gering.

Die Gehalte an polychlorierten Biphenylen (PCB) der Brennstoffe der untersuchten Anlagen sind gegenüber denen von naturbelassenem Holz erhöht (n.n.-1.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$) (Tabelle 5.11), liegen jedoch

mit Ausnahme der **Anlage L** (sortiertes Altholz) unterhalb des PCB-Gehalts von Müll (100-10'000 µg/kg) [17].

Ein Vergleich mit den Gehalten der organischen Inhaltsstoffe ähnlicher Restholz-Sortimente (Spanplatten, Baurestholz) der Holzkampagne 98 [5] ist nicht möglich, da die Nachweisgrenze sehr hoch angegeben wurde (Tabelle 5.16 und 5.17).

Tabelle 5.16: Schadstoffgehalte im Verpackungsholz+Bau-RH (Anlage A), in Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse (Anlage G) im Vergleich mit den Gehalten entsprechender Brennstoffe der Holzkamp. 98

		Verpackungs- holz+Bau-RH Anlage A Messwerte	Bau-RH ¹⁾ (Holzk. 98) (n=8) Messbereich	Verpak- kungsholz ²⁾ (Holzk. 98) (n=32) Messbereich	Einweg- paletten (sortiert) Anlage G Messwerte	Einweg- paletten ³⁾ (Holzk. 98) (n=6) Messbereich
α-HCH	µg/kg	0.96			3.0 ⁴⁾	
β-HCH	µg/kg	< 1				
γ-HCH	µg/kg	5.0	< 1'000	< 1'000		< 1'000
δ-HCH	µg/kg	< 1				
PCP	µg/kg	2'800	< 5'000	< 5'000	370	< 5'000
HCB	µg/kg	0.52			0.33	
DDT	µg/kg	< 5	< 1'000	< 1'000	< 5	< 1'000
Σ PCB	µg/kg	12	< 5'000	< 5'000	55	< 5'000

¹⁾ Schalungstafeln, Kanthölzer, Andere (Querschnittprobe)

²⁾ Einwegpaletten (Massivholz, Presspan), Presspanfüsse, Fruchtkisten, Harassen (Querschnittprobe)

³⁾ Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse (Massivholz) (Querschnittprobe)

⁴⁾ bei Anlage G wurde nur die Summe der HCHs bestimmt

Tabelle 5.17: Schadstoffgehalte in Balken aus Abbruchholz (Anlage J), in sortierten Altholz (Anlage L) im Vergleich mit den Gehalten entsprechender Brennstoffe der Holzkamp. 98

		Balken aus Ab- bruchholz Anlage J Messwerte	Dachbalken ¹⁾ (Holzk. 98) (n=6) Messbereich	Sortiertes Altholz Anlage L Messwerte	Fruchtkisten ¹⁾ (Holzk. 98) (n=2) Messbereich
α-HCH	µg/kg	0.15		1.3	
β-HCH	µg/kg	< 1		1.2	
γ-HCH	µg/kg	3.0	< 1'000	62	< 1'000
δ-HCH	µg/kg	< 1		3.0	
PCP	µg/kg	47	< 5'000	2'900	< 5'000
HCB	µg/kg	< 0.1		0.46	
DDT	µg/kg	490	< 1'000	200	< 1'000
Σ PCB	µg/kg	3.1	< 5'000	190	< 5'000

¹⁾ Querschnittprobe

Gehalte in der Rost- und Zyklonasche

Trotz der erhöhten Gehalte an Pentachlorphenol (PCP) im Brennstoff der **Anlagen A** (Verpackungsholz und Baurestholz) und **L** (sortiertes Altholz), als potentiell Dioxinvorläufer, treten bei diesen Anlagen keine erhöhten Dioxingehalte in den Aschen auf (Tabelle 5.15). Auch die Belastung der Aschen der **Anlagen J** (aus Abbruchholz separierte saubere Balken) und **G** (Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse) an Dioxinen und polyaromatischen Kohlenwasserstoffen sind gering.

d) Altholz (in Altholzfeuerung verbrannt)

Gehalte im Brennstoff

Der Brennstoff von **Anlage C** (Abbruchholz) weist einen hohen Gehalt an Pentachlorphenol (PCP) auf, der sowohl oberhalb des vorgeschlagenen Grenzwerts für holzschutzmittelbehandeltes Holz des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen [13] als auch der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall für Holzabfälle mit schädlicher Verunreinigung liegt [14] (Tabelle 5.18). Eine Brennstoff-Probe der Altholz-Schnitzel der Holzkampagne 98 weist einen ähnlich hohen Gehalt an PCP auf, die übrigen Gehalte bleiben unter der sehr hohen Nachweisgrenze.

Der Brennstoff der Anlage C (Abbruchholz) weist erhöhte Lindan-Gehalte (γ -HCH) auf, diese liegen jedoch unter dem vorgeschlagenen Grenzwert für holzschutzmittelbehandeltes Holz des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen [13]. Auch die erhöhten Gehalte an DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan) weisen auf eine Holzschutzmittelbehandlung hin. Der Gehalt an polychlorierten Biphenylen (PCB) entspricht dem von gering belastetem Müll (100-10'000 $\mu\text{g}/\text{kg}$) [17]. Ein Vergleich dieser organischen Inhaltsstoffe mit denen von Altholz-Schnitzeln der Holzkampagne 98 ist nicht möglich, da diese eine sehr hohe Nachweisgrenze aufweisen (Tabelle 5.18).

Tabelle 5.18: Schadstoffgehalte im Altholz (Anlage C) im Vergleich mit den Gehalten des entsprechenden Brennstoffes der Holzkamp. 98 und des DIANE 8-Projekts und den Schwellenwerten des LUA NRW und der LAGA für holzschutzmittelbehandeltes Holz (Werte in Klammern)

		Altholz (Anlage C)	Altholz- Schnitzel ¹⁾ (Holzk. 98) (n=12)	Altholz (DIANE 9) (n=3)	Schwellenwert für holzschutzmittel- behandeltes Holz
		Messwerte	Messbereich	Messbereich	
α -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	3.1			
β -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	1.3			
γ -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	240	< 1'000		> 500
δ -HCH	$\mu\text{g}/\text{kg}$	3.3			
PCP	$\mu\text{g}/\text{kg}$	6'500	< 5'000-9800	175-275	> 2'000 (\geq 5'000)
HCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	0.39			
DDT	$\mu\text{g}/\text{kg}$	246	< 1'000		
Σ PCB	$\mu\text{g}/\text{kg}$	380	< 5'000		

Gehalte in der Rost- und Zyklonasche

Die Dioxingehalte der Rost- und der Zyklonaschen der **Anlage C** (Abbruchholz) liegen im Bereich der Ergebnisse des HARVE- [7] und des DIANE 8-Projekts [19] (Tabelle 5.19). Die Dioxin-Bildung ist sowohl aus Pentachlorphenol (PCP) als auch über eine de novo-Synthese möglich [20]. Wie bei den Anlagen F, I und K (Tabelle 5.15) treten parallel zur Dioxin-Bildung auch erhöhten Gehalte an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) auf. Die Gehalte an polychlorierten Biphenylen (PCB) in der Rost- bzw. Zyklonasche liegen unterhalb bzw. im unteren Bereich des PCB-Gehalts der Flugasche von Kehrrichtverbrennungsanlagen (11-322 $\mu\text{g}/\text{kg}$) [17].

Tabelle 5.19: Schadstoffgehalte in der Rost- und Zyklonasche im Vergleich mit den Aschen des HARVE- und des DIANE 8-Projekts

Gehalte in der Rostasche		Altholz (Anlage C)	Altholz (HARVE- Projekt) (n=2)	Altholz DIANE 8 (n=2)
		Messwerte	Messbereich	Messbereich
Σ PAK	μg/kg	170		
Σ Karz. EPA	μg/kg	51		
Σ Karz. IARC (WHO)	μg/kg	32		
Σ PCDD	μg/kg	3.3	0.24-0.48	
Σ PCDF	μg/kg	0.17	0.14-0.29	
Σ I-TEQ	μg/kg	0.070	0.004-0.011	0.006-0.022
Σ PCB	μg/kg	n.n. ¹⁾		
Gehalte in der Zyklonasche		Messwerte	Messbereich	Messbereich
Σ PAK	μg/kg	14'000		
Σ Karz. EPA	μg/kg	380		
Σ Karz. IARC (WHO)	μg/kg	200		
Σ PCDD	μg/kg	30	14-23	
Σ PCDF	μg/kg	80	18-22	
Σ I-TEQ	μg/kg	1.8	0.73-0.92	3.1-7.6
Σ PCB	μg/kg	18		

¹⁾ die Einzel-Isomere wurden nicht nachgewiesen

5.2 ABGAS

5.2.1 Einhaltung der Luftreinhalte-Verordnung

Im folgenden Abschnitt soll durch einen Vergleich der Abgasmesswerte mit den Grenzwerten der Luftreinhalte-Verordnung [1] abgeschätzt werden ob bei Verwendung der beschriebenen Brennstoffe die LRV eingehalten wird. Es kommen dabei folgende Emissionsbegrenzungen zur Anwendung:

Allgemeine vorsorgliche Emissionsbegrenzungen:

Die Luftreinhalte-Verordnung verlangt von Holzfeuerungen und Anlagen zum Verbrennen von Altholz, wie von anderen stationären Anlagen, die Einhaltung vorsorglicher Emissionsgrenzwerte (LRV Stand 3. Februar 1998: Anhang 1) [1]. Diese Grenzwerte müssen bei Überschreitung eines bestimmten Massenstroms beachtet werden.

Ergänzende und abweichende Emissionsbegrenzungen:

Ausserdem gelten für Holzfeuerungen (LRV Stand 3. Februar 1998: Anhang 3, Ziffer 52) [1] bzw. Anlagen zum Verbrennen von Altholz, Papier- und ähnlichen Abfällen (LRV Stand 3. Februar 1998: Anhang 2, Ziffer 72) ergänzende und abweichende Emissionsbegrenzungen.

Die Emissionsgrenzwerte gelten als eingehalten wenn keiner der über eine halbe (Restholzfeuerung, Anlagen zum Verbrennen von naturbelassenem Holz) bzw. eine Stunde (Altholzfeuerung) gemittelten Werte den Grenzwert überschreitet. Die Einhaltung der Luftreinhalte-Verordnung [1] wird durch einen Vergleich der Grenzwerte der LRV mit Mittelwerten aus drei Stundenwerten bzw. im Falle der polyaromatischen Kohlenwasserstoffe (Benzo[a]pyren, Dibenzo[a,h]anthracen) mit einem 3-Stunden-Mittelwert abgeschätzt.

a) Naturbelassenes Holz

Die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (Anhang 1 und Anhang 3, Ziffer 52 LRV) [1] werden bei Verbrennung von naturbelassenem Holz in **Anlage D** und **E** (Waldhackschnitzel) eingehalten. Für keinen der gemessenen Schadstoffe wird der Bagatellmassenstrom überschritten (Tabelle 5.20).

Tabelle 5.20: Vergleich der Abgasmesswerte mit den Grenzwerten der LRV für Holzfeuerungen (naturbelassenes Holz)

	Naturbelassenes Holz (Anlage D, E)				Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung	
	Konzentration		Massenstrom		Konzentra- tion	Massen- strom
	D	E	D	E		
	[mg/m ³] ¹⁾		[g/h]		[mg/m ³] ¹⁾	[g/h]
Allgemeine vorsorgliche Emissionsbegrenzungen						
Anorganische, vorwiegend staubförmige Stoffe:						
Hg ²⁾	< 0.0005	< 0.0006	< 0.0008	< 0.0003	0.2	> 1
Summe As, Ni ²⁾	0.010	0.0096	0.015	0.0044	1	> 5
Summe Pb, Cr, Cu ²⁾	0.057	0.093	0.085	0.042	5	> 25
Anorganische gas- oder dampfförmige Stoffe:						
Bromverbindungen (als HBr)	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.07	5	> 50
Chlorverbindungen (als HCl)	0.25	0.35	0.37	0.16	5	> 50
Fluorverbindungen (als HF)	< 0.08	< 0.08	< 0.1	< 0.04	30	> 300
Stickoxide (als NO ₂)	189	238	280	108	250	> 2'500
Krebserzeugende Stoffe:						
	[µg/m ³] ¹⁾		[mg/h]		[µg/m ³] ¹⁾	[mg/h]
Benzo[a]pyren	k.M. ³⁾	0.21	k.M. ³⁾	0.095	100	> 500
Dibenz[a,h]anthracen	k.M. ³⁾	< 0.0002	k.M. ³⁾	< 0.0001	100	> 500
	[mg/m ³] ¹⁾				[mg/m ³] ¹⁾	
Ergänzende und abweichende Emissionsbegrenzungen						
Feststoffe insgesamt	114	97			150	
Kohlenmonoxid (CO):						
Anlage E (70-200 kW)		820			2'000	
Anlage D (500 kW-1 MW)	73				500	

¹⁾ Normzustand (0°C, 1013 mbar); trocken; Bezugssauerstoff 13 Vol-%

²⁾ Diese Grenzwerte gelten für die gesamte Masse eines emittierten Stoffes, einschliesslich der gas- und dampfförmigen Anteile im Abgas.

³⁾ keine Messung durchgeführt

b) "Typisches" Restholz

Die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung für Holzfeuerungen (Restholz) (Anhang 1 und Anhang 3, Ziffer 52 LRV) [1] werden bei Verbrennung von "typischem" Restholz in **Anlage F** (Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil), **I** (auf der Baustelle sortiertes Baurestholz) und **K** (Schreinerei-Restholz mit geringem Spanplattenanteil) eingehalten. Für keinen der gemessenen Schadstoffe wird der Bagatellmassenstrom überschritten (Tabelle 5.21). Allerdings liegt die Summenkonzentration der Schwermetalle Blei, Chrom und Kupfer im Abgas der Anlage I im Bereich des Konzentrationsgrenzwertes.

Tabelle 5.21: Vergleich der Abgasmesswerte des "typischen" Restholzes mit den Grenzwerten der LRV für Holzfeuerungen (Restholz)

	"typisches" Restholz (Anlage F, I, K)						Grenzwerte der LRV	
	Konzentration			Massenstrom			Konz. ¹⁾ [mg/m ³]	Mas- senstr om [g/h]
	F	I	K	F	I	K		
	[mg/m ³] ¹⁾			[g/h]			[mg/m ³]	[g/h]
Allgemeine vorsorgliche Emissionsbegrenzungen								
Anorganische, vorwiegend staubförmige Stoffe								
Hg ²⁾	< 0.001	0.0044	0.0026	< 0.001	0.00058	0.0019	0.2	> 1
Summe As, Ni ²⁾	0.064	0.061	0.014	0.068	0.0080	0.010	1	> 5
Summe Pb, Cr, Cu ²⁾	1.8	5.6	1.6	2.0	0.74	1.2	5	> 25
Anorganische gas- oder dampfförmige Stoffe:								
Bromverb. (als HBr)	< 0.3	< 0.2	< 0.2	< 0.4	< 0.03	< 0.1	5	> 50
Chlorverb. (als HCl)	19	1.9	1.5	20	0.25	1.1	30	> 300
Fluorverb. (als HF)	< 0.2	0.22	< 0.09	< 0.2	0.028	0.064	5	> 50
Stickoxide (als NO ₂)	64	260	420	62	35	310	250	> 2'500
Krebserzeugende Stoffe:								
	[μg/m ³] ¹⁾			[mg/h]			[μg/m ³] ¹⁾	[mg/h]
Benzo[a]pyren	< 0.0005	0.012	0.080	< 0.0006	0.0016	0.059	100	> 500
Dibenz[a,h]anthracen	< 0.0005	0.0096	< 0.0002	< 0.0006	0.0013	< 0.0002	100	> 500
Ergänzende und abweichende Emissionsbegrenzungen								
	[mg/m ³] ¹⁾						[mg/m ³] ¹⁾	
Feststoffe insgesamt	95	120	53				150	
Kohlenmonoxid (CO):								
Anlage I (70-200 kW)	145						1'000	
Anlage F, K (200-500 kW)	35	165					800	

¹⁾ Normzustand (0°C, 1013 mbar); trocken; Bezugssauerstoff: Anlage F, I, K: 13 Vol-%

²⁾ Diese Grenzwerte gelten für die gesamte Masse eines emittierten Stoffes, einschliesslich der gas- und dampfförmigen Anteile im Abgas.

Da dem verwendeten Restholz Altholz beigemischt wurde sind die Brennstoffe, mit Ausnahme der Anlage I, entsprechend der LRV als Altholz zu klassieren. Deshalb könnten zur Beurteilung der Anlagen auch die ergänzenden Emissionsbegrenzungen für Anlagen zum Verbrennen von Altholz herangezogen werden (Anhang 2, Ziffer 72 LRV) [1] (Tabelle 5.22). Bei allen drei Anlagen wird der Grenzwert für staubförmige Emissionen überschritten, bei Anlage I (auf der Baustelle sortiertes Baurestholz) ausserdem der Grenzwert für die Emissionen an Blei und Zink ($21 \pm 4 \text{ mg/m}^3$). Der Grenzwert für die Summe der Blei- und Zink-emissionen wird von Anlage K (Schreinerei-Restholz mit geringem Spanplattenanteil) ($4.2 \pm 0.7 \text{ mg/m}^3$) knapp eingehalten, die Blei- und Zinkemission von Anlage F (Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil) ($4.9 \pm 0.9 \text{ mg/m}^3$) liegt im Bereich des Grenzwertes (5 mg/m^3).

Tabelle 5.22: Vergleich der Abgasmesswerte des "typischen" Restholzes und des Altholzes mit den ergänzende und abweichende Emissionsbegrenzungen der LRV für Anlagen zum Verbrennen von Altholz

	"typisches" Restholz (Anlage F, I, K)			Altholz (Anlage A, G, J, L)				Grenzwerte der Luft- reinhalte-Verordnung	
	F	I	K	A	G	J	L	Konz. [mg/m^3] ¹⁾	Massen- strom [g/h]
staubförmig Emis- sionen	120	150	69	208	133	118	256	50	
Summe Pb, Zn	4.9	21	4.2	3.4	2.9	11	81	5	
Kohlenmonoxid (CO)	44	181	205	386	104	159	50	250	
gasförmige orga- nische Stoffe	5.0	3.5	4.2	< 2	3.5	5.7	4.3	50	

¹⁾ Normzustand (0°C, 1013 mbar); trocken; Bezugssauerstoff: 11 Vol-%

c) Altholz (in Restholzfeuerungen verbrannt)

Durch einen Vergleich der Abgasmesswerte mit den allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen der Luftreinhalte-Verordnung für stationäre Anlagen, den ergänzenden und abweichenden Emissionsbegrenzungen für Holzfeuerungen (Anhang 1 und Anhang 3, Ziffer 52 LRV) und den ergänzenden und abweichenden Emissionsbegrenzungen für Altholzfeuerungen (Anhang 2, Ziffer 72 LRV) [1] soll abgeschätzt werden ob eine LRV-konforme Verbrennung ohne eine weitgehende Abgasreinigung möglich ist (Tabelle 5.22 und 5.23).

Von den **Anlagen G** (Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse) und **J** (aus Abbruchholz separierte saubere Balken) werden alle Emissionsbegrenzungen für Restholzfeuerungen eingehalten. Der Massenstrom von Blei, Chrom und Kupfer der **Anlage L** (sortiertes Altholz) ($155 \pm 40 \text{ g/h}$) überschreitet den Bagatellmassenstrom (25 g/h) der Luftreinhalte-Verordnung. Damit kommt der

entsprechende Konzentrationsgrenzwert zur Anwendung (5 mg/m^3), welcher ebenfalls überschritten wird ($26 \pm 6 \text{ mg/m}^3$) (Tabelle 5.23).

Der Massenstrom für Stickoxide von **Anlage L** ($2'600 \pm 300 \text{ g/h}$) liegt im Bereich des Bagatellmassenstroms ($2'500 \text{ g/h}$). Der entsprechende Konzentrationsgrenzwert (250 mg/m^3) wird von Anlage L überschritten ($440 \pm 40 \text{ mg/m}^3$) (Tabelle 5.23).

