



**Gesundheitliche
Aspekte der energetischen
Biomassenutzung**

*Aspects sanitaires de la
production d'énergie à partir
de biomasses*

ABSCHLUSSBERICHT
RAPPORT FINAL

LAUFZEIT | DURÉE 01.01.2013 - 31.05.2015

Dieser Abschlussbericht entstand im Rahmen des EU-Forschungsprojektes »BIOCOMBUST: Gesundheitliche Aspekte der energetischen Biomassenutzung«, das im Rahmen des Programms INTERREG IV gefördert wurde.

Ce rapport final a été conçu dans le cadre du projet européen de recherche « BIOCOMBUST: Aspects sanitaires de la production d'énergie à partir de biomasses », cofinancé par le programme INTERREG IV.



IMPRESSUM | MENTIONS LÉGALES

Autoren | Auteurs:
BIOCOMBUST-Team | Équipe BIOCOMBUST

Online verfügbar unter | Disponible en ligne sous
www.biocombust.eu

Layout | Mise en Page
Dr. Sabine Richter, Christoph Maschowski

Druckerei / Imprimerie:
Les Bateliers, Strasbourg

Auflage / Édition:
150

Copyright: Fotos | Photos
BIOCOMBUST, F. Drewnick, fotolia, DWD

April 2015 / Avril 2015



Von der Europäischen Union kofinanziert | Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)
Cofinancé par l'Union Européenne | Fonds européen de développement régional (FEDER)

Der Oberrhein wächst zusammen, mit jedem Projekt | Dépasser les frontières: projet après projet



INHALTSVERZEICHNIS

TABLE DE MATIÈRE

1	EINLEITUNG	INTRODUCTION	11
2	KONTEXT	CONTEXTE	13
2.1	Biomasse-Verbrennung und Klimawandel	La combustion de biomasse et le changement climatique	13
2.2	Biomasse-Verbrennung und Luftqualität	La combustion de biomasse et la qualité de l'air	16
2.2.1	Die Brennstoffe	Les combustibles	16
2.2.2	Die Feuerungsanlagen	Les installations de combustion	17
2.2.3	Luftschadstoff-Emissionen im Oberrhein	Les émissions de polluants atmosphériques dans la vallée du Rhin supérieur	19
2.2.4	Konzentrationen in der Umgebungsluft	Les concentrations dans l'air ambiant	19
2.2.4.1	Schwebstaub	Les particules	19
2.2.4.2	Benzo(a)pyren	Le benzo(a)pyrène	22
2.3	Auswirkungen auf die Gesundheit	Impact sur la santé	23
2.4	Das Projekt BIOCOMBUST - Gesundheitliche Aspekte der energetischen Nutzung von Biomasse	Le projet BIOCOMBUST - Aspects sanitaires de la production d'énergie à partir de biomasse	26
2.4.1	Forschungsthema I: Charakterisierung der Partikel-Emissionen sowie der Aschen aus der Biomasse-Verbrennung	Thème de recherche I : Caractérisation des émissions atmosphériques particulaires et des cendres issues de la combustion biomasse	26
2.4.2	Forschungsthema 2: Untersuchungen zu biologischen Effekten von Partikel-Emissionen und Aschen aus der Biomasse-Verbrennung	Thème de recherche 2 : Études des effets biologiques des émissions de particules et des cendres issues de la combustion de la biomasse	27
2.4.3	Forschungsthema 3: Verwendung der Aschen aus Biomasse-Verbrennung als Ersatzstoff für Zementklinker	Thème de recherche 3 : Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse dans la production de ciment	28
2.4.4	Öffentlichkeitsarbeit	Communication	28
3	CHARAKTERISIERUNG DER PARTIKEL-EMISSIONEN SOWIE DER ASCHEN AUS DER BIOMASSE-VERBRENNUNG	CARACTERISATION DES EMISSIONS ATMOSPHERIQUES PARTICULAIRES ET DES CENDRES ISSUES DE LA COMBUSTION BIOMASSE	29
3.1	Verbrennungsanlagen und Messungen	Présentation des combustions et mesures	30
3.1.1	Kleine Verbrennungsanlagen im Labor	Petite échelle de combustion au laboratoire	30
3.1.2	Mittelgroße Verbrennungsanlagen	Echelle de combustion intermédiaire	32
3.1.3	Große Verbrennungsanlagen (≥1.7 MW)	Grandes installations de combustions (≥1.7 MW)	33
3.1.4	Außenluftmessungen	Campagne de mesures dans l'air extérieur	35
3.2	Experimentelle Methoden und Brennstoffe	Présentation des procédures expérimentales et biomasses	35

3.2.1	Experimentelle Methoden für Biomasse-Verbrennung im MPIC- Labor	Procédures expérimentales pour la combustion de la biomasse au laboratoire MPIC	35
3.2.2	Brennstoffe in GRE-Laborexperimenten	Biomasses pour la combustion au laboratoire GRE	37
3.2.3	Brennstoffe in mittleren und großen Holz-Verbrennungsanlagen	Biomasses pour la combustion dans des installations de combustion grandes et moyennes	37
3.3	Ergebnisse	Résultats	40
3.3.1	Emissionen aus Biomasse-Verbrennung	Emissions issues de la combustion de biomasse	40
3.3.2	Morphologie und Fluoreszenz	Morphologie et fluorescence des particules	45
3.3.3	Chemische und mineralogische Untersuchungen	Analyse chimique et minéralogique	46
3.3.3.1	Chemische Analyse	Analyse chimique	47
3.3.3.1.1	Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA)	Analyse par spectrométrie de fluorescence X (FX)	47
3.3.3.1.2	Atomabsorptions-Spektrometrie (AAS)	Spectrométrie d'absorption atomique (AAS)	50
3.3.3.2	Mineralogische Zusammensetzung	Composition minéralogique	52
3.3.3.2.1	Röntgendiffraktometrische Analyse (RDA)	Analyse par diffraction à rayons X (DX)	52
3.3.3.2.2	Analyse mittels Rasterelektronen-Mikroskop	Analyse par microscope électronique à balayage	53
3.3.4	Zusammensetzung des Kohlenstoffs in den Partikeln	Spéciation du carbone au sein des particules	55
3.3.5	Umwelteinfluss großer Biomasse-Verbrennungsanlagen	Influence environnementale des grandes chaudières à biomasse	57
3.3.6	Sammlung, Messung und Charakterisierung von atmosphärischen Partikeln an ausgewählten Schwarzwald-Standorten	Collecte, mesure et caractérisation des particules atmosphériques sur des sites sélectionnés en Forêt-Noire	58
4	UNTERSUCHUNGEN ZU BIOLOGISCHEN EFFEKTEN VON PARTIKEL-EMISSIONEN UND ASCHEN AUS DER BIOMASSE-VERBRENNUNG	ETUDES DES EFFETS BIOLOGIQUES DES EMISSIONS DE PARTICULES ET DES CENDRES ISSUES DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE	65
4.1	Einleitung	Introduction	66
4.2	Material und Methoden	Matériels et méthodes	68
4.2.1	Untersuchtes Verbrennungsmaterial	Matériaux de combustion étudiés	68
4.2.2	Verwendete Zellen	Cellules utilisées	70
4.2.3	Standardarbeitsanweisungen (SOPs)	Modes opératoires standard (SOP)	70
4.2.4	Bestimmung der Zellviabilität	Détermination de la viabilité cellulaire	71
4.2.5	Bestimmung der Genotoxizität	Détermination de la génotoxicité	71
4.2.6	Mikroskopie	Microscopie	72

4.2.7	Bestimmung von NF-κB als Entzündungsmediator	Détermination de NF-κB comme médiateur de l'inflammation	72
4.2.8	Bestimmung von IL-8	Détermination de l'interleukine 8 (IL-8)	72
4.2.9	Bestimmung von Sauerstoffradikalen (ROS)	Détermination des radicaux libres (ROS)	72
4.2.10	Bestimmung der Aktivierung Zellstress-relevanter Proteine (p38, JNK)	Détermination de l'activation de protéines associées au stress cellulaire (p38, JNK)	73
4.2.11	Bildung von Stress-Proteinen mit schützender Funktion (Nrf-2, HO-1)	Production de protéines de stress à fonction protectrice (Nrf-2, HO-1)	73
4.2.12	Statistische Auswertung	Exploitation statistique	73
4.3	Ergebnisse	Résultats	73
4.3.1	Fluoreszenz-mikroskopische Untersuchungen von Partikeln in humanen Lungenepithelzellen	Etude par microscopie de fluorescence de particules dans les cellules épithéliales du poumon humain	73
4.3.2	Zelltoxische und genotoxische Auswirkungen verschiedener Feinstaub-Partikel aus der Biomasse-Verbrennung	Impacts cytotoxiques et génotoxiques des différentes particules fines issues de la combustion de biomasse	74
4.3.3	Exposition von Zellen an der Luft/Flüssigkeits-Grenzschicht	Exposition de cellules à l'interface air-liquide	79
4.3.4	Zellviabilität und genotoxisches Potential von Verbrennungspartikeln in Abhängigkeit ihres PAK-Gehalts	Viabilité cellulaire et potentiel génotoxique de particules de combustion en fonction de leur concentration en HAP	80
4.3.5	Auswirkungen unterschiedlicher Feinstaub-Partikel auf Entzündungsparameter und den oxidativen Stress in Lungenepithelzellen und Makrophagen	Impacts des différentes particules fines sur les réactions inflammatoires et le stress oxydatif dans les cellules épithéliales de poumon et les macrophages	81
4.3.6	Auswirkungen von Feinstaub-Partikeln auf eine Stressantwort in Makrophagen	Impacts des particules fines sur une réponse au stress dans les macrophages	82
4.3.7	Auswirkung von Feinstaub auf Lungenzellen bei längerer Einwirkung	Impact des particules fines sur les cellules pulmonaires lors d'une exposition prolongée	85
4.3.8	Auswirkung von Feinstaub auf ein 3D-organotypisches Lungenzellkulturmodell	Impact des particules fines sur un modèle tridimensionnel de culture organotypique de cellules pulmonaires	86
4.3.9	Etablierung von 3D-Kulturen der Lunge	Etablissement de cultures tridimensionnelles dans le poumon	87
4.4	Abschließende Bewertung und Ausblick	Conclusions et perspectives	88
5	VERWENDUNG DER ASCHEN AUS BIOMASSE-VERBRENNUNG ALS ERSATZSTOFF FÜR ZEMENTKLINKER	VALORISATION DES CENDRES ISSUES DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE DANS LA PRODUCTION DE CIMENT	91
5.1	Versuchsaufbau	Dispositifs et procédures expérimentaux	92
5.2	Proben	Échantillons	92
5.3	Ergebnisse	Résultats	93
6	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	COMMUNICATION	97
6.1	Instrumente der Öffentlichkeitsarbeit	Outils de la communication	98

6.2	Das Kommunikationskonzept „Wissenschaft hautnah“	Concept de communication „la science vécue de près“	100
6.2.1	„Wissenschaft hautnah“: Poster	„La science vécue de près“: Posters	101
6.2.2	„Wissenschaft hautnah“: Der BIOCOMBUST-Stand	„La science vécue de près“: Le stand BIOCOMBUST	103
6.2.3	Virtuelle Plattform „backstage“	Plate-forme virtuelle „backstage“	103
6.3	Veranstaltungen	Manifestations	105
6.3.1	Veranstaltungen im Rahmen von „Wissenschaft hautnah“	Manifestations dans le cadre de „La science vécue de près“	105
6.3.2	Veranstaltungen mit projektspezifischen Zielgruppen	Manifestations avec des groupes-cibles spécifiques au projet	107
7	ZUSAMMENFASSUNG	CONCLUSIONS	109
7.1	Forschungsthema I: Charakterisierung der Partikel-Emissionen sowie der Aschen aus der Biomasse-Verbrennung	Thème de recherche I : Caractérisation des émissions atmosphériques particulières et des cendres issues de la combustion biomasse	110
7.2	Forschungsthema 2: Untersuchungen zu biologischen Effekten von Partikel-Emissionen und Aschen aus der Biomasse-Verbrennung	Thème de recherche 2 : Études des effets biologiques des émissions de particules et des cendres issues de la combustion de la biomasse	111
7.3	Forschungsthema 3: Verwendung der Aschen aus Biomasse-Verbrennung als Ersatzstoff für Zementklinker	Thème de recherche 3 : Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse dans la production de ciment	112
7.4	Öffentlichkeitsarbeit	Communication	113

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

LISTE DE FIGURES

1	Chemische Zusammensetzungen von Schwebstäuben	Spéciation chimique des particules	21
2	Transport von Partikeln im menschlichen Atemstrakt	Transport des particules dans le système respiratoire humain	23
3	Steigerung der Lebenserwartung und durchschnittliche Konzentration von PM _{2,5} in µg/m ³	Gains d'espérance de vie et concentrations moyennes en PM _{2,5} en µg/m ³	25
4	Beispiele für Biomasse-Brennstoffe	Exemples de combustibles 'biomasses'	30
5	Versuchsaufbau der Labormessungen und Zeitverlauf der CO ₂ -Emissionen für einen typischen Messtag.	Dispositif de mesure en laboratoire et émissions de CO ₂ sur une journée de mesure	31
6	Mittlere Partikelanzahlgrößenverteilungen verschiedener Brennphasen	Distribution en nombre des particules lors des deux principales phases de combustion de bois de hêtre	42
7	Partikel unter Weißlicht und als Fluoreszenzaufnahme	Vue des particules en lumière blanche et en fluorescence	45
8	Gehalte der Hauptelemente in Flugaschen	Teneur en éléments majeur dans les cendres volantes	49
9	Gehalte der Spurenelemente in Flugaschen	Teneur en éléments-traces dans les cendres volantes	49
10	Gehalte ausgewählter Schwermetalle und Arsen in den Rostaschen und Flugaschen	Teneur en métaux lourds et métalloïdes dans les cendres volantes et cendres résiduelles	50 / 51
11	Semi-quantitative mineralogische Zusammensetzung ausgewählter Rost- und Flugaschen	Analyse semi-quantitative de la composition minéralogique des cendres volantes et des cendres résiduelles	52
12	REM Aufnahmen von verschiedenen Partikeln	Clichés MEB de différentes particules	54
13	Verteilung von Ruß in der Umgebung von Ammertzwiller und St. Peter	Répartition géographique de suie dans l'air d'Ammertzwiller et de St. Peter	57
14	Geografische Lage der Probenahme-standorte	Localisation géographique des sites d'échantillonnage	59
15	Mittlere Größenverteilungen der Massenkonzentration „opaker“ atmosphärischer Partikel für Standorte im Schwarzwald	Distributions de taille moyenne en concentration massique des particules atmosphériques "opaques" pour les sites de la Forêt Noire	60
16	Box-Whisker-Plots der berechneten Massenkonzentrationen für drei Schwarzwaldstandorte	Graphe boîte à moustaches des concentrations massiques calculées pour 3 sites de la Forêt Noire	61
17	REM Aufnahmen und EDX-Spektren atmosphärischer Partikel vom Standort: Horben-Bohrer.	Images MEB et spectres EDX des particules atmosphériques du site: Horben-Bohrer.	62
18	Schematische Darstellung einer Entzündungsreaktion	Schéma de la réponse inflammatoire	66 / 67
19	Schematische Darstellung einer zellulären Stressantwort	Schéma de la réponse au stress cellulaire	67 / 68

20	Schema zur Untersuchung der biologischen Effekte von Feinstäuben und Flugaschen aus Biomasse-Verbrennungsprozessen.	Schéma relatif à l'étude des effets biologiques des particules fines et des cendres volantes issus de procédés de combustion de biomasse.	71
21	Fluoreszenz-mikroskopische Aufnahmen von humanen Lungenepithelzellen, die mit Feinstäuben aus Buchenholz-Verbrennung exponiert wurden.	Images par microscopie de fluorescence de cellules épithéliales de poumon humain exposé aux particules fines issues de la combustion du bois de hêtre.	74
22	Zellbelastung durch Feinstaub aus der Buchenholz-Verbrennung	Exposition cellulaire à des particules fines issues de la combustion du bois de hêtre	75
23	Kultivierungs- und Expositionseinheit der Firma Vitrocell / Exposition von Lungenepithelzellen mit Flugaschepartikeln aus Holzhackschnitzel-Verbrennung	Module de culture et d'exposition de la société VITROCELL / Exposition de cellules épithéliales de poumon à des particules de cendres volantes issues de la combustion de plaquette	79
24	Toxizität von Verbrennungspartikeln in Abhängigkeit ihres PAK-Gehalts	Toxicité des particules de combustion en fonction de leur teneur en HAP	81
25	Einfluss von Feinstaub aus Biomasse-Verbrennung auf Entzündungen	Implication des particules fines issues de la combustion de biomasse sur l'inflammation	82
26	Auslösung von diversen Schutzmechanismen in Lungenzellen durch Feinstaub	Déclenchement des mécanismes de protection divers dans les cellules pulmonaires par les particules fines.	84 / 85
27	Schematische Darstellung des dreidimensionalen-organotypischen Lungenzellkulturmodells	Schéma du modèle tridimensionnel de culture organotypique de cellules pulmonaires	87
28	Bildung von 3D-Kulturen mit Hilfe der sogenannten „Hanging Drops“	Production de cultures cellulaires 3D à l'aide de « hanging drops »	88
29	Rasterelektronen-mikroskopische Aufnahme von Flugaschepartikeln	Clichés MEB de particules de cendres volantes	95
30	Website BIOCOMBUST	Page web BIOCOMBUST	98
31	Facebook Seite des Projekts	Page Facebook du projet	99
32	Stempel "Wissenschaft hautnah"	Tampon "La science vécu de près"	101
33	Poster „Wissenschaft hautnah“: SAMMELN	Poster „Science vécue de près“: COLLECTE	102
34	BIOCOMBUST Stand auf Dialog Science Auftaktveranstaltung, 2013	Stand BIOCOMBUST sur la conférence de lancement "Dialog Science", 2013	103
35	Startseite der virtuellen Plattform, französische Version	Page d'accueil de la plateforme virtuelle, version française	104
36	Stand Fête de la Science, Mulhouse 2013	Stand Fête de la Science, Mulhouse 2013	106
37	Kinder-Uni "Wie klein ist klein"	Université pour enfants "C'est comment petit?"	106

TABELLENVERZEICHNIS

LISTE DE TABLEAUX

1	Definition der Zielvorgaben des Klima- und Energiepakets für Deutschland und Frankreich	Déclinaison des objectifs du paquet Energie-Climat pour l'Allemagne et la France	14
2	Schwebstaub- und Kohlenmonoxid-Emissionen bei der Biomasse-Verbrennung nach Anlagentyp	Emissions de particules et monoxyde de carbone selon le type d'installation de combustions de biomasse	18
3	Schwebstaub- und Kohlenmonoxid-Emissionen nach Brennstoffen	Emissions de particules et monoxyde de carbone selon le type de combustible	18
4	Sektorale Verteilung der Emissionen von Partikeln und Stickstoffdioxid	Répartition sectorielle des émissions de particules et de dioxyde d'azote	19
5	Benzo(a)pyren-Jahresmittelwerte im Elsass und in Baden-Württemberg	Moyennes annuelles de benzo(a)pyrène enAlsace et en Bade Wurtemberg	22
6	Übersicht der großen Biomasse-Verbrennungsanlagen	Liste des techniques de filtration sur les chaudières à biomasse	33
7	Ausgewählte Brennstoffe und Brennbedingungen bei Labormessungen am Scheitholzofen	Combustibles et conditions de combustion (poêle à bûche)	36
8	Übersicht der Anlagen, Brennstoffe und Probenahmen	Résumé des combustions et prélèvements	38
9	Eigenschaften der Biomasse-Brennstoffe	Propriétés des combustibles biomasses	39
10	Einfluss von Verbrennungsparametern auf die Hauptemissionsfaktoren	Influence des paramètres de combustion sur les principaux facteurs d'émissions	41
11	Zusammenfassung der Emissionen	Résumé des combustions et émissions	44
12	Probenübersicht	Combustibles étudiés	46
13	Chemische Elementgehalte der Aschen, bestimmt mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse	Composition chimique des cendres par fluorescence à rayons X	48
14	Kohlenwasserstoff-Verbindungen in Partikeln aus der Biomasse-Verbrennung	Composition carbonée des particules de combustion	55 / 56
15	Untersuchte Feinstäube und Flugaschen	Particules fines et cendres volantes étudiées	69 / 70
16	Zellviabilität von Feinstaub ausgesetzten Zellen und Genotoxizität von Feinstäuben und Flugaschen	Viabilité cellulaire de cellules exposées à des particules et génotoxicité de particules fines et cendres volantes.	77 / 78
17	Übersicht der Ascheproben, die den Zementmischungen beigegeben wurden	Origine des cendres de biomasse utilisées en mélanges avec le ciment	92
18	Qualitative Auswertung der Eigenschaften der Zementmischungen	Evaluation qualitative des propriétés des différents mélanges de ciment	94

EINLEITUNG INTRODUCTION



1 EINLEITUNG

Das Projekt BIOCOMBUST forscht zu gesundheitlichen Aspekten der energetischen Nutzung von Biomasse.

Als interdisziplinäres EU-Forschungsprojekt untersuchte BIOCOMBUST die Auswirkungen von Partikeln aus der Biomasse-Verbrennung auf die menschliche Gesundheit. Gefördert im Rahmen des INTERREG IV-Programms waren dabei Partner aus Frankreich, aus der Schweiz und aus Deutschland beteiligt, die ihr komplementäres Fachwissen aus den Bereichen der Verbrennungs-, Atmosphären-, Umwelt- und Geowissenschaften, Umweltmedizin, Pharmazie und Angewandte Geowissenschaften einbrachten.

Forschungsinteresse

Die Verbrennung unterschiedlicher Arten von Biomasse führt zu unterschiedlichen Emissionen. Teile davon - nämlich die Partikel - wurden für das Projekt gesammelt und analysiert. Im Zentrum des Interesses standen die Charakterisierung der Partikel, die Auswirkung der Verbrennung von Biomasse auf die Luftqualität und die damit verbundenen möglichen Einflüsse auf die menschliche Gesundheit. Zudem beschäftigte sich das Projekt mit der Frage, ob anfallende Aschen in der Zementproduktion als Klinkerersatz verwendet werden können.

Öffentlichkeitsarbeit

BIOCOMBUST zielte auf die Verbesserung der Lebensqualität der Bevölkerung im Oberrheingebiet durch die Förderung eines verantwortlichen und nachhaltigen Wachstums der Biomasse-Branche. Das Projektteam war auf vielen Veranstaltungen präsent und hat seine Projektziele, seine wissenschaftlichen Inhalte und seine Ergebnisse unter dem Motto »Wissenschaft hautnah« der Bevölkerung vermittelt. Online-Formate und gedruckte Broschüren, Führungen und eine gezielte Pressearbeit haben das Projekt einem weiten Kreis von Interessierten vorgestellt.

1 INTRODUCTION

Le projet BIOCOMBUST a pour but d'étudier les aspects sanitaires de la production d'énergie à partir de biomasses

En tant que projet de recherche européen et interdisciplinaire, BIOCOMBUST a étudié les effets des particules issues de la combustion de biomasse sur la santé humaine. Subventionné dans le cadre du programme INTERREG IV, le projet a impliqué des partenaires français, suisses et allemands qui ont apporté leurs connaissances techniques complémentaires dans des domaines comme la combustion, les sciences de l'atmosphère, de l'environnement et de la terre, la médecine environnementale, la pharmacie et les sciences appliquées de la terre.

Intérêt scientifique

La combustion de différents types de biomasse aboutit à différentes émissions. Une partie - à savoir les particules - a été collectée et analysée dans le cadre du projet. La caractérisation des particules, les effets de la combustion de la biomasse sur la qualité de l'air ainsi que les éventuels effets sur la santé humaine ont été au centre des travaux. En outre, le projet s'est intéressé à la question de savoir si les cendres de combustion récupérées pouvaient servir de substitut au clinker dans la production de ciment.

Communication

BIOCOMBUST s'est focalisé sur l'amélioration de la qualité de vie de la population du Rhin supérieur à travers la promotion d'un développement responsable et durable de la branche biomasse. L'équipe du projet a été présente à plusieurs manifestations et a présenté ses objectifs et contenus scientifiques et ses résultats auprès de la population avec le label « La science vécue de près ». Des contenus en , des brochures imprimées, des visites et une présence ciblée dans la presse ont permis de présenter le projet à un large public.

KONTEXT
CONTEXTE



2 KONTEXT

2.1 Biomasse-Verbrennung und Klimawandel

Biomasse war lange Zeit die wichtigste Heizenergiequelle. In Europa wurde Energieholz ab Ende des 19., Anfang des 20. Jahrhunderts nach und nach durch fossile Brennstoffe wie Kohle oder Heizöl ersetzt und nur noch wegen der Gemütlichkeit oder zur Zusatzbeheizung (Kaminfeuer) verwendet.

Im Rahmen des Energiewandels wird Biomasse heute als erneuerbarer Energieträger verwendet, mit dem der Rückgriff auf fossile Energieträger reduziert werden kann, und der seit einigen Jahren im Kampf gegen den Klimawandel und zur Minderung der Treibhausgasemissionen eingesetzt wird.

Die europäischen Zielvorgaben

Angesichts der klimatischen Herausforderungen hat die europäische Kommission als Unterzeichner des Kyoto-Protokolls im Dezember 2008 das „Klima- und Energiepaket“ verabschiedet. Dieses Maßnahmenpaket setzt den Mitgliedstaaten der Europäischen Union 3 Zielvorgaben, die sogenannten „3 x 20 bis 2020“-Ziele:

- Verbesserung der Energieeffizienz um 20 %,
- Senkung der Treibhausgasemissionen um 20 % gegenüber dem Stand von 1990,
- Steigerung des Anteils erneuerbarer Energiequellen am europäischen Energiemix auf 20 %.

Bei den beiden letztgenannten Zielvorgaben handelt es sich um rechtsverbindliche Verpflichtungen, die für die verschiedenen Mitgliedstaaten unterschiedlich definiert sind (Tabelle 1). Im Oktober 2014 sind weitere Zielvorgaben hinzugekommen, die bis 2030 verwirklicht werden sollen.

Zielvorgabe / Ojectif	Deutschland / Allemagne	Frankreich / France
Senkung der Treibhausgasemissionen aus nicht unter das EU-EHS fallenden Sektoren (Entscheidung 406/2009/EG) <i>Réduction des émissions de GES pour les secteurs hors ETS (décision 406/2009/CE)</i>	-14 %	-14 %
Anteil erneuerbarer Energiequellen <i>Part des énergies renouvelables</i>	23 %	18 %

2 CONTEXTE

2.1 La combustion de biomasse et le changement climatique

La biomasse a été longtemps la principale source d'énergie pour se chauffer. En Europe, à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème}, le bois-énergie a été, petit à petit, remplacé par des combustibles fossiles comme le charbon ou le pétrole et relégué à des usages d'agrément et d'appoint (feu de cheminée).

Aujourd'hui, dans ce cadre de la transition énergétique, la biomasse constitue une source d'énergie renouvelable qui permet de diminuer le recours aux énergies fossiles mis en œuvre depuis quelques années pour lutter contre le changement climatique et atténuer les émissions de gaz à effets de serre.

Les objectifs européens

Face au défi climatique, la Commission européenne, signataire du protocole de Kyoto, a adopté en décembre 2008 le « Paquet Énergie-Climat » (ou Climat-Énergie). Ce paquet législatif fixe aux Etats membres de l'Union Européenne 3 objectifs dits « 3 fois 20 » à respecter d'ici à 2020 :

- accroître l'efficacité énergétique de 20%.
- réduire de 20% les émissions de GES par rapport aux niveaux de 1990 ;
- faire passer la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique européen à 20%.

Les deux derniers engagements sont déclinés de manière différenciée dans les différents pays membres et sont juridiquement contraignants (tableau 1). A noter qu'en octobre 2014, de nouveaux objectifs à l'échéance 2030 ont été ajoutés.

Tabelle 1: Definition der Zielvorgaben für Deutschland und Frankreich (Klima- und Energiepaket 11-12/Dezember 2008 - EHS: Emissionshandelssystem - http://europa.eu/rapid/press-release_IP-09-628_de.htm?locale=de

Tableau 1 : Déclinaison des objectifs pour l'Allemagne et la France (paquet Energie - Climat 11-12 / décembre 2008 - ETS : Emission Trading Scheme - http://europa.eu/rapid/press-release_IP-09-628_fr.htm?locale=fr

Diese erneuerbare Energie wird als wenig klimaschädlich angesehen, da zwar während der Verbrennung die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan und Lachgas freigesetzt werden; andererseits wird CO₂ durch die Fotosynthese gebunden. Bei nachhaltiger Forstwirtschaft ist daher die CO₂-Bilanz von Holz ausgeglichen. Beim Vergleich der CO₂-Bilanz verschiedener Brennstoffe müssen sowohl die Schritte Transport und Raffination, als auch die „CO₂-Senke“ Fotosynthese berücksichtigt werden. Studien der französischen Agentur für Umwelt und Energiewirtschaft (ADEME) (Praxisleitfaden „Heizen mit Holz“, ADEME - Ausgabe November 2014) haben ergeben, dass beim Heizen mit Gas, Heizöl bzw. Strom 222, 480 bzw. etwa 180 kg CO₂ je MWh emittiert werden. Beim Heizen mit Holz liegt dieser Wert dagegen nur bei 40 kg CO₂.

Biomasse kann für die Wärme- oder die Stromerzeugung oder, in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, für beides genutzt werden. Holz kann in Form von Scheitholz, Hackschnitzeln oder Pellets in privaten Feuerungsanlagen (offene Kamineinsätze, Öfen) oder in Großfeuerungsanlagen mit größerer Kapazität energetisch verwertet werden.

Der Beschaffungsradius darf jedoch nicht erweitert werden, da bei weiten Transportwegen der Preis und die Transport-bedingten CO₂-Emissionen steigen und der energetische und finanzielle Nutzen des Heizens mit Holz so verringert werden.

Konkurrierende Nutzung der Ressource

Idealerweise ist Brennholz ein Nebenprodukt der Nutzwaldwirtschaft. Die starke Nachfrage nach Energieholz führt aber für die Hersteller von Möbelbauplatten und Bauholz zu Problemen bei der Rohstoffbeschaffung, obwohl die Mobilisierung von Bauholz zur Bindung von Kohlenstoff beiträgt: ein Anstieg des Bauholzverbrauchs in Europa um 4 % würde die zusätzliche Bindung von jährlich gleichwertig 150 Millionen Tonnen Kohlenstoff (teq C) Kohlenstoffäquivalenten bedeuten.

Eine Empfehlung zur Entschärfung dieser Nutzungskonkurrenz besteht darin, Möbelholz am Ende seiner Nutzung zu sammeln und der energetischen Verwertung zuzuführen. In diesem Fall muss diese Biomasse jedoch in industriellen Feuerungsanlagen verbrannt werden, die mit leistungsstarken Einrichtungen zur Reinigung der Abluft ausgerüstet sind, um die aus Additiven (Kleber, Lacke, ...) freigesetzten Schadstoffe aufzufangen.

Cette énergie renouvelable est considérée comme peu émettrice de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Lors de la combustion, le bois libère 3 gaz à effet de serre : du dioxyde de carbone, du méthane et protoxyde d'azote. Le dioxyde de carbone (CO₂) sera capté par photosynthèse par les arbres dans le cadre d'une gestion forestière durable. Pour ces raisons, le « bilan CO₂ » s'équilibre dans le temps et son impact est faible sur l'effet de serre. Selon des études de l'ADEME (Guide pratique « Se chauffer au bois », ADEME - édition novembre 2014), en comptabilisant l'énergie consommée du « puits » (captage du CO₂ par photosynthèse) à la chaleur produite, y compris les étapes de transport et raffinage, le chauffage au gaz, au fioul et à l'électricité émet respectivement 222, 480, et environ 180 kg de CO₂ par MWh. Le chauffage au bois n'en émet que 40.

La biomasse peut être utilisée pour produire de la chaleur ou de l'électricité, ou bien les deux dans des installations de cogénération. Le bois peut être valorisé énergétiquement sous forme de bûches, de plaquettes, ou de granulés dans des installations de chauffages domestiques (inserts ouverts, poêles...) ou dans des chaufferies collectives de plus grande capacité.

Attention toutefois, de ne pas élargir les rayons d'approvisionnement car si le bois vient de loin, son prix et les émissions de CO₂ liées à son transport augmenteront, réduisant ainsi le gain énergétique et financier du chauffage au bois.

Conflits d'usage sur la ressource

Idéalement, le bois destiné au chauffage est un sous-produit de l'exploitation des forêts pour le bois d'œuvre. Mais avec la forte demande du bois énergie, les industriels de panneaux d'ameublement et du bois de construction font face à des difficultés pour s'approvisionner en matière première alors que la mobilisation du bois de construction permet de séquestrer le carbone : une augmentation de 4% de la consommation de bois de construction en Europe permettrait de séquestrer près de 150 millions de tonnes équivalent carbone (teq C) supplémentaires par an.

Pour résoudre ce conflit d'usage, une recommandation est de collecter le bois d'ameublement en fin de vie vers des usages énergétiques. Mais dans ce cas, attention à brûler cette biomasse dans des chaudières industrielles équipées de moyens de dépollution performants pour maîtriser les émissions de polluants issus de produits additifs (colles, vernis...).



Die Biomasse-Verbrennung bietet also unbestreitbare Vorteile im Kampf gegen den Klimawandel. Die Region Oberrhein auf beiden Seiten der Grenze möchte daher ihr hohes Biomasse-Potenzial zur Energiegewinnung nutzen. Unvollständige Verbrennung in schlecht gewarteten Öfen kann jedoch bei für die Schadstoffausbreitung ungünstiger Wetterlage die Luftqualität beeinträchtigen. Die Holz-Verbrennung kann eine Quelle erheblicher Luftverunreinigung durch Schwebstaub (PM₁₀ und PM_{2,5}), Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder Nicht Methan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC) (einschließlich Benzol) sein.

2.2 Biomasse-Verbrennung und Luftqualität

Wie bei allen anderen Brennstoffen auch, muss die Biomasse-Verbrennung kontrolliert erfolgen, um die bestmögliche Energieproduktionseffizienz zu erzielen und die Schadstoffemissionen zu minimieren. Diese Kontrolle umfasst sowohl den Brennstoff als auch die verwendete Anlage, ihre Montage und Wartung sowie die Steuerung während der Heizperiode.

Die Verbrennung von fester Biomasse lässt sich nach dem Temperaturanstieg in der Feuerungsanlage (Jean Pierre Sawerysyn Air Pur 81 - 2012) in 3 Phasen unterteilen. In der ersten Phase verdampft das im Brennstoff vorhandene Wasser (Dehydrierung). Bei 200 bis 600°C wird die organische Substanz dann durch die Pyrolysereaktionen in leichtere Moleküle aufgespalten (z. B. Methan), die schließlich mit dem Luftsauerstoff verbrennen.

2.2.1 Die Brennstoffe

Biomasse besteht hauptsächlich aus organischer Substanz, im Wesentlichen Kohlenstoff (Massenanteil von 50 %), Sauerstoff (etwa 44 %), Wasserstoff (6 %). In geringeren Mengen enthält Biomasse Stickstoff (Proteine und Amine), Schwefel und metallische Spurenelemente.

Feste Biomasse, um die es bei dem Projekt BIOCMBUST geht, kann auf verschiedene Weise verbrannt werden:

- **Scheitholz** ist die traditionell am weitesten verbreitete Form. Es wird häufig in offenen Kaminen verbrannt. Wegen seines höheren Feuchtegehalts ist Scheitholz weniger energieeffizient und es werden mehr Luftschadstoffe freigesetzt, als bei anderen Formen fester Biomasse.

La combustion de la biomasse présente donc des avantages indéniables pour lutter contre le changement climatique. En conséquence, le Rhin supérieur, de part et d'autres des frontières, a fait le choix de développer, son riche potentiel d'énergie issue de la biomasse. En revanche, non maîtrisée, cette filière de production d'énergie peut ponctuellement entraîner une dégradation de la qualité de l'air en particulier lorsque les conditions météorologiques sont défavorables à la dispersion des polluants. La combustion du bois peut constituer une source importante de polluants comme les particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), les Composés Organiques Volatils Non-Méthaniques (COVNM) (dont le benzène).

2.2 La combustion de biomasse et la qualité de l'air

Comme pour tout combustible, la combustion de la biomasse doit être contrôlée pour obtenir le meilleur rendement de production énergétique et minimiser les rejets de polluants. Ce contrôle passe par la maîtrise du combustible et des équipements utilisés, de leur installation, de l'entretien et du pilotage en période de chauffe.

Lors de la combustion de la biomasse solide, on peut distinguer 3 phases en fonction de la montée en température du foyer (Jean Pierre Sawerysyn Air Pur 81 - 2012). Dans la première phase, l'eau présente dans le combustible se vaporise (déshydratation). Entre 200 et 600°C, les réactions de pyrolyse décomposent la matière organique avec la formation de molécules plus légères (par exemple le méthane). Enfin, ces molécules légères brûlent avec l'oxygène de l'air.

2.2.1 Les combustibles

La biomasse est principalement composée de matière organique. On retrouve principalement du carbone (env. 50% en masse), de l'oxygène (env.44%), de l'hydrogène (6%). En quantité moins importantes, la biomasse contient de l'azote (protéines et amines), du soufre et des traces métalliques.

La biomasse solide qui est au cœur du projet BIOCMBUST peut être brûlée sous différentes formes

- **Le bois bûche** est la forme traditionnelle la plus utilisée. Il est souvent brûlé dans des foyers ouverts. En raison du taux d'humidité important, le bois-bûche est énergétiquement moins performants et les émissions de polluants dans l'air sont plus importantes que pour les autres formes de biomasse solide.

- **Hackschnitzel** sind Holzhackschnitzel, die in Groß- oder Industriefeuerungsanlagen verwendet werden. Die Verbrennung kann besser gesteuert werden und erfolgt daher vollständiger und effizienter.
- **Pellets** sind kleine zylinderförmige Körper aus gepresstem Sägemehl, die in privaten Kleinfeuerungsanlagen (Kleinpellets) oder in Groß- oder Industriefeuerungsanlagen (Großpellets) verwendet werden. Der geringe Feuchtegehalt dieser Form von fester Biomasse gewährleistet eine hohe Heizkraft.

In den letzten Jahren hat sich auch der Anbau von Energie-Pflanzen entwickelt. Das in Europa angebaute Elefantengras (*miscanthus giganteus*) ist eine natürliche sterile Kreuzung, die sich aus nicht invasiven Rhizomen entwickelt. Seine Halme erreichen eine Höhe von 4 Metern. Die Ernte erfolgt nach der Abtrocknung im Frühjahr, wenn der Feuchtegehalt gering ist (Massenanteil von etwa 17 %). Elefantengras wird in Großfeuerungsanlagen verbrannt.

- **Les plaquettes** sont des copeaux de bois utilisées dans des chaudières collectives ou industrielles. La combustion mieux contrôlée assure une meilleure combustion et un meilleur rendement.
- **Les granulés (ou pellets)** sont des cylindres obtenus par compression de sciures de bois utilisés dans des petites installations domestiques (petits granulés) ou dans des chaudières collectives ou industrielles (grands granulés). Le taux d'humidité faible assure un pouvoir calorifique élevé à cette forme de biomasse solide.

Enfin, depuis quelques années, la culture de plantes énergétiques s'est développée. Le *miscanthus giganteus* cultivé en Europe est un hybride naturel stérile qui se développe à partir de rhizomes non invasifs. Ses cannes atteignent 4 mètres de hauteur. Elles se récoltent sèches au début du printemps, lorsque le taux d'humidité est faible (env. 17% en masse). Le *miscanthus* est brûlé dans des chaudières collectives.

Die Aschen aus der Verbrennung

Bei der Verbrennung organischer Substanzen fallen Aschen an: Rostasche und Flugasche.

Die Rostasche wird hinter den Rosten in einem Aschebehälter aufgefangen. Sie wird regelmäßig entnommen. Die Flugasche wird durch die elektrostatischen oder mechanischen Rauchgasfilter der Feuerungsanlagen aufgefangen. Kohle-Flugasche ist ein für die Herstellung bestimmter Zemente interessanter Rohstoff. Für die Flugasche aus der Biomasse-Verbrennung gilt dies noch nicht.

Les cendres de la combustion

Les cendres sont des résidus de combustion de matières organiques. On peut distinguer les cendres résiduelles et les cendres volantes.

Les cendres résiduelles sont les cendres qui tombent de l'arrière des grilles dans une trémie. Elles ont régulièrement extraites. Les cendres volantes sont récupérées lors du dépoussiérage des filtres électrostatiques ou mécaniques des fumées rejetées par les installations de combustion. Les cendres volantes de charbon constituent une matière première intéressante pour la fabrication de certains ciments. Ce n'est pas encore le cas pour les cendres volantes issues de la combustion de biomasse.

2.2.2 Die Feuerungsanlagen

Die Unterschiede hinsichtlich Effizienz und Schadstoffausstoß können je nach der verwendeten Verbrennungsanlage (alt oder neu, leistungsstark oder nicht, Einzel-, Groß- oder Industrieanlage) recht erheblich sein.

Eine Erhebung der ADEME (Le bois énergie et la qualité de l'air (Energieholz und Luftqualität) - ADEME 2009) hat ergeben, dass die Schwebstaubemissionen alter Öfen bei gleicher Menge an erzeugter Energie das Neunfache der Emissionen moderner Anlagen erreichen (Tabelle 2). In Hinblick auf die Feuerung in Haushalten ist ein offener Kamin emissionsintensiver als ein Ofen, und die Verwendung von Pellets ist besser als die Verwendung von Scheitholz (Tabelle 3).

2.2.2 Les installations de combustion

Selon l'équipement de combustion utilisé (ancien ou récent, performant ou non, individuel, collectif ou industriel), les rendements et les rejets de polluants dans l'atmosphère sont très différents.

Selon une étude de l'ADEME (Le bois énergie et la qualité de l'air - ADEME 2009) , les poêles anciens émettent 9 fois plus de particules dans l'air pour une même quantité d'énergie produite que les installations plus récentes (tableau 2). La combustion dans le secteur résidentiel est plus émettrice dans un foyer ouvert que dans un poêle. L'utilisation de granulés est également plus favorable que l'utilisation de bûches (tableau 3).



g/GJ	Alte Öfen (vor 1996)	Moderne Öfen (nach 1996)	Moderne Hochleistungs-öfen (nach 1996)	Großfeuerungsanlage
Schwebstäube	1556	433	175	118
Kohlenmonoxid	15556	6667	3125	294

Tabelle 2: Schwebstaub- und Kohlenmonoxidemissionen bei der Biomasse-Verbrennung nach Anlagentyp

g/GJ	Poêle anciens (avant 1996)	Poêle récents (après 1996)	Poêle récents (après 1996) à haut rendement (performant)	Chaufferie collective
Particules	1 556	433	175	118
Monoxyde de carbone	15 556	6 667	3 125	294

Tableau 2 : Emissions de particules et monoxyde de carbone selon le type d'installation de combustions de biomasse

Tabelle 3: Schwebstaub- und Kohlenmonoxidemissionen nach Brennstoffen

	PM ₁₀ -Emissionsfaktoren (g/GJ)	
	Scheitholz	Pellets
Offene Kamine	713	
Geschlossene Kamine + Kamineinsätze	373	
Öfen	320	67
Einzelkessel	201	29
Großfeuerungsanlagen	80	
Küchenherde	540	67

Tableau 3 : Emissions de particules et monoxyde de carbone selon le type de combustible

	Facteurs d'émissions de PM ₁₀ (g/GJ)	
	Bûches	Granulés
Foyers ouverts	713	
Foyers fermés + inserts	373	
Poêles	320	67
Chaudières individuelles	201	29
Chaudières collectives	80	
Cuisinières	540	67

2.2.3 Luftschadstoff-Emissionen im Oberrheintal

Im Oberrheintal ist derzeit die Quellengruppe Haushalte/ Kleinverbraucher (Heizung) der Hauptemittent bei den Schwebstäuben (Tabelle 4) und liegt mit einem Massenanteil von 44 % an den PM_{2,5}-Emissionen noch vor den Quellengruppen Straßenverkehr (25 %) und sonstiger Verkehr (15 %).

Im Elsass lag der Massenanteil von Energieholz an den PM₁₀-Emissionen 2010 bei 34 %, an den Benzolemissionen bei 63 %, an den Dioxinmissionen (PCDD/PCDF) bei 70 % und an den Benzo(a)pyrenmissionen bei 81 %.

Gruppe	PM ₁₀	PM _{2,5}	NO _x
Energiewirtschaft	2 %	1 %	9 %
Verarbeitende Industrie	17 %	12 %	19 %
Haushalte/Kleinverbraucher	29 %	44 %	10 %
Landwirtschaft	11 %	3 %	2 %
Straßenverkehr	25 %	25 %	47 %
Sonstiger Verkehr	16 %	15 %	12 %
GESAMT	100 %	100 %	100 %

Tabelle 4: Anteil der Emittentengruppen an den Schwebstaubemissionen (PM₁₀, PM_{2,5}) und den Stickstoffdioxidemissionen (Massenanteil in %) - Referenzjahr 2010 für Baden-Württemberg und das Elsass und 2000 für die Basler Kantone und Rheinland-Pfalz (Datenquelle: UMEG, LHA und ASPA).

2.2.4 Konzentrationen in der Umgebungsluft

Unter den durch die Biomasse-Verbrennung freigesetzten Schadstoffen weisen in der Region Oberrhein nur die Schwebstäube (PM₁₀ und PM_{2,5}) und Benzo(a)pyren Konzentrationen auf, die sich den europäischen Luftqualitätsgrenzwerten annähern oder sie überschreiten.

2.2.4.1 Schwebstaub

Feinstaub-Peak im Oberrheintal

Die Herkunft der Schwebstäube ist jahreszeitabhängig. Im Winter wirkt sich die Biomasse-Verbrennung stärker aus.

Tatsächlich sind im Winter die häusliche Feuerung (darunter die Feuerung mit Holz) und der Straßenverkehr die Hauptquellen. Wegen der niedrigen Temperaturen

2.2.3 Les émissions de polluants atmosphériques dans la vallée du Rhin supérieur

Dans la vallée du Rhin supérieur, le secteur résidentiel/ tertiaire (chauffage) est actuellement le principal émetteur pour les particules (tableau 4). Il contribue à 44% en masse des émissions de PM_{2,5} devant les transports routiers (25% en masse) et les transports non routiers (15% en masse).

En Alsace en 2010, le bois-énergie représente - en masse - 34% des émissions de particules PM₁₀, 63% des émissions de benzène, 70% des émissions de dioxine (PCDD/F) et 81% du benzo(a)pyrène.

Secteur	PM ₁₀	PM _{2,5}	NO _x
Branche Energie	2%	1%	9%
Industrie manufacturière	17%	12%	19%
Résidentiel / Tertiaire	29%	44%	10%
Agriculture	11%	3%	2%
Transport routier	25%	25%	47%
Autres transports	16%	15%	12%
TOTAL	100%	100%	100%

Tableau 4 : La part des secteurs d'activité dans les émissions de particules (PM₁₀, PM_{2,5}) et de dioxyde d'azote (% en masse) - Année de référence 2010 pour le Bade Wurtemberg et l'Alsace et 2000 pour les cantons de Bâle et la Rhénanie Palatinat (Source données UMEG, LHA et ASPA).

2.2.4 Les concentrations dans l'air ambiant

Parmi les polluants émis par la combustion de biomasse, seuls les particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) et le benzo(a)pyrène présentent des concentrations dans l'air du Rhin supérieur pouvant approcher ou dépasser des normes européennes de qualité de l'air.

2.2.4.1 Les particules

Les pics de particules dans la vallée du Rhin supérieur

L'origine des particules dans l'air ambiant va dépendre de la période de l'année. C'est en hiver que l'impact de la combustion de biomasse est le plus important.

En hiver, en effet, les sources principales sont le chauffage résidentiel (dont le chauffage au bois) et le trafic routier. Les températures froides augmentent

wird in den Haushalten verstärkt geheizt, was zu einem Anstieg der Schwebstaubbelastung führt. Wegen der atmosphärischen Stabilität breiten sich die Schwebstäube nicht vertikal aus und reichern sich in Bodennähe an. Die Konzentrationen steigen dadurch stark und schnell an, bevor sie bei einem Wetterumschwung wieder abnehmen.

Im Frühjahr dagegen sind Landwirtschaft und Straßenverkehr die Hauptschwebstaubquellen. Durch die Ausbringung von Stickstoffdünger auf dem ganzen Kontinent, in Verbindung mit der permanenten Straßenverkehrs-bedingten Luftverunreinigung, erhöhen sich die Konzentrationen an sekundären Feinstäuben (z. B. Ammoniumnitrate). Zu dieser Hintergrundbelastung kommen die lokalen Quellen hinzu, im Wesentlichen Straßenverkehrs-bedingt.

Es können auch schwebstaubbelastete Luftmassen aus anderen Regionen Europas in das Oberrheintal gelangen.

Saisonal geprägte chemische Zusammensetzung der Schwebstäube

Dass die Schwebstäube je nach Saison eine andere Herkunft haben, zeigt ihre chemische Zusammensetzung.

Die chemische Analyse der an der verkehrsnahen Messstation „Strasbourg Clemenceau“ gesammelten PM₁₀-Schwebstäube (Im Rahmen des Programms CARA (Caractérisation Chimique des Particules - Chemische Zusammensetzung der Schwebstäube) zeigt die signifikanten Unterschiede zwischen den Winter- und den Frühjahrsspitzenwerten (Abb. 1).

Im Winter liegt der Anteil von elementarem Kohlenstoff (EC) und organischer Substanz aus der Feuerung (Biomasse oder fossile Brennstoffe) bei 53 % der Schwebstoffmasse. Der Anteil der sekundären Aerosole ist geringer (Nitrat 10 %, Ammonium 4 %). Sekundäre Aerosole sind feine Schwebeteilchen, deren Größe von einem Bruchteil von Mikrometern bis zu mehreren Mikrometern reicht und die durch Gas-Partikel-Transformation entstehen (Sulfate, Ammonium, organische Verbindungen,...).

