

Korrelierte Partikelzählung zur Bestimmung von luftgetragenen Schimmelpilzen in Abfallbehandlungsanlagen

T. Missel¹, J. Hartung² und B. Schappler-Scheele³

¹Labor für Arbeits- und Umwelthygiene Dr. Missel, Hannover, ²Institut für Tierhygiene und Tierschutz der Tierärztlichen Hochschule, Hannover und ³Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hannover

1 Einleitung

An Arbeitsplätzen in Kompostierungsanlagen kommt es im Laufe der Bearbeitung des organischen Materials in der Regel zur Freisetzung größerer Mengen an Mikroorganismen. Diese können eine Gesundheitsgefahr für Arbeitnehmer bedeuten sofern sie in die Atemwege gelangen und sich dort anreichern. Eine Gesundheitsbeeinträchtigung kann nicht nur durch Mikroorganismen sondern auch durch deren Zerfallsprodukte wie z.B. Endotoxine oder Glucane ausgelöst werden (3,4). Zum Schutz der Arbeitnehmer vor Biologischen Arbeitsstoffen werden in Facharbeitskreisen des Ausschusses für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS) geeignete technische und betriebsorganisatorische Schutzmaßnahmen erarbeitet und in Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) veröffentlicht. In der TRBA 211 wurde für Biologische Abfallbehandlungsanlagen im Jahre 2001 erstmals ein Technischer Kontrollwert (TKW) zur Überprüfung der Wirksamkeit technischer Schutzmaßnahmen etabliert (10). Die Überprüfung des TKW (5×10^4 KBE/m³) durch Messungen geschieht auf der Basis kultureller Methoden, mit denen die aus der Luft gesammelten Mikroorganismen nachgewiesen werden. Die kulturellen Verfahren sind jedoch relativ unpräzise, weshalb eine Überschreitung des TKW um 100 % toleriert wird.

Die bei Arbeitsplatzmessungen anzuwendenden Meßverfahren und die Meßstrategie sind in der TRBA 430 und TRBA 405 geregelt. Beim Nachweis von Mikroorganismen aus Luft gemäß der TRBA 430 werden derzeit kulturelle Methoden benutzt. Kulturelle Methoden sind relativ einfach durchzuführen, weisen bei der Verwendung für Arbeitsplatzmessungen jedoch gravierende Nachteile auf. So sind diese Nachweisverfahren aufwendig und relativ ungenau. Nach den Ergebnissen von Ringversuchen liegen die Abweichungen der Methoden der TRBA 430 bei Parallelmessungen im Bereich von drei bis fünf (7). Eine Einschätzung der Höhe der Luftbelastung vor Ort ist nicht möglich. Um zumindest eine grobe Abschätzung der Mikroorganismen-Konzentrationen an einem bemessenen Arbeitsplatz vornehmen zu können, werden i.d.R. mehrere Tage benötigt. Der verbindliche Meßbericht eines beauftragten Meßinstituts liegt dem Anlagenbetreiber somit meist erst mehrere Wochen nach Durchführung der Messungen vor. In dieser Zeit können sich die raumklimatischen, hygienischen und organisatorischen Bedingungen am Arbeitsplatz verändert haben. Für die Optimierung einer technischen Schutzmaßnahme bzw. zur Ableitung von Verbesserungsvorschlägen bei der Betriebsorganisation wird ein direktanzeigendes Meßverfahren benötigt. Nur so können Schwachstellen lokalisiert und die Auswirkung auf die Luftbelastung am Arbeitsplatz nachvollzogen werden.

Die Konzentrationen luftgetragener Mikroorganismen können an den meisten Arbeitsplätzen innerhalb weniger Minuten um bis zu mehrere Größenordnungen schwanken (1,6,9). Neben den kurzzeitigen, meist von den momentanen Arbeitsabläufen abhängigen Konzentrationsschwankungen können in Abfallbehandlungsanlagen im Laufe einer Schicht auch größere Schwankungen der „Hintergrund-Konzentrationsniveaus“ beobachtet werden, die z.B. durch Änderungen der Betriebsabläufe oder der Lüftungsintensität am Arbeitsplatz

verursacht werden. An den meisten Arbeitsplätzen, die es im Bereich der Abfallwirtschaft und Entsorgung gibt, sind für eine realistische Einschätzung der längerfristigen Luftbelastung durch Mikroorganismen daher Beprobungszeiträume von mehreren Stunden zwingend notwendig. Die großen Schwankungen der Mikroorganismen-Konzentrationen in der Luft an Arbeitsplätzen im Bereich der Abfallwirtschaft werden damit dennoch nicht sicher erfaßt. Wünschenswert wären Meßverfahren, mit denen die Belastungssituation - idealerweise On-line - kontinuierlich gemessen werden kann. Die Messung von Konzentrationsverläufen auf der Basis kultureller Methoden ist jedoch sehr materialaufwendig und aufgrund der Arbeitswerte dieser Verfahren nicht praktikabel.

Das kürzlich entwickelte Verfahren der „Korrelierten Partikelzählung“ könnte ein geeignetes Instrument zur Darstellung des Verlaufs von Mikroorganismen-Konzentrationen sein (1,2). Das Verfahrensprinzip der „Korrelierten Partikelzählung“ besteht darin, Luftkeimkonzentrationen unter Benutzung eines festen Umrechnungsfaktors aus den kontinuierlich gemessenen Konzentrationen an Staubpartikeln, die eine keimrelevante Größe aufweisen, zu errechnen. Der Umrechnungsfaktor wird bei dem Verfahren durch lineare Regression der Meßbefunde von fünf bis zehn zeit- und ortsgleich durchgeführten Staubpartikel- und Luftkeimmessungen ermittelt. Die „Korrelierte Partikelzählung“ bietet somit derzeit zwar den großen Vorteil der Darstellung der Luftkeimkonzentrationen in Verlaufsform, beinhaltet allerdings immer noch 5 bis 10 Luftkeimmessungen mit dem entsprechenden Aufwand an kulturellen Untersuchungen. Ein Vorteil an Schnelligkeit und Kostenersparnis ist gegenüber den traditionellen Keimmeßverfahren solange nicht gegeben, wie die parallelen Keimmessungen noch notwendig sind. Sollte sich das statistische Verhältnis zwischen Staubpartikel- und Mikroorganismen-Konzentrationen in der Luft jedoch als längerfristig konstant erweisen, könnten Keimmessungen für bestimmte Bereiche in der täglichen Routineüberwachung durch Staubpartikelmessungen ersetzt werden. Um dies zu untersuchen, werden derzeit mehrere Forschungsvorhaben im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin sowie von Berufsgenossenschaften durchgeführt. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt und diskutiert.

2 Material und Methoden

Bei der „Korrelierten Partikelzählung“ wird das statistische Verhältnis zwischen luftgetragenen Mikroorganismen und Staubpartikeln von der Größe der untersuchten Keime bestimmt. Das statistische Verhältnis wird durch lineare Regression der Befunde von 6 bis 10 zeitlich und räumlich eng verbundenen Staubpartikel- und Mikroorganismen-Messungen ermittelt. Für die Staubmessungen werden hochauflösende Partikelzählgeräte (Grimm, Ainring) eingesetzt, mit denen die Erfassung der Partikelzahl in 1-minütigen Intervallen in 15 unterschiedlichen Partikelfractionen von 0,3 bis 20 µm Teilchendurchmesser und größer möglich ist. Die verwendeten Partikelzählgeräte arbeiten nach dem Streulichtprinzip.

Zur Keimzahlmessung wird die in den Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA 430) beschriebene Vorgehensweise zur indirekten Bestimmung der Schimmelpilz-Konzentrationen benutzt. Die Keimmessungen erfolgen mit dem PGP-GSP-System (Ströhlein, Kaarst). Die Probenahme bei der Korrelierten Partikelzählung erfolgt ortsfest an Stativen in 1,5 m Höhe und in Fahrzeugen (z.B. Radlader) in Atemhöhe der Fahrzeugführer. Als Filtermaterial werden Polycarbonatfilter mit einer Porenweite von 0,8 µm (Millipore, Eschborn) und als Nährmedien für die Schimmelpilze DG 18-Agar (Oxoid, Wesel) und für die Actinomyceten Glycerin-Arginin-Agar verwendet. Die Kultivierung der Schimmelpilze und Actinomyceten erfolgt bei 25 °C bzw. 32 und 50 °C.

Die Meßzeiten der bis zu 10 Probenahmen auf Mikroorganismen je Untersuchung betragen i.d.R. jeweils 20 bis 30 Minuten, so daß ein ausreichend großer Untersuchungszeitraum gewährleistet ist. Bei der Korrelierten Partikelzählung wird die Beziehung zwischen den Befunden der Keimmessungen und den entsprechenden Partikelmeßwerten mit Hilfe der linearen Regression für alle erfaßten Partikel-Größenfraktionen (hier 15) verdeutlicht. Diejenige Partikelfraktion, mit der das höchste Bestimmtheitsmaß bei der linearen Regression erhalten wurde, wird als sogenannte „Leitfraktion“ für die untersuchten Mikroorganismen im luftgetragenen Staub angesehen. Staubpartikel der „Leitfraktion“ repräsentieren die Belastung des gesamten Einatembaren Staubes (E-Staub) mit Mikroorganismen. Dies wird in dem Kapitel „Ergebnisse“ durch Beispiele verdeutlicht. Anhand der Steigungsgleichung der Regressionsgeraden werden Mikroorganismen-Konzentrationsverläufe mit 1-minütigen Meßintervallen aus den kontinuierlich gemessenen Staubpartikel-Konzentrationen errechnet.

Für einen Vergleich der statistischen Abhängigkeiten zwischen Staubpartikel- und Luftkeimkonzentrationen an verschiedenen Meßorten und / oder unterschiedlichen Meßtagen werden Partikel-Größenfraktionen herangezogen, mit denen an allen durchgeführten Untersuchungstagen vergleichsweise hohe Bestimmtheitsmaße erhalten werden. Nach den bisherigen Erfahrungen sind die „Leitfraktionen“ in Abfallbehandlungsanlagen relativ konstant, sofern die technischen und betriebsorganisatorischen Randbedingungen bei den Beprobungen vergleichbar sind.

Parallel zu den Keim- und Partikelmessungen wurden Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit gemessen (Rotronic, Bassersdorf, Schweiz). Die Messungen erfolgten kontinuierlich in 1-Minuten-Intervallen.

3 Ergebnisse

Die Abb. 1 zeigt die Anwendung der Korrelierten Partikelzählung zur Keimbestimmung an einem mit Feinstaub und an einem mit Grobstaub belasteten Arbeitsplatz in einer Kompostierungsanlage. Die linke Bildseite zeigt die Regressionsgerade, die sich bei der Verrechnung der Keim- und der Partikelbefunde in einer gut belüfteten Sortierkabine ergibt. Das höchste Bestimmtheitsmaß bei der linearen Regression der Befunde von 10 kombinierten Schimmelpilz- und Staubpartikel-Messungen wurde mit der Partikelfraktion 1-1,6 µm erhalten. Auch bei den anderen Partikelgrößen in der Feinstaubfraktion zwischen 1 und 5 µm wurden hohe Bestimmtheitsmaße mit $R^2 > 0,8$ gefunden. Bei Tracheobronchialstaub- und Grobstaubpartikeln (5-10 µm bzw. > 10 µm Durchmesser) wurden hingegen deutlich niedrigere Bestimmtheitsmaße erhalten. Diese Befunde sind so zu interpretieren, daß der deutlich überwiegende Teil der an dem beprobten Arbeitsplatz in der Luft enthaltenen Schimmelpilze in der Feinstaubfraktion enthalten war. Die Partikelfraktion 1-1,6 µm war somit die „Leitfraktion“ für die Gesamtheit luftgetragener Schimmelpilze im Einatembaren Staub am Tag der Probenahme. Die beschriebene Verteilung hoher Bestimmtheitsmaße ausschließlich auf Partikelfraktionen des Feinstaubes kann sehr häufig an Arbeitsplätzen angetroffen werden, wo es infolge guter Lüftung nicht zur Anreicherung von Grobstaubpartikeln in der Luft kommt.