Bei den **Anlagen A** (Verpackungsholz und Baurestholz) ($208 \pm 21 \text{ mg/m}^3$) und L (sortiertes Altholz) ($256 \pm 26 \text{ mg/m}^3$) wird der Grenzwert für die Feststoffemissionen (150 mg/m^3), bei Anlage A ($389 \pm 39 \text{ mg/m}^3$) ausserdem der Grenzwert für Kohlenmonoxid (250 mg/m^3) überschritten.

Tabelle 5.23: Vergleich der Abgasmesswerte des Altholzes mit den Grenzwerten der LRV für Holzfeuerungen (Restholz)

	Altholz (Anlage A, G, J, L)								Grenzwerte der Luftreinhalte- Verordnung	
	Konzentration				Massenstrom				Konz. ¹⁾ [mg/m^3]	Mas- senstro m [g/h]
	A	G	J	L	A	G	J	L		
	[mg/m^3] ¹⁾				[g/h]					
Allgemeine vorsorgliche Emissionsbegrenzungen										
Anorganische, vorwiegend staubförmige Stoffe										
Hg ²⁾	<0.0008	<0.0008	0.016	< 0.013	< 0.002	< 0.005	0.010	0.075	0.2	> 1
$\Sigma \text{ As, Ni}$ ²⁾	0.036	0.026	0.016	0.064	0.11	0.16	0.010	0.38	1	> 5
$\Sigma \text{ Pb, Cr, Cu}$ ²⁾	0.92	0.73	3.3	26	2.8	4.4	2.0	155	5	> 25
Anorganische gas- oder dampfförmige Stoffe:										
Bromverb. (als HBr)	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.7	< 1	< 0.2	< 1	5	> 50
Chlorverb. (als HCl)	0.68	< 0.2	1.7	17	2.1	< 1	1.0	103	30	> 300
Fluorverb.(als HF)	< 0.1	0.26	0.39	4.4	< 0.4	1.6	0.24	26	5	> 50
Stickoxide (als NO ₂)	130	210	170	440	400	1'300	106	2'600	250	> 2'500
Krebserzeugende Stoffe:										
	[$\mu\text{g/m}^3$] ¹⁾				[mg/h]				[$\mu\text{g/m}^3$]	[mg/h]
Benzo[a]pyren	0.0030	<0.0003	k.M. ³⁾	0.00026	0.011	< 0.002	k.M. ³⁾	0.0019	100	> 500
Dbenz[a,h]anthracen	<0.0003	<0.0003	k.M. ³⁾	<0.0002	< 0.001	< 0.002	k.M. ³⁾	< 0.002	100	> 500
Ergänzende und abweichende Emissionsbegrenzungen										
	[mg/m^3] ¹⁾								[mg/m^3]	
Feststoffe insg.	208	133	94	256					150	
Kohlenmonoxid (CO)										
Anlage J (70-200 kW)				129					1'000	
Anlage A, G, L (1-5 MW)	386	104		50					250	
gasf. organ. Stoffe	< 2	3.5		4.3					50	
Anlage A, G, L										

¹⁾ Normzustand (0°C, 1013 mbar); trocken; Bezugssauerstoff: Anlage J: 13 Vol-%; Anlage A, G, L: 11 Vol-%

- ²⁾ Diese Grenzwerte gelten für die gesamte Masse eines emittierten Stoffes, einschliesslich der gas- und dampfförmigen Anteile im Abgas.
- ³⁾ keine Messung durchgeführt

Da die verwendeten Brennstoffe entsprechend der Luftreinhalte-Verordnung als Altholz klassiert sind, könnten zur Beurteilung auch die ergänzenden Grenzwerte für Anlagen zum Verbrennen von Altholz herangezogen werden (Anhang 2, Ziffer 72 LRV) [1] (Tabelle 5.22).

Der Grenzwert für staubförmige Emissionen (50 mg/m^3) wird von allen vier Anlagen überschritten. Der Grenzwert für die Summenkonzentration Blei und Zink (5 mg/m^3) wird von **Anlage J** (aus Abbruchholz separierte saubere Balken) ($11 \pm 2 \text{ mg/m}^3$) und **L** (sortiertes Altholz) ($81 \pm 15 \text{ mg/m}^3$) überschritten. Bei **Anlage A** überschreitet der Mittelwert der Kohlenmonoxidmesswerte ($386 \pm 39 \text{ mg/m}^3$) den Grenzwert der Luftreinhalte-Verordnung (250 mg/m^3).

d) Altholz (in Altholzfeuerung verbrannt)

Die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung für Altholzfeuerungen (Anhang 1 und Anhang 2, Ziffer 72 LRV) [1] werden bei Verbrennung von Altholz in **Anlage C** (Abbruchholz) eingehalten. Für keinen der gemessenen Schadstoffe wird der Bagatellmassenstrom überschritten (Tabelle 5.24).

Tabelle 5.24: Vergleich der Abgasmesswerte des Altholzes mit den Grenzwerten der LRV für Anlagen zum Verbrennen von Altholz

	Altholz (Anlage C)		Grenzwerte der Luftreinhalte- Verordnung	
	Konzentration [mg/m ³] ¹⁾	Massenstrom [g/h]	Konzentration [mg/m ³] ¹⁾	Massenstrom [g/h]
Allgemeine vorsorgliche Emissionsbegrenzungen				
Anorganische, vorwiegend staubförmige Stoffe				
Hg ²⁾	< 0.0009	< 0.003	0.2	> 1
Summe As, Ni ²⁾	< 0.003	< 0.01	1	> 5
Summe Pb, Cr, Cu ²⁾	0.45	1.7	5	> 25
Anorganische gas- oder dampfförmige Stoffe:				
Bromverbindungen (als HBr)	< 0.2	< 0.92	5	> 50
Chlorverbindungen (als HCl)	7.2	27	30	> 300
Fluorverbindungen (als HF)	0.54	2.0	5	> 50
Stickoxide (als NO ₂)	382	1'411	250	> 2'500
Krebserzeugende Stoffe:				
	[µg/m ³] ¹⁾	[mg/h]	[µg/m ³]	[mg/h]
Benzo[a]pyren	0.88	4.1	100	> 500
Dibenz[a,h]anthracen	< 0.0003	< 1	100	> 500
Ergänzende und abweichende Emissionsbegrenzungen				
	[mg/m ³] ¹⁾		[mg/m ³]	
staubförmig Emissionen	3.4		50	
Summe Pb, Zn	1.1		5	
Kohlenmonoxid (CO):	96		250	
gasförmige organische Stoffe	6.0		50	

¹⁾ Normzustand (0°C, 1013 mbar); trocken; Bezugssauerstoff: 11 Vol-%

²⁾ Diese Grenzwerte gelten für die gesamte Masse eines emittierten Stoffes, einschliesslich der gas- und dampfförmigen Anteile im Abgas.

5.2.2 Organische Bestandteile im Abgas

a) Naturbelassenes Holz

Der Gehalt an Dioxinen und polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) im Abgas der **Anlagen D** und **E** (Waldhackschnitzel) liegt im Bereich der in verschiedenen Studien bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz gefundenen Werte (0.0005-0.992 ng/m³) [21] (Tabelle 5.25).

Der Gehalt an polychlorierten Biphenylen (PCB) im Abgas liegt über dem PCB-Gehalt in der Verbrennungsluft (0.1-1 ng/m³) und unterhalb des PCB-Gehalts der in Abgasen von Kehrlichtverbrennungsanlagen gemessen wird (122-3000 ng/m³) [17].

Tabelle 5.25: Schadstoffgehalte im Abgas beim Verbrennen von naturbelassenem Holz im Vergleich mit Literaturdaten

		Naturbel. Holz Anlage		Naturbelassenes Holz
		D	E	Messbereich
		Messwert ¹⁾		
Σ PAK	μg/m ³	k.M. ²⁾	21	0.5-50 ³⁾
Σ Karz. EPA	μg/m ³	k.M. ²⁾	5.3	
Σ Karz. IARC (WHO)	μg/m ³	k.M. ²⁾	3.6	
Σ PCDD	ng/m ³	1.8	0.093	
Σ PCDF	ng/m ³	2.4	0.15	
Σ I-TEQ	ng/m ³	0.047	0.0042	0.0005-0.992 ⁴⁾
Σ PCB	ng/m ³	48	18	

¹⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

²⁾ keine Messung

³⁾ Obernberger [8]

⁴⁾ VDI 3462 [21]

b) "Typisches" Restholz

Die Dioxin-Gehalte im Abgas aller drei Anlagen liegen erheblich über dem Grenzwert für Kehrlichtverbrennungsanlagen verschiedener europäischer Länder (Deutschland, Österreich, Niederlande) (0.1 ng I-TEQ/m³) [22] (Tabelle 5.26). Der höchste Werte wurden im Abgas der **Anlage F** (Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil) gemessen, erhöhte Werte im Abgas der **Anlagen I** (auf der Baustelle sortiertes Baurestholz) und **K** (Schreinerei-Restholz mit geringem Spanplattenanteil). Die sehr hohen Dioxin-Emissionen der Anlage F sind möglicherweise auf den erhöhten Gehalt von Chlor und der organischen Holzschutzmittel im Brennstoff zurückzuführen. Die Entstehung von Dioxinen hängt jedoch auch wesentlich von den Verbrennungsbedingungen ab [19]. Durch verbesserte Ausbrandbedingungen wäre auch eine Senkung der Emissionen an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen möglich [23]. In vergleichbaren Anlagen (Unterschubfeuerung, Hack-

schnitzelfeuerung) wurden bei der Verbrennung von PVC-beschichteten bzw. von mit NH_4Cl gehärteten Spanplatten oder von Holzhackgut mit PVC-Granulat Dioxin-Gehalte zwischen 2.26-9.8 ng I-TEQ/m³ im Abgas gemessen [21].

Der Gehalt an polychlorierten Biphenylen (PCB) im Abgas aller drei Anlagen liegt unterhalb des Gehalts der in Abgasen von Kehrichtverbrennungsanlagen gemessen wird (122-3000 ng/m³) [17].

c) Altholz (in Restholzfeuerungen verbrannt)

Die bei der Verbrennung von Altholz in den **Anlagen J** (aus Abbruchholz separierte saubere Balken) und **L** (sortiertes Altholz) aufgetretenen Dioxin-Emissionen liegen über dem Grenzwert für Kehrichtverbrennungsanlagen verschiedener europäischer Länder (Deutschland, Österreich, Niederlande) (0.1 ng I-TEQ/m³) (Tabelle 5.26). Die Dioxin-Emissionen sind jedoch geringer als die im DIANE 8-Projekt bei der Verbrennung von Altholz in Rostfeuerungen gefundenen Emissionswerte (2.7-9.6 ng I-TEQ/m³) [19].

Die Dioxin-Emissionen der **Anlagen A** (Verpackungsholz und Baurestholz) und **G** (Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse) liegen im Bereich bzw. unter dem Grenzwert von 0.1 ng I-TEQ/m³ für KVAs in Deutschland, Österreich und den Niederlanden.

Die Emissionen an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bei Verbrennung des Altholzes sind verglichen mit denen bei der Verbrennung des "typischen" Restholzes gering. Der Gehalt an polychlorierten Biphenylen (PCB) im Abgas aller vier Anlagen liegen unterhalb des Gehalts der Abgase von Kehrichtverbrennungsanlagen (122-3000 ng/m³) [17].

Tabelle 5.26: Schadstoffgehalte im Abgas beim Verbrennen von "typischem" Restholz und Altholz

		"typisches" Restholz Anlage			Altholz Anlage			
		F	I	K	A	G	J	L
		Messwerte ¹⁾			Messwerte ¹⁾			
Σ PAK	ng/m ³	0.41	7.9	46	0.38	0.042	k.M. ²⁾	0.15
Σ Karz. EPA	μg/m ³	0.043	2.3	4.6	0.078	0.0099	k.M. ²⁾	0.020
Σ Karz. IARC	μg/m ³	0.018	1.6	3.5	0.064	0.0053	k.M. ²⁾	0.014
Σ PCDD	μg/m ³	97	9.6	9.8	2.4	0.46	16	23
Σ PCDF	ng/m ³	210	83	47	4.6	2.4	69	35
Σ I-TEQ	ng/m ³	6.4	1.5	0.95	0.14	0.059	1.5	0.77
Σ PCB	ng/m ³	55	10	17	8.0	n.n. ³⁾	27	6.1

¹⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

²⁾ keine Messung

³⁾ die Einzel-Isomere wurden nicht nachgewiesen

d) Altholz (in Altholzfeuerung verbrannt)

Die Dioxin-Gehalte im Abgas der **Anlage C** (Abbruchholz) liegen im Bereich der Werte, die im DIANE 8–Projekt für die Verbrennung von Altholz mit Rostfeuerung gefunden wurden [19] (Tabelle 5.27).

Die sehr hohen Emissionen an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) liegen über denen die von Obernberger für naturbelassenes Holz gefunden wurden ($0.5-50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [8].

Der Gehalt an polychlorierten Biphenylen (PCB) im Abgas liegt unterhalb des Gehalts der in Abgasen von Kehrichtverbrennungsanlagen gemessen wird ($122-3000 \text{ ng}/\text{m}^3$) [17].

Tabelle 5.27: Schadstoffgehalte im Abgas beim Verbrennen von Altholz

		Altholz (Anlage C) Messwerte ¹⁾	DIANE 8 (n=10) Messbereich ¹⁾
Σ PAK	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	150	
Σ Karz. EPA	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	38	
Σ Karz. IARC (WHO)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	25	
Σ PCDD	ng/m^3	53	
Σ PCDF	ng/m^3	170	
Σ I-TEQ	ng/m^3	3.0	2.7-18
Σ PCB	ng/m^3	22	

¹⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

6 Resultat

6.1 AUSWIRKUNGEN DER SCHADSTOFFFRACHTEN IM BRENNSTOFF HOLZ AUF DIE EMISSIONEN

6.1.1 Naturbelassenes Holz

Schwermetall-Emissionen

Naturbelassenes Holz sowohl der vorliegenden Studie als auch der Holzkampagne 98 enthält geringe Schwermetallegehalte. Die beim Verbrennen dieses Holzes entstehenden Abgase und Aschen enthalten daher geringe Mengen an Schwermetallen.

Die **allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen der Luftreinhalte-Verordnung** für stationäre Anlagen (Anh. 1 LRV) bezüglich Schwermetallemissionen (Hg, Summenkonz. As + Ni, Summenkonz. Pb + Cr + Cu) werden beim Verbrennen von naturbelassenem Holz eingehalten (Abb. 6.1).

Dioxin-Emissionen

Naturbelassenes Holz enthält geringe Gehalte an organischen Verunreinigungen (Lindan, Pentachlorphenol, polychlorierte Biphenyle, DDT) und Chlor. Beim Verbrennen dieses Holzes entstehen Abgase und Aschen, die geringe Mengen an Dioxinen enthalten (Abb. 6.2). Der **Grenzwert für Kehrrichtverbrennungsanlagen** verschiedener europäischer Länder (Deutschland, Österreich, Niederlande) (0.1 ng I-TEQ/m^3) wird bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz eingehalten.

6.1.2 "Typisches" Restholz

Schwermetall-Emissionen

Es wurden drei Brennstoffe untersucht, die als "typische" Restholz-Sortimente verwendet werden:

- Schreinerei-Restholz mit hohem Spanplattenanteil
- Schreinerei-Restholz mit geringem Spanplattenanteil
- auf der Baustelle sortiertes Baurestholz

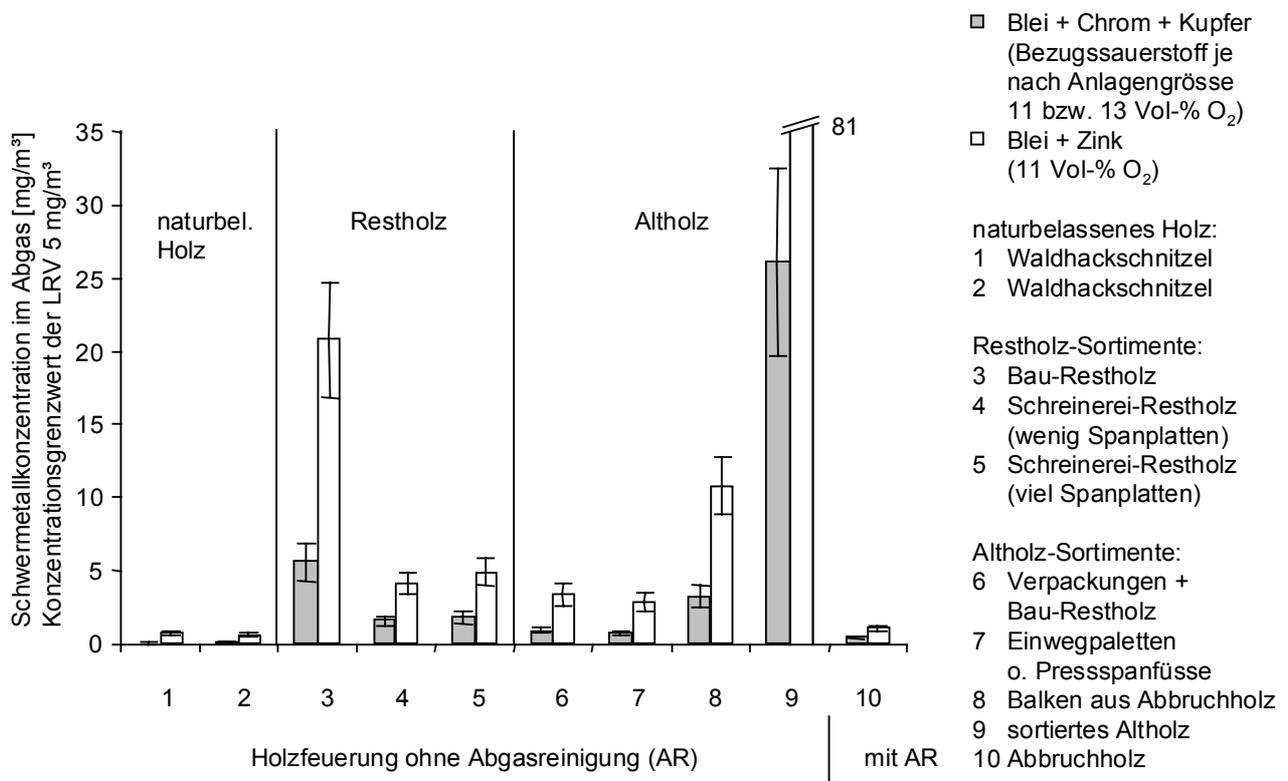
Die Schwermetallgehalte der Brennstoffe liegen im Messbereich vergleichbarer Brennstoff-Sortimente der Holzkampagne 98 (Baurestholz, Spanplatten) wobei einzelne Brennstoffproben dieser Sortimente der Holzkampagne 98 höhere Gehalte aufweisen (Kanthölzer, beschichtete Spanplatten).

Die Schwermetallgehalte (v. a. Pb und Zn) der eingesetzten Brennstoffe waren zumindest leicht (Schreinerei-Resthölzer) teilweise erheblich (auf der Baustelle sortiertes Bau-RH) gegenüber Restholz-Brennstoffen des HARVE-Projekts erhöht. Die hohen Chrom- und Kupfer-Gehalte des

auf der Baustelle sortierten Baurestholzes deuten, gemäss den Empfehlungswerten des LUA NRW und der LAGA auf eine anorganische Holzschutzmittelbehandlung hin.

Die **allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen der Luftreinhalte-Verordnung** für stationäre Anlagen bezüglich Schwermetallemissionen (Anh. 1 LRV) werden beim Verbrennen der "typischen" Restholz-Sortimente eingehalten (Abb. 6.1). Beim Bau-RH allerdings nur, da der Bagatellmassenstrom für die Summenkonzentration an Blei, Chrom und Kupfer nicht erreicht wird. Die Summenkonzentration der Schwermetalle Blei, Chrom und Kupfer im Abgas des Bau-Restholzes liegt im Bereich des Konzentrationsgrenzwertes. Der **Grenzwert der Luftreinhalte-Verordnung** für Altholzfeuerungen bezüglich der Summenkonzentration an Blei und Zink (Anh. 2, Ziffer 72 LRV) wird beim Verbrennen von Bau-RH deutlich überschritten. Die Summenkonzentration an Blei und Zink beim Verbrennen des Schreinerei-RH mit hohem Spanplattenanteil liegt im Bereich des Grenzwerts, beim Verbrennen des Schreinerei-RH mit geringem Spanplattenanteil knapp darunter.