Im Frühjahr steigt der Anteil an Nitraten (28 %) und Ammonium (10 %) um einen Faktor von 2 bis 3, während der Anteil an elementarem Kohlenstoff (5 %) und organischer Substanz (23 %) abnimmt.

Der Massenanteil mineralischer Partikel liegt saisonunabhängig bei 8 bis 9 %. Der Anteil der Seesalze ist im Oberrheingraben sehr gering (1 bis 2 %).

le recours au chauffage domestique et entraînent une augmentation des concentrations en particules. Avec la stabilité atmosphérique, les particules ne se dispersent pas verticalement et restent piégées au niveau du sol. Les niveaux augmentent alors fortement et rapidement avant de décroître à la faveur d'un changement de temps.

Au printemps en revanche, les sources principales de particules sont l'agriculture et le trafic routier. Lors de l'épandage des engrais azotés à l'échelle continentale combinée à la pollution routière permanente, les niveaux de particules secondaires (comme les nitrates d'ammonium) augmentent. A ce fond de pollution, s'ajoutent les sources locales principalement issues du trafic routier.

La vallée du Rhin supérieur peut également être touchée par des masses d'air d'autres régions européennes chargées en particules.

Une composition chimique des particules marquée par la saison

La composition chimique des particules confirme leur origine différente selon la saison.

L'analyse chimique des particules PM₁₀ collectées (dans le cadre du programme CARA (Caractérisation Chimique des Particules) sur la station de proximité trafic "Strasbourg Clemenceau" montre les différences marquées entre les pics hivernaux et printaniers (Fig. 1).

En hiver, le carbone élémentaire (EC) et la matière organique (OM) issus de la combustion (biomasse ou fossile) contribuent à 53% de la masse des particules. La part des aérosols secondaires est plus réduite (nitrate 10%, ammonium 4%). Les aérosols secondaires sont des fines particules atmosphériques dont la taille varie d'une fraction de µm à plusieurs µm formées par transformation gaz/particule (sulfates, ammonium, composés organiques...).

Au printemps, les parts des nitrates (28%) et de l'ammonium (10%) augmentent d'un facteur 2 à 3 et celles du carbone élémentaire (5%) et de la matière organique (23%) diminuent.

Les particules minérales ne représentent que 8 à 9% quelle que soit la saison. Enfin, les sels marins sont très faibles dans le fossé rhénan (1 à 2%).

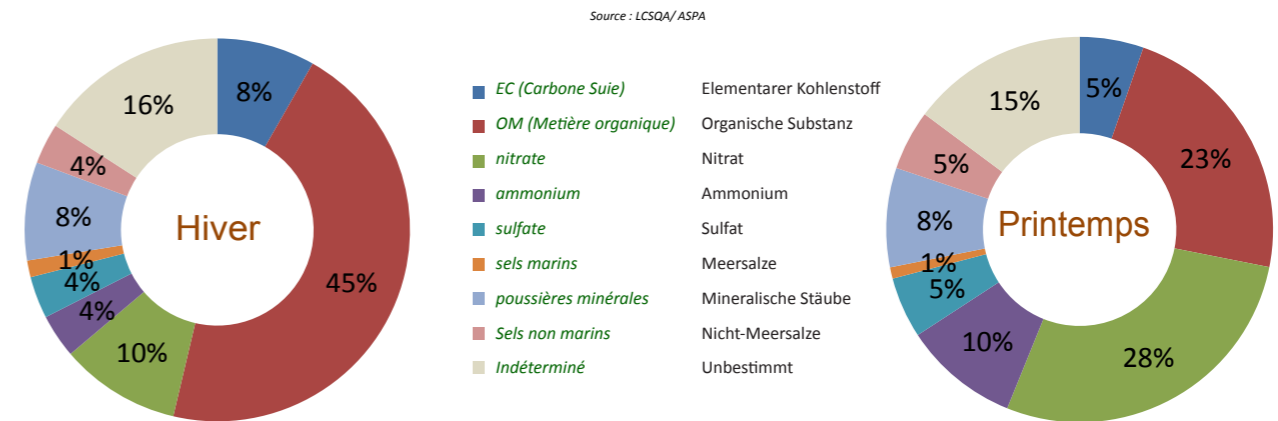


Abbildung 1 : Chimische Zusammensetzungen der Schwebstäube (Hiver=Winter, Printemps=Frühling): Verteilung der chemischen Gattungen in den Schwebstäuben an der verkehrsnahen Messstation „Strasbourg Clemenceau“ - Analyse anhand von 12 täglichen Probenahmen im Winter 2013/2014 und 12 täglichen Probenahmen im Frühjahr 2014 (Analysen durchgeführt vom Zentrallabor für Luftqualitätsüberwachung LCSQA).

Figures 1 : Spéciation chimique des particules : répartition des espèces chimiques dans les particules sur la station de proximité trafic 'Strasbourg Clemenceau' - analyse réalisée à partir de 12 prélèvements journaliers en hiver 2013/2014 et de 12 prélèvements journaliers au printemps 2014 été (analyses réalisées par le LCSQA).

Ein spezifischer Marker der Holzfeuerung: Levoglucosan

Levoglucosan ist ein spezifischer Indikator der Holzfeuerung. Anhand der Überwachung der Levoglucosankonzentrationen konnte der Beitrag von Biomasse in den Städten Grenoble, Gennevilliers (Paris), Lille und im Ballungsraum Straßburg (Geispolsheim) im Winter 2006/2007 abgeschätzt werden (Studie des Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air.) In Straßburg kann der Biomasse-Verbrennung ein Massenanteil von etwa 30 bis 50 % am PM₁₀-Schwebstaub zugewiesen werden.

Un marqueur spécifique de la combustion de bois: le lévoglucosan

Le lévoglucosan est un indicateur spécifique de la combustion du bois. Le suivi des concentrations en lévoglucosan a permis d'estimer la contribution de biomasse dans les concentrations de particules dans les villes de Grenoble, Gennevilliers (Paris), Lille et dans l'agglomération de Strasbourg (Geispolsheim) pendant l'hiver 2006/2007 (Étude du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air.) À Strasbourg, la part des particules PM₁₀ attribuable à la combustion de biomasse est d'environ 30 à 50 % en masse.

2.2.4.2 Benzo(a)pyren

Benzo(a)pyren (BaP) ist ein bekanntermaßen krebserregender polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff (PAK). Er gelangt durch die unvollständige Verbrennung verschiedener Brennstoffe (insbesondere Holz, fossile Brennstoffe) in Partikelform in die Atmosphäre. Die in den letzten Jahren im Elsass und in Baden-Württemberg (Tabelle 5) gemessenen Benzo(a)pyrenkonzentrationen lagen zwischen 0.2 ng/m³ in Colmar (städtischer Hintergrund) und 1.8 ng/m³ in Tübingen im Jahr 2010. Der Zielwert (1 ng/m³ im Jahresmittel) wurde 2013 im Thur-Tal (in der Nähe einer Holz-Großfeuerungsanlage) und in Tübingen überschritten.

Benzo(a)pyren in ng/m ³	2010	2011	2012	2013
Straßburg (Ballungsraum)	0.4	0.3	0.3	0.4
Mulhouse (Ballungsraum)	0.5	0.3	0.3	0.4
Colmar und Haguenau (Ballungsraum)	0.5	0.2	0.5	0.4
Thur-Tal (vormals Thann)	0.7	0.6	0.6	1.3
Freiburg (Schwarzwaldstraße)	0.5	0.4	0.4	0.4
Stuttgart Am Neckartor	0.6	0.5	0.4	0.5
Karlsruhe (Reinhold-Frank-Straße)	0.5	0.4	0.4	0.3
Tübingen (Jesinger Hauptstraße)	1.8	1.4	1.3	1.3

Benzo(a)pyrène en ng/m ³	2010	2011	2012	2013
Strasbourg (agglomération)	0.4	0.3	0.3	0.4
Mulhouse (agglomération)	0.5	0.3	0.3	0.4
Colmar et Haguenau (agglomération)	0.5	0.2	0.5	0.4
Vallée de la Thur (vieux Thann)	0.7	0.6	0.6	1.3
Freiburg (Schwarzwaldstraße)	0.5	0.4	0.4	0.4
Stuttgart Am Neckartor	0.6	0.5	0.4	0.5
Karlsruhe (Reinhold-Frank-Straße)	0.5	0.4	0.4	0.3
Tübingen (Jesinger Hauptstraße)	1.8	1.4	1.3	1.3

2.2.4.2 Le benzo(a)pyrène

Le benzo(a)pyrène (BaP) est un hydrocarbure aromatique polycyclique (HAP) reconnu pour être cancérigène. Il est rejeté dans l'atmosphère sous forme particulaire par la combustion incomplète de divers combustibles, en particulier le bois et les combustibles fossiles. Les concentrations de benzo(a)pyrène mesurées ces dernières années en Alsace et en Bade-Wurtemberg (tableau 5) ont été comprises entre 0.2ng/m³ à Colmar (en fond urbain) et 1.8 ng/m³ à Tübingen en 2010. La valeur cible (1 ng/m³ en moyenne annuelle) est dépassée dans la vallée de la Thur (à proximité d'une chaufferie collective bois) et à Tübingen en 2013.

Tabelle 5: Benzo(a)pyren-Jahresmittelwerte in verschiedenen Gebieten im Elsass und Baden-Württemberg in ng/m³ (Quelle: Bilans de qualité de l'air - ASPA und Kenngrößen der Luftqualität - UMEG)

Tableau 5 : Moyennes annuelles de benzo(a)pyrène sur différentes zones d'Alsace et du Bade-Wurtemberg en ng/m³. (Source : Bilans de qualité de l'air - ASPA et Kenngrößen der Luftqualität - UMEG)

2.3 Auswirkungen auf die Gesundheit

Im Oktober 2013 hat das internationale Krebsforschungszentrum (IARC) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Luftverschmutzung als für den Menschen sicher krebserregend eingestuft.

In vielen Städten der Entwicklungs- und Schwellenländer wirken sich die Schwebstäube unter den Luftschadstoffemissionen besonders nachteilig auf die Gesundheit aus. So hat nach einem Bericht der Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Schwebstaubexposition erhebliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit:

- Eine kurzfristige Feinstaubexposition führt zu vermehrten Herz-Lungen-Erkrankungen.
- Eine chronische Exposition begünstigt beim Erwachsenen die Entstehung von Asthma, von Herz-Gefäß-Erkrankungen und von Lungenkrebs.
- Beim Kind kann sie die Entwicklung des Atemapparates beeinträchtigen und zu chronischer Bronchopneumathie führen.
- Die langfristige Feinstaubexposition kann zu Atherosklerose führen, Geburten beeinträchtigen und Atemwegserkrankungen bei Kindern auslösen.

2.3 Impact sur la santé

En octobre 2013, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a officiellement déclaré la pollution de l'air extérieur comme cancérigène certain pour l'homme.

Et parmi les polluants atmosphériques, les particules en suspension génèrent un impact sanitaire important dans de nombreuses villes des pays développés et en développement. Selon un rapport de l'organisation mondiale de la santé (OMS), l'exposition des personnes aux particules a des conséquences importantes sur leur santé :

- Une exposition à court terme aux particules fines accroît la morbidité cardio-respiratoire.
- Une exposition chronique favorise l'apparition d'asthme chez l'adulte, de maladies cardiovasculaires et de cancers du poumon.
- Chez l'enfant, elle peut altérer le développement de l'appareil respiratoire et provoquer des broncho-pneumopathies chroniques.
- L'exposition à long terme aux particules très fines peut provoquer l'athérosclérose, des perturbations des naissances et des maladies respiratoires chez l'enfant.

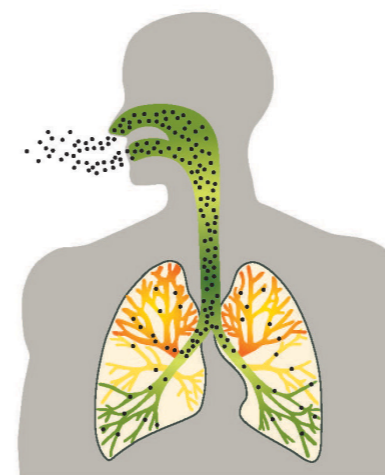


Abbildung 2: Transport von Partikeln im menschlichen Atmungsstrakt entsprechend ihrer Größe

5- 10 µm	Kehlkopf/ Luftröhre	Larynx / trachée
3-5 µm	Hauptbronchien	Bronches principales
2-3 µm	Lobäre Bronchien	Bronches lobaires
0.5-1 µm	Lungenbläschen	Alvéoles Pulmonare

Figure 2 : Transport des particules en fonction de leur taille dans le système respiratoire humain



Die Partikelgröße, ein entscheidendes Kriterium

Die Partikelgröße ist ein entscheidendes Kriterium, da es von ihr abhängt, wie tief der Partikel in den Lungenbaum eindringt (Abb. 2). Sie reicht von wenigen Nanometern (ein milliardstel Meter) bis zu einigen Dutzend µm (Mikrometern).

- Die größten Partikel (>10 µm) lagern sich sehr schnell ab und werden in der Nase und den oberen Atemwegen zurückgehalten. Zu dieser Kategorie zählen unter anderem die biologischen Partikel (Sporen, Bakterien, Pollen, ...).
- Die Partikel des mittleren Größenbereichs (zwischen 2.5 und 10 µm) lagern sich im Luftröhren-Bronchialbaum ab (Luftröhre, Haupt- und Nebenbronchien) und können ausgehustet werden.
- Von den feinen Partikeln unter 2.5 bzw. 1 µm gelangen viele in die Lungenbläschen.

La taille des particules, un critère essentiel

La taille des particules est un critère essentiel, car elle détermine, notamment, la profondeur de la pénétration dans l'arbre pulmonaire (Fig. 2). Cette taille varie de quelques nanomètres (un milliardième de mètre) à quelques dizaines de µm (micromètres).

- Les particules les plus grosses (>10 µm) se déposent rapidement et sont retenues au niveau du nez et des voies aériennes supérieures. Dans cette catégorie sont rassemblées, entre autres, les particules biologiques (spore, bactérie, pollen...).
- Les particules de taille intermédiaire (entre 2.5 µm et 10 µm) se déposent au niveau de l'arbre trachéo-bronchique (trachée, bronches principales et secondaires) et peuvent être éliminées par la toux.
- Les particules fines inférieures à 2.5 µm voire 1 µm atteignent en grand nombre les alvéoles pulmonaires.

PM2.5 und Langzeitsterblichkeit

Gemäß dem Projekt Aphekom (Improving Knowledge and communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe - 2004/2006) zeigt die Bewertung der gesundheitlichen Auswirkung in 25 europäischen Großstädten (39 Millionen Einwohner), dass das Leben von Menschen ab 30 Jahren um bis zu 22 Monate verlängert werden könnte (abhängig von der Stadt und den dortigen Feinstaubwerten), wenn die Feinstaub-(PM_{2.5})-Belastung im Jahresmittel auf den von der WHO empfohlenen Grenzwert von 10 µg/m³ gesenkt würde.

PM2.5 et mortalité à long-terme

Selon le projet Aphekom (Improving Knowledge and communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe - 2004/2006), l'évaluation de l'impact sanitaire dans 25 grandes villes européennes (39 millions d'habitants) montre que l'espérance de vie pourrait augmenter jusqu'à 22 mois pour les personnes âgées de 30 ans et plus (en fonction de la ville et du niveau moyen de pollution), si les niveaux moyens annuels de particules fines de diamètre inférieur à 2.5 µm (PM_{2.5}) étaient ramenés au seuil de 10 µg/m³, valeur guide préconisée par l'OMS.

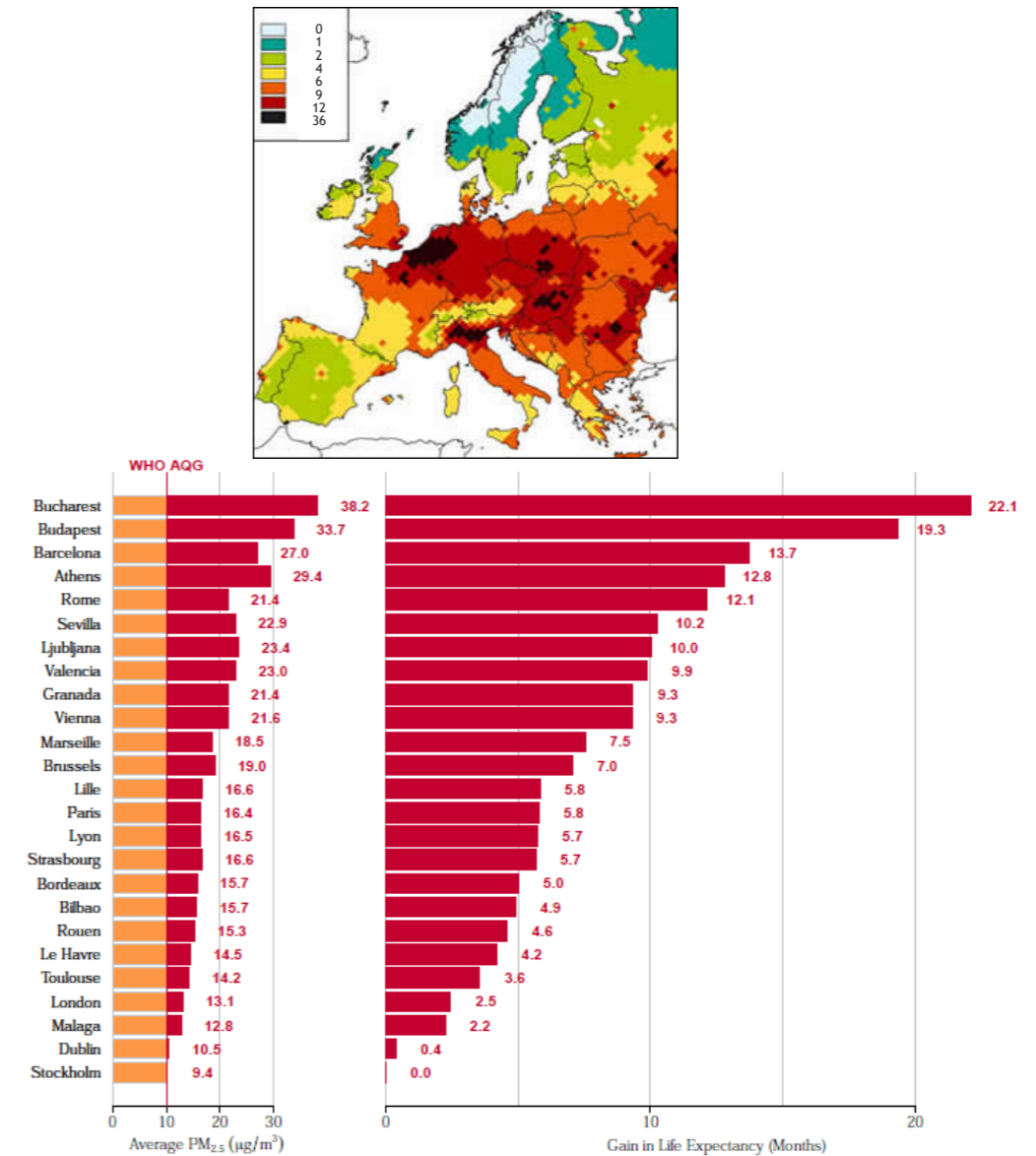


Abbildung 3: Mittlere PM_{2.5}-Belastungen in µg/m³ (unten). Erwartete mittlere Verlängerung der Lebensdauer von Menschen ab 30 Jahren, wenn die Konzentrationen dem Leitwert der WHO von 10 µg/m³ im Jahresmittel entspräche (oben).

Figure 3 : Concentrations moyennes en PM_{2.5} en µg/m³ (en bas). Gains moyens de l'espérance de vie (en mois) attendus pour les personnes de 30 ans et plus si les niveaux étaient conformes à la valeur guide de l'OMS fixée à 10 µg/m³ en moyenne annuelle (en haut).

2.4 Das Projekt BIOCOMBUST - Gesundheitliche Aspekte der energetischen Nutzung von Biomasse

BIOCOMBUST ist ein interdisziplinäres EU-Forschungsprojekt, das sich den Auswirkungen von Partikeln aus der Biomasse-Verbrennung auf die Gesundheit der Bevölkerung in der Region Oberrhein widmet. An dem im Rahmen des Programms INTERREG IV geförderten Projekt waren Partner aus Frankreich, aus der Schweiz und aus Deutschland beteiligt, die komplementäres Fachwissen aus den Bereichen Verbrennungs-, Atmosphären-, Umwelt- und Geowissenschaften, Umweltmedizin, Pharmazie und Angewandte Geowissenschaften einbrachten. Diese Bündelung der Expertisen erlaubte die parallele Anwendung von physikalischen, chemischen, molekularbiologischen, toxikologischen und technischen Untersuchungen auf gleiche Partikel aus denselben Quellen.

Die Verbrennung unterschiedlicher Arten fester Biomasse-Brennstoffe, wie zum Beispiel Scheitholz, Hackschnitzel und Pellets sowie das zur Energiegewinnung genutzte Gras Miscanthus, führt zu Emissionen von Gasen und Partikeln, welche hier analysiert wurden. Für die Messungen wurde auch mit Betreibern von Biomasse-Verbrennungsanlagen der Region Oberrhein kooperiert. Die Auswirkung der Verbrennung von Biomasse auf die Luftqualität sowie die damit verbundenen möglichen Einflüsse auf die menschliche Gesundheit wurden bewertet. Hierzu wurden Laborexperimente durchgeführt, in denen menschliche Lungenzellen verschiedenen Partikelarten ausgesetzt wurden, um die biochemischen Reaktionen auf diese Partikel zu untersuchen. Weiterhin wurde erforscht, ob die anfallenden Flugaschen als Klinkerersatz in der Zementproduktion verwendet werden können.

Diese Fragen wurden im Rahmen von drei Forschungsthemen bearbeitet und die Ergebnisse durch zielgerichtete Kommunikation der Bevölkerung in der Region Oberrhein zur Verfügung gestellt.

2.4.1 Forschungsthema I: Charakterisierung der Partikel-Emissionen sowie der Aschen aus der Biomasse-Verbrennung

Biomasse-Verbrennungsanlagen stoßen verschiedene gasförmige Substanzen sowie Fein- und Grobstäube aus (particulate matter - PM). Als Feinstäube ($PM_{2,5}$) werden im Allgemeinen diejenigen Partikel bezeichnet, die einen Durchmesser von weniger als 2.5 Mikrometern aufweisen (1000 Mikrometer entsprechen 1 mm). Grobstäube haben einen Durchmesser von größer als 2.5 Mikrometern. Partikel-Emissionen beeinflussen die lokale und regionale Luftqualität und können einen negativen Einfluss auf die menschliche Gesundheit

2.4 Le projet BIOCOMBUST - Aspects sanitaires de la production d'énergie à partir de biomasse

BIOCOMBUST est un projet européen de recherche interdisciplinaire qui se consacre aux effets des particules produites lors de la combustion de biomasse sur la santé humaine dans la région du Rhin supérieur. Le projet soutenu dans le cadre du programme INTERREG IV a impliqué des partenaires français, suisses et allemands, qui apportaient des connaissances professionnelles complémentaires des domaines de la combustion, de l'atmosphère, l'environnement et des sciences de la Terre, de la médecine environnementale, la pharmacie et des géosciences appliquées. Ce regroupement des expertises a permis l'utilisation parallèle des recherches physiques, chimiques, microbiologiques, toxicologiques et techniques sur des particules identiques en provenance des mêmes sources.

La combustion de différents types de combustibles solides à base de biomasse, telles que les bûches de bois, les copeaux de bois, les granulés ainsi que le miscanthus qui est cultivé à des fins d'usage énergétique, provoque des émissions de gaz et de particules qui font l'objet de ces analyses. Pour effectuer les mesures, on a également coopéré avec les installations de combustion de biomasse de la région du Rhin supérieur. On a évalué l'impact de la combustion de la biomasse sur la qualité de l'air ainsi que les éventuelles influences impliquées sur la santé humaine. À ce sujet, on a effectué des essais en laboratoire au cours desquels des cellules pulmonaires humaines étaient exposées à différents types de particules afin d'analyser les réactions biochimiques sur ces particules. Un axe du projet travaille également sur la valorisation des cendres volantes comme substitut de clinker dans la production de ciment.

On a traité ces questions dans le cadre de trois thèmes de recherche ; les résultats et ont été mis à la disposition de la population de la région du Rhin supérieur par le biais d'une communication ciblée.

2.4.1 Thème de recherche I : Caractérisation des émissions atmosphériques particulières et des cendres issues de la combustion biomasse

Les installations de combustion de biomasse émettent des substances gazeuses ainsi que des particules fines et grossières (particulate matter - PM). Les particules fines ($PM_{2,5}$) sont définies par un diamètre inférieur à 2.5 micromètres (1 000 micromètres correspondent à 1 mm). Les particules grossières ont un diamètre supérieur à 2.5 micromètres. Les émissions de particules influencent la qualité de l'air au niveau local et régional et peuvent avoir un impact négatif sur la santé humaine qui dépend en large partie de la taille et de la nature chimique des

haben. Dieser hängt zu einem großen Teil von der physikalischen und chemischen Beschaffenheit der eingeatmeten Partikel ab, die letztlich von der Art der Biomasse und den Brennbedingungen beeinflusst wird.

Im Rahmen des Forschungsthemas 1 wurden Emissionen untersucht, die sowohl aus experimenteller Verbrennung im Labor, als auch aus industrieller Verbrennung stammen. Hierdurch konnten Erkenntnisse gewonnen werden, wie unterschiedliche Betriebsbedingungen von Verbrennungsanlagen und die jeweils verwendeten Brennstoffe die Luftqualität beeinflussen. Die bei der Verbrennung entstandenen Aschen und Partikel wurden gesammelt und hinsichtlich ihrer Größenverteilung und Form sowie chemischer und mineralogischer Zusammensetzung analysiert. Große Partikel werden meist mittels Lichtmikroskopie untersucht, wohingegen feine Partikel mit unterschiedlichen Typen von Elektronenmikroskopen analysiert werden. Ebenso wurden die gasförmigen Emissionen untersucht und quantifiziert. Zudem liefern mobile Messungen in der Nähe von industriellen und privaten Biomasse-Verbrennungsanlagen Kenntnisse über den jeweiligen Einfluss der Anlage auf die Qualität der Umgebungsluft.

2.4.2 Forschungsthema 2: Untersuchungen zu biologischen Effekten von Partikel-Emissionen und Aschen aus der Biomasse-Verbrennung

Die zunehmende Nutzung von fester Biomasse als Energiequelle hat besonders während der Wintermonate sowohl in städtischem als auch ländlichem Umfeld zu einer Zunahme der Luftverschmutzung geführt. Über die gesundheitlichen Auswirkungen der Partikel aus Biomasse-Verbrennung auf die menschliche Gesundheit ist allerdings erst wenig bekannt, weshalb BIOCOMBUST die biologischen Effekte dieser Partikel untersucht hat.

Im Labor wurden menschliche Lungenzellen unterschiedlichen Partikeln und Aschen ausgesetzt und deren Wirkung auf die Erbsubstanz der Zellen sowie ihre Lebensdauer bestimmt. Verschiedene biologische Parameter wurden mit modernsten experimentellen Methoden gemessen und potentiell gesundheitsgefährdende Effekte bewertet. So können molekularbiologische Methoden Entzündungen oder Abwehrmechanismen erkennen, die auf eventuelle Zellschädigungen hinweisen. Zusätzlich zu den konventionellen Zellkulturen wurden auch Kultursysteme aus drei verschiedenen Zelltypen, Gewebeschnitte und 3D-Zellkulturverbände für die biologischen Untersuchungen verwendet.

particules inhalées, celles-ci étant en fait influencées par le type de biomasse et par les conditions de combustion.

Dans le cadre du thème de recherche 1, on a analysé les émissions qui proviennent aussi bien de la combustion expérimentale en laboratoire que de la combustion industrielle. Cela a permis de gagner des connaissances sur l'influence de la qualité de l'air par les différentes conditions opérationnelles des installations de combustion et par les combustibles respectivement utilisés. On a collecté les cendres et les particules produites lors de la combustion et on en a analysé la granulométrie et la forme ainsi que la composition chimique et minéralogique. Les grosses particules sont généralement analysées par microscopie optique alors que les fines particules sont analysées avec différents types de microscopes électroniques. Les émissions gazeuses ont également fait l'objet d'une analyse et d'une quantification. Des mesures mobiles à proximité d'installations de combustion de biomasse industrielles et privées fournissent en outre des connaissances sur l'impact respectif de ces installations sur la qualité de l'air ambiant.

2.4.2 Thème de recherche 2 : Études des effets biologiques des émissions de particules et des cendres issues de la combustion de la biomasse

L'augmentation de l'utilisation de la biomasse solide comme source d'énergie a conduit à une augmentation de la pollution atmosphérique dans des zones urbaines et rurales, en particulier pendant les mois d'hiver. Or, les effets des particules provenant de la combustion de biomasse sur la santé humaine sont peu connus ; c'est pourquoi BIOCOMBUST a étudié les effets biologiques de ces particules.

A cet effet, on a exposé en laboratoire des cellules pulmonaires humaines à différents types de particules et de cendres et on a identifié les effets sur le matériel génétique et la croissance cellulaire. On a mesuré différents paramètres biologiques avec des méthodes expérimentales modernes et on a évalué les effets potentiellement dangereux pour la santé. Les méthodes biologiques moléculaires peuvent détecter des inflammations ou des mécanismes immunitaires qui peuvent signaler d'éventuelles lésions cellulaires. Pour les analyses biologiques, on utilise également des cultures conventionnelles de cellules, des systèmes de culture de trois types de cellules différents, des coupes de tissus et des milieux de culture de cellules en 3D.



2.4.3 Forschungsthema 3: Verwendung der Aschen aus Biomasse-Verbrennung als Ersatzstoff für Zementklinker

Biomasse-Verbrennung produziert im Wesentlichen zwei Arten von Aschen: Rostasche und Flugasche. Rostasche wird unter dem Verbrennungssofen gesammelt und ist grobkörniges Material. Die feinkörnige Flugasche wird aus der heißen Abluft herausgefiltert, wie zum Beispiel durch den Einsatz von elektrostatischen Abscheidern, Zyklonen oder Gewebefiltern. Im Gegensatz zur Rostasche, die nach chemischen Kontrollen als Zusatz in Düngemitteln verwendet wird, kann Flugasche in einigen Ländern vor allem wegen erhöhten Konzentrationen einzelner Schwermetalle keine direkte Verwendung finden und muss weitgehend entsorgt werden. Um eine Alternative für diese Art der Entsorgung der Flugasche zu finden, hat BIOCOMBUST die mögliche Weiterverwertung dieser Aschen in der Zementindustrie untersucht, insbesondere ob sie sich als CO₂-neutraler Klinkerersatz eignen. Die Flugaschen verschiedenster Anlagentypen und Brennstoffarten wurden im Hinblick auf ihre physikalischen, chemischen, mineralogischen und toxikologischen Eigenschaften analysiert und einer ökotoxikologischen Bewertung unterzogen. Dann wurden sie in verschiedenen Anteilen Zementmischungen beigegeben und ihr Einfluss auf die Eigenschaften des Zements bewertet.

2.4.4 Öffentlichkeitsarbeit

BIOCOMBUST zielt auf die Förderung der Lebensqualität der Bevölkerung im Oberrheingebiet durch verantwortliches und nachhaltiges Wachstum der regionalen Biomasse-Branche. Die Arbeit des Projekts und die Forschungsergebnisse werden über vielseitige traditionelle und moderne Kommunikationswege an die Bevölkerung der Region Oberrhein, insbesondere an Bildungsstätten, Landwirtschaft, Industrie, Politik und Wirtschaft vermittelt.

Im Internet informiert die Projektwebsite (www.biocombust.eu) über die Projektinhalte und per Facebook ist der direkte Zugang und die Mitsprache zu laufenden Diskussionen möglich. Für die virtuelle Plattform „backstage“ (www.biocombust.eu/backstage) wurde das Thema Biomasse-Verbrennung in informativen und leicht verständlichen Kurzvideos aufbereitet. Zusätzlich hat BIOCOMBUST seine Arbeit auf verschiedensten Veranstaltungen (Wissenschaftsmärkte, Vorträge, regionale, nationale und internationale Konferenzen) vorgestellt und konnte in diesem Rahmen unterschiedlichste Zielgruppen sensibilisieren und mit ihnen über sinn- und verantwortungsvolle Nutzung von Energie aus Biomasse im Oberrheingebiet diskutieren.

2.4.3 Thème de recherche 3 : Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse dans la production de ciment

La combustion de la biomasse produit essentiellement deux types de cendres : les cendres résiduelles et les cendres volantes. Les cendres résiduelles sont recueillies sous le four à combustion et sont un matériau à grains grossiers. Les cendres volantes à grains fins sont filtrées de l'air d'évacuation chaud à l'aide de mesures de protection de la qualité de l'air, par exemple au moyen de dépoussiéreurs électriques, de cyclones ou de filtres en tissu. Contrairement aux cendres résiduelles qui, après des contrôles chimiques, sont utilisées comme additifs dans les engrais, dans certains pays, les cendres volantes ne peuvent pas être utilisées directement et doivent être éliminées en grande partie, avant tout à cause des concentrations élevées de certains métaux lourds. Pour trouver une alternative pour ce type d'élimination des cendres volantes, BIOCOMBUST a analysé les possibilités de récupération de ces cendres dans l'industrie du ciment, notamment si elles peuvent être utilisées comme substitut de clinker neutre de CO₂. On a analysé les cendres volantes provenant de différents types d'installation et types de combustibles quant à leurs propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et toxicologiques, et on a procédé à une évaluation écotoxicologique. On les a ensuite ajoutées dans des mélanges de ciment dans des proportions variables et on a évalué leur influence sur les propriétés du ciment.

2.4.4 Communication

BIOCOMBUST vise une amélioration de la qualité de vie de la population dans la région du Rhin supérieur par une croissance responsable et durable du secteur régional de la biomasse. Le travail du projet et les résultats de la recherche seront transmis via des canaux de communication traditionnels et modernes à la population de la région du Rhin supérieur, notamment aux établissements d'enseignement, à l'agriculture, l'industrie, la politique et aux milieux économiques.

Sur Internet, le site web du projet (www.biocombust.eu) informe sur les contenus du projet ; sur Facebook, il est possible d'accéder directement et de participer aux discussions en cours. La plateforme virtuelle « backstage » (www.biocombust.eu/backstage) traite le thème de la combustion de la biomasse dans de courtes vidéos informatives et facilement compréhensibles. BIOCOMBUST a également présenté son travail lors de diverses manifestations (marchés scientifiques, congrès, conférences nationales, régionales et internationales), ce qui a permis de sensibiliser des cibles très diverses et de discuter avec les participants sur l'utilisation raisonnable et responsable de l'énergie à partir de la biomasse dans la région du Rhin supérieur.

CHARAKTERISIERUNG DER PARTIKEL-EMISSIONEN SOWIE DER ASCHEN AUS DER BIOMASSE-VERBRENNUNG
CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES PARTICULAIRES ET DES CENDRES ISSUES DE LA COMBUSTION BIOMASSE



3 CHARAKTERISIERUNG DER PARTIKEL-EMISSIONEN SOWIE DER ASCHEN AUS DER BIOMASSE-VERBRENNUNG

3.1 Verbrennungsanlagen und Messungen

3.1.1 Kleine Verbrennungsanlagen im Labor

Um die Verbrennung von Biomasse zu studieren verfügt das Labor GRE unter anderem über eine Plattform zur Verbrennung verschiedener Biomasse-Arten. Kernstück ist ein kommerzieller Biomassen-Heizkessel (REKA) mit Schubrosten und einer Leistung von 40 kW - dies wäre zum Beispiel ausreichend für ein Gebäude mittlerer Energieklasse mit ca. 400 m² Grundfläche. Die Bauart des verwendeten Heizkessels ist vergleichbar mit derjenigen industrieller Heizkessel. Er ist für die automatisierte Verbrennung von Holz-Pellets, aber auch von Holzhackschnitzeln mit 10-30 Gew.% Feuchte (Reste aus der Holzwirtschaft), Miscanthus (Energie-Pflanze), Stroh und Getreide geeignet (Abb. 4).



Abbildung 4: Beispiele für Holz hackschnitzel (Agrivalor, links), Holzpellets (DIN+, Mitte) und getrockneten, gehäckselten Miscanthus (rechts).

Bei Miscanthus (*miscanthus giganteus*) handelt es sich um eine schnellwachsende Energie-Pflanze, die viel Nitrat aus dem Boden zieht und daher auch zur Nitrat-Dekontamination genutzt werden kann. Zur Verbrennung sind allerdings gewisse Anpassungen erforderlich (geringere Schüttdichte, korrosive Abgase, etc.). Die Verbrennung im Labor - im 40 kW Heizkessel - erfolgte unter vergleichbaren Bedingungen wie sie auch in größeren Biomasse-Heizkesseln herrschen. Bei der Verbrennung wurden die entstehenden Feinstaub-Partikel gesammelt. Mit „Feinstaub“ bezeichnet man Staubpartikel, die kleiner als 2.5 µm sind (PM_{2,5}).

3 CARACTÉRISATION DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES PARTICULAIRES ET DES CENDRES ISSUES DE LA COMBUSTION BIOMASSE

3.1 Présentation des combustions et mesures

3.1.1 Petite échelle de combustion au laboratoire

Au regard des différents projets de recherches attendants à la combustion de la biomasse, le laboratoire GRE s'est équipé en 2012 d'une chaudière multi-combustible de 40 kW de marque REKA qui permettrait de fournir eau chaude et chauffage pour un petit habitat collectif d'une surface d'environ 400 m² ; bâtiment d'une efficacité énergétique moyenne. Cette chaudière permet la combustion de multiples matériaux en continu et de manière automatisée ; elle peut brûler des granulés de bois mais aussi des plaquettes forestières d'une humidité limitée (10-30% massique) ou du miscanthus (plante énergétique). Les plaquettes forestières sont des résidus de l'exploitation du bois en forêts (Fig. 4).

Figure 4: Exemples de plaquettes forestières (Agrivalor) à gauche, granulés de bois (DIN+) au centre et miscanthus broyé et séché à droite

Si le miscanthus (*miscanthus giganteus*) permet une dépollution des sols en nitrates, elle présente également un intérêt certain car elle a une croissance très importante sans prolifération incontrôlée (hybride stérile) ; certaines adaptations de la combustion sont cependant nécessaires (masse volumique apparente différente, corrosivité des fumées, etc.). La combustion en continu au laboratoire sur la chaudière de 40 kW permet de s'approcher des conditions de plus grosses chaufferies biomasse (par exemple mieux qu'un poêle à bois ou qu'une chaudière à granulés) et aussi de produire des particules fines et des cendres pour différentes utilisations au sein du projet BIOCOMBUST. Les particules fines sont des particules de poussière avec un diamètre de moins de 2.5 µm (PM_{2,5}).

Es ist allgemein anerkannt, dass das menschliche Atmungssystem als Partikel-Filter wirkt: nur Feinstaub (PM_{2,5}) kann bis in die Alveolen gelangen (Abb. 2). Um nur Partikel dieser Größe aus der Verbrennung zu sammeln hat das Labor GRE im Rahmen dieses Projektes einen Impaktor (Dekati Gravimetric Impactor, DGI) beschafft, der die Partikel in Abhängigkeit von deren Größe sammelt. Um die mögliche Sammelzeit zu erhöhen wurde das System so modifiziert, dass ein größerer Filter (125 mm statt 47 mm Durchmesser) verwendet werden kann. Folgende Partikelgrößenfraktionen werden gesammelt:

- PM > 2.5 µm auf der ersten Impaktionsstufe
- PM 1 - 2.5 µm auf der zweiten Impaktionsstufe
- PM 0.4 - 1 µm auf der dritten Impaktionsstufe
- PM < 0.1 µm im nachgeschalteten Filter.

Für die weitere Verwendung im Rahmen der Partikelcharakterisierung und der biologischen Tests wurden nur die Partikel aus den Impaktionsstufen verwendet.

Da die Emissionen relativ gering sind, waren für die erfolgreiche Sammlung der PM_{2,5} für die biologischen und toxikologischen Tests lange Sammelzeiten erforderlich.

Weiterhin wurden die Konzentrationen von Sauerstoff (O₂), Kohlendioxid (CO₂), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO und NO₂), Ammoniak (NH₃), Schwefeldioxid (SO₂) sowie Gesamt-Kohlenwasserstoffen in der Abluft gemessen. Diese Gasanalyse ermöglicht es eine Aussage über die Qualität der Verbrennung zu treffen.

Il est globalement admis que le système respiratoire humain agit de façon à filtrer les particules : seules les particules fines (PM_{2,5}) pénètrent les alvéoles pulmonaires (Fig. 2). Pour récupérer seulement ces particules issues de la combustion biomasse, le laboratoire GRE a investi dans le cadre du projet BIOCOMBUST dans un impacteur manuel (Dekati Gravimetric Impactor, DGI) qui permet d'effectuer une ségrégation en taille des particules d'un aérosol. Il a fallu modifier le système existant et usiner un filtre terminal plus grand (125 mm Ø au lieu de 47mm Ø) pour de longues collections de particules fines aux tailles suivantes :

- PM > 2.5 µm sur plateau d'impaction
- PM 1 - 2.5 µm sur plateau d'impaction
- PM 0.4 - 1 µm sur plateau d'impaction
- PM < 0.4 µm sur filtre terminal

Il a été choisi d'utiliser seulement le matériel récolté sur plateau d'impaction en acier inoxydable pour les essais biologiques et les caractérisations de particules fines.

Des quantités suffisantes de PM_{2,5} ont été récoltées sur des périodes de mesures relativement longues à destination des tests biologiques et toxicologiques.

Pour le suivi des émissions gazeuses de combustion, une baie d'analyse a été utilisée en laboratoire : dioxygène (O₂), dioxyde de carbone (CO₂), monoxyde de carbone (CO), monoxyde d'azote et dioxyde d'azote (NO et NO₂), ammoniac (NH₃), dioxyde de soufre (SO₂) et les hydrocarbures totaux). Ces analyses en temps réel permettent un bon contrôle et une évaluation de la qualité de combustion.

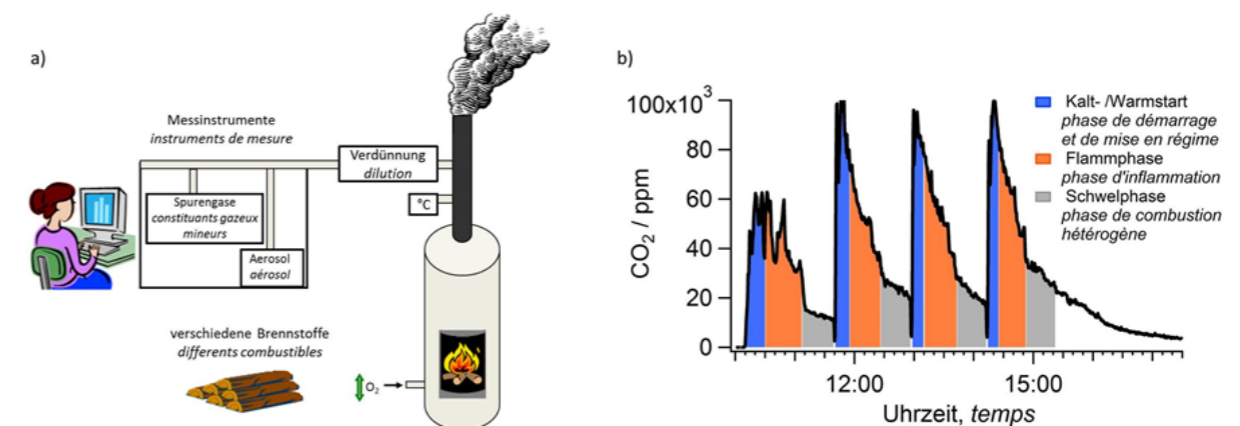


Abbildung 5: a) Versuchsaufbau der Labormessungen. b) Zeitverlauf der CO₂-Emissionen für einen typischen Messtag.

Figure 5 : a) Dispositif de mesure en laboratoire, b) Emissions de CO₂ sur une journée de mesure

Für die Verbrennungsmessungen am MPIC wurden ein Scheitholzofen (Vega III, Feuer & Flamme GmbH; 6 kW Nennwärmeleistung) und ein Pelletofen (Pelletto 417.08, HAAS+SOHN Ofentechnik GmbH; 8 kW) unter definierten Bedingungen im Labor betrieben. Ein Teil der Abluft wurde aus dem Kamin ausgeleitet und mittels zweier Verdünnungsstufen bei hoher Temperatur 150-fach verdünnt (Abb. 5a). Die so verdünnte Abluft wurde in den Einlass des mobilen Labors MoLa (siehe 3.1.4) geleitet, wo sie zur Messung in Echtzeit auf verschiedene Messinstrumente sowie auf einen Filtersammler (PM₁, Polykarbonat-Filter zur weiteren Analyse) aufgeteilt wurde.

3.1.2 Mittelgroße Verbrennungsanlagen

Die Gemeinde Ammertzwiller hat 2007-2008 einen Biomassen-Heizkessel (Köb Pyrot) mit einer Leistung von 400 kW installiert. Dieser ist an ein Fernwärmenetz angeschlossen und heizt die kommunalen Gebäude und angeschlossenen Privathäuser sowie eine im Bau befindliche Wohnsiedlung. Der Heizkessel ist zur Rauchgasreinigung mit einem Multizyklon ausgerüstet. Es ist allerdings allgemein bekannt, dass mit dieser Technik Partikel mit Durchmessern <2.5 µm kaum zurückgehalten werden.

Bereits zu Beginn des Projektes BIOCOMBUST (April 2013) wurden erste Proben in Ammertzwiller entnommen: Flugasche (mit den Rauchgasen ausgetragen und mit Multizyklon abgeschieden) sowie Rostasche, für die Brennstoffe Holz-Hackschnitzel und Miscanthus.

Mittels eines mobilen Systems der Firma Testo wurden hinter dem Multizyklon Emissionsmessungen durchgeführt (O₂, CO₂, CO, NO, NO₂). Die Partikel wurden mit dem DGI-Impaktor gesammelt (siehe 3.1.1). Da die Partikelkonzentrationen in der Abluft - hinter dem Multizyklon - geringer sind als im Laborexperiment, war die Ausbeute begrenzt. Trotzdem war es möglich, in einer Woche Probenahme die für die biologischen und toxikologischen Experimente erforderliche Menge zu sammeln.

Für die zeitaufgelösten Messungen mit MoLa wurde die Probenluft direkt am Kaminabgriff (hinter dem Multizyklon) bei 85 °C 10-fach verdünnt und die verdünnte Abluft zum MoLa-Einlass geleitet.

Les essais de combustion au Max-Planck Institut für Chemie (MPIC) ont été effectués en laboratoire sur un poêle à bûche (Vega III, Feuer & Flamme GmbH ; 6 kW), ainsi que sur un poêle à granulés (Pelletto 417.08 HAAS+SOHN Ofentechnik GmbH ; 8 kW). Une partie des fumées a été diluée à haute température (facteur de dilution 150) pour être amenée au dispositif d'analyses Mobile Laboratory (MoLa) (voir 3.1.4) pour des mesures en temps réel (Fig. 5a). Les particules PM₁ ont été récoltées sur des filtres en polycarbonate pour analyse ultérieure.

3.1.2 Echelle de combustion intermédiaire

Une installation de combustion d'une puissance nominale de 400 kW a été étudiée pour le projet : la mairie d'Ammertzwiller a installé en 2007-2008 une chaufferie biomasse de marque Köb Pyrot qui alimente, via un réseau de chaleur, ses bâtiments communaux, ainsi que des maisons d'habitations et les pavillons d'un nouveau lotissement (en cours de construction). Cette chaufferie a été équipée par l'installateur d'un système de dépolluissage appelé multi-cyclone ; il est néanmoins admis que ce type de système ne permet pas de piéger des particules de diamètre moyen inférieur à 2.5 µm.

Dans les premiers temps du projet (avril 2013), quelques premiers échantillons ont pu être prélevés à la chaufferie d'Ammertzwiller : des échantillons de cendres volantes (entraînées par le flux gazeux et piégées par un système de traitement de fumées, ici un multicyclone) et de cendres résiduelles ont pu être récupérés lors de combustions de plaquettes forestières et de miscanthus.

Des mesures d'émission sur cette chaufferie ont été aussi enregistrées avec un appareil de mesure Testo (O₂, CO₂, CO, NO, NO₂). En outre l'ensemble des émissions particulières (après cyclone) réparties en quatre fractions de particules fines à l'aide de l'impacteur manuel DGI a été récolté (voir 3.1.1). Les quantités de particules récoltées ont été relativement plus limitées que celles récoltées en laboratoire (moins d'amplitude horaire sur la journée de prélèvement), néanmoins une semaine de prélèvement a permis l'obtention d'un matériel jugé suffisant par l'équipe de biologiste et toxicologiste.

Pour les mesures stationnaires à l'aide du véhicule équipé (MoLa), un prélèvement à l'émission en cheminée (après le multi-cyclone, à une température d'environ 85°C) est dilué 10 fois avant l'analyse.

3.1.3 Große Verbrennungsanlagen (≥1.7 MW)

Um einen guten Überblick über die Emissionen bestehender Biomasse-Verbrennungsanlagen im Oberrheingebiet zu erhalten, wurden zwei deutsche (St. Peter und Vauban) sowie vier französische Anlagen (Rixheim, Colmar, Illberg, Saint-Louis) ausgewählt und beprobt.

