

Ermittlung der Resuspension partikelgebundener radioaktiver Kontamination von urbanen Oberflächen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wettereinflüsse und Gegenmaßnahmen

Abschlussbericht

Das Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz unter dem Förderkennzeichen 3611S60012 durchgeführt

Dauer des Vorhabens:

01.09.2011 - 31.08.2012

Auftragnehmer:

Fraunhofer ITEM
Abt.: Aerosoltechnologie
Nikolai-Fuchs-Str.1
30625 Hannover
Tel: 0511 5350 -117
Fax: 0511 5350-155
Email:
Wolfgang.Koch@item.fraunhofer.de
www.item.fraunhofer.de

Bearbeiter:

Wolfgang Koch, Hubert Lödding, Florentin Lange (Meerbusch)

Zusammenfassung

Eine fundierte Gefährdungsanalyse im Rahmen der nuklearspezifischen Gefahrenabwehr (NGA) erfordert belastbare Erkenntnisse bezüglich der Resuspensionsgefahr von radioaktiven Stoffen, die sich z. B. nach einem Dirty-Bomb-Anschlag auf urbanen Oberflächen niedergeschlagen haben.

In Modellexperimenten wurden Windresuspensionsraten für lungengängige Partikel und deren Zeitabhängigkeit bei der Beaufschlagung repräsentativ kontaminierter urbaner Oberflächen unter realitätsnahen Bedingungen und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wetterbedingungen und Gegenmaßnahmen (Fixierung) gemessen. Darüber hinaus wurden Daten für eine nachvollziehbare, realitätsnahe Modellierung der Einflüsse der durch Personen und die Einsatzkräfte selbst hervorgerufenen Partikelfreisetzung im Außenraum und innerhalb einer Notfallstation durch Gehbewegungen sowie durch sich bewegende Fahrzeuge erarbeitet.

Die Kurzzeitwindresuspensionsraten ($t < 0,5$ h) nach Beaufschlagung von Materialproben für den Außenbereich wie z.B. Straßenbeläge, Glas- und Holzoberflächen, diverse Ziegel sowie Fliesen liegen bei einer Überströmgeschwindigkeit von 6 m/s im Bereich um 10^{-2} 1/h mit einer Variationsbreite von ca. einer Größenordnung, $2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/h für Holzoberflächen und $5 \cdot 10^{-3}$ 1/h für die Straßen- und Kalksandsteinoberfläche. Das Zeitverhalten der Resuspensionsrate, R_R , kann durch $R_R = A \cdot t^{-\mu}$ beschrieben werden, wobei dem Exponent μ der Wert 1,3 für Zeitskalen kleiner als 1 Stunde und der Wert 1 für Resuspensionsbetrachtungen über längere Zeitskalen zugeordnet werden kann. Dieses qualitative Verhalten ist unabhängig von der Windgeschwindigkeit und wurde bis zu Windgeschwindigkeiten von 20 m/s bestätigt.

Werden nasse Oberflächen kontaminiert und anschließend getrocknet, so führt dies zu einer verstärkten Partikelhaftung und die Windresuspensionsraten reduzieren sich um ca. eine Größenordnung. Analog ist die Benetzung kontaminierter, trockener Oberflächen ein probates Mittel der Kontaminationsfixierung. Die Effizienz beträgt für alle getesteten Oberflächen 90 % bei Verwendung von Wasser und 99 % für ein Glycerin-Wasser-Gemisch als Fixierflüssigkeit. Eine Alterung kontaminierter Oberflächen durch mehrtägige Exposition gegenüber Außenluft (ohne Niederschlag!) kann ebenfalls eine Kontaminationsfixierung bewirken. Für poröse Straßenoberflächen wurden Effizienzen von ca. 90 % gemessen im Gegensatz zu glatten Oberflächen, für die kein Alterungseffekt festgestellt wurde.

Neben den stationären Strömungsbedingungen wurden auch instationäre Überströmvorgänge (pulsartige Luftströmung) betrachtet. Diese Situationen repräsentieren die Strömungsbeaufschlagung von Straßenoberflächen durch den Autoverkehr, aber auch die Resuspension durch Gehbewegungen, die im Wesentlichen durch die Verdrängungsströmung der Luft unterhalb der Schuhsohle beim Annähern hervorgerufen wird.

Für die transienten Überströmereignisse wurde der resuspendierte Anteil, R_A , der Oberflächenkontamination gemessen. In kleinskaligen Experimenten in der Kanalapparatur mit Straßenbelagsoberflächen wurde eine Abnahme der Werte der Messgröße mit der Zahl, n , der Beaufschlagungen mit Strömungspulsen gemäß $R_A = A n^{-1.2}$ ($n > 1$) festgestellt. Beim ersten Impuls werden bei 20 m/s ca. 5 % der Bodenkontamination freigesetzt, bei 10 m/s ca. 1,4 %. Diese Werte quantifizieren schon den größten Teil der ablösbaren Kontamination. Der kumulierte Beitrag aller nachfolgenden Ereignisse ist ca. 3,5 % bzw. 0,8 % beginnend mit $R_A = 0,7$ % (20 m/s) bzw. $R_A = 0,15$ % für $n = 2$. Die Strömungsgeschwindigkeit ist entscheidend für die Höhe der Freisetzung der lungengängigen Partikel. Ein Wechsel von hohen zu niedrigen Geschwindigkeiten bewirkt eine erhebliche Reduktion der Resuspensionsrate.

Die Untersuchungen zur Resuspension bei Gehbewegungen wurden im Reinraum durchgeführt. Die Werte des resuspendierten Anteils der lungengängigen Bodenkontamination liegen im Bereich zwischen 0,1 und 1 % bezogen auf die Auftrittsfläche. Dabei spielt die Art und Weise des Gehens eine große Rolle, indem „abrollende“ Bewegungen zu einer geringeren Freisetzung als „stampfende“ führen. Dies lässt sich unmittelbar mit den sich entwickelnden unterschiedlich starken Strömungen zwischen Sohle und Boden erklären. Bei wiederholter Überschreitung ein und derselben Fläche sollte sich eine ähnliche Abnahme des resuspendierten Anteils ergeben, wie bei der transienten Strömungsbeaufschlagung von kontaminierten Testoberflächen in der Kanalapparatur.

Die experimentellen Ergebnisse zur Resuspension bei Einwirkung von Wind und durch von Fußgängern und Fahrzeugen erzeugte pulsartige Luftströmungen sind bei der Analyse von Kontaminationsszenarien angewandt worden. Dazu sind der Betrieb einer Notfallstation im Fall eines schweren Unfalls eines Kernkraftwerkes und ein Kontaminationsereignis durch eine Schmutzige Bombe in urbanem Gebiet im Hinblick auf eine Strahlenexposition von Einsatzpersonal durch resuspendierte radioaktive Stoffe untersucht worden. Damit lassen sich gerechtfertigte Maßnahmen zum Atemschutz von Einsatzpersonal auch in der Frühphase eines solchen Ereignisses beurteilen. Sowohl in einer Notfallstation als auch an einem Dekont-Platz bei der Überprüfung von Personen auf Kontamination und deren weiterer Betreuung kann auch die Resuspension von kontaminierter Kleidung eine wesentliche Quelle für luftgetragenen radioaktiven Staub und in der Folge für abgelagerte radioaktive Stoffe auf dortigen Oberflächen sein.

Aus den experimentellen und analytischen Untersuchungen sind Empfehlungen für einfache Schutz- und Verhaltensmaßnahmen von Einsatzpersonal abgeleitet worden, die eine deutliche Verminderung von

Resuspensionsprozessen und damit einer Strahlenbelastung durch Inhalation bewirken.

Summary

Well-supported hazard analysis as part of the defense against nuclear hazards requires reliable knowledge about the risk of resuspension of radioactive particles deposited on urban surfaces, for example, after a dirty bomb attack.

In model experiments, wind resuspension rates of respirable particles and their time dependence after deposition on representatively contaminated urban surfaces were measured under real-life conditions, taking into account different weather conditions and countermeasures (fixation). In addition, data were generated to enable comprehensible and realistic modeling of the influence of particle resuspension caused by persons and responders themselves by walking movements and moving vehicles, both outdoors and in emergency stations.

After outdoor material samples such as road surface materials, glass and wooden surfaces, different bricks and tiles had been loaded with contaminated material, short-term wind resuspension rates ($t < 0.5$ h) were determined to be about 10^{-2} 1/h at a wind velocity of 6 m/s, with a variation range of approximately one order of magnitude, $2.5 \cdot 10^{-3}$ 1/h for wooden surfaces, and $5 \cdot 10^{-3}$ 1/h for road pavements and brick surfaces. The temporal behavior of the resuspension rate, R_R , can be described by the equation $R_R = A \cdot t^{-\mu}$, with the exponent μ taking the value 1.3 for time scales below 1 hour and the value 1 for resuspension lasting over longer time periods. This qualitative behavior is independent of the wind velocity and has been confirmed up to a wind velocity of 20 m/s.

Contamination of wet surfaces with subsequent drying results in increased particle adhesion, reducing wind resuspension rates by about one order of magnitude. Consequently, the wetting of contaminated dry surfaces is an appropriate measure to fix contamination in place. Its efficacy on all surfaces tested was 90 percent when using water and 99 percent when using a mixture

of glycerin and water as fixation liquid. The aging of contaminated surfaces by exposure to outdoor air (without any precipitation!) for several days can also result in fixation of the contamination. For porous road surfaces, efficacies of approx. 90 percent were measured, in contrast to smooth surfaces where no aging effect was observed.

Besides the stationary air flow conditions, non-stationary flow conditions (pulsating air streams) were also taken into account. These situations represent the transient air flows on road surfaces that result from automobile traffic, but also resuspension due to walking movements, which is caused above all by displacement of air below the shoe sole as it approaches the ground.

For the transient flow events, the resuspended fraction R_A of the surface contamination was measured. In small-scale experiments using a small scale wind duct with road surface materials, a decrease of the resuspended fraction according to $R_A = A n^{-1.2}$ ($n > 1$) was observed where n is the number of transient flow events applied to the surface. At 20 m/s, about 5 percent of the contamination on the ground is resuspended by the first impulse, at 10 m/s it is about 1.4 percent. These values already quantify the major fraction of the resuspendable contamination. The cumulative share of all subsequent events is about 3.5 percent and 0.8 percent starting with $R_A = 0.7$ percent (20 m/s) and $R_A = 0.15$ percent, respectively, for $n = 2$. The flow rate is decisive for the quantity of resuspended respirable particles. A change from high to low flow rates results in a substantial reduction of the resuspension rate.

Experiments to investigate resuspension due to walking were performed in a clean room. The fraction of respirable contaminated particles resuspended from the floor was in the range between 0.1 and 1 percent with reference to the surface area of the foot sole touching the ground. In fact, the walking technique plays an important role here, as a "rolling" motion causes less resuspension than a "stomping" foot. This can be explained directly with the difference in the resulting flows between the

sole and the floor. When walking repeatedly on the same surface, a similar decrease in the resuspension rate as during exposure of contaminated test surfaces to transient flows in the channel setup is to be expected.

The results of experiments investigating particle resuspension due to wind and pulsating air flows caused by pedestrians and automobiles were then taken into consideration in the analysis of contamination scenarios. To this end, we analyzed radiation exposure of first responders from resuspended radioactive materials during operation of an emergency station after a serious accident in a nuclear power plant and during a contamination event in an urban area resulting from a dirty bomb. The results of this analysis enable assessment of appropriate measures to protect responders from inhalation exposure also in the early phase of such an event. Both in an emergency station and at a decontamination point during contamination checking and further support of people, resuspension of particles from contaminated clothes can also be a major source of airborne radioactive dust and, subsequently, of radioactive materials deposited on surfaces at these sites.

From the results of the experimental and analytical investigations, we have derived recommendations for simple measures regarding protection and behavior of responders that will lead to a substantial reduction of resuspension processes and thus of radiation exposure by inhalation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und übergeordnete Zielsetzung	11
2	Stand von Wissenschaft und Technik zur Resuspension	12
2.1	Definitionen	12
2.2	Ergebnisse des vorangegangenen Vorhabens.....	14
2.3	Literaturstudie zur Freisetzung durch Gehbewegungen.....	15
3	Experimenteller Teil	20
3.1	Reinraumexperimente zur Partikelfreisetzung bei Gehbewegungen.....	20
3.1.1	Vorgehensweise.....	20
3.1.2	Ergebnisse.....	23
3.2	Experimente im Strömungskanal	25
3.2.1	Materialien.....	25
3.2.2	Ergebnisse.....	27
4	Simulation der Innenraumkontamination (erster einfacher Modellansatz)	39
4.1	Theoretischer Ansatz.....	39
4.2	Simulationsergebnis	42
5	Schlussfolgerungen aus Resuspensionsmessungen für Expositionsanalysen...	43
5.1	Untersuchte Oberflächen und Staubeigenschaften.....	43
5.2	Zeitabhängigkeit von Resuspensionsvorgängen bei Beaufschlagung durch Wind, herumgehende Personen und Fahrzeuge	46
5.2.1	Resuspension durch Windeinwirkung und deren Zeitabhängigkeit	46
5.2.2	Resuspension durch herumgehende Personen und Einfluss wiederholter Begehung	47
5.2.3	Resuspension von mit Fahrzeugen befahrenen Oberflächen.....	53
6	Exemplarische Analyse von Kontaminationsszenarien.....	61
6.1	Ereignis mit Kontamination urbaner Flächen mit radioaktivem Staub.....	61
6.1.1	Windresuspension	63
6.1.2	Begehung kontaminierter Flächen durch Fußgänger	65
6.1.3	Befahrung einer frisch mit Staub kontaminierten Straße	66
6.1.4	Exposition von Personen auf den kontaminierten urbanen Flächen.....	67
6.2	Kontamination einer Halle mit radioaktivem Staub auf Bodenflächen.....	70
7	Inhalationsbelastung von Einsatzpersonal in einer Notfallstation.....	73
7.1	Einleitung.....	73
7.1.1	Betriebsweise einer Notfallstation	75
7.1.2	Übertragung auf eine Notfallstation	82

7.1.3	Annahmen zur Kontamination von Personen, die eine Notfallstation aufsuchen.	85
7.1.4	Kontamination des Bodens im Schwarzbereich einer Notfallstation durch von Kleidung resuspendierten radioaktiven Staub.....	87
8	Informationen und Empfehlungen für den Einsatzfall bei kontaminierten Flächen	90
8.1	Einleitung.....	90
8.2	Aus den Resuspensionsmessungen abgeleitete Informationen und Empfehlungen für den Einsatzfall	94
9	Literatur	104

1 Einleitung und übergeordnete Zielsetzung

Im Rahmen der nuklearspezifischen Gefahrenabwehr (NGA) ist es erforderlich, über belastbare Erkenntnisse bezüglich der Resuspensionsgefahr von radioaktiven Stoffen, die sich z.B. nach einem dirty-bomb-Anschlag auf urbanen Oberflächen niedergeschlagen haben, zu verfügen, um eine fundierte Gefährdungsanalyse durchführen zu können. Die derzeit verfügbaren, sehr begrenzten Kenntnisse über die zeitliche Entwicklung von Resuspensionsraten und deren Abhängigkeit von Eigenschaften kontaminierter Oberflächen und von Umwelteinflüssen weisen auf eine ausgeprägte Zeitabhängigkeit in den ersten Stunden und Tagen nach dem Ereignis hin. Für die Beurteilung gerechtfertigter Schutzmaßnahmen für das Einsatzpersonal und für die Bevölkerung sowie für die aus radiologischer Sicht zweckmäßigen Dekontaminationsmaßnahmen sollten die benötigten Daten zur Resuspension und Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen, z.B. Fixierung, für repräsentative Oberflächen experimentell bestimmt werden.

Ziel des Vorhabens war die Ermittlung experimentell abgesicherter Windresuspensionsraten und deren Zeitabhängigkeit bei der Beaufschlagung repräsentativ kontaminierter urbaner Oberflächen unter realitätsnahen Bedingungen und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wetterbedingungen und Gegenmaßnahmen. Dabei waren nachvollziehbare, realitätsnahe Modellierungen der Einflüsse z.B. der durch die Einsatzkräfte selbst hervorgerufene Partikelfreisetzung durch Gehbewegungen bzw. eines sich bewegenden Fahrzeugs zu berücksichtigen. Weiterhin sollten noch Fragen, die im vorangegangenen Vorhaben (3609S70005) offen geblieben waren, beantwortet werden. Dazu gehörte unter anderem ebenfalls die Partikelresuspension von kontaminierten Böden in Notfallstationen

Die Daten sollen eine belastbare Abschätzung der Strahlenexposition von Personen durch Inhalation radioaktiver Stoffe infolge Resuspension nach trockener oder nasser Deposition ermöglichen.

2 Stand von Wissenschaft und Technik zur Resuspension

2.1 Definitionen

Zur Quantifizierung von Resuspensionsvorgängen werden üblicherweise zwei Größen verwendet: der Resuspensionsfaktor, R_F , und die Resuspensionsrate, R_R . Diese sind wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}
 R_F [\text{m}^{-1}] &= \frac{\text{Luftkonzentration, } C [\mu\text{g}/\text{m}^3]}{\text{Oberflächenkonzentration, } A [\mu\text{g}/\text{m}^2]} \\
 R_R [\text{s}^{-1}] &= \frac{\text{Resuspensionsflussdichte, } R [\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}]}{\text{Oberflächenkonzentration, } A [\mu\text{g}/\text{m}^2]}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Der Resuspensionsfaktor wird verbreitet zur Berechnung der Inhalationsdosis verwandt. Er wird experimentell aus der Messung der Luftkonzentration (unmittelbar oberhalb der kontaminierten Oberfläche) und der Oberflächenkonzentration bestimmt. Der so gewonnene Zahlenwert berücksichtigt die Vorgänge der Partikelfreisetzung von der Oberfläche, die Dispersion der Partikel im unmittelbar darüber liegenden Luftvolumen und die Redeposition der Teilchen auf die Oberfläche. Von Sehmel wurde schon 1980 eine Vielzahl von Resuspensionsszenarien tabellarisch zusammengefasst. Die Werte von R_F überdecken insgesamt einen Bereich von sieben Dekaden und beziehen sich immer explizit auf das Szenario, für das sie gemessen wurden.