Abb. 6.1: Summenkonzentration von Blei + Chrom + Kupfer und von Blei + Zink im Abgas (Konzentrationsgrenzwert der LRV für Pb + Cr + Cu und Pb + Zn: 5 mg/m³)



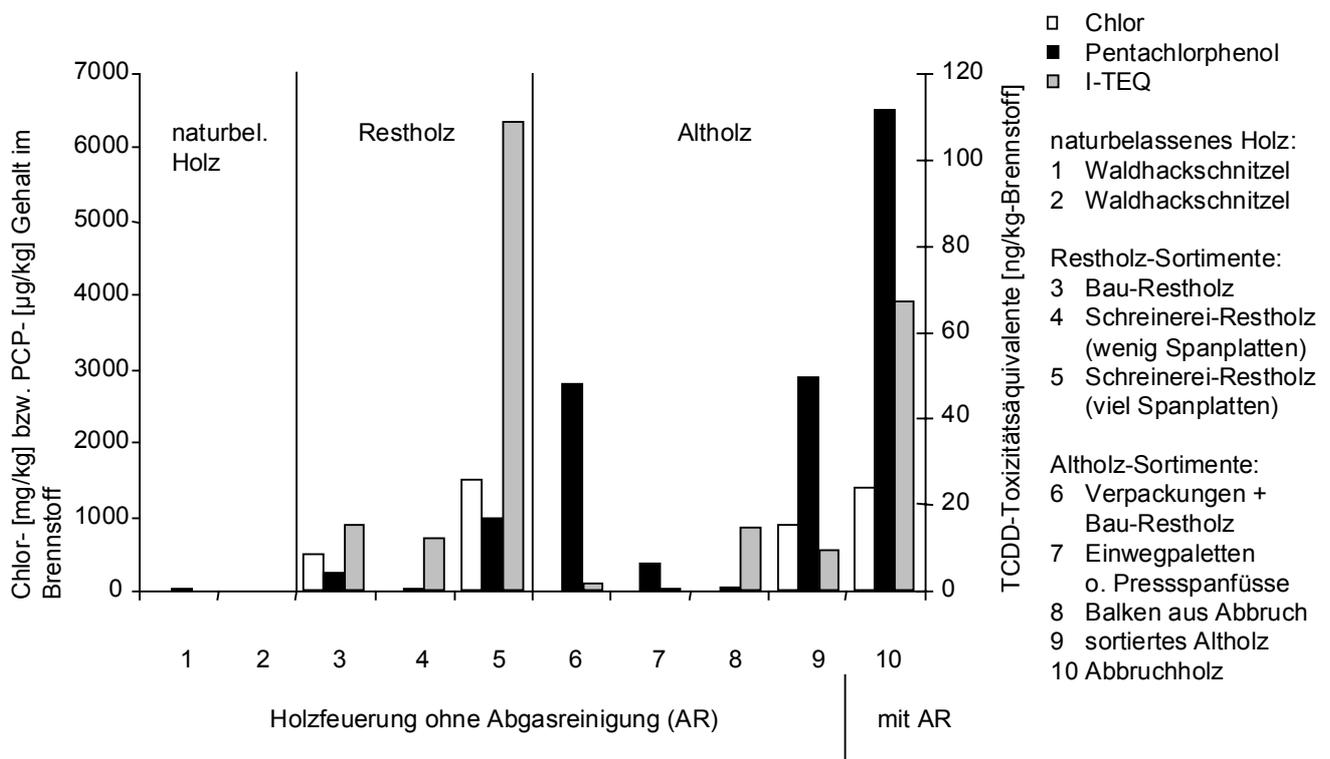
Dioxin-Emissionen

Das Schreinerei-RH mit hohem Spanplattenanteil und das auf der Baustelle sortierte Bau-RH weisen erhöhte Gehalte von Holzschutzmitteln (Lindan, Pentachlorphenol) auf, die Gehalte bleiben jedoch deutlich unter den Schwellenwerten des LUA NRW und der LAGA für holzschutzmittelbehandeltes Holz. Die Chlor-Gehalte derselben Brennstoffe waren gegenüber Restholz des HARVE-Projekts erhöht. Ähnliche Sortimente der Holzkampagne 98 (Baurestholz, Spanplatten) wiesen vergleichbare, einzelne Brennstoff-Proben auch sehr viel höhere, Chlor-Gehalte auf.

Beim Verbrennen der "typischen" Resthölzer entstehen Aschen und Abgase, die erhöhte Gehalte an polyaromatischen Kohlenwasserstoffen und Dioxinen aufweisen (Abb. 6.2).

Als Folge überschreiten die Dioxin-Gehalte im Abgas aller drei Anlagen die **Grenzwerte für KVAs** verschiedener europäischer Länder (0.1 ng I-TEQ/m^3) erheblich. Durch verbesserte Ausbrandbedingungen ist wahrscheinlich eine Reduktion der Dioxin-Emissionen möglich.

Abb. 6.2: Chlor- und PCP- Gehalt der verschiedenen Brennstoffe (CI-Gehalte unter der NG sind nicht angegeben) und die Summe der in Abgas und Aschen enthaltenen TCDD-Toxizitätsäquivalente (I-TEQ)



6.1.3 Altholz (in Restholzfeuerungen verbrannt)

Es wurden vier Brennstoffe untersucht, die zum Sortiment Altholz gehören, über deren tatsächliche Schadstoffbelastung jedoch Zweifel bestanden:

- Verpackungsholz und Baurestholz
- Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse

- Aus Abbruchholz separierte saubere Balken
- Sortiertes Altholz (Einwegpaletten, naturbelassenes Holz, Schreinerei-RH, Bau-RH, rohe Spanplatten und Fruchtkisten wurden aus Altholz aussortiert)

a) Altholz mit geringer Schadstoffbelastung

Schwermetall-Emissionen

Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse der vorliegenden Studie als auch der Holzkampagne 98 sind ein gering belastetes Altholz-Sortiment dessen Schwermetallbelastung der von Restholz des HARVE-Projekts entspricht.

Die Schwermetallgehalte des Sortiments Verpackungsholz + Baurestholz liegen ebenfalls im Messbereich von Restholz-Brennstoffen des HARVE-Projekts. Die vergleichbaren Brennstoff-Sortimente der Holzkampagne 98 weisen jedoch nur teilweise eine ähnlich geringe Schwermetallbelastung auf (Einwegpaletten, Harassen, Fruchtkisten, Schalungstafeln) und beinhalten auch deutlich höherbelastete Sortimente (Presspanfüsse von Einwegpaletten, Kanthölzer).

Beim Verbrennen dieser beiden schwachbelasteten Altholz-Sortimente entstehen Aschen deren Blei- und Zink-Belastung, mit Ausnahme des Zink-Gehalts der Rostasche, im Messbereich der Restholzaschen des HARVE-Projekts liegt.

Die **allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen der Luftreinhalte-Verordnung** für stationäre Anlagen (Anh. 1 LRV) (Hg, Summenkonz. As + Ni, Summenkonz. Pb + Cr + Cu) und die **ergänzenden Grenzwerte für Altholzfeuerungen** (Anh. 2, Ziffer 72 LRV) bezüglich Schwermetallemissionen (Summenkonz. Pb + Zn) werden beim Verbrennen von Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse und von Verpackungsholz + Baurestholz eingehalten (Abb. 6.1) .

Dioxin-Emissionen

Die Belastung an organischen Holzschutzmitteln der Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse ist gering. Das Verpackungsholz und Baurestholz weist einen deutlich erhöhten Gehalt an Pentachlorphenol auf, der über den Schwellenwerten für holzschutzmittelbehandeltes Holz des LUA NRW liegt.

Die Chlor-Gehalte dieser beiden schwachbelasteten Altholz-Sortimente liegen unter der Nachweisgrenze. Ähnliche Sortimente der Holzkampagne 98 (Bau-Restholz, Einwegpaletten, Verpackungsholz) weisen vergleichbare Chlor-Gehalte auf, es wurden aber auch höherbelastete Brennstoff-Proben analysiert (Presspanfüsse von Einwegpaletten).

Trotz der erhöhten Gehalte an organischen Holzschutzmitteln als potentiellen Dioxinvorläufern im Verpackungsholz und Baurestholz treten in den Abgasen und Aschen keine erhöhten Dioxin-Gehalte auf (Abb. 6.2).

Die Dioxin-Emissionen im Abgas des Verpackungs- und Baurestholzes und der Einwegpaletten ohne graue Presspanfüsse liegen im Bereich bzw. unter dem **Grenzwert für KVAs** in Deutschland, Österreich und den Niederlanden (0.1 ng I-TEQ/m³).

c) Altholz mit erhöhter Schadstoffbelastung

Schwermetall-Emissionen

Die Schwermetallbelastung der aus Abbruchholz separierten sauberen Balken liegt zwischen der von Restholz und der von Altholz des HARVE-Projekts. Die Schwermetallbelastung entspricht der von Dachbalken der Holzkampagne 98. Die bei der Verbrennung von aus Abbruchholz separierten sauberen Balken entstehenden Aschen weisen eine Schwermetallbelastung (Blei, Zink) auf, die im Bereich von Altholzaschen des HARVE-Projekts liegt.

Die **allgemeinen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen der Luftreinhalte-Verordnung** für stationäre Anlagen (Anh. 1 LRV) bezüglich Schwermetallemissionen (Hg, Summenkonz. As + Ni, Summenkonz. Pb + Cr + Cu) werden beim Verbrennen von aus Abbruchholz separierten Balken einhalten. Dagegen wird der **ergänzende Grenzwert der Luftreinhalte-Verordnung** für Altholzfeuerungen für die Summenkonzentration Blei und Zink (Anh. 2, Ziffer 72 LRV) deutlich überschritten (Abb. 6.1).

Beim sortierten Altholz wurden scheinbar gering belastete Sortimente (Einwegpaletten, naturbelassenes Holz, Schreinerei- und Bau-RH, rohe Spanplatten und Fruchtkisten) aus Altholz aussortiert und verwendet. Die Schwermetallbelastung des sortierten Altholzes ist mit der der darin enthaltenen höherbelasteten Sortimente der Holzkampagne 98 vergleichbar (Bau-Restholz) während andere Sortimente (Einwegpaletten, naturbelassenes Holz, Spanplatten, Fruchtkisten) deutlich geringer belastet sind. Die Schwermetallgehalte (Blei, Zink) des sortierten Altholzes liegen im Messbereich der Altholz-Brennstoffe des HARVE-Projekts. Aufgrund der erhöhten Arsen- und Quecksilber-Gehalte des Brennstoffs ist, gemäss des LUA NRW und der LAGA von einer anorganischen Holzschutzmittelbehandlung auszugehen.

Die bei der Verbrennung des sortierten Altholzes entstehenden Aschen weisen eine Schwermetallbelastung auf, die teilweise über der von Altholz-Aschen des HARVE-Projekts liegt.

Die Schwermetallkonzentrationen des Abgases aus der Verbrennung des sortierten Altholzes überschreiten den **Grenzwert der Luftreinhalte-Verordnung** für die Summenkonzentration Blei + Chrom + Kupfer (allgemeine vorsorgliche Emissionsbegrenzungen für stationäre Anlagen) (Anh. 1 LRV) und für die Summenkonz. Blei + Zink (ergänzende Emissionsbegrenzung für Altholzfeuerungen) (Anh. 2, Ziffer 72 LRV) deutlich (Abb. 6.1).

Dioxin-Emissionen

Die Belastung der aus Abbruchholz separierten sauberen Balken an organischen Holzschutzmitteln ist, mit Ausnahme von DDT, gering. Der Chlor-Gehalt des Brennstoffs liegt unter der Nachweisgrenze, während Dachbalken der Holzkampagne 98 teilweise erhöhte Chlor-Gehalte aufweisen.

Beim Verbrennen der aus Abbruchholz separierten sauberen Balken entstehen Abgase, die den **Dioxin-Grenzwert für Kehrrichtverbrennungsanlagen** verschiedener europäischer Länder von 0.1 ng I-TEQ/m^3 überschreiten, jedoch unter den Emissionen der Altholz-Verbrennung des DIANE 8-Projekts bleiben (Abb. 6.2).

Das sortierte Altholz weist einen deutlich erhöhten Gehalt an Pentachlorphenol auf, der über dem Schwellenwert für holzschutzmittelbehandeltes Holz des LUA NRW liegt. Ausserdem wurden im Brennstoff DDT und ein erhöhter Lindan-Gehalt nachgewiesen. Der Chlor-Gehalt des sortierten Altholzes ist ebenfalls erhöht. Ähnliche Sortimente der Holzkampagne 98 (Bau-Restholz, Einwegpaletten, rohe Spannplatten, Fruchtkisten) weisen vergleichbare Chlor-Gehalte auf, es wurden aber auch höherbelastete Brennstoff-Proben analysiert (Presspanfüsse von Einwegpaletten).

Trotz der erhöhten Gehalte an organischen Holzschutzmitteln und Chlor als potentiellen Dioxin-vorläufern im Brennstoff treten in den Aschen nur schwach erhöhte Dioxin-Gehalte auf (Abb. 6.2).

Beim Verbrennen des sortierten Altholzes entstehen Emissionen, die den **Dioxin-Grenzwert für KVAs** verschiedener europäischer Länder von 0.1 ng I-TEQ/m^3 überschreiten, jedoch unter den Emissionen der Altholz-Verbrennung des DIANE 8-Projekts bleiben.

6.1.4 Altholz (in Altholzfeuerungen verbrannt)

Schwermetall-Emissionen

Die Schwermetallgehalte des Altholzes sind gegenüber denen des HARVE- und des DIANE 8-Projekts erhöht, sie liegen jedoch im Messbereich der Schadstoffgehalte von Altholzschnitzeln der Holzkampagne 98. Die Schwermetallgehalte der Aschen liegen im Bereich der Werte des HARVE-Projekts.

Die Schwermetallkonzentrationen (Hg, Summenkonz. As + Ni, Summenkonz. Pb + Cr + Cu, Summenkonz. Pb+ Zn) im Abgas liegen nach Reinigung im Elektrofilter weit unter den **Grenzwerten der Luftreinhalte-Verordnung** für Altholzfeuerungen (Anh. 1 und Anh. 2, Ziffer 72 LRV) (Abb. 6.1).

Dioxin-Emissionen

Das verbrannte Altholz (Abbruchholz) weist einen hohen Gehalt an Pentachlorphenol auf, der gemäss den vorgeschlagenen Grenzwerten des LUA NRW als auch der LAGA auf eine deutliche Holzschutzmittelbehandlung hinweist. Eine Brennstoff-Probe der Altholz-Schnitzel der Holzkampagne 98 weist einen ähnlich hohen Gehalt an PCP auf, die übrigen Gehalte bleiben unter der

sehr hohen Nachweisgrenze. Die Lindan- und DDT-Gehalte des Abbruchholzes sind ebenfalls erhöht.

Der Chlor-Gehalt des Abbruchholzes ist erhöht er liegt jedoch im Messbereich des Gehalts von Altholz-Schnitzeln der Holzkampagne 98.

Infolge der hohen Holzschutzmittel- bzw. Chlor-Gehalte kommt es zu einer verstärkten Dioxin-Bildung, weshalb die Gehalte der Aschen und des Abgases erhöht sind (Abb. 6.2). Die Dioxin-Gehalte überschreiten den **Grenzwert für Kehrrichtverbrennungsanlagen** in Deutschland, Österreich und den Niederlanden (0.1 ng I-TEQ/m^3), liegen jedoch im Messbereich der Werte des HARVE- und des DIANE 8-Projekts.

6.2 TRANSFERKOEFFIZIENTEN

Der Transferkoeffizient eines Elementes gibt an zu welchem Anteil dieses in die festen Rückstände (Rost- bzw. Zyklonasche) oder ins Abgas (gasförmiger und partikelgeb. Anteil) gelangt. Der Transferkoeffizient und die Konzentration im Brenngut bilden die Grundlage, um Schicksal der Schadstoffe und deren Gefährdungspotential abzuschätzen. Die Transferkoeffizienten einer Verbindung berechnen sich aus der Masse (bzw. dem Volumen) der Stoffströme (Rost-, Zyklonasche, Abgas) und der Konzentration der Verbindung in der entsprechenden Fraktion. Da die Konzentration gewisser Elemente im Brennstoff unter der Bestimmungsgrenze liegt werden die Transferkoeffiziente in dieser Untersuchung auf die Summe der Ausgangsströme (Aschen + Abgas) bezogen. Für Rostfeuerungen und Unterschubfeuerungen wurden vergleichbare Transferkoeffizienten gefunden, daher werden die Ergebnisse beider Anlagentypen gemeinsam aufgeführt (Tab. 6.1).

Tabelle 6.1: Transferkoeffizienten der Rost- und Unterschubfeuerungen

	Transferkoeffizienten (%)					
	Rostasche		Zyklonasche		Abgas ¹⁾	
	Mittelwert	Messbereich	Mittelwert	Messbereich	Mittelwert	Messbereich
Arsen	61	37-92	4	0-12	36	5-59
Blei	27	4-50	6	1-13	67	45-89
Cadmium	<u>39</u>	<u>8-84</u>	11	1-27	51	32-83
Chrom	81	34-95	5	1-17	<u>14</u>	<u>1-62</u>
Kupfer	82	56-99	3	0-13	16	1-39
Nickel	77	72-97	<u>4</u>	1-12	<u>19</u>	<u>1-45</u>
Quecksilber	<u>9</u>	<u>1-33</u>	<u>2</u>	<u>0-5</u>	<u>90</u>	<u>66-99</u>
Zink	33	12-50	6	1-20	61	33-85
Chlor	<u>38</u>	<u>3-77</u>	15	1-36	<u>47</u>	<u>13-78</u>

Kursiv gedruckte und unterstrichene Werte beziehen sich auf Gehalte, die in mindestens einer der Anlagen unter der Nachweisgrenze liegen.

¹⁾ partikelgebundener (Flugasche) und gasförmiger Anteil.

Die schwer flüchtigen Metalle **Chrom, Kupfer und Nickel** werden vor allem in der Rostasche wiedergefunden und sind daher für die Schwermetallbelastung des Abgases in dieser Untersuchung von geringer Bedeutung. **Arsen** gelangt in dieser Untersuchung ebenfalls überwiegend in die Rostasche, womit die Arsen-Belastung des Abgases auch auf Grund der geringen Arsen-Gehalte der Brennstoffe (Holzkampagne 98) gering ist.

Die leichter flüchtigen Elemente **Blei, Zink, Cadmium und Chlor** werden nur zu ca. einem Drittel in die Rostasche transferiert während der überwiegende Teil im Abgas wiedergefunden wird (Blei: 45-89%; Zink: 33-85%; Cadmium: 32-83%; Chlor: 13-78%). Da die Blei- und Zink-Belastung der verschiedenen Brennstoffe in einem weiten Bereich variiert, stellen die Gehalte dieser beiden Schwermetalle eine wichtige Grösse zur Beurteilung eines Brennstoffs dar. Der Cadmium-Gehalt liegt in den Brennstoffen der Holzkampagne 98 meist unter der Nachweisgrenze, Cadmium ist daher für die Schwermetallbelastung des Abgases zumeist von geringer Bedeutung. Der ins Abgas transferierte Anteil des Chlors ist sehr variabel, daher ist die Chlor-Belastung des Abgases bei einem gegebenen Brennstoff-Gehalt schwer abzuschätzen. Aufgrund der erhöhten Chlor-Gehalt mancher Brennstoffe (Holzkampagne 98) kann die Abgasbelastung allerdings stark ansteigen.

Quecksilber gelangt ebenfalls überwiegend ins Abgas, wobei der Gehalt in den Brennstoffen (Holzkampagne 98) meist unter der Nachweisgrenze liegt und die Konzentration des Quecksilbers im Abgas daher gering ist.