Große Biomasse-Verbrennungsanlagen reinigen die Verbrennungsgase mit verschiedenen Abscheidetechniken (Tabelle 6). Somit fällt neben der Rostasche, die am Verbrennungsort zurückbleibt, auch die sog. Flugasche an. Diese besteht aus Partikeln kleiner als 100 µm und macht 20-60% des Volumens der Gesamtasche aus, je nach Größe der Verbrennungsanlage, Verbrennungstechnik und Abscheidetechnik. Für die chemischen und mineralogischen Untersuchungen wurden Rost- und Flugaschen aus verschiedenen Verbrennungsanlagen entnommen (siehe 3.3.3).

Anlage	Nominaleleistung	Brennstoff	Abscheidetechnik
Freiburg i.Br (D) Sammelstelle „Maiackerweg“	Private Kleinf Feuerungsanlagen (5-10 kW)	DIN+ Holzpellets	keine
St. Peter (D)	1700 kW	Holzhackschnitzel	Elektrostatischer Abscheider
Vauban (D)	2300 kW	Holzhackschnitzel	Zyklon und elektrostatischer Abscheider
Rixheim (F)	2800 kW	Holzhackschnitzel	Zyklon und Gewebefilter
Colmar (F)	8000 kW	Holzhackschnitzel	Zyklon und elektrostatischer Abscheider
Illberg (F)	4000 kW + 8000 kW	Holzhackschnitzel	Zyklon und Gewebefilter
Saint-Louis (F)	17300 kW	Holzhackschnitzel + Maisspindeln	Gewebefilter

Tabelle 6: Übersicht der großen Biomasse-Verbrennungsanlagen

Chaudière	Puissance thermique nominale	Combustible	Système de dépolluissage
Freiburg i.Br. (D) Point de collecte "Maiackerweg"	Petites Installations domestiques (5-10 kW)	DIN+ pellets de bois	Aucun
St. Peter (D)	1700 kW	Plaquettes de bois	Electrofiltre
Vauban (D)	2300 kW	Plaquettes de bois	Cyclone et electrofiltre
Rixheim (F)	2800 kW	Plaquettes de bois	Cyclone et filtre à manches
Colmar (F)	8000 kW	Plaquettes de bois	Cyclone et electrofiltre
Illberg (F)	4000 kW + 8000 kW	Plaquettes de bois	Cyclone et filtre à manches
Saint-Louis (F)	17300 kW	Plaquettes de bois + rafles de maïs	Filtre à manches

Tableau 6: Liste des techniques de filtration sur les chaudières à biomasse

In Rixheim (Mulhouse Alsace Agglomération, Haut-Rhin, France) wird seit Januar 2010 eine Biomasse-Verbrennungsanlage der Marke COMPTE.R mit einer Leistung von 2.8 MW betrieben. Sie ist an ein Fernwärmenetz angeschlossen, welches städtische Gebäude und Privathäuser mit Wärme versorgt. Zur Rauchgasreinigung sind ein Multizyklon sowie ein Gewebefilter der Marke LUHR vorhanden. Diese vermindern den Partikel-Ausstoß in die Atmosphäre.

An dieser Installation wurde Flugasche aus dem Gewebefilter entnommen. Die Rostasche und die Flugasche aus dem Multizyklon werden in einem gemeinsamen System im Wasserbad gesammelt. Sie sind daher im Rahmen dieses Projektes nur begrenzt geeignet (lösliche Bestandteile werden extrahiert, zwei Arten von Asche sind gemischt ...). Die Flugasche aus dem Gewebefilter konnte aber analysiert werden.

Weiterhin wurden hinter dem Multizyklon und dem Gewebefilter Emissionsmessungen (O_2 , CO_2 , CO, NO, NO_2) durchgeführt sowie mit dem DGI-Impaktor Partikel gesammelt und charakterisiert. Die sehr geringen Partikelkonzentrationen in der Abluft ermöglichten es allerdings nicht, die für die biologischen und toxikologischen Experimente erforderliche Menge zu sammeln.

Die Verbrennungsanlagen in Illberg (4+8 MW, Weiss) und Colmar (8 MW, URBAS) sind ebenfalls mit Systemen zur Rauchgasreinigung ausgestattet (Illberg: Multizyklon + Gewebefilter; Colmar: Multizyklon + Elektrofilter). Die Sammlung der Partikel ($PM_{2.5}$) wurde Anfang 2015 durchgeführt. In Anbetracht der verwendeten Systeme zur Rauchgasreinigung war es allerdings schwierig, die für die biologischen und toxikologischen Experimente erforderlichen Mengen zu sammeln.

An der Verbrennungsanlage in Saint-Louis (17.3 MW, Renewa) war die Probenahmeöffnung für Rauchgas noch nicht installiert. Das Sammeln von Partikeln war daher nicht möglich.

An allen drei Anlagen wurde Flugasche entnommen, in Illberg und Saint-Louis aus den Gewebefiltern und in Colmar aus dem Elektrofilter.

In St. Peter wurden Emissionsmessungen durchgeführt, indem die Probenluft direkt am Kaminabgriff (hinter der Abgasreinigung durch den Elektrofilter) bei 120 °C 10-fach verdünnt und die verdünnte Abluft zum MoLa-Einlass geleitet wurde. Ebenso wurden an dieser Anlage Proben von Rost- und Flugasche (aus dem Elektrofilter) gesammelt.

La chaufferie de Rixheim (Mulhouse Alsace Agglomération, Haut-Rhin, France) exploite depuis début janvier 2010 une chaudière biomasse de marque COMPTE.R d'une puissance nominale de 2.8 MW. Cette chaudière alimente un réseau de chaleur urbain et municipal étendu autour de la municipalité de Rixheim. Un premier système de filtration multicyclone permet de limiter les émissions de particules, enfin un filtre à manche de marque LUHR permet de limiter les rejets en particules fines dans l'atmosphère.

Des prélèvements de cendres résiduelles et de cendres volantes issues des filtres à manches ont été réalisés sur ces installations. Les cendres résiduelles sont cumulées avec les cendres multicyclone au sein d'un circuit humide ce qui rend difficile des analyses pour les utilisations du projet (pertes de certains minéraux par voie aqueuse, mélange de deux cendres, etc...). Les cendres récupérées au sein du filtre à manches ont pu néanmoins être analysées.

Les concentrations des principaux gaz ont été suivies (O_2 , CO_2 , CO, NO, NO_2) mais également l'ensemble des émissions particulières (après multicyclone et filtre à manches) réparties en quatre fractions de particules fines à l'aide de l'impacteur manuel DGI. Il n'y a pas eu suffisamment de particules récoltées sur plateaux d'impaction pour les essais biologiques et toxicologiques.

Les chaufferies de l'Illberg (4+8 MW, Weiss) et Colmar (8 MW, URBAS) disposent également de systèmes de traitement des fumées efficaces du même niveau que Rixheim (respectivement Multicyclone + Filtre à manches et Multicyclone + Précipitateur électrostatique). Des prélèvements des fractions de $PM_{2.5}$ ont été réalisés début 2015. Aux regards des efficacités des systèmes de dépoussiérage, il a été difficile de collecter suffisamment de matière pour les études biologiques et toxicologiques.

La chaufferie de Saint-Louis (17.3 MW, Renewa) étant récente, la trappe de prélèvement de particules fines n'était pas encore installée et il n'a pas été possible de récolter des particules fines.

Sur ces trois chaufferies, des échantillons de cendres issus des systèmes de traitement des fumées (filtre à manches pour l'Illberg et Saint-Louis, précipitateur électrostatique pour Colmar) ont été collectés.

A St. Peter, les mesures ont été menées à l'émission en cheminée (après l'électrofiltre, à une température d'environ 120 °C) ; l'échantillon est dilué 10 fois avant d'être analysé par le MoLa. Il a également été possible d'échantillonner les cendres résiduelles et les cendres volantes (ici issues d'un électrofiltre).

3.1.4 Außenluftmessungen

Für die Außenluft- und Labormessungen des MPIC wurde das Mobile Forschungslabor MoLa verwendet, in das zehn Instrumente zur Messung von Aerosolpartikeln und Spurengasen eingebaut sind. Gemessen werden die Mischungsverhältnisse von Stickoxiden, CO, CO_2 , O_3 und SO_2 , die Massenkonzentrationen der Aerosolpartikel im Größenbereich bis 1, 2.5 und 10 μm (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10}), die Größenverteilung der Partikel von 5 nm bis 30 μm Durchmesser, sowie die chemische Zusammensetzung der Partikel in PM_1 (leicht verdampfbare Bestandteile und Ruß; Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen (PAK) auf Partikeloberflächen werden qualitativ erfasst). Zudem werden meteorologische Parameter und die GPS-Position sowie (mittels einer Webcam) die Sicht durch die Frontscheibe aufgezeichnet.

Für die Außenluftmessungen wurden zwei Messmethoden verwendet:

1. *Stationäre Messungen*: Außenluft wurde in 30 - 250 m Abstand windabwärts der Verbrennungsanlagen von St. Peter (D) und Ammertzwiller (F) beprobt.

2. *Mobile Messungen*: Schadstoffkartierungen wurden in der Umgebung der Verbrennungsanlagen von Ammertzwiller und St. Peter sowie in Schwarzwaldtälern und im Elsass durchgeführt, indem die Strecken bei niedriger Geschwindigkeit mehrmals abgefahren wurden. Insgesamt wurden 51.5 h mobiler Messungen durchgeführt.

Außenluft wird wahlweise über einen von zwei Einlässen in 2 m bzw. 8 m Höhe über dem Boden angesaugt, welche für mobile bzw. stationäre Messungen optimiert sind. Kontaminationen der Messungen durch MoLa-eigenes Abgas werden während mobiler Messungen durch den Fahrtwind, während stationärer Messungen durch ein Abgasabsaugsystem verhindert.

3.2 Experimentelle Methoden und Brennstoffe

3.2.1 Experimentelle Methoden für Biomasse-Verbrennung im MPIC-Labor

Bei Messungen am Scheitholzofen wurden drei Anzündhölzer des entsprechenden Holzes in den aschefreien Feuerraum über einen Anzünder gestapelt. Darüber wurden die Holzscheite (in der Regel zwei Stück, 1.9 kg, rindenfrei) gelegt. Während der Anzündphase wurde der Rost offengelassen und zusätzliche Luft zugeführt (Kaltstart). Nachdem das Holz stabil brannte, wurden der Rost und die Zusatzluft-Zufuhr geschlossen.

3.1.4 Campagne de mesures dans l'air extérieur

Les campagnes de mesures dans l'air extérieur ont été effectuées par le MPIC avec l'utilisation du MoLa - une camionnette équipée de dix instruments pour la mesure des aérosols et des concentrations des oxydes d'azote, de CO, CO_2 , O_3 et SO_2 . Pour les aérosols, la distribution granulométrique et la concentration massique sont mesurées dans une gamme de 5 nm à 30 μm . Les concentrations sont obtenues spécifiquement pour les fractions PM_1 , $PM_{2.5}$ et PM_{10} . La nature chimique du carbone dans la fraction PM_1 est analysée de façon à voir si le carbone est sous forme de suies, s'il contient des composés contenant des groupes - CH et - CHO ou des composés aromatiques comme les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP). Le MoLa permet aussi d'enregistrer les paramètres météorologiques et la position.

Les mesures en air extérieur se font selon deux modes :

1. *Mesures stationnaires* : des mesures stationnaires ont été effectuées à St. Peter (D) et à Ammertzwiller (F), à une distance de 30 à de 250 m des unités de combustion, en se plaçant dans la direction du vent. L'échantillonnage de l'air se fait soit à 2 m, soit à 8 m au-dessus du niveau du sol à travers un conduit optimisé pour la mesure stationnaire. Pour éviter la contamination de la mesure par les gaz d'échappement du MoLa, les gaz d'échappement sont aspirés et rejetés en aval dans la direction du vent.

2. *Mesures mobiles* : des cartographies des émissions ont été établies à proximité des unités de combustion d'Ammertzwiller et de St. Peter ainsi que dans des vallées de la Forêt Noire et en plaine d'Alsace. L'itinéraire est parcouru plusieurs fois à basse vitesse. Dans ce cas, l'air est échantillonné à l'aide d'un conduit de 2 m au-dessus du sol. Une contamination par le MoLa n'est pas à craindre à cause du courant d'air lié à la vitesse du MoLa.

3.2 Présentation des procédures expérimentales et biomasses

3.2.1 Procédures expérimentales pour la combustion de la biomasse au laboratoire MPIC

Dans le cas des expériences de combustion avec le poêle à bûche, l'allumage est réalisé avec trois morceaux de l'essence étudiée posés l'un sur l'autre. Au-dessus, on avait placé les bûches (en général deux bûches, 1.9 kg sans écorce). Pendant la phase de démarrage à froid, l'entrée d'air au niveau de la grille et l'entrée d'air secondaire sont laissées en position ouverte. Quand le régime de combustion est obtenu, ces deux entrées

30 min nach Erlöschen der Flammen wurde die gleiche Menge Holz, nur ohne Anzünder, auf die gleiche Weise nachgelegt (Warmstart). Üblicherweise wurden an einem Messtag jeweils ein Kaltstart gefolgt von drei Warmstarts durchgeführt (Abb. 5b). Für die Messungen von Miscanthus (*miscanthus giganteus*) sowie für die Simulation nicht-idealer Brennbedingungen blieben die Zusatzluft-Zufuhr und (für die ersteren drei) der Rost während des gesamten Abbrandes geöffnet.

Die wichtigsten während der Labormessungen des MPIC am Scheitholzofen verwendeten Brennstoffe und die im Experiment vorherrschenden Brennbedingungen sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Brennstoff	Brennbedingung
Buche	ideal
	nicht-ideal (mit Zusatzluft)
	ideal, überladen
	ideal, unterladen
	ideal, mit Rinde
	ideal, trockenes Holz
	ideal, kleine Scheite
Eiche	ideal
Esche	"
Birke	"
Fichte	"
Kiefer	"
Fichte/Tanne	"
Buche Briketts	"
Eiche Briketts	"
Hackschnitzel	"
Miscanthus giganteus	"

Tabelle 7: Ausgewählte Brennstoffe und Brennbedingungen bei Labormessungen am Scheitholzofen

d'air sont fermées. Trente minutes après l'extinction des flammes, la même quantité de bois est rajoutée (sans allumage). Ceci correspond à un démarrage à chaud. Habituellement, sur chaque jour d'expérience, un allumage est suivi d'une mise en régime par trois charges successives (Fig. 5b). Pendant les expériences sur la combustion du miscanthus (*miscanthus giganteus*), les entrées d'air secondaire et d'air primaire sous la grille restent toujours ouvertes. Dans le cas de la combustion « en excès d'air », l'entrée de l'air secondaire reste ouverte.

L'essentiel des combustibles utilisés avec le poêle à bûche et les conditions expérimentales sont consignées dans Tableau 7.

Combustible	Conditions de combustion
Hêtre	Combustion à la stœchiométrie
	Combustion en excès d'air
	Combustion à la stœchiométrie, en surcharge
	Combustion à la stœchiométrie, en charge partielle
	Combustion à la stœchiométrie, bois avec écorces
	Combustion à la stœchiométrie, bois très sec
	Combustion à la stœchiométrie, petites buches
Chêne	Combustion à la stœchiométrie
Frêne	"
Bouleau	"
Epicéa	"
Pin	"
Epicéa / sapin	"
Brique de hêtre	"
Brique de chêne	"
Plaquettes de bois	"
Miscanthus giganteus	"

Tableau 7: Combustibles et conditions de combustion (poêle à bûche)

3.2.2 Brennstoffe in GRE-Laborexperimenten

Drei Brennstoffe wurden im Labor GRE (Tabellen 8 und 9) getestet und die entstandenen Partikel gesammelt: Miscanthus giganteus, Buchenholz-Hackschnitzel mit einer Feuchte von 32 Gew.%, sowie eine Probe Hackschnitzel aus St. Peter (D). Flugasche aus dieser großen Verbrennungsanlage war für die biologischen und toxikologischen Versuche verwendet worden; es war daher interessant, den gleichen Brennstoff in einem anderen Verbrennungssystem zu verwenden.

3.2.3 Brennstoffe in mittleren und großen Holz-Verbrennungsanlagen

An den industriellen Standorten werden vorwiegend Hackschnitzel verbrannt. Ausnahmen sind hier die Verbrennungsanlage in Ammertzwiler (Miscanthus giganteus) und Saint-Louis (Mischung von Hackschnitzeln mit derzeit 2 Gew.% Maisspindeln) (Tabellen 8 und 9). Daher sind die industriellen Verbrennungsanlagen in der Regel für Hackschnitzel ausgelegt. Für andere Brennstoffe ist häufig eine Optimierung erforderlich. Die Einstellung der Anlage in Saint-Louis für die vorgesehene Menge von 20 Gew.% Maisspindeln ist derzeit im Gange.

Proben der in den Anlagen in St. Peter und Ammertzwiler eingesetzten Brennstoffe (Hackschnitzel von Nadelholz aus der Umgebung; bzw. Miscanthus) wurden auch in vergleichenden Labormessungen im Scheitholzofen verbrannt (Tabelle 8).

3.2.2 Biomassen für die Verbrennung im Labor GRE

Au laboratoire Gestion des Risques et de l'Environnement (GRE), il a été choisi de brûler dans un premier temps du miscanthus giganteus pour la récolte de particules fines, puis des plaquettes forestières de hêtre présentant une humidité relative de 32% massique (Tableaux 8 et 9). Enfin, le GRE a brûlé au sein de la chaudière REKA le même combustible que celui disponible à la chaudière biomasse de St. Peter (D). Les cendres volantes de cette chaufferie avaient en effet été utilisées pour des essais biologiques et toxicologiques et il est intéressant d'avoir le même combustible dans des installations de chauffage différentes et des systèmes de collection différents.

3.2.3 Biomassen für die Verbrennung in großen und mittleren Anlagen

La plupart des biomasses brûlées en chaudières industrielles sont des plaquettes forestières aux exceptions notables d'Ammertzwiler (*miscanthus giganteus*) et Saint-Louis (ajout d'actuellement 2% massique de rafles de maïs). Les chaudières industrielles sont donc souvent construites pour des plaquettes forestières (Tableaux 8 et 9), une optimisation pour d'autres biomasses est alors nécessaire. Par exemple à Saint-Louis des réglages sont en cours pour arriver à leur objectif final de 20% en rafles de maïs mélangés avec des plaquettes.

À Ammertzwiler, le combustible brûlé est du miscanthus mélangé à 2% en masse de Ca(OH)₂. La centrale thermique de St. Peter utilise des plaquettes de bois de résineux récoltées dans les environs. Des échantillons de ces combustibles ont également été testés en laboratoire (Tableau 8).



Verbrennungsanlage	Nominalleistung	Brennstoff	Flugasche-Abscheidung	Sammlung PM	Gasförmige Emissionen
GRE	40 kW	Miscanthus	Gesamtstaub (TSP)	DGI	O ₂ , CO ₂ , CO, NO, NO ₂ , NH ₃ , SO ₂ , Flüchtige organische Verbindungen (VOC)
GRE	40 kW	Holzhackschnitzel (Buche)	Gesamtstaub (TSP)	DGI	
GRE	40 kW	Holzhackschnitzel (Nadelholz)	Gesamtstaub (TSP)	DGI	
Ammertzwiller	400 kW	Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂	Multizyklon+ Gesamtstaub (TSP)	DGI	O ₂ , CO ₂ , CO, NO, NO ₂
Ammertzwiller	400 kW	Holzhackschnitzel	Multizyklon	---	---
Rixheim	2.8 MW	Holzhackschnitzel	Gewebefilter + Gesamtstaub (TSP)	Menge nicht ausreichend für biologische und toxikologische Untersuchungen	O ₂ , CO ₂ , CO, NO, NO ₂
Colmar	8 MW	Hackschnitzel	Elektrofilter	---	---
Saint-Louis	17.3 MW	Hackschnitzel + 2% Maisspindeln	Gewebefilter	---	---

Tabelle 8: Übersicht der Anlagen, Brennstoffe und Probenahmen

Site de combustion	Puissance nominale	Combustible	Collection de cendres volantes	Collection de PM	Emissions gazeuses
GRE	40 kW	Miscanthus	Mesure de particules totales (TSP)	DGI	O ₂ , CO ₂ , CO, NO, NO ₂ , NH ₃ , SO ₂ , Composés organiques volatils totaux (VOC)
GRE	40 kW	Plaquettes forestières de hêtre	Mesure de particules totales (TSP)	DGI	
GRE	40 kW	Plaquettes forestières de conifère	Mesure de particules totales (TSP)	DGI	
Ammertzwiller	400 kW	Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂	Multicyclone + Mesure de particules totales (TSP)	DGI	O ₂ , CO ₂ , CO, NO, NO ₂
Ammertzwiller	400 kW	Plaquettes forestières	Multicyclone	non	---
Rixheim	2.8 MW	Plaquettes forestières	Filtre à manches + Mesure de particules totales (TSP)	Pas assez de matériel collecté	O ₂ , CO ₂ , CO, NO, NO ₂
Colmar	8 MW	Plaquettes forestières	Précipitateur électrostatique	non	---
Saint-Louis	17.3 MW	Plaquettes forestières + 2% rafles de maïs	Filtre à manches	non	---

Tableau 8 : Résumé des combustions et prélèvements

Biomasse-Brennstoffe	Verbrennungsanlage	Nominalleistung	Heizwert (MJ/kg)	Feuchte ^a (Gew.%)	Aschengehalt ^a (Gew.%)	Schüttdichte ^a (kg/m ³)
Buchenholz-Hackschnitzel	Laboratoire GRE	40 kW	12.8	32	0.4	359
Holzhackschnitzel (vorwiegend Nadelholz)	Laboratoire GRE	40 kW	9.6	46	0.5	603
Miscanthus	Laboratoire GRE und Ammertzwiller	40 und 400 kW	17.0	10	1.4	116
Holzhackschnitzel	Ammertzwiller	400 kW	11.0	25	2.0	304
Holzhackschnitzel	Rixheim	2.8 MW	11.4	35	0.5	409
Holzhackschnitzel	Colmar	8 MW	9.1	46	0.6	514
Holzhackschnitzel (98%) + Maisspindeln (2%)	Saint-Louis	17.3 MW	13.2	29	1.5	429

a. auf die Rohmasse bezogen

Tabelle 9: Eigenschaften der Biomasse-Brennstoffe

Combustibles biomasses	Site de combustion	Puissance nominale	Pouvoir Calorifique Inférieur (MJ/kg)	Humidité ^a (% massique)	Taux de cendres ^a (% massique)	Densité apparente ^a (kg/m ³)
Plaquettes forestières hêtre	Laboratoire GRE	40 kW	12.8	32	0.4	359
Plaquettes forestières de conifère	Laboratoire GRE	40 kW	9.6	46	0.5	603
Miscanthus	Laboratoire GRE et Ammertzwiller	40 und 400 kW	17.0	10	1.4	116
Plaquettes forestières	Ammertzwiller	400 kW	11.0	25	2.0	304
Plaquettes forestières	Rixheim	2.8 MW	11.4	35	0.5	409
Plaquettes forestières	Colmar	8 MW	9.1	46	0.6	514
Plaquettes forestières (98%) + Rafles de maïs (2%)	Saint-Louis	17.3 MW	13.2	29	1.5	429

a. sur brut

Tableau 9 : Propriétés des combustibles biomasses

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Emissionen aus Biomasse-Verbrennung

Bei den Messungen am Scheitholzofen können Zündphase, Flammphase und Schwelphase des Brandes unterschieden werden, (Abb. 2b), während derer die Emissionsfaktoren (EF), d.h. die Emission pro umgewandelter Energie (mg/MJ), sich zum Teil wesentlich unterscheiden (Tabelle 10). CO wird insbesondere während der Schwelphase emittiert, wenn die Verbrennung unvollständiger abläuft. Der EF der PM₁-Masse ist in der Schwelphase dagegen deutlich geringer als in den vorhergehenden Brennphasen; der EF der Partikelanzahlkonzentration jedoch nimmt in der Schwelphase deutlich zu. Die Anzahlgrößenverteilung zeigt in dieser Phase eine monomodale Verteilung kleiner Partikel, während in der Flammphase eine bimodale Verteilung (kleine und größere Partikel) beobachtet wird (was auch die höhere Partikelmasse in dieser Brennphase erklärt) (Abb. 6). Die Unterschiede in der Größenverteilung können dadurch erklärt werden, dass während der Flammphase im Gegensatz zur Schwelphase etwas mehr Ruß emittiert wird, auf dem organische Dämpfe kondensieren können; hierdurch wird die Neubildung neuer, kleinerer Partikel unterdrückt. Während der Schwelphase dagegen kann eine große Anzahl kleiner Partikel entstehen.

3.3 Résultats

3.3.1 Emissions issues de la combustion de biomasse

Dans le cas des expériences sur le poêle à bûche, il est possible de distinguer les trois phases de la combustion : l'inflammation, la combustion homogène (avec flamme) et la combustion hétérogène (sans flamme) (Fig. 2b). Les facteurs d'émission (EF), donc la quantité d'émissions par quantité d'énergie transformée (mg/MJ), diffèrent en partie de façon importante entre ces phases (Tableau 10). Le monoxyde de carbone est particulièrement émis dans la phase terminale lors de la combustion hétérogène. Les PM₁ diminuent considérablement après la phase de d'inflammation. Pendant la phase de combustion hétérogène (sans flamme), le nombre de particules augmente et la distribution en taille est dominée par un mode de nucléation caractérisant des toutes petites particules (PM_{0.1}) alors que la phase homogène (présence de flammes) met en évidence une distribution bimodale caractérisant à la fois la formation de très petites particules par nucléation mais aussi une phase d'accumulation générant des particules de tailles plus importantes (Fig. 6). Ceci s'explique par une émission plus importante de suie pendant la phase de flammes sur laquelle les vapeurs organiques peuvent venir se condenser, empêchant ainsi la nucléation.

Tabelle 10 (rechts): Tendenzielle Abhängigkeit der Emissionsfaktoren ausgewählter Parameter von Brennphase, Brennbedingung und Brennstoff. Für den Vergleich von Brennbedingungen und Brennstoff wurden Werte der Flammphase (bzw. im Falle der Anlagen: stabile Brennbedingungen) verglichen.

Tableau 10 (à droite): Influence des paramètres de combustion (phase de combustion, conditions de combustion et combustible) sur les principaux facteurs d'émissions. Pour la comparaison des conditions de combustion ou des combustibles, les facteurs d'émissions sont donnés durant la phase avec flamme stationnaire (les conditions de combustion ne changent pas pour comparer les différents combustibles).

Emissionsfaktoren / Facteurs d'émissions		PM ₁ / PM ₁	PM _{2.5} / PM _{2.5}	Ruß / Suie	Anzahlkonzentration / Nombre total de particules	PAK / HAP au sein des PM ₁	Organik / carbone organique au sein des PM ₁	CO / CO	NO _x / NO _x	SO ₂ / SO ₂
– niedrig / faible										
O mittel / moyen										
+ hoch / élevé										
++ sehr hoch / très élevé										
Phase / Phase de combustion	Warmstart / Inflammation	+	+	+	O	O	+	+	O	+
	Flammphase / Combustion avec flamme	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	Schwelphase / fin de combustion sans flamme	-	-	O	+	-	-	++	-	-
Brennbedingung / Conditions de combustions	Ideal / idéal	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	nicht-ideal (mit Zusatzluft) / non-ideal (excès d'air)	+	+	-	O	+	O	O	O	O
	mit Rinde / avec écorce	O	-	-	+	-	+	O	O	O
	Überladen / surcharge de combustible	O	O	-	O	+	-	-	O	O
	Unterladen / sous-charge de combustible	+	+	O	O	+	-	O	O	O
	kleine Scheite / petites bûches	++	++	-	O	++	-	++	O	+
	trockene Scheite / bûches plus sèches	+	+	O	O	++	-	-	O	O
Brennstoff / Combustible	Buche / Hêtre	O	O	O	O	+	O	O	O	O
	Buche Briketts / briquettes de Hêtre	-	-	-	+	O	-	O	O	O
	Fichte / Epicéa	O	O	O	+	-	-	+	O	-
	Birke / Bouleau	O	O	O	O	O	-	O	O	O
	Esche / Frêne	O	O	O	+	O	-	O	O	O
	Eiche / Chêne	-	-	-	O	-	-	+	O	O
	Miscanthus / Miscanthus	++	++	++	O	++	++	O	O	+
	Miscanthus (Amm.) / Miscanthus (à Ammertzwiler)	O	O	-		-	++	-	++	-
Hackschnitzel / Plaquettes forestières	++	++	++	-	++	++	O	+	++	
Hackschnitzel (St. Peter) / Plaquettes forestières (à St. Peter)	-	-	-	-		++	-	+	-	

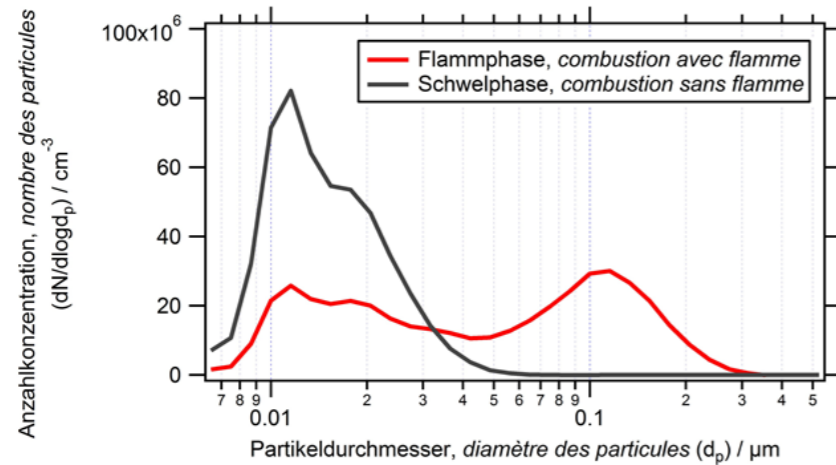


Abbildung 6 : Mittlere Partikelanzahlgrößenverteilungen der Flamm- (rot) und Schwelphase (grau) gemessen bei der Verbrennung (ideale Brennbedingungen) von Buche-Scheitholz.

Figure 6 : Distribution en nombre des particules lors des deux principales phases de combustion de bois de hêtre

Die Variation der Brennbedingungen führt zu einer deutlichen Veränderung der gemessenen EF (Tabelle 10). Ein Überschuss an Sauerstoff (durch nicht-ideale Brennbedingungen oder Unterladen des Ofens) führt zu deutlich erhöhten EF von PM_{10} in der Zünd- und Flammphase. Ein Überladen des Ofens führt während der Zündphase ebenfalls zu erhöhten EF (PM_{10} , CO); in der Flammphase dagegen sind die EF ähnlich oder sogar niedriger als im Falle idealer Beladung.

Die Verwendung unterschiedlicher Holzsorten hat nur einen geringen Einfluss auf die EF (Tabelle 10).

Die Verwendung unterschiedlicher Brennstoffe wirkt sich unterschiedlich auf die EF von CO und PM_{10} aus. So sind zum Beispiel für Eiche Scheitholz die EF von PM_{10} vergleichsweise niedrig, die EF von CO jedoch ungewöhnlich hoch. Für die EF von PAK spielen vor allem die Brennbedingungen eine wesentliche Rolle: Bei nicht-idealen Bedingungen sind sie deutlich erhöht. Bei Verwendung unterschiedlicher Brennstoffe zeigen sich dagegen kaum Unterschiede in den EF von PAK.

Ein Vergleich der während der Flammphase im Labor gemessenen EF mit denen der Anlagen in St. Peter und Ammertzwiller zeigt insbesondere für St. Peter deutlich geringere Werte für PM_{10} - die Abgasreinigung

La modification des conditions de combustion engendre une variation importante des facteurs d'émission (Tableau 10). Un excès d'oxygène ou une charge partielle de combustible dans le foyer entraîne des augmentations importantes des émissions des PM_{10} et du CO pendant les phases de démarrage et de flamme. Une surcharge du four entraîne une augmentation des EF de PM_{10} et de CO pendant la phase de démarrage. Cependant, pendant la phase de flamme, ces EF sont proches voir inférieurs à ceux avec une charge « optimale ».

L'utilisation de différentes essences de bois a peu d'effet sur les facteurs d'émissions (Tableau 10).

L'utilisation de différents combustibles n'influence pas les EF de CO et des PM_{10} de façon identique comme par exemple lorsque l'on fait varier les combustibles. Pour la combustion de bois de chêne, il est observé de faibles émissions de PM_{10} alors que les émissions de CO sont relativement élevées. La part importante de suie dans les PM_{10} induit une forte corrélation entre l'EF des HAP - souvent émis en même temps que la suie - et l'EF des PM_{10} .

Une comparaison des mesures en laboratoire (REKA - GRE) et dans les chaudières à St. Peter et Ammertzwiller montre que les émissions de polluants gazeux et particulaires sont plus faibles dans les chaudières de plus

und eine (durch automatisierte Regelung) effizientere Verbrennung wirken sich hier positiv aus. Letztere schlägt sich auch in erheblich geringeren CO EF nieder. Auch die EF von SO_2 sind kleiner für die Anlagen als für den Scheitholzofen, unabhängig vom Brennstoff. Dies gilt insbesondere für die SO_2 Emissionen bei der Verbrennung von Miscanthus in Ammertzwiller, da hier dem Brennstoff $Ca(OH)_2$ beigemischt wird. Dieser ist dafür bekannt, SO_2 in Form von Sulfaten zu binden, die dann in der Flugasche im Multizyklon oder Gewebefilter abgeschieden werden.

Während Änderungen des Betriebszustandes der Anlagen ist eine deutliche Erhöhung der EF von CO und PM_{10} festzustellen. Der EF von NO_x hängt stark von der aktuellen Leistung der Anlage (und damit von der Brenntemperatur) ab.

Im Gegensatz zu den Versuchen am MPIC hat sich das GRE auf die stationäre Phase der Verbrennung konzentriert, da diese für automatische Verbrennungsanlagen typisch ist. Selbstverständlich haben auch diese eine Start-Phase; im Vergleich zur Gesamtlaufzeit ist diese allerdings kurz, denn industrielle Anlagen werden in der Regel in der gesamten Heizsaison oder sogar ganzjährig (ausgenommen Zwischenfälle/Revisionen) permanent befeuert. Tabelle 11 zeigt die Emissionen, die gemessen wurden:

- im Labor GRE mit den drei Brennstofftypen
- in Ammertzwiller mit Miscanthus
- in Rixheim bei der Verbrennung von Holz-Hackschnitzeln.

Bei unseren Betriebsbedingungen sind Grenzwert-überschreitungen bei CO und VOCs aufgetreten.

grande taille. Ceci est dû à la présence d'un dispositif de nettoyage de fumées ainsi qu'à l'optimisation de la combustion par une régulation automatique. Les émissions en CO et de SO_2 sont également plus faibles. Il faut noter que dans le cas d'Ammertzwiller, l'installation utilise un mélange de miscanthus gigantesque avec de la chaux. La chaux est connue pour permettre de piéger le SO_2 présent dans les fumées et de le transformer en sulfates. Ces sulfates sont alors retrouvés principalement dans les cendres volantes récupérées dans les systèmes d'épuration (cyclones, filtre à manches et filtres électrostatiques).

Dans le cas des chaudières de grande taille, une modification de l'état de fonctionnement entraîne en général une augmentation des EF de CO et de PM_{10} . Les EF des NO_x par contre dépendent beaucoup de la puissance actuelle de la chaudière et donc de la température de combustion.

A l'inverse du MPIC, le GRE s'est uniquement intéressé au régime de combustion continu en chaufferie collective. Les installations visées ont effectivement généralement une période de mise en route mais elles sont généralement en régime continu durant l'ensemble de la saison de chauffe voire toute l'année sauf avarie/révision. Les émissions suivantes ont été mesurées au GRE lors de la combustion de trois combustibles étudiés (Tableau 11) :

- au laboratoire GRE lors de la combustion de plaquettes forestières de hêtre et de miscanthus
- à Ammertzwiller lors de la combustion de miscanthus
- à Rixheim lors de la combustion de plaquettes forestières.

Dans nos conditions expérimentales, certaines valeurs de CO et de VOCs à l'émission dépassent les normes en vigueur, cela est notamment lié à l'humidité importante des plaquettes forestières.

Nennleistung – Brennstoff	P _{primär} ^g kW	P _{nutzbar} ^h kW	CO ₂ (vol.%)	SO ₂ (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	VOC (mgC/Nm ³)	TSP (mg/Nm ³)
40 kW – Miscanthus ^a	36.6	24.2	7.8	13.9	104	198	8.4	33.5
40 kW – Holzhackschnitzel aus Buchenholz ^a	42.3	30.5	8.2	5.7	3443	83.6	213	148.5
40 kW – Holzhackschnitzel aus Nadelhölzern ^a	31.3	22.9	6.4	13.3	3413	117.3	310	113.7
In Frankreich gültige Grenzwerte (NF EN 12809/A1) ^b	< 50 kW		--	--	3000	--	100	150 ^f
400 kW – Miscanthus ^b	245 ^c	229	6.7	n.m. ^e	15	151	n.m. ^e	63.5
2.8 MW – Holzhackschnitzel ^b	3500 ^d	2800	10.7	n.m. ^e	42.9	118	n.m. ^e	1.01
In Frankreich gültige Grenzwerte (26/08/2013) ^b	0.4- 4 MW			300	250	750	50 ^f	225

- a. Die Konzentrationen der Emissionen in mg/Nm³ und mgC/Nm³ sind nach gesetzlichen Vorgaben bezogen auf 10 vol.% O₂
- b. Die Konzentrationen der Emissionen in mg/Nm³ und mgC/Nm³ sind nach gesetzlichen Vorgaben bezogen auf 6 vol.% O₂
- c. Berechnet mittels eines Wirkungsgrads von 93%, dieser wurde in einer vorhergehenden Studie bei 90 kW ermittelt
- d. Berechnet mit einem Wirkungsgrad von 80% (2 Jahres-Mittelwert)
- e. Nicht gemessen: Emissionen von SO₂ und VOC waren bei externen Messungen nicht verfügbar
- f. Flüchtige nicht-Methan Kohlenwasserstoffe; unsere Messungen beinhalten Methan
- g. Feuerungswärmeleistung
- h. Wärmeleistung

Tabelle 11: Zusammenfassung der Emissionen (die Konzentrationen sind auf einen Sauerstoffgehalt von 6 vol.% bzw. 10 vol.% bezogen)

Puissance thermique – Combustible	P _{fournie} ^g kW	P _{utile} ^h kW	CO ₂ (vol.%)	SO ₂ (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	VOC (mgC/Nm ³)	TSP (mg/Nm ³)
40 kW – Miscanthus ^a	36.6	24.2	7.8	13.9	104	198	8.4	33.5
40 kW – Plaquettes forestières de bois de hêtre ^a	42.3	30.5	8.2	5.7	3443	83.6	213	148.5
40 kW – Plaquettes forestières de bois de conifères ^a	31.3	22.9	6.4	13.3	3413	117.3	310	113.7
Législation française (NF EN 12809/A1) ^b	< 50 kW		--	--	3000	--	100	150 ^f
400 kW – Miscanthus ^b	245 ^c	229	6.7	n.m. ^e	15	151	n.m. ^e	63.5
2.8 MW – Plaquettes forestières ^b	3500 ^d	2800	10.7	n.m. ^e	42.9	118	n.m. ^e	1.01
Législation française (26/08/2013) ^b	0.4- 4 MW			300	250	750	50 ^f	225

- a. Les concentrations en mg/Nm³ et mgC/Nm³ sont normalisées à 10 vol.% O₂ selon la législation
- b. Les concentrations en mg/Nm³ et mgC/Nm³ sont normalisées à 10 vol.% O₂ selon la législation
- c. Calculée selon un rendement de 93% donnée par une étude précédente à 90 kW
- d. Calculée selon un rendement de 80% donné par une moyenne sur la même chaudière durant 2 ans.
- e. Non mesurée: appareil non disponible pour une mesure non effectuée au laboratoire
- f. Composés organiques volatiles non méthaniques – notre mesure prend en compte le méthane.
- g. Puissance thermique dégagée par le combustible
- h. Puissance thermique obtenue par l'échangeur

Tableau 11 : Résumé des combustions et émissions (émissions en mg/Nm³ ramenées à 6 vol.% ou 10 vol.% de dioxygène selon la norme)

3.3.2 Morphologie und Fluoreszenz

Die Forschungsgruppe „3D-Mikroskopie und Bildverarbeitung“ des MIPS-Labors hat die entstandenen Aschen und Feinstäube mittels Mikroskopie morphologisch charakterisiert.

Ein optisches Mikroskop vom Typ Olympus BX51 ermöglicht es, sowohl Bilder unter Weißlicht zu gewinnen als auch verschiedene Formen der Fluoreszenz zu untersuchen; insbesondere die Epifluoreszenz wird häufig für biologische Proben verwendet. Um die Fluoreszenz bei Ascheproben beobachten zu können, wurde zunächst ein Messprotokoll erarbeitet. Abbildung 7 rechts zeigt Partikel in schwarz auf einem roten Hintergrund. Einige Partikel in diesem Bild fluoreszieren (grün), was auf eine spezielle chemische Zusammensetzung hindeutet, die es zu untersuchen gilt.

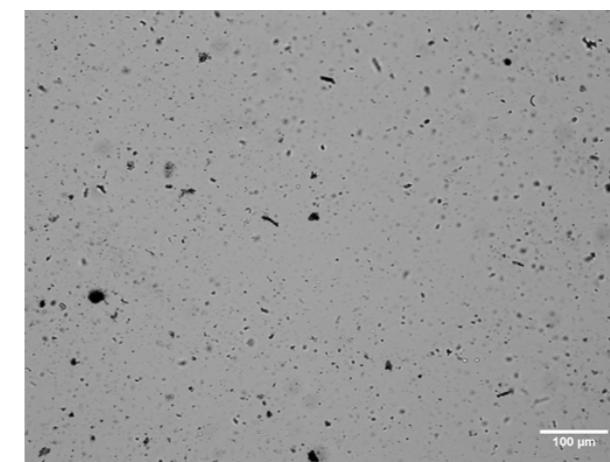


Abbildung 7: links: Weißlichtaufnahme. Rechts: aus Weißlichtaufnahme und Fluoreszenz-Aufnahme zusammengesetztes Bild. Fluoreszierende Partikel in grün und nicht fluoreszierende Partikel in schwarz.

Um die vorliegende Fluoreszenz zu erklären wurde zunächst mittels Bildverarbeitung ein Wert generiert, der die quantitative Fluoreszenz pro Partikel beschreibt. Dann wurden die gleichen Proben chemisch auf verschiedene organische Verbindungen untersucht: HUmic-Like Substances (HULIS), nicht verbrannte Reste von Kohlenstoff, lösliche organische Kohlenwasserstoffverbindungen sowie PAK. Eine Methode zur quantitativen Korrelation von Fluoreszenz und PAK-Konzentration wurde erarbeitet und anhand von jeweils 3 Partikel-Größenfraktionen (mit DGI gesammelt) aus drei verschiedenen Brennxperimenten mit Erfolg getestet (1-2.5 µm, 0.4-1 µm und kleiner à 0.4µm).

3.3.2 Morphologie et fluorescence des particules

L'équipe Imagerie Microscopique 3D et Traitement d'Image du laboratoire Modélisation, Intelligence, Processus et Systèmes (MIPS) a utilisé ses compétences pour essayer de caractériser morphologiquement les cendres et les particules fines de biomasse.

Un microscope optique Olympus BX51 permet l'observation en lumière blanche et en fluorescence d'échantillons variables; l'épifluorescence est néanmoins souvent utilisée pour des marquages d'échantillons biologiques. Pour l'observation de particules issues de la combustion biomasse, il a fallu tout d'abord mettre au point un protocole permettant leur observation entre lame et lamelle. La figure 7 à droite présente une image en fluorescence de ces particules. Les points verts représentent des particules qui fluorescent indiquant alors une composition chimique particulière.

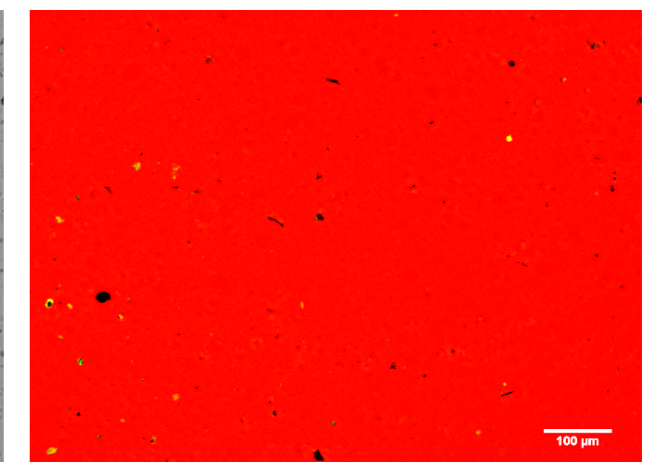


Figure 7 : A gauche : Vue en lumière blanche. A droite : Image composite entre la fluorescence (en vert) de quelques particules et en noir les particules non fluorescentes.

L'approche utilisée pour expliquer cette fluorescence a été double : décrire à l'aide du traitement d'image par des données quantifiables cette fluorescence par particules ; dans un second temps les composés carbonés de l'aérosol de combustion de biomasse du même échantillon ont été analysés chimiquement : HUmic-Like Substances (HULIS), carbone résiduel non brûlé, carbone organique soluble à l'eau, et HAP. Une méthode a été testée pour 3 types d'échantillons en trois tranches granulométriques collectées à l'aide du DGI permettant de corréler HAP et fluorescence (1-2.5 µm, 0.4-1 µm et inférieur à 0.4µm).

3.3.3 Chemische und mineralogische Untersuchungen 3.3.3 Analyse chimique et minéralogique

Probe Nr.	Brennstoff	Aschenfraktion / Partikel	Verbrennungsanlage
BA1	Holzhackschnitzel	Rostasche	St. Peter (D)
FA1	Holzhackschnitzel	Flugasche aus elektrostatischem Abscheider	St. Peter (D)
P1	Holzhackschnitzel	Mit dem Impaktor gesammelte Partikel	GRE (F)
BA2	Holzhackschnitzel	Rostasche	Vauban (D)
FA2	Holzhackschnitzel	Flugasche aus Zyklon und elektrostatischem Abscheider	Vauban (D)
BA3	Holzhackschnitzel	Rostasche	Ammertzwiler (F)
FA3	Holzhackschnitzel	Flugasche aus Zyklon	Ammertzwiler (F)
BA4	Holzhackschnitzel	Rostasche	Rixheim (F)
FA4	Holzhackschnitzel	Flugasche aus Gewebefilter	Rixheim (F)
BA5	Holzhackschnitzel	Rostasche	Colmar (F)
FA5	Holzhackschnitzel	Flugasche aus elektrostatischem Abscheider	Colmar (F)
BA6	Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂	Rostasche	Ammertzwiler (F)
FA6	Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂	Flugasche aus Zyklon	Ammertzwiler (F)
BA7	Miscanthus	Rostasche	GRE (F)
P7	Miscanthus	Mit dem Impaktor gesammelte Partikel	GRE (F)
BA8	Holzpellets	Rostasche	Maiackerweg (D)
P9	Buchen-Hackschnitzel	Mit dem Impaktor gesammelte Partikel	GRE (F)

Tabelle 12: Probenübersicht

Echantillon	Combustible	Type d'échantillon	Origine
BA1	Plaquettes de bois	Cendres résiduelle	St. Peter (D)
FA1	Plaquettes de bois	Cendre volante de l'électrofiltre	St. Peter (D)
P1	Plaquettes de bois	Particules collectées avec l'impacteur DGI	GRE (F)
BA2	Plaquettes de bois	Cendres résiduelle	Vauban (D)
FA2	Plaquettes de bois	Cendre volante sortant de cyclone et électrofiltre	Vauban (D)
BA3	Plaquettes de bois	Cendres résiduelle	Ammertzwiler (F)
FA3	Plaquettes de bois	Cendre volante du cyclone	Ammertzwiler (F)
BA4	Plaquettes de bois	Cendres résiduelle	Rixheim (F)
FA4	Plaquettes de bois	Cendre volante du filtre à manche	Rixheim (F)
BA5	Plaquettes de bois	Cendres résiduelle	Colmar (F)
FA5	Plaquettes de bois	Cendre volante de l'électrofiltre	Colmar (F)
BA6	Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂	Cendres résiduelle	Ammertzwiler (F)
FA6	Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂	Cendre volante du cyclone	Ammertzwiler (F)
BA7	Miscanthus	Cendres résiduelle	GRE (F)
P7	Miscanthus	Particules collectées avec l'impacteur DGI	GRE (F)
BA8	Granulés de bois	Cendres résiduelle	Maiackerweg (D)
P9	Plaquettes de hêtre	Particules collectées avec l'impacteur DGI	GRE (F)

Tableau 12: Combustibles étudiés

3.3.3.1 Chemische Analyse

Die Proben von Rost- und Flugaschen (BA bzw. FA, Tabelle 12) wurden mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) und Atomabsorptions-Spektrometrie (AAS) analysiert. Mit der RFA konnten die Konzentrationen der chemischen Hauptbestandteile der Aschen sowie einiger Spurenelemente gemessen werden. Konzentrationen von ausgewählten Schwermetallen und anderen Spurenelementen wurden mit hoher Präzision und niedriger Nachweisgrenze mit der AAS bestimmt. Für diese beiden Methoden sind Probenmengen von mehreren Gramm notwendig. Vor der Analyse wurden die Aschen im Ofen bei 50°C so lange getrocknet, bis kein Gewichtsverlust mehr feststellbar war.

Die Partikelproben, die mit dem Impaktor gesammelt wurden, mussten wegen geringer Probenmengen mit einer anderen Methode untersucht werden (siehe 3.3.3.2.2).

3.3.3.1.1 Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA)

Für die RFA wurden die Ascheproben unter Zugabe von 20 Gew.% Lithiumtetraborat (Flussmittel) in einem Tiegel über einer Flamme geschmolzen und anschließend abgekühlt, um eine glasige Probe zu erhalten.

Nicht alle Ascheproben konnten mittels RFA analysiert werden, da einige Proben (Rostaschen aus kleineren Öfen) zu viel Restbiomasse enthielten, und die Präparation der Schmelzproben fehlschlug.