Die Resuspensionsrate gibt den Emissionsmassenstrom an, mit der spezifisch der Ablösevorgang der Teilchen von der Oberfläche quantifiziert

wird. Dieser ist bestimmt vom Wechselspiel zwischen den Haftkräften und den äußeren (aerodynamischen, mechanischen, elektrostatischen,...) Kräften, die auf das Partikel einwirken. Für die Einbindung in Transportmodelle (z.B. atmosphärische Ausbreitung) und für eine systematische Parametrisierung im Hinblick auf Partikel- und Oberflächeneigenschaften ist die Resuspensionsrate die geeignete Größe.

Für eine Innenraumsituation kann näherungsweise folgender Zusammenhang zwischen dem Resuspensionsfaktor und der Resuspensionsrate hergestellt werden.

$$R_F = \frac{R_R \times S}{V \times \Gamma} \quad [2.2]$$

Hierfür ist die Kenntnis der Ausdehnung der kontaminierten Oberfläche, S , des Raumvolumens, V , und der Luftaustauschrate Γ erforderlich.

Ursache der Partikelresuspension sind zum einen hydrodynamische Kräfte, zum anderen transiente oder periodisch wiederkehrende Krafteinwirkungen auf abgelagerte Partikel. Neben Art und Höhe der Krafteinwirkung spielen die Haftkräfte und damit die Oberflächenbeschaffenheit eine Rolle. In einem Übersichtsartikel hat Sehmel Daten zur Partikelresuspension zusammengestellt (Sehmel, 1980). Werte der Resuspensionsrate überdecken einen Bereich von mehreren Größenordnungen bedingt durch die Varianz der Einflussgrößen und der experimentellen Randbedingungen.

2.2 Ergebnisse des vorangegangenen Vorhabens

Im vorangegangenen Vorhaben wurden wichtige Einflussgrößen auf die Kurzzeitresuspension identifiziert. Resuspensionsraten wurden in einer kleinskaligen Resuspensionsapparatur und in Kammerexperimenten gemessen.

Generell spielt die Einwirkungszeit eine wesentliche Rolle. In Einklang mit der Literatur konnte das Kurzzeitverhalten ($t < 2h$) für strömungsbedingte Resuspension durch eine Potenzfunktion mit einem Exponenten im Bereich zwischen -1 und -1.5 beschrieben werden. Wiederholte transiente Krafteinwirkungen führten eher zu einem exponentiellen Abfall der Werte der Resuspensionsraten. Die Resuspensionsrate nahm stark mit der Windgeschwindigkeit zu. Die Staubart hingegen hatte nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Freisetzungsraten.

In Kammerexperimenten wurde unter realistischen Bedingungen die Partikelfreisetzung ausgehend von kontaminierter Kleidung untersucht. Das Niveau der Resuspensionsrate und das Kurzzeitverhalten konnte quantifiziert werden.

Die Ergebnisse bildeten die Grundlage für radiologische Bewertungen und Ableitungen von Schutzmaßnahmen des Einsatzpersonals bei Ereignissen wie z.B. einer Kontamination urbaner Bereiche durch einen Anschlag mit einer schmutzigen Bombe oder beim Betrieb einer Notfallstation.

Die Untersuchungsergebnisse sind in einem BfS-Forschungsbericht detailliert dargestellt (Koch et al., 2012).

2.3 Literaturstudie zur Freisetzung durch Gehbewegungen

Offen blieb die Frage nach der Resuspension ausgehend von kontaminierten Bodenoberflächen durch Gehbewegungen. Die Quantifizierung dieser potentiellen Quelle für inhalative Exposition ist naheliegenderweise für First-Responder beim Betreten kontaminierter Areale und Innenräume von Bedeutung. Da die Untersuchung dieses Freisetzungsvorgangs ein Schwerpunkt des Vorhabens ist, soll auch der Stand der Erkenntnisse an dieser Stelle etwas ausführlicher dargestellt werden. Hierzu wurde eine Literaturrecherche durchgeführt.

In mehreren neueren Publikationen wird über kontrollierte Kammerexperimente, in denen auch die Freisetzung durch Gehen untersucht wird, berichtet. Karlsson et al. (1999) definieren einen Freisetzungsteil als Menge, N_R , der resuspendierten Partikel bezogen auf die Menge $N_{A,S}$, die sich auf der Bodenfläche unterhalb der Schuhsohle befindet.

$$R_A = \frac{N_R}{N_{A,S}} \quad [2.3]$$

In Kammerexperimenten wurde über die Messung der Luftkonzentration der Partikel unter Zuhilfenahme einer Bilanzgleichung für die Anzahlkonzentration der resuspendierte Anteil pro Schritt ermittelt. In der Studie wurden biologische Partikel (*bacillus subtilis*, als 10-20 μm große Cluster vorliegend) ausgebracht. Probanden bewegten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (75 Schritte pro Minute bzw. 300 Schritte pro Minute bei 4 Personen gleichzeitig). Für einen PVC-Fußboden wurde ein Freisetzungsteil von $R_A=5 \cdot 10^{-4}$ bezogen auf die Auftrittsfläche abgeschätzt.

Bezüglich der Aktivität „Gehen“ erlaubt die Messung des Freisetzungsteils bei jedem Schritt eine eindeutige Quantifizierung des Resuspensionsvorgangs. Die Ableitung einer Resuspensionsrate aus diesen Daten erfor-

dert die Festlegung eines Beaufschlagungsszenarios der kontaminierten Fußbodenfläche, d.h. die Angabe über den pro Zeiteinheit von Schritten überdeckten Flächenanteil, \dot{F}_S . Daraus lässt sich dann über

$$R_R = R_A \cdot \dot{F}_S \quad [2.4]$$

eine Resuspensionsrate R_R berechnen.

Es gibt eine Reihe von Publikationen, in denen Resuspensionsraten direkt angegeben werden. Diese beziehen sich dabei dann immer auf die in den Arbeiten unterstellten Szenarien.

Thatcher und Layton (1995) untersuchten unter anderem den Einfluss der Partikelresuspension in einem Einfamilienhaus. Sie betrachteten das Aufwirbeln von Hausstaub, dessen Bodenbelegungsichte sie vorher bestimmt hatten. Resuspensionsraten wurden aus Konzentrationsmessungen und Bilanzgleichungen ermittelt, die Resuspension und Partikeltransfer von außen nach innen als Quellterme und Luftwechsel und Partikeldeposition als Senken berücksichtigen. Für eine vierköpfige Familie mit „normalen“ Aktivitäten ergaben sich im Mittel Resuspensionsraten für lungengängige Partikel im Bereich von $1 \cdot 10^{-4}$ [1/h]. Informationen über den Einfluss spezifischer Parameter für das Gehen, wie z.B. die Geschwindigkeit bzw. die Struktur der Fußbodenoberfläche (glatt versus Teppichboden) können aus dieser Publikation nicht abgeleitet werden.

In kontrollierten Kammerexperimenten ist eine genauere Untersuchung der Vorgänge möglich, da die Bodenkontamination künstlich erzeugt und gut charakterisiert, die Ventilationsrate genau gemessen und andere mögliche Einflussfaktoren wie die relative Feuchte eingestellt werden können. Qian und Ferro (2008) führten Experimente in einer 18m²-Testkammer durch. Unterschiedliche Testflächen (die ca. 30% des Kammerbodens ausmachten) wurden mit lungengängigem, mineralischem Teststaub

(ATD-Teststaub) belegt. Von einem Probanden wurde ein Standardaktivitätsprotokoll bestehend aus Gehen (10 Minuten) und Sitzen (5 Minuten bewegungslos, 10 Minuten mit den Füßen stapfend) abgearbeitet. Je nach Bedingungen und Partikelgröße variierten die gemessenen Resuspensionsraten zwischen 10^{-5} und 10^{-2} [1/h]. Im Mittel lagen die Resuspensionsraten für Partikel mit Durchmessern zwischen 1 und $10\ \mu\text{m}$ oberhalb von 10^{-3} [1/h]. Für einen festen Parametersatz betrug die Variation ca. eine Größenordnung, was auf den Einfluss der Gehart und des Schuhtyps der einzelnen am Experiment beteiligten Probanden zurückzuführen war. "Heftiges" Gehen verursachte mehr Partikelresuspension als sachte Gehbewegungen. Allerdings ist aus Abb. 2.1 ein Einfluss der Gehgeschwindigkeit (steps/min) auf die Resuspensionsrate nicht abzuleiten. Die Autoren weisen auf die Notwendigkeit der genauen Analyse der Wechselwirkungen der Fußbewegungen mit der Bodenoberfläche hin.

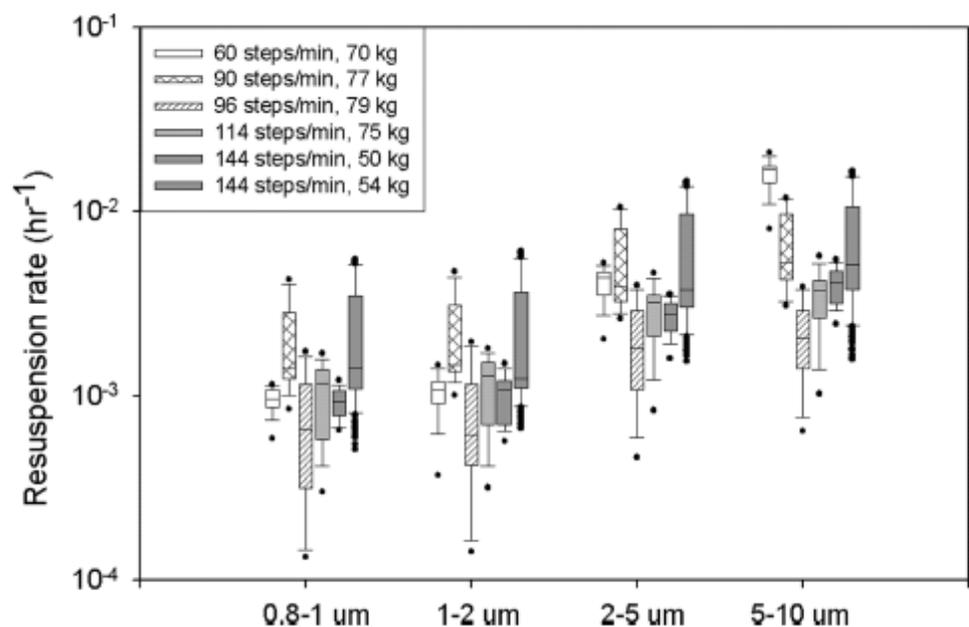


Abb. 2.1 Boxplots der Resuspensionsrate für unterschiedliche Geharten bei sonst gleichen Bedingungen. Mit ATD (Arizona Test Dust) bestaubter alter Teppichboden.

Shaughnessy und Vu (2012) beschreiben ebenfalls Kammerexperimente, bei denen 2m^2 -große Testflächen innerhalb einer $3.66\text{m} \times 2.84\text{m} \times 2.4\text{m}$

großen Freisetzungskammer mit Arizona Test Dust (ATD) kontaminiert wurden. Die Testoberflächen waren alter und neuer Teppichboden sowie ein PVC-Belag. Das Belastungsszenario war ein 10-minütiges Gehen mit ca. 100 Schritten pro Minute innerhalb der Testfläche. Geht man von einer Schuhfläche von 200 cm² aus, so bedeutet diese Aktion eine ca. 10-fache Schrittlüberdeckung der Testfläche. Untersucht wurde die Partikelresuspension im Bereich zwischen 0.8 und 3.0 µm. Die höchsten Werte der Resuspensionsrate von ca. $1 \cdot 10^{-2}$ [1/h] wurden beim Gehen über den PVC-Fußboden gemessen. Generell wurde eine Abhängigkeit der Resuspensionsrate von der Zeit, der Fußbodenstruktur und der Staubelegungsichte festgestellt.

Der eigentliche Freisetzungsmechanismus ist hauptsächlich auf die sich zwischen Sohle und Fußboden ausbildende Luftströmung zurückzuführen. Diese wurde in Modellsystemen mittels Videotechnik und Strömungsvisualisierung, PIV-Messungen (*particle image velocimetry*) und CFD-Simulation von Kubota et al. (2009) und Eisner et al. (2010) untersucht. In der Arbeit von Kubota wird eine runde Scheibe mit konstanter Geschwindigkeit einer staubbelegten Oberfläche genähert und mit einer von der Geschwindigkeit in Abwärtsrichtung unterschiedlichen Geschwindigkeit wieder davon entfernt. Es entstehen dabei eine Druck- und Sogströmung, die beide zu einer Ablösung von Partikeln führen, wie aus der Abb. 2.2 und Abb. 2.3 ersichtlich ist. Eisner und al. führen ganz ähnliche Experimente durch. Sie benutzen einen realen Schuh für ihre Prüfstandsexperimente und betrachten insbesondere den Effekt des Abrollens bei der Gehbewegung (Abb. 2.4). In beiden Arbeiten werden die Strömungen experimentell und in der Arbeit von Eisner auch modelltheoretisch quantifiziert. Die Resuspension wird aber nur qualitativ behandelt.

Diese mechanistischen Untersuchungen unterstützen die Resultate der Kammerexperimente dahingehend, dass die Art und Weise der Gehbewegungen einen großen Einfluss auf die Resuspension hat.

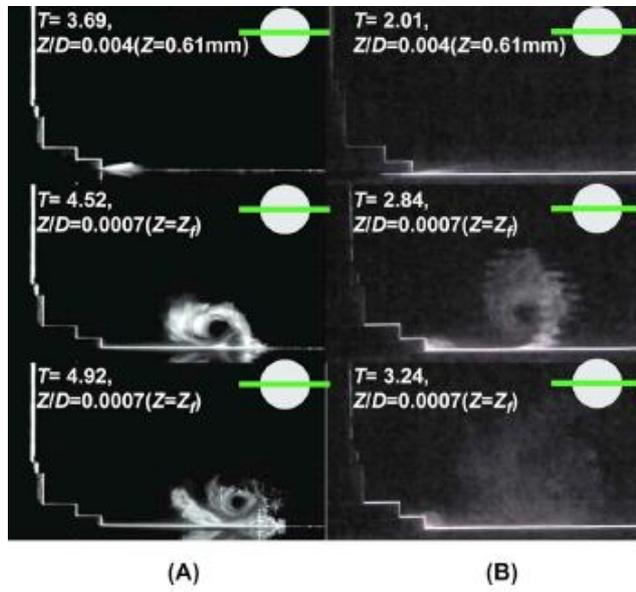


Abb. 2.2 Videosequenz, die die Partikelresuspension unterhalb einer sich dem Boden nähernden runden Scheibe zeigt. A: Stampfen, B: Gehen (Kubota et al.)

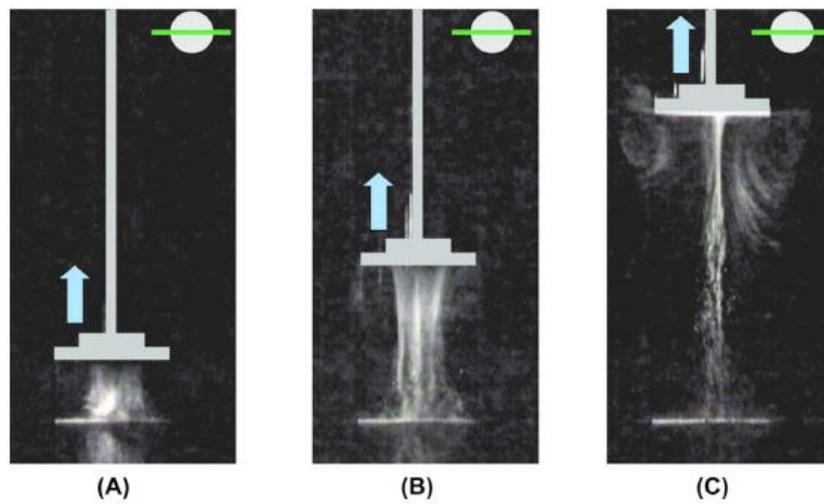


Abb. 2.3 Videosequenz, die die Partikelresuspension unterhalb einer sich dem Boden entfernenden, runden Scheibe zeigt. A: Stampfen, B: Gehen (Kubota et al.)

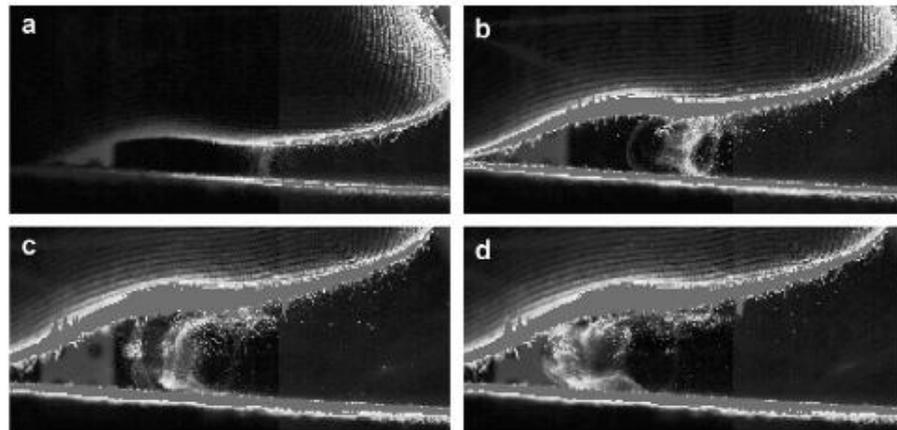


Abb. 2.4 Ablösen von Partikeln beim Abrollen eines Schuhs. Bewegungsrichtung nach oben in der Sequenz a-d (Eisner et al.).