6.3 UNTERSCHIEDUNG VON NATURBELASSENEM HOLZ, RESTHOLZ UND ALTHOLZ AUF GRUND DER SCHADSTOFFBELASTUNG DES BRENNSTOFFS UND DER ASCHEN

Naturbelassenes Holz - Restholz

Beim naturbelassenem Holz handelt es sich um einen Brennstoff dessen Schwermetall- und Chlorgehalte sehr gering sind. Die Schwermetallgehalte der untersuchten Restholz-Sortimente liegen teilweise deutlich über denen des naturbelassenen Holzes (Tab. 6.2). Beim Verbrennen von naturbelassenem Holz wurden Rost- und Zyklonaschen mit geringer Schwermetallbelastung erhalten (Tab. 6.3). Aschen mit höherem Schwermetallgehalt deuten deshalb darauf hin, dass auch verunreinigte d. h. nicht naturbelassene Hölzer verbrannt wurden.

Restholz - Altholz

Die Schadstoffbelastung der hochbelasteten Restholz-Sortimente (Schreinerei- und Bau-Restholz) dieser Untersuchung ist mit der von Altholz vergleichbar (Tab. 6.2). Möglicherweise resultiert diese erhöhte Schadstoffbelastung des Restholzes auch aus einer unvollständigen Abtrennung vorhan-

dener Altholz-Sortimenten. Bei der Verbrennung dieser Restholz-Sortimente entstehen Aschen deren Schwermetallbelastung der von Altholzaschen entspricht (Tab. 6.3). Eine Abgrenzung zwischen Rest- und Altholz, auf Grund der Schwermetallbelastung des Brennstoffs und der Rost- und Zyklonaschen, ist auf Grund dieser Ergebnissen nicht sinnvoll.

Tab. 6.2: Schwermetallgehalte der Brennstoffe

Brennstoff		Naturbel. Holz ¹⁾	Restholz ²⁾	Altholz ³⁾
Arsen	mg/kg	< 1	< 0.5-1	< 0.5-22
Blei	mg/kg	< 0.1-4.7	0.2-390	3-18'500
Cadmium	mg/kg	< 0.05-0.3	< 0.1-0.63	< 1-24
Chrom	mg/kg	< 0.2-2.4	< 0.2-580	1.7-3'100
Kupfer	mg/kg	< 1-5.1	0.9-60	< 1-900
Nickel	mg/kg	< 1-1.3	< 1-150	< 1-39
Quecksilber	mg/kg	< 1	< 1	< 1
Zink	mg/kg	3.4-28	1.4-1'300	15-18'500
Chlor	mg/kg	< 400	< 100-27'000	66-4'500

Ergebnisse mit, gegenüber den anderen Untersuchungen, erhöhter Nachweisgrenze sind nicht aufgeführt

¹⁾ Diese Untersuchung (n=2), Holzk. 98 (n=9), HARVE-Projekt (n=7)

²⁾ Diese Untersuchung (n=3), Holzk. 98 (n=109-119), HARVE-Projekt (n=5)

³⁾ Diese Untersuchung (n=5), Holzk. 98 (Altholzschnitzen) (n=14), HARVE-Projekt (n=6)

Tab. 6.3: Schwermetallgehalte der Rostaschen

Rostasche		Naturbel. Holz ¹⁾	Restholz ³⁾	Altholz ⁴⁾
Arsen	mg/kg	8.4-10 ²⁾	21-24 ²⁾	4-40
Blei	mg/kg	< 0.1-42	10-1'600	150-5'300
Cadmium	mg/kg	0.1-12	< 0.5-39	0.8-83
Chrom	mg/kg	13-87	200-1'600	180-730
Kupfer	mg/kg	95-260	60-1'800	860-7'600
Nickel	mg/kg	20-110	43-150	84-240
Quecksilber	mg/kg	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Zink	mg/kg	9-950	90-4'500	1'800-22'000
Chlor	mg/kg	< 100-2'000	< 100-30'000	75-19'000

Ergebnisse mit, gegenüber den anderen Untersuchungen, erhöhter Nachweisgrenze sind nicht aufgeführt

¹⁾ Diese Untersuchung (n=2), HARVE-Projekt (n=13)

²⁾ nur Erg. dieser Untersuchung

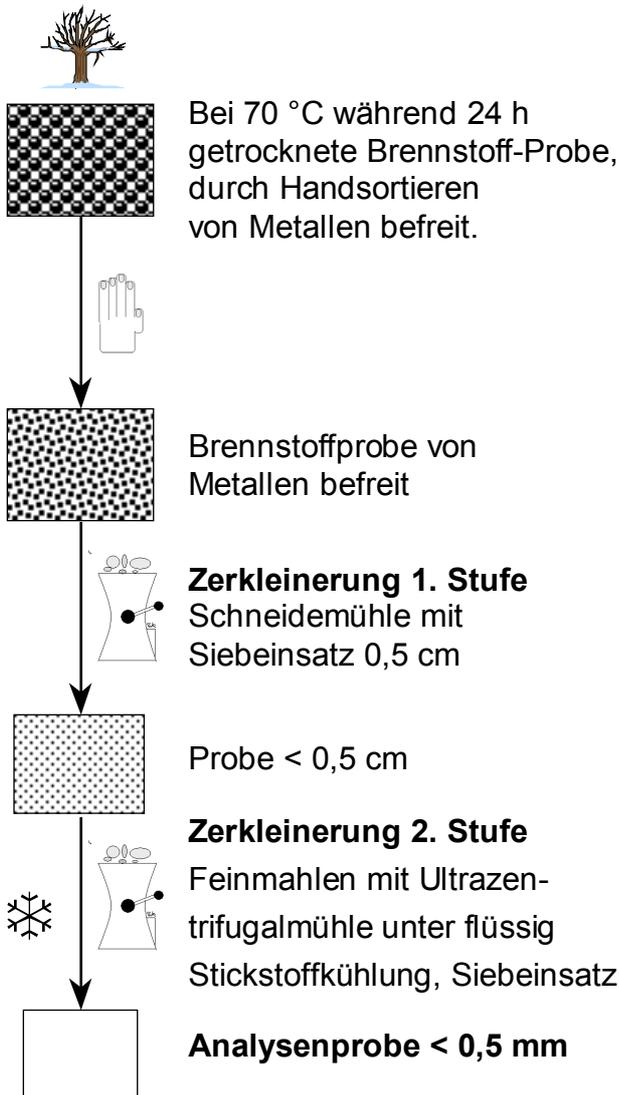
³⁾ Diese Untersuchung (n=3), HARVE-Projekt (n=4)

⁴⁾ Diese Untersuchung (n=5), HARVE-Projekt (n=8)

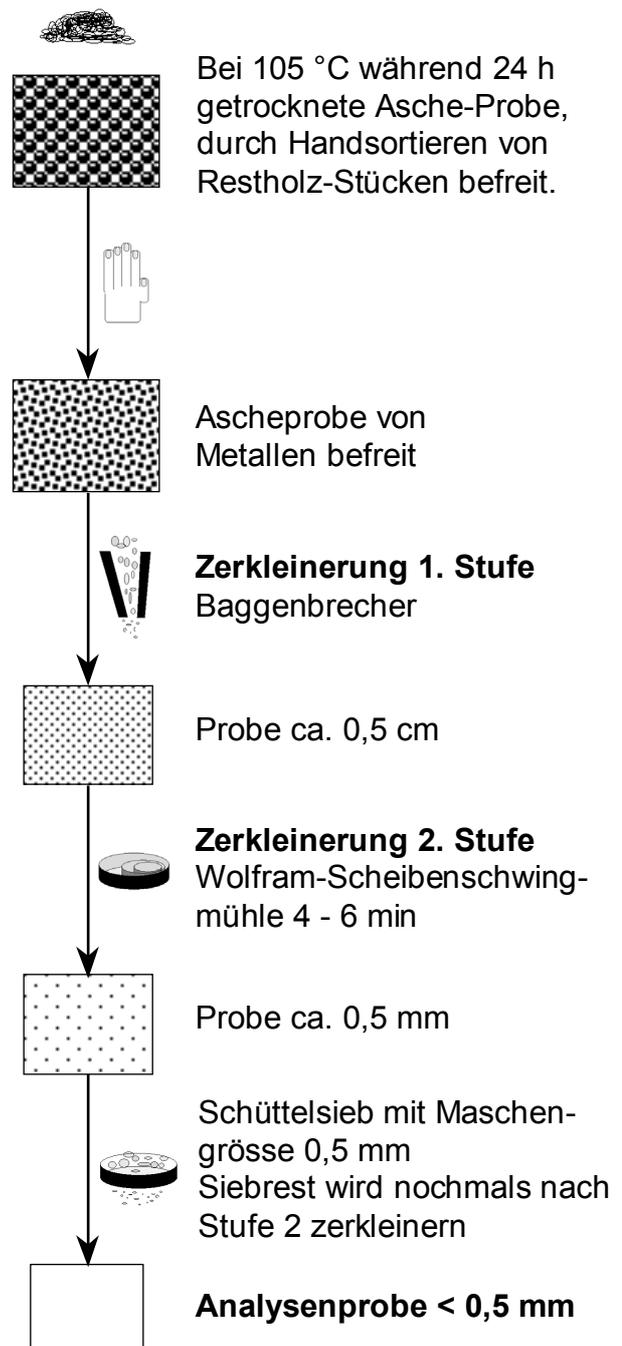
Anhang 1: Messtechnik

ANHANG 1.1: PROBENVORBEREITUNG

Brennstoff



Asche



ANHANG 1.2: ANGABEN ZU EINZELNEN MESSVERFAHREN

Anhang 1.2.1: Anorganische Inhaltsstoffe, TOC

Nachweis im Feststoff

Brennstoffproben

Für die Analyse der Metalle wurden die Proben (siehe Anhang 1.1) in fünffacher Ausführung mit Salpetersäure im Hochdruckverascher (HPA-S) bei 135 bar Druck und 300°C mineralisiert.

Schwermetalle (As, Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Zn, Hg):

Die Bestimmung der Massenkonzentrationen erfolgte für die Schwermetalle, ausgenommen für Hg, mittels Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS). Für die Analyse von Hg wurde ein Aliquot der Probe nach dem Aufschluss mittels KMnO_4 stabilisiert und anschliessend mit Hilfe der Atomabsorptionsspektrometrie-Kaltdampftechnik (AAS-KDT) analysiert.

Alkali-, Erdalkalielemente (Ca, Mg, Na, K) und Phosphor:

Die Analyse der Elemente Phosphor, Calcium, Kalium und Magnesium erfolgte mittels ICP-OES. Natrium wurde mittels F-AAS analysiert.

Halogene (F, Cl, Br):

Für die Analyse der Halogene wurden die Proben (siehe Anhang 1.1) in einer mit Natronlauge als Absorptionslösung versehenen Sauerstoff-Druckbombe verbrannt. Die dabei interessierenden Elemente werden als ihre Salze in der Natronlauge absorbiert. Die Bestimmung der Massenkonzentration von Chlor erfolgte mittels Ionenchromatographie als Chlorid. Fluor und Brom wurden mit ionenselektiven Elektroden als Fluorid bzw. Bromid analysiert.

Zur Qualitätssicherung wurden wässrige Standardreferenzmaterialien mitaufgeschlossen und analysiert.

Ascheproben

Für die Analyse der Metalle wurden die Proben in fünffacher Ausführung mittels einer Königswasser-Mischung im Hochdruckverascher (HPA-S) bei 135 bar Druck und 300°C mineralisiert.

Schwermetalle (As, Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Zn, Hg), Alkali-, Erdalkalielemente (Ca, Mg, Na, K) und Phosphor:

Die Bestimmung der Massenkonzentrationen erfolgte für die Schwermetalle, ausgenommen für Hg, mittels ICP-MS. Für die Analyse von Hg wurde ein Aliquot der Probe nach dem Aufschluss mittels KMnO_4 stabilisiert und anschliessend mit Hilfe der AAS-Kaltdampftechnik analysiert. Die

Analyse der restlichen Elemente, ausgenommen Fluor, Chlor und Brom, erfolgte mittels ICP-OES. Cadmium wurde mittels F-AAS analysiert.

Halogene (F, Cl, Br):

Für die Analyse der Halogene wurden die Proben in einer mit Natronlauge als Absorptionslösung versehenen Sauerstoff-Druckbombe verbrannt. Die dabei interessierenden Elemente werden als ihre Salze in der Natronlauge absorbiert.

Die Bestimmung der Massenkonzentration von Chlor erfolgte mittels Ionenchromatographie als Chlorid. Fluor und Brom wurden mit ionenselektiven Elektroden als Fluorid bzw. Bromid analysiert.

Zur Qualitätssicherung wurden wässrige Standardreferenzmaterialien mitaufgeschlossen und analysiert.

Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (TOC):

Die Analyse des gesamten organisch gebundenen Kohlenstoffs (TOC) erfolgte am Shimadzu TOC-Analyzer SSM 5000A in drei Schritten:

1. Bestimmung des gesamten Kohlenstoffs (TC) mittels einer Verbrennung im Sauerstoffmedium bei 980°C unter der Verwendung von Vanadiumpentoxid als Oxidationshilfe, und anschliessender NDIR-Detektion von CO₂.
2. Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffs (IC) durch das Austreiben des karbonatgebundenen Kohlenstoff als CO₂ mit Phosphorsäure bei 200°C und anschliessender NDIR-Detektion.
3. Berechnung des gesamten organisch gebundenen Kohlenstoffs (TOC) als Differenz von gesamtem Kohlenstoff (TC) und anorganischem Kohlenstoff (IC).

Nachweis im Abgas

Quarzwatten

Die Proben wurden in einfacher Ausführung in einer Wolframcarbid-Scheibenschwingmühle gemahlen.

Schwermetalle (As, Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Zn, Hg), Alkali-, Erdalkalielemente (Ca, Mg, Na, K) und Phosphor:

Nach dem Mitteldruck-Aufschluss mit Salpetersäure im Mikrowellenofen wurden die Proben mit Reinstwasser verdünnt. Ein Aliquot wurde mit KMnO₄-Lösung stabilisiert und anschliessend der Hg-Analyse, mittels AAS-KDT unter Verwendung einer matrixkorrigierten Kalibrationsgeraden, zugeführt.

Für die Analyse der übrigen Schwermetalle wurden die Proben mit Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) analysiert. Die restlichen Elemente wurden mittels ICP-OES analysiert.

Zur Qualitätssicherung dienten aufgeschlossene Multielementstandardlösungen.

Absorptionslösungen

Schwermetalle (As, Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Zn, Hg), Alkali- ,Erdalkalielemente (Ca, Mg, Na, K) und Phosphor:

Für die Bestimmung von Quecksilber wurden die Lösungen mit Hydroxylammoniumhydrochlorid in den geschlossenen Waschflaschen im Ultraschallbad vorreduziert (vollständige Reduktion des Braunsteins). Mittels Kaltdampf-Atomabsorptionsspektrometrie (AAS-KDT) unter der Verwendung eines Überschuss von Zinnchlorid als Reduktionsmittel, wurde die Massenkonzentration von Quecksilber bestimmt. Die Kalibrationsgerade wurde in der Matrix angesetzt.

Für die Bestimmung der übrigen Schwermetalle wurden die Lösungen direkt im Absorptionsgefäss mit Reinstwasser auf 100 ml ergänzt. Cd, Cr, Cu, As, Ni, Pb und Zn wurden mit ICP-MS gemessen.

Phosphor wurde der Messung mit ICP-OES zugeführt. Die restlichen Elemente wurden mittels F-AAS analysiert.

Anhang 1.2.2: Organische Inhaltsstoffe

Definition der Messgrößen:

Polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK):

Fluoranthren	FLT
Pyren	PYR
Benzo[c]phenanthren	BcPH
Benzo[ghi]fluoranthren	BghiFLT
Benz[a]anthracen ^{1),2)}	BaA
Chrysen ¹⁾	CHR
Benzo[e]pyren	BeP
Benzo[b]fluoranthren ^{1),2)}	BbFLT
Benzo[k]fluoranthren ^{1),2)}	BkFLT
Benzo[a]pyren ^{1),2)}	BaP
Benzo[ghi]perylen	BghiPER
Dibenz[ah]anthracen ^{1),2)}	DBahA
Indeno[1,2,3-cd]pyren ^{1),2)}	IndP
Anthanthren	ANT
Coronen	COR

Σ PAK Summe aller oben genannten polyaromatische Kohlenwasserstoffe

Σ PAK karz. EPA Summe der PAK mit Index ¹⁾

Σ PAK karz. IARC (WHO) Summe der PAK mit Index ²⁾

Die mit ¹⁾ bzw. ²⁾ gekennzeichneten Verbindungen werden von der US/EPA bzw. der WHO als kanzerogen bezeichnet.

Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F):

PCDD/F Tetra-Octachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane

TCDD/F Tetrachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane

PeCDD/F Pentachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane

HxCDD/F Hexachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane

HpCDD/F Heptachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane

OCDD/F Octachlorierte Dibenzo-p-dioxine bzw. Dibenzofurane

Es wurden sowohl alle 17 2,3,7,8-Cl-substituierten Einzelverbindungen (Kongenere) sowie die Summenkonzentrationen der Tetra-, Penta-, Hexa-, Hepta-, und Octachlorierten Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane bestimmt.

Die Summenkonzentration der PCDD bzw. PCDF setzt sich wie folgt zusammen:

$$\Sigma \text{ PCDD (F)} = \Sigma \text{ TCDD (F)} + \Sigma \text{ PeCDD (F)} + \Sigma \text{ HxCDD (F)} + \Sigma \text{ HpCDD (F)} + \text{OCDD (F)}$$

Die Summe I-TEQ (Summe der 2,3,7,8-TCDD-Toxizitätsäquivalente) ist die Summe der mit den I-TEF (Toxizitätsäquivalenzfaktoren) gewichteten Einzelkonzentrationen. Sie ist ein Mass für die Gesamtoxizität der Mischung.

Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT):

Falls die Summenkonzentration der beiden DDT-Isomere unter der Nachweisgrenze lag wurde diese angegeben, ansonsten wurden die Konzentrationen der Isomere p,p-DDT und o,p-DDT separat angegeben.

p,p-DDT 1,1'-(2,2,2-trichloroethylidene)bis[4-chloro-Benzene]

o,p-DDT 1-chloro-2-[2,2,2-trichloro-1-(4-chlorophenyl)ethyl]-Benzene

Hexachlorcyclohexan (HCH):

Es wurden die (α , β , γ , δ) Konfigurationsisomere des 1,2,3,4,5,6-Hexachlorcyclohexans bestimmt (Ausnahme: bei der Anlage G wurde nur die Summe der Isomere bestimmt).

Polychlorierte Biphenyle (PCB):

Es wurde die Summe aller Tri- bis Octachlorierten PCB's bestimmt.

Aufarbeitung der Proben

Brennstoffproben (PCB, HCH, HCB, PCP, DDT)

24-stündigen Soxhletextraktion der Brennstoffproben (Aufbereitung siehe Anhang 1.1) mit n-Hexan. Ein aliquoter Teil des Extrakts wurde für die Bestimmung der HCH, HCB, PCP, DDT und der PCB verwendet.

Ascheproben (PCB, PCDD/PCDF, PAK)

Aufschluss eines Aliquots der Probe (Aufbereitung siehe Anhang 1.1) mit verdünnter (1 M) Salzsäure bei Raumtemperatur. Filtration der säurebehandelten Asche und Neutralisation auf pH > 4. Lufttrocknung des Filtrerrückstandes bei Raumtemperatur.

24-stündige Soxhletextraktion der getrockneten Ascheproben mit Toluol. Ein aliquoter Teil des Extrakts wurde für die Bestimmung der PAK und der PCB, PCDD/PCDF verwendet.

Abgasproben (LAGA-Verfahren) (PCB, PCDD/PCDF, PAK)

Nach der isokinetischen Entnahme eines Teilvolumenstroms (2 m³/h; ca. 4 bis 8-Stundenmittelwert) mit einem beheizten Absaugrohr (120°C) erfolgte die Filtration durch einen beheizten Quarzwattfilter bei 120°C. Der Teilvolumenstrom wurde abgekühlt und das Kondensat in einer Kondensatflasche und einem Tropfenfänger abgetrennt. Die Sorption von filtergängigen Komponenten erfolgte in zwei nacheinander geschalteten XAD-2-Kartuschen.