3.3.3.1 Analyse chimique

Les échantillons de cendres résiduelles (BA) et de cendres volantes (FA ; Tableau 12) ont été analysés par spectrométrie d'absorption atomique (AAS) et fluorescence à rayons X (FX). La FX permet d'analyser les composants chimiques majoritaires des cendres ainsi que certains éléments-traces. La méthode AAS est utilisée pour compléter l'analyse de la concentration de certains métaux lourds et d'éléments-traces avec une précision accrue et une limite de détection plus faible. Pour ces analyses, une quantité de quelques grammes est nécessaire. Les échantillons ont été placés en étuve à 50°C jusqu'à masse constante pour la mesure de l'humidité résiduelle.

Les échantillons collectés avec l'impacteur ont été analysés par une autre méthode, car les quantités n'étaient pas suffisantes pour être analysées par les méthodes FX et AA (voir 3.3.3.2.2).

3.3.3.1.1 Analyse par spectrométrie de fluorescence X (FX)

Pour la préparation de l'analyse en FX, l'échantillon est mélangé avec du tétraborate de Lithium (20% massique) puis fondu au-dessus d'une flamme avant d'être refroidi pour obtenir un fondant.

Il n'a pas été possible d'analyser tous les échantillons à l'aide de la FX. Les cendres résiduelles des petites chaudières contenaient trop de composés volatils et la préparation a échoué.

	BA1	FA1	BA2	FA2	BA3	FA3	FA4	FA5
Composants majeurs (%massique) / Hauptbestandteile (Gew.%)								
SiO ₂	25.14	13.46	33.1	13.78	35.8	17.89	18.29	2.35
TiO ₂	0.19	0.17	0.22	0.17	0.07	0.1	0.17	0.03
Al ₂ O ₃	4.51	3.18	5.8	3.27	0.98	1.31	3.13	0.56
Fe ₂ O ₃ (tot) *	2.28	1.64	2.53	2.43	0.79	8.98	2.31	0.85
MnO	0.83	0.41	0.95	1.24	0.35	0.31	0.88	0.73
MgO	4.73	3.7	4.76	5.84	1.48	1.27	3.76	2.89
CaO	44.62	30.88	38.1	39.87	51.13	54.95	22.43	15.65
Na ₂ O	0.58	0.7	0.96	0.95	0.43	0.47	1.9	1.34
K ₂ O	10.23	18.22	8.9	14.02	7.31	1.18	18.94	32.39
P ₂ O ₅	4.96	4.13	3.56	4.31	3.51	1.92	2.43	2.04
Total	98.07	76.49	98.88	85.88	101.85	88.38	74.24	58.83
Eléments traces (ppm) / Spurenelemente (ppm)								
V	33	29	44	46	14	18	38	16
Cr	167	52	516	1046	5.96	838	1159	722
Ni	42	41	251	462	377	522	664	384
Cu	250	197	1174	872	62	70	256	395
Zn	40	2041	222	2663	33	1135	4379	7212
Rb	203	280	318	740	15	7	445	1192
Sr	1092	605	1092	1191	194	186	530	412
Zr	85	72	102	69	59	55	74	12
Ba	2393	1638	5238	6512	229	391	1683	1470

* Fe₂O₃(tot) : dieser Wert gibt den Gesamt-Eisengehalt an, d.h. sowohl FeO als auch Fe₂O₃, ausgedrückt in Gew.% Fe₂O₃ / cette valeur indique la concentration totale du fer, y compris la teneur en FeO et Fe₂O₃, mais exprimé en %massique de Fe₂O₃

Tabelle 13: Chemische Elementgehalte der Aschen, bestimmt mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse

Tableau 13 : Composition chimique des cendres par fluorescence à rayons X

Die Daten (Tabelle 13) erlauben einen Vergleich von drei Rost- und Flugaschepaaren untereinander, indem die Werte für die Flugaschen (FA) jeweils mit den Werten der Rostaschen (BA) normiert werden. So werden Unterschiede in der Anreicherung von bestimmten Elementen in den FA deutlich. Abbildung 8 zeigt, dass die Konzentrationen der Hauptelemente in der aus dem elektrostatischen Abscheider (ESP) gewonnenen Flugasche (St. Peter, Vauban) gegenüber den Konzentrationen in der Rostasche etwas vermindert sind. Dies trifft aber nicht zu für die Alkalimetalle Natrium und Kalium, wobei die Kalium-Konzentration fast zweifach erhöht ist. Die ausschließlich mit einem Zyklon gewonnene Flugasche (Ammertzwiller) hingegen ist zehnfach an Eisen angereichert, aber auch etwas an Titan und Aluminium; die Kalium-Konzentration ist hier jedoch stark vermindert.

Pour l'analyse des données (Tableau 13), les concentrations des cendres volantes (FA) sont normalisées par rapport aux concentrations dans les cendres résiduelles (BA). Cela permet de mettre en évidence un facteur d'enrichissement de certains éléments dans les cendres volantes. L'analyse de la Figure 8 montre que les cendres volantes piégées dans les électrofiltres (ESP ; St. Peter, Vauban) enregistrent un enrichissement moins important que les cendres du lit pour la majeure partie des composants, en dehors des métaux alcalins : sodium et potassium. Il y a par contre une teneur deux fois plus élevée en potassium. Les cendres volantes piégées dans les cyclones (Ammertzwiller) contiennent de fortes teneurs en fer et des quantités plus faibles de titane et d'aluminium. On peut noter que le potassium est beaucoup moins présent.

Die Flugasche, welche eine Mischung von mittels Zyklon und Elektrofilter abgeschiedener Asche darstellt (Vauban), unterscheidet sich bis auf den relativen Gehalt

Les cendres volantes issues d'un regroupement entre les cendres cyclone et électrofiltre (à Vauban) se distinguent des cendres d'électrofiltre (St. Peter)

an Eisen und Mangan nicht besonders von der reinen Elektrofilterasche (St. Peter), was darauf hindeutet, dass der Gewichtsanteil der mit dem Zyklon zurückgehaltenen Flugasche hier eher eine untergeordnete Rolle spielt.

par un contenu relativement plus fort en fer et en manganèse. Cet effet s'explique par l'ajout de cendres volantes (cyclone) plus concentrées.

Bei den Spurenelementen (Abb. 9) beobachtet man, dass die Gehalte in den Flugaschen sich relativ zu den Gehalten in den Rostaschen nicht erheblich unterscheiden, außer für die Elemente Chrom, Zink und Rubidium. Beim Chrom ist deutlich eine Abhängigkeit von der Abscheidetechnik zu sehen. Chrom verhält sich analog zu Eisen (Abb. 8), findet sich also vermindert in der Elektroabscheiderasche, sehr stark erhöht (über hundertfach) in der Zyklonasche, und kaum erhöht in der gemischten Flugasche. Für Rubidium gilt dasselbe, jedoch in umgekehrter Reihenfolge. Zink - ein sehr volatiles Element - ist in allen Flugaschetypen mindestens zehnfach erhöht.

Les teneurs en éléments traces dans les cendres volantes ne diffèrent que peu des teneurs dans les cendres résiduelles (Fig. 9). Ce constat n'est par contre pas observé pour le chrome, le zinc et le rubidium. Le comportement du chrome est très proche de celui du fer (Fig. 8). On en retrouve moins dans des cendres d'électrofiltres que dans des cendres de cyclone. Dans celles-ci, un facteur d'enrichissement de 100 est noté. Le rubidium quant à lui présente un comportement inverse. Le zinc, élément très volatil, est enrichi d'un facteur 10 au moins dans les cendres volantes.

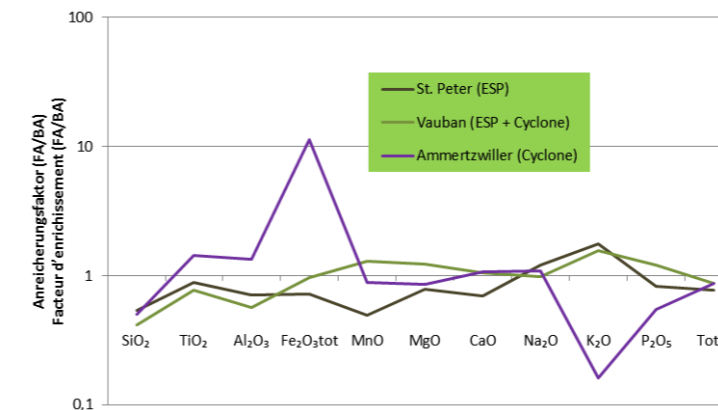


Abbildung 8: Gehalte der Hauptelemente in Flugaschen (FA), normiert auf die Gehalte in den entsprechenden Rostaschen (BA). ESP = Elektrostatistischer Filter; Cyclone = Zyklon

Figure 8 : Teneur en éléments majeurs dans les cendres volantes (FA) normalisées par rapport aux teneurs dans les cendres résiduelles (BA). ESP = électrofiltre

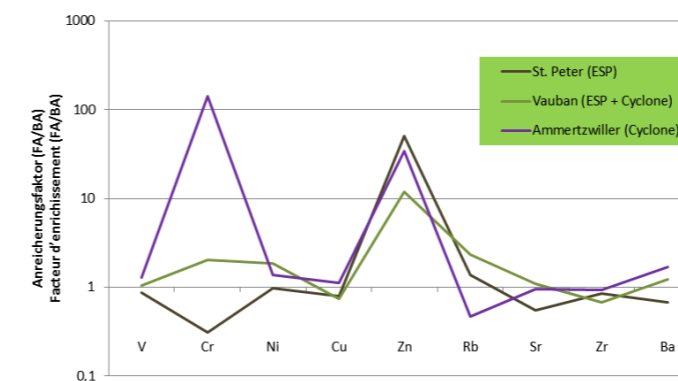


Abbildung 9: Gehalte der Spurenelemente in Flugaschen (FA), normiert auf die Gehalte in den entsprechenden Rostaschen (BA). ESP = Elektrostatistischer Filter; Cyclone = Zyklon

Figure 9 : Teneur en éléments-traces dans les cendres volantes (FA) normalisées par rapport aux teneurs dans les cendres résiduelles (BA). ESP = électrofiltre

3.3.3.1.2 Atomabsorptions-Spektrometrie (AAS)

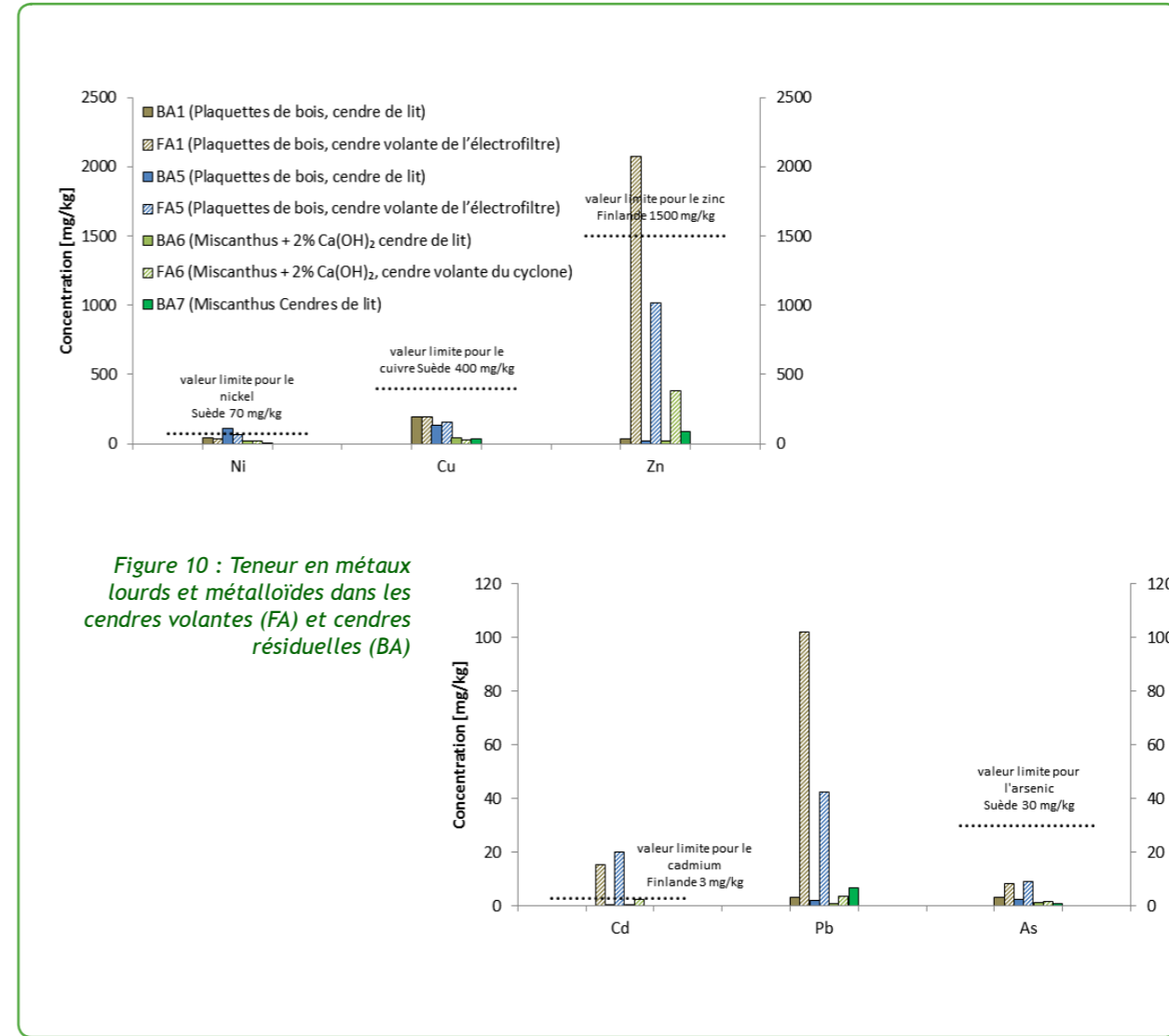
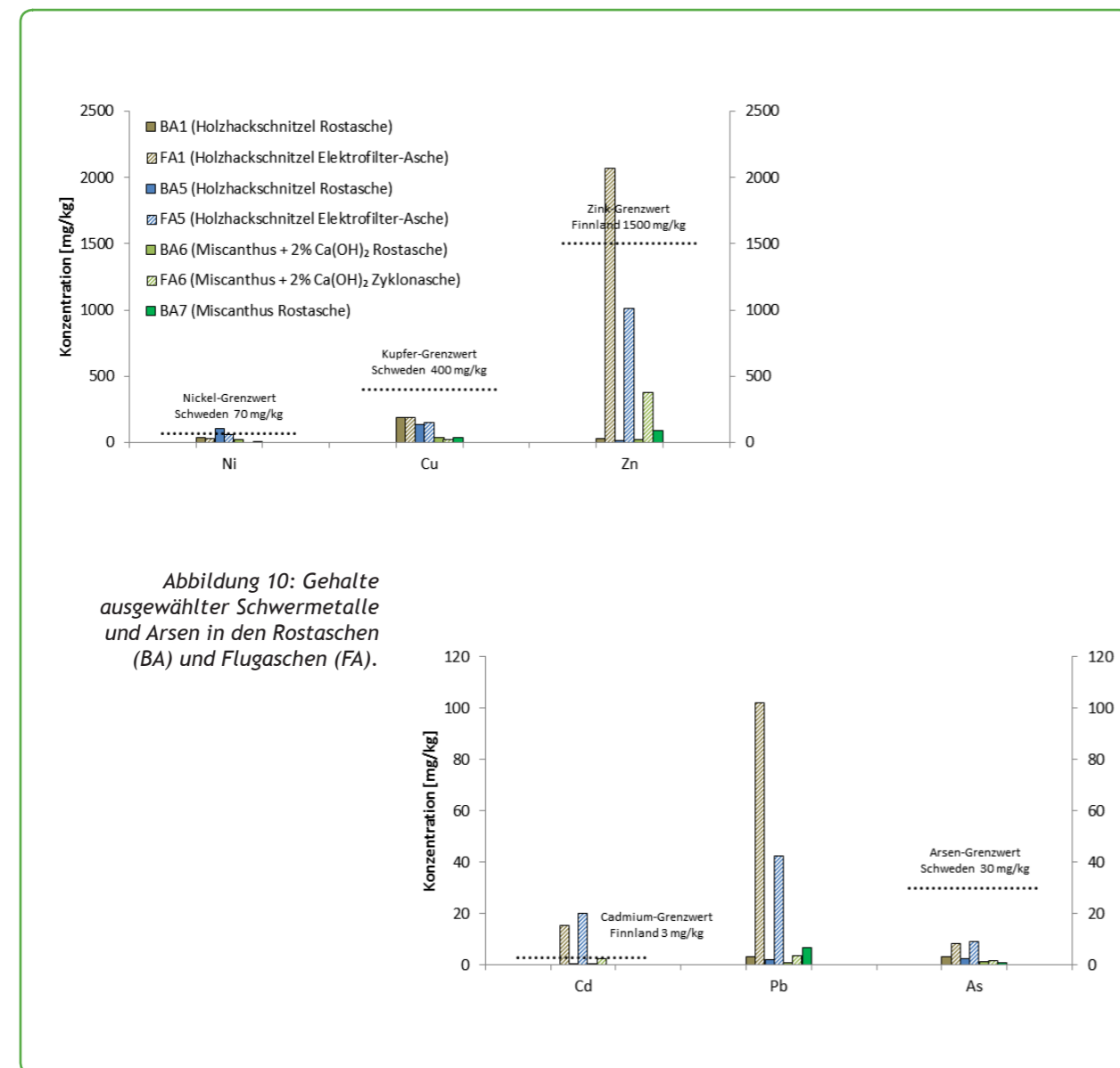
Für die AAS wurden die Ascheproben mit Königswasser bzw. Flusssäure aufgeschlossen. Der Fokus bei diesen Messungen lag auf den Schwermetallen Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium und Blei, sowie auf Arsen. Für diese Elemente liegen Grenzwerte vor, die für Aschen aus Biomasse-Verbrennung gelten. Je nach Belastung können die Aschen z.B. in der Landwirtschaft weiterverwendet werden oder müssen deponiert werden. Da die in Finnland bzw. Schweden geltenden Grenzwerte die niedrigsten sind, wurden diese hier verwendet.

Die AAS-Daten (Abb. 10) stimmen gut mit den Ergebnissen aus der RFA überein.

3.3.3.1.2 Spectrométrie d'absorption atomique (AAS)

Pour l'analyse AAS, les échantillons sont minéralisés dans de l'eau régale ou de l'acide fluorhydrique. L'accent est mis sur la mesure des métaux lourds comme le nickel, le cuivre, le zinc, le cadmium, le plomb, ainsi que sur la mesure d'arsenic. Les teneurs en ces éléments font l'objet de valeurs maximales autorisées pour la réutilisation des cendres en agriculture. Les teneurs mesurées sont comparées aux seuils limites réglementaires les plus sévères existants au niveau européen. Il s'agit des seuils imposés en Suède et en Finlande.

Les données de l'analyse en AAS (Fig. 10) sont en bon accord avec les résultats obtenus en FX pour l'échantillon.



Während die Werte für Nickel und Kupfer in Rost- und Flugaschen sich nicht signifikant unterscheiden, gibt es bei Zink, Cadmium, Blei und Arsen deutliche Unterschiede bei den Gehalten in Rost- und Flugaschen. Im Vergleich zu den zugehörigen Rostaschen sind diese Elemente in den Flugaschen um das Hundertfache höher. Die hohen Dampfdrücke von einigen Metallen und Metalloiden wie Zink, Cadmium und Arsen sind schon bei den Temperaturen der Biomasse-Verbrennung so hoch, dass sie verdampfen. Sie werden daher aus dem Brennraum ausgetragen und kondensieren bei Abkühlung auf den Flugaschen.

Der Grenzwert für Zink wird in der Flugasche aus Verbrennung von Holzackschnitzeln (FA1) überschritten, und beide Proben von bei Holz-Verbrennung entstandenen Flugaschen (FA1 und FA5) überschreiten den Grenzwert für Cadmium, wobei die Cadmium-Konzentration in der Flugasche aus der Verbrennung von Miscanthus (FA6) auch sehr nahe an diesen Grenzwert herankommt.

Les teneurs en nickel et cuivre sont comparables entre les cendres résiduelles et les cendres volantes. À l'inverse, les teneurs en zinc, cadmium, plomb et arsenic sont cent fois plus élevées dans les cendres volantes par rapport aux cendres résiduelles issues de la même origine. Certains métaux et métalloïdes comme le zinc, le cadmium et l'arsenic présentent des pressions de vapeur saturante très élevées même à des basses températures. La conséquence est l'entraînement de ces éléments dans les gaz de combustion. Ces éléments se condensent au cours du refroidissement des fumées sur les cendres volantes.

La valeur limite pour le zinc est dépassée dans le cas des cendres volantes de la combustion de plaquettes de bois (FA1), ainsi que la valeur limite de cadmium dans le cas des cendres volantes de plaquettes (FA1 et FA5). Nous pouvons également observer que la teneur en cadmium dans le cas de la combustion de miscanthus (FA6) est aussi proche de cette limite.

3.3.3.2 Mineralogische Zusammensetzung

3.3.3.2.1 Röntgendiffraktometrische Analyse (RDA)

Mithilfe der Röntgendiffraktometrie (RDA) kann man die kristallinen Phasen in den Aschen und Partikeln identifizieren und - bei Zugabe eines Standards - außerdem deren Anteil an der Probe semi-quantitativ bestimmen. Weiterhin lässt sich eine Aussage über den Anteil an nicht-kristallinen (amorphen) Feststoffen treffen (z.B. Glas). Um bei komplexen Materialien wie Aschen statistisch verwertbare Daten zu erhalten, wurde die Pulverdiffraktometrie gewählt, wofür je ca. ein Gramm der Probe in einem Mörser zu einem sehr feinen Pulver zerkleinert wurde. Für die Identifizierung der Phasen waren die zuvor erhobenen chemischen Messergebnisse hilfreich.

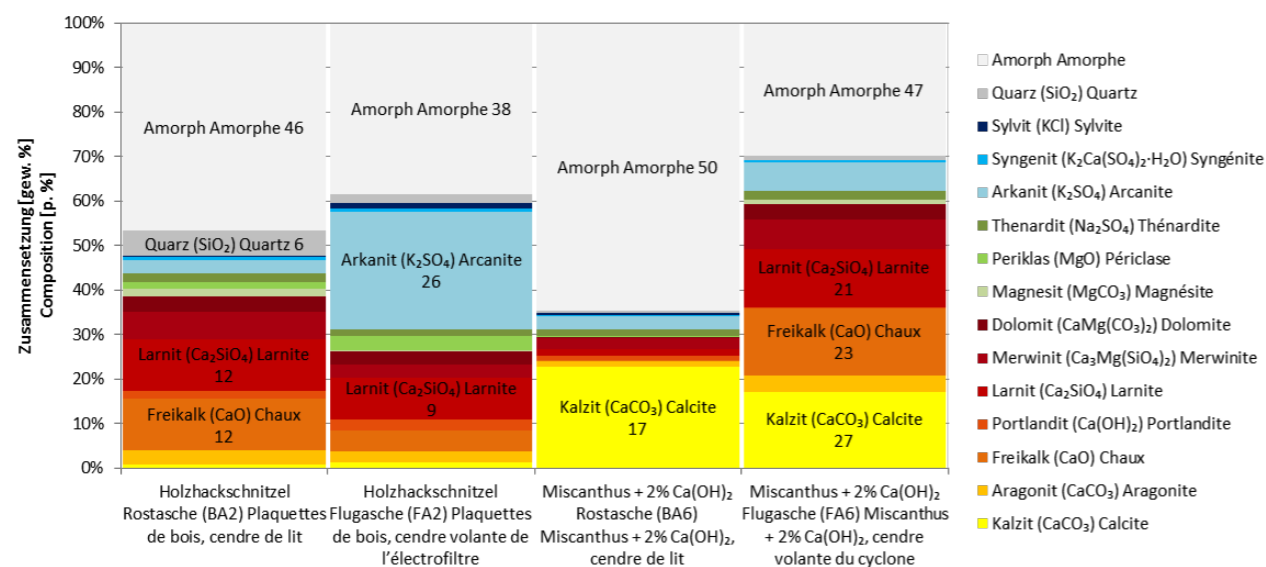


Abbildung 11: Semi-quantitative mineralogische Zusammensetzung ausgewählter Rost- und Flugaschen. Bei den Angaben handelt es sich um relative Häufigkeiten der Feststoffe.

Der Unterschied zwischen Rost- und Flugaschen wird auch bei der mineralogischen Betrachtung deutlich; Rostaschen beinhalten mehr (schwere) kalzium- und siliziumreiche Verbindungen und haben einen höheren Anteil an amorphen Substanzen (Glas) als die Flugaschen. Das gilt sowohl für Holzhackschnittzel, als auch für Miscanthus (Abb. 11). Der hohe Kalzitgehalt in den Miscanthus-Aschen (hellgelb) stammt von der Beimengung von Ca(OH)₂ zum Brennstoff. Dies verhindert einerseits die Bildung von korrosiven Schlacken, die die Verbrennung behindern, und fixiert andererseits korrosive Kalium-, Schwefel- und Chlorverbindungen in den Abgasen.

3.3.3.2 Composition minéralogique

3.3.3.2.1 Analyse par diffraction à rayons X (DX)

L'analyse par diffraction X (DX) permet d'identifier les phases cristallines présentes dans les cendres et les particules. En outre, quand on ajoute un étalon standard, on peut même déterminer la proportion des phases cristallines ainsi que celle des matériaux amorphes (comme le verre par exemple). Cette analyse des proportions des phases reste néanmoins semi-quantitative. La technique choisie concerne l'analyse d'environ 1 gramme de cendres. Les résultats de mesure chimiques effectués auparavant ont été utiles pour l'identification des phases.

Figure 11 : Analyse semi-quantitative de la composition minéralogique des cendres volantes et des cendres résiduelles (cendres de lit). Les données indiquent les abondances relatives des phases solides.

La différence entre cendres résiduelles et cendres volantes est également visible dans l'analyse minéralogique (obtenue par DX). Les cendres du lit contiennent plus de composants riches en calcium et silicium et ont une fraction plus importante en substances amorphes que les cendres volantes. Ceci est observé autant pour les plaquettes de bois que pour le miscanthus (Fig. 11). La concentration importante en calcite (en jaune pâle) dans les cendres du miscanthus est liée à l'ajout de Ca(OH)₂ dans la chaudière pour empêcher la formation de mâchefers bouchant les grilles et pour fixer les composants corrosives des fumées contenant du chlore, du potassium et du soufre.

Die mineralogische Zusammensetzung der Aschen der verschiedenen Brennstoffarten und Verbrennungsanlagen variiert in hohem Maße, ist aber dennoch von den vorhandenen Feststoffen her ähnlich.

Bei der mineralogischen Untersuchung der mit dem Impaktor gesammelten Partikel konnte keine semi-quantitative Auswertung erfolgen, da das Röntgensignal der amorphen Feststoffe, welches vermutlich von dem hohen Anteil an organischem Material hervorgerufen wurde, zu groß war.

3.3.3.2.2 Analyse mittels Rasterelektronen-Mikroskop

Mit dem Rasterelektronen-Mikroskop (REM) können Asche- und Partikelproben sowohl manuell als auch automatisiert analysiert werden. Dabei können mittels energie-dispersiver Röntgenspektrometrie (EDX) für jedes Partikel die darin enthaltenen chemischen Elemente bestimmt werden. Aus diesen Daten lassen sich z.B. statistische Aussagen über den Zusammenhang zwischen Zusammensetzung und Größe der Partikel treffen.

Mittels REM konnte festgestellt werden, dass bei Flugaschen die kleinsten Partikel (PM_{2,5}) vorwiegend aus Arkanit, also Kaliumsulfat (K₂SO₄), bestehen. Die großen Partikel sind meist natürliche Gesteinspartikel (Quarz, Feldspat, Glimmer und Tonminerale), die schon vorher als Staub in den Brennstoff eingetragen wurden, und nicht erst während der Verbrennung entstanden sind.

Vor allem in der im Zyklon abgeschiedenen Flugasche finden sich überwiegend Partikel, die während des Verbrennungsprozesses aus silizium-, aluminium-, eisen- und kalziumreicher Schmelze als Blasen gebildet werden. Diese Partikel finden sich untergeordnet auch in den mittels anderer Methoden abgeschiedenen Flugaschen, wo aber feine Salzpartikel dominieren (Abb. 12). Die Partikelgrößenverteilung hängt dabei sowohl von den Verbrennungsbedingungen als auch von dem Abkühlvorgang in Wärmetauscher und Rauchgasreinigung ab.

La composition minéralogique des différentes cendres est semblable mais les proportions des phases diverses varient en fonction de la nature du combustible.

Dans le cas des particules collectées avec l'impacteur, une analyse DX semi-quantitative n'a pas été possible car la part des composés amorphes attribuable à la présence de composés organiques était trop importante.

3.3.3.2.2 Analyse par microscope électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) permet une analyse manuelle ou automatique d'échantillons de cendres ainsi que de particules. L'analyse par dispersion d'énergie (EDX) permet de mesurer les éléments contenus dans chaque particule. Il est ainsi possible de déterminer la composition chimique par taille de particules.

L'analyse MEB des cendres volantes montre que les plus petites particules (PM_{2,5}) sont composées essentiellement du sulfate de potassium (K₂SO₄) sous forme arcanite. Les particules les plus grandes sont majoritairement composées de particules naturelles de roche (Quartz, Feldspath, Micas et argiles minérales) présentes dans le combustible. Ces particules minérales ne réagissent pas au cours de la combustion et sont retrouvées dans des cendres volantes.

Les cendres volantes collectées au sein du cyclone contiennent des particules qui ont été formées pendant la combustion à partir de bulles en fusion de silicium, aluminium, fer et calcium. Ces particules se trouvent également dans les autres cendres volantes dans lesquelles de fines particules de sel dominant (Fig. 12). La taille des particules dépendent à la fois des conditions de combustion et de refroidissement que rencontrent les gaz lors de leur passage dans l'échangeur de chaleur et dans les systèmes d'épuration.

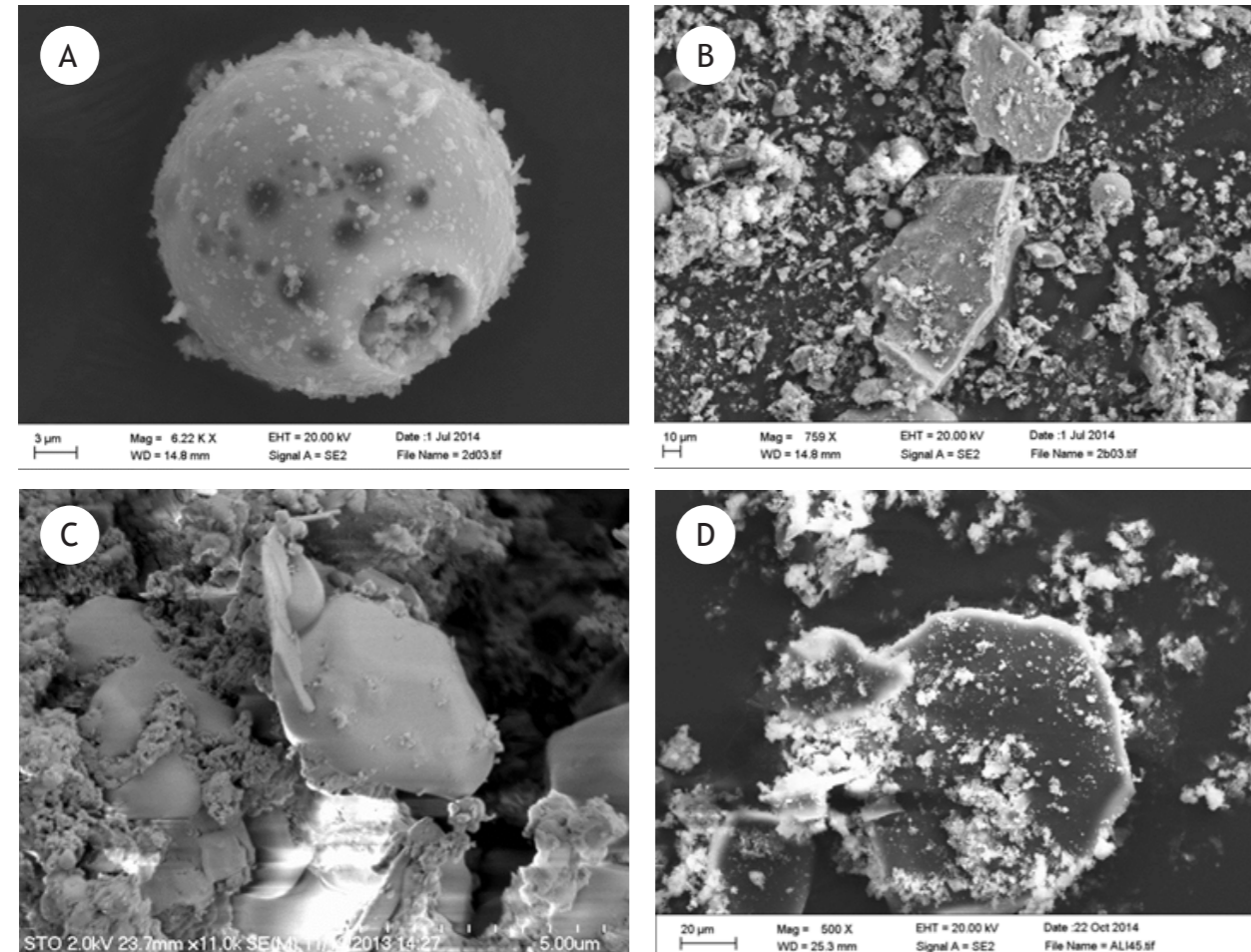


Abbildung 12: REM Aufnahmen von
A) Flugaschepartikeln in Zyklonasche aus Holzhackschnitzel-Verbrennung (FA3);
B) natürlichen Gesteinspartikeln mit feinen Salzpartikeln und Flugaschepartikeln in der Flugasche aus einem elektrostatischen Abscheider (FA1);
C) großen Kaliumchloridpartikeln in Kaliumsulfatmatrix und organischem Material aus einer mit dem Impaktor gesammelten Partikelprobe aus der Verbrennung von Buchenholz (P9);
D) Kaliumchloridpartikeln mit feinen Kaliumsulfatpartikeln und organischem Material aus einer mit dem Impaktor gesammelten Partikelprobe aus der Verbrennung von Nadelholz (P1).

Figure 12: Clichés MEB de
A) particule de cendre volante de la combustion de plaquettes de bois (FA3) ;
B) particule naturelle de roche avec petites particules de sel et particules de cendre volantes d'un électrofiltre (FA1) ;
C) particule de chlorure de potassium avec sulfate de potassium et matériau organique issu de la combustion de hêtre et collecté avec l'impacteur (P9) ;
D) particule de chlorure de potassium avec sulfate de potassium et matériau organique issu de la combustion de bois résineux et collecté avec l'impacteur (P1).

3.3.4 Zusammensetzung des Kohlenstoffs in den Partikeln

Das GRE hat die chemische Zusammensetzung der Partikel bezüglich verschiedener organischer Verbindungen untersucht: HULIS, Reste nicht verbrannten Kohlenstoffs, lösliche organische Kohlenwasserstoffverbindungen sowie PAK. Dies ermöglichte zudem die Korrelation mit den Ergebnissen des MIPS (Fluoreszenz, siehe 3.3.2). Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt.

3.3.4 Spéciation du carbone au sein des particules

Le GRE a analysé la spéciation du carbone résiduel: carbone résiduel non brûlé, carbone organique soluble à l'eau, HULIS, HAP, et ceci afin de mettre en évidence des éventuelles corrélations avec les résultats de fluorescence obtenus par le MIPS (voir 3.3.2). Les résultats des différentes formes de carbone sont présentés dans le Tableau 14.

Brennstoff - Leistung - Ort der Partikel-Sammlung	Restkohlenstoffgehalt (Gew.%)	Wasserlösliche Kohlenwasserstoffe (mg/g)	HULIS (µg/g)	ΣPAK (µg/g)	Fluoreszenz-Intensität (F.U/part)**
Holzhackschnitzel 400 kW -Multizyklon	9.46	2.17	116	4.97	37.5
Miscanthus 400 kW - Multizyklon	20.5	1.72	491	1.84	36.7
Holzhackschnitzel 2.8 MW - Gewebefilter	7.29	1.61	155	1.79	6.83
Holzhackschnitzel 8 MW - Elektrofilter ^a	11.0	2.86	101	0.79	1.15
Holzhackschnitzel + 2% Maisspindeln	10.9	4.34	121	0.34	8.04
17.3 MW - Gewebefilter					
Miscanthus 40kW (>2.5 µm) ^a	17.8	4.95	281	30.8	8.16
Miscanthus 40kW (1-2.5µm) ^a	6.54	5.23	500	9.04	2.41
Miscanthus 40kW (0.4-1 µm) ^a	2.92	1.21	95	2.46	0.94
Buchenholz-Hackschnitzel 40kW (>2.5 µm) ^a	1.0	8.09	3173	622.5	16.5
Buchenholz-Hackschnitzel 40kW (1-2.5µm) ^a	19.9	9.32	4057	1369	65.3
Buchenholz-Hackschnitzel 40kW (0.4-1 µm) ^a	18.0	14.6	5341	2458	92.8
Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂ 400kW (>2.5 µm) ^a	13.4	1.43	113	10.9	1.04
Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂ 400kW (1-2.5µm) ^a	13.3	2.23	222	2.31	0.19
Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂ 400kW (0.4-1 µm) ^a	8.15	3.95	189	11.2	1.32

^a Mit dem Impaktor gesammelte Fraktionen

** die quantitative Fluoreszenz pro Partikel (siehe Abschnitt 3.3.2)

Tabelle 14 : Kohlenwasserstoff-Verbindungen in Partikeln aus der Biomasse-Verbrennung (Verbrennungsanlagen aus Tabelle 5)

Combustible - puissance - collection du matériel	Carbone résiduel non brûlé (%massique)	Carbone organique soluble à l'eau (mg/g)	HULIS (µg/g)	ΣHAP (µg/g)	Intensité de fluorescence (F.U/part)**
Plaquettes forestières 400 kW -Cyclone	9.46	2.17	116	4.97	37.5
Miscanthus 400 kW - Cyclone	20.5	1.72	491	1.84	36.7
Plaquettes forestières 2.8 MW - Bag house	7.29	1.61	155	1.79	6.83
Plaquettes forestières 8 MW - ESP	11.0	2.86	101	0.79	1.15
Plaquettes forestières + 2% Rafles de maïs					
17.3 MW - Filtre à manches	10.9	4.34	121	0.34	8.04
Miscanthus 40kW (>2.5 µm) ^a	17.8	4.95	281	30.8	8.16
Miscanthus 40kW (1-2.5µm) ^a	6.54	5.23	500	9.04	2.41
Miscanthus 40kW (0.4-1 µm) ^a	2.92	1.21	95	2.46	0.94
Plaquettes forestières hêtre 40kW (>2.5 µm) ^a	21.0	8.09	3173	622.5	16.5
Plaquettes forestières hêtre 40kW (1-2.5µm) ^a	19.9	9.32	4057	1369	65.3
Plaquettes forestières hêtre 40kW (0.4-1 µm) ^a	18.0	14.6	5341	2458	92.8
Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂ 400kW (>2.5 µm) ^a	13.4	1.43	113	10.9	1.04
Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂ 400kW (1-2.5µm) ^a	13.3	2.23	222	2.31	0.19
Miscanthus + 2% Ca(OH) ₂ 400kW (0.4-1 µm) ^a	8.15	3.95	189	11.2	1.32

^a : Fractions collectées avec l'impacteur

** fluorescence par particule (voir paragraphe 3.3.2)

Tableau 14 : Composition carbonée des particules de combustion (sites de combustion données en tableaux 5)

Die größten Konzentrationen an PAKs (gentoxische Substanzen) wurden bei der Verbrennung von Buchenholz-Hackschnitzeln mit 32 Gew.% Feuchte im Laborversuch gemessen. Gleichzeitig sind auch die Emissionen von CO und VOCs erhöht (Tabelle 11). Dies deutet auf eine schlechte Verbrennung hin und kann mit dem für den verwendeten Heizkessel grenzwertigen Wassergehalt erklärt werden. Für die mit dem Impaktor gesammelten PM_{2,5}-Proben kann eine Korrelation zwischen PAK-Konzentration und Fluoreszenz festgestellt werden (Tabelle 14).

Mit Hilfe der MoLa Messungen kann Kohlenstoff in Form von Ruß sowie organischen Verbindungen (CH- bzw. CHO-haltige Verbindungen) in PM₁ speziiert werden. Der Anteil von Ruß an der Gesamtmasse kohlenstoffhaltiger Verbindungen betrug während der Flammphase für Scheitholzmessungen (Buche) ca. 85 %, für die Anlage in Ammertzwiller ca. 40 %, und für die Anlage in St. Peter weniger als 1 %. Der organische Kohlenstoff bestand bei Messungen am Scheitholzofen und an der Anlage in Ammertzwiller zu etwa 2/3 aus CH- und zu 1/3 aus CHO-haltigen Verbindungen; an der Anlage in St. Peter war es umgekehrt. Dies könnte durch effizientere

Les concentrations les plus fortes en HAP (produits génotoxiques) sont observées dans les trois fractions des PM_{2,5} pour la combustion de plaquettes hêtre à 32% (en masse) d'humidité lors de la combustion à petite échelle au laboratoire. Des fortes concentrations en monoxyde de carbone et en composés organiques volatils sur la chaudière REKA sont observées lors de la combustion de ces plaquettes humides (Tableau 11). Ces valeurs traduisent une mauvaise combustion liée à une forte humidité dans le combustible. Cette technologie de chaudière n'est pas adaptée à des combustibles biomasses d'humidité élevée. Dans le Tableau 14, on observe dans les fractions PM_{2,5} une corrélation entre la teneur en HAP et la fluorescence.

Les instruments du MoLa permettent de déterminer la nature chimique du carbone dans les PM₁. Il est possible de distinguer si le carbone est sous forme de suies, composés contenant des groupes -CH et -CHO ou HAP. Si la part de suie représente environ 85% de la masse totale de molécules carbonées dans les PM₁ lors de la combustion du bois de hêtre, elle n'est plus que de 40% dans les particules récoltées à Ammertzwiller, et elle représente moins de 1% à St. Peter. Le carbone

Verbrennung zu erklären sein, aber auch durch effizientere Abgasreinigung, in deren Folge schwerer flüchtige Substanzen (d.h. insbesondere CHO-haltige Verbindungen) durch Kondensation aus der Gas- in die Partikelphase übergehen.

3.3.5 Umwelteinfluss großer Biomasse-Verbrennungsanlagen

Aus den mobilen Messungen mittels MoLa lassen sich Karten der Verteilung verschiedener Spurenstoffe erstellen. In Abbildung 13 sind beispielhaft die Verteilungen von Ruß in der Umgebung von Ammertzwiller und St. Peter dargestellt.

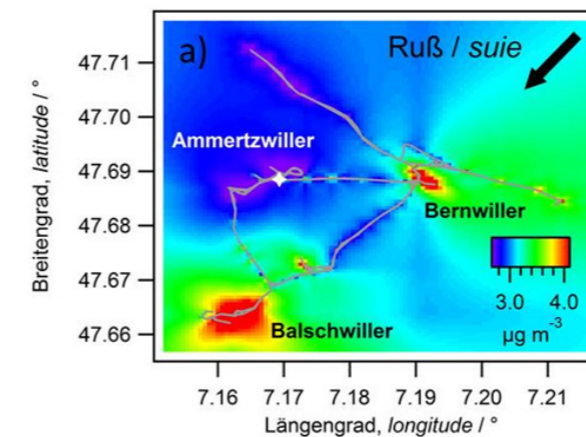


Abbildung 13: Verteilung von Ruß in der Umgebung von a) Ammertzwiller und b) St. Peter. Die Standorte der Biomasse-Verbrennungsanlagen sind durch weiße Sterne, die vorherrschenden Windrichtungen durch schwarze Pfeile dargestellt. Die Messungen fanden tagsüber am 13. bzw. 15.02.2013 statt.

Bei der Messung in und um Ammertzwiller (Abb. 13a) zeigen sich erhöhte Konzentrationen von Ruß und anderen Produkten aus Holz-Verbrennung (z.B. PAK, Organik in PM₁) insbesondere im Nachbarort Balschwiller, weniger in Bernwiller und kaum in Ammertzwiller. Wie Ammertzwiller verfügt auch Bernwiller über eine mittelgroße Biomasse-Verbrennungsanlage zur Versorgung mehrerer Häuser mit Wärme und Warmwasser. Die Wärmeversorgung durch eine gemeinsame Biomasse-Verbrennungsanlage führt in diesen beiden Dörfern also zu einer insgesamt besseren Luftqualität als bei individueller Holz-Verbrennung in privaten Haushalten.

organique est composé à 2/3 de groupements -CH et à 1/3 de groupements -CHO à Ammertzwiller ainsi que dans le cas du poêle à bûche. La répartition est l'inverse à St. Peter. Cette observation peut être expliquée soit par une meilleure combustion, soit par un nettoyage des fumées plus efficace, qui permet aux substances plus lourdes (notamment les composants riches en CHO) de se condenser sur des particules.

3.3.5 Influence environnementale des grandes chaudières à biomasse

Les résultats des mesures mobiles effectués à l'aide du MoLa permettent de créer des cartographies des différents gaz et d'autres composants à l'état de trace dans l'air autour des chaufferies. Dans la Figure 13 sont représentées à titre d'exemple les répartitions de suie autour d'Ammertzwiller et de St. Peter.

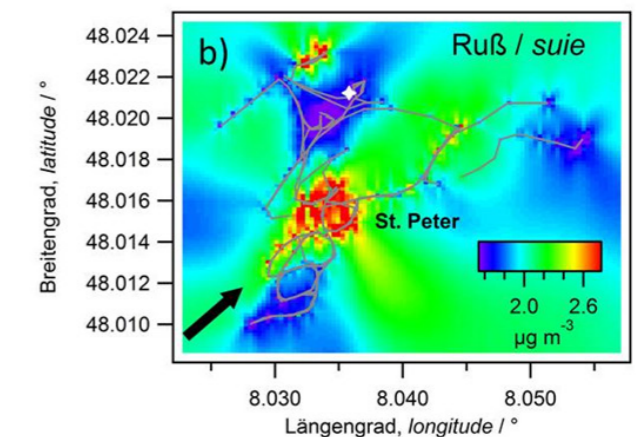


Figure 13 : Répartition géographique de suie dans l'air d'Ammertzwiller (a) et de St. Peter (b). La position des chaudières est marquée par une étoile blanche, la direction du vent prépondérant par une flèche noire. Les mesures diurnes ont été effectuées le 13 et le 15 février 2013.

Les mesures autour de la chaudière d'Ammertzwiller (Fig. 13a) montrent une augmentation des concentrations de suie et d'autres produits de la combustion du bois (par exemple : HAP, partie organique dans les PM₁) dans les villages autour d'Ammertzwiller (de façon faible à Bernwiller et plus élevée à Balschwiller). A Ammertzwiller, ces composés sont présents en plus faible quantité. Le village de Bernwiller est également doté d'une chaufferie collective à plaquettes forestières. La centrale thermique de biomasse et la distribution de chaleur permettent d'améliorer la qualité de l'air par rapport à une utilisation de foyers bois individuels.

In und um St. Peter fanden Kartierungsmessungen sowohl bei Tag (Abb. 13b) als auch bei Nacht statt. Bei Tag waren zwei verschiedene Quellen auszumachen: Im Ortskern von St. Peter wurden hohe Konzentrationen von Ruß, PM₁, organischer Aerosolbestandteile in PM₁ und PAK gefunden, die alle auf private Holz-Verbrennung zurückzuführen sind. An der Hauptverkehrsstraße dagegen, die an St. Peter vorbeiführt, treten tagsüber hohe Konzentrationen der Partikelanzahl, von NO_x und CO₂ auf. Diese können auf den herrschenden Straßenverkehr zurückgeführt werden, zumal sie bei Nacht (d.h. bei deutlich geringerer Verkehrsdichte) verschwinden. Die Marker der Holzverbrennungs-Emissionen sind dagegen auch während der Nacht erkennbar; wie in Ammertzwiller auch zeigen sich jedoch keine erhöhten Konzentrationen derselben in der direkten Umgebung der Biomasse-Verbrennungsanlage.

3.3.6 Sammlung, Messung und Charakterisierung von atmosphärischen Partikeln an ausgewählten Schwarzwald-Standorten

An drei verschiedenen Schwarzwald-Standorten (Horben-Bohrer, Hofsggrund und Todtnauberg (Abb. 14) sowie an dem Referenzstandort Freiburg (DWD-Klimagarten) wurden für die Heizsaison 2013/14 (01. Nov 2013 - 28. Feb 2014) insgesamt 84 Luftstaubproben im Rahmen einer wöchentlichen Probenahme gesammelt und analysiert.

Der Schwerpunkt der Probenahme und Messung von atmosphärischen Aerosolen lag im Größenbereich der Partikel von dp = 2.5-10 µm (Grobstaub). Zur Anwendung kam dabei das Passivsammlerverfahren Sigma-2 (VDI 2119-2013). Auf einer transparenten und mit einem witterungsbeständigen Adhäsiv beschichteten Akzeptorfläche wurden mittels automatischer Lichtmikroskopie die Partikel identifiziert und abschließend morpho- sowie densitometrisch vermessen (TLM-Analyse). Die Analysewerte liefern eine Partikelanzahl-Depositionsrate (Partikel pro Fläche und Sammelzeitraum). Unter Anwendung des Stokes'schen Gesetzes, in das die Größe und mittlere Dichte jedes einzelnen Partikels eingeht, konnte damit die Partikel-Massenkonzentration für den Expositionszeitraum berechnet (Abb. 15) und damit die Luftqualität bestimmt werden.