3 Experimenteller Teil

3.1 Reinraumexperimente zur Partikelfreisetzung bei Gehbewegungen

3.1.1 Vorgehensweise

Im Unterschied zur Resuspension von an Oberflächen adsorbierten Partikeln durch meteorologische Phänomene, wie zum Beispiel Wind, die durch die Resuspensionsrate, R_R , definiert ist, wird die Resuspension durch Phänomene, bei denen die Oberfläche nur teilweise betroffen ist - wie ein Fahrzeug, das über einen Teil der Oberfläche fährt, oder ein Fußgänger, dessen Schuhsohlen nur mit einem Teil der Oberfläche in Berührung kommt, - durch die dimensionslose Größe Resuspensionsanteil, R_A quantifiziert.

Zur Messung des Resuspensionsanteils beim Gehen wurde der im vorangegangenen Vorhaben beschriebene Reinraum verwendet. Die Untersuchungen wurden mit einer lungengängigen Fraktion mineralischer Al_2O_3 -Partikeln (MIRA dust, superfine) durchgeführt. Der Staub wurde mit einer eigens erstellten Dosier- und Dispergiervorrichtung im nicht ventilierten

Raum dispergiert. Nach 24 Stunden war die Bodenoberfläche gleichmäßig belegt. Danach wurde der Luftaustausch in Gang gesetzt (Austauschrate 10 h^{-1}), um die Raumluft von restlichen Partikeln zu reinigen. Zur Bestimmung der Belegungsdichte wurden zwei Mikroskopgläser exponiert, die sich auf einem Probenarm in 1.1 m Höhe mittig im Raum bzw. auf halber Distanz zur Wand befanden. Die Messung der Belegungsdichte erfolgte nach dem gleichen Verfahren wie bei den Untersuchungen im Strömungskanal, nämlich durch Absaugen einer definierten Fläche des Probenträger und Messung der Partikel im Absaugstrom mit dem gleichen optischen Partikelzähler, der auch für die Konzentrationsmessungen im Raum verwendet wird.

Die Freisetzungsversuche wurden bei einer Raumventilation von 10 l/h mit partikelfreier Luft durchgeführt. Nach Eintritt der Testperson in den Raum und anschließendem bewegungslosen Verharren war die Partikelkonzentration nach 15 Minuten auf 8% ihres Anfangswerts abgefallen. Zu diesem Zeitpunkt begann die Person mit den ersten beiden Rundgängen einer Dauer von 10 Sekunden, jeweils in Nähe der Seitenwände, gefolgt von einer weiteren Pause von 15 Minuten. Die zurückgelegten Schritte wurden gezählt. Die Partikelkonzentration wurde kontinuierlich gemessen und als 60 Sekundenmittelwerte abgespeichert. Dieser Versuchsablauf wurde während eines Freisetzungsexperiments noch dreimal wiederholt.

Aus den Messintervallen wurde jeweils ein Zeitprofil der Partikelkonzentration erstellt (s. Abb. 3.1). Der Zeitpunkt 0 im Diagramm liegt dabei 30 sec nach dem Beginn der beiden Rundgänge (Dauer ca. 10 sec). Der mittlere exponentielle Abfall aller 4 Zeitprofile ergibt in diesem Fall 0.177 min^{-1} , was gut mit dem Wert auf Grund des 10-fachen Luftaustausches 0.167 min^{-1} übereinstimmt. Aus dem Abfall und dem Anfangswert bei $t=0$ wird auf die tatsächlich emittierten Partikelanzahl, N_R , 25 sec vorher – also zur zeitlichen Mitte der beiden Rundgänge – extrapoliert:

$$N_R = C_{t=25s} \cdot V \quad [2.5]$$

Die Gesamtresuspension, R_S , bezogen auf die von der Schuhsohle berührte Oberfläche berechnet sich damit:

$$R_S = \frac{N_R}{F_S \cdot Z_S}, \quad [2.6]$$

wobei F_S die Sohlenoberfläche und Z_S die Anzahl der Schritte sind. Normierung auf die Flächenbelegung, A , ergibt den bei jedem Schritt resuspendierten Anteil:

$$R_A = \frac{R_S}{A}. \quad [2.7]$$

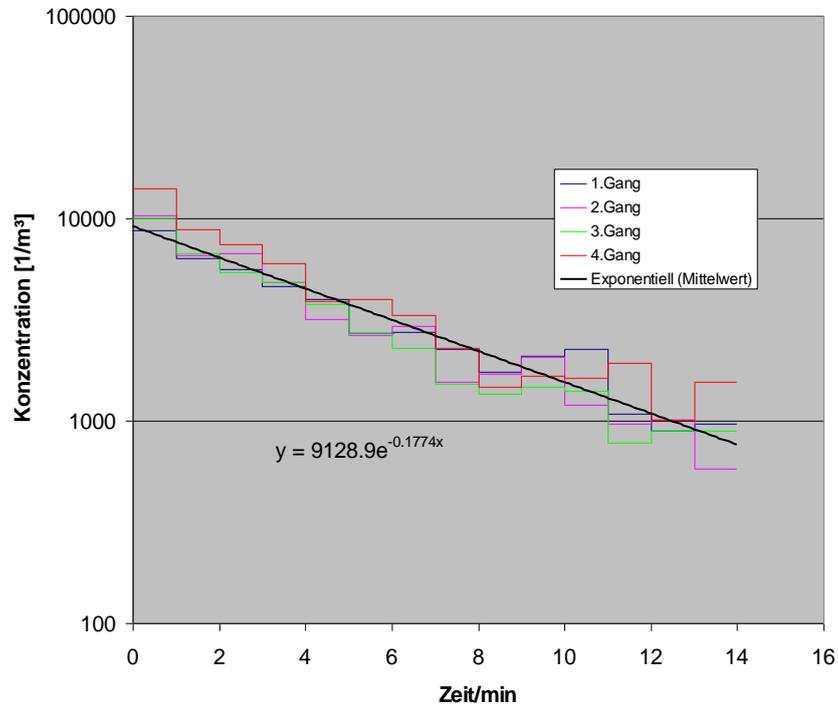


Abb. 3.1: Konzentrationsdaten während der Gehstrecken der Testperson. Exponentieller Abfall während der Bewegungspausen

3.1.2 Ergebnisse

Die Rohdaten einer Messung zeigt Abb. 3.2. Das Ende der Zeiträume der jeweiligen Gehbewegungen von 20 Sekunden Dauer sind durch die Pfeile markiert. Das Signal durch die Partikelresuspension des kontaminierten Fußbodens ist ca. eine Größenordnung über dem Hintergrundsignal, welches durch Gehen auf gereinigtem Boden erzeugt wird.

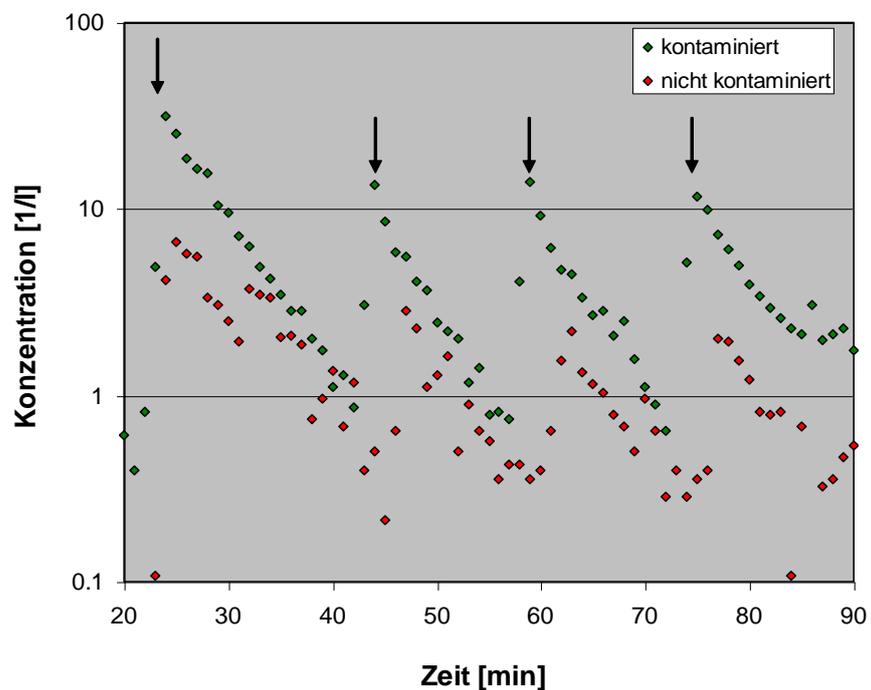


Abb. 3.2: Konzentrationsverlauf eines typischen Experiments zur Bestimmung des resuspendierten Anteils bei Gehbewegungen.

Die Ergebnisse der insgesamt 9 durchgeführten Freisetzungsexperimente im Reinraum (Abb. 3.3) zeigen einen geringen Einfluss der Gehgeschwindigkeit auf den resuspendierten Anteil. Die Art des Gehens hat einen deutlicheren Effekt auf die Resuspension. Geher 1 und insbesondere Geher 4 haben einen abrollenden, sanften Gehstil, während sich Geher Nr. 3 durch einen festen senkrechten Auftritt auszeichnete.

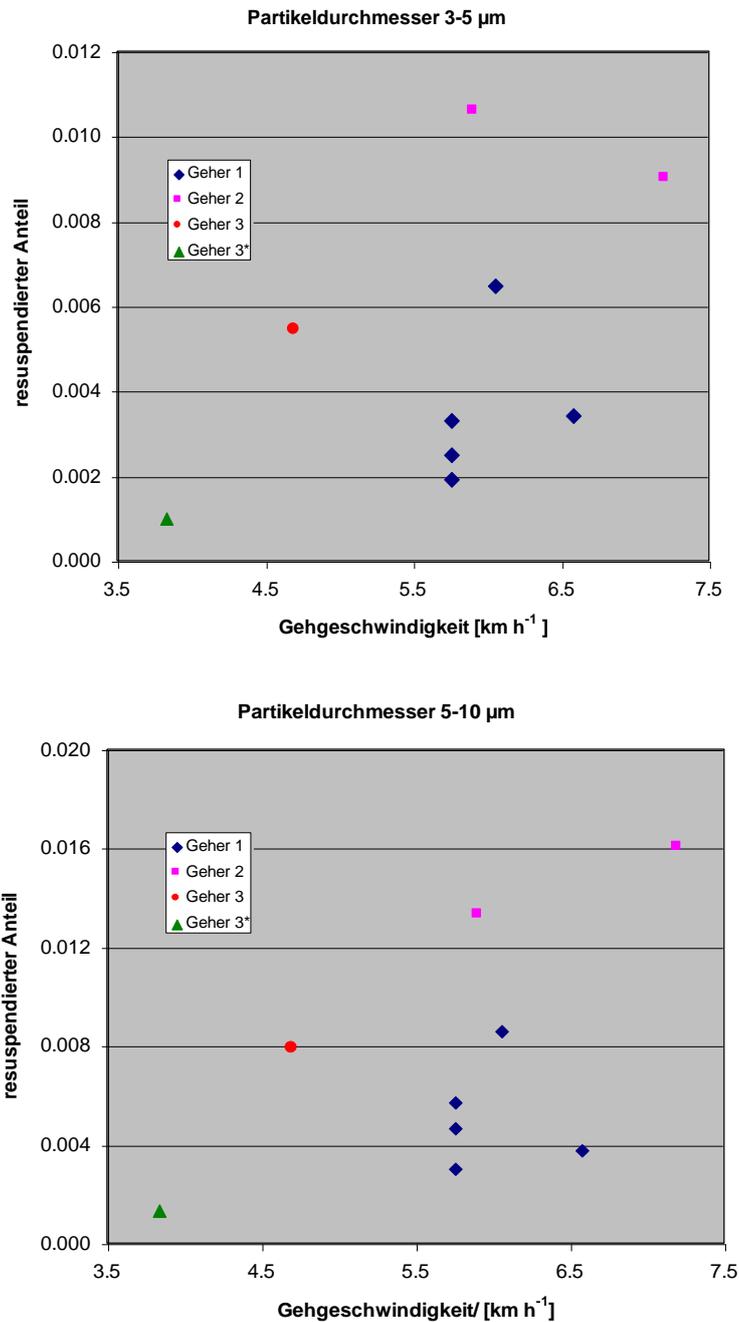


Abb. 3.3: Resuspendierter Anteil für zwei unterschiedliche Partikelgrößenklassen.

Die Partikelgröße ist ein weiterer signifikanter Faktor. So erhöht sich der resuspendierte Anteil um den Faktor 1.6 beim Übergang vom Partikelgrößenkanal 3-5 auf 5-10 µm und um den Faktor 8.4 beim Wechsel von 5-10 auf 10-20 µm.

Aus den Werten des resuspendierten Anteils von 0.2-2 % lassen sich unter Zugrundelegung von Szenarien der Schrittbeaufschlagung der Kontrollfläche auch Resuspensionsraten ableiten. Geht man beispielsweise davon aus, dass innerhalb von $T_R=10$ Minuten ein Anteil, F_A , von 10% der Kontrollfläche mit Schritten überdeckt wurde, so ergibt sich aus

$$R_R = \frac{F_A}{T_R} R_A \quad [2.8]$$

ein entsprechender Wertebereich der Resuspensionsrate von $1.2 \cdot 10^{-3}$ [1/h] bis $1.2 \cdot 10^{-2}$ [1/h].

3.2 Experimente im Strömungskanal

3.2.1 Materialien

3.2.1.1 Testoberflächen

Die im vorangegangenen Vorhaben erstellten Probenträger wurden mit Testoberflächen versehen, die ein relevantes Spektrum von Oberflächen des Außenbereichs abdecken. Hierfür wurden entsprechende Rohmaterialien beschafft und auf die Dimensionen des Probenträgers zugeschnitten. Es wurde auf die Einhaltung eines exakten Höhenmaßes geachtet, damit der Einbau des Probenträgers in den Strömungskanal stufenfrei erfolgt und somit eine Bildung von zusätzlichen Strömungswirbeln vermieden wird. Die meisten Materialien wurden im Baumarkt erworben, Straßenbeläge wurden realen Straßen (Baustellen) entnommen.

Die Abb. 3.4 zeigt eine Auswahl von Oberflächen im Probenträger für die Experimente im Strömungskanal.



Abb. 3.4: Testoberflächen für die Resuspensionsmessungen im Strömungskanal.

3.2.1.2 Oberflächenbelegung und -behandlung

Für die Untersuchungen im Strömungskanal wurden ausschließlich Silberpartikel als Testsystem verwendet. Dies erfolgte vor dem Hintergrund der geringen Abhängigkeit der Windresuspensionsrate von der Staubart und der Möglichkeit, auf Grund der einfachen, sphärischen Geometrie der Teilchen ggf. theoretische Betrachtungen durchführen zu können. In dem vorhandenen Sedimentationsturm wurden ca. 3 g Silberpulver aerosolisiert und durch Sedimentation auf insgesamt 5 Oberflächenproben abgeschieden. Zusätzlich wurden zwei Mikroskopiegläser für die Bestimmung der Belegungsdichte exponiert.

Die Testoberflächen wurden in den meisten Fällen in trockenem Zustand belegt. Bei einigen Messungen wurden die Oberflächen durch Besprühen mit Wasser vorab befeuchtet und anschließend zur Trocknung unter Laborbedingungen gelagert. Wie das rechte Photo der Abb. 3.5 zeigt, führt dieser Vorgang zu einer starken Agglomeration von Partikeln.

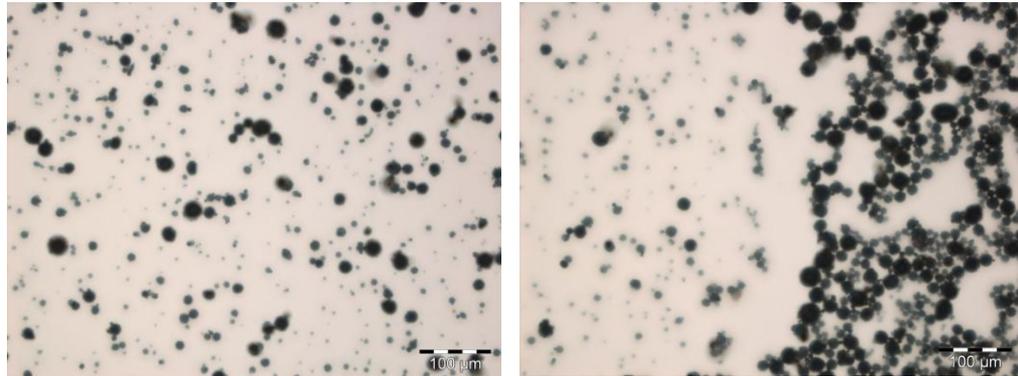


Abb. 3.5: Mikroskopische Aufnahmen deponierter Silberpartikel auf trockener Glasoberfläche (links) und auf nasser Glasoberfläche mit anschließender Trocknung (rechtes Bild).