Die rechte Bildseite zeigt die Regressionsgerade in der ungenügend belüfteten Fahrerkabine eines Radladers. Das Fahrzeug war zum Zeitpunkt der Messungen bei der Absiebung von Fertigungskompost eingesetzt. Die Mikroorganismenflora an diesem Arbeitsplatz wird dominiert von mesophilen Actinomyceten. Schimmelpilze hingegen sind an Arbeitsplätzen im Bereich der Absiebung meist nur in geringen Konzentrationen nachweisbar, so daß die Meßwerte hier etwa eine Größenordnung unter den Konzentrationen der mesophilen Actinomyceten liegen.

Bei der Absiebung kommt es i.d.R. zu sehr hohen Staubemissionen, wobei Grobstaubpartikel einen relativ großen Anteil an der Gesamtpartikelzahl im luftgetragenen Staub stellen. Bei diesen Bedingungen befindet sich ein weitaus höherer Anteil der luftgetragenen Mikroorganismen in der Grobstaubfraktion, als dies an gut belüfteten Arbeitsplätzen mit niedrigen Grobstaub-Konzentrationen der Fall ist. Aus diesem Grund wurden an dem beprobten Arbeitsplatz die höchsten Bestimmtheitsmaße bei der linearen Regression von Grobstaubpartikel-Konzentrationen und Actinomyceten-Zahlen gefunden.

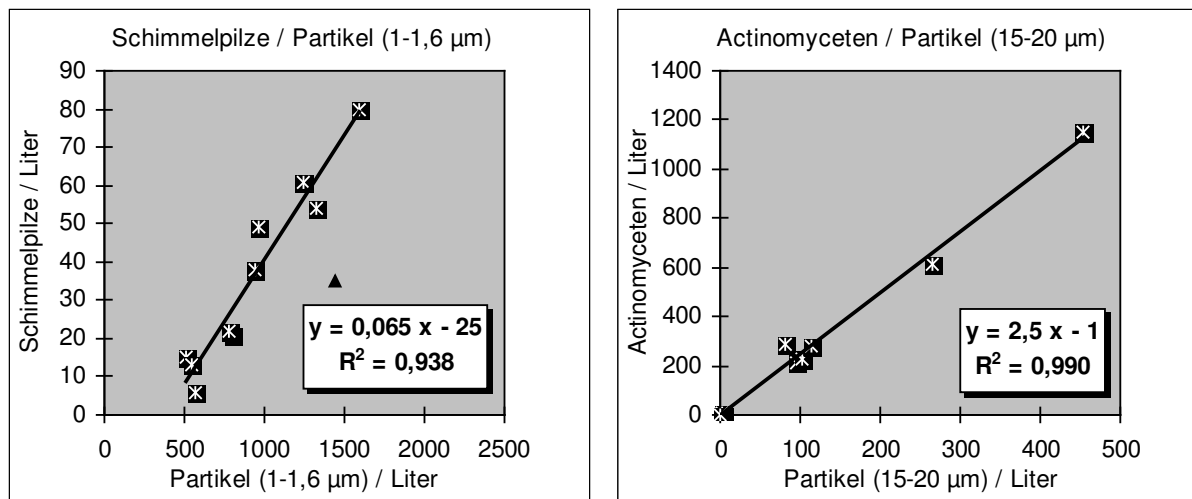


Abb. 1: Lineare Regression zwischen Staubpartikeln und Mikroorganismen an zwei Arbeitsplätzen in Kompostierungsanlagen. Gezeigt sind die Regressionsgeraden von Partikeln der Größe 1-1,6 µm und Schimmelpilzen in einer Sortierkabine (links) und von Partikeln der Größe 15-20 µm und mesophilen Actinomyceten in einer Radladerkabine (rechts). Ein Ausreißer bei der Linearen Regression ($\alpha = 0,05$) ist mit einem dreieckigen Datenpunkt markiert.

In Abb. 2 sind die aus kontinuierlich gemessenen Partikelkonzentrationen anhand der Steigungsgleichung in Abb. 1 (rechte Bildseite) errechneten Verläufe der Konzentrationen mesophiler Actinomyceten in dem Führerhaus des Radladers grafisch dargestellt. Mit der Korrelierten Partikelzählung konnten Dauer, Ausmaß und Häufigkeit von Belastungsspitzen an dem Arbeitsplatz aufgezeigt werden. Während der Arbeiten kommt es den Verlaufskurven zufolge zu kurzzeitigen, aber hohen Keimimmissionen in der Fahrerkabine, so daß Actinomyceten-Konzentrationen bis in den Bereich 10^6 bis 10^7 KBE/m³ resultieren.

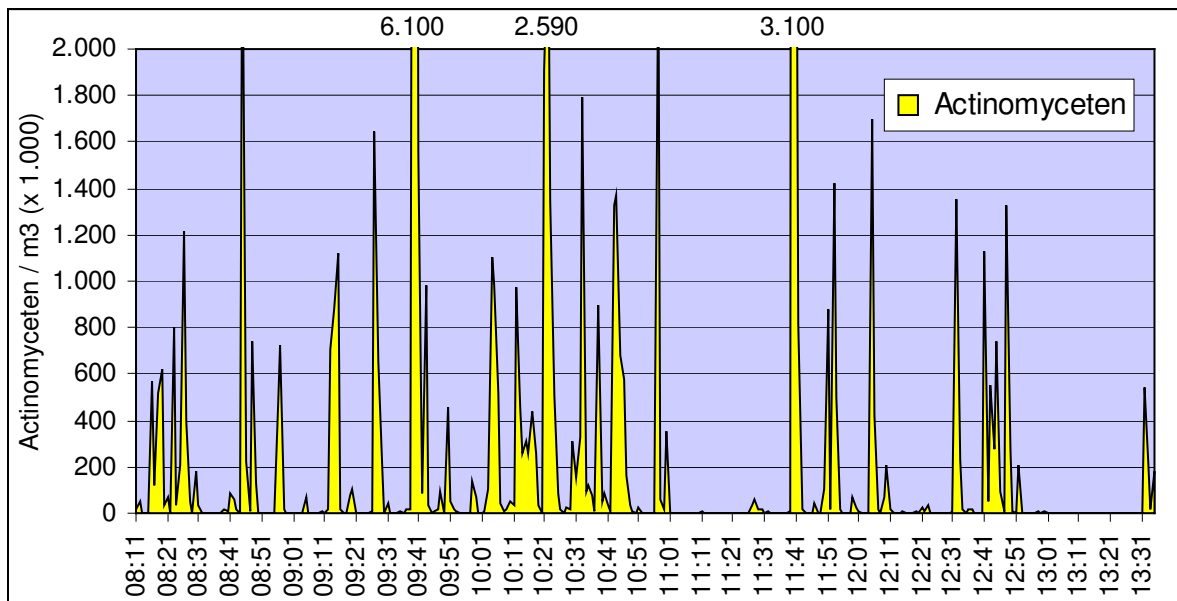


Abb. 2: Verläufe der Actinomyceten-Konzentrationen in der ungenügend belüfteten Fahrerkabine eines Radladers auf einem Kompostierplatz. Der Radlader war beim Absieben von Rohkompost im Einsatz.

In Abb. 3 sind die Verläufe der Konzentrationen thermotoleranter Schimmelpilze (v.a. *Aspergillus fumigatus*) und thermophiler Actinomyceten in dem Führerhaus eines Radladers, der im Rottebereich in einer Kompostierungsanlage eingesetzt war, bei zwei unterschiedlichen Betriebszuständen gezeigt. Der Radlader ist mit einer Staubschutzanlage mit Überdrucküberwachung ausgestattet.

Zuerst wurde bei konsequent geschlossenen Kabinentüren gemessen. Die Fahrtür wurde nur vom Meßpersonal beim Wechsel der Probenahmefilter sowie beim Ein- und Aussteigen des Fahrzeugführers kurzzeitig geöffnet und rasch wieder verschlossen, so daß die maximale Wirkung der Lüftung in der betrieblichen Praxis erreicht wurde (Abb. 3 oben). Anschließend wurde der Radlader bei abgeschalteter Staubschutzanlage beprobt, um den Wirkungsgrad der Lüftungstechnischen Einrichtung abschätzen zu können. Dabei wurde die Kabinentür häufiger und länger geöffnet (Abb. 3 unten).

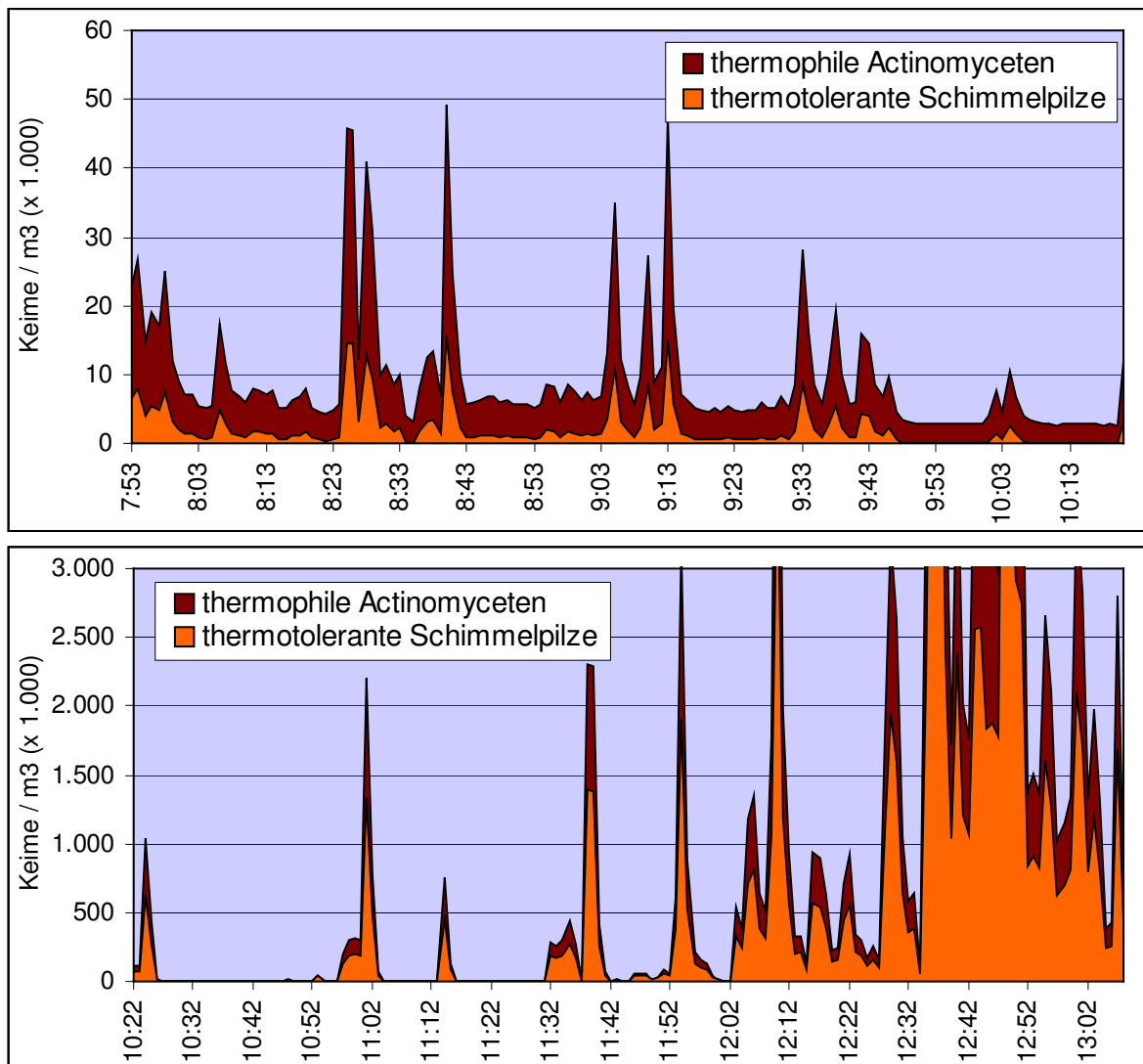


Abb. 3: Verläufe der Schimmelpilz- und Actinomyceten-Konzentrationen in der Fahrerkabine eines Radladers auf einem Kompostierplatz. Der Radlader war beim Umsetzen von Kompostmaterial der Haupttrötte im Einsatz. Der obere Bildteil zeigt die relativ geringe Belastung der Kabinenluft wenn die Kabinentür eher selten und dann nur kurzzeitig geöffnet wurde. Im unteren Bildteil wird das Fehlen der Staubschutzanlage und der Einfluß des Türöffnens im Führerhaus für einige Minuten deutlich.