Des mesures mobiles à St. Peter ont été effectuées dans des conditions diurnes (Fig. 13b) mais aussi au cours de la nuit. Pendant les mesures diurnes, deux sources ont été identifiées : au centre-ville de St. Peter, de fortes concentrations de suie, de PM₁, de composés organiques dans les PM₁ et de HAP ont été observées. Elles peuvent être liées à la combustion du bois dans des foyers domestiques. Au bord de la route principale qui passe à côté de St. Peter, la concentration en nombre des PM ainsi que les concentrations relativement élevées de NO_x et de CO₂ ont été mesurées. Ceci pourrait être lié au trafic routier. La forte diminution de ces concentrations pendant la nuit avec une densité de trafic plus réduite confirme cette hypothèse. Les marqueurs de la combustion de biomasse présentés ci-dessus restent mesurables pendant la nuit. Comme à Ammertzwiller, une augmentation à proximité de la chaudière n'est pas observée.

3.3.6 Collecte, mesure et caractérisation des particules atmosphériques sur des sites sélectionnés en Forêt-Noire

Un total de 84 échantillons de particules d'air a été collecté et analysé pendant la saison de chauffage 2013/14 (du 1^{er} novembre 2013 au 28 février 2014) sur trois différents sites de la Forêt-Noire (Horben-Bohrer, Hofsggrund et Todtnauberg, Fig. 14) et sur le site de référence Fribourg, le « jardin climat » du DWD.

Concernant l'échantillonnage et la mesure des aérosols atmosphériques, l'accent a été mis sur les particules grossières (gamme de taille des particules dp = 2.5-10 µm) utilisant la méthode d'échantillonnage passif Sigma-2 (VDI 2119-2013). Sur un récepteur transparent et recouvert d'un adhésif résistant aux influences atmosphériques, les particules ont été identifiées au moyen de la microscopie optique automatique puis mesurées par morpho- et densitométrie (analyse TLM). Les mesures fournissent un taux de dépôt du nombre de particules (particules par unité de surface et la période de collecte). En utilisant la loi de Stokes, dans laquelle sont prises en compte la taille et la densité moyenne de chaque particule, il a été possible de calculer la concentration massique des particules (Fig. 15) et d'évaluer ainsi la qualité de l'air.

Die Auswahl der Probenahmestandorte im Schwarzwald erfolgte nach folgenden Kriterien:

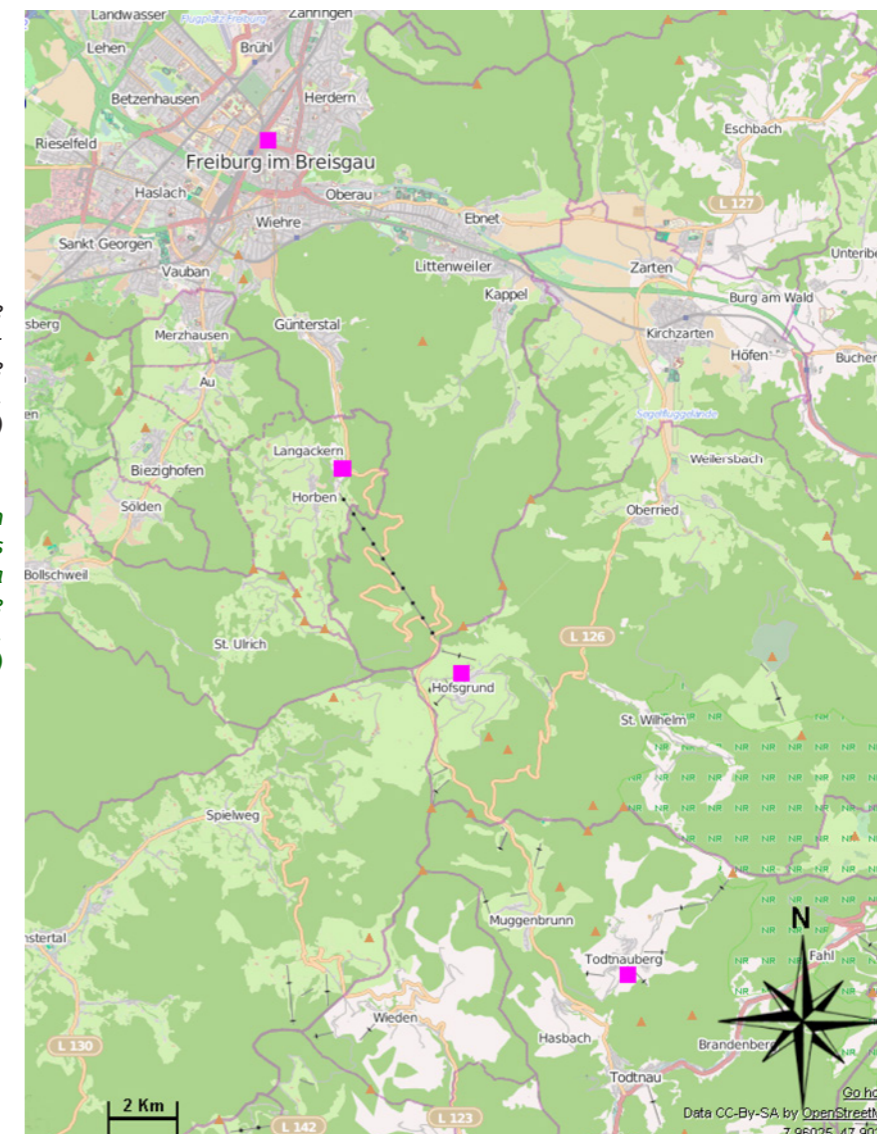
1. Lokal großer Heizungsanteil bei individueller Holz-Verbrennung in privaten Haushalten.
2. Vermeidung anderer direkter anthropogener Emissionsquellen, wie z.B. Verkehr und/oder Industrie.
3. Möglichst geringe Störeinflüsse der Probenahme durch eventuelle Ferntransportmechanismen aufgrund der Selektion einer besonderen geografischen Lage der Standorte (z.B. Tal- und Kessellagen).

La sélection des sites d'échantillonnage dans la Forêt-Noire a été effectuée selon les critères suivants:

1. Rechercher une part importante de combustion du bois individuelle dans le chauffage des ménages.
2. Éviter d'autres sources d'émissions anthropiques directes telles que le trafic et / ou l'industrie.
3. Minimiser l'interférence sur le prélèvement lié à l'apport longue distance des emplacements géographiques spécifiques des sites de prélèvement (par exemple situé dans une vallée ou cuvette).

Abbildung 14: Geografische Lage der drei Schwarzwald-Probenahmestandorte sowie der Referenzstation Freiburg. (Karte: OpenMap)

Figure 14 : Localisation géographique de trois sites d'échantillonnage de la Forêt-Noire et de la station de référence Fribourg. (carte: OpenMap)



Die Unterscheidung der atmosphärischen Partikel erfolgte für die thorakale Partikelfraktion ($dp = 2.5 - 10 \mu m$) sowie für die Partikelfraktion im Größenbereich von $10-80 \mu m$ lichtmikroskopisch anhand der Lichtdurchlässigkeit nach „transparent“ (überwiegend mineralischen und biogenen Bestandteilen) und „opak“ (überwiegend kohlenstoffhaltigen Verbrennungsrückständen $dp = 2.5-10 \mu m$, wie z.B. Ruß und Flugaschen). Die Quellen für die Partikelfraktion $dp = 10-80 \mu m$ können hauptsächlich Verkehrs-bedingten Abriebpartikeln zugeordnet werden.

Die rechtsschiefe Größenverteilung für die opaken Partikel an den Standorten Horben-Bohrer und Hofsgrund (Abb. 15) lässt darauf schließen, dass insbesondere die Partikel der kleinen Partikelfraktion um $2.5 \mu m$ durch Bildung aus der Gasphase und anschließende Koagulation entstanden sein muss. Verglichen mit der Referenzstation in Freiburg (verkehrsbedingt) sind die Massenkonzentrationen aber auf extrem niedrigem Niveau.

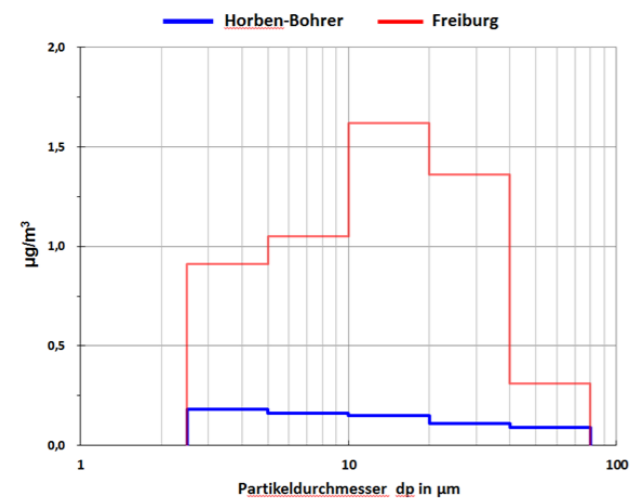


Abbildung 15: Mittlere Größenverteilungen ($dp = 2.5-80 \mu m$) der Massenkonzentration „opaker“ atmosphärischer Partikel an den ausgewählten Schwarzwald-Standorten im Vergleich zu dem Referenzstandort Freiburg (Zeitraum: 01.Nov. 2013 - 28.Feb. 2014, $N=84$). *Horben-Bohrer: Mittelwert der Stationen BO-01 und BO-02

La distinction des particules atmosphériques pour la fraction inhalable des particules ($dp = 2.5 \text{ à } 10 \mu m$) et pour la fraction des particules dans la gamme de taille de $10-80 \mu m$ a été réalisée par microscopie optique par transmission entre “transparent” (principalement des composants minéraux et biogènes) et “opaque” (principalement des résidus de combustion carbonés $dp = 2.5-10 \mu m$, comme p.ex. la suie et les cendres volantes). Les sources, pour la fraction de particules $dp = 10-80 \mu m$, sont principalement associées aux particules d’usure liées à la circulation.

La distribution de taille asymétrique vers la droite pour les particules opaques sur les sites Horben-Bohrer et Hofsgrund (Fig. 15) suggère en particulier que la fraction des particules les plus fines ($2.5 \mu m$) se forme à partir de la phase gazeuse et la coagulation ultérieure. Par rapport à la station de référence à Fribourg (avec beaucoup de trafic), les concentrations massiques sont plus faibles.

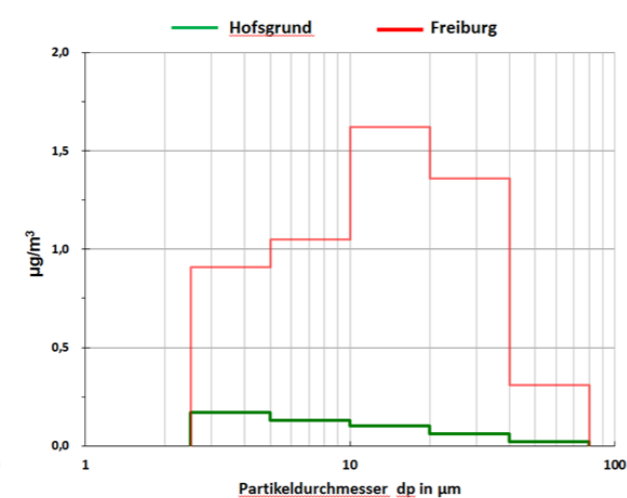


Figure 15: Distributions de taille moyenne ($dp = 2.5-80 \mu m$) en concentration massique des particules atmosphériques “opakes” sur les sites de la Forêt-Noire sélectionnés par rapport au site de référence Fribourg (période: 01 Nov. 2013 - 28 Feb 2014 $N = 84$). * Horben-Bohrer: Moyenne des stations BO-BO-01 et 02

Einzelne Luftstaubproben wurden aus den entsprechenden Expositionswochen mit Hilfe des $0.5 \mu g/m^3$ „threshold levels“ (empirisch bestimmte REM-Nachweisgrenze, siehe Abb. 16) der opaken Partikelfraktion im Größenbereich von $2.5 - 10 \mu m$ für eine detailliertere Einzelpartikelanalyse mittels REM und EDX selektiert.

Les échantillons de particules dans l’air ont été sélectionnés à l’aide d’une valeur seuil fixée à $0,5 \mu g/m^3$ parmi l’ensemble des échantillons hebdomadaires recueillis pour une analyse par MEB et EDX. Ce seuil empirique correspond à la limite de détection pour le MEB.

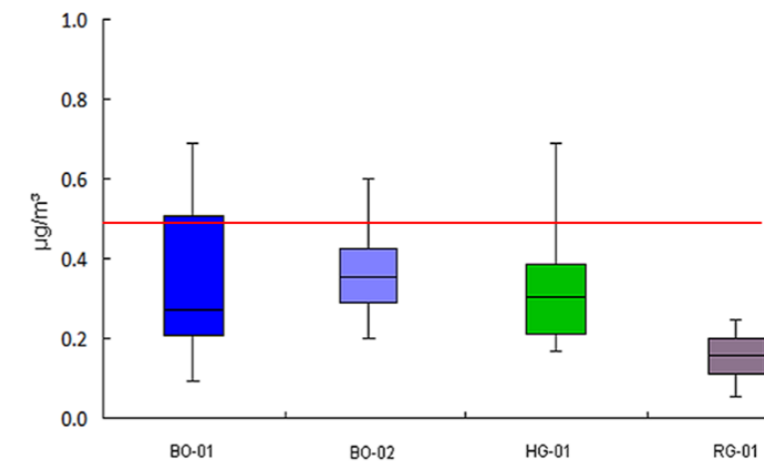


Abbildung 16: Box-Whisker-Plots der berechneten Massenkonzentrationen (opake Partikelfraktion, $dp = 2.5-10 \mu m$) für die drei Schwarzwald-Standorte in der Heizperiode 2013/14. BO-01 und BO-02: Horben-Bohrer. HG-01: Hofsgrund. RG-01: Todtnauberg. (Zeitraum: 01.Nov. 2013 - 28.Feb. 2014, $N=68$). Die „rote“ Linie kennzeichnet einen empirisch erhobenen „threshold level“ bei $0.5 \mu g/m^3$ für die Probenselektion der Einzelpartikelanalyse mit dem Rasterelektronen-Mikroskop (REM).

Figure 16: Graphe boîte à moustache des concentrations massiques calculées (fraction opaque des particules : $2.5 - 10 \mu m$) pour les trois sites en Forêt Noire durant la saison de chauffage 2013/14. BO-01 et BO-02 : Horben-Bohrer. HG-01 Hofsgrund. RG-01 Todtnauberg (période : 1 Nov. 2013 - 28 Feb. 2014 $N=68$). La ligne rouge représente un niveau seuil empiriquement fixé à $0,5 \mu g/m^3$ pour sélectionner des échantillons de particules à analyser par microscopie électronique à balayage.

Eine statistisch quantitativ abgesicherte Partikelanalyse konnte aufgrund der geringen Anzahldeposition z.Zt. nicht realisiert werden. Einige qualitativ chemische Einzelpartikelanalysen sind in Abbildung 17 beispielhaft dargestellt.

Une analyse statistique de particules n'a pu être réalisée en raison de la faible quantité de dépôts. La figure 17 présente quelques exemples d'analyses chimiques qualitatives de particules individuelles.

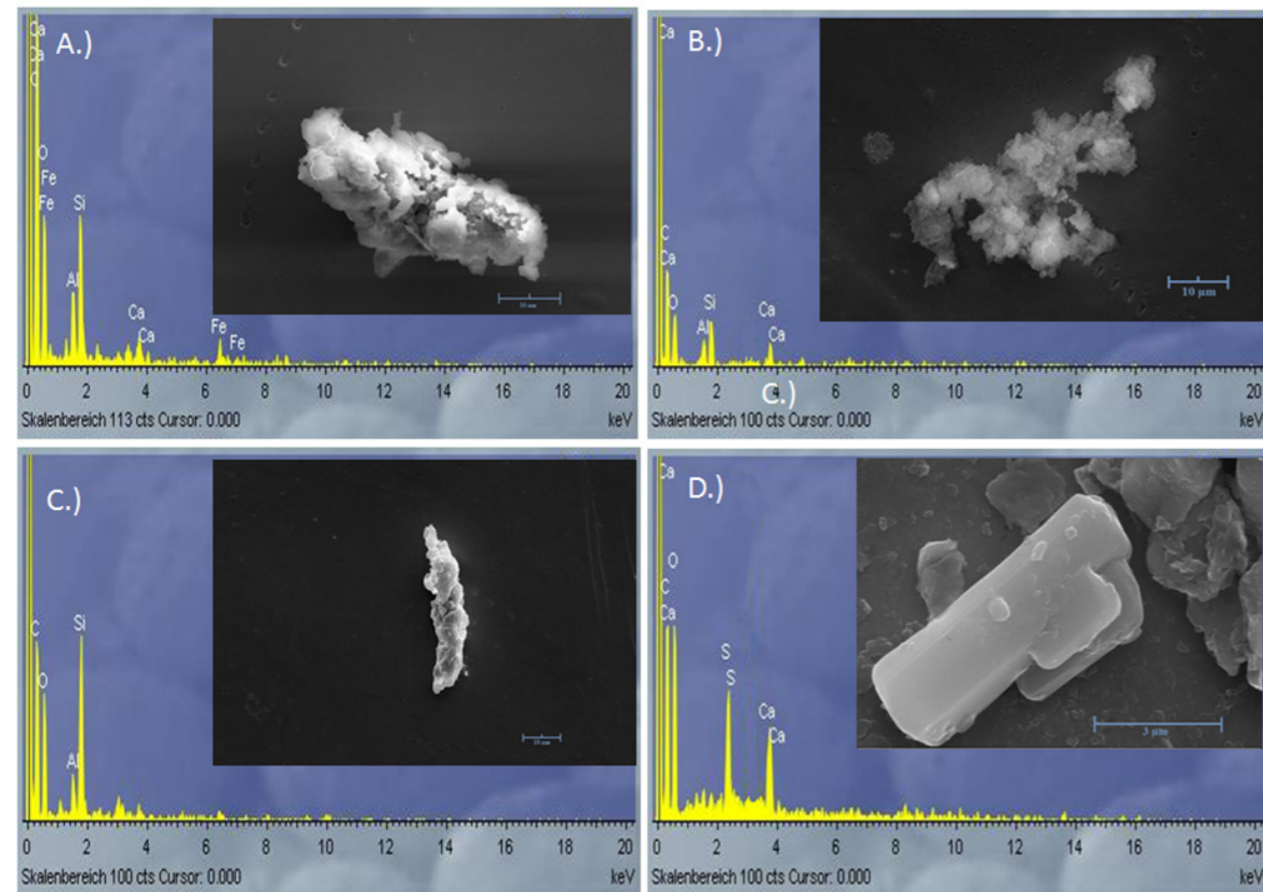


Abbildung 17: REM Aufnahmen und EDX-Spektren atmosphärischer Partikel vom Standort: Horben-Bohrer.
A) Aschepartikel aus der Biomasse-Verbrennung überwiegend aus nichtflüchtigen Elementen bestehend (Si, Al, Ca, Fe).
B) Kalziumoxidpartikel (CaO) aus der Holz-Verbrennung.
C) Aschepartikel aus Aluminiumsilikat (Si, Al, C, O).
D) Kalziumsulfat (CaSO₄), typisches Partikel aus der Biomasse-Verbrennung.

Figure 17 : images MEB et spectres EDX des particules atmosphériques du site: Horben-Bohrer.
A) Particules de cendres provenant de la combustion de la biomasse constituées principalement d'éléments non volatils (Si, Al, Ca, Fe).
B) Particules d'oxyde de calcium (CaO) issues de la combustion du bois.
C) Particules de cendres de silicate d'aluminium (Si, Al, C, O).
D) Sulfate de calcium (CaSO₄), particules typiques de la combustion de biomasse.

Der Winter 2013/14 war extrem mild und ohne lang anhaltende Inversionslagen, während der sich Emissionen anreichern konnten.

L'hiver 2013/14 a été extrêmement doux et il n'y a pas eu de situation d'inversion de températures de longue durée au cours desquelles les émissions auraient pu s'accumuler.

Der Winter in Baden-Württemberg war drei Grad wärmer als das langjährige Mittel und besonders reich an Sonnenschein. Dies ist auch ein Grund, dass sich die gemessenen Massenkonzentrationen der opaken Partikelfraktion im Größenbereich von 2.5 -10 µm an der REM-Nachweisgrenze bewegen (Abb. 16).

Dans le Bade-Wurtemberg, l'hiver a été trois degrés plus chaud que la moyenne pluriannuelle et très ensoleillé. C'est aussi une raison pour laquelle les concentrations en masse mesurées de la fraction de particule opaque dans la gamme de taille de 2.5 - 10 µm ne sont pas détectées par MEB (Fig. 16).

Zwei von drei Schwarzwald-Standorten zeigen aber dennoch, zum einen aufgrund der qualitativen REM-Analyse für den Standort Horben-Bohrer und zum anderen aufgrund der TLM-Analysen (rechtsschiefe Größenverteilungen der opaken Partikelfraktion) an beiden Standorten (Horben-Bohrer und Hofgrund) die Merkmale typischer Partikel aus der Holz-Verbrennung.

Cependant, les résultats d'analyses par les techniques MEB et TLM montrent que deux des trois sites de la Forêt-Noire (Horben-Borher et Hofgrund) sont caractérisées par des particules typiques de la combustion du bois.

Pour la saison hivernale de chauffage 2014/15, la série de mesures a été poursuivie en utilisant la même approche.

Für die Heizperiode im Winter 2014/15 wird die Messreihe nach dem gleichen Konzept fortgeführt.

UNTERSUCHUNGEN ZU BIOLOGISCHEN EFFEKTEN VON PARTIKEL-
EMISSIONEN UND ASCHEN AUS DER BIOMASSE-VERBRENNUNG
ÉTUDES DES EFFETS BIOLOGIQUES DES ÉMISSIONS DE PARTICULES
ET DES CENDRES ISSUES DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE



4 UNTERSUCHUNGEN ZU BIOLOGISCHEN EFFEKTEN VON PARTIKEL-EMISSIONEN UND ASCHEN AUS DER BIOMASSE-VERBRENNUNG

4.1 Einleitung

Verbrennungsaerosole aus Biomasse-Verbrennung enthalten feine und ultrafeine Partikel in hoher Zahl. Sie sind Bestandteile des Umweltaerosols und vorwiegend in Regionen mit hoher Biomasse-Verbrennung, wie z.B. Schwarzwald und Vogesen zu finden. Feine und ultrafeine Partikel aus Biomasse-Verbrennung könnten bei erhöhten Konzentrationen zu Gesundheitsschäden führen.

Ziel des Projektes war es daher zum einen Feinstäube und Flugaschen aus Biomasse-Verbrennung an verschiedenen Lungenzellsystemen auf mögliche zelltoxische und erbgutschädliche Effekte zu untersuchen (IUK). Zum anderen sollten das Entzündungs-fördernde Potential von Partikel-Emissionen aus der Biomasse-Verbrennung sowie eine Partikel-abhängige zelluläre Stressantwort näher analysiert werden (Abb. 18 und 19).

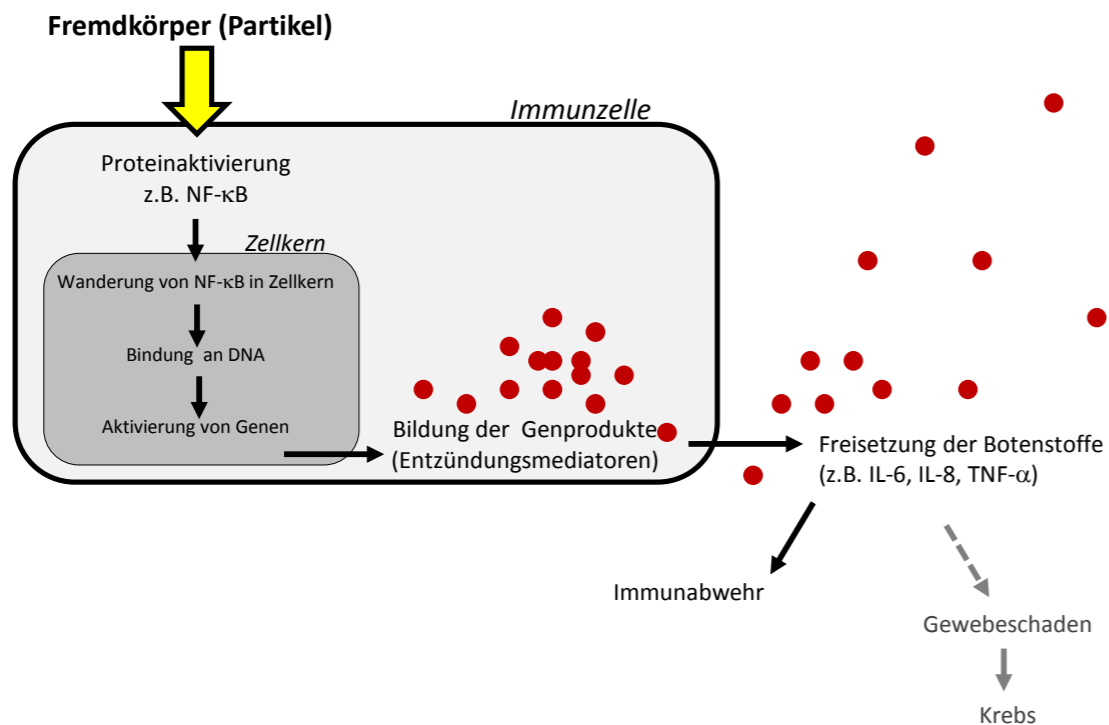


Abbildung 18: Die Entzündung (Inflammation) ist ein wesentlicher Bestandteil einer Immunreaktion mit dem Ziel, Fremdkörper oder Giftstoffe zu beseitigen. Es wird maßgeblich von Immunzellen reguliert und beinhaltet die Aktivierung bestimmter zellulärer Signalwege und Regulatoren, wie z.B. dem Transkriptionsfaktor NF-κB, welcher an DNA binden und Gene aktivieren kann, die das Entzündungsgeschehen steuern. Eine übermäßige oder anhaltende Aktivierung von Entzündungsprozessen kann umliegendes gesundes Gewebe schädigen und schwerwiegende Erkrankungen wie z.B. Krebs verursachen.

4 ÉTUDES DES EFFETS BIOLOGIQUES DES ÉMISSIONS DE PARTICULES ET DES CENDRES ISSUES DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE

4.1 Introduction

Les aérosols de combustion de biomasse contiennent un nombre élevé de particules fines et ultrafines. Ce sont des composantes de l'aérosol atmosphérique et on les trouve principalement dans les régions affichant une très forte combustion de la biomasse, par exemple dans la Forêt-Noire et dans les Vosges. En concentrations élevées, les particules fines et ultrafines issues de la combustion de biomasse peuvent se révéler nocives pour la santé.

L'objectif du projet était par conséquent, d'une part, d'étudier les éventuels effets cytotoxiques et génotoxiques des particules fines et des cendres volantes issues de la combustion de biomasse sur différents modèles de cellules pulmonaires (IUK) et, d'autre part, d'analyser plus profondément le potentiel pro-inflammatoire des particules émises lors de la combustion de biomasse ainsi que la réponse au stress cellulaire provoquée par les particules (Fig. 18 et 19).

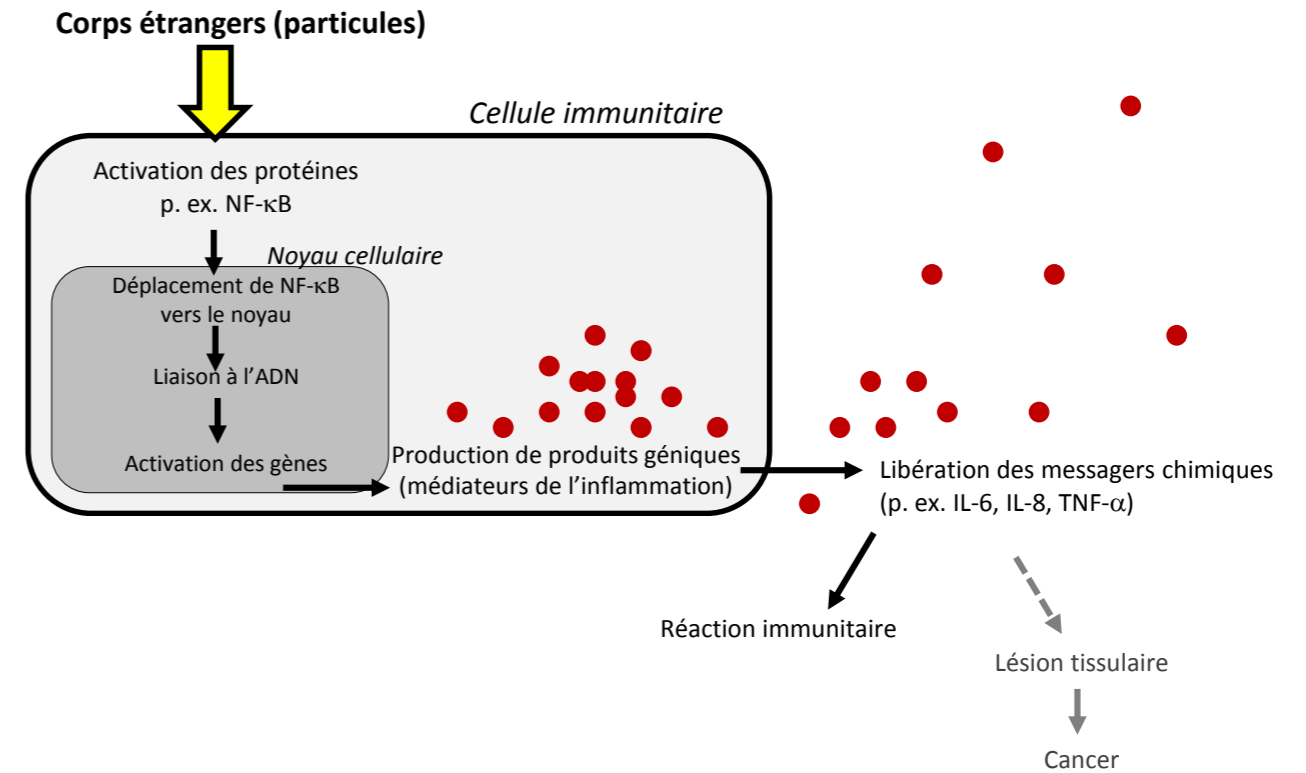


Figure 18 : L'inflammation fait partie intégrante d'une réponse immunitaire visant à éliminer les corps étrangers ou les toxines du corps. Cette réponse est essentiellement régulée par des cellules immunitaires et elle est impliquée dans l'activation de certaines voies de signalisation cellulaire et de certains régulateurs tels que le facteur de transcription NF-κB qui a la capacité de se lier à l'ADN et d'activer des gènes importants pour la réaction inflammatoire. Une activation excessive ou permanente des processus inflammatoires peut endommager le tissu sain environnant et provoquer des maladies graves, notamment le cancer.

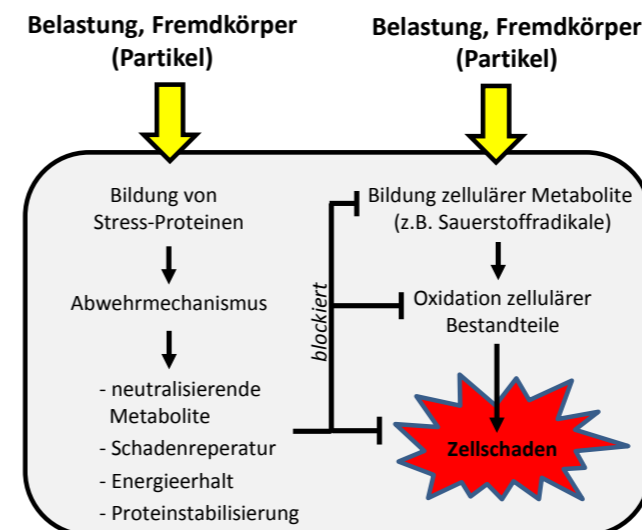
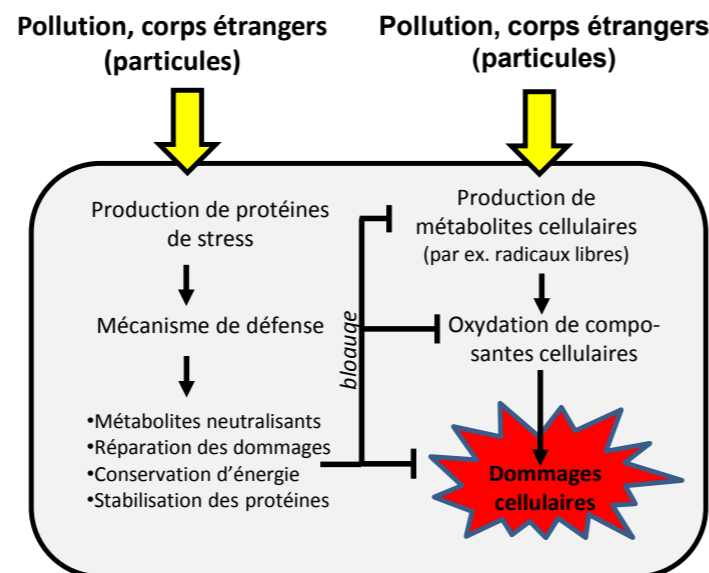


Abbildung 19: Unter Belastung und widrigen Umgebungseinflüssen bilden Zellen typische Eiweißstoffe, sogenannte Stress-Proteine, welche einer Schädigung entgegenwirken. Dieser Abwehrmechanismus wird als zelluläre Stressantwort zusammengefasst und erfüllt vielfältige Funktionen, wie z.B. die Abwehr schädlicher zellulärer Inhaltsstoffe, die Stabilisierung von Proteinen in ihrer funktionsfähigen Struktur, oder den Energieerhalt zur Reparatur der Zelle. Als hochempfindliche Sensoren sind Stress-Proteine hervorragend dazu geeignet, den Eintrag von Schadstoffen in die Umwelt zu überwachen und das Potential von Zellen zu beurteilen, sich gegen bestehende Umwelteinflüsse zu schützen.

Figure 19 : Sous l'influence du stress et d'un environnement adverse, les cellules produisent des protéines typiques appelées protéines de stress qui empêchent l'endommagement des cellules. Ce mécanisme de défense, appelé réponse au stress cellulaire, remplit de multiples fonctions telles que la défense contre les substances intracellulaires nocives, la stabilisation des protéines et de leur structure opérationnelle, ou la production d'énergie pour la réparation des cellules. Les protéines de stress sont d'excellents et très sensibles capteurs permettant de surveiller l'apport de polluants dans l'environnement et d'évaluer le potentiel des cellules à se protéger contre les influences environnementales existantes.



Des Weiteren sollten 3-dimensionale (3D) organotypische Lungenzellkulturmodelle entwickelt werden, um die physiologischen Bedingungen der Lunge als Organ besser darzustellen (IUK, PHARM) und in diesen 3D-Kulturen die Wirkung von Verbrennungspartikeln aus Biomasse zu testen. Abschließend sollten Lungenzellen an der Luft-Flüssigkeit-Grenzschicht mit Verbrennungsaerosolen aus verschiedenen Biomasse-Verbrennungsquellen in einem Vitrocell-Expositionssystem versetzt werden, um die inhalative Aufnahme von Feinpartikeln zu simulieren und toxikologisch zu bewerten (IUK). Diese Bioassays sollten dahingehend standardisiert werden, dass sie einem Screening-System zur Verfügung stehen, mit welchem die Gesundheitsrisiken durch Feinstaubpartikel aus verschiedenen Biomasse-Verbrennungsquellen besser abgeschätzt werden können.

4.2 Material und Methoden

4.2.1 Untersuchtes Verbrennungsmaterial

Es wurden diverse Feinstäube und Flugaschen aus der Verbrennung in Klein- und Großfeuerungsanlagen untersucht (Tabelle 15). Verschiedene Feinstäube aus der Verbrennung von Miscanthus, Kiefer (Holzhackschnitzel) und Buche wurden bei GRE unter kontrollierten Verbrennungsbedingungen hergestellt. Flugasche wurde aus den Anlagen Ammertzwiller und St. Peter erhalten. Eine Flugasche aus St. Peter wurde impaktiert und in vier Fraktionen aufgetrennt: Ausgangsmaterial (nicht größenfraktioniert, „bulk“), Filtergut (PM_{1-2,5}), Feingut (PM₁), Rückstand (unbestimmte Partikelgröße, „residue“). Feinstaubpartikel aus der Verbrennung von Miscanthus, Holzhackschnitzeln und Buche wurden durch GRE mittels einem Kaskaden-Impaktor zu den Fraktionen PM_{0,4-1}, PM_{1-2,5} und PM_{>2,5} aufgetrennt.

Par ailleurs, il était prévu de développer des modèles tridimensionnels (3D) de culture organotypique de cellules pulmonaires pour permettre une meilleure visualisation des conditions physiologiques du poumon en tant qu'organe (IUK, PHARM) et pour tester, dans ces cultures 3D, l'effet des particules de combustion de biomasse. Enfin, il était prévu d'administrer dans un système d'exposition VITROCELL des aérosols de combustion issus de différentes sources de combustion de biomasse dans des cellules pulmonaires à l'interface air-liquide afin de simuler l'inhalation de particules fines et de l'évaluer sur le plan toxicologique (IUK). Ces essais biologiques devaient être standardisés afin de servir comme système de dépistage permettant de mieux estimer les risques sanitaires engendrés par les particules de poussières fines issues de différentes sources de combustion de biomasse.

4.2 Matériels et méthodes

4.2.1 Matériaux de combustion étudiés

Des particules fines et des cendres volantes diverses issues de la combustion dans de petites installations de combustion ou dans des chaufferies collectives (tableau 15) ont été étudiées. A cet effet, des particules fines différentes issues de la combustion de miscanthus, de pin (plaquettes) et de hêtre ont été produites par le laboratoire GRE dans des conditions de combustion contrôlées. Les cendres volantes provenaient des chaufferies d'Ammertzwiller et de St. Peter. Les cendres volantes provenant de St. Peter ont été impactées et séparées en quatre fractions : matériau de base (sans fractionnement granulométrique, « bulk »), matière filtrée (PM_{1-2,5}), fines (PM₁), résidu (granulométrie indéterminée, « résidus »). Les particules fines issues de

Die bei der Verbrennung von Biomasse-Brennstoffen anfallenden Feinstäube und Aschen wurden von den Kooperationspartnern in ihren chemischen und physikalischen Zusammensetzungen charakterisiert (siehe Forschungsthemen 1 und 3). Als Referenzpartikel mit bekannten toxischen Effekten wurden Siliziumdioxid (SiO₂, nano-Silica), Diesellabgaspartikel (DEP) und Steinkohle-Flugasche (CFA) verwendet. Zudem wurden Kalziumkarbonat (CaCO₃, d.h. Kalzit) und Kaliumsulfat (K₂SO₄, d.h. Arkanit) als wichtige Bestandteile der Aschen (siehe 3.3.3.2.1) untersucht.

la combustion de miscanthus, de plaquettes et de hêtre ont été subdivisées par le GRE en fractions de PM_{0,4-1}, de PM_{1-2,5} et de PM_{>2,5} à l'aide d'un impacteur en cascades. La caractérisation chimique et physique des particules fines et des cendres issues de la combustion de combustibles de biomasse a été réalisée par les partenaires du projet (voir thèmes de recherche 1 et 3). Le dioxyde de silicium (SiO₂, nano silice), les particules Diesel (DEP) et les cendres volantes de charbon (CFA) ont servi de particules témoin avec des effets toxiques connus. Le carbonate de calcium (CaCO₃, ou calcite) et le sulfate de potassium (K₂SO₄, ou arcanite) ont également été étudiés en tant que composants importants des cendres (voir 3.3.3.2.1).

Untersuchungsmaterial	Bezeichnung	Größe
Kontrollpartikel	SiO ₂ (nano-Silica) (Sigma Aldrich)	12 - 50 nm
Kontrollpartikel	Diesellabgaspartikel (DEP) (NIST ¹)	50 – 500 nm
Kontrollpartikel	Steinkohle-Flugasche (CFA) (BCR-038 ²)	1 – 10 µm
Kontrollpartikel	Kalziumkarbonat	1 – 2 µm
Kontrollpartikel	Kaliumsulfat	50 nm
Feinstaub aus Kleinfeuerungsanlage (GRE)	Miscanthus	0.4 – 1 µm
Feinstaub aus Kleinfeuerungsanlage (GRE)	Miscanthus	1 – 2.5 µm
Feinstaub aus Kleinfeuerungsanlage (GRE)	Miscanthus	> 2.5 µm
Feinstaub aus Kleinfeuerungsanlage (GRE)	Buchenholz	0.4 – 1 µm
Feinstaub aus Kleinfeuerungsanlage (GRE)	Buchenholz	1 – 2.5 µm
Feinstaub aus Kleinfeuerungsanlage (GRE)	Buchenholz	> 2.5 µm
Feinstaub aus Kleinfeuerungsanlage (GRE)	Holzhackschnitzel (Kiefer)	0.4 – 1 µm
Feinstaub aus Kleinfeuerungsanlage (GRE)	Holzhackschnitzel (Kiefer)	1 – 2.5 µm
Feinstaub aus Kleinfeuerungsanlage (GRE)	Holzhackschnitzel (Kiefer)	> 2.5 µm
Flugasche (Biomassekraftwerk Ammertzwiller)	Miscanthus	0.4 – 1 µm
Flugasche (Biomassekraftwerk Ammertzwiller)	Miscanthus	1 – 2.5 µm
Flugasche (Biomassekraftwerk Ammertzwiller)	Miscanthus	> 2.5 µm
Flugasche (Biomassekraftwerk Vauban (Freiburg))	Holzhackschnitzel (Kiefer)	Ausgangsmaterial (nicht fraktioniert)
Flugasche (Biomassekraftwerk St. Peter)	Holzhackschnitzel	Ausgangsmaterial (nicht fraktioniert)
Flugasche (Biomassekraftwerk St. Peter)	Holzhackschnitzel	Filtergut (1 – 2.5 µm)
Flugasche (Biomassekraftwerk St. Peter)	Holzhackschnitzel	Feingut (< 1 µm)
Flugasche (Biomassekraftwerk St. Peter)	Holzhackschnitzel	Rückstand

¹ NIST = National Institute of Standards and Technology, USA

² BCR-038 zertifiziertes Referenzmaterial; European Commission Joint Research Center, Institute for Reference Materials and Measurements

Tabelle 15: Untersuchte Feinstäube und Flugaschen aus der Verbrennung in Klein- und Großfeuerungsanlagen sowie entsprechendes Referenzmaterial.

Matériaux étudiés	Désignation	Taille
Particules témoin	SiO ₂ (nano silice) (Sigma Aldrich)	12 - 50 nm
Particules témoin	Particules Diesel (DEP) (NIST ¹)	50 – 500 nm
Particules témoin	Cendres volantes de charbon (CFA) (BCR-038 ²)	1 – 10 µm
Particules témoin	Carbonate de calcium	1 – 2 µm
Particules témoin	Sulfate de potassium	50 nm
Particules fines issues de petite installation de combustion (GRE)	Miscanthus	0.4 – 1 µm
Particules fines issues de petite installation de combustion (GRE)	Miscanthus	1 – 2.5 µm
Particules fines issues de petite installation de combustion (GRE)	Miscanthus	> 2.5 µm
Particules fines issues de petite installation de combustion (GRE)	Bois de hêtre	0.4 – 1 µm
Particules fines issues de petite installation de combustion (GRE)	Bois de hêtre	1 – 2.5 µm
Particules fines issues de petite installation de combustion (GRE)	Bois de hêtre	> 2.5 µm
Particules fines issues de petite installation de combustion (GRE)	Plaquettes (pin)	0.4 – 1 µm
Particules fines issues de petite installation de combustion (GRE)	Plaquettes (pin)	1 – 2.5 µm
Particules fines issues de petite installation de combustion (GRE)	Plaquettes (pin)	> 2.5 µm
Cendres volantes (centrale à biomasse d'Ammertzwiler)	Miscanthus	0.4 – 1 µm
Cendres volantes (centrale à biomasse d'Ammertzwiler)	Miscanthus	1 – 2.5 µm
Cendres volantes (centrale à biomasse d'Ammertzwiler)	Miscanthus	> 2.5 µm
Cendres volantes (centrale à biomasse de Vauban (Freiburg))	Plaquettes (pin)	Matériau de base (non fractionné)
Cendres volantes (centrale à biomasse de St. Peter)	Plaquettes	Matériau de base (non fractionné)
Cendres volantes (centrale à biomasse de St. Peter)	Plaquettes	Matière filtrée (1 – 2.5 µm)
Cendres volantes (centrale à biomasse de St. Peter)	Plaquettes	Fines (< 1 µm)
Cendres volantes (centrale à biomasse de St. Peter)	Plaquettes	Refus

¹ NIST = National Institute of Standards and Technology, USA

² Matériaux de référence certifiés BCR[®]-038 ; European Commission Joint Research Center, Institute for Reference Materials and Measurements

Tableau 15 : Particules fines et cendres volantes étudiées, issues de la combustion dans des petites installations de combustion ou dans des chaufferies collectives et matériaux de référence respectifs

4.2.2 Verwendete Zellen

Es wurden humane Lungenepithelzellen (A549, BEAS-2B), ausdifferenzierte THP-1 Makrophagen, aus Blutspenden differenzierte M1- und M2-Makrophagen sowie dendritische Zellen verwendet. Diese Zellen dienen als erste Verteidigungslinie gegen Fremdkörper, welche in die Lunge eindringen können, indem sie eine Barrierefunktion erfüllen oder Entzündungs- bzw. Immunabwehrfunktionen vermitteln.

4.2.3 Standardarbeitsanweisungen (SOPs)

Für die Untersuchung der biologischen Effekte der Feinstaubpartikel auf Lungenzellen wurden Standardarbeitsanweisungen für die Probenherstellung und Inkubationsbedingungen erstellt, um zu gewährleisten, dass die Experimente aller Kooperationspartner unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt wurden.

4.2.2 Cellules utilisées

Des cellules épithéliales du poumon humain (A549, BEAS-2B), des macrophages différenciés à partir de THP-1, des macrophages M1 et M2 différenciés à partir de dons de sang ainsi que des cellules dendritiques furent utilisés. Ces cellules servent de première ligne de défense contre les corps étrangers pouvant s'introduire dans le poumon, en fonctionnant comme barrière ou en stimulant les réactions inflammatoires ou les défenses immunitaires.

4.2.3 Modes opératoires standard (SOP)

Pour étudier les effets biologiques des particules fines sur les cellules pulmonaires, des modes opératoires standard ont été élaborés pour la préparation des échantillons et les conditions d'incubation afin d'assurer que les expériences soient réalisées sous des conditions comparables chez les différents partenaires du projet.

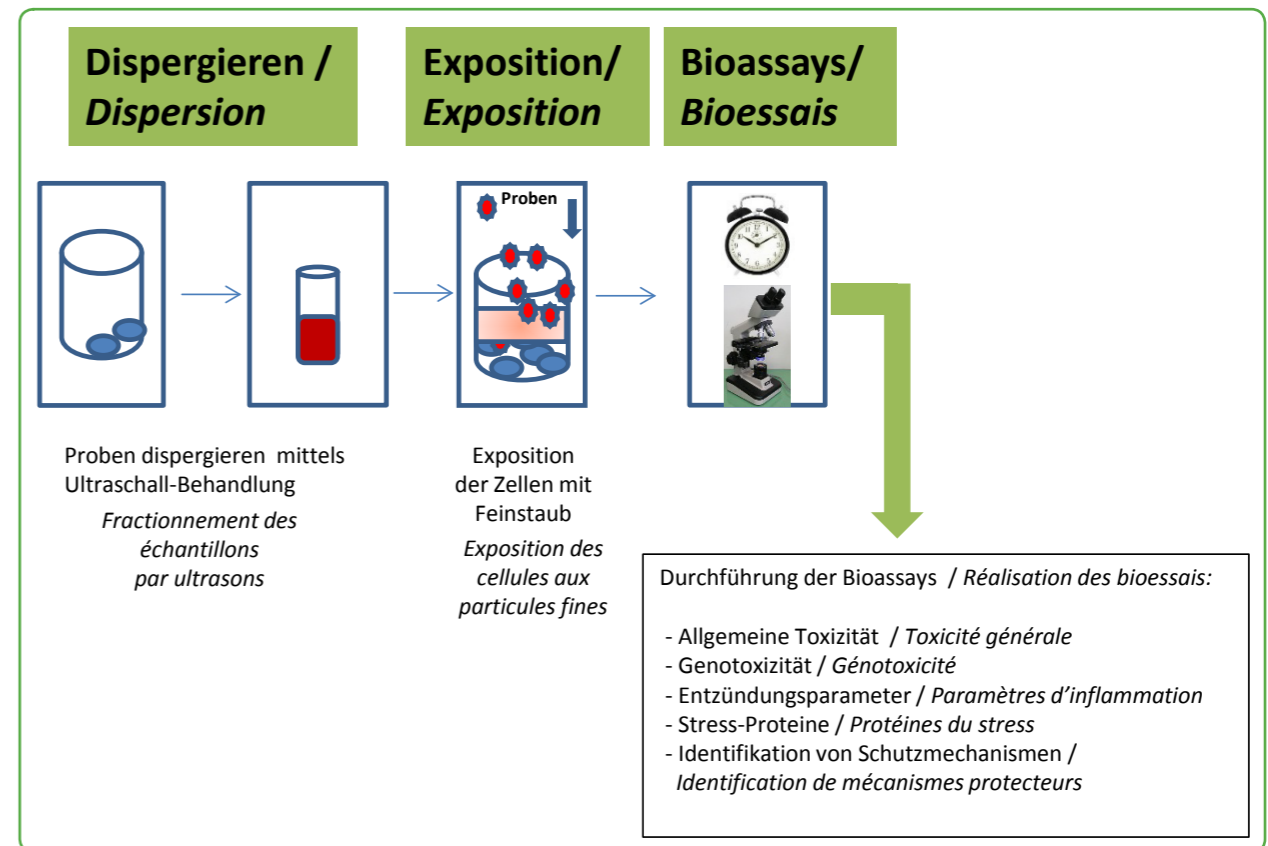


Abbildung 20: Schema zur Untersuchung der biologischen Effekte von Feinstäuben und Flugaschen aus Biomasse-Verbrennungsprozessen. Partikelproben wurden mittels Ultraschallbehandlung dispergiert und in einem vordefinierten Volumen und umweltrelevanter Menge den Zellen zugeführt, bevor die Zellviabilität, Genotoxizität, Entzündungsmediatoren und eine zelluläre Stress-Antwort anhand diverser Bioassays bestimmt wurden.