Das Kondensat wurde dreimal mit Dichlormethan und einmal mit n-Hexan extrahiert; sämtliche Feststoffe (Quarzwatte aus Filterhülse und Tropfenfänger, sowie Adsorber) wurden mit Toluol extrahiert und alle Glaswaren nacheinander mit Aceton, Dichlormethan und Toluol gespült. Ein aliquoter Teil der Extrakte wurde für die Bestimmung der PAK und der PCB, PCDD/PCDF verwendet.

Weitere Aufarbeitung der Extrakte der Brennstoff-, Asche- und Abgasproben zum Nachweis der PCDD/PCDF und PCB

Die Extrakte der Brennstoff-, Asche- bzw. Abgasproben wurden mit einem internen Standard (Gemisch von siebzehn ¹³C₁₂-markierten PCDF und PCDD-Isomeren und ¹³C₁₂ PCB 138 [2,2',3,4,4',5'-Hexachlorobiphenyl]) versetzt, eingeeengt, mit 7% Oleum behandelt, mit n-Hexan extrahiert und dann über Kieselgel gereinigt.

Die Abtrennung der PCB von den PCDD/PCDF erfolgte während der chromatographischen Reinigung an den Festphasen. Die erste Fraktion (2% Dichlormethan in n-Hexan) der basischen Aluminiumoxidsäule enthielt die polychlorierten Biphenyle, welche separat gesammelt wurden.

Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F):

Massenspektrometrische Analyse nach SN/EN 1948, Blätter 1-3, 1998. Auftrennung der PCDD/PCDF in einer Kapillarsäule, Identifizierung der einzelnen Kongenere auf Grund ihrer Re-

tentionszeit (Vergleich mit internem Standard) und Detektion mit hochauflösender Massenspektrometrie (SIM-Modus, $R=8'000-10'000$, 10% Tal). Es wurden jeweils die zwei intensivsten Massen des Molekülionenisotopenclusters der nativen und der $^{13}C_{12}$ markierten PCDD/F detektiert. Die Quantifizierung erfolgte über die Summe der Signalflächen in den Einzelionenchromatogrammen durch den Vergleich mit den internen Standards. Signale nahe der Nachweisgrenze wurden über die Höhe ausgewertet.

Die Nachweisgrenzen für PCDD/PCDF sind vom Verhältnis Signal zu Rauschen abhängig und werden somit teilweise durch die Zusammensetzung des Abgases beeinflusst.

Polychlorierte Biphenyle (PCB):

Die quantitative Bestimmung erfolgte mittels HRGC/HRMS (SIM-Modus, $R=8'000$) durch Vergleich mit einem der Probe möglichst entsprechenden externen Standard (z. B. Aroclor 1242, 1254, 1260 oder einer Mischungen dieser drei Standards).

Polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK):

Ein aliquoter Teil des Extrakts der Asche bzw. der Abgasprobe wurde nach VDI-Richtlinie 3872 aufgearbeitet (chromatographische Reinigung der Extrakte an Kieselgel, Fraktionierung durch Chromatographie an Sephadex LH-20, HPLC mit UV- und Fluoreszenzdetektion).

Hexachlorcyclohexan (HCH), Hexachlorbenzol (HCB), Pentachlorphenol (PCP) und Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT):

Probenahme im Abgas

Kondensatsammelflasche kombiniert mit Supelco-Röhrchen (Teilstrom der Feststoffprobenahme). 24 stündige Soxhletextraktion des Supelco-Röhrchens mit Dichlormethan und flüssig/flüssig Extraktion des auf pH 2-3 angesäuerten Kondensates mit Dichlormethan und n-Hexan. Vereinigung des Soxhletextraktes und des Extraktes aus der flüssig/flüssig Verteilung des Kondensates

Nachweis im Brennstoff und im Abgas

Das Extrakt der Brennstoffprobe bzw. das Extrakt der Abgasprobenahme wurden mit den internen Standards versetzt ($^{13}C_6$ HCB, $^{13}C_6$ PCP und $^{13}C_6$ HCH) und anschliessend am Rotationsverdampfer eingeeengt.

Umsetzung des Pentachlorphenols mit Diazomethan zum Pentachloranisol.

Der behandelte Extrakt wurde über eine gemischte Kieselgelsäule (basisches, neutrales und saures Kieselgel) mit n-Hexan chromatographiert. Das Eluat der Kieselgelsäule wurde am Rotationsverdampfer (40°C, 300 mbar) bis auf ca. 1 ml eingeeengt und anschliessend durch mehrmaliges spülen mit Dichlormethan quantitativ in ein 1 ml Minivial transferiert. Das Lösemittel wurde unter einem leichtem Stickstoffstrom bis auf ca. 30 μ l abgeblasen. Danach erfolgte die quantitative Bestimmung von Hexachlorbenzol, Pentachlorphenol, DDT, sowie α -, β -, γ - und δ -HCH mittels hochauflösender

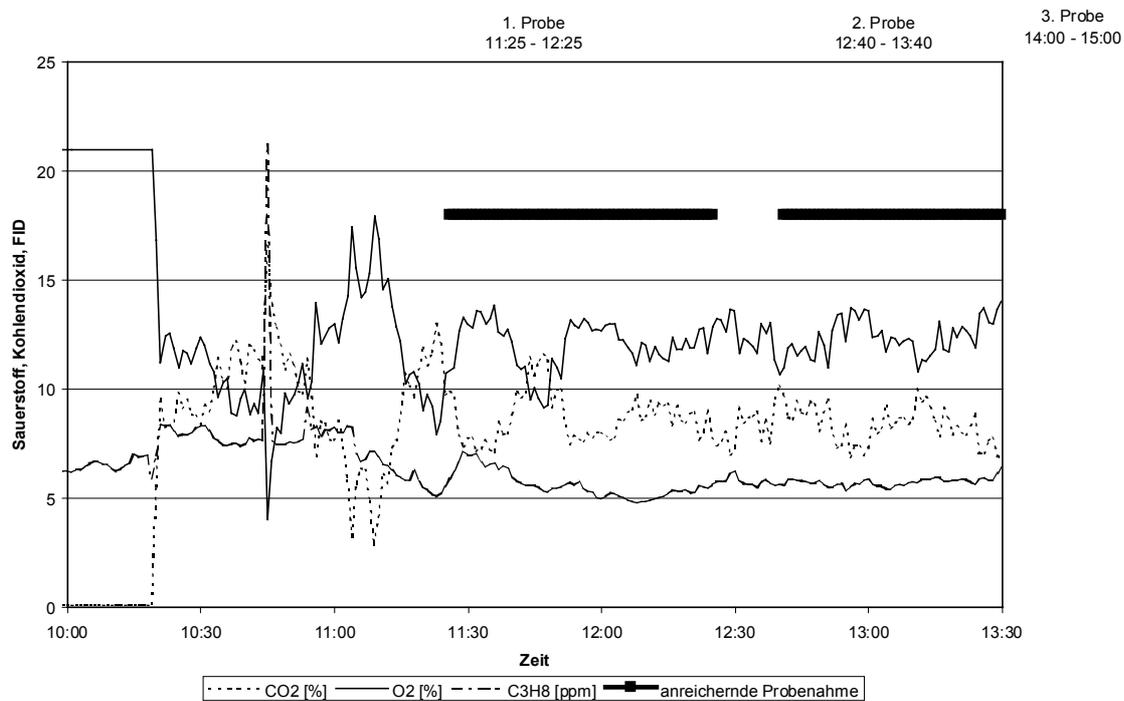
gaschromatographischer, massenspektrometrischer Analyse (HRGC/HRMS) (SIM-Modus, R=8'000-10'000, 10% Tal).

Für α -, β -, δ -HCH sowie DDT wurden keine isotopenmarkierten interne Standards verwendet ihre quantitative Bestimmung erfolgte über die gemessenen Responsefaktoren bezogen auf γ -HCH.

Anhang 2: Ergänzende Messdaten

ANHANG 2.1 ANLAGE A

On-Line Aufzeichnungen der Anlage A



Bemerkung: ab 13:30 Ausfall der elektronischen Datenerfassung

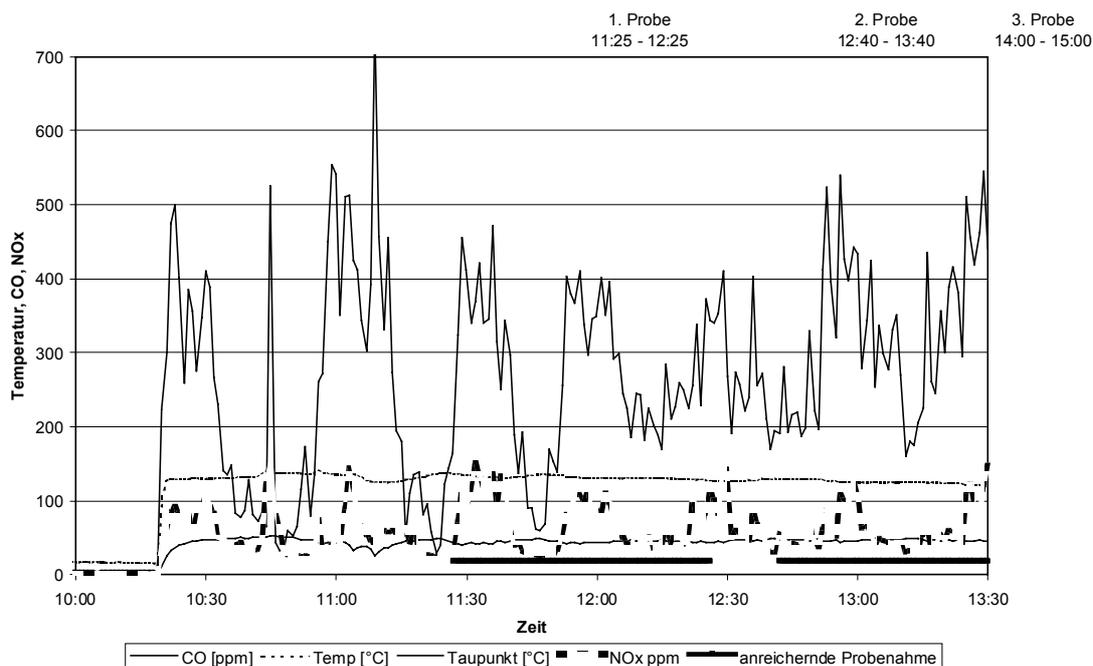


Tabelle A2.1: Dioxin- und PAK-Daten der Anlage A

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	n.n.	660	0.59
2,3,7,8-TCDD	< 1.5	15	0.0072
Summe PeCDD	n.n.	700	0.64
1,2,3,7,8-PeCDD	< 2.1	41	0.045
Summe HxCDD	n.n.	830	0.60
1,2,3,4,7,8-HxCDD	< 2.6	47	0.026
1,2,3,6,7,8-HxCDD	< 2.6	58	0.048
1,2,3,7,8,9-HxCDD	< 3.1	39	0.035
Summe HpCDD	n.n.	440	0.36
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	< 7.7	230	0.18
OCDD	< 13	330	0.22
Summe TCDF	n.n.	2'100	1.9
2,3,7,8-TCDF	< 1.7	57	0.046
Summe PeCDF	n.n.	1'300	1.5
1,2,3,7,8-PeCDF	< 1.3	80	0.057
2,3,4,7,8-PeCDF	< 1.5	75	0.12
Summe HxCDF	n.n.	520	0.73
1,2,3,4,7,8-HxCDF	< 1.2	62	0.081
1,2,3,6,7,8-HxCDF	< 1.2	58	0.078
1,2,3,7,8,9-HxCDF	< 2.6	1.1	0.0090
2,3,4,6,7,8-HxCDF	< 1.7	51	0.090
Summe HpCDF	n.n.	220	0.35
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	< 4.5	130	0.21
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	< 8.2	11	0.038
OCDF	< 11	80	0.11
Σ PCDD	n.n.	3'000	2.4
Σ PCDF	n.n.	4'200	4.6
Σ PCDD/F	n.n.	7'200	7.1
Σ I-TEQ	n.n.	120	0.14
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthen	3.8	170	0.11
Pyren	1.9	160	0.075
Benzo[c]phenanthren	0.11	1.4	0.0020
Benzo[ghi]fluoranthen	< 0.06	12	0.029
Benz[a]anthracen	0.38	2.0	0.0055
Chrysen	1.2	4.2	0.011
Benzo[e]pyren	0.079	2.6	0.019
Benzo[b]fluoranthen	0.25	1.9	0.020
Benzo[k]fluoranthen	< 0.06	0.58	0.0073
Benzo[a]pyren	< 0.06	0.37	0.0037
Benzo[ghi]perylen	< 0.06	0.66	0.026
Dibenz[ah]anthracen	< 0.06	< 0.06	< 0.0003
Indeno[1,2,3-cd]pyren	< 0.06	0.14	0.027
Anthanthren	< 0.06	8.5	0.0016
Coronen	< 0.06	0.12	0.044
Σ PAK	7.9	370	0.38
Σ Karzinogene EPA	1.9	9.1	0.078
Σ Karzinogene IARC (WHO)	0.71	4.9	0.064

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

ANHANG 2.2 ANLAGE C

On-Line Aufzeichnungen der Anlage C

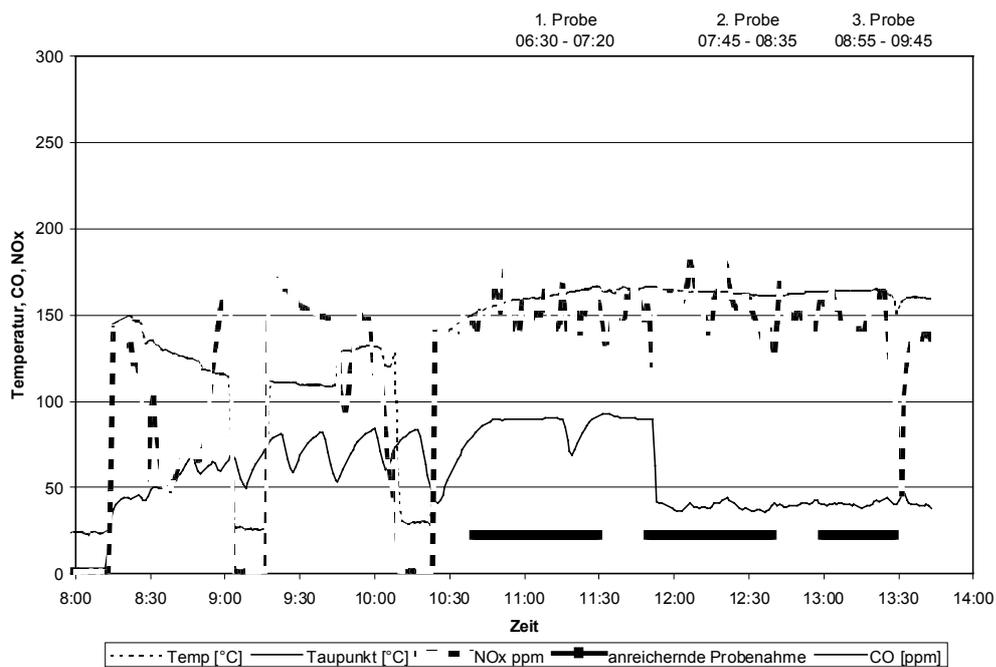
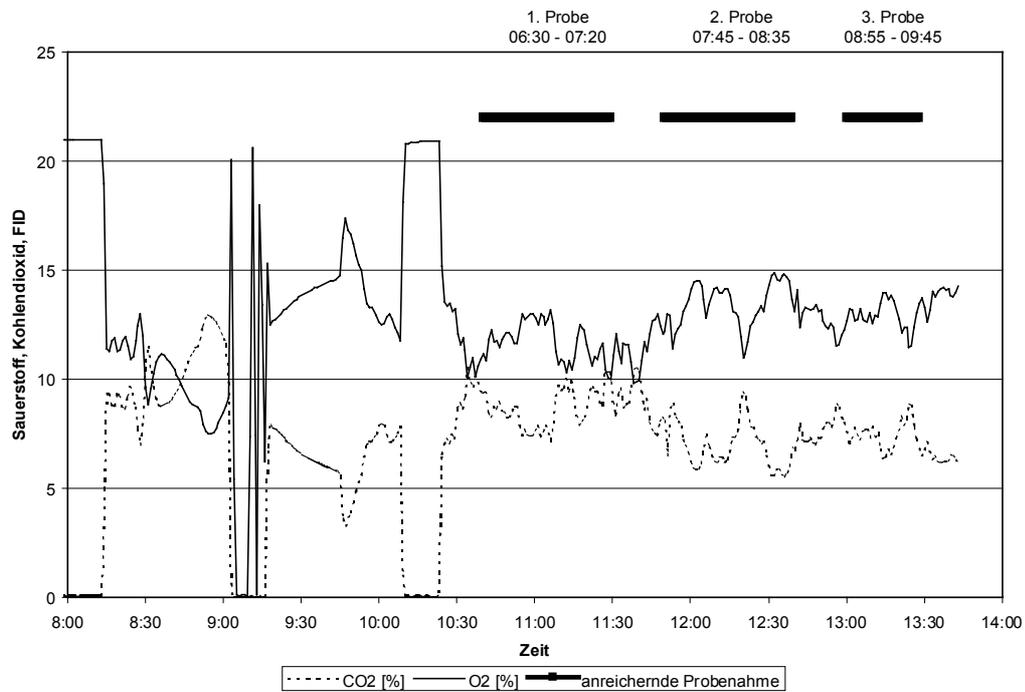


Tabelle A2.2: Dioxin- und PAK-Daten der Anlage C

	E-Filterasche ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	56'000	160	9'400	10
2,3,7,8-TCDD	800	10	170	0.16
Summe PeCDD	45'000	340	6'100	11
1,2,3,7,8-PeCDD	4'100	65	720	0.46
Summe HxCDD	35'000	710	5'300	16
1,2,3,4,7,8-HxCDD	1'800	17	300	1.2
1,2,3,6,7,8-HxCDD	4'100	56	480	1.3
1,2,3,7,8,9-HxCDD	2'500	55	300	1.1
Summe HpCDD	22'000	750	3'300	9.7
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	12'000	380	1'700	5.6
OCDD	22'000	1'300	5'900	6.2
Summe TCDF	394'000	61	56'000	92
2,3,7,8-TCDF	12'000	1.3	1'700	1.4
Summe PeCDF	148'000	31	18'000	53
1,2,3,7,8-PeCDF	10'000	1.5	1'400	3.5
2,3,4,7,8-PeCDF	14'000	3.0	1'500	2.1
Summe HxCDF	55'000	33	5'200	21
1,2,3,4,7,8-HxCDF	7'400	34	720	2.3
1,2,3,6,7,8-HxCDF	8'600	20	850	1.9
1,2,3,7,8,9-HxCDF	610	1.4	52	0.22
2,3,4,6,7,8-HxCDF	7'300	21	490	2.6
Summe HpCDF	17'000	26	1'300	6.2
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	11'000	12	710	4.1
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	1'500	1.3	110	0.57
OCDF	1'900	15	180	0.67
Σ PCDD	180'000	3'300	30'000	53
Σ PCDF	615'000	170	80'000	170
Σ PCDD/F	795'000	3'500	111'000	230
Σ I-TEQ	15'000	70	1'800	3.0
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthren	32'000	44	6'700	39
Pyren	39'000	42	6'600	36
Benzo[c]phenanthren	560	4.9	84	1.7
Benzo[ghi]fluoranthren	4'600	18	360	14
Benz[a]anthracen	1'800	18	130	1.5
Chrysen	2'200	19	180	13
Benzo[e]pyren	2'300	5.5	57	10
Benzo[b]fluoranthren	1'700	7.4	47	12
Benzo[k]fluoranthren	590	1.3	12	5.3
Benzo[a]pyren	1'100	1.6	16	1.1
Benzo[ghi]perylen	1'200	3.0	7.7	4.4
Dibenz[ah]anthracen	< 0.06	< 0.06	< 0.06	< 0.0004
Indeno[1,2,3-cd]pyren	520	4.1	< 0.06	5.2
Anthanthren	100	< 0.06	< 0.06	< 0.0004
Coronen	350	< 0.06	< 0.06	1.4
Σ PAK	88'000	170	14'000	140
Σ Karzinogene EPA	7'900	51	380	38
Σ Karz. IARC (WHO)	5'700	32	200	25