Mit den Messungen bei geschlossenen Kabinentüren konnte die gute Wirksamkeit der vorhandenen Staubschutzanlage aufgezeigt werden. Beim Öffnen der Kabinentür (z.B. 08:24, 08:26, 08:41 Uhr) kam es zwar zu teils erheblichen Keimimmissionen aus der hoch belasteten Außenluft in die Fahrerkabine, so daß kurzzeitig Schimmelpilz- und Actinomyceten-Konzentrationen bis 5×10^4 KBE/m³ erreicht wurden. Die mit Staubpartikeln und Mikroorganismen belastete Kabinenluft wird durch keimarme Zuluft relativ rasch verdünnt bzw. durch den Überdruck aus der Kabine verdrängt, so daß es innerhalb weniger Minuten zu einer Verminderung der Mikroorganismen-Konzentrationen auf Werte im Bereich von 10^3 bis 10^4 KBE/m³ kommt. Der Technische Kontrollwert von 5×10^4 KBE/m³ wurde deutlich unterschritten (Abb. 3, obere Bildhälfte, im Mittel 9×10^3 KBE/m³ thermophile Actinomyceten und 3×10^3 KBE/m³ Schimmelpilze). Eine vollständige Eliminierung von Mikroorganismen aus der Kabinenluft ist den Ergebnissen der Messungen zufolge mit der vorhandenen Lüftungsanlage in der betrieblichen Praxis aber nicht möglich.

Ist die Staubschutzanlage ausgeschaltet, kommt es beim Öffnen der Kabinentür zu einer erheblichen Kontamination der Luft der Fahrerkabine. Bei kurzzeitigem Öffnen der Fahrertür erreichten die Schimmelpilz- und Actinomyceten-Konzentrationen Werte bis 2×10^6 KBE/m³ (10:23 und 11:00 Uhr). Die Befunde zeigen, daß sich die Korrelierte Partikelzählung eignet, um Wirksamkeit und Betriebszustände von Staubschutzanlagen in Radladerkabinen zu prüfen.

Abb. 4 zeigt die Verläufe der Schimmelpilz- und Actinomyceten-Konzentrationen im Führerhaus eines anderen Radladers. Dieser Radlader ist nicht mit einer Staubschutzanlage sondern nur mit einer einfachen mechanischen Lüftung ausgestattet, so daß in der Fahrerkabine allenfalls ein geringer Überdruck aufgebaut werden kann. Der Radlader war am Tag der Probenahme bei der Absiebung von Rohkompost eingesetzt. Dieses Kompostmaterial hat den Prozeß der Hygienisierung nahezu vollständig durchlaufen, so daß die Abtötung thermotoleranter und thermophiler Mikroorganismen bereits weitestgehend vollzogen ist. Das sich abkühlende Kompostmaterial wird relativ rasch von natürlichen, bodenlebenden Schimmelpilzen und Bakterien (Actinomyceten), die im mesophilen Temperaturbereich gut wachsen, besiedelt. Bei Arbeitsplatzmessungen im Bereich der Absiebung sind daher Messungen von mesophilen Mikroorganismen sinnvoll.

Dieser Radlader wurde ebenfalls bei zwei unterschiedlichen Betriebszuständen, d.h. im regulären Betrieb und bei geöffnetem Kabinenfenster bemessen. Die Ergebnisse der Messungen bei geschlossener Fahrerkabine sind in Abb. 4 oben gezeigt. Die Tür des Fahrzeugs wurde hier nur kurzzeitig zum Wechsel der Probenahmefilter geöffnet und danach sofort wieder verschlossen. Die Kabine war bei diesen Messungen permanent mit einem Fahrer besetzt. Die Verläufe der Schimmelpilz- und Actinomyceten-Konzentrationen bei geöffnetem Kabinenfenster zeigt Abb. 4 unten.

Bei geschlossenem Fenster waren in der Luft der Fahrerkabine dieses Radladers deutlich mehr Keime meßbar als im Führerhaus des Radladers, der mit Staubschutzanlage ausgestattet war. Die Verläufe zeigen, daß es in der Fahrerkabine im Laufe der Schicht zu einer kontinuierlichen Erhöhung luftgetragener Mikroorganismen auf Werte im Bereich von 2×10^4 bis 5×10^4 KBE/m³ kommt. Die Lüftung ist offensichtlich nicht in der Lage, die über die Arbeitskleidung, verschmutzte Oberflächen und Sitzpolster sowie die kurzzeitig geöffnete Kabinentür in die Fahrerkabine eingetragenen Mikroorganismen rasch und effektiv aus der Kabine zu verdrängen oder stark zu verdünnen. Etwa 60 Minuten nach Beginn der Probenahme stellte sich das Gleichgewicht zwischen Keimimmission auf der einen Seite und Verdünnung staubbelasteter Kabinenluft auf der anderen Seite bei etwa 5×10^4 KBE/m³ ein.

In der Arbeitspause zwischen 12:50 und 13:20 Uhr wurden die Messungen fortgeführt, wobei der Motor des Fahrzeugs weiter lief und die Lüftung eingeschaltet war. In diesem Zeitraum lagen die Schimmelpilz- und Actinomyceten-Konzentrationen im Führerhaus im Bereich natürlicher Umgebungsluft. Bei ordnungsgemäßem Betrieb sind die Schutzmaßnahmen in der Lage, eine Kontamination der Kabinenluft durch Schimmelpilze und Bakterien zu verhindern.

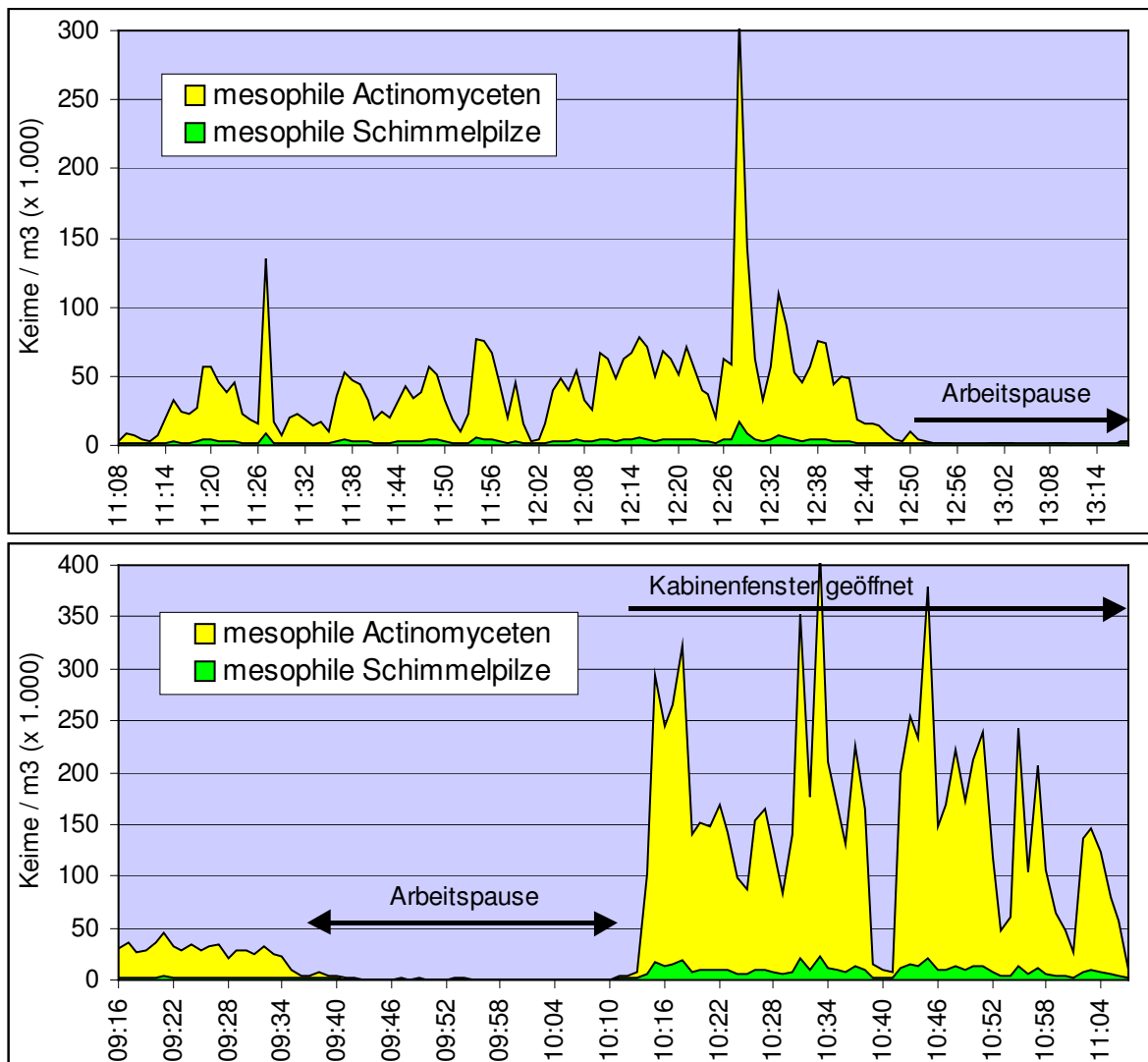


Abb. 4: Verlauf der Schimmelpilz- und Actinomyceten-Konzentrationen in der Fahrerkabine eines Radladers beim Absieben von Kompostmaterial. Der obere Bildteil zeigt die Belastung der Kabinenluft, wenn die Kabinentür eher selten und dann nur kurzzeitig geöffnet wird. Die untere Verlaufskurve in Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der Messungen bei zeitweise geöffnetem Kabinenfenster.

Bei geöffnetem Kabinenfenster stieg die Keimbelastung in dem Radlader auf Werte zwischen 1×10^5 bis 2×10^5 KBE/m³ an. Die Konzentrationsspitzen erreichten aber lediglich Werte bis 4×10^5 KBE/m³. Dies ist auf eine deutlich niedrigere Keimexposition des Fahrzeugs gegenüber dem Radlader, der beim Umsetzen eingesetzt war (Abb. 3), zurückzuführen.

Die Verläufe der Konzentrationen luftgetragener Actinomyceten in einem vierten Radlader sind in Abb. 5 dargestellt. Der Radlader war ebenfalls bei der Kompostabsiebung im Einsatz, so daß die Luftproben nur auf mesophile Actinomyceten untersucht wurden. Die Messungen erfolgten - wie bei den Beprobungen der Radlader in Kompostierungsanlage Nr. 1 bis Nr. 3 - sowohl bei konsequent geschlossener (bis 09:55 Uhr) als auch bei geöffneter Kabine. Der Radlader ist mit einer Schutzbelüftungsanlage mit Schwebstaub- und Aktivkohlefilter ausgestattet. Die Schutzbelüftung sorgt für die Aufrechterhaltung eines konstanten Überdrucks im Führerhaus. Die Kabinenluft wird zusätzlich durch einen Umluft-Filter der Klimaanlage entstaubt.

Alle Oberflächen im Führerhaus einschließlich der Sitzpolster waren am Tag der Probenahme sehr stark verschmutzt. Die starke Verschmutzung wirkte sich deutlich auf die Verlaufskurve der Actinomyceten-Konzentrationen im Führerhaus aus, so daß es - geschlossener Türen und Fenster zum Trotz - zu hohen Konzentrationsspitzen bis in den Bereich von 10^4 bis 10^5 KBE/m³ kam. Im Laufe der Arbeiten bei geschlossener Fahrerkabine nahm die Höhe der Konzentrationsspitzen kontinuierlich ab (gestrichelter Pfeil). Dieser Befund resultiert aus der Wirkung der Umluftfiltrierung der Klimaanlage, die eine sukzessive Entstaubung der anfangs stark kontaminierten Fahrerkabine bewirkt. Die Konzentrationsspitzen bei geschlossener Fahrerkabine wurden durch Staubaufwirbelungen von den verschmutzten Oberflächen, insbesondere den Sitzpolstern, verursacht.