Figure 20: Schéma relatif à l'étude des effets biologiques des particules fines et des cendres volantes issues de procédés de combustion de biomasse. Les échantillons de particules ont été fragmentés par ultrasons et administrés aux cellules dans un volume préétabli et en quantité significative d'un point de vue environnemental, pour ensuite permettre de déterminer la viabilité des cellules, la génotoxicité, les médiateurs de l'inflammation et une réponse au stress cellulaire moyennant diverses expériences.

4.2.4 Bestimmung der Zellviabilität

Der Einfluß von Partikeln auf die Zellviabilität wurde entweder durch die Reduktion vom Tetrazolium-Farbstoff WST-1 oder von AlamarBlue ermittelt. Dabei wird die Menge des von lebenden Zellen umgewandelten Farbstoffs anhand eines Farbumschlags quantifiziert und auf die Zellviabilität rückgeschlossen.

4.2.5 Bestimmung der Genotoxizität

Genotoxizität ist die Veränderung oder Schädigung des Erbguts (DNA). Die DNA eines Organismus ist ständig dieser Gefahr ausgesetzt. Nicht reparierte bzw. unzureichend reparierte DNA-Schäden können zum Verlust der Zellteilungskontrolle, Mutationen und letztendlich zu Krebs oder Missbildungen bei der embryonalen Entwicklung führen. Im Projekt wurde die DNA-

4.2.4 Détermination de la viabilité cellulaire

L'impact des particules sur la viabilité cellulaire a été déterminé par la réduction du sel de tétrazolium WST-1 ou d'Alamar Blue. La quantité de colorant convertie par les cellules vivantes est déterminée à l'aide d'un virage de couleur pour en déduire ensuite la viabilité cellulaire.

4.2.5 Détermination de la génotoxicité

La génotoxicité désigne la modification ou les dommages sur le génome (ADN). L'ADN d'un organisme est en permanence exposé à ce risque. Des dommages de l'ADN pas entièrement ou non réparés peuvent provoquer une perte du contrôle de la division cellulaire, des mutations et finalement provoquer un cancer ou des malformations au cours du développement embryonnaire. Dans le

schädigende Wirkung von Feinstäuben und Flugaschen mittels des DNA-alkalischen Entwindungs-Assays (engl. DNA alkaline unwinding assay; DAUA) bestimmt.

4.2.6 Mikroskopie

Die Lichtmikroskopie wurde mit einem Axiovert 100 Mikroskop (Zeiss, Oberkochen), kombiniert mit einer CCD-Kamera (Hamamatsu) und einem Bildverarbeitungsprogramm (Openlab Imposition, Coventry), durchgeführt. Die konfokale Fluoreszenz-Mikroskopie wurde in Zusammenarbeit mit GRE/MIPS durchgeführt.

4.2.7 Bestimmung von NF-κB als Entzündungsmediator

NF-κB ist ein DNA-bindendes Protein, welches Entzündungsgene aktiviert und daher als Marker für Entzündungsprozesse genutzt wird. Um das Potential zu bestimmen, inwieweit die Feinstäube dazu führen, dass NF-κB vermehrt an die DNA bindet (Aktivierung von NF-κB), wurden zelluläre Extrakte von Feinstaub-behandelten Zellen bzw. unbehandelten Kontrollzellen mit radioaktiv markierten DNA-Sonden gemischt, an welche aktiviertes NF-κB binden kann. Anschließend wurden DNA-Protein-Komplexe in einem Polyacrylamid-Gel aufgetrennt und als Schwärzung sichtbar gemacht. Das Ausmaß der Schwärzung korreliert direkt mit der Menge an aktivem NF-κB.

4.2.8 Bestimmung von IL-8

IL-8 ist ein Botenstoff, welcher von vielen Zellen im Laufe einer Entzündung abgesondert wird und andere Immunzellen anlockt. Die Menge an freigesetztem IL-8 wurde durch ein antikörperbasiertes Nachweisverfahren (ELISA) bestimmt. Dabei wird IL-8 über einen Erstantikörper an eine Mikrotiterplatte absorptiv gebunden und anschließend über einen Enzym-gekoppelten Zweitantikörper anhand des Substratumsatzes quantifiziert.

4.2.9 Bestimmung von Sauerstoffradikalen (ROS)

Zellulärer Stress kann zur Bildung von ROS führen, welche Zellbestandteile oxidieren und dadurch die Zelle schwerwiegend schädigen können. Die Bildung von ROS in Lungenzellen wurde durch Zugabe von Dichlorodihydrofluorescein-Diacetat quantifiziert, einem Molekül, welches in Anwesenheit von ROS zu einem fluoreszierenden Produkt oxidiert wird. Die Zunahme der Fluoreszenz der Zellen wird quantifiziert und korreliert mit der Zunahme an intrazellulärem ROS.

cadre du projet, les effets génotoxiques des particules fines et des cendres volantes ont été déterminés en milieu alcalin par la méthode de DNA alkaline unwinding assay ; DAUA.

4.2.6 Microscopie

La microscopie optique a été réalisée à l'aide d'un microscope Axiovert 100 (Zeiss, Oberkochen) combiné avec une caméra CCD (Hamamatsu) et un programme de traitement d'images (Openlab Imposition, Coventry). La microscopie confocale de fluorescence a été réalisée en coopération avec GRE/MIPS.

4.2.7 Détermination de NF-κB comme médiateur de l'inflammation

NF-κB est une protéine liant l'ADN qui active les gènes pro-inflammatoires et peut donc être utilisée comme marqueur du processus inflammatoire. Pour déterminer dans quelle mesure les particules fines augmentent la liaison de NF-κB à l'ADN (activation NF-κB), des extraits cellulaires de cellules traitées aux particules resp. de cellules témoins non traitées ont été mélangées avec des sondes d'ADN marquées par radioactivité auxquelles le NF-κB peut se lier. Ensuite, les complexes ADN-protéine ont été séparés sur un gel de polyacrylamide et visualisés par noircissement. L'intensité du noircissement est proportionnelle à la quantité de NF-κB actif.

4.2.8 Détermination de l'interleukine 8 (IL-8)

L'IL-8 est un médiateur qui, en cas d'inflammation, est sécrété par un grand nombre de cellules et qui attire d'autres cellules immunitaires. La quantité d'IL-8 sécrétée a été déterminée par un test de dosage basé sur les anticorps (ELISA). Lors de ce test, l'IL-8 se lie par l'intermédiaire d'un anticorps primaire à une plaque de microtitration. Elle est ensuite quantifiée à l'aide d'un anticorps secondaire couplé à une enzyme qui convertit le substrat.

4.2.9 Détermination des radicaux libres (ROS)

Le stress cellulaire peut entraîner la production de ROS qui, à leur tour, peuvent oxyder certains composants cellulaires et ainsi endommager gravement la cellule. La production de ROS dans les cellules pulmonaires a été quantifiée par l'ajout de diacétate de dichlorodihydrofluoresceine. En présence de ROS, cette molécule s'oxyde en un produit fluorescent. L'augmentation de l'intensité de la fluorescence des cellules est quantifiée et corrélée avec l'augmentation des ROS intracellulaires.

4.2.10 Bestimmung der Aktivierung Zellstress-relevanter Proteine (p38, JNK)

P38 und JNK sind Proteine, welche bei Zellstress aktiviert werden. Eine Phosphorylierung von p38 führt zur Aktivierung dieses Proteins bei Zellstress. (Phosphorylierung ist eine biochemische Reaktion, bei welcher enzymatisch eine Phosphatgruppe an ein organisches Molekül (z.B. Protein) anhängt wird.) Diese Phosphorylierung wurde mittels Western Blots nachgewiesen. Aktivierte JNK ist in der Lage weitere Proteine (z.B. c-jun) zu phosphorylieren. Um die Aktivität der JNK in zellulären Proben zu bestimmen, wurde die JNK mit Hilfe eines spezifischen Antikörpers isoliert und getestet, inwiefern die isolierte JNK c-jun phosphorylieren kann, d.h. aktiv ist. Phosphoryliertes c-jun wurde dann ebenfalls mittels Western Blots nachgewiesen und quantifiziert.

4.2.11 Bildung von Stress-Proteinen mit schützender Funktion (Nrf-2, HO-1)

Nrf-2 ist ein DNA-bindendes Protein, welches Gene aktiviert, deren Genprodukte einer Zellschädigung entgegen wirken. Wird Nrf-2 aktiviert, wandert es vom Zellplasma in den Zellkern (nukleäre Translokation). Dies lässt sich nachweisen, indem die Kernproteine isoliert werden und anschließend mittels Western Blot überprüft wird, ob sich Nrf-2 im Zellkern befindet. Darüber hinaus wurde die Neusynthese des zellulären Schutzproteins Hämoxygenase-1 (HO-1) mittels Western Blots nachgewiesen. Die HO-1 gehört zu den Genprodukten, welche durch Nrf-2 aktiviert werden.

4.2.12 Statistische Auswertung

Bei den in den Abbildungen dargestellten Messwerten handelt es sich um die arithmetischen Mittelwerte aus mindestens drei unabhängigen Versuchen. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler (SD) wieder.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Fluoreszenz-mikroskopische Untersuchungen von Partikeln in humanen Lungenepithelzellen

Anhand konfokaler Fluoreszenz-Mikroskopie wurde die Partikel-Aufnahme in humanen Lungenepithelzellen dargestellt. Mittels dieser neuartigen Methode wurde gezeigt, dass Ultrafeinstäube (UFPs) aus der Holzackschnitzel (Kiefernholz)- und Buchenholz-Verbrennung nach einer Expositionszeit von 24 h in die Zellen aufgenommen werden können (Abb. 21).

4.2.10 Détermination de l'activation de protéines associées au stress cellulaire (p38, JNK)

Les protéines P38 et JNK sont des protéines activées en cas de stress cellulaire. En cas de stress cellulaire, la protéine p38 est activée par sa phosphorylation. (La phosphorylation est une réaction biochimique qui consiste en l'addition d'un groupe de phosphate à une molécule organique (par ex. une protéine) par voie enzymatique.) Cette phosphorylation est détectée à l'aide de Western Blots. La protéine JNK activée est capable de phosphoryler d'autres protéines (par ex. c-jun). Afin de déterminer l'activité de JNK dans les échantillons cellulaires, elle a été isolée à l'aide d'un anticorps spécifique pour ensuite tester dans quelle mesure JNK est capable de phosphoryler c-jun, c'est-à-dire, dans quelle mesure elle est active. C-jun phosphorylée a ensuite également été détectée et quantifiée à l'aide de Western Blots.

4.2.11 Production de protéines de stress à fonction protectrice (Nrf-2, HO-1)

Nrf-2 est une protéine liant l'ADN. Elle active des gènes dont les produits géniques empêchent les dommages cellulaires. L'activation de Nrf-2 entraîne sa translocation du cytoplasme vers le noyau (translocation nucléaire). Cette translocation peut être démontrée en isolant les protéines nucléaires pour ensuite vérifier à l'aide de Western Blots la présence de Nrf-2 dans le noyau cellulaire. La néosynthèse de la protéine cytoprotectrice hème-oxygénase-1 (HO-1) a également été démontrée à l'aide de Western Blots. La HO-1 fait partie des produits géniques activés par Nrf-2.

4.2.12 Exploitation statistique

Les valeurs représentées dans les figures sont les moyennes arithmétiques issues d'au moins trois essais indépendants. Les barres d'erreur affichent l'erreur standard SD.

4.3 Résultats

4.3.1 Etude par microscopie de fluorescence de particules dans les cellules épithéliales du poumon humain

L'image des particules dans les cellules épithéliales du poumon humain a été prise par microscopie confocale de fluorescence. A l'aide de cette nouvelle méthode, il a été démontré que les particules ultrafines (UFP) issues de la combustion des plaquettes (bois de pin) et du bois de hêtre peuvent pénétrer dans les cellules après une durée d'exposition de 24 heures (Fig. 21).



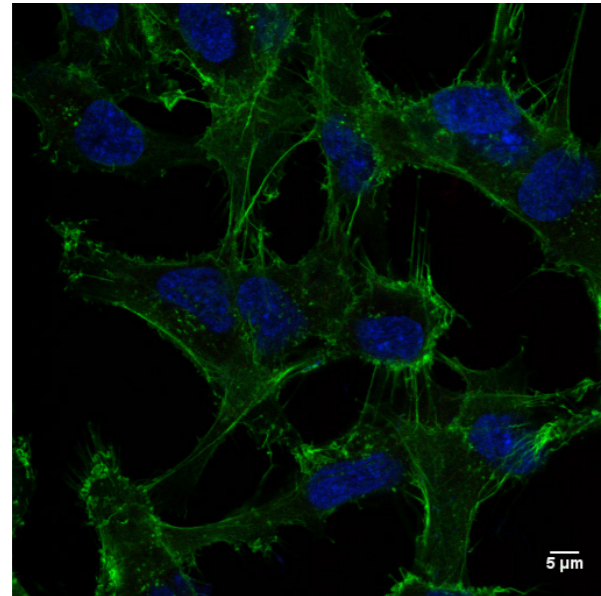


Abbildung 21: Fluoreszenz-mikroskopische Aufnahmen von humanen Lungenepithelzellen, die mit Feinstäuben aus der Buchenholz-Verbrennung für 24 h exponiert wurden. Links: unbehandelte Zellen; rechts: Feinstaub-exponierte Zellen; Färbung: blau = DAPI-Färbung der Zellkerne; grün = FITC-Phalloidin-Färbung des Zytoskeletts; rot = Färbung der ultrafeinen Partikel.

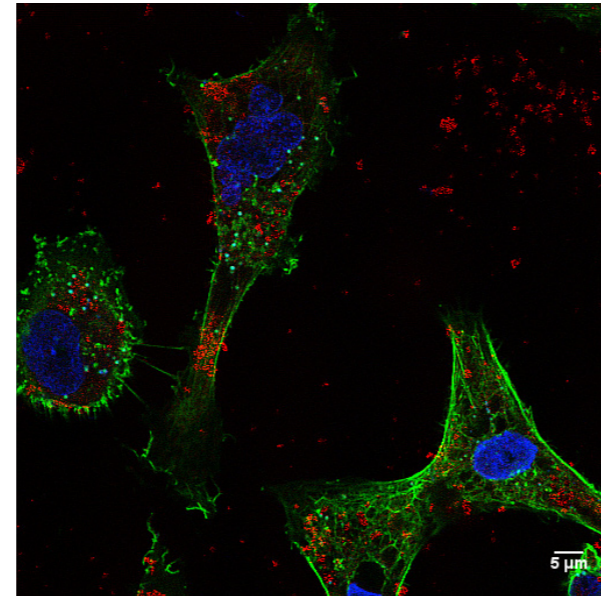


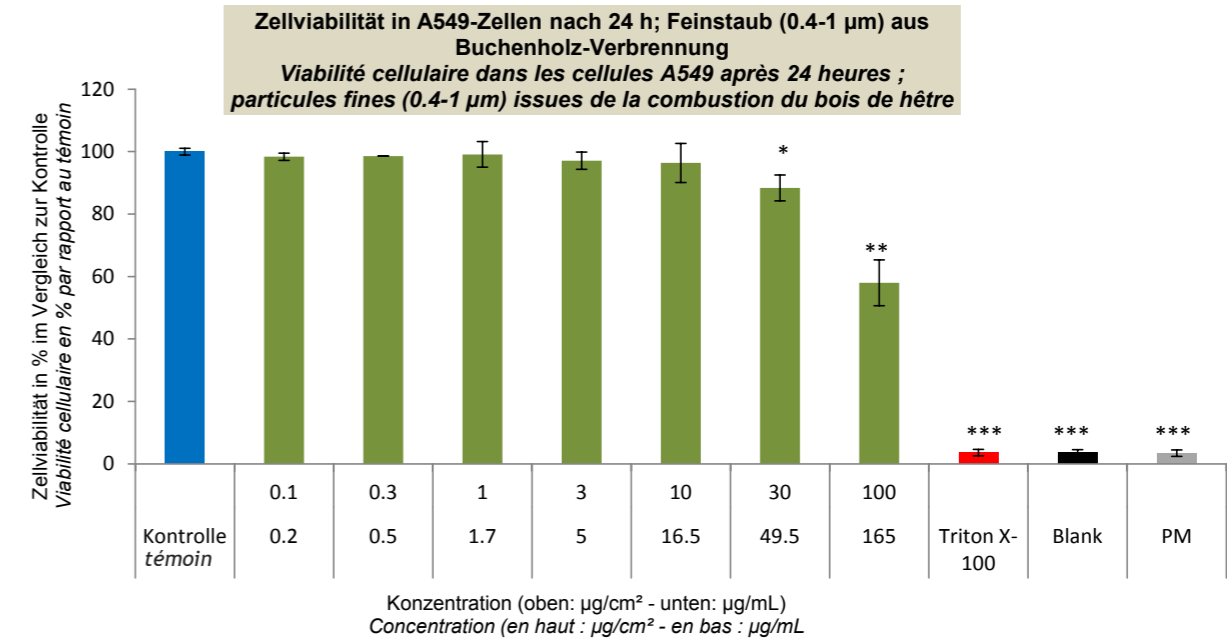
Figure 21 : Images obtenues par microscopie de fluorescence de cellules épithéliales de poumon humain après 24 heures d'exposition aux particules fines issues de la combustion du bois de hêtre. A gauche : cellules non traitées ; à droite : cellules exposées aux particules fines ; Coloration : bleu = coloration DAPI des noyaux ; vert = coloration du cytosquelette à la phalloïdine-FITC ; rouge = coloration des particules ultrafines.

4.3.2 Zelltoxische und genotoxische Auswirkungen verschiedener Feinstaubpartikel aus der Biomasse-Verbrennung

Die Toxizität diverser Verbrennungspartikelgrößen aus Biomasse wurde in Lungenepithelzellen untersucht und mit den toxischen Effekten von Steinkohle-Flugasche als Referenzmaterial verglichen (Abb. 22). Erste toxische Effekte von Feinstaub aus der Buchenholz-Verbrennung und der Steinkohle-Flugaschen waren bei 50 µg/mL (30 µg/cm²) zu beobachten. Während für die Zellviabilität keine Abhängigkeit von der Partikelgröße zu beobachten war, konnte man für die DNA-schädigende (genotoxische) Wirkung eine Partikelgrößenabhängigkeit des getesteten Materials feststellen. Partikelgrößen von 0.4 - 1 µm aus der Buchenholz-Verbrennung schädigen die DNA bereits ab einer Konzentration von 50 µg/mL (30 µg/cm²), während größere Partikel erst bei 165 µg/mL (100 µg/cm²) genotoxisch wirkten. Ähnliche Partikelgrößenabhängigkeiten fanden sich auch für die anderen Feinstäube und Flugaschen.

4.3.2 Impacts cytotoxiques et génotoxiques des différentes particules fines issues de la combustion de biomasse

La toxicité des particules de diverses tailles issues de la combustion de biomasse a été étudiée dans des cellules épithéliales du poumon et comparée aux effets toxiques du matériau de référence (cendres volantes de charbon) (Fig. 22). Les premiers effets toxiques des particules fines issues la combustion du bois de hêtre et des particules des cendres volantes de charbon ont pu être observés à partir de 50 µg/mL (30 µg/cm²). Tandis qu'une influence de la taille des particules sur la viabilité cellulaire n'a pas pu être observée, une telle influence sur l'impact génotoxique a bel et bien pu être constatée pour les matériaux testés. Les particules de 0.4 à 1 µm issues de la combustion du bois de hêtre endommagent déjà l'ADN à partir d'une concentration de 50 µg/mL (30 µg/cm²), tandis que les particules de plus grande taille n'ont un effet génotoxique qu'à partir de 165 µg/mL (100 µg/cm²). Des influences similaires de la taille des particules ont également été constatées pour les autres particules fines et les cendres volantes.



DNA-schädigende Wirkung in A549-Zellen nach 24 h; Feinstaub (0.4 - 1 µm) aus Buchenholz-Verbrennung

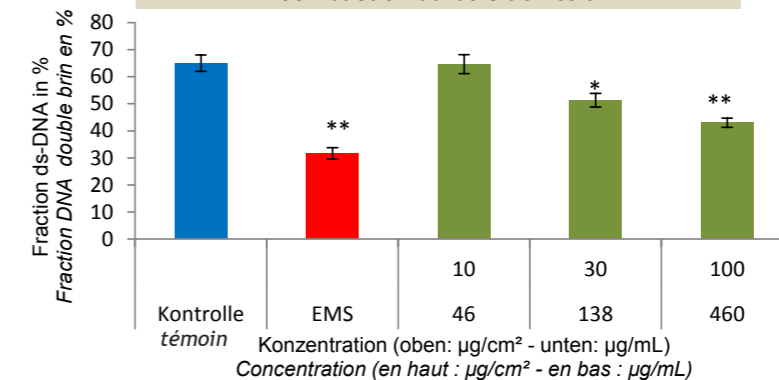


Abbildung 22: Zellviabilität und DNA-schädigende (genotoxische) Wirkungen für Feinstaub aus der Buchenholz-Verbrennung. Humane Lungenepithelzellen wurden für 24 h mit den Partikeln versetzt, bevor die Abnahme der Viabilität (Zellviabilität) und die Genotoxizität anhand des WST-1 Bioassays (obere Abbildung) und dem DNA-alkalischen Entwindungstest (untere Abbildung) bestimmt wurden. Konzentrationsangaben in den jeweiligen Abbildungen: oben in µg/cm²; unten in µg/mL. Blau = Zellen unbehandelt; Rot = bei Zellviabilität Triton-X100; bei DNA-alkalischem Entwindungstest Ethylmethansulfonat (EMS); schwarz: Reagenzienkontrolle (blank); grau: Partikelkontrolle (PM) ohne Zellen

Figure 22 : Exposition cellulaire à des particules fines issues de la combustion du bois de hêtre. Après une exposition de cellules épithéliales du poumon humain aux particules pendant 24 heures, la diminution de la viabilité (viabilité cellulaire) et la génotoxicité ont été déterminées à l'aide du test WST-1 (figure en haut) et de la méthode de déroulement de l'ADN en milieu alcalin (figure en bas). Concentrations indiquées dans les figures : en haut en µg/cm² ; en bas en µg/mL. Bleu = cellules non traitées ; rouge = pour la viabilité cellulaire, le triton-X100 ; pour la méthode de déroulement de l'ADN en milieu alcalin, le sulfonate d'éthyle méthane (EMS) ; noir = réactif témoin (blank) ; gris = particules témoins (PM) sans cellules

Weiterhin wurden morphologische Veränderungen nach Feinstaub-Exposition von Lungenepithelzellen fotomikroskopisch betrachtet. Miscanthuspartikel-exponierte Zellen wiesen kaum morphologische Veränderungen auf, während bei den anderen Proben z.T. deutliche Veränderungen sichtbar wurden. Diese waren nach Behandlung mit Steinkohle-Flugasche oder Feinstaubpartikel aus der Buchenholz-Verbrennung am stärksten ausgeprägt.

Zudem wurde die Zellviabilität und Genotoxizität aller in Tabelle 15 aufgeführten Partikel bestimmt. Genotoxische Effekte (DNA-Schäden) konnten für Holz-Flugasche-Fractionen, für Miscanthus-Flugasche-Fractionen sowie für die Positiv-Kontrollpartikel (SiO₂, DEP, CFA) nachgewiesen werden. Weiterhin wurden auch Einflüsse auf die Zellviabilität beobachtet. Interessanterweise vermittelte auch Kalziumkarbonat (Fraktion <1 µm), welches in den verschiedenen Fractionen der Flugaschen gehäuft gefunden wurde (siehe 3.3.3.2.1), eine dosisabhängige, Zellviabilität-beeinflussende und DNA-schädigende Wirkung. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 16 zusammengefasst.

De plus, les modifications morphologiques après exposition des cellules épithéliales de poumon aux particules fines ont été observées au microscope optique. Les cellules exposées aux particules de miscanthus n'ont guère présenté de modifications morphologiques, tandis qu'une partie des autres échantillons présentait des modifications sensibles. Les modifications les plus marquées ont été constatées après l'exposition aux cendres volantes de charbon ou aux particules fines issues de la combustion du bois de hêtre.

La viabilité cellulaire et la génotoxicité de l'ensemble des particules indiquées au tableau 15 ont également été déterminées. Des effets génotoxiques (dégâts de l'ADN) ont pu être démontrés pour les fractions des cendres volantes de bois, pour les fractions des cendres volantes de miscanthus et pour les particules du témoin positif (SiO₂, DEP, CFA). Des influences sur la viabilité cellulaire ont également été observées. Le carbonate de calcium (fraction <1 µm), très fréquemment rencontré dans les différentes fractions des cendres volantes (voir 3.3.3.2.1), induit également des effets génotoxiques et des impacts sur la viabilité cellulaire en fonction de la dose. Les résultats sont résumés dans le tableau 16.

Untersuchungsmaterial	Zelllinie	Zellviabilität *LOEL [µg/cm ²]	Genotoxizität *LOEL [µg/cm ²]
Positiv-Kontrollpartikel			
SiO ₂	A549 BEAS-2B	10 3	10 10
DEP	A549 BEAS-2B	30 30	10 10
CFA	A549 BEAS-2B	30 30	10 10
Wichtige Bestandteile der Flugaschen aus der Biomasse-Verbrennung (siehe 3.3.3.2.1)			
CaCO ₃	A549 BEAS-2B	30 30	30 30
K ₂ SO ₄	A549 BEAS-2B	>100 >100	>100 >100
Flugasche Miscanthus-Verbrennung (Ammertzwiler)			
0.4 – 1 µm	A549 BEAS-2B	100 100	100 100
1 – 2.5 µm	A549 BEAS-2B	100 100	100 100
>2.5 µm	A549 BEAS-2B	100 100	100 100
Flugasche Holzhackschnitzel-Verbrennung (St.Peter)			
Ausgangsmaterial (nicht fraktioniert)	A549 BEAS-2B	30 30	100 100
Filtergut (1 – 2.5 µm)	A549 BEAS-2B	30 30	100 100
Feingut (< 1 µm)	A549 BEAS-2B	100 100	100 100
Rückstand	A549 BEAS-2B	100 100	100 100
Feinstaub Miscanthus-Verbrennung (GRE)			
0.4 - 1 µm	A549 BEAS-2B	>100 >100	>100 >100
1 – 2.5 µm	A549 BEAS-2B	>100 >100	>100 >100
> 2.5 µm	A549 BEAS-2B	>100 >100	>100 >100
Feinstaub Buchenholz-Verbrennung (GRE)			
0.4 – 1 µm	A549 BEAS-2B	30 30	30 30
1 – 2.5 µm	A549 BEAS-2B	30 30	100 30
> 2.5 µm	A549 BEAS-2B	100 100	100 100
Feinstaub Holzhackschnitzel-Verbrennung (GRE)			
0.4 – 1 µm	A549 BEAS-2B	30 30	100 100
1 – 2.5 µm	A549 BEAS-2B	100 30	100 30
> 2.5 µm	A549 BEAS-2B	100 100	100 100

*LOEL („Lowest Observable Effect Level“): die niedrigste beobachtbare Dosis, die einen adversen Effekt ausübt.

Tabelle 16: Zellviabilität und Genotoxizität diverser Feinstäube und Flugaschen aus Verbrennungsprozessen von Biomasse sowie entsprechendem Referenzmaterial.

Matériaux étudiés	Lignée cellulaire	Viabilité cellulaire *LOEL [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]	Génotoxicité *LOEL [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$]
Particules du témoin positif			
SiO ₂	A549	10	10
	BEAS-2B	3	10
DEP	A549	30	10
	BEAS-2B	30	10
CFA	A549	30	10
	BEAS-2B	30	10
Constituants importants des cendres volantes issues de la combustion de biomasse (voir 3.3.3.2.1.)			
CaCO ₃	A549	30	30
	BEAS-2B	30	30
K ₂ SO ₄	A549	>100	>100
	BEAS-2B	>100	>100
Cendres volantes issues de la combustion de miscanthus (Ammertzwiler)			
0.4 – 1 μm	A549	100	100
	BEAS-2B	100	100
1 – 2.5 μm	A549	100	100
	BEAS-2B	100	100
>2.5 μm	A549	100	100
	BEAS-2B	100	100
Cendres volantes issues de la combustion de plaquettes (St. Peter)			
Matériau de base (non fractionné)	A549	30	100
	BEAS-2B	30	100
Matière filtrée (1 – 2.5 μm)	A549	30	100
	BEAS-2B	30	100
Fines (< 1 μm)	A549	100	100
	BEAS-2B	100	100
Refus	A549	100	100
	BEAS-2B	100	100
Particules fines issues de la combustion de miscanthus (GRE)			
0.4 - 1 μm	A549	>100	>100
	BEAS-2B	>100	>100
1 – 2.5 μm	A549	>100	>100
	BEAS-2B	>100	>100
> 2.5 μm	A549	>100	>100
	BEAS-2B	>100	>100
Particules fines issues de la combustion du bois de hêtre (GRE)			
0.4 – 1 μm	A549	30	30
	BEAS-2B	30	30
1 – 2.5 μm	A549	30	100
	BEAS-2B	30	30
> 2.5 μm	A549	100	100
	BEAS-2B	100	100
Particules fines issues de la combustion de plaquettes (GRE)			
0.4 – 1 μm	A549	30	100
	BEAS-2B	30	100
1 – 2.5 μm	A549	100	100
	BEAS-2B	30	30
> 2.5 μm	A549	100	100
	BEAS-2B	100	100

*LOEL (« Lowest Observable Effect Level ») : dose minimale entraînant un effet néfaste observé.

Tableau 16 : Viabilité cellulaire des cellules exposées à des particules et génotoxicité de particules fines et de cendres volantes issues de procédés de combustion de biomasse par rapport à des témoins.

4.3.3 Exposition von Zellen an der Luft/Flüssigkeits-Grenzschicht

Feinstaubpartikel werden über die Atemwege ins Lungengewebe aufgenommen. Um diesen Zustand möglichst naturgetreu zu simulieren, etablierten wir ein innovatives Expositionssystem, über welches Feinstaubpartikel als Aerosol den Versuchszellen zugeführt wurden. Dazu wurde die Kultivierungs- und Expositionseinheit der Firma Vitrocell (Waldkirch, Deutschland) eingesetzt und die Viabilität von Feinstaub-Aerosol-behandelten Zellen bestimmt (Abb. 23).

4.3.3 Exposition de cellules à l'interface air-liquide

Les particules fines sont absorbées par le tissu pulmonaire via les voies respiratoires. Pour assurer une simulation aussi réaliste que possible de cet état, nous avons établi un modèle d'exposition innovant à l'aide duquel les particules fines sont incorporées dans les cellules tests sous forme d'aérosol. A cet effet, le module de culture et d'exposition de la société VITROCELL (Waldkirch, Allemagne) a été utilisé pour déterminer la viabilité des cellules exposées à l'aérosol de particules fines (Fig. 23).

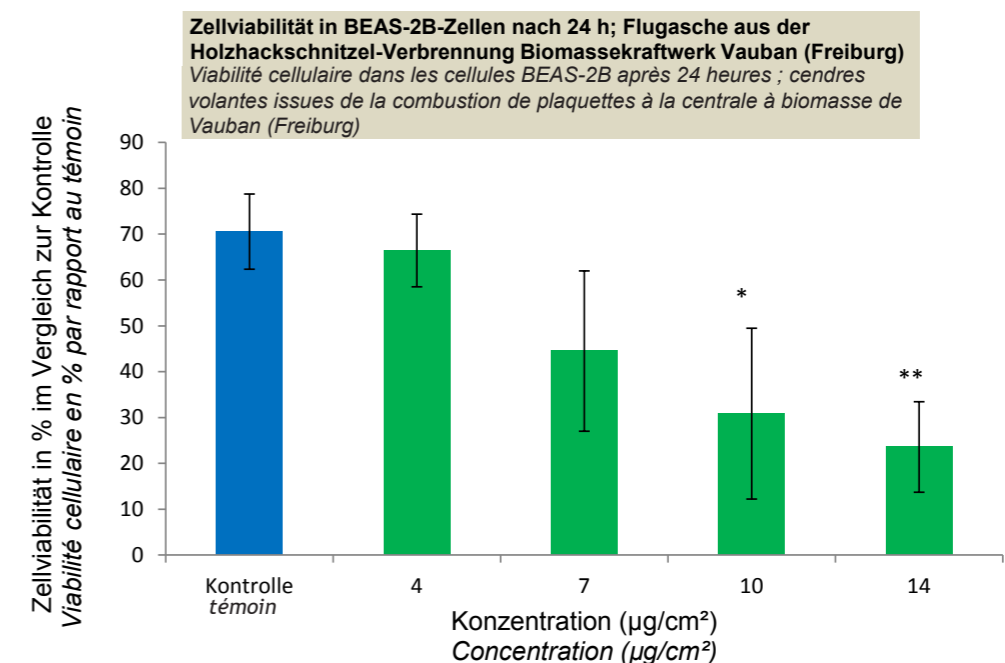


Abbildung 23: Die Kultivierungs- und Expositionseinheit der Firma Vitrocell im Herstellerbau (oben links) und im Laborbetrieb mit der Aerosolisierungsgarnitur zur Erzeugung der Partikelaserosole (oben rechts). Die Zellviabilität wurde 24 Stunden nach der Exposition bestimmt (unten).

Figure 23 : Module de culture et d'exposition de la société VITROCELL monté chez le constructeur (à gauche) et en service au laboratoire avec l'appareillage d'aérosolisation pour la génération des aérosols de particules (à droite). La viabilité cellulaire a été déterminée 24 heures après l'exposition (en bas).

Die zu untersuchenden Lungenzellen werden auf einer speziellen Membran ausgesät und mit Zellkulturmedium bis knapp über den Zellrasen beschichtet. Die Konzentration der Feinstaubpartikel im Aerosol sowie der Volumenstrom sind variabel einstellbar. Lungenepithelzellen wurden für eine Stunde mit Flugaschepartikeln aus der Holzhackschnitzel-Verbrennung Biomassekraftwerk Vauban (4, 7, 10 und 14 µg/cm²) bei einem Volumenstrom von 5 mL/min behandelt.

Unsere Ergebnisse belegen, dass bereits Konzentrationen von 10 µg/cm² Feinstaub aus Holzhackschnitzel-Verbrennung in Lungenzellen eine toxische Wirkung entfalten können (Abb. 23). Somit lassen sich mit der Exposition an der Luft/Flüssigkeit-Grenzschicht in einem Vitrocell-Expositionssystem bereits bei deutlich niedrigeren Konzentrationen toxische Effekte nachweisen als mit den zuvor durchgeführten Submerskultur-Experimenten (Tabelle 16).

4.3.4 Zellviabilität und genotoxisches Potential von Verbrennungspartikeln in Abhängigkeit ihres PAK-Gehalts

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen (PAKs) entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von organischem Material wie Holz, Kohle oder Öl, vornehmlich aus Kleinfeuerungsanlagen, industriellen Prozessen, Feuerstellen oder Tabakrauch. Viele PAKs gelangen durch diese Verbrennungsprozesse in die Atmosphäre und verteilen sich gebunden an Staub und Rußpartikel weiträumig. Besorgniserregend sind PAKs weil viele von ihnen krebserregende, erbgutverändernde und/oder fortpflanzungsgefährdende Eigenschaften aufweisen. Im Rahmen des Projektes wurde der Gehalt von verschiedenen Feinstäuben auf PAKs untersucht (MIPS) und mit den biologischen Effekten der entsprechenden Feinstaubproben verglichen. Unsere Ergebnisse belegen, dass der PAK-Gehalt der Verbrennungspartikel einen erheblichen Einfluss auf die zuvor beobachtete Feinstaubbedingte Toxizität von Lungenepithelzellen ausübt (Abb. 24).

Les cellules pulmonaires à étudier sont mises en cultures sur une membrane spéciale et recouvertes de milieu de culture cellulaire juste au-dessus du tapis cellulaire. Les concentrations des particules fines contenues dans l'aérosol ainsi que le débit sont réglables. Les cellules épithéliales du poumon ont été exposées durant une heure aux particules de cendres volantes issues de la combustion de plaquettes de la centrale 'biomasse' de Vauban (4, 7, 10 et 14 µg/cm²) à un débit de 5 mL/min.

Les résultats obtenus confirment qu'une concentration de 10 µg/cm² de particules fines issues de la combustion de plaquettes suffit à entraîner des effets toxiques sur les cellules pulmonaires (Fig. 23). L'exposition à l'interface air-liquide dans un système d'exposition VITROCELL permet donc de montrer des effets toxiques à partir de concentrations bien plus basses qu'avec les expériences en culture immergée réalisées auparavant (tableau 16).

4.3.4 Viabilité cellulaire et potentiel génotoxique de particules de combustion en fonction de leur concentration en HAP

Les composés d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) se forment lors de la combustion incomplète de matières organiques telles que le bois, le charbon ou l'huile, issue notamment de petites installations de combustion, de procédés industriels, de foyers domestiques ou de la fumée de tabac. Lors de la combustion, un grand nombre de molécules de HAP sont rejetées dans l'atmosphère et se dispersent, adsorbées aux particules notamment à la suie. Certains HAP sont cancérogènes, mutagènes et/ou reprotoxiques. Dans le cadre du projet, la concentration en HAP dans différentes particules fines a été étudiée (MIPS) et comparée avec les effets biologiques des échantillons de particules fines respectives. Les résultats confirment une influence considérable de la concentration en HAP dans les particules de combustion sur la toxicité des particules fines étudiées sur les cellules épithéliales de poumon (Fig. 24).

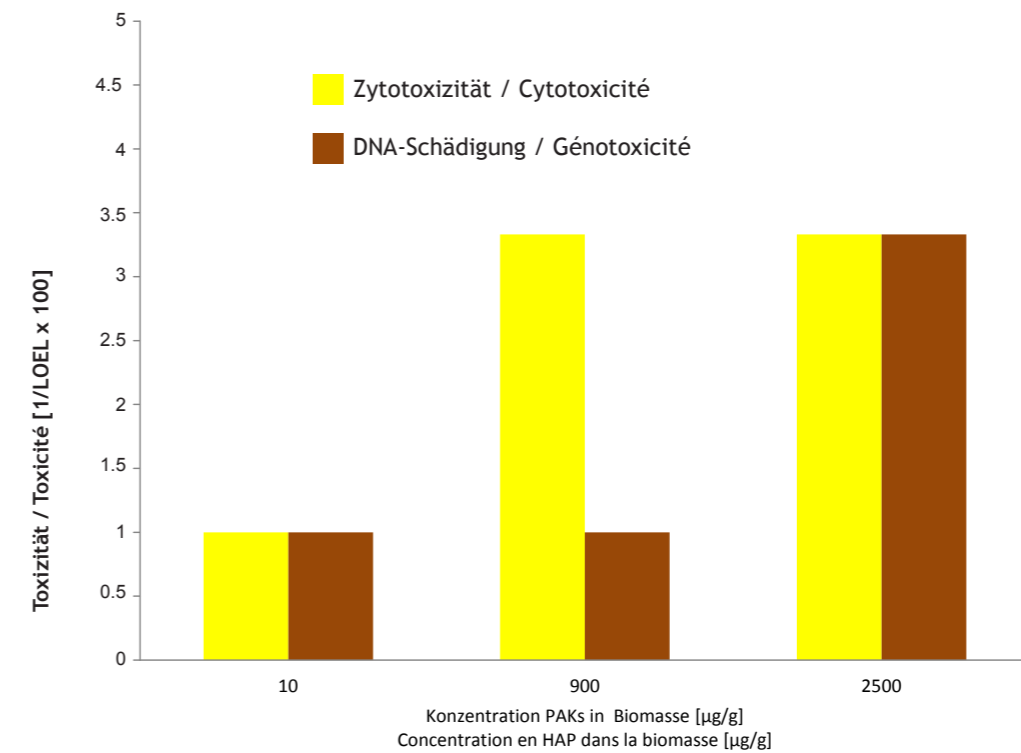


Abbildung 24: Toxizität von Verbrennungspartikeln in Abhängigkeit des PAK-Gehalts der verwendeten Biomasse. Die Toxizität wird als 1/LOEL x 100 dargestellt. Je höher dieser Wert, desto toxischer wirken die Verbrennungspartikel.

Figure 24 : Toxicité des particules de combustion en fonction de la concentration en HAP dans la biomasse utilisée. La toxicité est exprimée en 1/LOEL x 100. Les particules de combustion sont d'autant plus toxiques que cette valeur est importante.

4.3.5 Auswirkungen unterschiedlicher Feinstaub-Partikel auf Entzündungsparameter und den oxidativen Stress in Lungenepithelzellen und Makrophagen

Um abzuschätzen, ob Feinstaubpartikel aus der Biomasse-Verbrennung eine Entzündungsreaktion oder zellulären Stress auslösen können, wurden Lungenepithelzellen und Makrophagen mit 1 - 100 µg/mL Feinstaubpartikel aus der Verbrennung von Miscanthus, Buche und Holzhackschnitzel (Verbrennungsanlage St. Peter) versetzt und die Aktivierung des Transkriptionsfaktors NF-κB (DNA-Bindung) und die Bildung von zellschädigenden Sauerstoffradikalen als Messparameter einer Entzündung oder von Zellstress ermittelt. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die verwendeten Verbrennungspartikel weder die DNA-Bindung von NF-κB signifikant erhöhten, noch eine deutliche Bildung von Sauerstoffradikalen (ROS) in den betroffenen Zellen verursachten (Abb. 25).

4.3.5 Impacts des différentes particules fines sur les réactions inflammatoires et le stress oxydatif dans les cellules épithéliales de poumon et les macrophages

Afin de pouvoir estimer si les particules fines issues de la combustion de biomasse peuvent provoquer une réaction inflammatoire ou un stress cellulaire, des particules fines (1 à 100 µg/mL), issues de la combustion de miscanthus, de hêtre et de plaquettes (installation de combustion de St. Peter), ont été incorporées dans les cellules épithéliales de poumon et les macrophages. L'activation du facteur de transcription NF-κB (liaison à l'ADN) et la production de radicaux libres cytotoxiques sont les marqueurs d'une inflammation ou d'un stress cellulaire. Les résultats indiquent que les particules de combustion utilisées ne provoquent pas d'augmentation sensible de la liaison de NF-κB à l'ADN, ni une production importante de radicaux libres (ROS) dans les cellules concernées (Fig. 25).

Dies belegt, dass die getesteten Feinstäube aus der Biomasse-Verbrennung biologisch nur schwach reaktiv sind und keine ausgeprägte Entzündungsreaktion oder zellschädigenden oxidativen Zellstress auslösen. Im Gegensatz dazu konnten wir aber zeigen, dass eine bestehende Entzündungsreaktion durch Feinstaubpartikel sogar abgeschwächt werden kann. Zellen, welche mit dem entzündungsfördernden Zytokin TNF- α vorstimuliert und anschließend mit den Partikeln versetzt wurden, wiesen eine geringere NF- κ B Aktivität auf (Abb. 25).

Cela confirme que les particules fines testées issues de la combustion de biomasse sont biologiquement peu réactives et ne provoquent ni réactions inflammatoires marquées ni stress cellulaire oxydatif cytotoxique. En revanche, nous avons pu démontrer qu'une réaction inflammatoire existante peut même être atténuée par les particules fines. Des cellules pré-stimulées à la cytokine TNF- α et dans lesquelles ont été incorporées des particules, présentaient une activité de NF- κ B plus faible (Fig. 25).

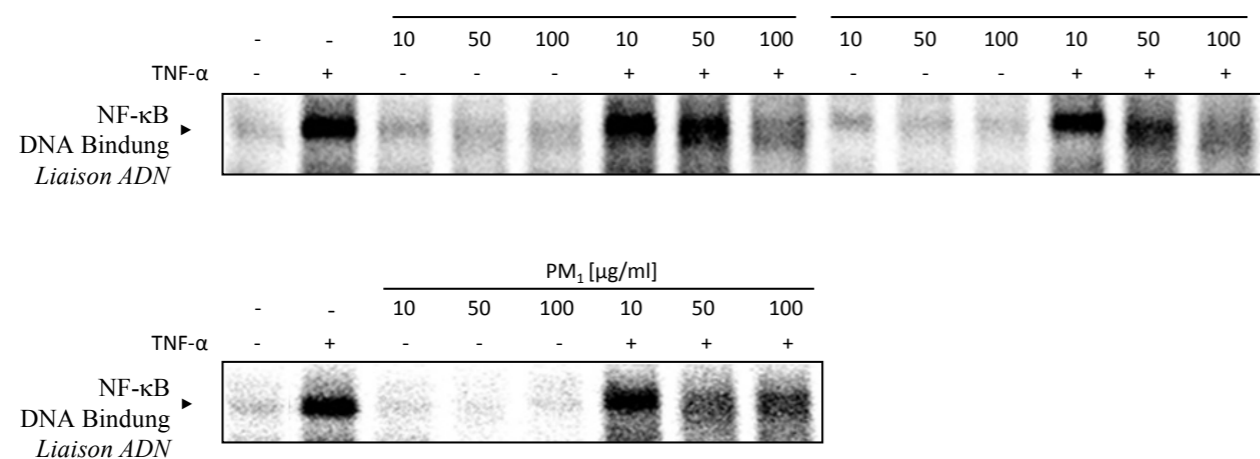


Abbildung 25: Feinstaub aus der Biomasse-Verbrennung ruft keine erhöhte Bildung von Entzündungsmediatoren hervor, kann aber eine bestehende Entzündung reduzieren. In Lungenepithelzellen löst der Botenstoff TNF- α die DNA-Bindung des Entzündungsmarkers NF- κ B innerhalb von 24 Stunden aus (sichtbar an der Zunahme der Schwärzung), während Feinstaub aus der Biomasse-Verbrennungsanlage St. Peter (Ausgangsmaterial, PM_{gesamt}; Filtergut, PM_{1-2.5}; Feingut, PM₁) dazu nicht in der Lage war. Allerdings wurde die DNA-Bindung von NF- κ B in Anwesenheit des Botenstoffs TNF- α durch Feinstaub (PM_{gesamt}, PM_{1-2.5}, PM₁; St. Peter) deutlich reduziert.

Figure 25 : Les particules fines issues de la combustion de biomasse ne provoquent pas d'augmentation de la production de médiateurs de l'inflammation mais peuvent réduire une inflammation existante. Dans les cellules épithéliales de poumon, le médiateur TNF- α déclenche en 24 heures la liaison du marqueur de l'inflammation NF- κ B à l'ADN (augmentation de l'intensité du noircissement), alors que les particules fines issues de l'installation de combustion de biomasse de St. Peter (matériau de base, PM_{total}; matière filtrée, PM_{1-2.5}; fines, PM₁) n'en sont pas capables. En revanche, en présence du médiateur TNF- α la liaison de NF- κ B à l'ADN a été sensiblement réduite par les particules fines (PM_{total}, PM_{1-2.5}, PM₁; St. Peter).

4.3.6 Auswirkungen von Feinstaub-Partikeln auf eine Stressantwort in Makrophagen

P38 und JNK sind Proteine, welche bei Zellstress aktiviert werden und somit als hochempfindliche Sensoren eine Schadstoffbelastung der Zellen anzeigen können. Unsere Untersuchungen belegen, dass 100 μ g/mL PM_{1-2.5} aus der Verbrennungsanlage St. Peter nach 2 Stunden die Stressindikatoren p38 und JNK in Makrophagen deutlich aktivieren. Darüber hinaus zeigten weiterführende Experimente, dass eine Aktivierung dieser Proteine

4.3.6 Impacts des particules fines sur une réponse au stress dans les macrophages

Les protéines P38 et JNK, activées en cas de stress cellulaire, fonctionnent comme des capteurs très sensibles qui peuvent signaler la présence de substances nocives dans les cellules. Nos études confirment que les indicateurs de stress p38 et JNK dans les macrophages sont activés après une exposition de 2 heures à 100 μ g/mL de PM_{1-2.5} issues de l'installation de combustion de St. Peter. Des expériences approfondies ont d'ailleurs

auch bei weitaus geringeren Feinstaubkonzentrationen möglich ist, wenn die Einwirkungszeit entsprechend verlängert wird. Nach 24 Stunden waren 1 - 10 μ g/mL PM_{1-2.5} ausreichend, um p38 oder JNK zu aktivieren. Die Konzentration von 100 μ g/mL PM_{1-2.5} gilt für den Menschen als relevant, da Expositionsmodelle gezeigt haben, dass eine 24-stündige Inhalationsexposition von 100 - 150 μ g/m³ an Partikeln zu einer Ablagerung von ca. 100 μ g/mL in den menschlichen Atemwegen führen kann. PM₂₋₁₀, PM_{0.8-2} und PM_{0.8} aus Filterrückständen nach Verbrennung von Buche und CaCO₃ konnten ebenfalls p38 aktivieren. CaCO₃ ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Verbrennungspartikel und daher vermutlich an der Aktivierung stress-induzierter Proteine beteiligt.

Die Aktivierung von p38 löste einen Abwehrmechanismus aus, welcher eine schädigende Wirkung von Feinstaub auf Zellen potentiell reduzieren kann. Wir konnten folgerichtig zeigen, dass Feinstaub das Protein Nrf-2 aktiviert, welches daraufhin an die DNA bindet und zur Bildung von anderen Proteinen führt, welche dem Zellschaden entgegen wirken. So konnten wir nachweisen, dass das Enzym Hämoxigenase-1 in Feinstaub-behandelten Zellen vermehrt gebildet wird. Dies könnte erklären, weshalb Feinstaubpartikel nur ein geringfügiges Potential besitzen, die Bildung aggressiver Sauerstoffradikale in den betroffenen Zellen anzuregen (Abb. 26).