Die Befeuchtung von Proben wurde auch in einer anderen Reihenfolge vorgenommen. Zunächst wurden die trockenen Oberflächen belegt und anschließend entweder mit Wasser oder mit einem Glycerin-Wassergemisch (60% Glycerin) besprüht. Während das erstgenannte Prozedere die Ablagerung radioaktiven Staubes auf regennassen Oberflächen simuliert, steht das zweite Verfahren für mögliche Fixierungsmaßnahmen auf trockenen Flächen deponierter partikelgebundener Radioaktivität.

Eine weitere Probenbehandlung war die Alterung unter atmosphärischen Bedingungen, jedoch ohne direkte Regen- und Staubexposition. Hierzu wurden die belegten Proben in eine mit gefilterter Außenluft ventilierter Box gebracht. Die Alterungsbox befand sich im Außenraum, sodass die Testoberflächen den natürlichen Temperatur- und relativen Feuchteschwankungen ausgesetzt waren.

3.2.2 Ergebnisse

3.2.2.1 Vergleich der Oberflächen

Ein erster Arbeitspunkt der kleinskaligen Untersuchungen war der Vergleich der Kurzzeitresuspensionsraten für die unterschiedlichen Oberflächen des Außenbereichs. Als Kurzzeitresuspension soll die über die erste

halbe Stunde nach Beaufschlagung gemittelte Resuspensionsrate definiert werden. Zur Messung dieser Größe wurden die unbelegten Proben zunächst gereinigt und anschließend der unspezifische Resuspensionshintergrund (Abb. 3.6) gemessen. Nach der Belegung wurde dann die spezifische Resuspensionsrate nach den Methoden, wie sie im Ergebnisbericht zum Vorhaben 3609S70005S beschrieben sind, gemessen. Die Überströmgeschwindigkeit betrug bei allen Messungen 6 m/s. Um den Anschluss an dieses Vorhaben zu demonstrieren, wurde neben den „neuen“ Oberflächen auch die glatte Fliese mit in das Screeningprogramm aufgenommen.

Die Werte der Kurzzeitresuspensionsraten ($t < 0.5$ h) sind in Abb. 3.7 dargestellt. Die Fehlerbalken sind die Standardabweichungen der Messserien für die jeweiligen Oberflächen. Es wurden zwischen 2 und 4 Bestimmungen der Resuspensionsrate pro Testfläche durchgeführt. Die Standardabweichung überdeckt den Bereich von 15% (Fliese) bis 129% Kalksandstein. Die Resuspensionsraten für Naturschiefer-, Holz- und Glasoberflächen unterscheiden sich signifikant von den Werten der anderen Oberflächen. Insgesamt beträgt die Varianz der Mittelwerte ca. eine Größenordnung. Die Materialien Fliese, Strasse, Kunstschiefer und Kalksandstein befinden sich unter Einbeziehung der Oberflächentypen des vorangegangenen Vorhabens am oberen Ende der Skala; Naturschiefer, Holz und Glas am unteren Ende. Der Anteil der unspezifischen Freisetzung lungengängiger Partikel ist in allen Fällen unter 10% der spezifischen Freisetzung.

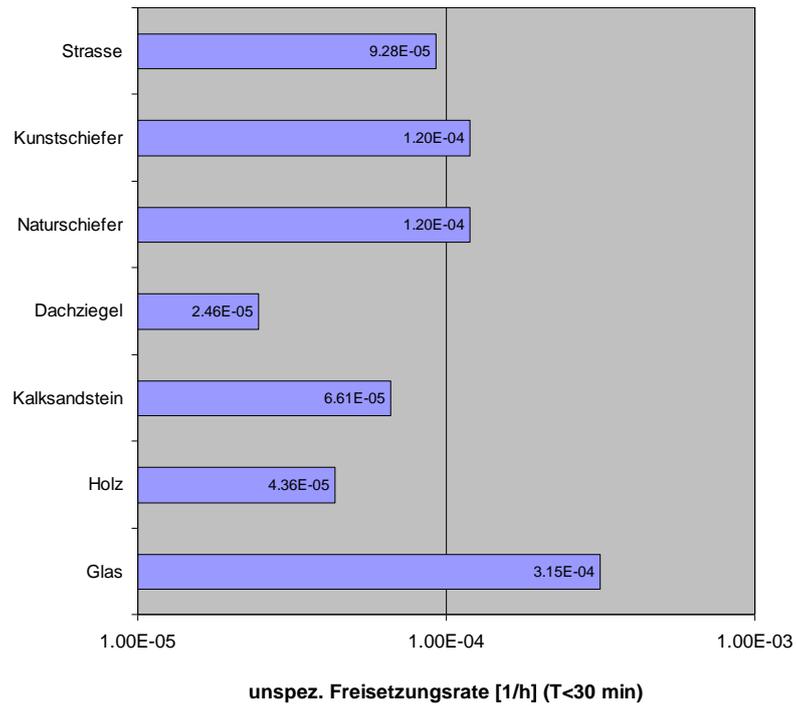


Abb. 3.6: Unspezifische Freisetzungsrate lungengängiger Partikel für die untersuchten Oberflächen bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s.

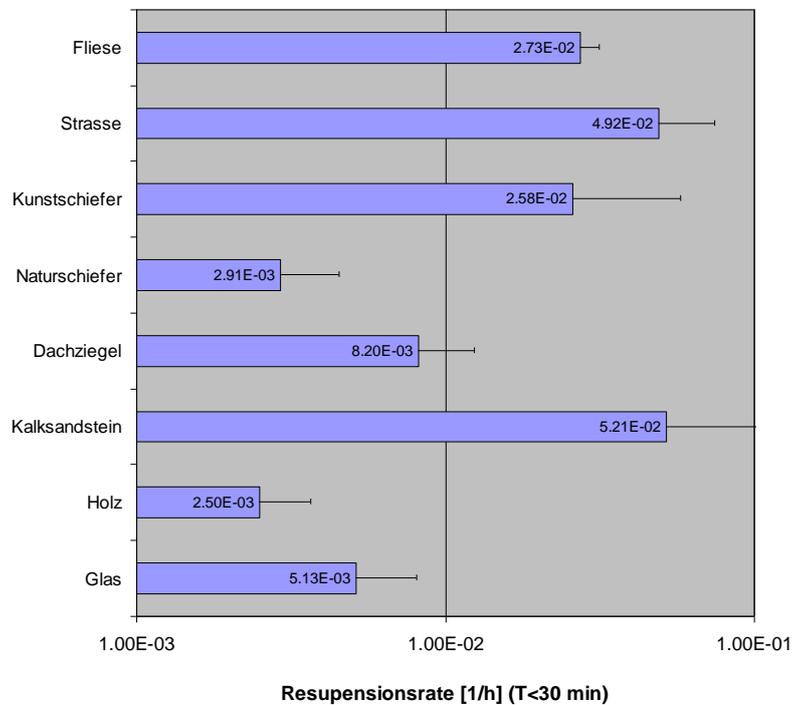


Abb. 3.7: Resuspensionsraten lungengängiger Partikel als Mittelwert über die erste halbe Stunde nach Beginn der Strömungsbeaufschlagung.

3.2.2.2 Einfluss der Oberflächenbehandlung

Ein naheliegendes und in der Praxis auch eingesetztes Verfahren der Fixierung der abgelagerten Radioaktivität ist das Besprühen mit Wasser. Dieses Verfahren wurde an unterschiedlichen Proben simuliert. Die Besprühung der belegten Proben erfolgte mit einer Haushaltsprühflasche. Es wurde eine flächendeckende Flüssigkeitslage aufgebracht und zwar aus reinem Wasser und einem Glycerin-Wasser-Gemisch. Die Resuspensionsmessungen wurden erst nach Verdampfung des Wassers durchgeführt. Im Falle der Glycerinbeimengung blieb allerdings eine Flüssigkeitsschicht zurück. Die Effizienz der Maßnahmen ist sehr deutlich. Allein die Wasserbehandlung führt zu einer Reduktion der Resuspensionsraten um 90%. Bei der Fixierung mit Glycerin verringern sich die Resuspensionsraten um eine weitere Größenordnung im Vergleich zu unbehandelten Oberflächen (Abb. 3.8, Abb. 3.9)

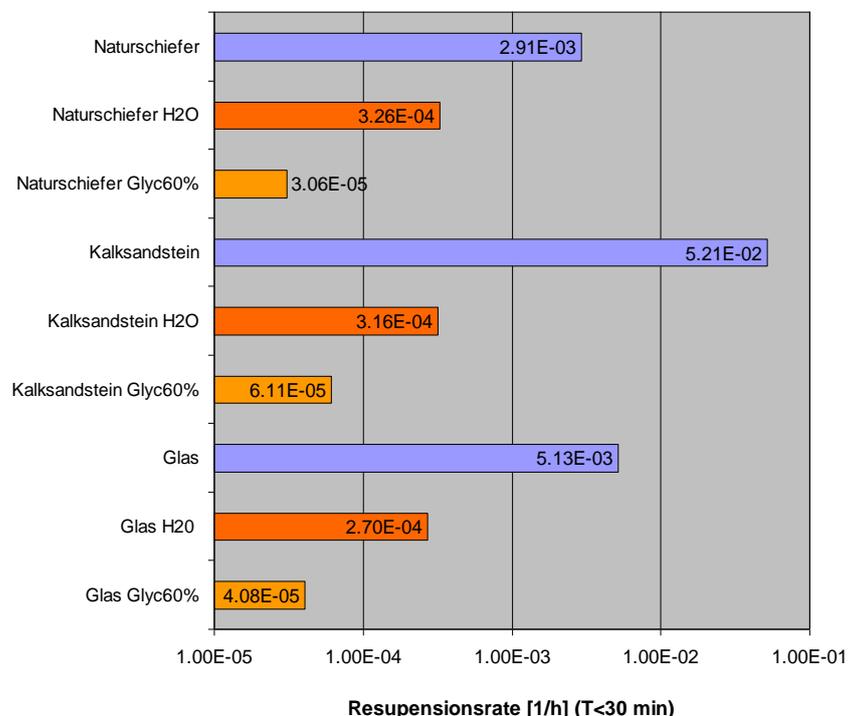


Abb. 3.8: Auswirkung der Besprühung kontaminierter Oberflächen auf die Kurzzeitresuspension.

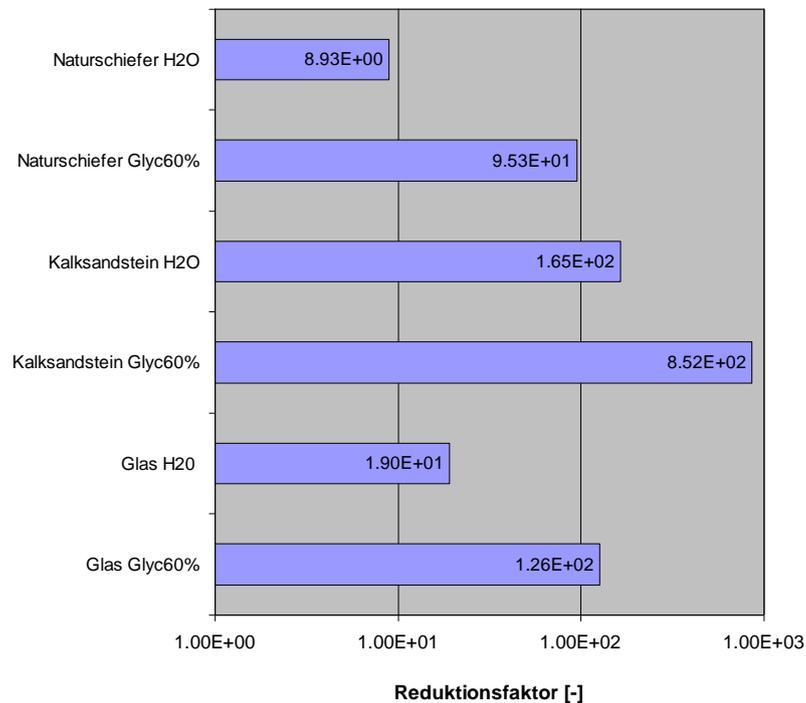


Abb. 3.9: Reduktionsfaktor der Kurzzeitesuspension durch Fixierung der Kontamination mit Wasser und einem Gemisch aus Glycerin und Wasser.

Auch eine Befeuchtung der Oberfläche vor der Kontamination bewirkt eine deutliche Reduktion der Resuspensionsraten. Die Oberflächenproben wurden analog zu oben mit Wasser besprüht und dann unmittelbar danach mit Staub beaufschlagt. Nach der Abtrocknung wurde die Kurzzeitesuspension bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s gemessen. Die Werte reduzieren sich im Vergleich zu denjenigen für trockene Oberflächen um zwei Größenordnungen (Abb. 3.10). Mögliche Ursachen hierfür sind die Agglomeration der Staubpartikel im Zuge des Trocknungsvorgangs und/oder die Migration von Partikeln in tiefere Schichten des Materials bei porösen, wasserresorbierenden Materialien wie z.B. Kalksandstein oder bituminösem Straßenbelag.

Der Einfluss einer 6-tägigen Exposition von kontaminierten Oberflächen gegenüber der Außenluftatmosphäre unter wechselnden Temperatur- und

Feuchtebedingungen (Abb. 3.11) auf die Kurzzeitresuspensionsrate ist offensichtlich vom Oberflächenmaterial abhängig (Abb. 3.12).

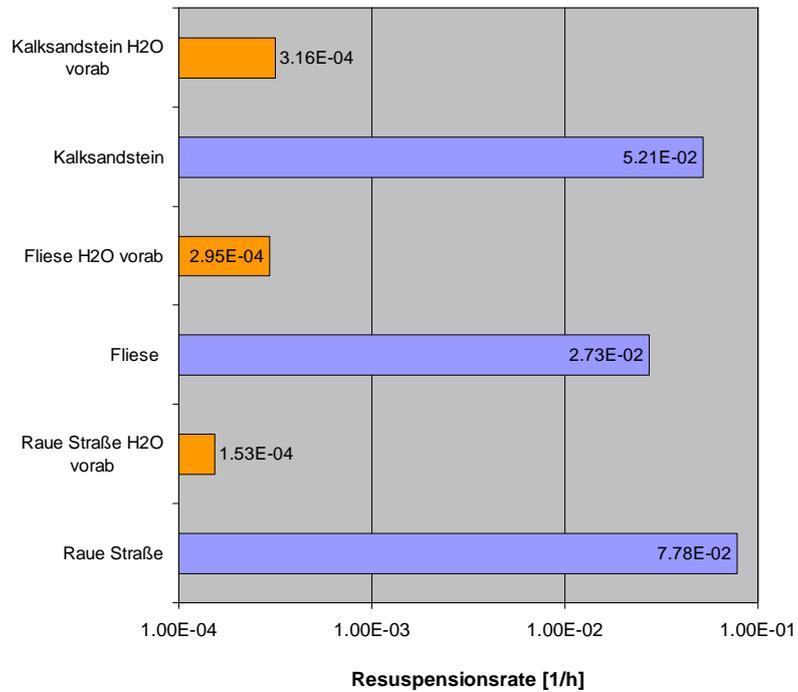


Abb. 3.10: Kurzzeitresuspensionsrate bei Befuchtung der Testoberflächen vor der Kontamination.

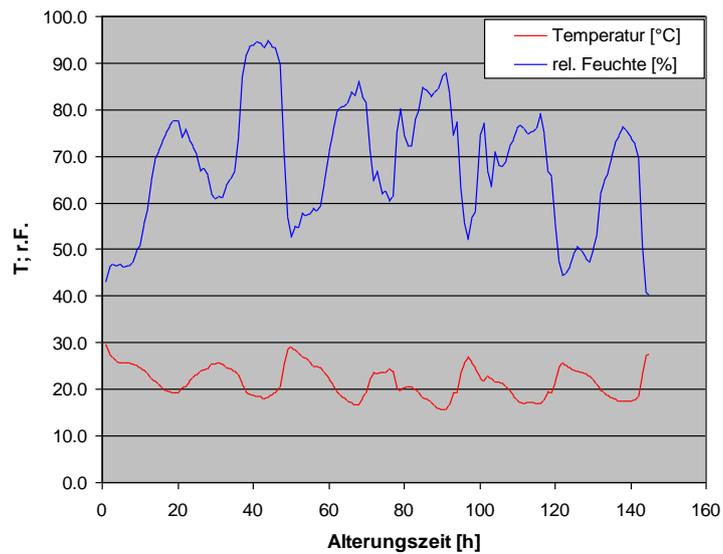


Abb. 3.11: Temperatur- und Feuchteverlauf bei der Alterung kontaminierten Proben unter Außenluftbedingungen.

Beim Straßenbelag zeigt sich ein deutlicher Effekt, während für die Dachziegeloberfläche keine Abnahme der Resuspensionsrate nach der Außenluftalterung der Probe festgestellt wurde.