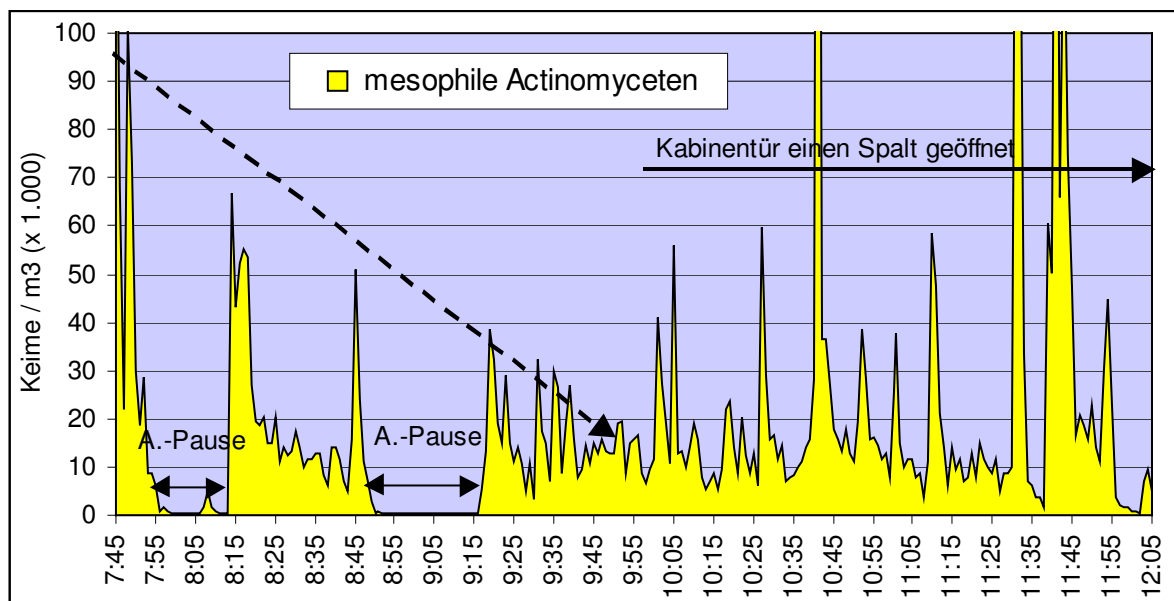


Abb. 5: Verlauf der Konzentrationen luftgetragener Actinomyceten in der Fahrerkabine eines Radladers in der Kompostierungsanlage Nr. 4. Der Radlader wurde beim Absieben von Kompostmaterial eingesetzt. Ab 09:55 Uhr wurde die Kabinentür einen Spalt geöffnet gehalten.

Daß die Schutzbelüftungsanlage durch eine hohe Leistungsfähigkeit gekennzeichnet ist, selbst wenn die Kabinentür einen Spalt geöffnet ist, wird in der Verlaufskurve der Actinomyceten-Konzentrationen nach 09:55 Uhr in Abb. 5 deutlich. Hohe Konzentrationen an luftgetragenen Actinomyceten bis 10^5 KBE/m³ waren selbst bei geöffneter Fahrertür nur im Minutenbereich meßbar. Offensichtlich wurde das Eindringen größerer Mengen keimbelasteter Umgebungsluft in das Führerhaus aufgrund eines - zwar verminderten, aber beständigen - Überdrucks in der Fahrerkabine verhindert. Die rasche Abnahme der Meßwerte im Anschluß an die Konzentrationsspitzen ist auf die entstaubende Wirkung der Umluft-Filteranlage zurückzuführen. Bei einem Vergleich der Verlaufskurven bei konsequent geschlossener und geöffneter Fahrerkabine in Abb. 5 wird deutlich, daß eine starke Verschmutzung des Führerhauses zu ähnlich hohen Luftbelastungen in Radladern führen kann wie das Öffnen der Kabinentüre in hoch belasteten Bereichen.

Bei den in den Abbildungen 2 bis 5 gezeigten Verlaufskurven wurden die Mikroorganismen-Immissionen an den Arbeitsplätzen vorwiegend durch das Öffnen von Türen und Fenstern der

Fahrerkabinen in hoch belasteten Bereichen verursacht. Mikroorganismen können jedoch auch über schadhafte oder ungeeignete Luftfilter in die Fahrerkabinen von Fahrzeugen eindringen. In vielen Fällen kommt es hierbei zur selektiven Anreicherung bestimmter Mikroorganismen. Eine Anreicherung bestimmter Mikroorganismen kann allerdings auch andere Ursachen wie z.B. eine Kontamination der Lüftungsanlage oder der Oberflächen der Fahrerkabine haben. Auch kann es in Fahrerkabinen in Kompostierungsanlage zur Anreicherung bestimmter Mikroorganismen aufgrund einer besonders leichten Verdriftung kommen, die von den speziellen physikalischen Eigenschaften der Mikroorganismen bzw. der Keim-Partikel-Aggregationen herrührt.

Die Anreicherung luftgetragener Actinomyceten im Führerhaus eines Radladers wird bei einem Vergleich der beiden Verlaufskurven in der Abb. 6 deutlich. Die Messungen wurden in der Anlieferungshalle eines Kompostwerks durchgeführt, wobei zeitparallel in der Anlagenhalle und der Radladerkabine gemessen wurde. Der Radlader ist mit einer Staubschutzanlage mit Überdrucküberwachung ausgestattet. Nach den vor Ort gemachten Beobachtungen kam es im Führerhaus des Radladers zu hohen Belastungen durch Mikroorganismen nur im Anschluß an das Öffnen der Fahrtür (z.B. 13.30-13.37 in Abb. 6 oben). Die Konzentrationen luftgetragener Actinomyceten nahmen im Anschluß an die Konzentrationsspitzen jedoch innerhalb weniger Minuten wieder auf Werte deutlich unter 10^4 KBE/m³ ab, wenn die Türen wieder geschlossen wurden. Die Hallenluft war durchschnittlich mit 2×10^5 KBE Schimmelpilzen /m³ und 7×10^4 KBE thermophilen Actinomyceten /m³ belastet. Die Schimmelpilz-Konzentrationen in der Fahrerkabine wurden im Durchschnitt auf unter 3 % der parallel in der Halle gemessenen Werte vermindert. Bei den thermophilen Actinomyceten wurden im Führerhaus hingegen mit durchschnittlich 3×10^4 KBE/m³ noch etwa 40 % der parallel in der Hallenluft gemessenen Werte nachgewiesen.

Aufgrund der weitgehenden Unabhängigkeit der Verläufe der Luftbelastungen in der Anlagenhalle und der Fahrerkabine des Radladers sind Undichtigkeiten im Führerhaus oder Leckagen in der Lüftung vermutlich nicht die Ursachen für die hohen Actinomyceten-Konzentrationen im Führerhaus. Da die Luftbelastung durch Schimmelpilze und Actinomyceten während der Schicht regelmäßig auf Werte im Bereich von 10^3 KBE/m³ vermindert wurden, kamen Kontaminationen der Lüftungsanlage und / oder der Luftfilter als Ursache für die z.T. hohen Belastungen mit Actinomyceten vermutlich ebenfalls nicht in Betracht. Die festgestellte Anreicherung von thermophilen Actinomyceten im Führerhaus beim Öffnen und Schließen der Fahrtür wurde vermutlich durch die bessere Schwebfähigkeit von Actinomyceten verursacht. Die Mehrzahl der Actinomyceten-Spezies sind mit einer Größe zwischen 0,2 bis 1 µm deutlich kleiner als Schimmelpilze und sind daher prinzipiell besser schwebfähig, wenn sie nicht an Grobstaubpartikel gebunden sondern vereinzelt in der Luft vorkommen. In größerer Entfernung zu Emissionsquellen in Kompostierungsanlagen ist dies nach den Erfahrungen der Messungen mit der Korrelierten Partikelzählung meist der Fall. Daß die im Anlieferungsbereich der Kompostierungsanlage Nr. 5 gefundenen luftgetragenen Actinomyceten tatsächlich in der Feinstaubfraktion enthalten waren und daher bereits durch geringe Luftbewegungen (Öffnen und Schließen der Tür) gut im gesamten Führerhaus verteilt werden konnten, zeigen die Befunde der statistischen Abhängigkeiten zwischen Staubpartikel- und Actinomyceten-Konzentrationen über lineare Regression: Ausgeprägte lineare Abhängigkeiten mit Actinomyceten fanden sich nur bei Feinstaub-Partikeln unter 3 µm Größe. Bei den Schimmelpilzen hingegen wurden bei der linearen Regression mit allen gemessenen Partikelgrößen des Einatembaren Staubs hohe Bestimmtheitsmaße erhalten.

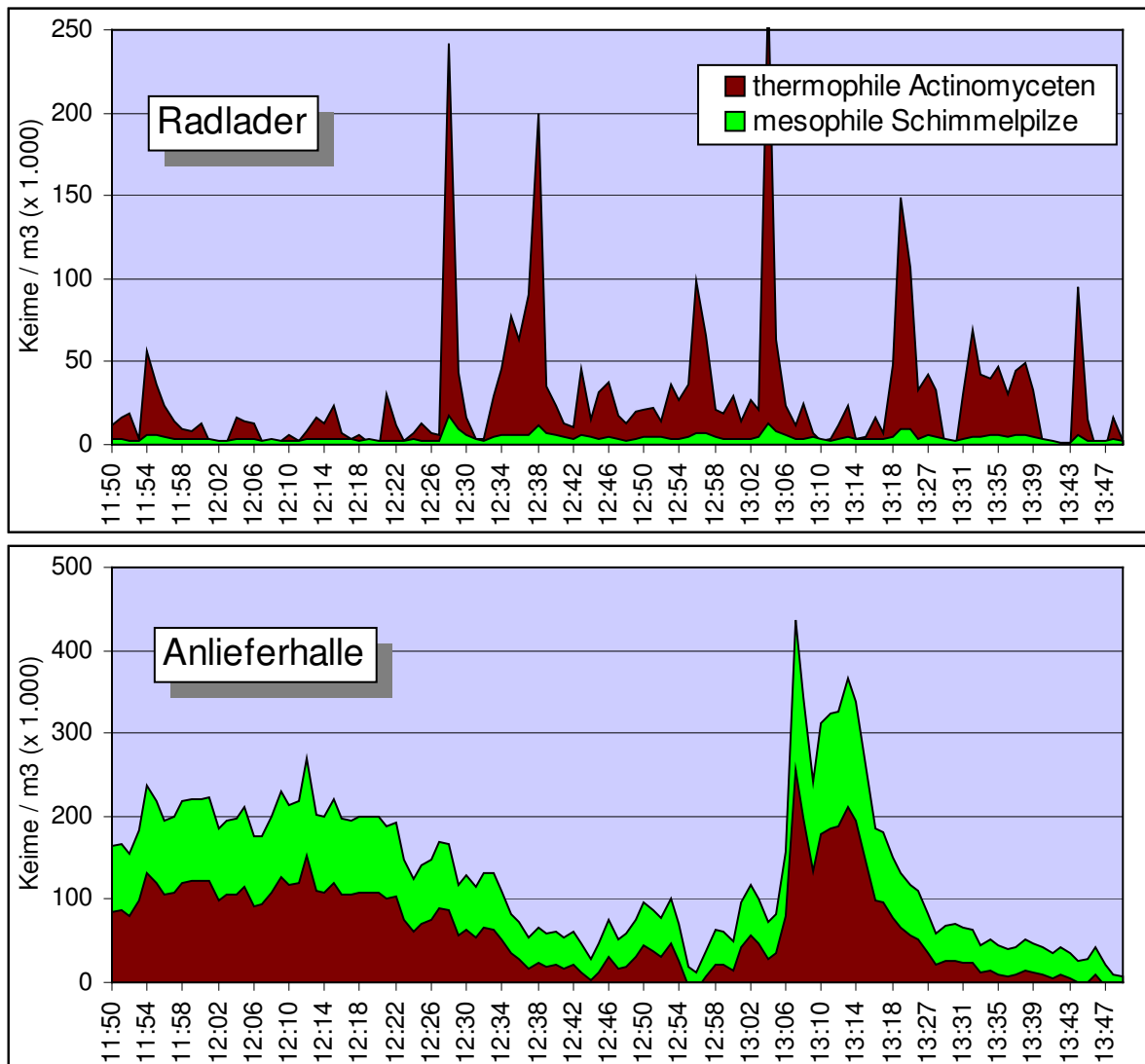


Abb. 6: Verläufe der Konzentrationen luftgetragener Actinomyceten und Schimmelpilze im Anlieferbereich der Kompostierungsanlage Nr. 5 (unten) und in der Fahrerkabine eines hier eingesetzten Radladers (oben). Türen und Fenster waren während des Betriebs des Fahrzeugs geschlossen. Die hohen Konzentrationsspitzen wurden nach Öffnen der Kabinentür beim Ein- und Aussteigen des Fahrers gemessen.