Durch die Exposition von Zellen mit Feinstaub wurde ein weiterer zellulärer Schutzmechanismus ausgelöst, in dem das Protein eEF-2, welches die Proteinneusynthese reguliert, modifiziert wird. Diese Veränderung führt in der Regel zu einer Hemmung der Proteinneusynthese. An der Veränderung war p38 nicht beteiligt, wohl aber das Protein AMPK. Das Enzym AMPK gilt als Indikator für zellulären Energiemangel (z.B. Stress-bedingt) und schaltet aufwendige Biosynthesen zugunsten einer Energieersparnis für Reparatur, Stressbewältigung und Selbsterhalt ab, u.a. durch Modulation der Aktivität des Proteins eEF-2 (Abb. 26). Die in den Viabilitätsassays beobachtete Reduktion des enzymatisch bedingten Farbumschlags in Anwesenheit von Feinstaub aus Biomasse-Verbrennung (Abb. 23) könnte möglicherweise auch durch einen verringerten Zellmetabolismus bedingt sein. Ein verringerter Zellmetabolismus generiert weniger Energie für die Zelle und könnte somit eine Aktivierung der AMPK erklären (Abb. 26).

Allerdings könnte eine lang anhaltende Aktivierung der AMPK und die daraus resultierende Hemmung der Proteinneusynthese für die Feinstaub-belastete Lunge gravierende Folgen haben, da wesentliche Vorgänge zur Beseitigung schädlicher Fremdpartikel auf der

montré que ces protéines peuvent être activées à des concentrations en particules fines bien moins élevées si la durée d'exposition est prolongée. Après 24 heures, 1 - 10 μ g/mL de PM_{1-2.5} ont suffi pour activer la p38 ou la JNK. La concentration de 100 μ g/mL de PM_{1-2.5} est considérée comme significative pour l'homme. Des modèles d'exposition ont montré qu'une inhalation pendant 24 heures de 100 à 150 μ g/m³ de particules peut entraîner le dépôt d'environ 100 μ g/mL dans les voies respiratoires humaines. La protéine p38 peut également être activée par les PM₂₋₁₀, PM_{0.8-2} et PM_{0.8} issues de résidus de filtration après la combustion de hêtre et de CaCO₃. Le CaCO₃ fait partie intégrante de ces particules de combustion et, par conséquent, participe probablement à l'activation des protéines induites par le stress.

L'activation de p38 déclenche un mécanisme de défense susceptible de réduire l'impact nocif des particules fines sur les cellules. Nous avons pu démontrer de manière concluante que les particules fines activent la protéine Nrf-2 qui se lie à l'ADN et déclenche la production d'autres protéines qui empêchent les dégâts cellulaires. Ainsi nous avons pu démontrer que la production de l'enzyme hème-oxygénase-1 augmente dans les cellules traitées aux particules fines, ce qui pourrait expliquer le faible potentiel des particules fines pour stimuler la production de radicaux libres agressifs dans les cellules concernées (Fig. 26).

L'exposition des cellules aux particules fines a déclenché un autre mécanisme de protection qui comporte la modification de la protéine eEF-2 qui règle la néosynthèse des protéines. En règle générale, cette modification mène à l'inhibition de la néosynthèse des protéines. La p38 n'a pas participé à cette modification, mais la protéine AMPK y a bel et bien participé. L'enzyme AMPK est considérée comme indicateur du manque d'énergie cellulaire (par ex. à cause de stress), et elle stoppe les biosynthesés fortement consommatrices d'énergie afin de conserver cette énergie pour les mécanismes de réparation, la gestion du stress et la préservation de la cellule, à l'aide notamment d'une modulation de l'activité de la protéine eEF-2 (Fig. 26). La réduction du virage de couleur induit par les enzymes en présence de particules fines issues de la combustion de biomasse, observée lors des essais de viabilité (Fig. 23), pourrait également être causée par un métabolisme cellulaire réduit. Un métabolisme cellulaire réduit génère moins d'énergie pour la cellule et pourrait donc expliquer une activation de l'AMPK (Fig. 26).

Néanmoins, une activation prolongée de l'AMPK et, de ce fait, l'inhibition de la néosynthèse des protéines pourraient avoir des conséquences graves pour le poumon chargé en particules fines, car les mécanismes essentiels pour l'élimination des corps étrangers

Neusynthese von Proteinen beruhen, wie z.B. die Migration und Differenzierung von Monozyten/Makrophagen oder das Auslösen einer Entzündungsreaktion.

Eine anhaltende Aktivierung der Hämoxygenase-1 kann chronische Entzündungen fördern oder sogar die Krebsentstehung begünstigen. Zudem ist bekannt, dass Nrf-2 die Resistenz von Zellen gegen aggressive Stoffwechselprodukte erhöht und somit eine wirkungsvolle Krebstherapie beeinträchtigen könnte (Abb. 26). Deshalb haben wir überprüft, inwiefern Feinstaub auch in Epithelzellen, welche als Ursprungszellen von Lungenkarzinomen angesehen werden, Nrf-2 und das Protein Hämoxygenase-1 aktivieren kann. Erste Ergebnisse zeigen, dass Feinstaub tatsächlich in der Lage ist auch in humanen Lungenepithelzellen Nrf-2 zu stimulieren und die Bildung der Hämoxygenase-1 zu veranlassen. Allerdings sind weitere Untersuchungen erforderlich, um einen direkten Zusammenhang zwischen Feinstaub-Exposition und der Krebsentstehung zu verifizieren.

nocifs, tels que la migration et la différenciation des monocytes/macrophages ou le déclenchement d'une réaction inflammatoire, sont basés sur la néosynthèse des protéines.

L'activation prolongée de l'hème-oxygénase-1 peut favoriser les inflammations chroniques ou même contribuer à la formation de cancers. D'ailleurs, il est connu que la Nrf-2 augmente la résistance aux produits agressifs du métabolisme et pourrait donc affecter l'efficacité d'un traitement anticancéreux (Fig. 26). C'est pourquoi nous avons vérifié dans quelle mesure les particules fines peuvent également activer les protéines Nrf-2 et hème-oxygénase-1 dans les cellules épithéliales, considérées comme cellules d'origine des carcinomes pulmonaires. Les premiers résultats montrent que les particules fines sont effectivement capables de stimuler la Nrf-2, également dans les cellules épithéliales du poumon humain, et d'induire ainsi la production de l'hème-oxygénase-1. D'autres études seront cependant nécessaires pour vérifier une relation directe entre l'exposition aux particules fines et la formation de cancers.

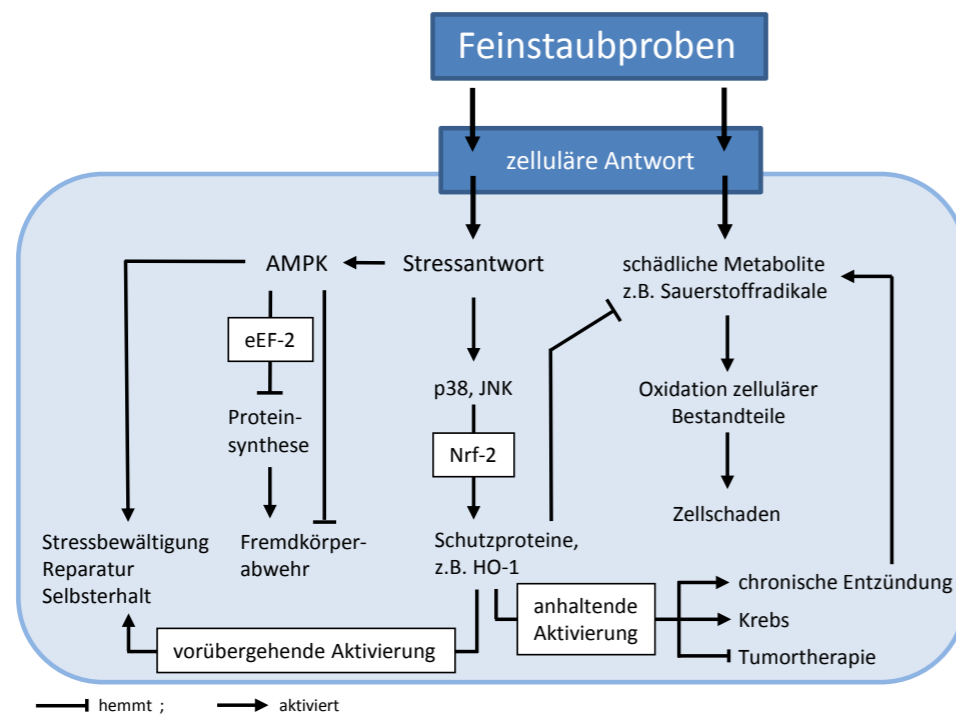


Abbildung 26: Feinstaub kann in Lungenzellen diverse Schutzmechanismen auslösen. Er verursacht die Aktivierung der Proteine p38 und Nrf-2, wodurch das Protein Hämoxygenase-1 (HO-1), welches dem Feinstaub-bedingten Zellschaden (z.B. durch Sauerstoffradikale) entgegen wirkt, vermehrt gebildet wird. Die Reduktion des zellulären Metabolismus durch Feinstaub aktiviert das Protein AMPK, welches aufwendige Biosynthesen zugunsten einer Energieersparnis für Stressbewältigung, Reparatur und Selbsterhalt abschalten kann. Allerdings könnte eine anhaltende Hemmung der Proteinbiosynthese eine effiziente Immunantwort beeinträchtigen und eine persistente Aktivierung von Nrf-2 und der Hämoxygenase-1 die Krebsentstehung oder chronische Entzündungen fördern bzw. eine wirkungsvolle Krebstherapie beeinträchtigen.

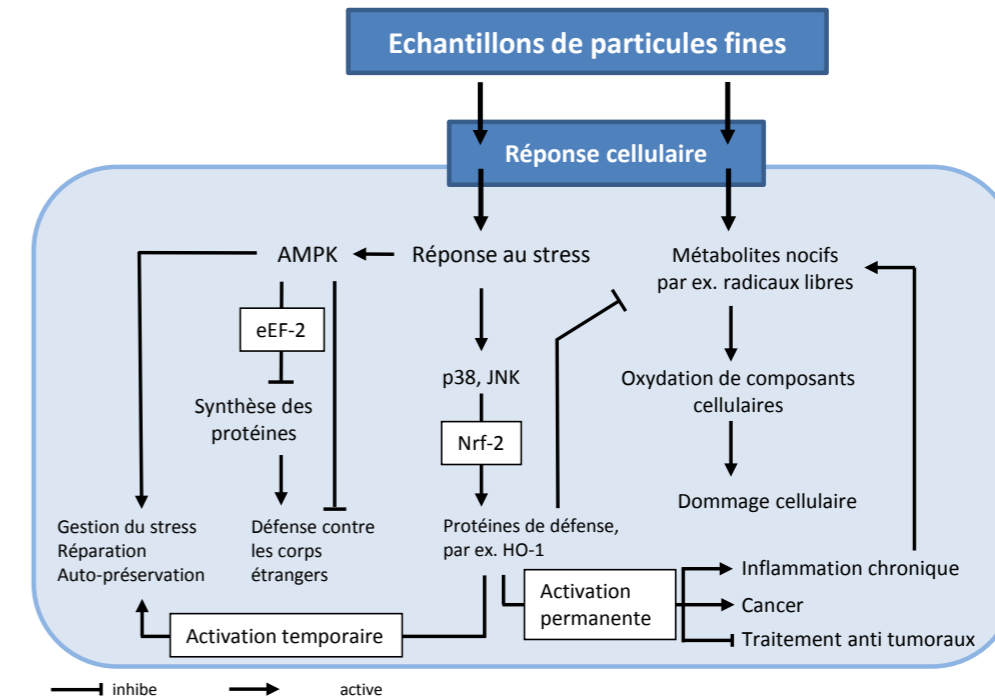


Figure 26 : Déclenchement des mécanismes de protection dans les cellules pulmonaires par les particules fines. Elles provoquent l'activation des protéines P38 et Nrf-2 et augmentent ainsi la production de la protéine hème-oxygénase-1 (HO-1) qui empêche les dommages cellulaires dus aux particules fines (radicaux oxygénés). La réduction du métabolisme cellulaire, induite par les particules fines, active la protéine AMPK qui est capable de stopper les biosyntheses fortement consommatrices d'énergie afin de la conserver pour gérer le stress, la réparation et l'auto-préservation. L'inhibition prolongée de la biosynthèse des protéines est susceptible d'affecter l'efficacité de la réponse immunitaire. L'activation continue de la Nrf-2 et de l'hème-oxygénase-1 peut favoriser la formation de cancers ou des inflammations chroniques et affecter l'efficacité des traitements anti-cancéreux

4.3.7 Auswirkung von Feinstaub auf Lungenzellen bei längerer Einwirkung

Unsere bisherigen Studien haben gezeigt, dass umweltübliche Feinstaubkonzentrationen (1 - 100 µg/mL) aus der Biomasse-Verbrennung keine unmittelbar gravierenden nachteiligen Kurzzeiteffekte vermitteln. Vielmehr häufen sich die Hinweise, dass Feinstaub verschiedene zellschützende Mechanismen der Stressbewältigung über Nrf-2/Hämoxygenase-1 und AMPK/eEF-2 in Gang setzt. Im Gegensatz dazu ist die Langzeitwirkung von Feinstaub auf Lungenzellen kaum untersucht worden. Deshalb haben wir humane Lungenepithelzellen über einen Zeitraum von 60 Tagen mit 100 µg/mL Filtergut (PM_{1-2,5}, St. Peter) exponiert, um die resultierenden zellulären Auswirkungen zu charakterisieren. Im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollzellen wurde eine deutliche Abnahme der Zahl Feinstaub-exponierter Zellen ab ca. der 5. Woche beobachtet. Einen Toxizitäts-bedingten Zellverlust konnten wir nicht nachweisen. Der Feinstaub induzierte weder den nekrotischen noch den programmierten (apoptotischen) Zelltod. Obwohl die Assays des IUK eine Abnahme der Viabilität in Anwesenheit von Feinstaub

4.3.7 Impact des particules fines sur les cellules pulmonaires lors d'une exposition prolongée

Jusqu'ici, nos études ont montré que les particules fines aux concentrations couramment rencontrées (1 - 100 µg/mL) issues de la combustion de biomasse n'induisent aucun effet nocif grave, ni dans l'immédiat ni à court terme. Au contraire, les faits tendent à montrer que les particules fines déclenchent divers mécanismes de protection cellulaire et de gestion du stress via les protéines Nrf-2/hème-oxygénase-1 et AMPK/eEF-2. En revanche, l'impact à long terme des particules fines sur les cellules pulmonaires n'a guère été étudié. C'est pourquoi nous avons exposé pendant 60 jours des cellules épithéliales de poumon humain à 100 µg/mL de matière filtrée (PM_{1-2,5}, St. Peter) afin de caractériser les effets cellulaires résultants. En comparaison avec les cellules témoins, une réduction sensible du nombre de cellules exposées aux particules fines a été observée à partir de la 5e semaine. Nous n'avons pas pu démontrer une perte de cellules due à la toxicité. Les particules fines n'ont induit ni la mort cellulaire nécrotique ni la mort cellulaire programmée (apoptose). Bien que les essais de l'IUK aient montré une réduction de la viabilité en



zeigten, ist dies möglicherweise nicht auf Toxizität, sondern auf einen reduzierten Zellmetabolismus zurückzuführen. Tatsächlich konnten wir zeigen, dass Feinstaub auch in Lungenepithelzellen das Protein AMPK aktiviert, welches einen Abfall des Energiestatus der Zelle anzeigt. Eine Aktivierung der AMPK führt zur Hemmung der Proteinneusynthese und könnte sich daher auch auf die Zellteilung auswirken.

Die Gründe für den Feinstaub-bedingten Zellverlust sind auf Basis der bisher durchgeführten Experimente nur unzureichend geklärt. Unsere Ergebnisse lassen aber darauf schließen, dass eine langfristige Feinstaub-Exposition Lungenepithelzellen nachhaltig schädigen könnte, wodurch möglicherweise die Barrierefunktion und das Regenerationspotential der Epithelzellwand, z.B. in Lungengefäßen und Alveolen, beeinträchtigt werden könnten.

4.3.8 Auswirkung von Feinstaub auf ein 3D-organotypisches Lungenzellkulturmodell

Die Reaktion der Lunge auf Fremdpartikel ist durch eine komplexe Wechselwirkung unterschiedlicher Zelltypen gekennzeichnet. Daher haben wir im Labor ein 3D-organotypisches Lungenzellkulturmodell etabliert, welches die wesentlichen Zellen einschließt, die an einer Fremdkörperabwehr in der Lunge beteiligt sind (Abb. 27). Dieses Modellsystem aus Makrophagen, Lungenepithelzellen und dendritischen Zellen berücksichtigt die physiologischen Umgebungsbedingungen und die Struktur der Lunge und wurde durch andere Studien bereits erfolgreich zur Analyse des Schadenpotentials diverser Nanopartikel eingesetzt. Eine Exposition dieser 3D-organotypischen Lungenzellkultursysteme mit Verbrennungspartikeln aus Biomasse konnte allerdings keine nennenswerte Bildung von Entzündungsmarkern herbeiführen, wie z.B. dem Transkriptionsfaktor NF- κ B und die durch NF- κ B aktivierten Entzündungsgene IL-6, IL-8 und TNF- α . Allerdings reduzierte der Feinstaub die Bildung von Entzündungsfaktoren, die durch bakterielle Komponenten des Lungenerregers *Pseudomonas aeruginosa* verursacht wurden und für eine effiziente Fremdkörperabwehr erforderlich sind. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass der von uns getestete Feinstaub aus der Biomasse-Verbrennung zwar keine direkte, unmittelbare Entzündungsreaktion in Lungenzellen auslöst, dass aber die Belastung der Lunge mit Feinstaubpartikeln aus Biomasse-Verbrennung die Immunantwort gegen eine bakterielle Infektion beeinträchtigen könnte.

présence de particules fines, cet effet n'est peut-être pas dû à la toxicité mais à un métabolisme cellulaire réduit. En effet, nous avons pu montrer que dans les cellules épithéliales de poumon également, les particules fines activent la protéine AMPK, laquelle indique une déplétion énergétique cellulaire. L'activation de l'AMPK entraîne l'inhibition de la néosynthèse des protéines et pourrait donc également influencer la division cellulaire.

Les expériences menées jusqu'ici n'expliquent qu'insuffisamment les causes de la perte cellulaire due aux particules fines. Nos résultats permettent néanmoins de conclure qu'une exposition prolongée aux particules fines pourrait durablement endommager les cellules épithéliales du poumon, ce qui pourrait affecter la fonction de barrière et le potentiel de régénération des parois des cellules épithéliales, par exemple dans les vaisseaux pulmonaires et les alvéoles.

4.3.8 Impact des particules fines sur un modèle tridimensionnel de culture organotypique de cellules pulmonaires

La réaction du poumon aux corps étrangers est caractérisée par une interaction complexe entre les différents types de cellules. C'est pourquoi nous avons établi un modèle tridimensionnel de culture organotypique de cellules pulmonaires comprenant les cellules essentielles participant à la défense du poumon contre les corps étrangers (Fig. 27). Ce système modèle, composé de macrophages, de cellules épithéliales du poumon et de cellules dendritiques, prend en compte les conditions environnementales et la structure du poumon et a déjà été employé avec succès pour l'analyse du potentiel nocif de divers nanoparticules au cours d'autres études. Une exposition de ces systèmes tridimensionnels de culture organotypique de cellules pulmonaires aux particules de combustion de biomasse n'a cependant pas pu induire une production notable de marqueurs de l'inflammation, tels que le facteur de transcription NF- κ B et les gènes pro-inflammatoires IL-6, IL-8 et TNF- α , activés par NF- κ B. A noter cependant que les particules fines ont réduit la production de facteurs d'inflammation induits par les composantes bactériennes du pathogène pulmonaire *Pseudomonas aeruginosa* et nécessaires pour une défense efficace contre les corps étrangers. Ces résultats permettent de conclure que, bien que les particules fines issues de la combustion de biomasse, testées par nos soins, ne déclenchent pas de réaction inflammatoire directe et immédiate dans les cellules pulmonaires, la présence de particules fines issues de la combustion de biomasse dans le poumon pourrait néanmoins affecter la réponse immunitaire à une infection bactérienne.

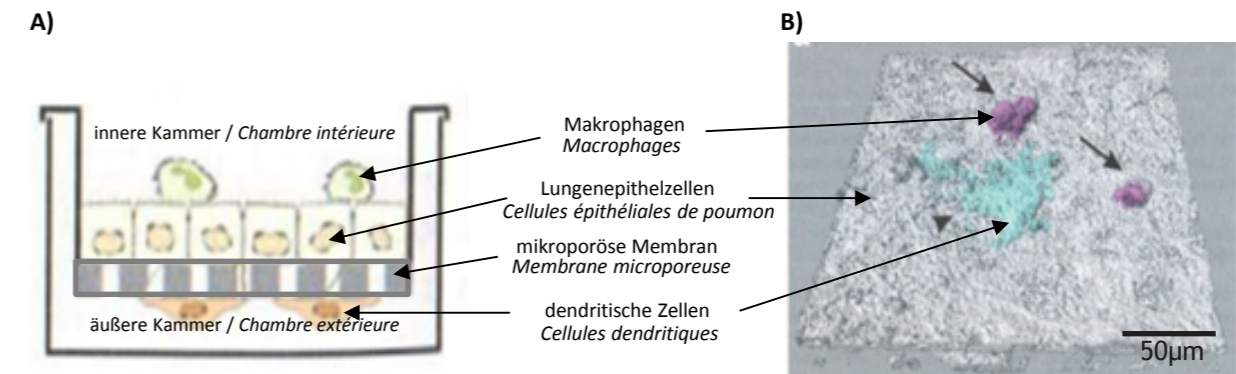


Abbildung 27: Schematische Darstellung des dreidimensionalen-organotypischen Lungenzellkulturmodells, welches die alveolare Epithelzellbarriere und die natürliche Lage der dort befindlichen immunrelevanten Zellen der Lunge darstellt, die an der Beseitigung von Umweltgiften beteiligt sind. In einem Zweikammersystem werden menschliche Lungenepithelzellen auf einer mikroporösen Membran kultiviert. Auf dieser Lungenepithelzellschicht werden Makrophagen (Phagozyten) aufgetragen. Basolateral, auf der Unterseite der porösen Membran hingegen werden menschliche Antigen-präsentierende dendritische Zellen kultiviert. Mit diesem Tripel-Kokultursystem lassen sich Vorgänge an der Atemwegbarriere untersuchen, welche zelluläre Wechselwirkungen mit einschließen. Somit ist das Tripel-Kokultursystem Monokulturen deutlich überlegen.

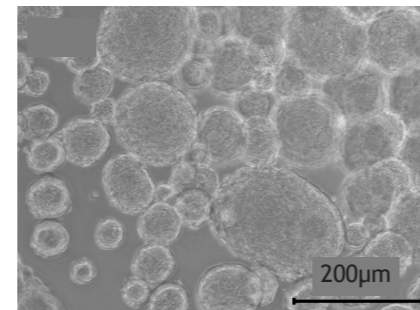
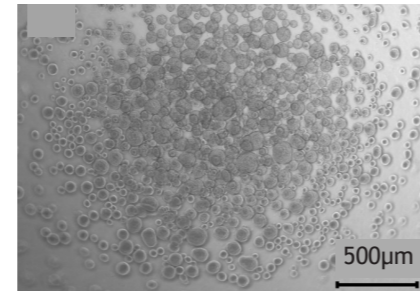
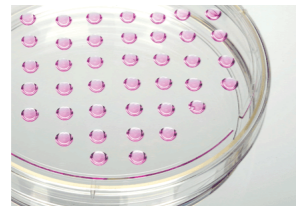
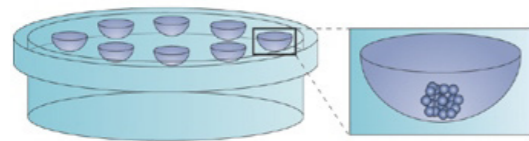
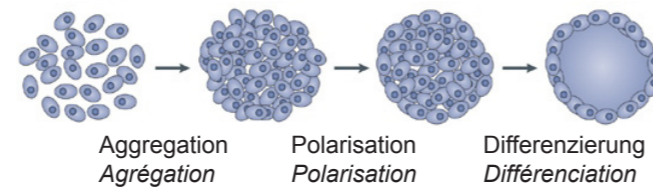
Figure 27 : Schéma du modèle tridimensionnel de culture organotypique de cellules pulmonaires représentant la barrière alvéolo-épithéliale et la position naturelle des cellules immuno-compétentes du poumon qui participent à l'élimination des substances toxiques pour l'environnement. Les cellules épithéliales de poumon humain sont cultivées sur une membrane microporeuse dans un système à deux chambres. Cette couche de cellules épithéliales du poumon est recouverte de macrophages (phagocytes). Du côté basolatéral, sur la face inférieure de la membrane poreuse, des cellules dendritiques présentant des antigènes humains sont cultivées. Ce système triple de co-culture permet l'étude des mécanismes au niveau de la barrière des voies respiratoires, y compris les interactions cellulaires. Le système triple de co-culture est donc nettement meilleur que les monocultures.

4.3.9 Etablierung von 3D-Kulturen der Lunge

Das Verhalten isolierter Zellen in einem Zellkulturgefäß und Zellen in ihrer natürlichen physiologischen 3D-Umgebung kann sich deutlich unterscheiden. Dies könnte auch Auswirkungen auf die Reaktion der Zellen auf widrige Umgebungsbedingungen haben. So ist es möglich, dass sich die Wirkung von Verbrennungstäuben auf zweidimensionale Zellkulturbedingungen und Zellen im Körper deutlich unterscheiden. Daher wurde im Rahmen des Projektes eine 3D-Zellkultur etabliert, die die physiologische Umgebung in der Lunge nachahmt, um die Toxizität der Verbrennungstäube besser abschätzen zu können. Diese Kulturen haben eine sphäroide Form und sind in der Lage, über mehrere Tage die Struktur einer Lungenalveole zu behalten (Abb. 28). Erste Experimente mit Ultrafeinstäuben wie nano-Silica und Carbon-Nanotubes (CNT) zeigen die Einsatzmöglichkeit dieser 3D-Kulturen der Lunge für Toxizitätsuntersuchungen. Diese physiologischen Kulturen stehen nun für Feinstaub-Expositionsexperimente zur Verfügung.

4.3.9 Etablissement de cultures tridimensionnelles dans le poumon

Le comportement de cellules isolées dans un récipient de culture cellulaire peut différer sensiblement de celui des cellules dans leur environnement physiologique tridimensionnel naturel. Cela pourrait également avoir des impacts sur la réaction des cellules à des conditions environnementales défavorables. L'impact des poussières de combustion sous des conditions de culture cellulaire bidimensionnelle est nettement différent de l'impact sur les cellules dans le corps. C'est pourquoi, dans le cadre du projet, une culture cellulaire tridimensionnelle imitant l'environnement physiologique du poumon a été établie afin de mieux pouvoir estimer la toxicité des particules de combustion. Ces cultures présentent une forme sphéroïde et sont capables de maintenir la structure d'une alvéole pulmonaire pendant plusieurs jours (Fig. 28). Des premières expériences avec des particules ultrafines telles que la nano-silice et les nanotubes de carbone (CNT) montrent que ces cultures 3D de poumon peuvent être utilisées pour les études de toxicité. Ces cultures physiologiques sont désormais disponibles pour les expériences d'exposition aux particules fines.



Sphäroide in „Hanging drops“ nach 7 Tagen Kultivierung
Sphäroide in den Tropfen suspendiert nach 7 Tagen Kultivierung

Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Leichte Kultivierbarkeit und Ernte der Sphäroide Geringer Zeitaufwand
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> Culture et récolte aisées des sphéroïdes Peu de temps requis
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Sphäroide sind nicht komplett differenziert Sphäroide überleben nur für kurze Zeit (etwa 7 Tage)
Désavantages	<ul style="list-style-type: none"> Différenciation incomplète des sphéroïdes Courte durée de survie des sphéroïdes (env. 7 jours)

Abbildung 28: Bildung von 3D-Kulturen mit Hilfe der sogenannten „Hanging Drops“. Die gebildeten Sphäroide werden in eine spezielle Matrix eingebettet und können über mehrere Wochen in Kultur gehalten werden.

Figure 28 : Production de cultures 3D à l'aide de « hanging drops » (gouttes suspendues). Les sphéroïdes formés sont noyés dans une matrice spéciale et peuvent être maintenus en culture pendant plusieurs semaines.

4.4 Abschließende Bewertung und Ausblick

Die hier dargestellten Ergebnisse lassen für eine kurz-fristige Feinstaubexposition nach Biomasse-Verbrennung in umweltüblichen Konzentrationen keine schwerwiegenden gesundheitlichen Folgen herleiten. Für die meisten der untersuchten Materialien, z.B. aus Miscanthus und Holzhackschnitzel (Kiefernholz), konnten keine oder eine nur sehr geringe zelltoxische oder DNA-schädigende Wirkung festgestellt werden. Allerdings deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Verbrennungsprodukte von langsam wachsenden Biomassen (z.B. Buche) eine höhere Toxizität aufweisen als Verbrennungsmaterial von schnell wachsenden Biomassen (Buche > Kiefer (in Holzhackschnitzeln) > Miscanthus). Dies ist möglicherweise auf die Akkumulation von Schadstoffen, wie z.B. der Einlagerung von Schwermetallen, zurückzuführen. Auch bestätigte sich,

4.4 Conclusions et perspectives

Les résultats présentés ne permettent pas de conclure qu'une exposition à courte durée aux particules fines issues de la combustion de biomasse, aux concentrations couramment rencontrées, ait des impacts graves sur la santé. Pour la plupart des matériaux étudiés, issus par exemple de miscanthus ou de plaquettes (bois de pin), l'effet cytotoxique ou génotoxique constaté est négligeable, voir nul. Néanmoins, les résultats indiquent que les produits de combustion issus de biomasse à croissance lente (tels que le hêtre) présentent une toxicité plus élevée que les matériaux de combustion issus de biomasse à croissance rapide (hêtre > pin (dans les plaquettes) > miscanthus). Ce fait peut être dû à l'accumulation de substances nocives telles que les métaux lourds. Il a également été confirmé que les particules ultrafines qui pénètrent très profondément

daß ultrafeine Partikel, welche besonders tief in die Lunge eindringen, ein erhöhtes toxisches Potential aufweisen. Zudem konnte gezeigt werden, dass der Gehalt an PAKs zum Teil für das Ausmaß der Toxizität mitverantwortlich ist. Da krebserregende PAKs bei einer unvollständigen Verbrennung von organischem Material bzw. der Verbrennung von feuchter Biomasse entstehen können, scheint eine Optimierung des Verbrennungsvorgangs dringend notwendig, um die toxische Wirkung von Feinstaub weiter zu reduzieren. Diese Optimierung sollte Gegenstand weiterer Forschungsprojekte sein.

Keines der untersuchten Partikel aus der Biomasse-Verbrennung konnte kurzfristig deutlich Entzündungsparameter induzieren, noch konnte eine massive Zunahme an oxidativem Stress in den Zellen nachgewiesen werden. Offensichtlich sind Zellen in der Lage, die negativen Folgen einer Feinstaubbelastung durch die dargestellten Schutzmechanismen zu kompensieren. Zu beachten gilt allerdings, dass sich diese Erkenntnisse auf die untersuchten Partikel beschränken und dass nur Entzündungsreaktionen und die Stressantwort untersucht wurden.

Hingegen sind bei langfristiger Exposition mit Feinstaub aus der Biomasse-Verbrennung adverse Effekte mit negativen gesundheitlichen Folgen wahrscheinlich. Der Verlust von Lungenepithelzellen bei langfristiger Feinstaub-Exposition lässt darauf schließen, dass womöglich die Regenerationsfähigkeit und die Barrierefunktion von Epithelzellen durch Verbrennungspartikel eingeschränkt sein könnten. Eine anhaltende Hemmung der Proteinneusynthese könnte sich nachteilig auf die Immunantwort und die Abwehr von Mikroorganismen auswirken, welchen die Lunge permanent ausgesetzt ist. Des Weiteren könnte eine anhaltende Aktivierung zellulärer Schutzmechanismen chronische Entzündungen fördern, die Entstehung von Krebs begünstigen oder eine bestehende Krebstherapie beeinträchtigen. Aufgrund dieser Gefahrenquellen ist es hochinteressant und notwendig, die langfristigen Auswirkungen von Feinstaub aus der Biomasse-Verbrennung weiter zu untersuchen.

Abschließend konnte ein innovatives Untersuchungssystem etabliert werden, welches erlaubt, Lungenzellen direkt mit Feinstaub aerosolen zu exponieren. Dieses physiologisch realitätsnahe Vitrocell-Expositionssystem könnte in Zukunft benutzt werden, um die Risiken einer Feinstaubexposition weit sensitiver zu untersuchen.

dans le poumon présentent un potentiel toxique élevé. De plus, il a été possible de montrer que la concentration en HAP est en partie responsable du degré de toxicité. Comme les HAP cancérigènes peuvent se former lors de la combustion incomplète de matières organiques telles que la biomasse humide, il paraît crucial d'optimiser le processus de combustion pour réduire encore davantage l'impact toxique des particules fines. Cette optimisation devait faire l'objet d'autres projets de recherche.

Aucune des particules étudiées issues de la combustion de biomasse n'a pu nettement induire à court terme des paramètres d'inflammation, et une augmentation massive du stress oxydatif dans les cellules n'a également pas pu être démontrée. Les cellules sont manifestement capables de compenser les effets négatifs d'une pollution particulaire à l'aide des mécanismes de protection présentés. Cependant, il importe de savoir que ces conclusions ne sont valables que pour les particules étudiées, et que seules les réactions inflammatoires et la réponse au stress ont été étudiées.

En revanche, des effets adverses avec des impacts néfastes sur la santé sont probables lors d'une exposition prolongée aux particules fines issues de la combustion de biomasse. La perte de cellules épithéliales du poumon lors d'une exposition prolongée aux particules fines permet de conclure que la capacité de régénération et la fonction de barrière des cellules épithéliales sont susceptibles d'être diminuées par les particules de combustion. L'inhibition prolongée de la néosynthèse des protéines pourrait avoir des répercussions néfastes sur la réponse immunitaire et la défense contre les microorganismes auxquels le poumon est en permanence exposé. De plus, l'activation prolongée des mécanismes de protection cellulaire est susceptible de favoriser les inflammations chroniques, de contribuer à la formation de cancers ou d'affecter un traitement anticancéreux en cours. Compte tenu de ces sources de danger, il serait intéressant et nécessaire d'étudier davantage les impacts à long terme des particules fines issues de la combustion de biomasse.

Finalement, il a été possible d'établir un système d'étude innovant permettant l'exposition directe de cellules pulmonaires aux aérosols de particules fines. Le système d'exposition VITROCELL est un système réaliste du point de vue physiologique qui pourrait désormais être utilisé pour une étude beaucoup plus fine des risques d'une exposition aux particules fines.

VERWENDUNG DER ASCHEN AUS BIOMASSE-VERBRENNUNG ALS
ERSATZSTOFF FÜR ZEMENTKLINER
VALORISATION DES CENDRES ISSUES DE LA COMBUSTION DE
BIOMASSE DANS LA PRODUCTION DE CIMENT



5 VERWENDUNG DER ASCHEN AUS BIOMASSE-VERBRENNUNG ALS ERSATZSTOFF FÜR ZEMENTKLINKER

5.1 Versuchsaufbau

Ein Zement muss bestimmte Eigenschaften vorweisen, um Verwendung als Bindemittel im Beton zu finden. Ausschlaggebend sind hier in erster Linie die Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Alterungsbeständigkeit. Die Verarbeitbarkeit hängt von den Fließeigenschaften der Mörtelmasse (Zement-Sand-Wassergemisch) ab. Die Qualität des Zements hängt hier unmittelbar mit dem benötigten Wasseranteil (Wasser-Binder-Verhältnis, W/B) zusammen, welcher anhand der sog. Ausbreitungsmethode bestimmt werden kann. Dabei werden drei Mörtel mit verschiedenen Wasseranteilen hergestellt und mittels eines speziellen Zylinders auf eine Glasplatte gegeben. Die Durchmesser der Zementfladen werden gemessen und mit einer linearen Regression gegen den entsprechenden Wasseranteil aufgetragen. Der Wasseranteil, der für einen vorgegebenen Durchmesser benötigt wird, kann somit ermittelt werden. Je niedriger der Wasseranteil, desto positiver fallen die Vorhersagen auf gute Zementeigenschaften aus.

Die Festigkeit wird bestimmt, indem sog. Prismen aus Mörtelmasse hergestellt werden und nach unterschiedlich langen Aushärtungszeiträumen auf Belastbarkeit untersucht werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Geräts, welches den Druck auf die Prismen so lange erhöht, bis diese zerbrechen. Der maximale Druck wird dann als Wert verwendet.

5.2 Proben

Probe Nr.	Brennstoff	Aschenfraktion	Verbrennungsanlage
ESP	Holzhackschnitzel	Flugasche aus elektrostatischem Abscheider	St. Peter (D)
BAG FA1	Holzhackschnitzel	Flugasche aus Gewebefilter (Verbrennung in Wirbelschicht)	Saint-Louis (F)
BAG FA2	Holzhackschnitzel	Flugasche aus Gewebefilter	Rixheim (F)
CYC	Miscanthus + 2 Gew. % Ca(OH) ₂	Flugasche aus Zyklon	Ammertzwiller (F)

Tabelle 17: Übersicht der Ascheproben, die den Zementmischungen beigegeben wurden

Designation.	Combustible	Collection des cendres volantes	Site de combustion
ESP	Plaquettes forestières	Filtre électrostatique	St. Peter (D)
BAG FA1	Plaquettes forestières	Filtre à manche (combustion en lit fluidisé)	Saint-Louis (F)
BAG FA2	Plaquettes forestières	Filtre à manche	Rixheim (F)
CYC	Miscanthus + 2 % massique Ca(OH) ₂	Multicyclone	Ammertzwiller (F)

Tableau 17 : Origine des cendres de biomasse utilisées dans les mélanges de ciment

5 VALORISATION DES CENDRES ISSUES DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE DANS LA PRODUCTION DE CIMENT

5.1 Dispositifs et procédures expérimentaux

Le ciment sert de liant dans le béton, il doit donc avoir des caractéristiques bien définies, qui sont principalement la facilité de mise en œuvre, la stabilité et la résistance au vieillissement. La facilité de mise en œuvre dépend des propriétés d'écoulement du mortier (mélange ciment/sable/eau). La qualité du ciment dépend directement de la teneur en eau (ratio eau-liant, E/L). La qualité est déterminée à l'aide de la méthode dite de « propagation ». Trois types de mortiers avec des teneurs différentes en eau sont fabriqués. Ils sont appliqués sur une plaque en verre à l'aide d'un cylindre formant une galette. La taille des « galettes » de mortier est alors mesurée. La droite qui trace le diamètre de la galette en fonction de la teneur en eau permet de déterminer la teneur en eau d'une galette de ciment pour un diamètre donné. Plus la teneur en eau est faible et meilleure est la qualité du ciment

La stabilité du ciment est testée en fabriquant des prismes de mortier dont la résistance à la compression est analysée après différents temps de prise. Un dispositif augmente la pression sur les prismes jusqu'à ce qu'ils cassent. Cette pression maximale est alors utilisée en tant que valeur caractéristique.

5.2 Échantillons

5.3 Ergebnisse

Um die Eigenschaften der Zementproben in Zusammenhang zu bringen, wurden zu jedem Versuch drei Referenzmischungen hergestellt:

1. Mörtel mit 100 Gew. % Portlandzement (Normo 4 SG) im Zementanteil
2. Mörtel mit 70 Gew. % Portlandzement (Normo 4 SG) und 30 Gew. % Kalksteinpulver im Zementanteil
3. Mörtel mit 70 Gew. % Portlandzement (Normo 4 SG) und 30 Gew. % Flugasche aus Ölschiefer im Zementanteil

Die Mischungen 2 und 3 sind bereits etabliert und weisen gute Eigenschaften auf. Die Aschen aus der Biomasse-Verbrennung (Tabelle 17) wurden jeweils zu 30 Gew. % des Zementanteils mit Portlandzement (Normo 4 SG) gemischt. Für die beiden Aschen aus dem Gewebefilter wurden zudem Mischungen mit jeweils 2.5 und 5 Gew. % hergestellt. Die qualitativen Ergebnisse über die benötigten Wassermengen und die Festigkeitsentwicklung finden sich in Tabelle 18.

Die Mischungen mit 30% Ascheanteil liefern schlechte Ergebnisse für den Wasserbedarf und die Festigkeitsentwicklung bei allen Aschearten, bis auf die Zyklonasche, welche sogar besser abschneidet als die etablierten Vergleichsmischungen mit Ölschiefer-Flugasche und Kalkstein. Deshalb wurden hier auch keine weiteren Mischungen mit 2.5% und 5% hergestellt. Zu den schlechten Eigenschaften der Mischung mit der Elektroabscheiderasche kommen die zu hohen Salzgehalte, weshalb auch hier auf weitere Mischungen verzichtet wurde.

Die Gewebefilterasche aus der Verbrennungsanlage mit Wirbelschicht zeigt bei 30% Anteil befriedigende Ergebnisse bei Wasserbedarf und Festigkeitsentwicklung. Bei geringeren Mischungsverhältnissen übertreffen die Eigenschaften diejenigen der herkömmlichen Ersatzstoffe, ähnlich den Ergebnissen der Zyklonasche. Dieses Verhalten konnte auch bei der Gewebefilterasche aus der Verbrennung ohne Wirbelschicht beobachtet werden.

Die Eignung der Asche als Ersatzmaterial für Zement scheint u. a. davon abzuhängen, ob dem Brennstoff Kalk (Wirbelschicht) oder Kalziumhydroxid (Miscanthus) zugegeben wurde und welche Rauchgasabscheidetechnik verwendet wurde.

5.3 Résultats

Trois mortiers de référence sont préparés et testés pour obtenir un point de comparaison :

1. Mortier constitué de 100% massique de ciment Portland (Normo 4 SG)
2. Mortier constitué de ciment Portland (Normo 4 SG) et de calcaire pulvérisé dans la fraction de ciment en proportion massique 70/30
3. Mortier constitué de ciment Portland (Normo 4 SG) et de cendres volantes de schiste bitumineux dans la fraction de ciment en proportion 70/30.

Les mélanges 2 et 3 présentent de bonnes caractéristiques. Les cendres de la combustion de biomasse (tableau 17) ont été mélangées avec du ciment Portland (Normo 4 SG) également en proportion massique 70/30. A partir de deux échantillons de cendres collectés avec le filtre à manche, d'autres mélanges à 2.5 et 5% massiques ont été fabriqués. Les résultats qualitatifs sur la fraction d'eau et le développement de la résistance sont présentés dans le tableau 18.

Les mélanges contenant 30% de cendres donnent des mauvais résultats sur la teneur en eau et la résistance mécanique sauf à partir des cendres du multicyclone d'Ammertzwiller (Miscanthus). Comparativement, ce mélange donne même de meilleurs résultats que pour les échantillons 2 et 3. Il n'a pas été nécessaire de préparer de nouveaux mélanges contenant 2.5 et 5% de ces cendres avec le ciment. L'ajout au ciment de cendres issues du filtre électrostatique donne de mauvais résultats car ces cendres sont très riches en sels. L'utilisation de ces cendres n'a pas été poursuivie.

L'utilisation des cendres de la centrale thermique de Saint-Louis en proportion de 30% en masse donne des résultats satisfaisants pour les deux paramètres étudiés. L'abaissement des teneurs à 5 et 2.5% dépassent les propriétés des références 2 et 3. Cette observation est également vraie lors de l'utilisation des cendres de filtres à manches de l'installation de Rixheim.

Il est à noter que deux échantillons sont riches en calcium : il s'agit des cendres issues de la centrale d'Ammertzwiller car, au combustible, est ajoutée de la chaux et de la référence 2 dont les cendres sont issues d'un traitement de fumées utilisant du calcaire. La présence de calcaire dans les cendres va permettre d'obtenir un ciment possédant les propriétés requises.



	Wasserverbrauch (W/B Verhältnis)	Festigkeit nach 1 Tag	Festigkeit nach 2 Tagen	Festigkeit nach 28 Tagen
Referenz 1	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT
Referenz 2	SEHR GUT	GUT	GUT	GUT
Referenz 3	SEHR GUT	GUT	GUT	GUT
ESP (30%)	SEHR SCHLECHT	SEHR SCHLECHT	SCHLECHT	SCHLECHT
BAG FA1 (2,5%)	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT
BAG FA1 (5%)	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT
BAG FA1 (30%)	BEFRIEDIGEND	BEFRIEDIGEND	GUT	BEFRIEDIGEND
BAG FA2 (2,5%)	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT
BAG FA2 (5%)	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT
BAG FA2 (30%)	SEHR SCHLECHT	SEHR SCHLECHT	SEHR SCHLECHT	SCHLECHT
CYC (30%)	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT	SEHR GUT

Tabelle 18: Qualitative Auswertung der Eigenschaften der Zementmischungen

	Teneur d'eau (rapport E/B)	Résistance mécanique après 1 jour	Résistance mécanique après 2 jours	Résistance mécanique après 28 jours
Référence 1	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN
Référence 2	TRÈS BIEN	BIEN	BIEN	BIEN
Référence 3	TRÈS BIEN	BIEN	BIEN	BIEN
ESP (30%)	TRÈS MAUVAIS	TRÈS MAUVAIS	MAUVAIS	MAUVAIS
BAG FA1 (2,5%)	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN
BAG FA1 (5%)	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN
BAG FA1 (30%)	Satisfaisant	Satisfaisant	BIEN	Satisfaisant
BAG FA2 (2,5%)	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN
BAG FA2 (5%)	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN
BAG FA2 (30%)	TRÈS MAUVAIS	TRÈS MAUVAIS	TRÈS MAUVAIS	MAUVAIS
CYC (30%)	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN	TRÈS BIEN

Tableau 18 : Evaluation qualitative des propriétés des différents mélanges de ciment

Da es sich bei der Zyklonasche um einen anderen Brennstoff als bei den anderen Aschen handelt, sind die Ergebnisse hier nicht unmittelbar auf die Strategie der Rauchgasreinigung, also des Filtertyps zurückzuführen, dennoch wird hier ein Zusammenhang vermutet.

Nachfolgende rasterelektronen-mikroskopische Aufnahmen sollen zeigen, dass auch Zyklonasche aus reinen Holzhackschnitzeln ein großes Eignungspotenzial verspricht (Abb. 29).

Morphologisch gesehen würde sich die Zyklonasche aus Holz-Verbrennung in einem ähnlich guten Maße eignen wie die Flugasche aus Kohle-Verbrennung, welche bereits erfolgreich verwendet wird. Versuche mit dieser Asche sind zurzeit in Arbeit.

Si l'utilisation des cendres récupérées dans le cyclone permet d'obtenir un ciment ayant les propriétés requises, il n'est pas possible de relier ce résultat à la technique d'épuration des fumées car dans ce cas, la nature du combustible est différente. On peut faire l'hypothèse qu'il y a une relation de cause à effet.

Des images en microscopie électronique MEB ont été faites pour estimer le potentiel de cendres de cyclone de la combustion de plaquettes de bois (Fig. 29).

Les clichés A, B et C montrent que la morphologie des cendres issues de la combustion du bois et piégées dans un cyclone est très proche de la morphologie de cendres issues de la combustion de charbon. Sachant que les cendres de charbon donnent de bons résultats dans la préparation de ciment, l'utilisation de cendres de cyclone issues de la combustion du bois devrait aboutir aussi à des résultats concluants. Ce travail est en cours.

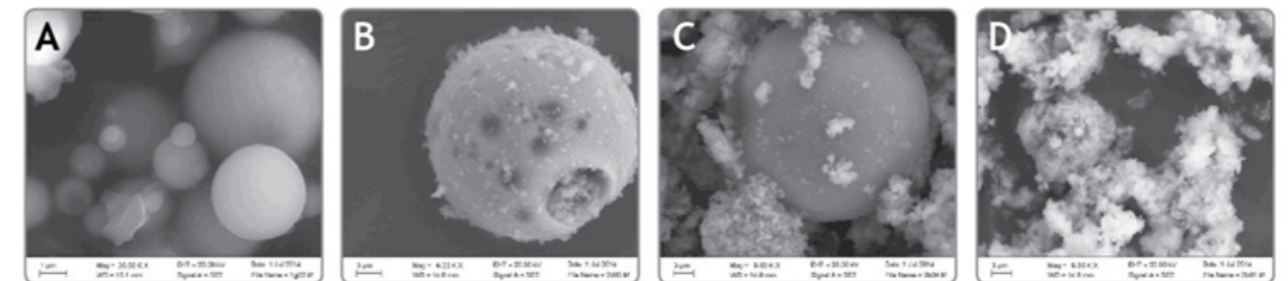


Abbildung 29: Rasterelektronen-mikroskopische Aufnahme von Flugaschepartikeln.