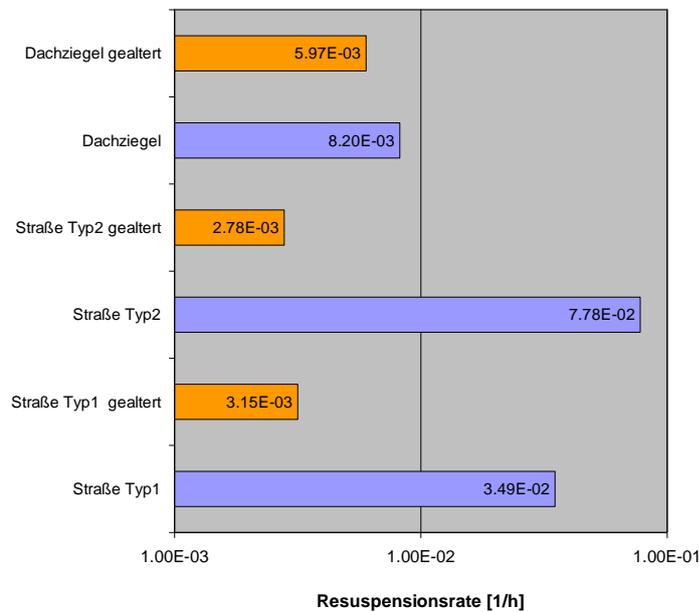


Abb. 3.12: Effekt einer mehrtägigen Probenalterung an der Außenluft. (Die Oberfläche des Straßentyps1 hat eine geringere Rauigkeit als diejenige des Straßentyps 2)

3.2.2.3 Langzeitresuspension

Mit dem Begriff Langzeitresuspension soll der Resuspensionsvorgang über einen Zeitraum von 1-2 Tagen verstanden werden. Entsprechende Untersuchungen wurden für den kontaminierten Straßenbelag (Typ 1) durchgeführt. Die Kurzzeitresuspensionsraten der unbehandelten Straßenoberflächen entsprechen derjenigen der glatten Fliese (Abb. 3.7). Aus Abb. 3.13 ist die Konsistenz der zeitaufgelösten Messungen der Resuspensionsraten dieses Vorhabens mit denjenigen des Vorgegangenen abzulesen.

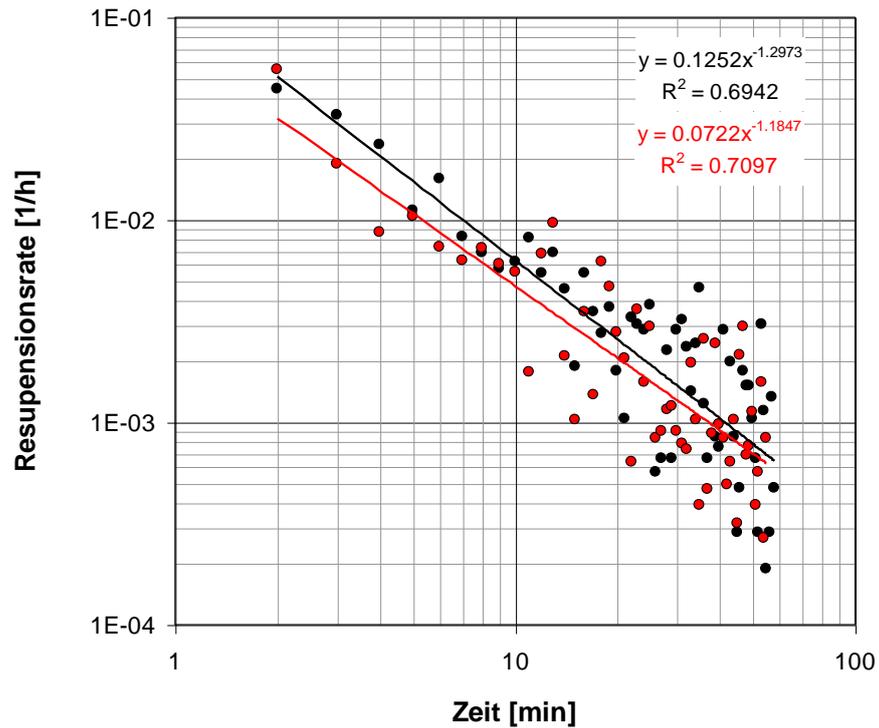


Abb. 3.13: Vergleich der Kurzzeitresuspensionsraten für Silberpartikel auf der Straßenoberfläche (Typ 1) und der glatten Fliese. Datenbasis: 1-Minutenmittelwerte

Der Exponent der die zeitliche Abnahme beschreibenden Potenzfunktion ist kleiner als -1. Verlängert man den Beobachtungszeitraum, so erhöht sich der Wert des Exponenten auf Werte größer als -1. In der Darstellung (Abb. 3.14) wurde die Mittelungszeit aus statistischen Gründen auf eine Stunde (rote Punkte) bzw. 2 h (blaue Punkte) ausgedehnt. Der jeweils erste Punkt (0-1 h bzw. 0-2 h) wurde in der Regressionsanalyse nicht berücksichtigt. Die von Reeks et al. (1988) vorhergesagte $1/t$ -Abhängigkeit ist nicht ganz erfüllt, da die späten Datenpunkte schon im Bereich der Nachweisgrenze des Verfahrens von ca. $1 \cdot 10^{-5}$ [1/h] liegen.

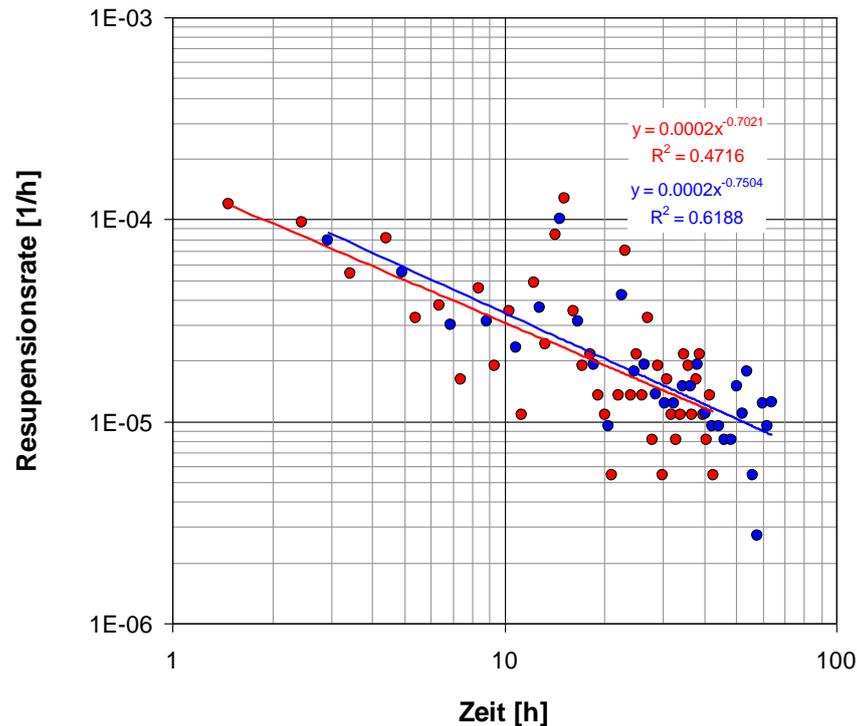


Abb. 3.14: Zeitlicher Verlauf der Resuspensionsrate über einen Zeitraum von 2-3 Tagen bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s. Die Mittelungszeit der Zählzeiten musste auf 1 bzw. 2 Stunden erweitert werden, um Nullwerte zu vermeiden und so eine Anpassung mittels Potenzgesetz zu ermöglichen.

3.2.2.4 Resuspension bei hohen Geschwindigkeiten und „transienter“ Überströmung

Weitere Windkanaluntersuchungen wurden bei einer hohen Überströmgeschwindigkeit von 20 m/s unter stationären und transienten Bedingungen durchgeführt. Hier stand im Wesentlichen die Frage nach der potentiellen Resuspension von auf einem Straßenbelag abgelagerter Kontamination durch den Fahrzeugverkehr im Vordergrund. Für die Durchführung der Untersuchungen wurde die Absaugvorrichtung modifiziert. Es wurden zwei Stutzen verwendet, die jeweils die Hälfte des benötigten Volumenstroms absaugten. Ein Kompensationskessel in der Vakuumleitung wurde entfernt, um bei einer transienten Beaufschlagung einen möglichst steilen Geschwindigkeitsanstieg beim Öffnen des Vakuumventils zu gewährleisten. Der transiente Geschwindigkeitspuls hatte eine Dauer von 3 Se-

kunden. Dies sollte das Überfahren der Kontamination durch ein Fahrzeug simulieren. Kürzere Zeiten waren wegen der Anflutzeiten von ca. 1 Sekunde technisch nicht zu realisieren. Das Vakuumventil wurde manuell geöffnet, die Ventilöffnungszeit von 3 s wurde ebenfalls manuell gestoppt.

Die Ergebnisse der stationären Überströmung bei einer Geschwindigkeit von 20 m/s sind in Abb. 3.15 dargestellt. Die zeitliche Abnahme entspricht mit Exponenten von -1.1 derjenigen, die für die geringeren Geschwindigkeiten gemessen wurden. Die gröbere Oberfläche zeigt insgesamt eine etwas höhere Kurzzeitresuspensionsrate als die glatte (raue Straße versus glatte Straße).

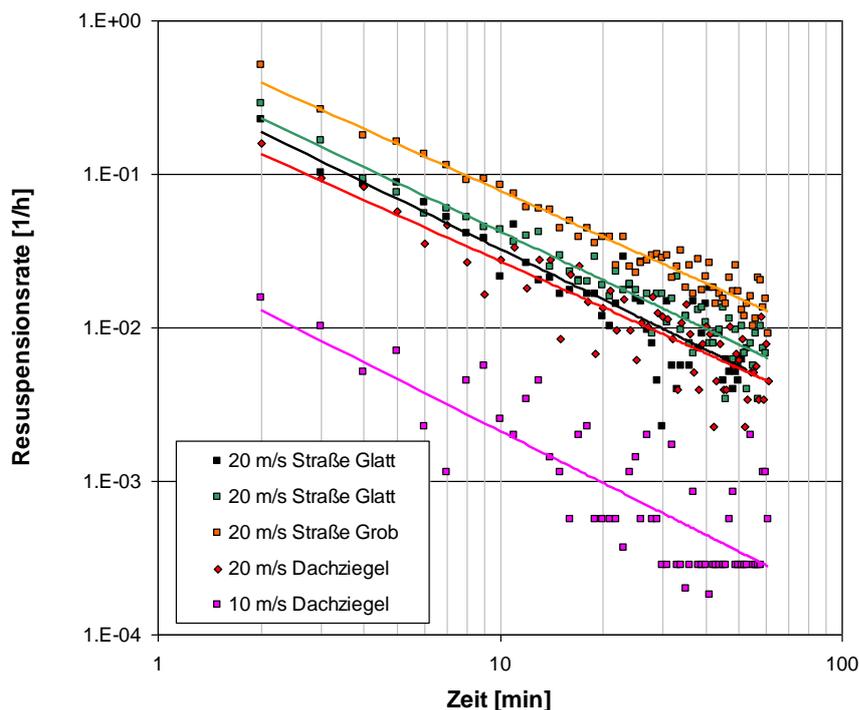


Abb. 3.15: Zeitlicher Verlauf der Resuspensionsrate für eine Windgeschwindigkeit von 20 m/s. Die Datenpunkte nach einer Minute wurden hier nicht berücksichtigt.

Die Werte der mittleren Kurzzeitresuspension (gemittelt über die ersten 30 Minuten) bei 20 m/s passen relativ gut zu den im vorhergehenden Vorha-

ben gemessenen Daten (siehe Abb. 3.16). Der höhere Wert für die raue Straße (grauer Datenpunkt) zeigt sich auch hier.

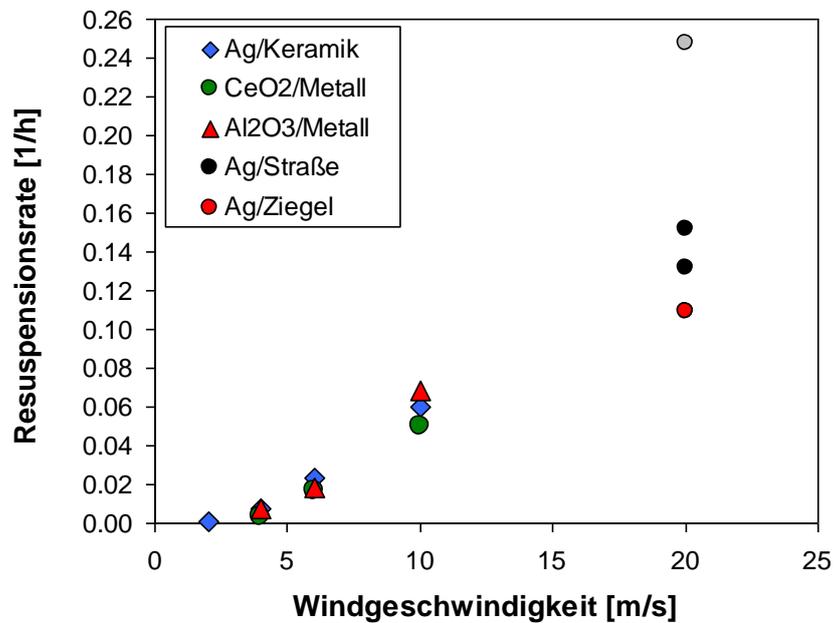


Abb. 3.16 Geschwindigkeitsabhängigkeit der mittleren Kurzzeitresuspensionsrate ($0 < t < 30$ min)

Die Ergebnisse der Messungen unter transienten Strömungsbedingungen finden sich in Abb. 3.17 und Abb. 3.18. Aufgetragen ist der über den dreisekündlichen Beaufschlagungszeitraum resuspendierte Anteil der Kontamination als Funktion der Anzahl der Beaufschlagungen. Die Abnahme erfolgt im Bereich $n > 1$ mit $1/n^v$. Die funktionale Abhängigkeit entspricht derjenigen der kontinuierlichen Beaufschlagung.

$$R_A = n^{-v} = \left(\frac{t}{t_B} \right)^{-v} \propto R_R \quad [3.1]$$

Hierbei sind t_B die Zeitdauer des Strömungspulses und t die kumulierte Überströmzeit.

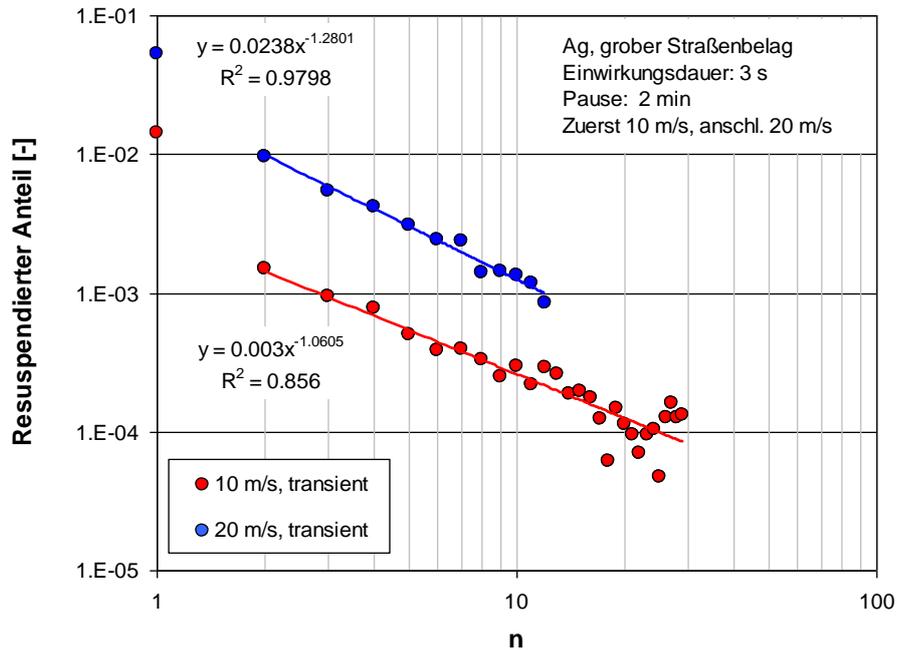


Abb. 3.17: Resuspendierter Anteil als Funktion der Anzahl n der Windstöße

Bei den Messungen in Abb. 3.17 wurden zunächst Pulse mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s aufgegeben (rote Datenpunkte), anschließend wurde die Pulsgeschwindigkeit auf 20 m/s erhöht, wobei der Zähler, n wieder auf 1 gesetzt wurde. Die 20 m/s-Messreihe liegt um einen Faktor von ungefähr 6 über der 10 m/s-Reihe. Der „zeitliche“ Verlauf ist identisch. Beim Übergang von 10 auf 20 m/s werden offensichtlich Partikeln im deutlich höheren Haftkraftbereich aktiviert und abgelöst. Wird zuerst mit 20 m/s beaufschlagt, erfolgt bei anschließender Beaufschlagung mit 10 m/s keine Partikelfreisetzung mehr. In Abb. 3.18 ist der resuspendierte Anteil für 10 m/s unterhalb der Nachweisgrenze des Verfahrens.

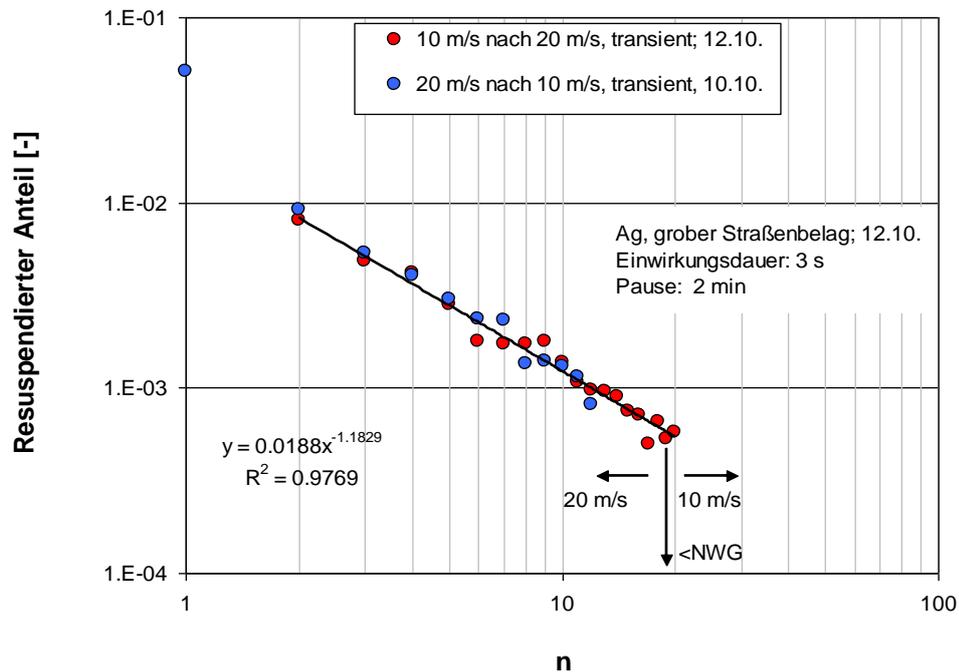


Abb. 3.18: Vergleich der Resuspension bei 20 m/s-Pulsen: vor und nach einer Beaufschlagung mit 10m/s-Pulsen. Die roten Punkte repräsentieren 20 Beaufschlagungen mit 20 m/s. Danach folgen Beaufschlagungen mit 10 m/s. Die Freisetzunganteile sind $<10^{-5}$. Die blauen Punkte sind die Daten aus Abb. 3.17.