Eine durch ungeeignete Luftfilter verursachte Anreicherung bestimmter Mikroorganismen im Führerhaus eines Radladers wurde bei Messungen in der Kompostierungsanlage Nr. 6 nachgewiesen. Die Fahrerkabine des beprobten Radladers war ebenfalls mit einer Staubschutzanlage ausgestattet. Im Gegensatz zu den Verhältnisse bei der Beprobung des Radladers in Kompostierungsanlage Nr. 5 (Abb. 6) wurde die Fahrerkabine dieses Fahrzeugs jedoch konsequent geschlossen gehalten. Die zeitparallel in Radlader und Anlagenhalle aufgenommenen Verlaufskurven in sind in Abb. 7 gezeigt.

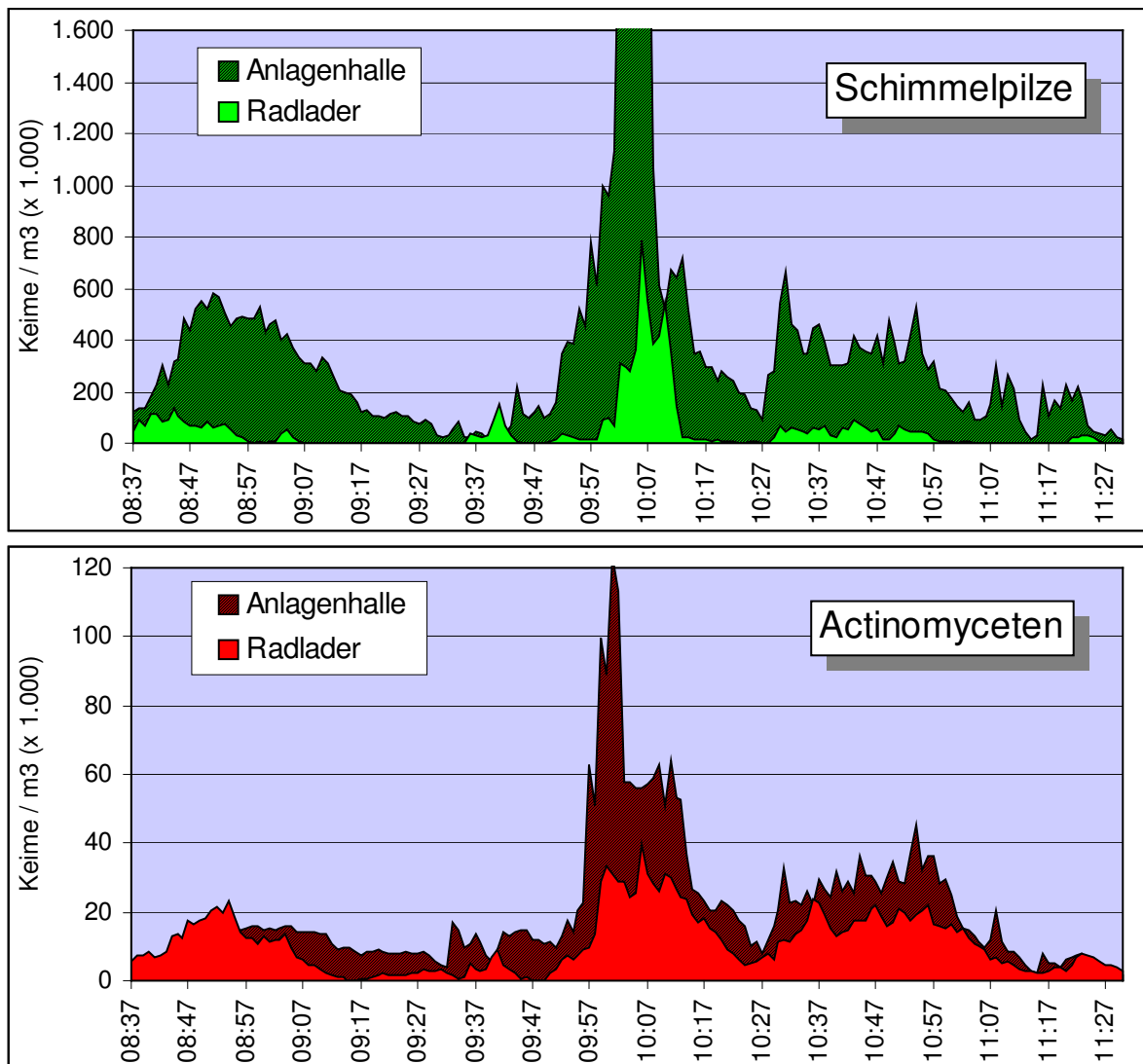


Abb. 7: Verläufe der Konzentrationen luftgetragener Actinomyceten (unten) und Schimmelpilze (oben) im Anlieferbereich der Kompostierungsanlage Nr. 5. Die Verläufe wurden zeitparallel in der Halle (hinten, dunkel) und dem Führerhaus des Radladers (vorne, hell) gemessen.

Die Schimmelpilz- und Actinomyceten-Konzentrationen in der Fahrerkabine wurden gegenüber der zeitweise hoch belasteten Hallenluft im Mittel lediglich um 93 % bzw. 47 % vermindert. Offensichtlich war das Rückhaltevermögen der vorhandenen Luftfilter in bezug auf die thermophilen Actinomyceten besonders stark eingeschränkt. Thermophile Actinomyceten weisen etwa um eine Größenordnung geringere Durchmesser als Schimmelpilz-Sporen auf und können ungeeignete Luftfilter daher generell leichter durchdringen.

Die gegenüber den Verhältnissen in der Hallenluft anteilmäßig erhöhten Konzentrationen an thermophilen Actinomyceten in der Fahrerkabine des Radladers deuten darauf hin, daß die vorhandenen Luftfilter aufgrund zu großer Porenweite ungeeignet bzw. schadhaft sind, so daß die Actinomyceten-Sporen nicht effektiv zurückgehalten werden. Eine Besiedelung der Filter durch Schimmelpilze war aufgrund der im Führerhaus vorgefundenen heterogenen Zusammensetzung der Schimmelpilzflora sowie der schnellen Abnahme der Belastungen nach

Konzentrationsspitzen auf Werte im Bereich der unbelasteten Außenluft eher unwahrscheinlich.

Wie die Abbildungen Nr. 2 bis 7 zeigen, kann die Korrelierte Partikelzählung erfolgversprechend zur Arbeitsplatzanalyse eingesetzt werden, da sie technische und betriebsorganisatorische Mängel erkennen hilft. Durch die Möglichkeit der Darstellung der Luftkeimkonzentrationen in Verlaufsform bieten sich dem Untersucher sehr viel bessere Möglichkeiten zur Einschätzung der längerfristigen Belastungen an einem Arbeitsplatz, als dies bei Stichpunktprobenahmen auf der Basis der Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA 430 und 405) der Fall ist. Darüber hinaus ist das Verfahren sehr gut zur Überprüfung der Einhaltung Technischer Kontrollwerte geeignet. Die Korrelierte Partikelzählung beinhaltet allerdings noch immer Luftkeimmessungen mit entsprechend aufwendigen und z.T. langwierigen mikrobiologischen Untersuchungen. In dieser Hinsicht bietet es keinen Vorteil gegenüber den traditionellen Keimmeßverfahren. Der unschätzbare Vorteil besteht jedoch darin, Keimverläufe wirklichkeitsnah errechnen zu können. Wenn das statistische Verhältnis zwischen Staubpartikel- und Mikroorganismen-Konzentrationen in der Luft an dem jeweiligen Probenahmeort gleichbleibend ist, kann die übliche Keimmessung mit den traditionellen mikrobiologischen Nachweismethoden durch die Staubpartikelmessungen der Korrelierten Partikelzählung direkt ersetzt werden. Das Meßergebnis würde dann bereits nach der Probenahme noch vor Ort verfügbar sein. Um diese Möglichkeiten weiter an möglichst verschiedenen Arbeitsplätzen zu untersuchen, werden derzeit mehrere Forschungsvorhaben im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin sowie von Berufsgenossenschaften durchgeführt, von denen im Folgenden erste Ergebnisse vorgestellt werden.

In den Abbildungen 8 und 9 sind die Regressionsgeraden von neun Messungen, die mit der Korrelierten Partikelzählung in der Sortierkabine einer Wertstoffsortieranlage über die Dauer einer gesamten Arbeitsschicht durchgeführt wurden, zusammengestellt.

Die untersuchte Sortierkabine ist mit einer einfachen Verdünnungslüftung älterer Bauart ausgestattet, eine Absaugvorrichtung für staubbelastete Kabinenluft ist nicht vorhanden. Bei diesem Typ Lüftung sind die Abwurfschächte nicht mit Klappen verschließbar. Die Messungen mit der Korrelierten Partikelzählung wurden bei zwei unterschiedlichen Betriebszuständen der Sortierkabine durchgeführt. In Abb. 9 sind die Ergebnisse der Messungen bei vergleichsweise niedrigen Staubemissionen und -immissionen gezeigt. Die Kabinentüren wurden während der Messungen konsequent geschlossen gehalten. Die nicht mit Personal besetzten Bandabschnitte wurden gekapselt und abgesaugt. Bei diesen Messungen befand sich die Sortierkabine in einem sehr gut gereinigten Zustand, so daß vergleichsweise niedrige Schichtmittelwerte für Schimmelpilze unter 5×10^4 KBE/m³ erhalten wurden. Die Abb. 8 zeigt die Ergebnisse der Messungen bei deutlich höheren Staub- und Keimemissionen in der Sortierkabine. Die Kabinentüren waren bei diesen Messungen häufig und für längere Zeit geöffnet, so daß es zu Keimimmissionen aus der Anlagenhalle in die Sortierkabine kam. Das Sortierband war zum Zeitpunkt dieser Messungen noch nicht gekapselt, so daß die Schichtmittelwerte in der Sortierkabine zwischen 5×10^4 und 10^5 KBE/m³ (Schimmelpilze) lag. Als „Leitfraktion“ für luftgetragene Schimmelpilze wurden in der Sortierkabine dieser Wertstoffsortieranlage Staubpartikel mit dem Durchmesser 2-3 µm ermittelt. Mit dieser Staubpartikel-Größenfraktion wurden an allen neun Meßtagen hohe Bestimmtheitsmaße mit $R^2 > 0,8$ erhalten. Die Partikelfraktion 2-3 µm kann somit als geeignete „Leitfraktion“ für luftgetragene Schimmelpilze im Einatembaren Staub in der Sortierkabine angesehen werden.

Die fünf bzw. vier Steigungen der Regressionsgeraden in Abb. 8 bzw. Abb. 9 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, so daß die jeweilige Staubzusammensetzung bei den beiden Betriebszuständen als weitgehend identisch angesehen werden kann. Bei niedrigem Schutzniveau (Abb. 8) waren die Schimmelpilz-Konzentrationen im luftgetragenen Staub um einen Faktor von etwa drei höher, als bei geschlossenen Kabinentüren und gekapseltem Sortierband (Abb. 9). Die Steigungen der flachsten und die steilsten Regressionsgeraden in Abb. 8 unterschieden sich hierbei lediglich um 30 %. Der Fehler bei der Abschätzung von Schimmelpilz-Konzentrationen ausschließlich auf der Basis gemessener Konzentrationen an Partikeln mit der Größe 2-3 µm ist somit vernachlässigbar gering.