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

ANHANG 2.3 ANLAGE D

On-Line Aufzeichnungen der Anlage D

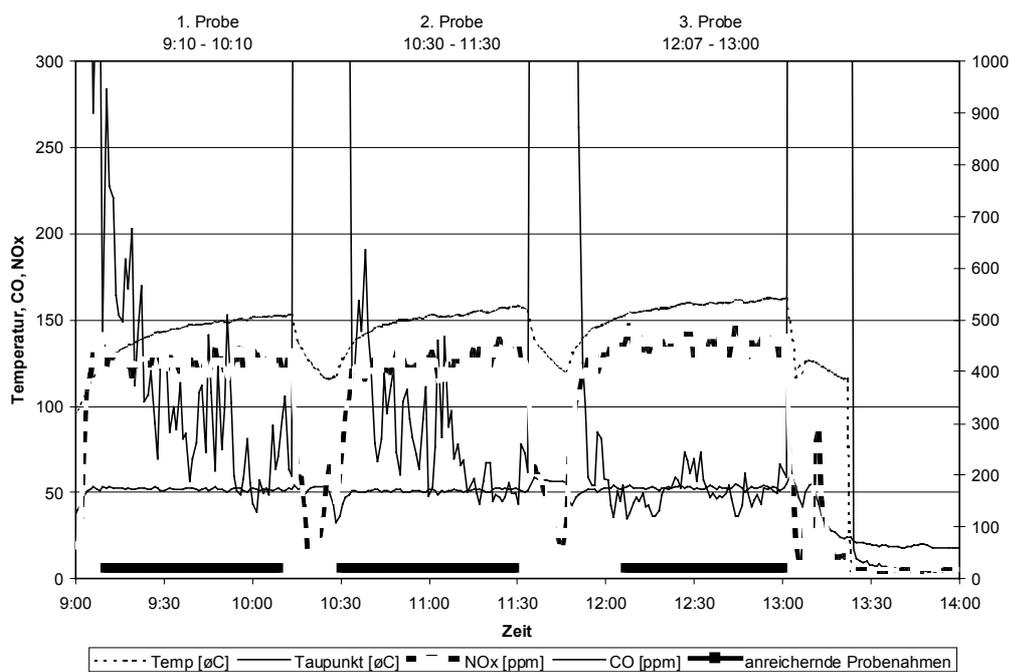
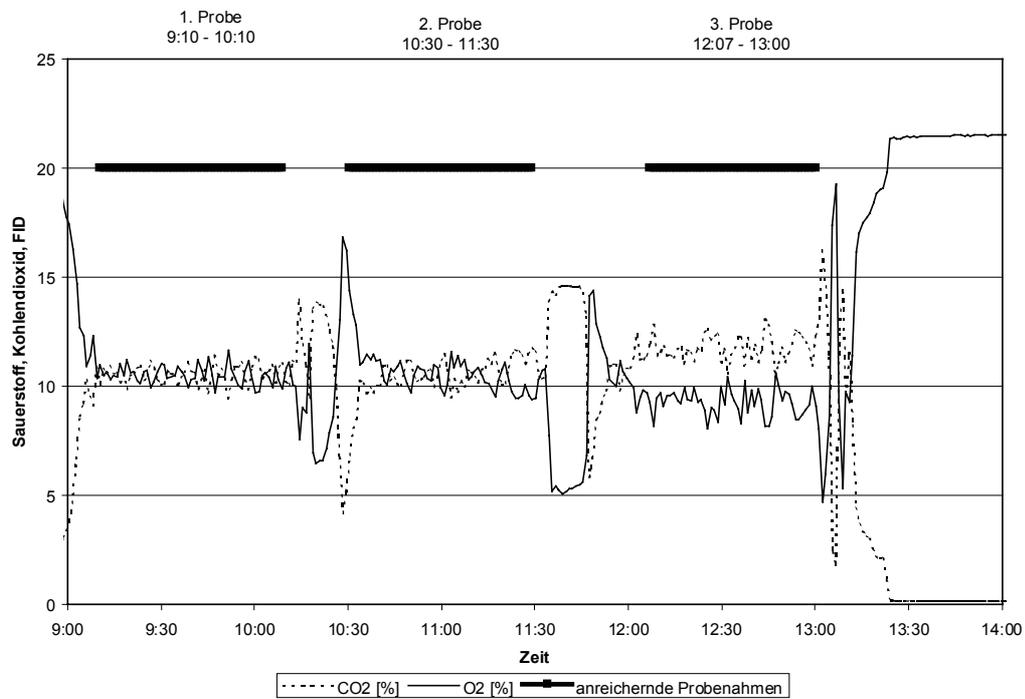


Tabelle A2.3: Dioxin- und PAK-Daten der Anlage D

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	3.4	3.5	0.040
2,3,7,8-TCDD	0.17	0.24	0.0011
Summe PeCDD	5.3	3.7	0.078
1,2,3,7,8-PeCDD	0.51	0.23	0.0089
Summe HxCDD	9.1	5.2	0.18
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.64	< 0.46	0.012
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.97	< 0.46	0.016
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.75	< 0.51	0.013
Summe HpCDD	11	7.0	0.41
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	6.1	4.1	0.21
OCDD	15	8.1	1.1
Summe TCDF	13	11	0.16
2,3,7,8-TCDF	0.36	0.56	0.0087
Summe PeCDF	14	8.7	0.23
1,2,3,7,8-PeCDF	0.93	0.50	0.019
2,3,4,7,8-PeCDF	0.85	0.48	0.023
Summe HxCDF	7.8	4.6	0.43
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.89	0.45	0.038
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.84	0.34	0.045
1,2,3,7,8,9-HxCDF	< 0.71	< 0.49	0.015
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.91	1.0	0.055
Summe HpCDF	4.5	4.2	0.63
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	4.5	2.9	0.30
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	< 2.3	< 0.97	0.11
OCDF	< 2.1	3.9	0.99
Σ PCDD	45	28	1.8
Σ PCDF	42	32	2.4
Σ PCDD/F	87	60	4.2
Σ I-TEQ	1.7	1.1	0.047
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthren	15	4'600	k.M.
Pyren	9.9	4'000	k.M.
Benzo[c]phenanthren	0.18	280	k.M.
Benzo[ghi]fluoranthren	< 0.06	870	k.M.
Benz[a]anthracen	0.35	920	k.M.
Chrysen	0.79	940	k.M.
Benzo[e]pyren	0.31	1'400	k.M.
Benzo[b]fluoranthren	0.42	960	k.M.
Benzo[k]fluoranthren	0.13	330	k.M.
Benzo[a]pyren	0.067	670	k.M.
Benzo[ghi]perylen	0.23	820	k.M.
Dibenz[ah]anthracen	0.25	< 0.06	k.M.
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0.075	600	k.M.
Anthanthren	0.075	100	k.M.
Coronen	0.30	160	k.M.
Σ PAK	28	17'000	k.M.
Σ Karzinogene EPA	2.1	4'400	k.M.
Σ Karzinogene IARC (WHO)	1.3	3'500	k.M.

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

ANHANG 2.4 ANLAGE E

On-Line Aufzeichnungen der Anlage E

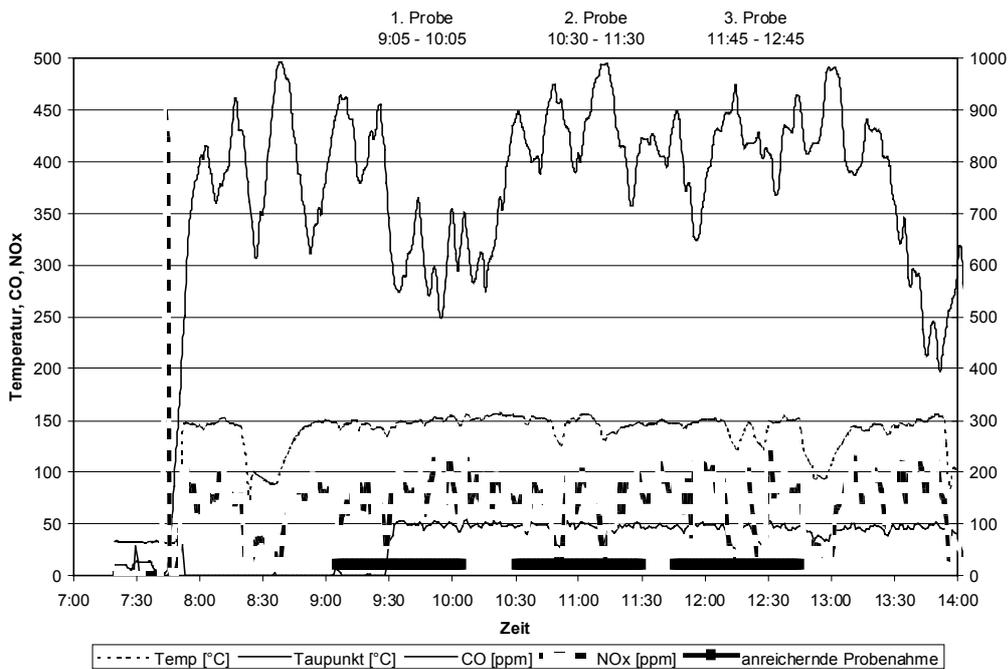
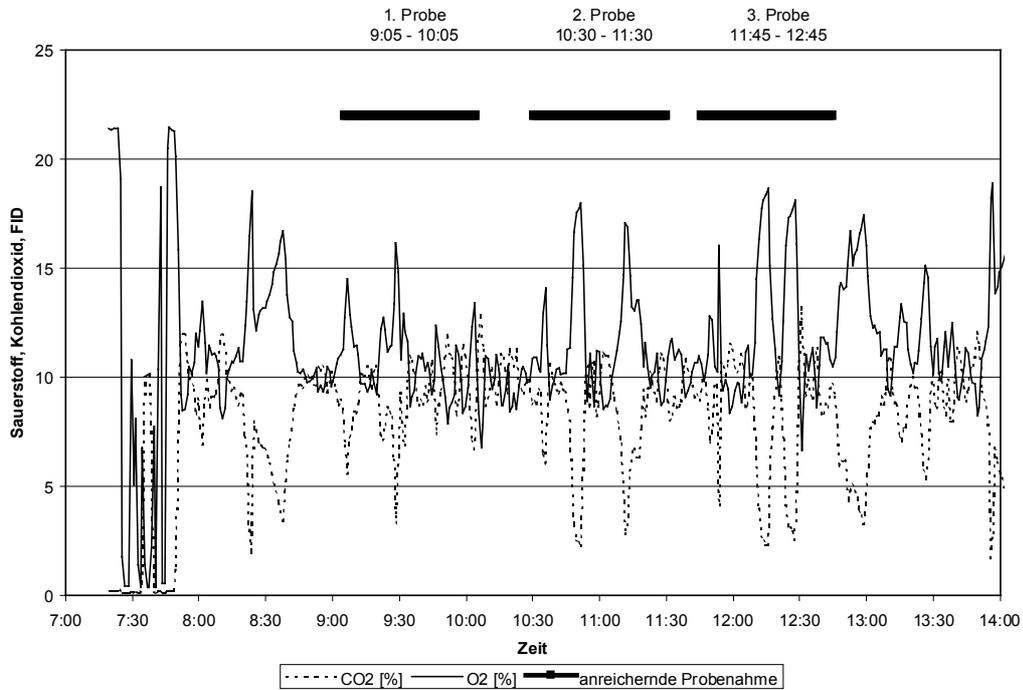


Tabelle A2.4: Dioxin- und PAK-Daten der Anlage E

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	n.n.	19	0.012
2,3,7,8-TCDD	0.37	1.0	0.00024
Summe PeCDD	n.n.	15	0.0066
1,2,3,7,8-PeCDD	0.30	< 2.6	0.00069
Summe HxCDD	7.1	34	0.013
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.14	< 4.2	0.0016
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.34	< 4.4	0.0022
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.33	< 5.3	0.00092
Summe HpCDD	10	110	0.023
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	4.9	60	0.012
OCDD	13	30	0.039
Summe TCDF	3.4	89	0.052
2,3,7,8-TCDF	0.14	4.9	0.0024
Summe PeCDF	4.9	42	0.035
1,2,3,7,8-PeCDF	0.24	1.6	0.0021
2,3,4,7,8-PeCDF	0.23	2.8	0.0032
Summe HxCDF	5.0	16	0.028
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.37	< 2.3	0.0023
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.25	< 2.6	0.0023
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.43	< 4.1	0.00042
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.34	< 4.6	0.0032
Summe HpCDF	4.4	26	0.021
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	2.8	26	0.011
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.65	< 15	0.0021
OCDF	2.00	< 39	0.011
Σ PCDD	31	210	0.093
Σ PCDF	20	210	0.15
Σ PCDD/F	50	420	0.24
Σ I-TEQ	0.98	8.1	0.0041
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthen	1.4	1'400	6.8
Pyren	0.77	1'500	5.8
Benzo[c]phenanthren	< 0.06	110	0.36
Benzo[ghi]fluoranthen	< 0.06	580	1.2
Benz[a]anthracen	0.16	500	0.96
Chrysen	0.27	660	1.7
Benzo[e]pyren	< 0.06	1'000	0.72
Benzo[b]fluoranthen	0.14	820	1.1
Benzo[k]fluoranthen	< 0.06	280	0.35
Benzo[a]pyren	< 0.06	460	0.26
Benzo[ghi]perylen	< 0.06	1'700	0.49
Dibenz[ah]anthracen	< 0.06	44	< 0.0003
Indeno[1,2,3-cd]pyren	< 0.06	1'700	0.90
Anthanthren	< 0.06	200	0.028
Coronen	< 0.06	1'400	0.24
Σ PAK	2.9	12'000	21
Σ Karzinogene EPA	0.65	4'400	5.3
Σ Karzinogene IARC (WHO)	0.38	3'800	3.6

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

ANHANG 2.5 ANLAGE F

On-Line Aufzeichnungen der Anlage F

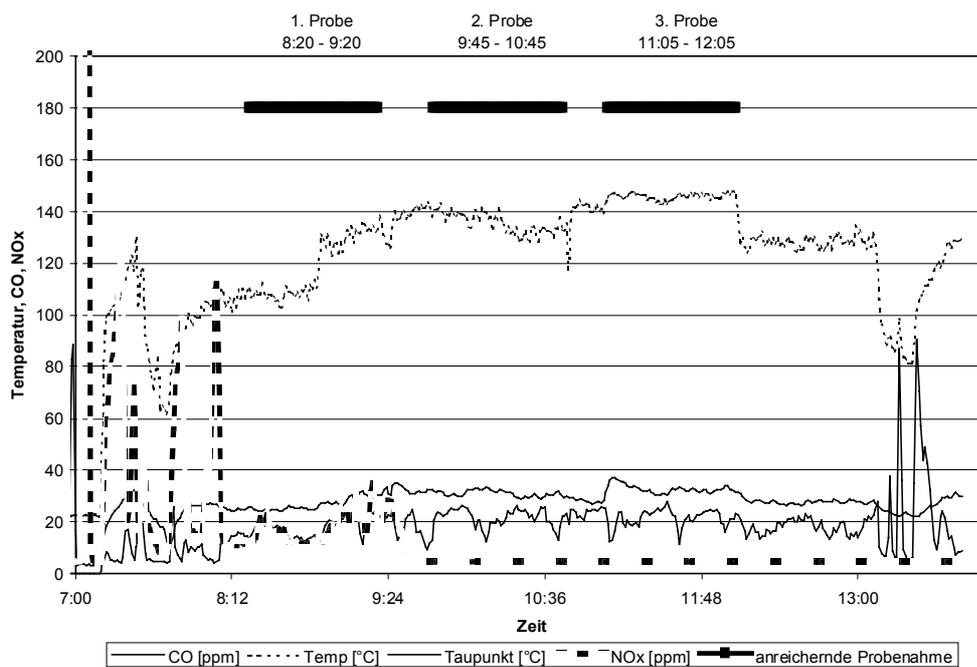
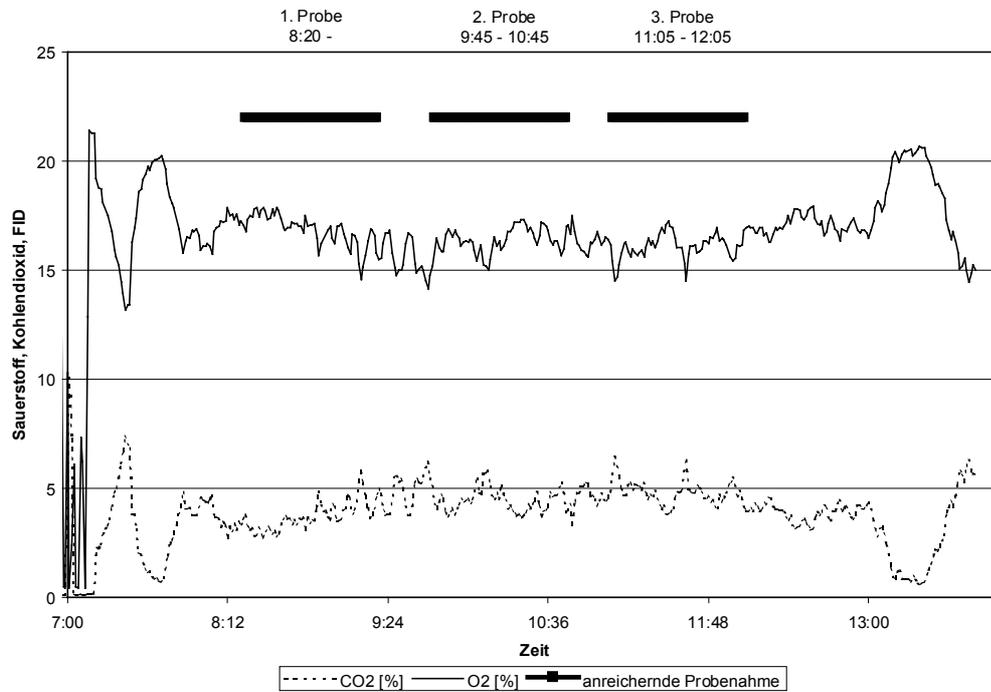


Tabelle A2.5: Dioxin- und PAK-Daten der Anlage F

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	8'800	88'000	9.1
2,3,7,8-TCDD	280	1'100	0.19
Summe PeCDD	14'000	165'000	15
1,2,3,7,8-PeCDD	1'500	6'500	1.5
Summe HxCDD	28'000	342'000	25
1,2,3,4,7,8-HxCDD	1'400	19'000	1.1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	2'200	24'000	2.0
1,2,3,7,8,9-HxCDD	2'200	25'000	1.4
Summe HpCDD	36'000	306'000	27
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	20'000	159'000	13
OCDD	36'000	273'000	21
Summe TCDF	21'000	216'000	60
2,3,7,8-TCDF	580	7'700	1.6
Summe PeCDF	26'000	266'000	53
1,2,3,7,8-PeCDF	1'400	19'000	2.7
2,3,4,7,8-PeCDF	2'700	14'000	5.1
Summe HxCDF	27'000	249'000	42
1,2,3,4,7,8-HxCDF	3'300	30'000	4.8
1,2,3,6,7,8-HxCDF	3'300	30'000	4.9
1,2,3,7,8,9-HxCDF	290	210	0.44
2,3,4,6,7,8-HxCDF	4'300	39'000	7.0
Summe HpCDF	32'000	295'000	41
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	20'000	181'000	26
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	3'200	25'000	3.3
OCDF	21'000	150'000	18
Σ PCDD	123'000	1'180'000	97
Σ PCDF	127'000	1'180'000	210
Σ PCDD/F	250'000	2'350'000	310
Σ I-TEQ	4'700	34'000	6.4
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthren	55	130	0.16
Pyren	46	35	0.14
Benzo[c]phenanthren	3.6	16	0.010
Benzo[ghi]fluoranthren	12	17	0.037
Benz[a]anthracen	14	35	0.0032
Chrysen	19	140	0.024
Benzo[e]pyren	6.4	38	0.0060
Benzo[b]fluoranthren	12	85	0.0088
Benzo[k]fluoranthren	2.4	11	0.0016
Benzo[a]pyren	3.1	8.6	< 0.0006
Benzo[ghi]perylen	2.6	17	0.0022
Dibenz[ah]anthracen	< 0.06	1.7	< 0.0006
Indeno[1,2,3-cd]pyren	2.6	39	0.0032
Anthanthren	1.2	19	< 0.0006
Coronen	5.0	75	0.0082
Σ PAK	180	660	0.41
Σ Karzinogene EPA	53	320	0.043
Σ Karzinogene IARC (WHO)	34	180	0.018