Es zeigt sich eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit des Verfahrens. Die transiente Resuspension ist gekennzeichnet durch einen überproportional hohen Beitrag von der ersten Beaufschlagung, gefolgt von dem in Gl. 3.1 dargestellten Verhalten. Ausführung der Summe für $n=2$ bis 20 und $v=1.18$ ergibt einen kumulierten Anteil von 3.8 %.

4 Simulation der Innenraumkontamination (erster einfacher Modellansatz)

4.1 Theoretischer Ansatz

In diesem Kapitel wird eine erste Version eines Innenraummodells zur Berechnung der Aktivitätskonzentration, AK , in Notfallstationen vorgestellt. Hierbei handelt es sich um ein Massebilanzmodell in einem turbulent durchmischten Volumen, V . Die Ventilation ist durch eine Luftaus-

tauschrates, Γ , charakterisiert. Als Quellterme im Raum werden die Resuspension von der Kleidung der sich im Raum befindenden Personen, S_K , sowie die Wiederaufwirbelung von Bodenkontamination durch Umhergehen der Personen, S_G , berücksichtigt. Als Senke werden der Luftaustausch und die Partikelablagerung auf Oberflächen berücksichtigt. Die Bilanzgleichungen lauten wie folgt:

$$\frac{dAK}{dt} = -\Gamma \cdot AK - \frac{v_d}{H_{eff}} AK + \frac{S_K(t)}{V} + \frac{S_G(t)}{V}$$

$$S_G(t) = \tilde{S}_G(t) \cdot F_B \quad [4.1]$$

$$\frac{dF_B}{dt} = AK \cdot v_d$$

Die Quelle für die Resuspension durch Gehbewegungen hängt unmittelbar mit der Fußbodenkontamination, F_B , zusammen, die sich aus Ablagerung luftgetragener Teilchen durch Sedimentation ergibt. Die Population, N_P , kontaminierter Personen in der Notfallstation errechnet sich aus dem Zustrom, \dot{N}_P und der mittleren Aufenthaltszeit, τ_{res} . Legt man für jede Person eine Gehstrecke, L_G und eine Schrittlänge, l_S zu Grunde, so ergibt sich für die Quellstärke bezogen auf die Fußbodenkontamination:

$$\tilde{S}_G(t) = R_A \cdot F_S \cdot \frac{L_G}{l_S} \cdot \dot{N}_P(t) \quad [42]$$

Hierbei sind F_S die Fläche der Schuhsohle und R_A der pro Schritt resuspendierte Anteil der Fußbodenkontamination der Bodenfläche F_S .

Die Quellstärke durch Kontaminationsablösung von der Kleidung wird wie folgt berechnet:

$$S_K(t) = \dot{N}_P(t) \cdot \tau_{res} \cdot F_K \cdot O_K \cdot \bar{R}_{R,K} \quad [4.3]$$

Hierbei bedeuten F_K die Oberflächenkontamination der Kleidung, O_K die Kleidungsoberfläche und $\bar{R}_{R,K}$ die zeitlich gemittelte Resuspensionsrate während des Aufenthalts der Personen in der Notfallstation. Diese berechnet sich aus:

$$\bar{R}_{R,K} = \frac{R_0}{\tau_{res}} \int_{t_V}^{t_V + \tau_{res}} \frac{dt}{t} = R_0 \cdot \frac{1}{\tau_{res}} \ln \left(\frac{t_V + \tau_{res}}{t_V} \right), \quad [4.4]$$

wobei eine durchgängige $1/t$ -Abhängigkeit der Resuspensionsrate vom Zeitpunkt der Kontamination aus gerechnet angenommen wird. Die Größe t_V ist die Verweilzeit zwischen Kontamination und Eintritt in die Notfallstation. Der Zahlenwert von $R_0 = 0.6/60$ (für t in Minuten) kann als konservativer Wert der Abb. 4.1 entnommen werden, die sich aus der kontinuierlichen Schlagbeaufschlagung eines Kleidungsstückes ergibt. Die schwarze Kurve repräsentiert die im Modell verwendete Zeitabhängigkeit der Resuspensionsrate.

Der Zustrom \dot{N}_p von Personen in die Notfallstation wird im Modell nicht als konstant angesehen, sondern es kann eine Zeitabhängigkeit definiert werden.

Das Modell wurde in der Umgebung Excel realisiert. Berechnet werden die zeitlichen Verläufe der Aktivitätskonzentration, der Bodenkontamination und die inhalierte Dosis für ein Atemminutenvolumen von 10 l/min.

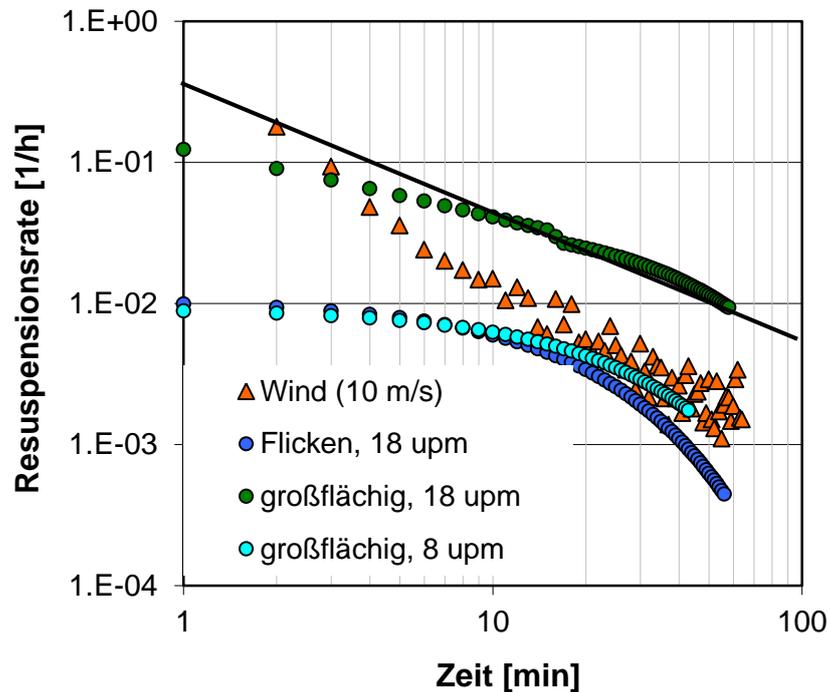


Abb. 4.1 Zeitlicher Verlauf der Resuspensionsraten bei Schlagbeaufschlagung eines kontaminierten Kleidungsstückes.

4.2 Simulationsergebnis

Die Simulation kann an Hand der Abb. 4.2 erläutert werden. Die linke Seite sind die Eingabedaten, der obere Teil der rechten Seite abgeleitete Größen und darunter befindet sich das Simulationsergebnis. Im vorliegenden Beispiel wurde davon ausgegangen, dass 1 Person pro zwei Minuten in den ersten beiden Stunden des Simulationszeitraums von 6 Stunden in die Notfallstation kommt. Während dieser Zeit steigt die Aktivitätskonzentration an. Ein Gleichgewichtszustand wird innerhalb der ersten beiden Stunden bei der angenommenen Luftwechselrate von 0.5 1/h nicht erreicht. Die Bodenkontamination nimmt kontinuierlich zu. Die Zunahmerate ist proportional zur Aktivitätskonzentration.

Eingabedaten

kontaminierte Raumfläche	F	m ²	100
Raumhöhe	H	m	3
Raumvolumen	V	m ³	100
Effektive Sedimentationsstrecke	H _{eff}	m	2
Sedimentationsgeschwindigkeit	v _d	m/min	1.8E-02
Luftaustauschrate	Γ	1/min	0.008
Anfängliche Fußbodenkontamination	F _{B,0}	Bq/m ²	0.0E+00
Anfangskonzentration	AK _A	Bq/m ³	0.0E+00

Abgeleitete Größen

Mittl. Resuspensionsrate_Kleidung	RR_K	1/min	5.5E-04
Quellstärke_Kleidung	SK	Bq/min	2.5E+05
Schrittfrequenz	NS	1/min	1.3E+00
Quellstärke_Gehen / Bodenkontaminatir	SG_Norm	m ² /min	3.8E-03

Rechengrößen

Aktivitätskonzentration	AK	Bq/m ³	
Bodenkontamination	FB	Bq/m ²	
Inhalationsdosis	Dinh	Bq	1.7E+05

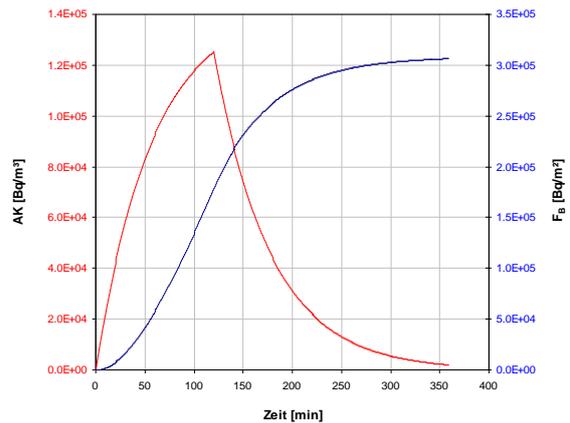


Abb. 4.2: Excel-Programmblatt zur Simulation der Belastung des Hilfspersonals in einer Notfallstation.

5 Schlussfolgerungen aus Resuspensionsmessungen für Expositionsanalysen

5.1 Untersuchte Oberflächen und Staubeigenschaften

Die im ersten Vorhaben mit Luftströmung beaufschlagten Oberflächen waren: feiner Kunstrasen, grauer Kunstrasen, grober Kunstrasen, glatte und grobe Fliese. Im neuen Vorhaben sind weitere Testoberflächen untersucht worden, die insbesondere für städtische Bereiche relevant sind:

- 2 Arten von Straßenbelägen aus Asphalt, in einem Fall eine rauere Variante
- Naturschiefer (hat einen natürlichen Ölanteil) und sog. Kunstschiefer (entweder Kunstharz- oder zementgebundene Platten)
- Dachziegel
- Holz

- Glas
- Kalksandstein

Die Testoberflächen wurden in den meisten Fällen in einem Sedimentationsturm in trockenem Zustand mit Silberpartikeln als Teststaub belegt. Bei einigen Messungen wurden die Oberflächen durch Besprühen mit Wasser vorab befeuchtet und anschließend (an die Belegung) zur Trocknung unter Laborbedingungen gelagert. Dadurch wird die Ablagerung von radioaktivem Staub auf regennassen Oberflächen simuliert. Diese Bedingungen dürften auch einer nassen Deposition durch Regen mit anschließendem Abtrocknen der beaufschlagten Oberfläche nahekommen.

Im vorangegangenen Vorhaben (Koch et al., 2012) sind Feinstäube mit unterschiedlichen chemisch/physikalischen Eigenschaften eingesetzt worden. Es zeigten sich jedoch so geringe Unterschiede im Resuspensionsverhalten, dass in diesem Vorhaben überwiegend nur Silberpartikel eingesetzt wurden.

Bei den Messungen der Resuspension von auf Oberflächen deponierten Partikeln mit der Kanalapparatur erfolgte die Überströmung mit gegebener Strömungsgeschwindigkeit. Eine Beeinflussung der gemessenen Resuspensionsraten infolge einer Lagerung der Probenflächen unter den wenig variierenden Innenraumbedingungen im Labor konnte nicht festgestellt werden. In diesem Vorhaben wurden nun einige Testoberflächen Außenluftbedingungen ausgesetzt, in dem sie vor Regen und Wind geschützt für 6 Tage so gelagert wurden, dass sie die äußeren Änderungen der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte erfuhren. Diesem „Alterungsprozess“ wurden staubbelegte Dachziegeloberflächen und Oberflächen der beiden Repräsentanten für Straßenbelag (Strasse Typ 1 mit geringerer Rauigkeit und Strasse Typ 2) ausgesetzt und der Einfluss auf die Resuspensionsrate bei einer 30-minütigen Luftüberströmung mit 6 m/s im Vergleich zu unter Innenraumbedingungen gelagerten gleicharti-

gen Testoberflächen gemessen. Interessanterweise ergab sich dadurch für die beiden Typen von Straßenbelag eine deutliche Reduktion resuspendierter Anteile. Gemessene Kurzzeitresuspensionsraten waren infolge der „Alterung“ etwa um einen Faktor 10 bei dem Straßenbelag Typ 1 und sogar um rund einen Faktor 30 geringer bei dem raueren Belag des Typs 2. Bei der Dachziegeloberfläche wurde kein Einfluss einer Alterung unter Außenluftbedingungen beobachtet. Die Ursache für die bei beiden Straßenbelägen beobachtete Reduzierung der Resuspensionsrate nach Einwirkung von Umgebungsbedingungen kann man wohl auf die höhere Porosität dieser Oberflächen zurückführen, wodurch es (z.B. durch Kapillarkondensation bei höherer relativer Luftfeuchte) zu einer Verstärkung der auf deponierte Staubpartikel einwirkenden Haftkräfte kommt. Somit kann man erwarten, dass solche Alterungsprozesse unter Außenbedingungen nach einem Kontaminationsereignis im Vergleich zu der unter ungestörten Laborbedingungen gemessenen Resuspensionsrate zu einer schnelleren Abnahme der Resuspensionsrate bei solchen Straßenoberflächen beitragen würden.

Damit liegen jetzt Ergebnisse von Resuspensionsmessungen für 13 Typen von Oberflächen vor, die in dieser oder ähnlicher Form insbesondere in bewohnten Gebieten wie urbane Bereiche vorliegen. Beim Vergleich gemessener Resuspensionsraten zeigten sich zwar systematische Unterschiede zwischen den untersuchten Testflächen, die sich jedoch innerhalb einer Bandbreite von etwa einem Faktor 10 bewegten. Für diese Unterschiede liegen teilweise plausible Erklärungen nahe. So trägt im Fall von Naturschiefer der ölige Anteil dieses Natursteins zu einer verstärkten Haftung von Partikeln bei, wie auch Resuspensionsversuche zum Einfluss eines Besprühens von Oberflächen mit einem Wasser/Glycerin-Gemisch zeigen. Als Grund für die geringe Resuspensionsrate von Glas als sehr gutem Isolator lässt sich eine Haftungsverstärkung für Staubpartikel durch elektrostatische Kräfte anführen.

5.2 Zeitabhängigkeit von Resuspensionsvorgängen bei Beaufschlagung durch Wind, herumgehende Personen und Fahrzeuge.

In dem ersten Vorhaben wurde die Zeitabhängigkeit der Resuspensionsrate bei Windeinwirkung gemessen. Außerdem wurde der Einfluss einer zusätzlichen mechanischen Einwirkung durch Schlagbelastungen von kontaminierten Flächen bestimmt. Durch wiederholte Schlagbelastungen wurde die Abnahme der Resuspension mit der Anzahl solcher Beaufschlagungen ermittelt. Es wurde auch erkennbar, dass die durch einen Schlag induzierten Vibrationen zu einer Lockerung von Bindungskräften bei einzelnen Partikeln führten, was im weiteren zeitlichen Verlauf der durchgehenden Windbeaufschlagung zu einer vorübergehend verstärkten Resuspension von Partikeln führt. Bei Wiederholungen der Schlagbeaufschlagung klingt dieser Effekt ab. Außerdem zeigte sich, dass bei wiederholten Schlagbelastungen einer Testfläche mit jeder weiteren Schlagbeaufschlagung der resuspendierte Anteil einer Staubelegung deutlich abnahm.

5.2.1 Resuspension durch Windeinwirkung und deren Zeitabhängigkeit

Die gemessene Zeitabhängigkeit der Resuspensionsvorgänge bei unterschiedlichen repräsentativen Oberflächen und Partikeleigenschaften mit der Dauer einer Windeinwirkung zeigte für die Messzeiten von ca. 2 h näherungsweise eine $t^{-\nu}$ Abhängigkeit mit $\nu \approx 1$ (Bereich 0.9 bis 1.4). Im vorliegenden Vorhaben wurden für ein größeres Spektrum von für urbane Bereiche typischen Oberflächen, analoge Messungen durchgeführt mit Einwirkungszeiten über einen kurzen Zeitraum von ½ Stunde und über längere Zeitdauern von 2 bis 3 Tagen. Diese Experimente bestätigten die Ergebnisse der im vorausgegangenen Vorhaben durchgeführten Messungen über kürzere Zeiträume von einigen Stunden und ergaben auch über längere Zeitdauern von Tagen eine Abnahme der Resuspensionsrate mit der Zeit, die mit $\nu = 0,7$ bis $0,8$ noch nahe bei $\nu = 1$ liegt.