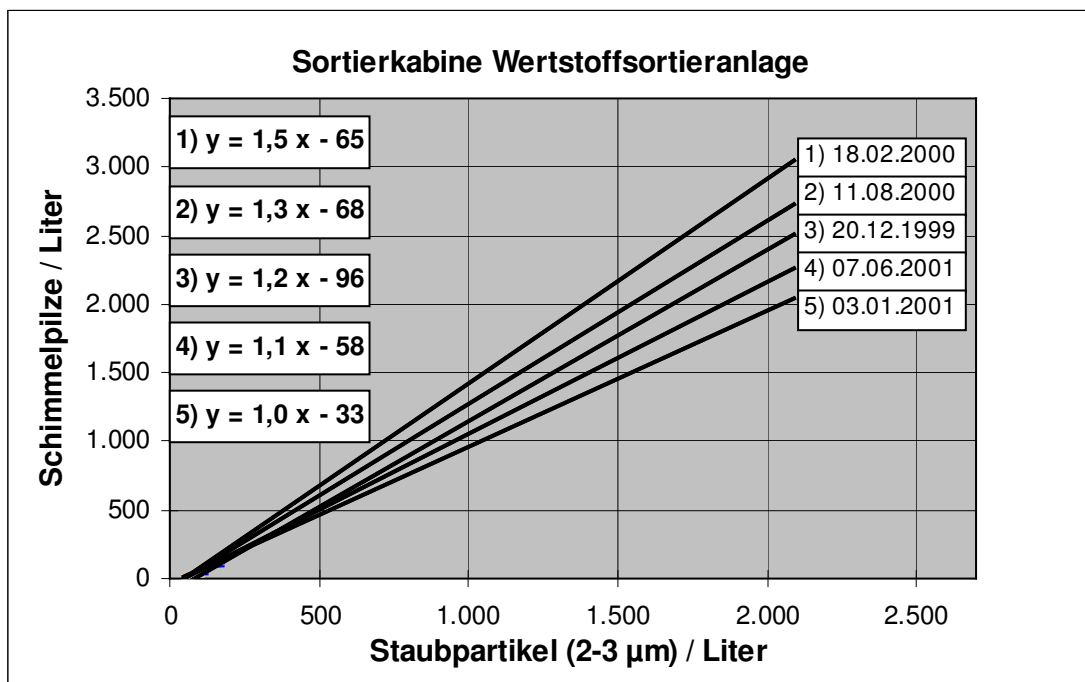


Abb. 8: Lineare Regression der gemessenen Konzentrationen an Staubpartikeln der Größe 2-3 µm und Schimmelpilzen im Einatembaren Staub an fünf Meßtagen in der Sortierkabine einer Wertstoffsortieranlage. Die Messungen erfolgten bei einem vergleichsweise niedrigen Schutzniveau, so daß Schimmelpilz-Konzentrationen im Bereich von 5×10^4 bis 10^5 KBE/m³ meßbar waren (Ergebnisse aus der Forschung im Auftrag der Berufsgenossenschaft für Fahrzeughaltungen).

Die Erhöhung des Schutzniveaus in der Sortierkabine durch Reinigung der Oberflächen, Kapselung des Sortierbandes und Schließen der Kabinentüren bewirkte eine Verminderung insbesondere der Emissionen an Grobstaub-Partikeln in der Sortierkabine. Da bei der Korrelierten Partikelzählung in der Sortierkabine die Abhängigkeiten von Feinstaubpartikeln (2-3 µm) zu den im Einatembaren Staub enthaltenen Mikroorganismen bestimmt werden, sind die Steigungen der Regressionsgeraden bei Reduzierung des Keimgehalts in der Grobstaubfraktion abgeflacht.

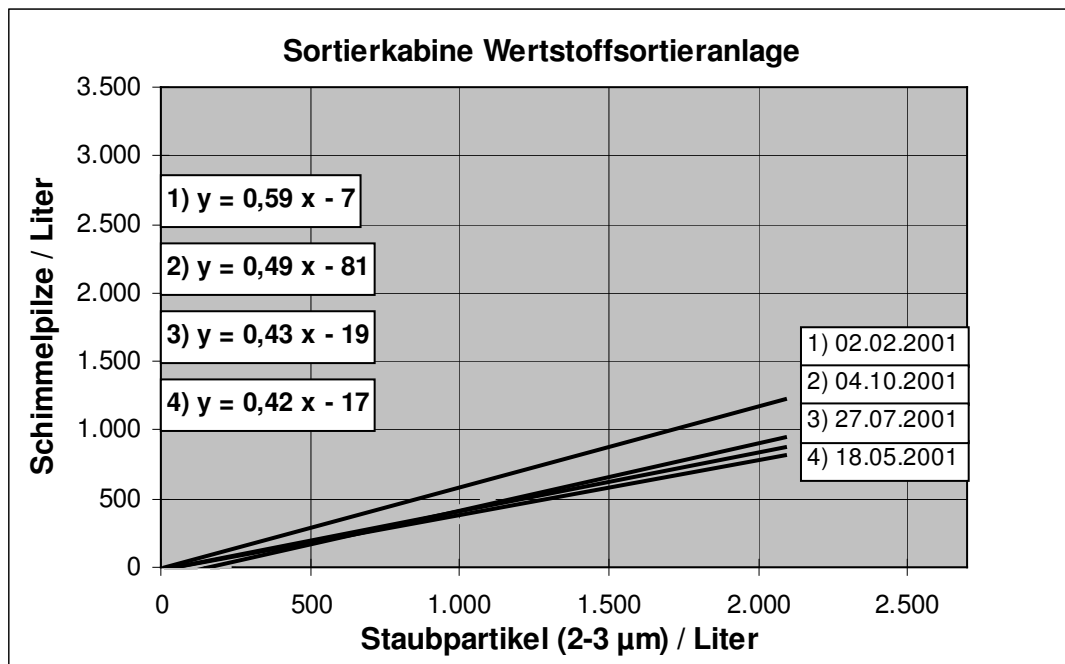


Abb. 9: Lineare Regression der gemessenen Konzentrationen an Staubpartikeln der Größe 2-3 µm und Schimmelpilzen im Einatembaren Staub an fünf Meßtagen in der Sortierkabine derselben Wertstoffsortieranlage. Die Messungen erfolgten bei einem vergleichsweise hohen Schutzniveau, so daß Schimmelpilz-Konzentrationen unter 5×10^4 KBE/m³ gemessen wurden (Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt F1093 der BAuA)

Die Unterschiede zwischen der flachsten Steigung in Abb. 9 und der steilsten Steigung in Abb. 8 überschreiten den Faktor von drei nur knapp. Die statistischen Verhältnisse zwischen den Konzentrationen an Staubpartikeln der Größe 2-3 µm und Schimmelpilzen in Abb. 8 und Abb. 9 waren somit über die Dauer von annähernd zwei Jahren und selbst bei zwischenzeitlich deutlich verbessertem Schutzniveau noch gut vergleichbar. Nach den Ergebnissen von Ringversuchen liegen die Abweichungen der Schimmelpilzmessungen gemäß der TRBA 430 bei Parallelmessungen bereits zwischen drei und fünf.

Ähnliche Befunde mit nur geringer Streubreite im Verhältnis zwischen Staubpartikel- und Schimmelpilz-Konzentrationen wurden auch in den Sortierkabinen und Anlagenhallen anderer Wertstoffsortieranlagen erhalten. Auch in Restabfall- und Gewerbeabfall-verarbeitenden Betrieben wurden über längere Zeiträume relativ konstante statistische Verhältnisse zwischen luftgetragenen Mikroorganismen und Staubpartikeln gefunden. Das Forschungsvorhaben F 5184 der BAuA „Untersuchungen zur Wertigkeit spezifischer IgG-Antikörper bei Exposition gegenüber luftgetragenen biologischen Arbeitsstoffen bei Kompostwerkern“ beinhaltet ebenfalls Messungen mit der Korrelierten Partikelzählung. Ziel der Messungen mit dem Verfahren der Korrelierten Partikelzählung war es zu untersuchen, ob Abhängigkeiten zwischen arbeitsmedizinischen Befunden an Kompostwerkern und den Konzentrationen luftgetragener Partikel bestimmter Größe an den entsprechenden Arbeitsplätzen bestehen. Hierzu wurde zunächst geprüft, ob an Arbeitsplätzen in Kompostierungsanlagen feste statistische Abhängigkeiten zwischen Staubpartikel- und Luftkeimkonzentrationen bestehen. Die Messungen im Rahmen dieser Pilotstudie beschränkten sich auf die Führerhäuser von Radladern (vgl. Abb. 2 bis 5).

Schwierigkeiten können bei dem Verfahren der Korrelierten Partikelzählung dann auftreten, wenn es im Laufe der Messungen zu einer Veränderung des Spektrums emittierter Mikroorganismen kommt. In diesen Fällen kann von einer einheitlichen Zusammensetzung des Bioaerosols nicht mehr ausgegangen werden. Nach den Erfahrungen kommt es im Bereich der Wertstoffsartierung und Abfallaufbereitung aufgrund der guten Durchmischung größerer Materialmengen eher selten zu größeren Schwankungen der Zusammensetzung der Mikroorganismenflora. Zu der regelmäßig nachweisbaren Konstanz des Mikroorganismenspektrums trägt bei, daß die Abfälle in diesen Anlagen lediglich mechanisch und i.d.R. auch innerhalb kurzer Zeit verarbeitet werden. In biologischen Abfallbehandlungsanlagen hingegen kommt es im Laufe der Verarbeitung des Materials prozeßbedingt zu einer Vermehrung von Mikroorganismen und zu starken Verschiebungen in der Zusammensetzung der Mikroorganismenflora im Kompostmaterial, was der Ausbildung konstant zusammengesetzter Bioaerosole entgegenwirkt. Dies erschwert das Auffinden statistischer Abhängigkeiten zwischen Staubpartikel- und Luftkeimkonzentrationen mit der Korrelierten Partikelzählung.

So herrscht im frischen Biomüll eine äußerst heterogen zusammengesetzte mesophile Schimmelpilz- und Bakterienflora vor, darunter auch Krankheitserreger wie z.B. Fäkalstreptococcen und Salmonellen. Mit zunehmender Selbsterhitzung während des Abbaus der leichter verwertbaren energiereichen Nährstoffe werden nicht-sporenbildende Bakterien weitestgehend abgetötet. Bei zunehmender Erhitzung des organischen Materials vermindert sich die Zahl mesophiler Mikroorganismen weiter. Die Mikroorganismenpopulation verschiebt sich hierbei über eine thermotolerante Mikroorganismenflora zu einer thermophilen Flora mit überwiegend thermophilen Actinomyceten, den typischen Mikroorganismen der Hauptrotte. Durch die hohe Temperatur von bis zu 80 °C kommt es zur Selbstabtötung der thermophilen Actinomyceten und zu einer Hygienisierung des Komposts. Der sich abkühlende Kompost wird anschließend wieder von mesophilen Schimmelpilzen und Bakterien, hierbei vor allem Actinomyceten, besiedelt.

In definierten Arbeitsbereichen in Kompostierungsanlagen sind die Staubzusammensetzungen im Hinblick auf die vorherrschende Mikroorganismenflora jedoch weitgehend stabil. Die Untersuchungen in Radladerkabinen im Rahmen der Pilotstudie wurden daher bei dauerhaftem Einsatz der Fahrzeuge beim Schreddern, Umsetzen oder Absieben durchgeführt. Fahrzeuge mit wechselndem Einsatzort während einer Schicht wurden nicht bemessen.

Es wurden drei Radlader beim Umsetzen von Kompostmieten im Bereich der Hauptrotte beprobt. Die Ergebnisse der linearen Regressionen der gemessenen Staubpartikel- und Schimmelpilz-Konzentrationen sind in Abb. 10 zusammengestellt. In allen drei Radladern wurden deutlich ausgeprägte Abhängigkeiten zwischen Schimmelpilzen und Staubpartikeln der Größe 1-5 µm gefunden. Die flachste und steilste Steigung unterschieden sich lediglich um den Faktor von etwa 0,5.