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

ANHANG 2.6 ANLAGE G

On-Line Aufzeichnungen der Anlage G

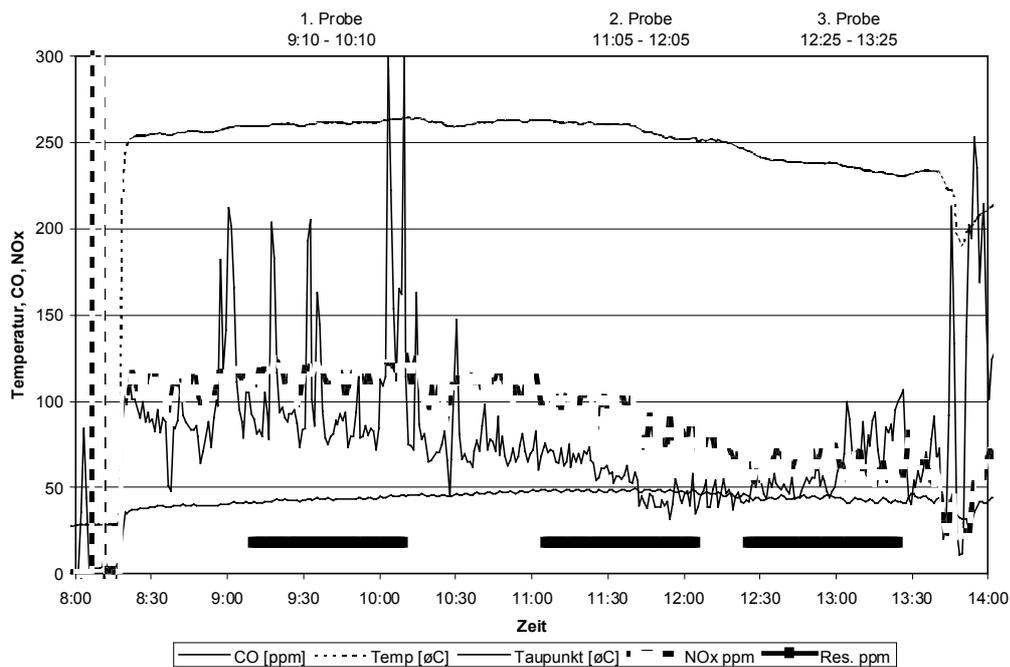
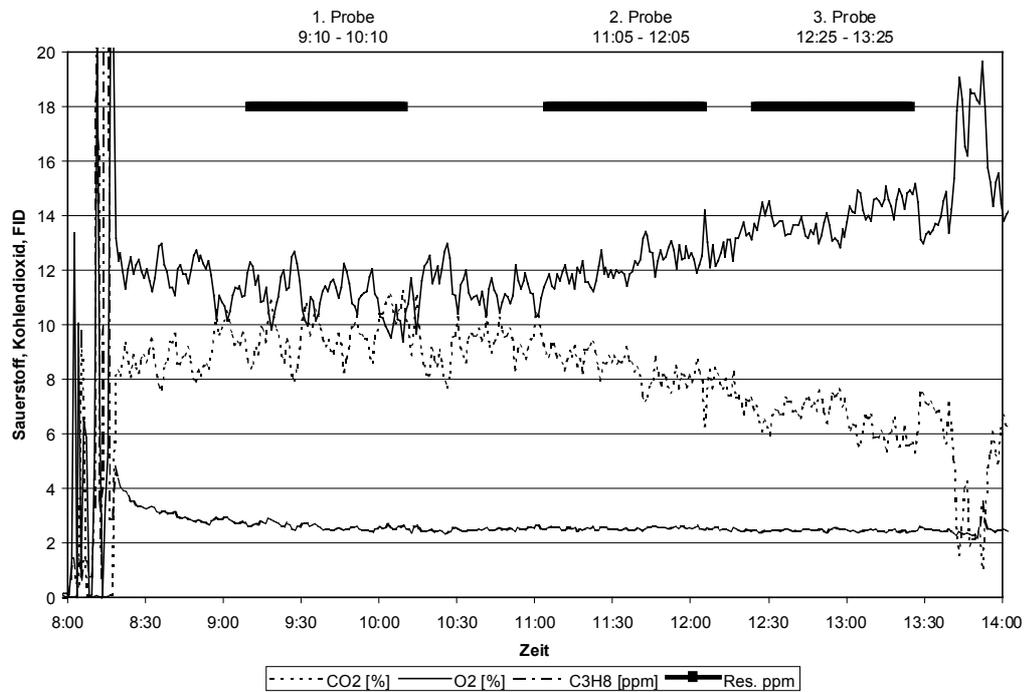


Tabelle A2.6: Dioxin- und PAK-Daten der Anlage G

	Brennstoff ¹⁾	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	3.8	4.6	600	0.081
2,3,7,8-TCDD	0.50	0.49	21	0.0034
Summe PeCDD	4.5	6.9	810	0.077
1,2,3,7,8-PeCDD	0.56	1.1	110	0.0093
Summe HxCDD	14	19	970	0.13
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.80	1.0	73	0.0082
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1.8	1.7	120	0.015
1,2,3,7,8,9-HxCDD	1.1	1.6	78	0.0092
Summe HpCDD	57	27	580	0.080
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	33	15	340	0.042
OCDD	280	68	340	0.085
Summe TCDF	29	25	5'800	1.1
2,3,7,8-TCDF	1.8	1.7	290	0.045
Summe PeCDF	25	25	3'100	0.73
1,2,3,7,8-PeCDF	1.1	1.7	230	0.031
2,3,4,7,8-PeCDF	2.5	2.5	400	0.057
Summe HxCDF	19	18	2'800	0.42
1,2,3,4,7,8-HxCDF	4.0	2.0	280	0.037
1,2,3,6,7,8-HxCDF	2.2	2.5	250	0.037
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.57	0.33	39	0.0050
2,3,4,6,7,8-HxCDF	2.5	2.2	250	0.041
Summe HpCDF	29	10	710	0.11
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	15	5.5	330	0.052
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	1.0	1.2	91	0.013
OCDF	26	5.7	91	0.020
Σ PCDD	360	120	3'300	0.45
Σ PCDF	130	84	13'000	2.4
Σ PCDD/F	490	210	16'000	2.8
Σ I-TEQ	4.4	4.0	430	0.059
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthen	k.M.	11	17	0.011
Pyren	k.M.	7.1	14	0.0075
Benzo[c]phenanthren	k.M.	0.50	0.82	0.0015
Benzo[ghi]fluoranthen	k.M.	2.7	7.2	0.0040
Benz[a]anthracen	k.M.	2.8	3.5	0.0011
Chrysen	k.M.	3.2	5.0	0.0045
Benzo[e]pyren	k.M.	1.5	2.1	0.0021
Benzo[b]fluoranthen	k.M.	3.8	3.8	0.0020
Benzo[k]fluoranthen	k.M.	0.90	1.0	0.00056
Benzo[a]pyren	k.M.	1.2	0.77	< 0.0003
Benzo[ghi]perylen	k.M.	0.97	0.39	0.0027
Dibenz[ah]anthracen	k.M.	0.11	0.17	< 0.0003
Indeno[1,2,3-cd]pyren	k.M.	1.2	1.6	0.0015
Anthanthren	k.M.	0.29	0.11	< 0.0003
Coronen	k.M.	< 0.06	< 0.06	0.0029
Σ PAK	k.M.	37	57	0.042
Σ Karzinogene EPA	k.M.	13	16	0.0099
Σ Karzinogene IARC (WHO)	k.M.	10	11	0.0053

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

ANHANG 2.7 ANLAGE I

On-Line Aufzeichnungen der Anlage I

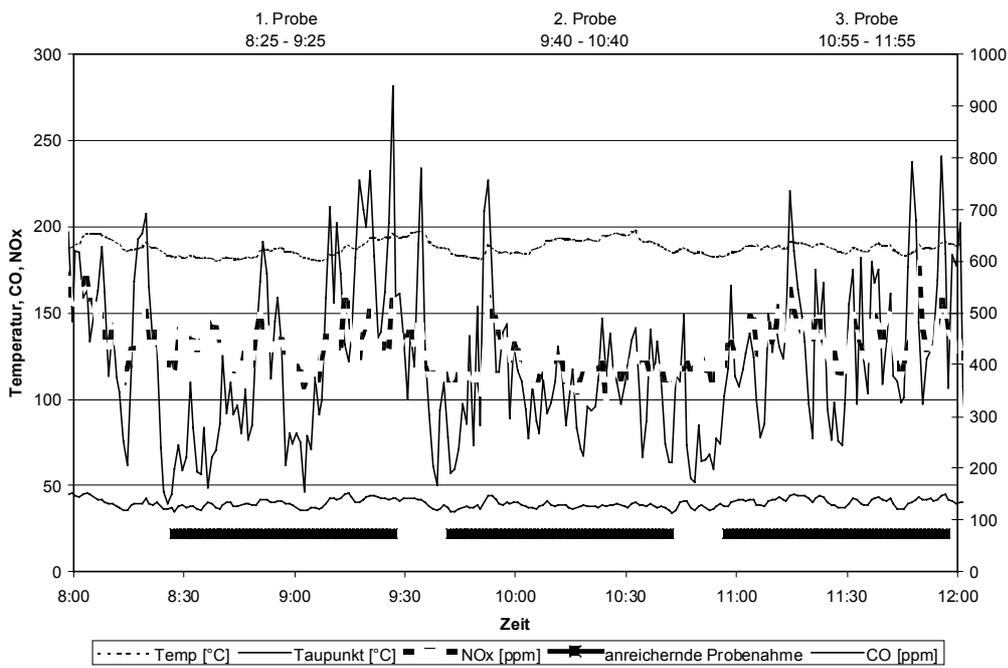
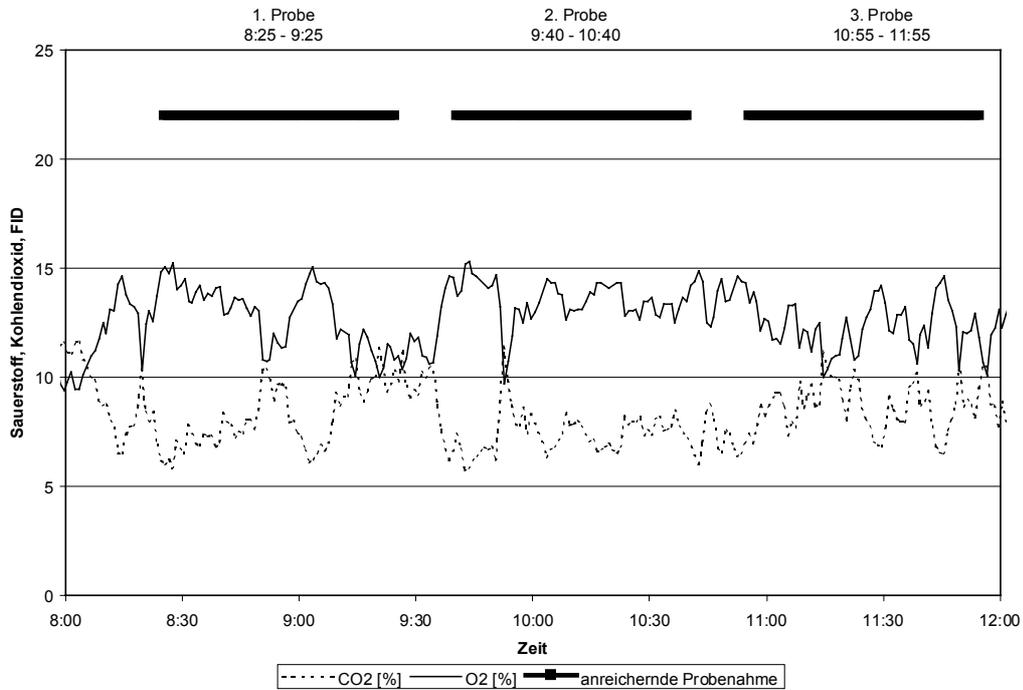


Tabelle A2.7: Dioxin- und PAK-Daten der Anlage I

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	390	8'800	4.5
2,3,7,8-TCDD	9.9	63	0.13
Summe PeCDD	260	6'500	3.1
1,2,3,7,8-PeCDD	26	210	0.34
Summe HxCDD	160	5'800	1.4
1,2,3,4,7,8-HxCDD	7.3	280	0.096
1,2,3,6,7,8-HxCDD	15	340	0.12
1,2,3,7,8,9-HxCDD	7.0	300	0.091
Summe HpCDD	67	2'200	0.47
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	37	1'200	0.23
OCDD	40	990	0.14
Summe TCDF	1'300	33'000	58
2,3,7,8-TCDF	33	630	2.1
Summe PeCDF	560	15'000	18
1,2,3,7,8-PeCDF	35	680	1.3
2,3,4,7,8-PeCDF	50	650	1.5
Summe HxCDF	160	4'100	5.4
1,2,3,4,7,8-HxCDF	22	510	0.56
1,2,3,6,7,8-HxCDF	24	510	0.63
1,2,3,7,8,9-HxCDF	1.4	54	0.076
2,3,4,6,7,8-HxCDF	17	420	0.43
Summe HpCDF	43	1'300	1.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	27	790	0.66
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	4.5	140	0.12
OCDF	11	180	0.12
Σ PCDD	910	24'000	9.6
Σ PCDF	2'100	53'000	83
Σ PCDD/F	3'000	78'000	93
Σ I-TEQ	63	860	1.5
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthren	210	5'800	2.9
Pyren	110	2'900	0.89
Benzo[c]phenanthren	9.7	210	0.095
Benzo[ghi]fluoranthren	17	800	0.92
Benz[a]anthracen	25	640	0.13
Chrysen	34	730	0.57
Benzo[e]pyren	5.3	530	0.47
Benzo[b]fluoranthren	9.6	640	0.75
Benzo[k]fluoranthren	2.4	240	0.22
Benzo[a]pyren	0.91	180	0.015
Benzo[ghi]perylen	1.3	250	0.25
Dibenz[ah]anthracen	< 0.06	10	0.012
Indeno[1,2,3-cd]pyren	2.4	290	0.50
Anthanthren	< 0.06	21	0.028
Coronen	0.75	47	0.15
Σ PAK	430	13'300	7.9
Σ Karzinogene EPA	75	2'700	2.3
Σ Karzinogene IARC (WHO)	41	2'000	1.6

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

ANHANG 2.8 ANLAGE J

On-Line Aufzeichnungen der Anlage J

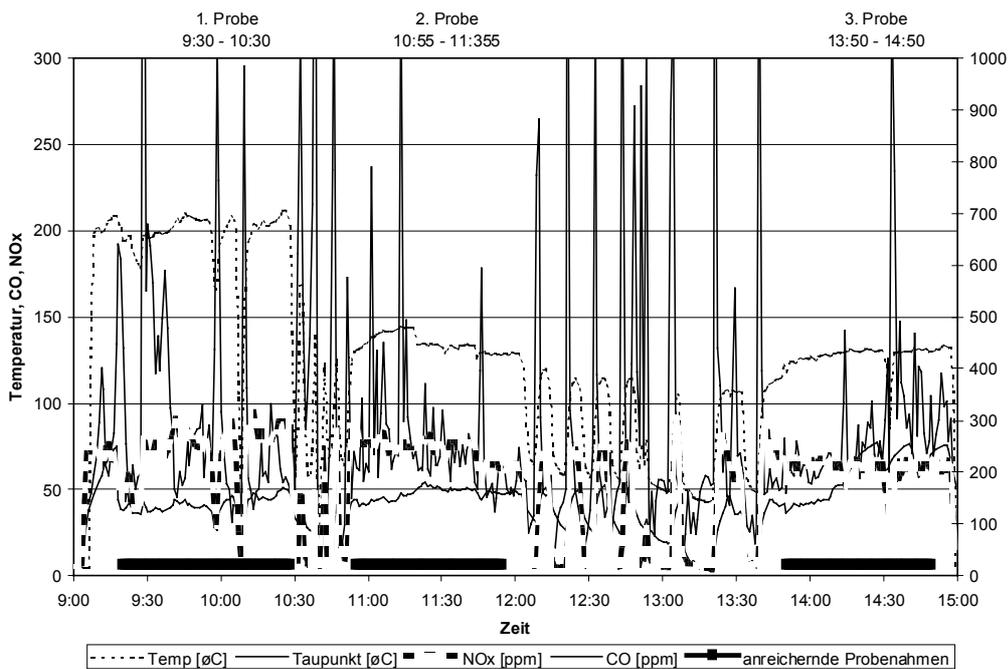
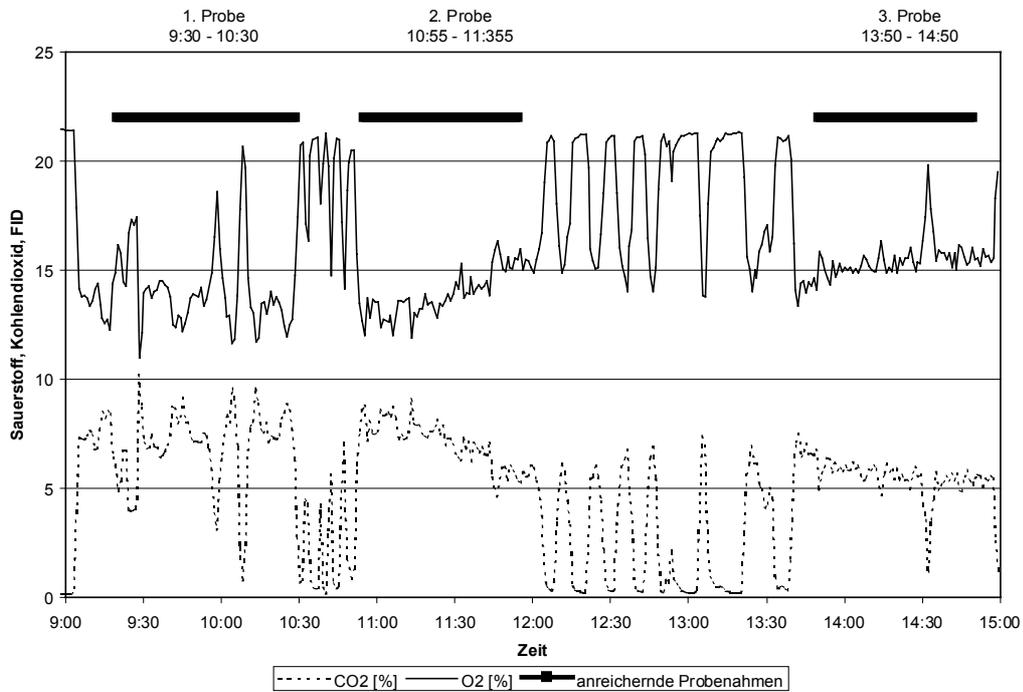


Tabelle A2.8: Dioxin- und PAK-Daten der Anlage J

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	6.4	4'200	6.1
2,3,7,8-TCDD	0.23	61	0.13
Summe PeCDD	8.5	4'100	4.5
1,2,3,7,8-PeCDD	0.31	140	0.53
Summe HxCDD	11	3'900	3.2
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.20	180	0.25
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.27	300	0.30
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.27	270	0.22
Summe HpCDD	7.2	2'200	1.7
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	3.8	1'200	0.87
OCDD	9.6	1'600	0.81
Summe TCDF	50	12'000	48
2,3,7,8-TCDF	1.2	260	1.9
Summe PeCDF	18.0	6'100	15
1,2,3,7,8-PeCDF	0.84	370	1.0
2,3,4,7,8-PeCDF	1.05	270	1.3
Summe HxCDF	7.3	1'800	5.1
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.71	160	0.46
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.70	130	0.48
1,2,3,7,8,9-HxCDF	< 0.48	18	0.074
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.70	200	0.41
Summe HpCDF	3.9	680	1.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	2.7	410	0.62
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	< 0.88	66	0.11
OCDF	< 2.0	150	0.22
Σ PCDD	43	16'000	16
Σ PCDF	81	21'000	69
Σ PCDD/F	120	37'000	86
Σ I-TEQ	1.5	460	1.5
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthren	21	76	k.M.
Pyren	15	66	k.M.
Benzo[c]phenanthren	1.0	5.8	k.M.
Benzo[ghi]fluoranthren	0.061	23	k.M.
Benz[a]anthracen	3.4	25	k.M.
Chrysen	2.9	34	k.M.
Benzo[e]pyren	< 0.06	8.9	k.M.
Benzo[b]fluoranthren	1.5	14	k.M.
Benzo[k]fluoranthren	0.39	3.9	k.M.
Benzo[a]pyren	0.32	3.0	k.M.
Benzo[ghi]perylen	0.18	1.9	k.M.
Dibenz[ah]anthracen	< 0.06	< 0.06	k.M.
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0.46	3.6	k.M.
Anthanthren	< 0.06	0.11	k.M.
Coronen	< 0.06	< 0.06	k.M.
Σ PAK	46	260	k.M.
Σ Karzinogene EPA	8.9	83	k.M.
Σ Karzinogene IARC (WHO)	6.0	49	k.M.