Damit konnte gezeigt werden, dass windinduzierte Resuspensionsprozesse (-raten) ohne zusätzliche Umwelteinflüsse auch über die ersten Stunden nach einer Kontamination hinaus näherungsweise mit einer $1/t$ -Abhängigkeit abnehmen. Diese Abnahme der Resuspensionsrate mit der Zeit nach Start einer Windeinwirkung hat für die Analyse von Kontaminationssituationen und für dabei angezeigte Schutz- und Gegenmaßnahmen Bedeutung. Eine Abnahme der Resuspensionsrate mit $1/t$ bedeutet beispielsweise, dass in der 1. Stunde nach einer Kontamination von Außenflächen bei Windeinwirkung etwa gleichviel lungengängiger Staub durch Resuspension luftgetragen wird wie in den daran anschließenden 23 Stunden.

5.2.2 Resuspension durch herumgehende Personen und Einfluss wiederholter Begehung

5.2.2.1 Reinraummessungen mit herumgehendem Probanden

Der anfänglich resuspendierte Anteil lungengängiger Partikel von mit Staub belegtem Boden eines Reinraums pro Auftritt ist gemessen worden. Der Resuspensionsvorgang wird durch beim Auftreten induzierte Luftströmung im Auftrittsbereich dominiert. Dazu gibt es Veröffentlichungen von Kubota et al. (2009) und Eisner et al. (2010), die das induzierte turbulente Strömungsfeld und den Staubeintrag visualisieren (Abb. 2.2 bis 2.4).

Aus dem gemessenen resuspendierten Anteilen lungengängiger Partikel der Staubbelegung des Bodens pro Schritt und Auftrittfläche R_A lassen sich Szenarien analysieren, bei denen kontaminierte Flächen durch Schritte dort laufender Personen beaufschlagt werden. Die Auftrittfläche ist etwa durch die Sohlenfläche gegeben und kann mit rund 300 cm^2 angenommen werden. Die für das Szenario ermittelte Resuspensionsrate R_R bezogen auf die betrachtete kontaminierte Fläche ergibt sich, wie weiter vorne

bereits behandelt, aus diesem Freisetzunganteil R_A und dem pro Zeiteinheit von Schritten überdeckten Flächenanteil \dot{F}_S dieser kontaminierten Fläche.

$$R_R = R_A \cdot \dot{F}_S \quad [5.1]$$

Wird beispielsweise von einer kontaminierten Fläche ein Anteil $\dot{F}_S = 0.1$ pro h durch herumlaufende Personen betreten, so wäre die Resuspensionsrate R_R : $R_R = R_A \cdot 0,1$ [1/h].

Bei den Reinraumversuchen, wo eine Person jeweils zweimal für 10 s umherlief bei registrierter Schrittzahl und dieser Vorgang nach jeweils 15 Minuten Pause zur Reduzierung der Partikelkonzentration in der Raumluft noch 3 mal wiederholt worden ist, wurde R_A gemessen. Bei ca. 90 Schritten pro Minute mit rund 300 cm² Auftrittfläche wurde während der Dauer der Rundgänge von insgesamt 4 x 20 s = 80 s eine Fläche von ca. 3,6 m² beaufschlagt.

Die Grundfläche der Reinraumkammer beträgt ca. 6,5 m². Damit ist im Mittel nach 4 Probanden die Bodenfläche etwa 2 x betreten worden. Da verwundert es nicht, dass kein zeitlicher Abfall von R_A beobachtet worden ist.

5.2.2.2 Wiederholte Beaufschlagung einer staubbelegten Fläche durch Schritte

Die Reinraumversuche mit herumgehenden Personen haben den pro Schritt freigesetzten Anteil R_A der lungengängigen Staubbelegung bezogen auf die Auftrittfläche eines Schuhs ergeben. Die Versuche mit jeweils einem von insgesamt 4 Probanden haben gezeigt, dass der pro Auftritt freigesetzte Anteil R_A der homogenen Staubkonzentration (z.B. in µg/m² oder im Falle radioaktiven Staubs auch in Bq/m²) von der Art der Gehweise eines Probanden abhängt. Als mittleren Wert kann man $R_A = 5 \cdot 10^{-3}$

pro Auftritt bezogen auf die Trittfläche annehmen. Das bedeutet, dass beim Auftreten ein Anteil von 5 Promille der frischen Staubbelegung von der vom Schuh betretenen Fläche resuspendiert und damit luftgetragen wird. Dieser Wert bezieht sich auf Bedingungen, wo eine staubbelegtes Flächenelement nur einmal oder wenige Male betreten wird. Damit stellt sich die Frage, wie sich der pro Auftritt resuspendierte Anteil R_A bei mehrfach wiederholter Beaufschlagung entwickelt.

Dazu ist im Untersuchungsprogramm folgendermaßen vorgegangen worden: Aus der Literatur (z.B. Kubota et al. (2009) und Eisner et al. (2010)) und früheren Untersuchungen des Fraunhofer ITEM (Mädler, 1999) folgt, dass die Resuspension von einer Staubbelegung des Bodens überwiegend durch die mit einem Auftritt einhergehende lokale Luftströmung bestimmt wird. Das ist das Verdrängen von Luft bei Annäherung der Schuhsohle an den Boden und das Einströmen von Luft beim folgenden Abheben der Schuhsohle. Dadurch treten kurzzeitig hohe lokale Strömungsgeschwindigkeiten auf, die gemäß Modellbetrachtungen (Khalifa, E. et al. 2007) einige 10 m/s betragen können.

Um solche Bedingungen näherungsweise zu simulieren, ist der Vorgang der Überströmung einer Testoberfläche in der Kanalapparatur so modifiziert worden, dass anstelle einer dauerhaften kontinuierlichen Luftströmung mit zeitlichem Abstand kurzzeitige Luftpulse von 3 Sekunden Dauer mit eingestellter Strömungsgeschwindigkeit u [m/s] wiederholt den Kanal durchströmen. In der üblichen Weise wurde dabei jeweils der von der beaufschlagten Testfläche resuspendierte Anteil der Staubbelegung während der 3 Sekunden der Einwirkungsdauer gemessen. Die Strömungsgeschwindigkeit betrug dabei 10 m/s oder 20 m/s. Die weiter vorne detaillierter beschriebenen Versuche (z.B. Abb. 3.17) haben als wesentliche Erkenntnisse gebracht (Abb. 5.1):

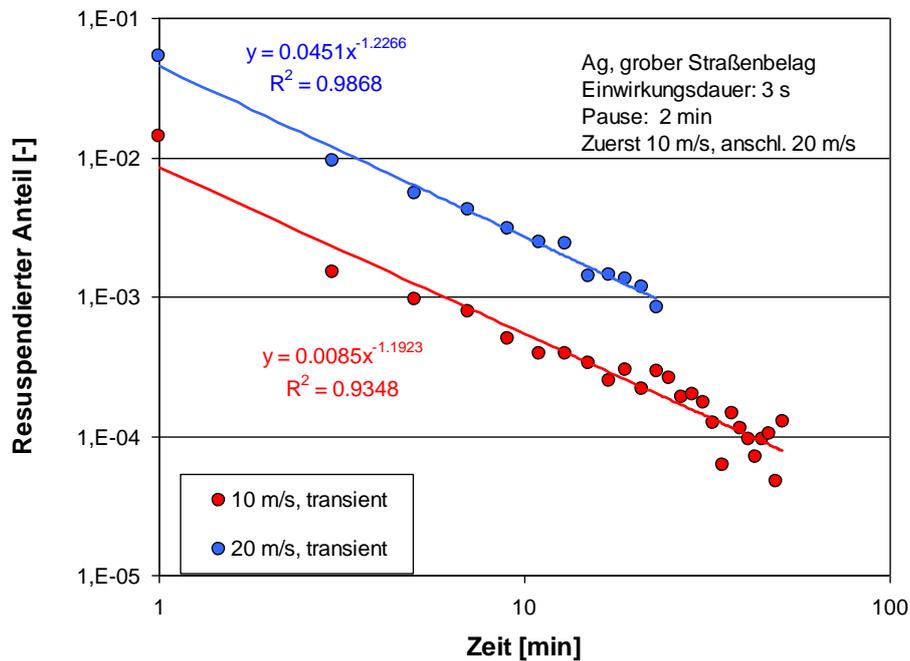


Abb. 5.1: Abfolge des resuspendierten Anteils der Staubbelegung einer Testfläche des groben Straßenbelages bei wiederholten Strömungspulsen von 3 Sekunden Dauer.

- Der Freisetzungsteil nimmt mit jedem weiteren Luftpuls ab. Ausgehend vom ersten 3 Sekunden Puls vermindert sich mit jedem folgenden Luftpuls der resuspendierte Anteil. Ab dem 2. oder 3. Puls von n aufeinander folgenden Strömungspulsen nimmt der resuspendierte Anteil näherungsweise mit $1/n$ ab. Nach z.B. 10 Luftpulsen geht der resuspendierte Anteil auf etwa ein 10. des anfänglichen Wertes zurück.
- Der jeweilige zeitliche Abstand zwischen den Luftpulsen von 3 s Dauer betrug 2 Minuten, in denen keine Luftströmung erfolgte. Bezüglich der Abnahme des resuspendierten Anteils mit der aufsummierten Dauer vieler einzelner 3 s Pulse oder der Situation einer über diese Gesamtdauer bestehenden dauerhaften Anströmung besteht kein Unterschied. Da in den Pausen von 2 Minuten zwischen einzelnen Luftpulsen keine Resuspension erfolgt, kann man die Serie von Luftpulsen auch als unmittelbar aufeinander folgend und über die aufsummierte Pulsdauer als kontinuierlich ansehen.

Diese Aussage ergibt sich aus einem Vergleich der Resuspensionsmessung bei einer Serie von Einzelpulsen (vgl. Abb. 3.18)) und Messergebnissen, bei denen eine Überströmung der staubbelegten Testoberflächen kontinuierlich erfolgte.

- Die in Abb. 5.1 aufgeführten Zeitreihen des freigesetzten Anteils einer Staubkontamination bei wiederholten kurzen Luftpulsen beziehen sich auf Strömungsgeschwindigkeiten von 10 m/s und 20 m/s. Dabei ist zunächst die staubbelegte Oberfläche mit Luftpulsen von 10 m/s und dann anschließend mit Luftpulsen von 20 m/s überströmt worden. Ein Vergleich der jeweils gemessenen freigesetzten Anteile bei 10 m/s und bei 20 m/s zeigt um etwa einen Faktor 5 bis 6 höhere Werte bei 20 m/s. Das ist in guter Übereinstimmung mit der im vorausgegangenen Vorhaben aus Messungen bei variierten Überströmungsgeschwindigkeiten von 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s und 10 m/s abgeleiteten Abhängigkeit der Resuspension von der Windgeschwindigkeit u mit der Potenz 2.5, d.h. $\sim u^{2.5}$. Bei Verdopplung der Windgeschwindigkeit steigt der resuspendierte Anteil angenähert mit einem Faktor $(2)^{2.5} = 5.7$.
- Ein höherer Resuspensionsanteil führt analog auch zu einem höheren integral freigesetztem Anteil bei kontinuierlicher Anströmung oder bei einer Abfolge von Strömungspulsen. Die in Abb. 5.1 aufgeführten resuspendierten Anteile bei wiederholten Luftpulsen ergeben aufsummiert bei 10 m/s einen freigesetzten Anteil von 2.2 % der beaufschlagten Staubbelegung ab dem 1. Luftpuls und von 0.8 % ohne den ersten Luftpuls. Man erkennt daran, dass beim ersten Strömungspuls über eine zuvor nicht beaufschlagte Oberfläche lose haftende Partikel verstärkt resuspendiert werden. (Dies entspricht auch Erfahrungen aus dem Alltag. Will man auf einer Fläche die Staubbelegung schnell vermindern, pustet man mit einem kurzen heftigen Luftstoß darüber.) Bei 20 m/s betragen bei den Messergebnissen die der Abb. 5.1 aufsummierten resuspendierten Anteile ab dem 1. Strömungspuls 8.6% und ab

dem 2. Strömungspuls 3.2 % der Staubbelegung. Diese Ergebnisse zeigen erneut, dass bei Windüberströmung auch bei langer oder oft wiederholter Beaufschlagung mit vergleichsweise hoher Windgeschwindigkeit insgesamt nur ein Anteil von bis zu einigen Prozent einer lungengängigen Staubbelegung (in den Versuchen 3-10 μm Partikeldurchmesser) resuspendiert wird. Bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten von 20 m/s erreicht für lungengängige Partikel der insgesamt durch Resuspension abgelöste Anteil Werte um 10%. Falls dauerhafte oder wiederholte Luftpulse, etwa bei Befahrung mit Fahrzeugen, mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten verbunden sind, wäre dann mit höherer integralen Resuspension zu rechnen, die dann auch mit einer entsprechend höheren Abnahme der verbleibenden Kontamination verbunden wäre. Die mit einer Abfolge von Einzelpulsen gewonnenen Versuchsergebnisse lassen sich auf die Situation übertragen, bei denen eine kontaminierte Fläche wiederholt von Schritten herumlaufender Personen beaufschlagt wird. Nach n-fachem Betreten desselben Flächenelementes, kann näherungsweise angenommen werden, dass der Freisetzunganteil dann nur noch etwa $1/n$ der ersten Beaufschlagung beträgt.

Ein in den Reinraumversuchen anfänglich gemessener resuspendierter Anteil R_A von z.B. $5 \cdot 10^{-3}$ von einer mit lungengängigem Staub belegten Auftrittfläche würde bei 10-mal wiederholtem Betreten nur noch $5 \cdot 10^{-4}$ oder eher noch weniger betragen. Dieser Befund hat einige Aussagekraft für Situationen, z.B. in einem städtischen Bereich, wo infolge eines radiologischen Ereignisses Flächen durch trockene Ablagerung kontaminiert worden sind. Mit einem wiederholten Betreten derselben Stelle einer Fläche geht eine mit der Anzahl der Trittbeaufschlagungen korrelierte Abnahme des resuspendierten Anteils einher. Das gilt natürlich auch bei Innenraumbedingungen, wenn es zu einer Staubkontamination des Bodens gekommen ist.

5.2.3 Resuspension von mit Fahrzeugen befahrenen Oberflächen

Zu einer Resuspension von mit Staub kontaminierten Oberflächen kann es auch durch Fahrzeuge kommen, die z.B. eine Straße befahren. Für eine Abschätzung des dabei resuspendierten Anteils lungengängiger Partikel können veröffentlichte Daten von gezielten Experimenten und Erkenntnissen aus dem vorangegangenen und dem hier behandelten Projekt kombiniert werden. Auch im Fall von einer Befahrung durch Fahrzeuge ist die dadurch unter dem Fahrzeug und im unmittelbar angrenzenden Bereich verursachte Luftströmung für eine Resuspension maßgeblich. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auf Messungen von Sehmel (1973) zu verweisen. Bei den Untersuchungen wurde auf eine von zwei Spuren einer Straßenhälfte über eine Breite von rund 3 m und eine Länge von 30 m ZnS Staub, von dem ca. die Hälfte der Staubmasse Partikelgrößen $< 10 \mu\text{m}$ aufwies, durch Sedimentation aufgebracht. Die anfängliche Belegungsdichte mit dem Teststaub entsprach ca. 5 g/m^2 , der Massenmedianwert des Partikeldurchmessers lag bei $8 \mu\text{m}$. Während Zeiten, in denen der Wind von einer Seite senkrecht zur Fahrtrichtung blies, fuhr ein Fahrzeug bei trockenen Bedingungen mit definierter Geschwindigkeit entweder auf der kontaminierten Fahrspur oder auf der daneben liegenden Spur. Als Fahrzeuge wurden PKW und leichte LKW eingesetzt, wobei Fahrgeschwindigkeiten zwischen ca. 8 und 80 km/h lagen. Mit einer aufwendigen Anordnung auf der Leeseite der Straße von zeitauflösenden und integrierenden Staubsammlern und Erfassung deponierter Partikel in Verbindung mit meteorologischer Instrumentierung wurde der resuspendierte Staub ermittelt und charakterisiert.

Wichtige Ergebnisse aus diesen Untersuchungen sind:

- Der resuspendierte Anteil steigt mit der Fahrzeuggeschwindigkeit und nimmt etwa mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu.
- Nach Aufbringen des Teststaubes wurden anfangs je nach Testbedingungen resuspendierte Anteile im Bereich von 10^{-5} bis

10^{-2} gemessen. Dazu gehörten Fahrzeugdurchfahrten auf der kontaminierten Spur und auf der benachbarten Spur mit PKW und leichtem LKW bei verschiedenen Geschwindigkeiten im Bereich von ca. 8 km/h bis 80 km/h.

- Resuspendierte Anteile waren bei LKW Durchfahrten höher als bei PKW. Sie waren etwa um einen Faktor 10 höher beim Befahren der kontaminierten Spur im Vergleich zur benachbarten Spur.
- Die Versuche verteilten sich über 30 Tage. Dabei trat über die Zeit eine starke Abnahme gemessener Resuspensionsanteile auf, die zwei bis drei Zehnerpotenzen betrug. Das wird in der Veröffentlichung auf die Einwirkung von Witterungsbedingungen zurückgeführt.
- Als angemessenen Wert des resuspendierten Anteils bei ersten Befahrungen der frisch kontaminierten Asphalt-Straße durch ein Fahrzeug mit 80 km/h wird 10^{-2} angegeben. Unter Verwendung der aus den Experimenten abgeleiteten Abhängigkeit des resuspendierten Anteils vom Quadrat der Fahrzeuggeschwindigkeit ergibt sich damit für die ersten Durchfahrten mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h als Wert $3 \cdot 10^{-3}$.