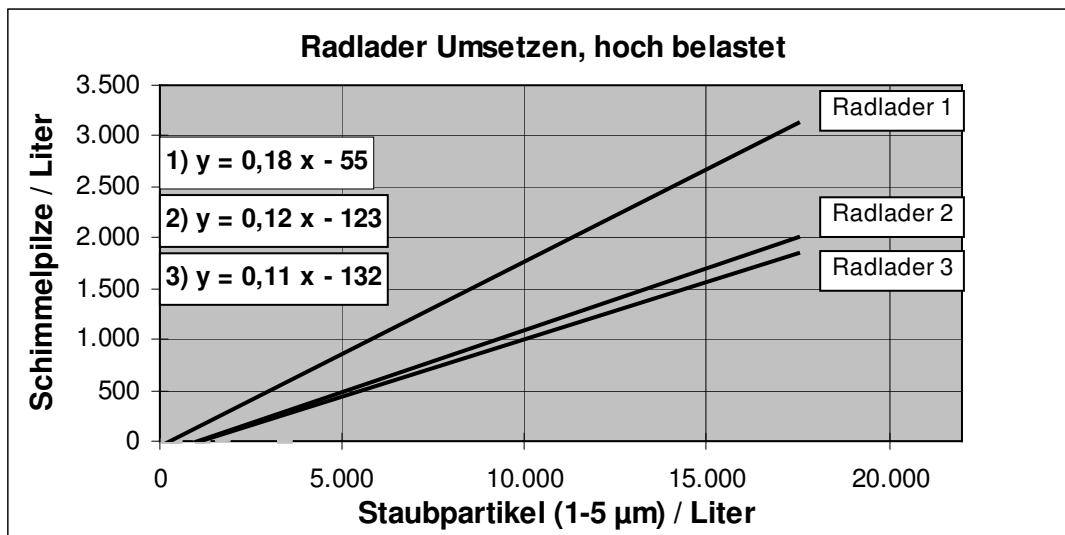


Abb. 10: Lineare Regression der gemessenen Konzentrationen an Staubpartikeln und Mikroorganismen in drei Führerhäusern von Radladern in Kompostierungsanlagen. Die Fahrzeuge wurden beim Umsetzen von Kompostmieten im Bereich der Haupttröte eingesetzt. Gezeigt sind die Regressionsgeraden von Partikeln der Größe 1-5 µm und Schimmelpilzen.

Auch im Bereich der Absiebung wurden in verschiedenen Radladern gut vergleichbare statistische Verhältnisse zwischen Staubpartikel- und Mikroorganismen-Konzentrationen gefunden (Abb. 11, unten). Wie bei den Messungen in der Sortierkabine einer Wertstoffsartieranlage (Abb. 8 und Abb. 9) wurden bei hoch und gering belasteten Fahrerhäusern unterschiedlich steile Regressionsgeraden erhalten, da Feinstaubpartikel die Leitfraktionen für die Belastung des gesamten Einatembaren Staubes mit Mikroorganismen waren (höchste Bestimmtheitsmaße in diesem Partikel-Größenbereich). Die Abflachung der Regressionsgeraden gegenüber der oberen Bildhälfte in Abb. 11 resultiert aus dem vergleichsweise geringen Gehalt an Tracheobronchialstaub- (5-10 µm) und Grobstaubpartikeln (> 10 µm) in gut belüfteten Fahrerhäusern.

Bei Bemessung der Fahrerhäuser von Radladern können nach den Ergebnissen der Untersuchungen Aufwirbelungen mineralischer Inertstaubpartikel vom Boden und hohe Luftfeuchtigkeiten, aber auch Diesruß-Immissionen das Auffinden linearer Beziehungen erschweren. So wurden bei einigen Messungen in Radladern außergewöhnlich niedrige Keimgehalte im Staub gefunden, obwohl die Konzentrationen an Einatembaren Staub im oberen Bereich dessen lagen, was unter vergleichbaren Bedingungen in anderen Radladern meßbar war. Für eine statistische Auswertung der Meßdaten unter den Bedingungen erhöhter Inertstaubemissionen ist die vorliegende Datenmenge allerdings noch zu gering.

Die 17 in dem Pilotprojekt durchgeführten Untersuchungen in 14 verschiedenen Radladern deuten darauf hin, daß die statistischen Verhältnisse zwischen den Konzentrationen an luftgetragenen Mikroorganismen einerseits und Staubpartikeln keimrelevanter Größe andererseits in definierten Arbeitsbereichen auch in Kompostierungsanlagen relativ konstant sind. Bei Kenntnis der statistischen Abhängigkeiten der beiden Parameter voneinander wäre die Abschätzung der Verläufe der Luftkeimkonzentrationen an Arbeitsplätzen ausschließlich auf der Basis von Staubpartikelmessungen möglich. Auf diese Weise wären Funktionsüberprüfungen technischer Schutzmaßnahmen erheblich schneller, zuverlässiger

und kostengünstiger durchführbar, als die mit den kulturellen Verfahren der Technischen Regeln der Fall ist.

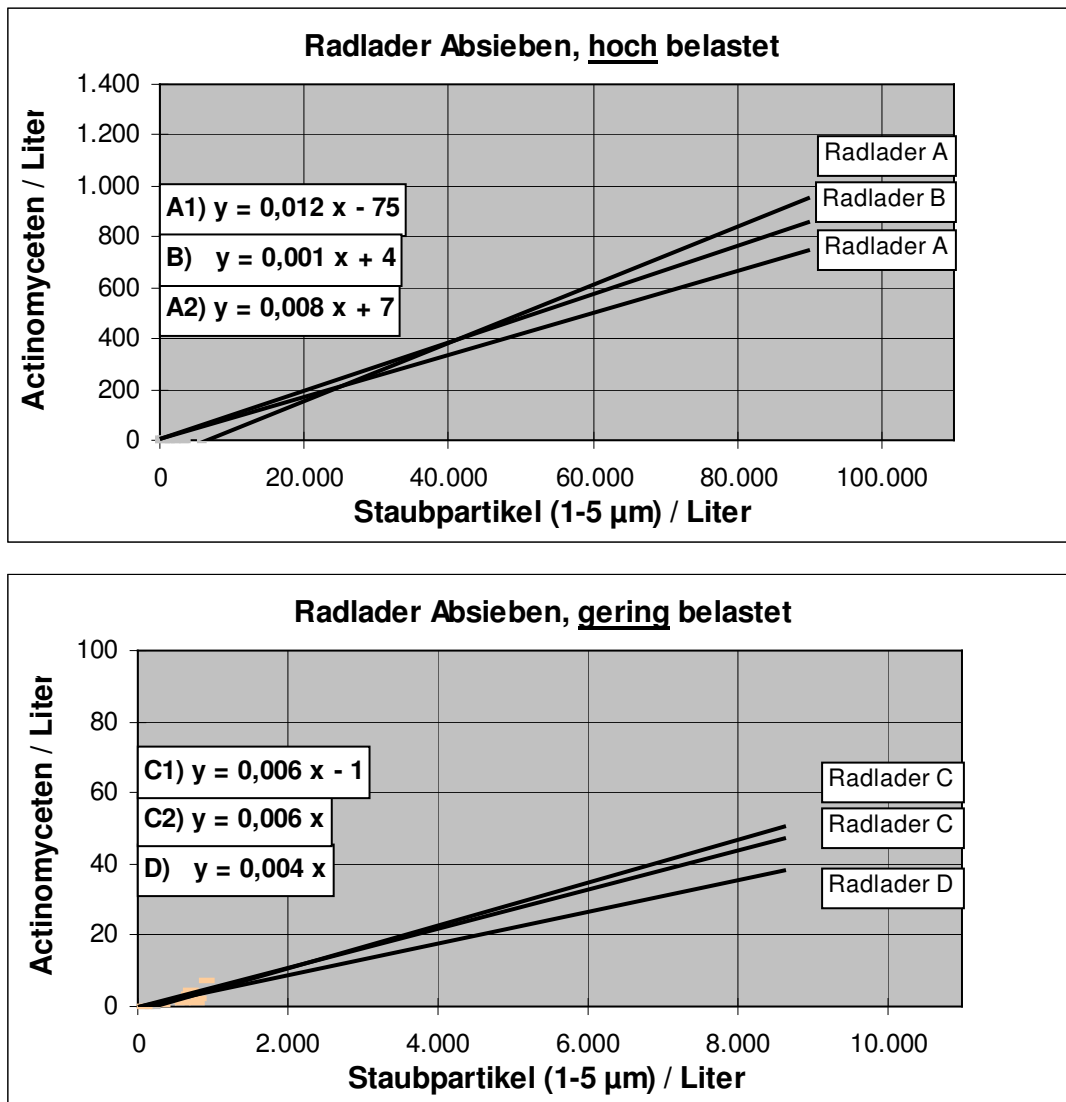


Abb. 11: Lineare Regression der gemessenen Konzentrationen an Staubpartikeln und Mikroorganismen in den Führerhäusern von vier Radladern in verschiedenen Kompostierungsanlagen. Gezeigt sind die Regressionsgeraden von Partikeln der Größe 1-5 µm und mesophilen Actinomyceten. Die Fahrzeuge wurden beim Absieben von Rohkompost eingesetzt. Die Abbildung oben zeigt die Ergebnisse der Korrelierten Partikelzählung in zwei hoch mit Staubpartikeln belasteten Führerhäusern (Radlader A zweimal beprobt). Bei Verwendung von Feinstaubpartikeln für die Lineare Regression fallen die Regressionsgeraden in gering mit Staubpartikeln belasteten Fahrerkabinen etwas flacher aus als in hoch belasteten, da die im Grobstaub enthaltenen Mikroorganismen weitgehend aus der Luft eliminiert wurden. In der Abb. 11 unten sind die Regressionsgeraden in zwei vergleichsweise gering mit Staubpartikeln belasteten Radladerkabinen zusammengefaßt (Radlader C zweimal beprobt).

4 Diskussion

Die Ergebnisse wiederholter Anlagenbeprobungen deuten darauf hin, daß die linearen Beziehungen zwischen luftgetragenen Mikroorganismen und Staubpartikeln an Arbeitsplätzen im Bereich der Abfallwirtschaft über längere Zeiträume konstant sind. Bei vergleichbarem Materialinput wurden in unterschiedlichen Abfallbehandlungsanlagen sehr gut vergleichbare Keimgehalte im luftgetragenen Staub nachgewiesen, was auf eine in weiten Bereichen einheitliche Zusammensetzung der Bioaerosole hindeutet. Diese Befunde lassen es denkbar erscheinen, daß Stichpunktmessungen auf luftgetragene Mikroorganismen bei Kenntnis der statistischen Abhängigkeiten von Luftkeim- und Staubpartikel-Konzentrationen durch kontinuierliche Staubpartikelmessungen ersetzt werden könnten. Dies könnte aufgrund der erheblichen Steigerung des Informationsgehalts der Messungen und der Kostenersparnis z.B. bei Funktionsüberprüfungen von technischen Schutzmaßnahmen an Arbeitsplätzen von großer Bedeutung sein. Durch die Möglichkeit der Darstellung der Luftkeimkonzentrationen in Verlaufsform bieten sich dem Untersucher sehr viel bessere Möglichkeiten zur Beurteilung des Wirkungsgrades Technischer Schutzmaßnahmen und auch zur Einschätzung der längerfristigen Belastungssituation an einem Arbeitsplatz, als dies bei Stichpunktprobenahmen der Fall ist. Darüber hinaus ist das Verfahren sehr gut geeignet zur Überprüfung der Einhaltung Technischer Kontrollwerte, da die Gefahr der Fehlinterpretation zufallsbedingt hoher Meßwerte durch Erhalt der Verlaufskurven minimiert wird.