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

ANHANG 2.9 ANLAGE K

On-Line Aufzeichnungen der Anlage K

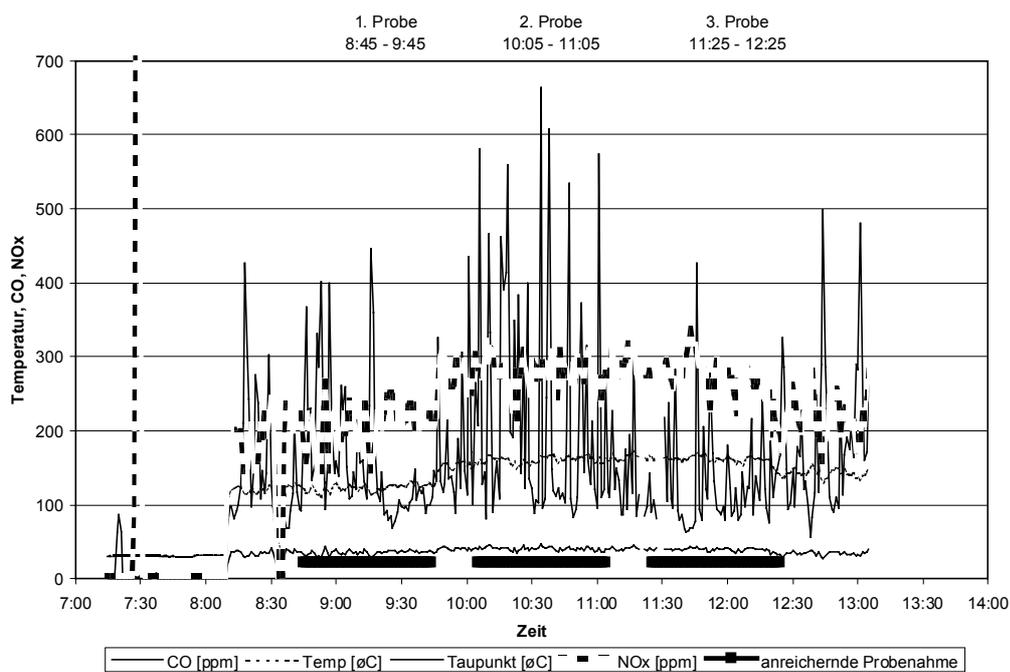
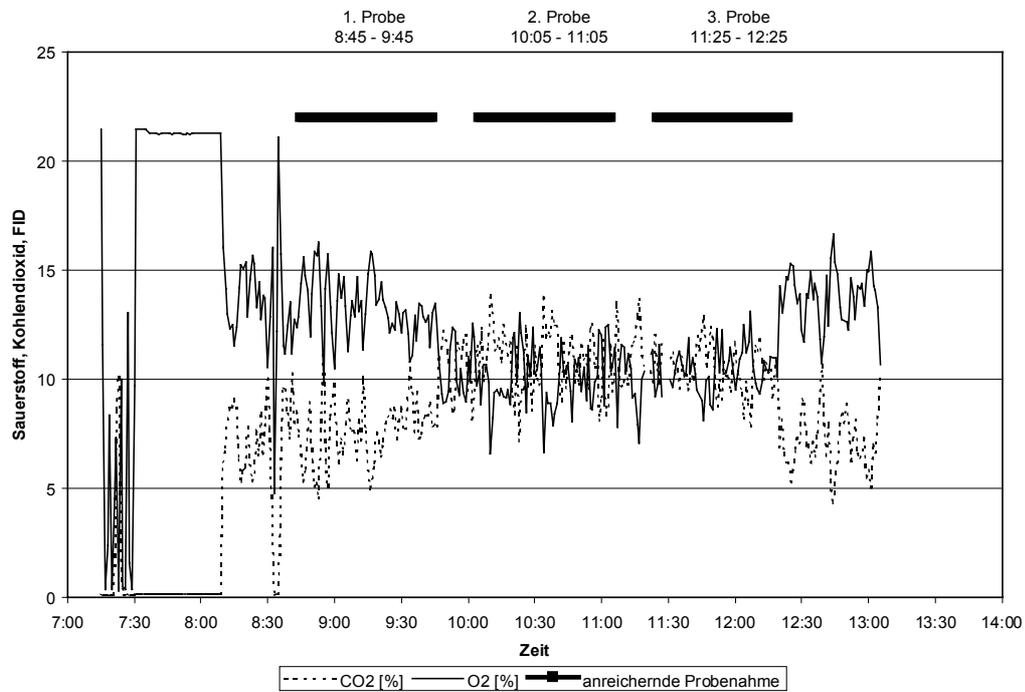


Tabelle A2.9: Dioxin- und PAK-Daten der Anlage K

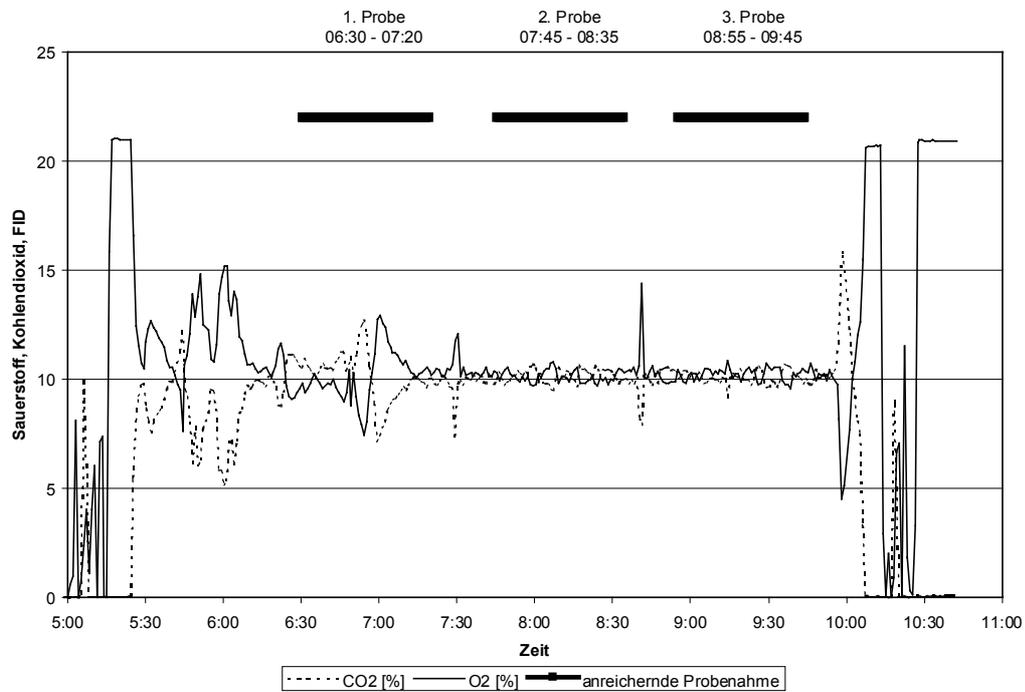
	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	400	14'000	3.4
2,3,7,8-TCDD	8.7	93	0.11
Summe PeCDD	470	10'000	3.2
1,2,3,7,8-PeCDD	46	390	0.29
Summe HxCDD	650	10'000	1.9
1,2,3,4,7,8-HxCDD	19	520	0.09
1,2,3,6,7,8-HxCDD	44	720	0.15
1,2,3,7,8,9-HxCDD	50	650	0.12
Summe HpCDD	510	4'700	0.91
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	270	2'600	0.46
OCDD	250	1'800	0.42
Summe TCDF	1'300	34'000	28
2,3,7,8-TCDF	46	740	0.077
Summe PeCDF	50	21'000	13
1,2,3,7,8-PeCDF	36	1'100	0.66
2,3,4,7,8-PeCDF	46	1'100	0.95
Summe HxCDF	50	7'900	4.2
1,2,3,4,7,8-HxCDF	20	930	0.38
1,2,3,6,7,8-HxCDF	44	920	0.41
1,2,3,7,8,9-HxCDF	10	130	0.06
2,3,4,6,7,8-HxCDF	70	960	0.42
Summe HpCDF	70	3'600	1.4
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	350	1'700	0.65
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	56	500	0.19
OCDF	60	760	0.34
Σ PCDD	2'300	41'000	9.8
Σ PCDF	3'000	67'000	47
Σ PCDD/F	5'300	108'000	57
Σ I-TEQ	92	1'500	0.95
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthren	870	4'700	14
Pyren	1'000	5'000	18
Benzo[c]phenanthren	69	190	0.17
Benzo[ghi]fluoranthren	320	1'200	2.9
Benz[a]anthracen	260	530	0.42
Chrysen	260	790	0.78
Benzo[e]pyren	140	490	0.83
Benzo[b]fluoranthren	170	460	0.84
Benzo[k]fluoranthren	65	170	0.26
Benzo[a]pyren	99	230	0.10
Benzo[ghi]perylen	88	290	2.5
Dibenz[ah]anthracen	2.6	< 0.06	< 0.0003
Indeno[1,2,3-cd]pyren	78	170	1.9
Anthanthren	8.7	25	0.16
Coronen	18	91	3.6
Σ PAK	3'500	14'000	46
Σ Karzinogene EPA	930	2'400	4.6
Σ Karzinogene IARC (WHO)	680	1'600	3.5

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

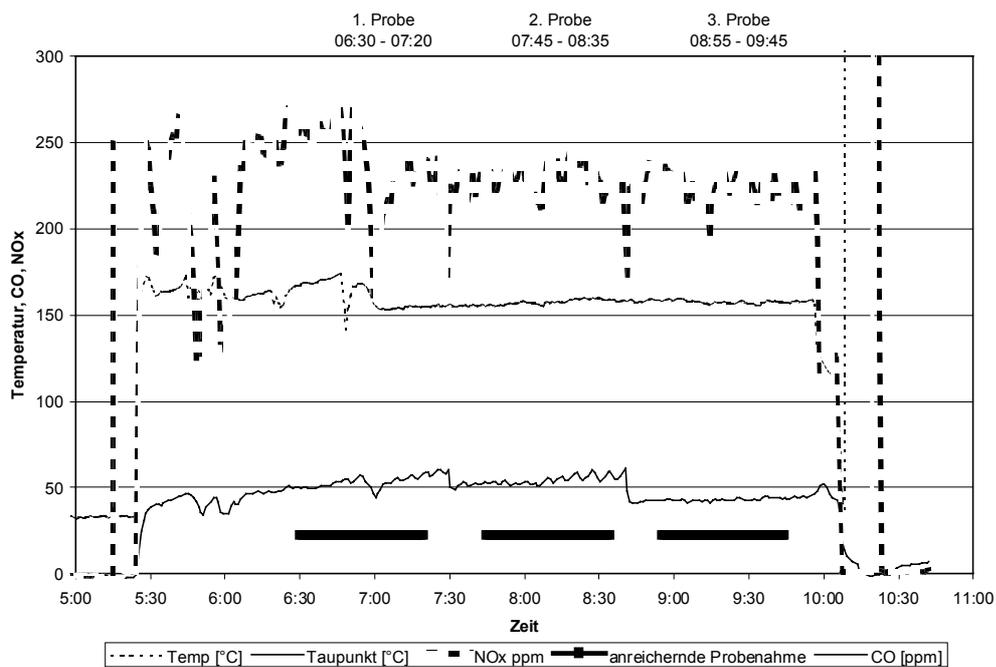
²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

ANHANG 2.10 ANLAGE L

On-Line Aufzeichnungen der Anlage L



Bemerkung: ab13:30 Ausfall der elektronischen Datenerfassung



Dioxin- und PAK-Daten der Anlage L

	Rostasche ¹⁾	Zyklonasche ¹⁾	Abgas ²⁾
Dioxin/ Furan	ng/kg	ng/kg	ng/m ³
Summe TCDD	n.n.	2'400	1.3
2,3,7,8-TCDD	< 0.52	140	0.034
Summe PeCDD	n.n.	2'000	2.0
1,2,3,7,8-PeCDD	< 0.89	380	0.16
Summe HxCDD	n.n.	2'200	4.2
1,2,3,4,7,8-HxCDD	< 0.69	160	0.29
1,2,3,6,7,8-HxCDD	< 0.63	230	0.36
1,2,3,7,8,9-HxCDD	< 0.71	180	0.34
Summe HpCDD	4.0	1'200	6.4
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	2.2	690	3.3
OCDD	11	490	8.7
Summe TCDF	5.9	14'000	7.1
2,3,7,8-TCDF	0.25	430	0.11
Summe PeCDF	n.n.	4'800	7.4
1,2,3,7,8-PeCDF	< 0.23	440	0.44
2,3,4,7,8-PeCDF	< 0.42	350	0.44
Summe HxCDF	n.n.	2'200	6.6
1,2,3,4,7,8-HxCDF	< 0.41	270	0.76
1,2,3,6,7,8-HxCDF	< 0.35	340	0.71
1,2,3,7,8,9-HxCDF	< 0.99	30	0.088
2,3,4,6,7,8-HxCDF	< 0.46	160	0.52
Summe HpCDF	n.n.	930	7.8
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	< 0.91	490	4.4
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	< 2.3	110	0.88
OCDF	< 11	150	6.4
Σ PCDD	20	8'400	23
Σ PCDF	10	22'000	35
Σ PCDD/F	31	31'000	58
Σ I-TEQ	1.7	720	0.77
PAK	μg/kg	μg/kg	μg/m ³
Fluoranthren	4.8	6.7	0.061
Pyren	4.4	6.9	0.045
Benzo[c]phenanthren	0.10	0.16	0.0013
Benzo[ghi]fluoranthren	0.41	0.92	0.0066
Benz[a]anthracen	0.46	0.41	0.0015
Chrysen	0.66	0.65	0.0049
Benzo[e]pyren	0.40	0.094	0.0038
Benzo[b]fluoranthren	0.58	0.14	0.0067
Benzo[k]fluoranthren	0.19	< 0.06	0.0013
Benzo[a]pyren	0.26	< 0.06	0.00033
Benzo[ghi]perylen	0.38	< 0.06	0.0026
Dibenz[ah]anthracen	< 0.06	< 0.06	< 0.0003
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0.38	< 0.06	0.0039
Anthanthren	< 0.06	< 0.06	0.00033
Coronen	0.15	< 0.06	0.0069
Σ PAK	13	16	0.15
Σ Karzinogene EPA	2.5	1.3	0.020
Σ Karzinogene IARC (WHO)	1.9	0.61	0.014

¹⁾ bezogen auf trockene Asche

²⁾ bezogen auf 11 Vol-% O₂, trockenes Abgas

Literatur

- [1] Luftreinhalte-Verordnung (LRV) (Stand 3. Februar 1998) vom 16. Dez. 1985.
- [2] Schweizerische Vereinigung für Holzenergie: Holzfeuerungen richtig betreiben. Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern (1998).
- [3] Bühler, R.: DIANE Nr. 8: Energie aus Altholz und Altpapier-Schlussbericht inkl. nachgeforderte Ergänzungen. Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) / DIANE 8, Bern (1996).
- [4] Stoff-Verordnung vom Juni 1986 (Stand 1992).
- [5] Labor der Urkantone: Bericht der HOLZKAMPAGNE 98, Mitteilung vom 23. August 1999.
- [6] Empfehlungen über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen (Emissions-Messempfehlungen). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern (1996).
- [7] Noger, D., Felber, H., Pletscher, E., Hasler, P.: Verwertung und Beseitigung von Holzaschen; Schriftenreihe Umwelt Nr. 269. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern (1996).
- [8] Obernberger, I.: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen. Verlag für die Technische Universität Graz, Graz (1997).
- [9] Marutzky, R.: Entsorgung von Rest- und Gebrauchtholz: Eine Bestandesaufnahme der aktuellen Situation in Deutschland. Holz-Zentralblatt 146, 2201-2204 (1997).
Marutzky, R., Schmidt, W.: Alt- und Restholz. Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik. VDI Verlag, Düsseldorf (1996).
- [10] DIN 51731; Prüfung fester Brennstoffe-Preßlinge aus naturbelassenem Holz (1996).
- [11] Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft: Wegleitung zur Bewertung und Zulassung von Düngern und diesen gleichgestellten Erzeugnissen. Bern (1999).
- [12] Voß, A.: Aufkommen und Zusammensetzung schutzmittelbehandelter Althölzer und ihre Entsorgung. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg. Kommissionsverlag Buchhandlung Max Wiedebusch, Hamburg (1998).
- [13] Hoffmann, V.: Zuordnungskriterien für Rest- und Altholz zur energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung. In: Marutzky, R., Schmidt, W.: Alt- und Restholz. VDI Verlag, Düsseldorf, 15-24 (1996).
- [14] LAGA-Entwurf: Anforderungen an die Entsorgung von Holzabfällen. Entwurf nach mündlicher Erörterung. 12. Januar 1998 (1998).
- [15] Nussbaumer, T., Hasler, P., Jenni, A., Erny, M., Vock, W.: Emissionsarme Altholznutzung in 1-10 MW-Anlagen. Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) / DIANE 8, Bern (1994).
- [16] Hasler, P., Kasser, U.: Rückstände aus der Altholzverbrennung. Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) / DIANE 8, Bern (1994).

- [17] Müller, J.: Diffuse Quellen von PCB in der Schweiz; Schriftenreihe Umwelt Nr. 229. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern (1994).
- [18] Scheffer, F., Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde 14. Auflage. ENKE Verlag, Stuttgart (1998).
- [19] Nussbaumer, T., Hasler, P.: Dioxin- und Furanemissionen aus Altholzfeuerungen. Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) / DIANE 8, Bern (1994).
Hasler, P, Nussbaumer, T., Bühler, R.: Dioxinemissionen von Holzfeuerungen. Schriftenreihe Umwelt Nr. 208. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern (1993).
- [20] Ballschmiter, K., Bacher, R.: Dioxine. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1996).
- [21] VDI 3462 Blatt 4 (Entwurf); Emissionsminderung - Holzbearbeitung und -verarbeitung - Verbrennen von Holz und Holzwerkstoffen ohne Holzschutzmittel (1996).
- [22] Bundesimmissionsschutz-Verordnung (17. BImSchV): Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe. Bundesgesetzblatt (BGBl.), Teil I, 2545-2553 (1990).
- [23] VDI 3462 Blatt 5 (Entwurf); Emissionsminderung - Holzbearbeitung und -verarbeitung - Verbrennen von Holz und Holzwerkstoffen mit Holzschutzmittel (1996).