- A: Zyklonasche aus Kohle-Verbrennung;
- B: Zyklonasche aus Holz-Verbrennung (Ammertzwiler, F);
- C: Asche aus Zyklon- und elektrostatischem Abscheider (Vauban, D);
- D: Flugasche aus elektrostatischem Abscheider (St. Peter, D)

Figure 29 : Clichés MEB de particules de cendres volantes.
A : cendres issues de cyclone de la combustion de charbon,
B : cendres issues de cyclone de la combustion de bois (Ammertzwiler, F),
C : cendres issues de cyclone et électrofiltre (Vauban, D);
D : cendres volantes issues d'un électrofiltre (St. Peter, D)

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT COMMUNICATION



6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Die Vermittlung von Informationen und Wissen über die gesundheitlichen Aspekte der energetischen Biomassennutzung ist primäres Ziel der BIOCOMBUST Öffentlichkeitsarbeit. Um verschiedene Bevölkerungsgruppen für die Thematik zu sensibilisieren und über die Forschungsarbeit des Projekts aufzuklären, wurden unterschiedlichste Instrumente und Informationskanäle eingesetzt. Durch die Nutzung dieser verschiedenartigen Medienformen und die Entwicklung einer großen Auswahl von Materialien konnten die Inhalte des Projekts zielgerichtet und effizient kommuniziert werden.

6.1 Instrumente der Öffentlichkeitsarbeit

Für das BIOCOMBUST-Projekt wurde mit der Entwicklung eines Corporate Designs und dem Schutz der Wort-Bildmarke „BIOCOMBUST: biomass, energy, health“ beim Deutschen Patent- und Markenamt eine sichere und gute Ausgangslage für eine einheitliche Kommunikation geschaffen. Auf allen Kommunikationsträgern sind neben dem BIOCOMBUST-Projektlogo auch die EU-Flagge und das INTERREG IV Logo zu sehen.



Abbildung 30: Website BIOCOMBUST

6 COMMUNICATION

La transmission d'informations et de connaissances concernant les aspects de santé de l'utilisation énergétique de la biomasse constitue le principal objectif du travail de la communication de BIOCOMBUST. Afin de sensibiliser et d'informer différents groupes de populations sur les travaux de recherche du projet, différents instruments et voies d'informations ont été utilisés. A travers l'utilisation de différentes formes de média et le développement d'un large éventail d'outils, les contenus du projet ont pu être communiqués de manière efficace et précise.

6.1 Outils de communication

Le développement d'une charte graphique et le dépôt de du nom et du visuel du projet « BIOCOMBUST : biomass, energy, health » auprès du Deutsche Patent- und Markenamt a été le socle d'une communication cohérente. Le logo du projet BIOCOMBUST, le drapeau de l'UE et le logo INTERREG IV figurent sur tous les supports de communication du projet.

Unter www.biocombust.eu ist die dreisprachige Projektwebsite (deutsch-französisch-englisch) abrufbar (Abb. 30). Sie stellt das Projekt, seine Forschungsthemen und Ziele sowie die beteiligten Projektpartner vor. Darüber hinaus liefert sie einen Veranstaltungskalender inklusive Veranstaltungsarchiv, informiert über BIOCOMBUST - Publikationen und bietet einen Downloadbereich.

Der Downloadbereich enthält neben der Pressemappe auch die für das Projekt erstellten Kommunikationsmittel in Form von Flyern und Postern. Er bietet darüber hinaus Links zu Netzwerkpartnern (INTERREG, EUCOR, OUI Biomasse, TRION) sowie eine Auswahl von Ratgebern zum richtigen Heizen mit Holz. Nach google analytics verzeichnet die Website mehr als 49.000 Besucher, Stand 31. März 2015.

Über einen Link kann man sich in die BIOCOMBUST-Mailingliste eintragen. Hier sind Anfragen über ein Kontaktformular möglich, die an die jeweils zuständigen Projektpartner weitergeleitet werden. Zusätzlich stellt sich das Projekt in verschiedenen sozialen Netzwerken dar (LinkedIn, Facebook, YouTube).

La page web du projet, accessible sur le lien www.biocombust.eu (allemand-français-anglais), présente le projet, ses thèmes de recherche ainsi que les objectifs des différents partenaires du projet (Fig. 30). En outre elle fournit le calendrier des manifestations avec leurs archives et informe sur les publications BIOCOMBUST avec des fichiers à télécharger.

L'espace de téléchargement contient un dossier de presse ainsi que les outils de communication créés durant le projet sous forme de flyers et de posters. Il propose également des liens vers des partenaires (INTERREG, EUCOR, OUI Biomasse, TRION) ainsi qu'un choix de guide de bonne conduite pour le chauffage au bois. La page web a enregistré plus de 49 000 visiteurs selon google analytics, le 31 Mars 2015.

On peut s'inscrire sur une liste mail BIOCOMBUST à l'aide d'un lien. Des demandes à l'aide d'un formulaire de contact peuvent être postées et envoyées aux différents partenaires du projet. De plus, le projet est présent sur différents réseaux sociaux (Linked-in, Facebook, YouTube).



Abbildung 31: Facebook Seite des Projekts

Das Facebook-Profil des Projekts enthält einen „Science Blog“, der aktuelle Informationen zu projektspezifischen Inhalten aufbereitet. Im Gegensatz zu Fachpublikationen oder der zusammenfassenden Beschreibung der Projektinhalte auf der Website werden hier gezielt einzelne Ausschnitte der Projektarbeit beleuchtet, wie z.B. die Sammlung von Partikeln in der Umgebungsluft oder die mikroskopische Analyse von Aschen. Diese exemplarische

Le profil Facebook du projet contient un „Blog Scientifique“ avec des actualités sur des contenus spécifiques au projet. Contrairement aux publications spécifiques ou dans le résumé du projet de la page web, les parties du projet sont présentées de façon ciblée, comme par exemple la collecte des particules dans l'air ambiant ou l'analyse microscopique des cendres. Ces informations sont présentées de manière attraktive et

Darstellung in Form von kleinen Informationshäppchen ist graphisch ansprechend aufbereitet und enthält Fotos der Projektmitarbeiter. Hierdurch wird ein unmittelbarer und erfahrungsbasierter Zugriff auf die Projektarbeit ermöglicht, eben „Wissenschaft hautnah“ (vgl. Abschnitt 6.2).

Neben dem „Science Blog“ enthalten die Facebook-Einträge auch kleine Begebenheiten aus dem Alltag der Teams, tagesaktuelle Meldungen zu den Themen des Projektes und sind buntgemischt mit Verweisen auf andere Webseiten oder Filme, die projektverwandte Inhalte zeigen. Hierdurch wird die Öffentlichkeit über das direkte Projekt hinausgehend für das Thema Biomasse-Verbrennung sensibilisiert.

Die Facebook-Seite hat ca. 40 registrierte Follower, doch auch nicht-registrierten Personen ist ein Lesezugriff auf die Seite möglich. Da Facebook keine nutzerfreundliche Funktionalität zur Zweisprachigkeit bietet, wurde stattdessen Englisch als gemeinsame Sprache gewählt, die zudem die Option eröffnet, weitere interessierte Personenkreise zu erreichen, die weder Deutsch noch Französisch verstehen.

Presse und TV

Beim Kontaktaufbau mit der Presse auf deutscher und französischer Seite des Rheines profitierte das Projekt besonders von den Netzwerken der Pressestelle der Universität Freiburg und der Öffentlichkeitsarbeit der ASPA. Für die Pressearbeit wurde der Presseverteiler beider Institutionen genutzt.

Auf der Projektwebsite stehen vielfältige Informationen für die Presse zur Verfügung, so z.B. Flyer, Broschüren, Poster, wissenschaftliche Publikationen.

Das Projekt und seine Ziele wurden in Presseartikeln, in Interviews sowohl bei (regionalen) Radio-Sendern als auch bei TV-Sendern präsentiert. Das entstandene Pressecho ist auf der Website abrufbar: <http://www.biocombust.eu/press-and-media>.

6.2 Das Kommunikationskonzept „Wissenschaft hautnah“

Die Öffentlichkeitsarbeit des Projekts nutzte nicht nur die traditionellen Wege der Public Relations (Pressearbeit, Website, Flyer), sondern entwickelte darüber hinaus ein speziell auf das Projekt BIOCOMBUST ausgerichtetes Kommunikationskonzept - „Wissenschaft hautnah“.

Hintergrund dieses Kommunikationskonzepts ist, dass wissenschaftliche Forschung viel Zeit in Anspruch nimmt und ihre Ergebnisse nicht im Halbjahrestakt

contiennent des photos des membres du projet. Ceci permet un accès aux travaux du projet facile et basé sur l'expérience, « la science vécue de près » en quelque sorte (voir paragraphe 6.2).

Outre le „Blog Scientifique“, la page Facebook contient également des petits événements concernant le quotidien de l'équipe, des messages en direct concernant les sujets du projet et des renvois vers d'autres sites web ou des films qui présentent des contenus proches du projet. Ainsi, le grand public est sensibilisé sur le thème de la combustion de biomasse au-delà du projet.

La page Facebook a environ 40 fans enregistrés, mais des personnes non enregistrées peuvent consulter les pages. Puisque Facebook ne dispose pas d'une fonctionnalité bilingue agréable pour l'utilisateur, l'anglais a été choisi comme langue commune. Ceci permet également d'atteindre d'autres personnes intéressées qui ne comprennent ni l'allemand, ni le français.

Presse et TV

Pour établir un contact avec la presse de part et d'autres du Rhin, le projet a profité des réseaux du service de presse de l'Université de Freiburg ainsi que du travail de communication de l'ASPA. Les listes de diffusion des deux institutions ont été utilisées pour le travail au contact de la presse.

De nombreuses informations à destination de la presse régionale sont disponibles sur le site sous formes variées (flyers, brochures, posters, publications scientifiques).

Le projet et ses objectifs ont été présentés dans des articles de presse, des interviews auprès des radios (régionales) et de chaînes de télévision. Le dossier de presse est disponible sur le site web : <http://www.biocombust.eu/press-and-media>.

6.2 Concept de communication „la science vécue de près“

Le travail de communication du projet n'utilise pas uniquement les chemins traditionnels de la communication (presse, pages web, flyer), mais a également développé un concept de communication spécifique au projet BIOCOMBUST : „La science vécue de près“.

La toile de fond de ce concept est que la recherche scientifique nécessite beaucoup de temps et que ses

veröffentlicht werden können. Um dennoch bereits ab Projektbeginn zielgerichtet kommunizieren zu können und die Öffentlichkeit für das Thema Biomasse-Verbrennung zu interessieren und zu sensibilisieren, bietet „Wissenschaft hautnah“ einen Blick hinter die Kulissen des Forschungsalltags und beleuchtet alltägliche Arbeiten innerhalb des Wissenschaftsbetriebs.

Man entdeckt wissenschaftliche Geräte, Instrumente und Arbeitsmethoden und eine Vielzahl interessanter Persönlichkeiten mit einer Faszination für wissenschaftliche Fragestellungen.

BIOCOMBUST hat sich im Rahmen von „Wissenschaft hautnah“ auf Veranstaltungen präsentiert, für die eigens Poster gestaltet wurden. Außerdem wurde eine umfassende virtuelle Plattform entwickelt, die das Kommunikationskonzept online umsetzt. Das Konzept „Wissenschaft hautnah“ hat somit verschiedene Medien und Veranstaltungsformen genutzt, um die Bevölkerung auf beiden Seiten des Rheins zu informieren und die Menschen in persönlichen Austausch zu bringen - getreu dem Motto „Der Oberrhein wächst zusammen, mit jedem Projekt“.

résultats ne sont pas publiables en six mois. Pour pouvoir communiquer dès le début du projet de façon ciblée à destination du grand public, en le sensibilisant au thème de la combustion de biomasse, la « science vécue de près » a permis de montrer les coulisses du projet et a mis le focus sur les travaux de recherche au quotidien et sur son fonctionnement.

On découvre des appareils scientifiques, des instruments et des méthodes de travail ainsi que plusieurs personnalités intéressantes qui ont partagé leur enthousiasme pour des questions scientifiques.

BIOCOMBUST s'est présenté dans le cadre de „la Science vécue de près“ à l'occasion de manifestations au travers des posters spécialement conçus à cet effet. Une plateforme virtuelle a également été créée pour mettre ce concept de communication en ligne. Ainsi le concept « la Science vécue de près » dispose de différents médias et de formes de manifestations pour informer la population de part et d'autre du Rhin afin d'amener le public à un échange en écho du slogan « dépasser les frontières : projet après projet ».



Abbildung 32: Stempel „Wissenschaft hautnah“
Figure 32 : Tampon „La science vécue de près“

Ein zusätzliches visuelles Erkennungsmerkmal, ein orangener „Wissenschaft hautnah“-Stempel markiert alle Kommunikationsmaterialien dieser Reihe, die die wissenschaftliche Forschung in einen besonders lebendigen und erfahrbaren Kontext stellen (Abb. 32).

6.2.1 „Wissenschaft hautnah“: Poster

Als Informationsträger für Veranstaltungen wurden die im Projekt bearbeiteten Themen öffentlichkeitswirksam und leicht verständlich aufbereitet und auf Postern dargestellt:

De plus, un signe distinctif visuel, un tampon orange « la science vécue de près » marque tous les supports de communication de cette série qui met la recherche scientifique en scène de façon vivante et compréhensible (Fig. 32).

6.2.1 „La science vécue de près“: Posters

Afin de disposer d'un support de communication pour des manifestations, les thèmes abordés dans le projet à destination du Grand public ont été représentés sur des posters de manière facilement compréhensible :

1. MESSEN / Biomasse-Verbrennungsanlage unter Beobachtung
2. SAMMELN / Partikel für die Forschung
3. ANALYSIEREN / Staubpartikel unter dem Mikroskop
4. AUSWERTEN / Von Partikeln und Zellen

Die Poster dokumentieren an erster Stelle in einer Fotoreihe verschiedene Arbeitsabläufe von Projektmitarbeitern, wodurch ein niedrigschwelliger und unmittelbarer Zugang zur Forschungsarbeit ermöglicht wird. Ein Zitat in einer Sprechblase liefert darüber hinaus eine persönliche Aussage einer beteiligten Person über ihre Forschungsarbeit und spricht die Leser auf diese Weise direkt an. Als drittes Gestaltungselement zeigt jedes Poster eine Graphik, die einen wissenschaftlichen Aspekt erläutert, der direkt mit dem Thema des Posters zusammenhängt. Hier wird sowohl technisches, medizinisches oder chemisches Wissen allgemein verständlich vermittelt - eingebettet in den konkreten Projektzusammenhang (Abb. 33).

1. MESURER / installation de combustion de biomasse sous surveillance
2. COLLECTER / particules pour la recherche
3. ANALYSER / particules de poussière sous le microscope
4. EXPLOITER / des particules et des cellules

En premier lieu, ces posters présentent une série de photos de différents processus de travail des participants du projet. Ceci permet un accès simple et direct aux travaux de recherche. Une citation dans une bulle donne par ailleurs un témoignage personnel de la personne impliquée concernant son travail de recherche et interpelle ainsi directement le lecteur. Un troisième élément montre sur chaque poster un graphique, qui illustre un aspect scientifique directement lié au thème du poster. Les connaissances techniques, médicales ou chimiques sont enseignées de manière aisément accessibles - tout en étant intégrées dans le cadre concret du projet (Fig. 33).



Abbildung 33: Poster „Wissenschaft hautnah“: SAMMELN
Figure 33 : Poster „Science vécue de près“: COLLECTER

6.2.2 “Wissenschaft hautnah”: Der BIOCOMBUST-Stand

Der BIOCOMBUST-Stand (Abb. 34) wurde während der Projektlaufzeit auf ca. 10 Veranstaltungen präsentiert, z.B. auf Wissenschaftsmärkten oder dem Europa-Tag sowie bei Veranstaltungen von Netzwerkpartnern, z.B. Konferenzen oder Expertenmeetings. Das Thema des Standes war bereits von weitem erkennbar - ein auf einem großen Bildschirm dargestelltes Kamin- bzw. Lagerfeuer. Der Stand bot die Möglichkeit, die untersuchten Brennstoffmaterialien wie Holzhackschnitzel, Pellets oder Miscanthus in die Hand zu nehmen und zu „begreifen“ und hat die bei der Verbrennung entstehenden unterschiedlichen Aschen in Laborgläsern ausgestellt. Diese Ausstattung des Standes hat Besucher angezogen, die sich mittels der „Wissenschaft hautnah“-Poster weiter informieren konnten und mit den Standbetreuern ins Gespräch kamen. Ein Biomasse-Quiz diente als weiterer Anziehungspunkt für Interessierte, die sich dadurch aktiver mit den Projektthemen beschäftigen konnten. Auch Projektflyer und weitere Hintergrundinformationen standen für jedermann zugänglich bereit und fanden breiten Anklang.

6.2.2 “La science vécue de près”: Le stand BIOCOMBUST

Durant la durée du projet, un stand BIOCOMBUST (Fig. 34) a été présenté lors d’une dizaine de manifestations : des expositions scientifiques, la Journée de l’Europe, des manifestations organisées par le réseau de partenaires (conférences et réunions d’experts). Le thème du stand était déjà identifiable de loin - un grand feu de cheminée ou de camp sur un grand écran. Le stand donnait la possibilité de toucher et de découvrir des matériaux de combustion comme les copeaux de bois, les pellets et le miscanthus. Les cendres issues des différentes combustions étaient présentées dans de la verrerie de laboratoire. Cet aménagement du stand attirait les visiteurs, leur donnait la possibilité de s’informer à l’aide des posters « La science vécue de près » et de discuter avec les personnes animant le stand. Un quizz concernant la nature de la biomasse et sa combustion constituait un autre pôle d’attraction pour les personnes intéressées qui ont pu aborder activement les thèmes du projet. D’autres documents concernant le projet ainsi que d’autres informations plus approfondies ont également été mis à la disposition de chacun et ont été plébiscités.



Abbildung 34: BIOCOMBUST Stand auf Dialog Science Auftaktveranstaltung, 2013

Figure 34 : Stand BIOCOMBUST sur la conférence de lancement “Dialog Science”, 2013

6.2.3 Virtuelle Plattform “backstage”

Die virtuelle Plattform „backstage“ ermöglicht einen Blick hinter die Kulissen des grenzüberschreitenden Projekts BIOCOMBUST. Sie enthält gut 30 eigens produzierte zweisprachige Kurzfilme, die in verschiedenen Modulen angeordnet sind (Abb. 35). In den Kurzfilmen erläutern die Projektmitarbeiter, mit welchen Methoden sie die Gesundheitlichen Aspekte der energetischen Biomassenutzung untersuchen. Zusätzlich wurden Experten interviewt, die weitere Hintergrundinformationen rund ums Thema Biomasse-Verbrennung diskutieren.

6.2.3 Plate-forme virtuelle “backstage”

La plateforme virtuelle „backstage“ a permis un regard derrière les coulisses du projet de recherche transfrontalier BIOCOMBUST. Elle contient une trentaine de courts métrages spécialement conçus et classés dans différents « modules » (Fig. 35). Les partenaires du projet expliquent dans ces courts métrages leurs méthodes pour étudier les particules issues de l’utilisation énergétique de la biomasse et les aspects sanitaires associés. En plus, des experts régionaux ont été interviewés pour fournir des informations complémentaires sur le thème de la combustion de la biomasse.

Module der Plattform „backstage“:

- Energie aus Biomasse : Holzproduktion und -verwertung, Vor- und Nachteile der energetischen Nutzung von Biomasse
- Biomasse-Verbrennung : Verbrennungsanlagen und unterschiedliche Brennstoffe
- Was sind Partikel? : Ursprung und Größe von Partikeln, Analyse von Aschen und Partikeln
- Luftqualität : Sammlung und Messung von Partikeln, Quellen von Feinstaub
- Partikel & Gesundheit : Einfluss von Partikeln auf die menschliche Gesundheit und seine Erforschung
- Zement : Herstellung, Einfluss auf die Umwelt, Klinkerersatzstoffe
- Das Team : Portraits der am Projekt beteiligten Wissenschaftler

« Modules » de la plateforme „backstage“:

- Usage énergétique de la biomasse: production et utilisation du bois, avantages et inconvénients de l'utilisation énergétique de la biomasse
- Combustion de la biomasse : installations de combustion et différents combustibles
- Particules : qu'est-ce qu'une particule? Origine et taille des particules, analyse des cendres et des particules
- Qualité de l'air : collecte et mesure des particules, sources de particules fines
- La santé humaine : influence des particules sur la santé humaine et recherche la concernant
- Ciment : fabrication, influence sur l'environnement, Alternative pour la fabrication du Clinker
- L'équipe : portraits des scientifiques participant au projet

Die Plattform ist übersichtlich in drei Spalten angelegt. Links findet sich die Navigationsleiste, die einen direkten Zugriff auf die einzelnen Module ermöglicht. Die mittlere Spalte enthält kurze Texte, die das Thema des jeweiligen Moduls einführen, sowie weiterführende Links zu interessanten Hintergrundinformationen oder weiteren

La plateforme est clairement organisée en trois parties : à gauche, le menu avec un accès direct sur les différents « modules »; au centre, des textes introductifs du thème de chaque module ainsi que des liens vers

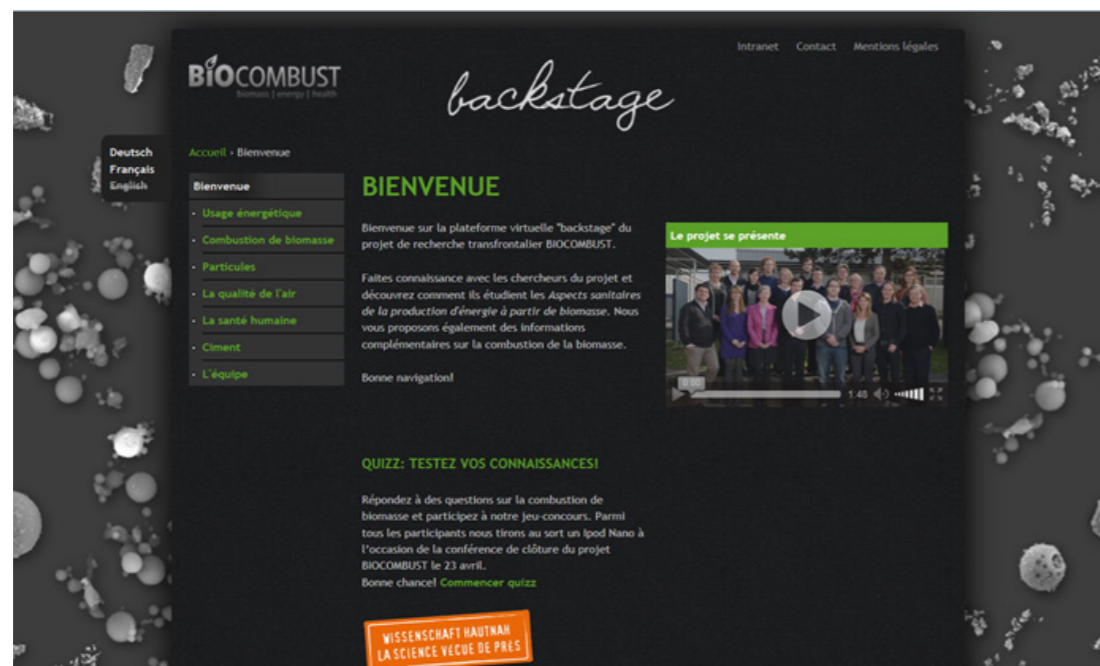


Abbildung 35: Startseite der virtuellen Plattform, französische Version

Figure 35 : Page d'accueil de la plateforme virtuelle, version française

multimedialen Inhalten. In der rechten Spalte sind die Kurzfilme eingestellt, die mit Titel und einer kurzen Inhaltsangabe versehen sind. Die Hypertextstruktur der Plattform ermöglicht einen interesegeleiteten, nicht-sequenziellen Zugriff auf die Inhalte. Hierdurch können sich die Besucher gezielt und schnell zu einzelnen Themen informieren. Die gebündelte Darstellung vieler Facetten der Forschungsarbeit des Projekts und die lebendige und abwechslungsreiche Gestaltung der Filme laden aber auch zum weiteren Stöbern auf der Plattform ein.

Um eine noch intensivere Beschäftigung mit der Thematik zu fördern, wurde außerdem ein Online-Quiz entwickelt, das den Besuchern die Möglichkeit bietet, ihr Wissen in einer aktiven und spielerischen Form zu überprüfen.

Ein besonders zu erwähnender Kurzfilm ist das Portrait „BIOCOMBUST: Wrap-Up!“. Dieser Film stellt die grenzüberschreitende interdisziplinäre Zusammenarbeit innerhalb des Forschungsprojekts und ihren besonderen Reiz für die beteiligten Wissenschaftler dar. Dieser Kurzfilm wurde auf zwei Filmfestivals eingereicht, dem „fast-forward-science“ im Oktober 2014, das von „Wissenschaft im Dialog“ für Filme im der Wissenschaftskommunikation ausgelobt wurde und im November 2014 bei „Greenstorming for renewable energies“ vom Zentrum für Erneuerbare Energien der Universität Freiburg. Hierdurch konnte das Projekt einem noch weiteren Personenkreis bekannt gemacht werden.

d'autres informations intéressantes ou d'autres contenus multimédias; enfin à droite, les courts-métrages avec leur titre et un résumé sommaire. La structure hypertexte de la plateforme permet un accès non-séquentiel en fonction des centres d'intérêt. Ainsi les visiteurs peuvent s'informer sur les différents thèmes rapidement et de façon ciblée. La présentation concentre les différentes facettes du travail de recherche du projet. La diversité des films invite également à fouiller d'avantage sur la plateforme.

Un quizz en ligne a été développé pour encourager une réflexion plus poussée sur la thématique et permettre aux internautes de tester leur connaissance de manière active et ludique.

Il faut mentionner particulièrement le court-métrage de communication „BIOCOMBUST : Wrap-Up !“. Ce film met le focus sur le travail interdisciplinaire et transfrontalier du projet de recherche ainsi que sur les scientifiques qui y participent. Ce court-métrage a été présenté à deux festivals. En octobre 2014, le « fast-forward-science » lui a décerné les félicitations du « Wissenschaft im Dialog » des films de communication scientifique. En novembre 2014 il a également été présenté au « Greenstorming for renewable energies » du Centre pour les énergies renouvelable de l'Université de Fribourg. Ainsi un public plus large a pu prendre connaissance du projet.

6.3 Veranstaltungen

6.3.1 Veranstaltungen im Rahmen von „Wissenschaft hautnah“

Einer breiten Öffentlichkeit hat sich das Projekt insbesondere durch seine Teilnahme auf Wissenschaftsmärkten vorgestellt (Freiburg 2013, Fête de la Science 2013 in Mulhouse und 2014 in Colmar; Abb. 36). Bei den vielen intensiven Gesprächen mit den Besuchern wurde deutlich, dass das Thema Biomasse-Verbrennung und seine gesundheitlichen Auswirkungen von hoher Relevanz für die Bevölkerung am Oberrhein ist und ein starkes Interesse daran besteht. Als Gewinn des Biomasse-Quiz auf dem Wissenschaftsmarkt der Universität Freiburg wurde eine Führung durch die Labore der Geochemie angeboten. Bei dieser Gelegenheit konnten Bürger Einblicke in die ansonsten für die Öffentlichkeit nicht zugänglichen Forschungseinrichtungen gewinnen.

6.3 Manifestations

6.3.1 Manifestations dans le cadre de „La science vécue de près“

Le projet a été présenté au Grand public grâce à la participation à différentes expositions scientifiques (Freiburg 2013, Fête de la Science 2013 à Mulhouse et 2014 à Colmar; Fig. 36). Lors d'échanges poussés avec les visiteurs, il s'est avéré que le thème de la combustion de la biomasse, de ses effets sur la santé et sur l'environnement sont des sujets importants pour la population du Rhin supérieur qui suscitent de l'intérêt. Le prix du quizz biomasse lors du « Wissenschaftsmarkt » était une visite des laboratoires de géochimie de l'université de Fribourg. A cette occasion, les citoyens ont eu l'occasion de découvrir des installations de recherche qui habituellement ne sont pas accessibles au grand public.



Abbildung 36: Stand Fête de la Science, Mulhouse 2013

Figure 36 : Stand Fête de la Science, Mulhouse 2013



Abbildung 37: Kinder-Uni "Wie klein ist klein"

Figure 37 : Université pour enfants "C'est comment petit?"



Kinder im Alter zwischen acht und zwölf Jahren wurden im Rahmen der Science Days 2014 im Europapark Rust über Biomasse-Verbrennung informiert. Als besonderes Highlight konnte das mobile Labor zur Messung der Luftqualität der ASPA besichtigt werden. Die gleiche Altersgruppe wurde auch durch eine Veranstaltung im Rahmen der „Kinder-Uni“ der Badischen Zeitung angesprochen, auf der Professor Gieré einen Vortrag zum Thema „Wie klein ist klein - was so alles durch die Luft schwirrt“ vor 40 begeisterten Kindern gehalten hat (Abb. 37).

Am internationalen Europatag 2014 standen Mitarbeiter des Projektes in der Freiburger Innenstadt Rede und Antwort zu ihrer Forschung.

Les enfants âgés de huit à douze ans ont été sensibilisés sur le projet et la combustion de biomasse dans le cadre du „Science Days 2014“ à Europapark Rust. Le point fort a été la visite du laboratoire mobile de l'ASPA. La même classe d'âge a été interpellée dans le cadre de la « Kinder-Uni » (université pour enfants) du journal « Badische Zeitung » où le Professeur Gieré a fait un exposé devant 40 enfants passionnés sur le thème « C'est comment petit ? Tout ce qui bourdonne dans l'air » (Fig. 37).

A l'occasion de la Journée de l'Europe 2014 les partenaires du projet ont répondu aux questions des passants au centre-ville de Fribourg.

6.3.2 Veranstaltungen mit projektspezifischen Zielgruppen

Das Projekt hat sich von Anfang an bei verschiedenen Netzwerkpartnern vorgestellt und hierdurch die Basis für einen fachlichen Austausch untereinander gelegt (Deutsch-französisch-schweizerische Oberrheinkonferenz: Expertenausschuss Luftreinhaltung, Projekttreffen OUI Biomasse, Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles (SPPPI), TRION, TMO Säulen der Wissenschaft). Ebenso war das Projekt auf Veranstaltungen der ASPA präsent (Mini-Konferenz „Luftqualität am Oberrhein - 20 Jahre grenzüberschreitende Zusammenarbeit und Tag der offenen Tür).

Studierende wurden auf unterschiedliche Weise über das Projekt informiert. Zum einen wurden Vorträge gehalten (LERU Bright Konferenz, EUCOR Summerschool, Freiburg Seminar), zum anderen wurden Studierende im Rahmen von Lehrveranstaltungen mit dem Thema befasst. So haben 30 Studierende der Geowissenschaften der Universität Freiburg an einer Besichtigung eines Holz-Blockheizkraftwerks in Freiburg und einer Führung mit anschließender eigener Mikroskopier-Arbeit durch die Labore der Geochemie teilgenommen. Weitere Studierende waren intensiv an der Konzeptionierung und Betreuung des Standes auf den Science Days 2014 beteiligt.

Unter dem Titel „Biomasse-Verbrennung: Erste Ergebnisse des grenzüberschreitenden Projekts BIOCOMBUST“ hat das Projekt im November 2014 eine halbtägige Konferenz in Freiburg abgehalten. Die integrierte Postersession bot Möglichkeit zu intensivem Austausch zwischen Wissenschaftlern, Netzwerkpartnern und der Presse.

Die wissenschaftliche Fachwelt, Forschungszentren und (Umwelt)Institute wurden mittels wissenschaftlicher Veröffentlichungen und durch die Teilnahme von Projektmitarbeitern auf einer Vielzahl von nationalen und internationalen Konferenzen über das Projekt und die Resultate informiert (DMG Tagung 2013, DUST 2014, Goldschmidt 2013 und 2014, Nanotox 2014)

Energieerzeuger, Vertreter der Landwirtschaft und der Zementindustrie haben unter anderem über den Projektverteiler, der circa 400 Personen-Einträge beinhaltet, und durch die Teilnahme an Veranstaltungen Zugang zu relevanten Forschungsthemen erhalten. Zu erwähnen sind u.a. Badenova, Holcim und die Kraftwerksbetreiber der beprobten Anlagen in Mulhouse Agglomération Alsace (Anlagen in Illberg und Rixheim), Société Colmarienne de Chauffage Urbain (Anlage in

6.3.2 Manifestations avec des groupes-cibles spécifiques au projet

Dès le début, le projet a été présenté au réseau des partenaires et a jeté les bases d'un échange professionnel entre eux (Conférence franco-germano-suisse du Rhin Supérieur : groupe expert «qualité de l'air », réunion projet OUI Biomasse, Secrétariat Permanent pour la Prévention des Pollutions Industrielles (SPPPI) ; TRION, TMO Säulen der Wissenschaft). Le projet a été présenté (avec d'autres projets INTERREG) lors d'une miniconférence sur la passerelle du jardin des deux rives sur le Rhin à Strasbourg / Kehl dans le cadre d'un Café-Kuchen de l'association Jardin/Garten et lors de la journée Portes Ouvertes de l'ASPA : Qualité de l'air dans le Rhin Supérieur - 20 ans de coopération transfrontalière.

Les étudiants ont été informés de différentes manières sur le projet. D'une part, des exposés ont été réalisés (LERU Bright Konferenz, EUCOR Summerschool, Freiburg Seminar), et d'autre part les étudiants ont été directement impliqués dans le cadre des cours. Ainsi 30 étudiants en géosciences de l'université de Fribourg ont participé à la visite d'une centrale thermique biomasse à Fribourg et ont pu effectuer des travaux au microscope dans les laboratoires de géochimie. D'autres étudiants ont participé de façon intensive à la conception et la tenue du stand aux « Science Days 2014 ».

Le projet a été présenté en novembre 2014 à l'occasion d'une conférence d'une demi-journée „combustion de la biomasse : premiers résultats du projet transfrontalier BIOCOMBUST“. L'exposition de posters a permis un échange poussé entre les scientifiques du projet, le réseau de partenaires ainsi que la presse.

La communauté scientifique, les centres de recherche et les instituts travaillant dans le domaine de l'environnement ont été informés sur le projet et ses résultats à l'aide de publications scientifiques et des participations à des conférences nationales et internationales (DMG Tagung 2013, DUST 2014, Goldschmidt 2013 et 2014, Nanotox 2014).

Les producteurs d'énergie du monde agricole et de l'industrie du ciment ont été informés concernant les thèmes de recherches grâce à des envois réguliers à partir d'une liste de diffusion avec plus de 400 adresses et par leur participation aux manifestations du projet. On peut citer entre autres Badenova, Holcim et les exploitants des centrales thermiques à Mulhouse Agglomération Alsace (installations de combustion à Illberg et Rixheim), Société Colmarienne de Chauffage Urbain (installation de

Colmar), EBM Thermique SAS (Anlage in Saint-Louis), Rathaus von Ammertzwiler (Anlage in Ammertzwiler), Bürger Energie St. Peter e. G. (KWK in St. Peter) und badenova AG & Co. KG (Anlage Vauban, Freiburg i. Br.).

combustion à Colmar), EBM Thermique SAS (installation de combustion à Saint-Louis), mairie d'Ammertzwiler (installation de combustion à Ammertzwiler), Bürger Energie St. Peter e. G. (KWK à St. Peter) et Badenova AG & Co. KG (installation de combustion à Vauban, Freiburg), dans lesquelles des mesures ont été réalisées.

ZUSAMMENFASSUNG CONCLUSIONS



7 ZUSAMMENFASSUNG

Das interdisziplinäre EU-Forschungsprojekt untersuchte die Auswirkungen von Partikeln aus der Biomasse-Verbrennung auf die menschliche Gesundheit. Im Zentrum des Interesses standen die Charakterisierung der Partikel, die Auswirkung der Verbrennung von Biomasse auf die Luftqualität und die damit verbundenen möglichen Einflüsse auf die menschliche Gesundheit. Zudem beschäftigte sich das Projekt mit der Frage, ob anfallende Aschen in der Zementproduktion als Klinkerersatz verwendet werden können. Eine wichtige Komponente des Projektes war auch die Öffentlichkeitsarbeit, die der Bevölkerung beidseits des Rheines mit mehreren Methoden, Formaten und Veranstaltungen die Projektziele, die Forschungsinhalte und die Resultate näher brachte.

7.1 Forschungsthema I: Charakterisierung der Partikel-Emissionen sowie der Aschen aus der Biomasse-Verbrennung

Emissionen aus der Biomasse-Verbrennung hängen sowohl von dem Brennstoff und der Feuchte als auch von der Leistung der betreffenden Anlage ab. Unsere Ergebnisse haben gezeigt, dass bei größeren Verbrennungsanlagen (ab 400 kW) die Emissionen in der Regel niedriger sind, weil einerseits die Verbrennungsbedingungen besser kontrolliert werden und andererseits gute Filtervorrichtungen vorhanden sind. Während der Schwelphase des Brennprozesses ist dabei die Gesamtanzahl der emittierten Partikel deutlich höher als während der Flammphase. Brennbedingungen haben einen deutlich größeren Einfluss auf die Emissionen als die Verwendung unterschiedlicher Holzsorten.

Mikroskopische Untersuchungen der entstandenen Aschen und Feinstäube haben gezeigt, dass die Fluoreszenz von Partikeln mit zunehmender Konzentration adsorbierter Polyzyklischer Aromatischer Kohlenwasserstoffverbindungen (PAK) zunimmt. Damit steht eine schnelle Methode zur Verfügung, um die gesundheitsschädigenden PAK relativ einfach zu bestimmen.

Flug- und Rostaschen unterscheiden sich stark bezüglich ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung, wobei die kleinsten Partikel (PM_{2.5}) in den Flugaschen vorwiegend aus Kaliumsulfat (K₂SO₄) bestehen - einem harmlosen Salz. Außerdem sind die Flugaschen im Vergleich zu den zugehörigen Rostaschen an den relativ flüchtigen Elementen Zink, Cadmium, Blei und Arsen stark angereichert, weshalb sie, im Gegensatz zu den Rostaschen, normalerweise nicht als Düngersatz verwendet werden können.

7 CONCLUSIONS

Le projet de recherche européen et interdisciplinaire a étudié les effets des particules issues de la combustion de biomasse sur la santé humaine. La caractérisation des particules, les effets de la combustion de la biomasse sur la qualité de l'air ainsi que les éventuels effets sur la santé humaine ont été au centre des travaux. En outre, le projet s'est intéressé à la question de savoir si les cendres de combustion récupérées pouvaient servir de substitut au clinker dans la production de ciment. La communication a été une composante importante du projet. Elle a permis d'informer la population des deux côtés du Rhin grâce à différentes méthodes, supports et manifestations sur les objectifs du projet, les travaux de recherche ainsi que les résultats.

7.1 Thème de recherche I : Caractérisation des émissions atmosphériques particulaires et des cendres issues de la combustion biomasse

Les émissions issues de la combustion de biomasse dépendent autant du combustible et de l'humidité que de la puissance de l'installation de combustion. Nos résultats ont montré que pour des installations de combustion plus importantes (à partir de 400kW), les émissions sont moins importantes en règle générale, puisque d'une part les conditions de combustion sont mieux contrôlées et d'autre part, elles disposent d'équipements de filtration efficaces. Au cours de la phase de combustion hétérogène (sans flamme), le nombre total de particules émises est sensiblement plus élevé que pendant la phase de combustion homogène (avec flamme). Les conditions de combustion ont un impact beaucoup plus important sur les émissions que l'utilisation de différents types de bois.

Des études microscopiques des cendres et des particules résultantes ont montré que la fluorescence des particules augmente avec la concentration en hydrocarbures aromatiques polycycliques adsorbés (HAP). C'est une méthode rapide pour caractériser de manière relativement facile les HAP qui sont nocifs sur la santé.

Les cendres volantes et les mâchefers diffèrent beaucoup dans leur composition chimique et minéralogique. Les plus petites particules (PM_{2.5}) dans les cendres volantes sont principalement composées de sulfate de potassium (K₂SO₄) - un sel inoffensif. En outre, par rapport aux cendres de lit, les cendres volantes sont plus riches en éléments relativement volatils comme le zinc, le cadmium, le plomb et l'arsenic. Elles ne peuvent pas être utilisées en tant qu'additif pour les engrais contrairement aux cendres de lit.

Bei der Messung der Luftqualität an zwei Standorten zeigten sich erhöhte Konzentrationen von Ruß und anderen Produkten aus Holz-Verbrennung nicht in unmittelbarer Nähe der zentralen Biomasse-Verbrennungsanlage, sondern nur dort, wo in privaten Haushalten individuell Holz verbrannt wird. Die Bilanz für die Luftqualität ist deshalb besser für die gemeinsamen Anlagen als bei der privaten Holz-Verbrennung.

Obwohl der Winter 2013/14 ausgesprochen mild war und keine lang anhaltenden Inversionslagen aufwies, zeigten zwei Standorte im Schwarzwald dennoch typische Merkmale für Partikel aus der Holz-Verbrennung, wie durch Einzelpartikelstudien an Proben aus Passivsammlern nachgewiesen wurde.

7.2 Forschungsthema 2: Untersuchungen zu biologischen Effekten von Partikel-Emissionen und Aschen aus der Biomasse-Verbrennung

Weil Feinstaubpartikel über die Atemwege ins Lungengewebe eindringen können, wurden im Labor die möglichen Auswirkungen der Partikel auf menschliche Lungenzellen untersucht. Die Resultate zeigen, dass Feinstaub aus der Biomasse-Verbrennung je nach Konzentration zelltoxische und genotoxische Effekte in humanen Lungenzellen hervorruft, dass aber nicht nur die Größe sondern auch die Art der Partikel eine wesentliche Rolle spielt. So haben z.B. Miscanthus-Partikel keine Schädigung der Zellen verursacht. Die Ergebnisse belegen außerdem, dass der PAK-Gehalt in Verbrennungspartikeln einen erheblichen Einfluss auf den Schädigungsgrad von Lungenzellen ausübt.

Es gibt ebenso Indizien, dass die verwendeten Feinstaubproben keine maßgeblichen Entzündungsreaktionen auslösen, sondern evtl. sogar eine bestehende Entzündung reduzieren können. Die untersuchten Feinstäube regen Stressindikatoren (z.B. Sauerstoffradikale) in der Zelle an und lösen dadurch verschiedene Schutzmechanismen aus. Bei kurzzeitiger Exposition mildern offensichtlich die Schutzmechanismen die Schädigung der Zellen.

Eine langfristige Feinstaubexposition könnte aber die Lunge nachhaltig schädigen, weil dann eine längerfristige Aktivierung von Schutzmechanismen die Immunantwort der Lunge beeinträchtigen, Infektionen fördern und die Entstehung von Krebs begünstigen könnte.

Erste Langzeitversuche deuten darauf hin, dass Verbrennungspartikel den Energiegehalt der Zelle beeinträchtigen und die Proteinsynthese hemmen können, was sich auf die Zellteilung auswirken und

Des concentrations élevées de suies et d'autres produits issus de la combustion du bois ont été constatées lors des mesures de qualité de l'air sur deux sites de mesure. Ces niveaux de concentrations ont été observés non pas aux alentours de la centrale thermique de biomasse mais à proximité des installations individuelles de combustion de bois. Le bilan de qualité de l'air est meilleur pour les installations collectives que pour les installations individuelles domestiques.

Malgré un hiver 2013/14 particulièrement doux et l'absence de situation prolongée d'inversion de températures, deux sites de mesure en Forêt-Noire présentent des particules ayant des caractéristiques typiques de celles issues de la combustion de biomasse comme en témoignent les études de particules isolées sur des échantillons provenant des collecteurs passifs.

7.2 Thème de recherche 2 : Études des effets biologiques des émissions de particules et des cendres issues de la combustion de la biomasse

Parce que les particules fines peuvent pénétrer dans les poumons par les voies respiratoires, l'impact potentiel de particules sur des cellules pulmonaires humaines a été étudié en laboratoire. Les résultats montrent que les particules fines issues de la combustion de biomasse provoquent - en fonction de leur concentration - des effets cytotoxiques et génotoxiques dans les cellules pulmonaires humaines. La taille mais également la nature des particules jouent un rôle important. Les résultats confirment également que la teneur en HAP dans les particules de combustion a une influence considérable sur le degré de lésion des cellules pulmonaires.

Les résultats indiquent que les échantillons de particules fines utilisés ne peuvent pas déclencher de réactions inflammatoires importantes, mais que bien au contraire ils peuvent même réduire une inflammation existante. Les particules fines étudiées stimulent des indicateurs de stress (par exemple des radicaux oxygénés) dans la cellule et déclenchent ensuite différents mécanismes de protection. Vraisemblablement, les mécanismes de protection réduisent les lésions cellulaires pour une exposition de courte durée.

En revanche, une exposition prolongée aux particules fines pourrait endommager durablement le poumon. Une activation à long terme de ces mécanismes de protection pourrait affecter la réponse immunitaire des poumons, favoriser des infections et contribuer à la formation de cancers.

Les premiers essais à long terme indiquent que les particules de combustion affectent la teneur en énergie de la cellule et pourraient impacter la division cellulaire



somit die Regeneration und die Barriere-Funktion von Lungenzellen stören könnte.

Erste Experimente mit Partikeln aus Biomasse-Verbrennung zeigen zudem, dass sich die während dieses Projektes entwickelten drei-dimensionalen Lungenzellkulturen zur Untersuchung von Entzündungsprozessen und von Zellschädigungen gut eignen.

7.3 Forschungsthema 3: Verwendung der Aschen aus Biomasse-Verbrennung als Ersatzstoff für Zementklinker

Der Einsatz von elektrostatischen Abscheidern, Zyklonen oder Gewebefiltern ermöglicht das Auffangen von Flugasche. Im Gegensatz zur Rostasche, die nach Bestehen einer chemischen Prüfung als Zusatz in Düngemitteln verwendet wird, muss Flugasche vor allem wegen erhöhten Konzentrationen einzelner Schwermetalle speziell entsorgt werden. BIOCOMBUST hat die mögliche Weiterverwertung dieser Aschen in der Zementindustrie untersucht, um herauszufinden, ob sie sich als CO₂-neutraler Klinkerersatz eignen. Zu diesem Zweck mussten die Aschen im Detail charakterisiert werden bevor Ihr Einfluss auf die Eigenschaften des Zements untersucht werden konnte.

Zement muss bestimmte Eigenschaften vorweisen, um Verwendung als Bindemittel in Mörtel und Beton zu finden. Ausschlaggebend sind hier vorwiegend Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Alterungsbeständigkeit. Die Qualität des Zements hängt unmittelbar mit dem benötigten Wasseranteil zusammen.

Die Eignung der Asche als Material für die Zementbeimischung scheint unter anderem davon abzuhängen, ob dem Brennstoff Kalk oder Kalziumhydroxid bei Miscanthus zugegeben wurde und welche Rauchgasabscheidetechnik verwendet wurde. Zusammen mit rasterelektronen-mikroskopischen Aufnahmen haben die Laborversuche gezeigt, dass Zyklonasche aus der Biomasse-Verbrennung ein großes Eignungspotenzial verspricht.

et perturber ainsi la régénération et la fonction de barrière des cellules pulmonaires.

Des premières expérimentations avec des particules de combustion ont montré que les cultures 3D des cellules de poumon, développées pendant le projet, pouvaient être utilisées pour l'étude des processus inflammatoires et des lésions cellulaires.

7.3 Thème de recherche 3 : Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse dans la production de ciment

L'utilisation d'électrofiltres, de multicyclones ou de filtres à manches permet de collecter les cendres volantes. Contrairement aux cendres de lit qui, après vérification de la composition chimique, sont utilisées comme additifs dans les engrais, les cendres volantes ne peuvent pas être utilisées directement à cause des concentrations élevées de certains métaux lourds et doivent être éliminées séparément. BIOCOMBUST a analysé les possibilités de réutiliser ces cendres dans l'industrie du ciment notamment en tant que substitut au clinker tout en étant plus sobre en émissions de CO₂. Les cendres devaient être caractérisées de façon détaillée avant de pouvoir étudier leur influence sur les propriétés du ciment.

Le ciment sert de liant dans le béton, il doit donc avoir des caractéristiques bien définies, qui sont principalement la facilité de mise en œuvre, la stabilité et la résistance au vieillissement. La qualité du ciment dépend directement de la teneur en eau.

Le potentiel d'utilisation des cendres comme matériau à mélanger au ciment semble entre autres dépendre de l'adjonction au combustible de calcaire ou d'hydroxyde de calcium pour le miscanthus et de la technique d'extraction des fumées utilisée. Les images de microscopie électronique à balayage et les tests en laboratoire ont montré que les cendres de cyclone provenant de la combustion de la biomasse représentent un important potentiel d'utilisation dans le ciment.

7.4 Öffentlichkeitsarbeit

Eines der wichtigen Ziele von BIOCOMBUST war die Vermittlung von Informationen und Wissen über das Projekt an verschiedene Bevölkerungsgruppen. Dazu wurden diverse Instrumente und verschiedene Informationskanäle genutzt. Die Öffentlichkeitsarbeit entwickelte ein Kommunikationskonzept unter dem Slogan „Wissenschaft hautnah“, welches einen Blick hinter die Kulissen des grenzüberschreitenden Projekts gewährte.

Außerdem wurde eine zweisprachige virtuelle Plattform (<http://biocombust.eu/backstage>) entwickelt, die über 30 eigens produzierte Kurzfilme erläutert, an welchen Fragestellungen und mit welchen Methoden die Projektpartner arbeiten.

Alle Aktivitäten der Öffentlichkeitsarbeit (Veranstaltungen, Vorträge, Zeitungsartikel, Radio- und Fernsehbeiträge) sind auf der Projektwebseite (www.biocombust.eu) zusammengestellt und stehen dem interessierten Publikum gratis zur Verfügung.

7.4 Communication

L'un des objectifs importants de BIOCOMBUST était la transmission d'informations et de connaissances aux différents groupes de population. Différents outils et voies d'informations ont ainsi été utilisés. Le travail de communication a donné naissance à un concept de communication sous le label « La science vécue de près » pour permettre de montrer les coulisses du projet transfrontalier.

En outre, une plate-forme virtuelle bilingue (<http://biocombust.eu/backstage>) a été développée. Les partenaires du projet expliquent dans plus de 30 courts métrages leurs recherches et méthodes de travail.

Toutes les facettes de la communication (événements, conférences, articles de journaux, radio et télévision) sont répertoriées sur le site du projet (www.biocombust.eu) et disponibles gratuitement.