Voraussetzung für das Ersetzen von Keimmessungen durch Staubpartikelmessung ist nach den Ergebnissen der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen allerdings eine sehr weit gehende Vergleichbarkeit der Randbedingungen bei den Messungen wie z.B. im Bereich des Raumklimas, der Qualität des bearbeiteten Materials und der Betriebsorganisation. In den Fahrerkabine von Radladern erschweren Inertstaub-Aufwirbelungen vom Boden, hohe Luftfeuchtigkeiten sowie Dieselfuß-Immissionen häufig das Auffinden der linearen Beziehungen. Für die Funktionsüberprüfung der Lüftungstechnik spielen diese Faktoren jedoch eine untergeordnete Rolle, da die entsprechenden Messungen auf stabile Witterungsbedingungen und Zeiten geeigneter Betriebszustände der Anlage gelegt werden können.

Anhand ausgewählter Verlaufskurven von Luftkeimkonzentrationen in verschiedenen Radladerkabinen wurde gezeigt, daß die Luftbelastungen innerhalb weniger Minuten großen Schwankungen um Größenordnungen unterworfen sein können. Die Ursachen für diese Schwankungen sind sehr häufig nicht in einer nachlassenden Leistung der Schutzmaßnahmen zu finden, sondern liegen in veränderten klimatischen oder betriebsorganisatorischen Randbedingungen begründet. Diese Gegebenheit erschwert die Einschätzung des Verlaufs der längerfristigen Belastungssituation an einem Arbeitsplatz und somit eine Beurteilung, ob ein Technischer Kontrollwert als eingehalten gilt oder aber eine Nachrüstung bzw. Erweiterung der Technischen Schutzmaßnahmen notwendig ist.

Die gezeigten Ergebnisse von Luftuntersuchungen an Arbeitsplätzen in Abfallbehandlungsanlagen verdeutlichen die Notwendigkeit der Durchführung einer umfassenden Arbeitsbereichsanalyse, sofern technische Schutzmaßnahmen in bezug auf die Einhaltung eines Technischen Kontrollwerts überprüft werden. Aufgrund der äußerst inhomogenen Verläufe der Luftbelastungen und den vielfältigen Ursachen für die großen Schwankungen muß die Meßstrategie der im Rahmen der Überprüfungen durchgeführten Messungen alle emissions- und immissionsrelevanten Faktoren berücksichtigen. Nur dann kann von einer dauerhaften Einhaltung eines TKW ausgegangen werden. Die in dieser Arbeit

dargestellten Ergebnisse der Arbeitsplatzmessungen zeigen, daß Stichpunktmessungen in vielen Fällen gänzlich ungeeignet für die Überprüfung der Einhaltung Technischer Kontrollwerte sind. Ohne Kenntnis der Verlaufskurven der Luftkeimkonzentrationen gelingt es vielfach nicht zu klären, ob ansteigende Luftbelastungen in Fahrerkabinen bei hoher Exposition des Fahrzeugs Keimen gegenüber auf eine eingeschränkte Funktion einer Belüftungsanlage oder das Fehlverhalten eines Fahrzeugführers (z.B. das Öffnen der Kabinentür) zurückzuführen sind. Auch geben die Ergebnisse von Stichpunktprobenahmen i.d.R. keine Hinweise darauf, ob Luftfilter ungeeignet bzw. schadhaft sind oder aber eine selektive Verdriftung aufgrund unterschiedlicher Schwebefähigkeit von Partikeln zu einer Anreicherung bestimmter Mikroorganismen an Arbeitsplätzen führte.

Mit den derzeit angewandten Meßverfahren ist eine realistische Einschätzung des Wirkungsgrades Technischer Schutzmaßnahmen vielfach nicht möglich. Nach den Erfahrungen können durch Verlängerung der Meßzeiten auf 30 bis 60 Minuten zwar repräsentative Meßdaten auch anhand von Stichpunktmessungen erhalten werden. Wichtige Informationen über die Verläufe der Luftkeimkonzentrationen gehen hierbei jedoch verloren. Eine Zuordnung momentan vorherrschender betriebsorganisatorischer oder klimatischer Randbedingungen zu Einzelmeßwerten wird aufgrund der häufigen Überlagerung verschiedener Einflußfaktoren erschwert. Im Falle einer Verkürzung der Meßzeiten der Einzelprobenahmen auf Minutenbereiche resultiert i.d.R. eine große Streuung der Einzelbefunde, so daß eine hohe Probenanzahl zum Erhalt statistisch abgesicherter Meßdaten benötigt wird. Hierdurch werden i.d.R. unverträglich hohe Kosten bei der Probenahme und Analyse verursacht.

Die anhand von Stichpunktmessungen nachgewiesene Einhaltung eines TKW an einem Probenahmetag läßt nach den gezeigten Ergebnissen vielfach keine Rückschlüsse drauf zu, ob eine ausreichende Wirksamkeit der Schutzmaßnahme auch bei veränderten raumklimatischen und betriebsorganisatorischen Bedingungen gegeben ist. Bei einer meßtechnischen Überprüfung sollten daher zumindest zeitweise auch ungünstige Randbedingungen gegeben sein. Technische Schutzmaßnahmen können aber auch als ausreichend wirksam erachtet werden, obwohl eine Überschreitung des TKW nachgewiesen wurde. Dies kann der Fall sein, wenn eine Erhöhung des Wirkungsgrades beim gegenwärtigen Stand der Technik nicht bzw. nur mit unverträglich hohem Kostenaufwand erreicht werden kann. So können in Sortierkabinen von Abfallbehandlungsanlagen, die mit wirksamen Verdrängungslüftungen ausgestattet sind, sehr häufig Meßwerte oberhalb des TKW erhalten werden. Aufgrund der komplizierten strömungstechnischen Gegebenheiten gelingt ein unmittelbarer Abtransport emittierter Mikroorganismen auch in gut belüfteten Sortierkabinen nicht immer, beispielsweise wenn an einem Arbeitsplatz größere Störstoffe wie Teppiche oder Folien aussortiert werden müssen.

5 Zusammenfassung

Das Labor für Arbeits- und Umwelthygiene führte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Tierhygiene und Tierschutz der Tierärztlichen Hochschule Hannover in den Jahren 2000 und 2001 im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben etwa 70 Messungen in verschiedenen Abfallbehandlungsanlagen über die Dauer einer gesamten Schicht mit dem Verfahren der Korrelierten Partikelzählung durch. Ziel der Untersuchungen war es festzustellen, ob in den untersuchten Anlagen feste lineare Beziehungen zwischen den Konzentrationen an luftgetragenen Mikroorganismen und Staubpartikeln nachweisbar sind und ob die Abhängigkeiten dieser beiden Parameter reproduzierbar sind. Die Untersuchungen dienten

dem Zweck der Entwicklung eines schnellen, zuverlässigen und kostengünstigen Staubpartikel-Meßverfahrens zur Keimzahlbestimmung in der Luft an Arbeitsplätzen.

Die Ergebnisse zeigen, daß in Abfallbehandlungsanlagen in den weitaus häufigsten Fällen stabile lineare Abhängigkeiten zwischen luftgetragenen Mikroorganismen und Staubpartikeln bestimmter Größenfraktionen bestehen und diese Abhängigkeiten mit dem Verfahren der Korrelierten Partikelzählung sehr gut nachgewiesen werden können. Nur in wenigen Anlagen waren keine bzw. sehr schwach ausgeprägte lineare Abhängigkeiten zwischen luftgetragenen Mikroorganismen mit Bestimmtheitsmaßen kleiner 0,6 feststellbar. In nahezu allen dieser Fälle wurden die Ursachen für schwach ausgeprägte Abhängigkeiten gefunden. So können Dieselrußemissionen von Fahrzeugen und Emissionen mineralischer Inertstaubpartikel Schwankungen der Staubzusammensetzung herbeiführen. Ein besonderes Problem stellen kurzzeitige Wasserdampfemissionen in Kompostierungsanlagen dar.

Die genannten Einflußfaktoren führen in der Meßpraxis jedoch nur zu einzelnen Ausreißerwerten bei der Korrelation von Staubpartikel- und Luftkeimkonzentrationen. Die Steigung der Regressionsgeraden wird durch Ausreißermessungen i.d.R. nicht signifikant beeinträchtigt. Die vorliegenden Ergebnisse wiederholter Anlagenbeprobungen deuten darauf hin, daß die linearen Beziehungen zwischen luftgetragenen Mikroorganismen und Staubpartikeln auch über längere Zeiträume weitgehend konstant sind. So wurden bei Wiederholungsmessungen sehr gut vergleichbare Keimgehalte im luftgetragenen Staub nachgewiesen, was auf eine im weiten Bereichen einheitliche Zusammensetzung der Bioaerosole hindeutet. Diese Befunde lassen es denkbar erscheinen, daß Stichpunktmessungen auf luftgetragene Mikroorganismen bei Kenntnis der statistischen Abhängigkeiten von Luftkeim- und Staubpartikel-Konzentrationen durch kontinuierliche Staubpartikelmessungen ersetzt werden könnten.

6 Literatur

- (1) MISSEL, T. (1999): Biologische und physikalische Charakterisierung luftgetragener Partikel an Arbeitsplätzen in der Abfallwirtschaft. Diss. Fachbereich Biologie der Universität Hannover
- (2) MISSEL, T. UND SCHIES, U. (2001). Abhängigkeiten zwischen Staub- und Luftkeimkonzentrationen in Raum- und Außenluft. Tiefbau, Erich Schmidt Verlag, Heft 2, 02/2001, S. 91 - 97
- (3) BÖHM, R., MARTENS, W. UND PHILIPP, (1998). Hygienische Relevanz von Keimemissionen bei Sammlung und Behandlung von Bioabfällen. In: Wiemer und Kern, Witzenhausen-Institut (1998): Bio- und Restabfallbehandlung II, 311 – 344
- (4) BÜNGER, J., MÜLLER, M., RUHNAU, P., SCHULZ, T., WESTPHAL, G., DREEBEN, B., STALDER, K. UND HAILLIER, E. (1999). Erfassung von Exposition und Gesundheitsrisiken durch luftgetragene biologische Arbeitsstoffe in der Abfallwirtschaft. Zbl Arbeitsmed 49 (1999), S. 182-190
- (5) NEUMANN, H.-D., MATHYS, W., RAULF-HEIMSOTH, M., BECKER, G. UND BALFANZ, J. (2001). Gefährdung von Beschäftigten bei der Abfallsammlung und -abfuhr durch Keimexpositionen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fb920 2001, ISSN 1433-2086, ISBN 3-89701-676-1
- (6) SCHAPPLER-SCHEELE, B., HARTUNG, J., SCHÜRMAN, W., MISSEL, T., BENNING, C. UND WEBER, J. (1998). Untersuchung der gesundheitlichen Gefährdung von Arbeitnehmern der Abfallwirtschaft in Kompostieranlagen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, FB 844, 1999, ISBN 3-89701-357-6, ISSN 1433-2086
- (7) AVERDIEK, B., DEININGER, CH., ENGELHART, S., MISSEL, TH., PHILIPP, W., RIEGE, F.G., SCHICHT, B. UND SIMON, R. (1997). Bestimmung der Konzentration Biologischer Arbeitsstoffe in der Luft am Arbeitsplatz - Erster Ringversuch "Schimmelpilze". Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 57, Springer - VDI Verlag 1997: S. 129 - 136
- (8) GÖTTLICH, E., BECK, E.-M., BÖHM, R., DANNEBERG, G., GERBL-RIEGER, S., HOFMANN, R., KOCH, A., KÜHNER, M., KUMMER, V., LIEBL, K., MISSEL, TH., NEEF, A., PALMGREN, U., RABE, R., SCHILLING, B., TILKES, F. UND WIESER, P. (1999). Erfassung von luftgetragenen kultivierbaren Mikroorganismen aus Kompostierungsanlagen - Emission und Immission. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 59, Springer - VDI Verlag 6/1999: S. 209 – 218
- (9) MISSEL, T. (2000). Keim- und Staubbelastung von Müllwerkern bei der Abfallsammlung. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 60, Springer - VDI Verlag 4/2000: S. 150-157
- (10) ANONYM: Bek. des BMA vom August 2001: Die TRBA 211. Biologische Abfallbehandlungsanlagen: Schutzmaßnahmen. In: Bundesarbeitsblatt 08 / 2001