Bei den Versuchen von Sehmel (1973) ist die beobachtete starke Abnahme des resuspendierten Anteils bei wiederholten und über 30 Tage erstreckten Fahrzeugbefahrungen primär auf den Einfluss von Witterungsbedingungen zurückgeführt worden. In dem hier berichteten Vorhaben sind zwei Typen von Straßenbelägen für einige Tage variierenden Umweltbedingungen von Temperatur und relativer Feuchte ausgesetzt worden, waren jedoch vor trockener Staubablagerung und Regeneinfluss geschützt. Dabei ist für diese Art von Oberfläche im Gegensatz zu einer Dachziegeloberfläche ein merklicher Einfluss auf Resuspensionsprozesse bei anschließenden Messungen mit der Kanalapparatur beobachtet worden. Die Minderung der Resuspensionsrate im Vergleich zu Probeflächen, die solchen

mehrtätigen Außenbedingungen nicht ausgesetzt worden waren, betrug etwa eine Größenordnung.

Die mit der Kanalapparatur durchgeführten Versuche, bei denen die beiden Arten von mit Teststaub belegten Straßenbelägen mit wiederholten 3 s Pulsen von Luftströmung beaufschlagt worden sind, zeigten nach n -fachem Luftpuls eine mindestens mit $1/n$ abnehmenden resuspendierten Anteil. Somit wird die bei den Versuchen von Sehmel (1973) beobachtete starke Abnahme des resuspendierten Anteils bei über viele Tage verteilten wiederholten Fahrzeugbefahrungen sowohl durch Witterungseinfluss als auch durch den mit der Einwirkungsdauer bzw. der Anzahl wiederholter Einwirkungen einhergehenden Rückgang resuspendierter Partikel verursacht sein.

Für die Analyse von Szenarien, bei denen kontaminierte Außenflächen mit Fahrzeugen befahren werden, kann man die Ergebnisse von Sehmel zu anfänglich resuspendierten Anteilen pro Fahrzeugbefahrung mit den Messungen dieses Verhabens kombinieren, um Aussagen über die Entwicklung des resuspendierten Anteils bei wiederholter Befahrung eines Flächenelementes zu erhalten. Dadurch kann wie bei einer dauerhaften Beaufschlagung durch Wind oder bei wiederholtem Begehen von Flächenanteilen durch Personen auch bei wiederholten Befahrungen von Flächenelementen durch Fahrzeuge die Entwicklung der luftgetragenen Konzentration bestimmt werden.

Nimmt man als Wert für den resuspendierten Anteil R_A den bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h gemessenen Wert $R_A = 10^{-2}$ für eine 1. Durchfahrt und eine Abnahme von R_A mit $1/n$ der Durchfahrten an, so würde bei der 100. Durchfahrt noch $1/100$ des anfänglichen Freisetzunganteils resuspendiert (bezogen auf die vom Fahrzeug überstrichene Fläche). Das wäre dann noch $R_A = 1 \cdot 10^{-4}$. Insgesamt wäre nach 100 Durchfahrten mit diesen Annahmen aufsummiert ein Anteil von

$\sim 1 \cdot 10^{-2} \cdot (1 + 1/2 + 1/3 + \dots + 1/100)$ resuspendiert. Das ergibt rund $10^{-2} \cdot 5,2 = 5,2$ % der Kontamination auf der befahrenen Fläche. Dieser Wert ist mit den Messungen mit wiederholten Luftpulsen von 20m/s mit der Kanalapparatur gut verträglich.

Sowohl bei kontinuierlicher oder intermittierender Beaufschlagung einer kontaminierten Testoberfläche mit überströmender Luft, oder durch wiederholte Schlagbeaufschlagung, die zu Vibration führt, zeigten die Messungen von resuspendierten Anteilen mit der Kanalapparatur eine Abnahme mit der Dauer oder der Anzahl solcher Einwirkungen. Das Maß dieser Abnahme der Resuspension mit der Dauer oder Anzahl von Beaufschlagungen bewirkt im Ergebnis, dass insgesamt nur ein Bruchteil der anfänglichen Staubbelegung resuspendiert und damit luftgetragen wird. Darauf ist schon wiederholt hingewiesen worden. Augenfällig wurde diese Tatsache auch bei den Messungen mit der Kanalapparatur mit wiederholten Luftpulsen, deren Ergebnisse z.B. in Abb. 5.1 dargestellt sind. Hier wurde die staubbelegte Testoberfläche zunächst mit einer Serie von Luftpulsen mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s beaufschlagt. Bei der sich daran anschließenden Messreihe von Luftpulsen mit der doppelten Überströmungsgeschwindigkeit von 20 m/s bestätigte sich die schon bei kontinuierlicher Windeinwirkung beobachtete Zunahme mit der Potenz 2.5 der Strömungsgeschwindigkeit und die analoge Zunahme des insgesamt nach längerer Einwirkungsdauer freigesetzten Anteils mit dieser Potenz. Bei den Strömungsgeschwindigkeiten bis 20 m/s und bei den im vorausgehenden Vorhaben durchgeführten wiederholten Schlagbelastungen blieben die insgesamt resuspendierten Anteile im Bereich weniger Prozent der Staubbelegung.

Analog zu den in Abb. 5.1 dargestellten Ergebnissen von wiederholten Luftpulsen - zunächst mit 10 m/s und anschließend mit 20 m/s - sind mit dem gleichen Typ von Straßenbelag Messungen durchgeführt worden, bei

denen die Strömungsgeschwindigkeit zuerst 20 m/s betrug und bei der anschließenden Serie von Luftpulsen auf 10 m/s erniedrigt wurde (Abb. 3.18). In diesem Fall wurden bei 10 m/s keine weiteren Partikel oberhalb der Nachweisgrenze im Bereich einiger 10^{-5} der Kontamination bei der Abfolge von 3 s Luftpulsen gemessen. Das passt zum Verständnis, dass jeweils nur ein begrenzter Anteil einer Staubbelegung durch Resuspensionsprozesse von der Oberfläche abgelöst wird, wobei dieser resuspendierte Anteil von der Stärke der Einwirkung abhängt.

In einer Arbeit von Nicholson und Branson (1990) wurde die Fahrzeugresuspension in einem realskaligen Ansatz behandelt. Fluoreszenzmarkierte, monodisperse Partikeln wurden auf einer Straßenoberfläche ausgebracht. Die Abnahme der Fluoreszenz nach Durchfahren von Fahrzeugen wurde gemessen und der Partikelresuspension zugeordnet. Die Flächenbelegung mit den monodispersen kugelförmigen Aerosolpartikeln erfolgte über Sedimentation jeweils mit unterschiedlichen Partikelgrößen von ca. 5, 10, 15 und 20 μm Durchmesser und blieb unterhalb von 25% einer Monolage. Aufgrund der Dichte $\rho \sim 1000 \text{ kg/m}^3$ entspricht der Durchmesser dem aerodynamisch äquivalenten Durchmesser AED. Bei der Befahrung mit einem PKW lag die kontaminierte Fläche entweder zwischen den Rädern des Fahrzeugs oder wurde direkt vom Vorder- und Hinterrad einer Fahrzeugseite durchfahren. Nach jeder Überfahrung wurde mit Fluoreszenzlichtanalyse der verbleibende Anteil der anfänglichen Kontamination gemessen. Damit konnte insgesamt der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Partikelgröße auf die nach Befahrungen verbleibende Staubbelegung der Testflächen bestimmt werden. Der Unterschied zwischen einer Testfläche, die zwischen den Rädern lag oder von Rädern durchfahren wurde, ist gering und unterstützt die Vorstellung, dass auch bei abrollenden Reifen dabei induzierte Luftströmung für eine Resuspension maßgeblich ist. Zur Veranschaulichung sind hier zwei Abbildungen der Publikation von Nicholson (1990) entnommen:

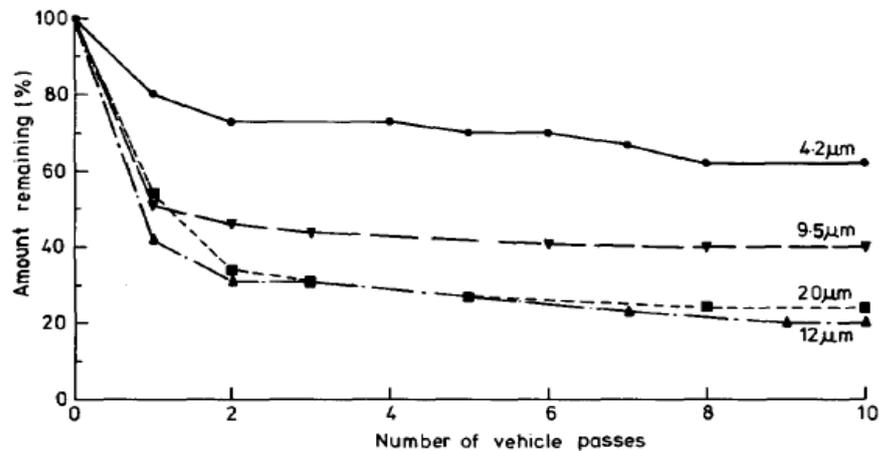


Abb. 5.2: Messung der verbleibenden Kontamination nach mehrmaliger Überfahung einer mit Teststaub belegten Straßenfläche mit einem PKW bei 64 km/h in Abhängigkeit von der Partikelgröße des fluoreszierenden Teststaubs (aus Nicholson, 1990)

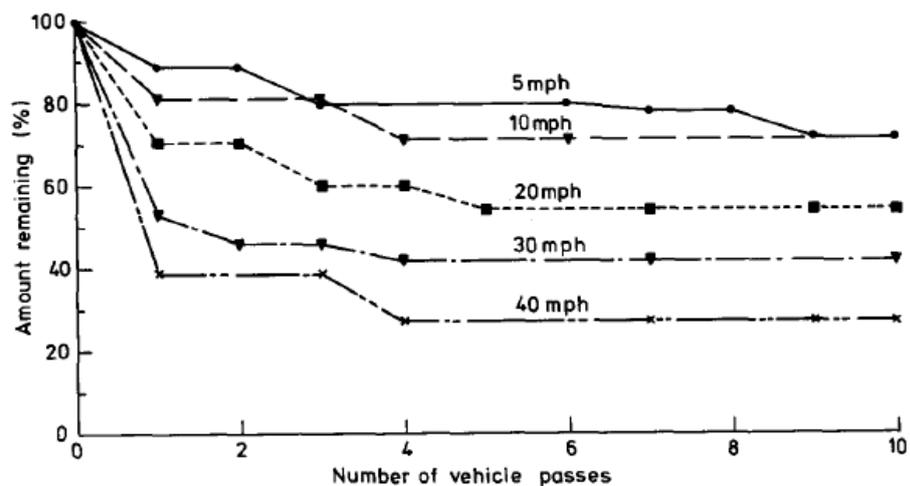


Abb. 5.3 Messung der verbleibenden Kontamination nach mehrmaliger Überfahung einer mit Teststaub belegten Straßenfläche mit einem PKW bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten von 8,16, 32, 48 und 64 km/h für größere Partikel von 12 μm aerodynamischem Durchmesser des fluoreszierenden Teststaubs (aus Nicholson, 1990)

Aus den hier dargestellten Ergebnissen sind einige Schlussfolgerungen zur Resuspension von befahrenen Flächen von Bedeutung:

- Bei der ersten Befahrung wird bereits ein großer Anteil der insgesamt nach mehreren Durchfahrten verbleibenden Staubebelegung durch Resuspension entfernt. Schon nach wenigen weiteren Durchfahrten erfolgt kein weiterer Rückgang der verbleibenden Kontamination. Dies

steht im Einklang mit Messungen mit der Kanalapparatur bei kurzen Luftpulsen von 3 s mit 10 und 20 m/s, bei denen schon der beim ersten Luftpuls resuspendierte Anteil der Staubbelegung besonders stark zur gesamten Resuspension nach darauf folgenden Luftpulsen beiträgt. Allerdings sind die bei den Versuchen von Nicholson beobachteten verbleibenden Staubkontaminationen der Ausgangskontamination wesentlich niedriger und dementsprechend die resuspendierten Anteile im Vergleich zu Messungen mit der Kanalapparatur deutlich höher. Bei Strömungsgeschwindigkeiten der Luftpulse von 20 m/s mit der Kanalapparatur gemessene summierte Werte des resuspendierten Anteils lagen dabei im Bereich von 8 % und nicht bei Vielfachen von 10%, wie aus Abb. 5.2 und 5.3 ersichtlich. Das könnte damit zusammenhängen, dass bei den Befahrungen von Fahrzeugen mit z.B. 64 km/h wesentlich höhere lokale Luftströmungen wirksam werden als 20 m/s. Es bleibt aber auch eine Diskrepanz zu den Messungen von Sehmel, aus denen sich ein resuspendierter Anteil von rund 1% bei einer ersten Durchfahrt eines PKWs mit 80 km/h ergab.

- Die in Abb. 5.3 gezeigte erhöhte Abnahme des verbleibenden Teststaubs mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit ist qualitativ analog zu Messungen mit der Kanalapparatur. Allerdings korrelieren die Unterschiede nicht mit dem beobachteten Anstieg der Resuspension mit der Potenz 2.5 der Strömungsgeschwindigkeit, sondern zeigen eine deutlich geringere Änderung mit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Die Messungen der resuspendierten Anteile in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit durch Sehmel ergaben hingegen im Rahmen der Messgenauigkeit eine mit Ergebnissen der Kanalapparatur verträgliche Potenz von 2.

Aus Abb. 5.2 der Messungen von Nicholson ist die mit der Partikelgröße ansteigende Resuspension gut erkennbar. Das entspricht auch Ergebnissen von Resuspensionsmessungen mit der Kanalapparatur, wobei hier Messungen von lungengängigen Partikeln im Größenintervall 3 – 10 μm im Vordergrund standen. Für diesen Partikelgrößenbereich können die mit

4.2 μm in Nicholson angegebenen Partikel als repräsentativ angesehen werden.

Für die Analyse von Expositionsszenarien nach einer Kontamination von Oberflächen im Außenbereich durch vorab luftgetragene Staubpartikel zeigen die Messungen von Nicholson analog zu den Messungen mit kurzen Luftpulsen mit der Kanalapparatur, dass die pro Befahrung mit einem Fahrzeug resuspendierten Anteile einer Kontamination schnell abnehmen und schon nach wenigen Durchfahrten kaum noch etwas resuspendiert wird. Das hat im Ereignisfall einige Bedeutung, weil nach anzahlmäßig wenigen Befahrungen bei weiteren Durchfahrten von Fahrzeugen diese Quelle für luftgetragenen Staub abgeklungen ist. Keine Konsistenz besteht in Bezug auf die Höhe des resuspendierten Anteils R_A einer Staubebelegung bei der oder den ersten Durchfahrten mit einem Fahrzeug. Die Messungen von Sehmel ergaben für die vom Fahrzeug überfahrene Straßenfläche für die 1. Befahrung mit 80 km/h einen Wert um 1%. Die zitierten Messungen von Nicholson legen einen R_A um 20% beim ersten Befahren mit 64 km/h für Partikel im Bereich 5 μm nahe (Abb. 5.2). Mit der Kanalapparatur führte der erste Luftpuls von 3 s bei 20 m/s (entspricht 72 km/h) zu einem R_A um 5% für lungengängige Partikel (vgl. Abb. 5.1).

Für Abschätzungen einer Resuspension von Fahrzeugen wird im Folgenden von einem Wert des resuspendierten Anteils einer Kontamination mit Partikeln im lungengängigen Größenbereich $R_A = 5\%$ beim einer ersten Durchfahrt mit typischen innerstädtischen Geschwindigkeiten ausgegangen und einer Abnahme des R_A bei der n-ten Durchfahrt proportional zu $1/n$. Diese Annahmen würden nach der 10. Überfahung auf eine summierte Resuspension von 15% der anfänglichen Kontamination auf dem befahrenen Flächenanteil hinauslaufen.

6 Exemplarische Analyse von Kontaminationsszenarien

6.1 Ereignis mit Kontamination urbaner Flächen mit radioaktivem Staub

In dem Bericht Koch et al. (2012) ist bereits ein Szenario betrachtet worden, bei dem es durch die Umsetzung einer schmutzigen Bombe (USBV mit radioaktiver Beiladung) zu einer Kontamination von urbanen Gebieten kommt. Dabei sind exemplarisch zwei mögliche Radionuklide betrachtet worden:

- Cs 137 als Beta-/Gamma-Strahler, bei dem zur Strahlenexposition von Personen nach Deposition sowohl die externe Exposition durch Direktstrahlung als auch die Inhalation nach Resuspension beitragen.
- Pu 238 als Vertreter von Alpha-Strahlern, die keine oder nur eine geringe Gamma-Komponente aufweisen, und wegen der vergleichsweise hohen Dosiskoeffizienten [Sv/Bq] bei Inhalation von partikelförmiger Aktivität im lungengängigen Bereich den wesentlichen Expositionsbeitrag nach Deposition über den Resuspensionspfad liefern.

Als Kontamination wird hier in beiden Fällen für höher kontaminierte städtische Oberflächen eine Aktivitätskonzentration von 10^6 Bq/m² angenommen. Zur Veranschaulichung wird ein 200 m langer urbaner Bereich betrachtet, bei dem ein öffentlicher Platz mit angrenzender Straße und daran anschließendem Bürgersteig kontaminiert worden sind. Diese vereinfachte Konstellation ist in Abb. 6.1 gezeigt.

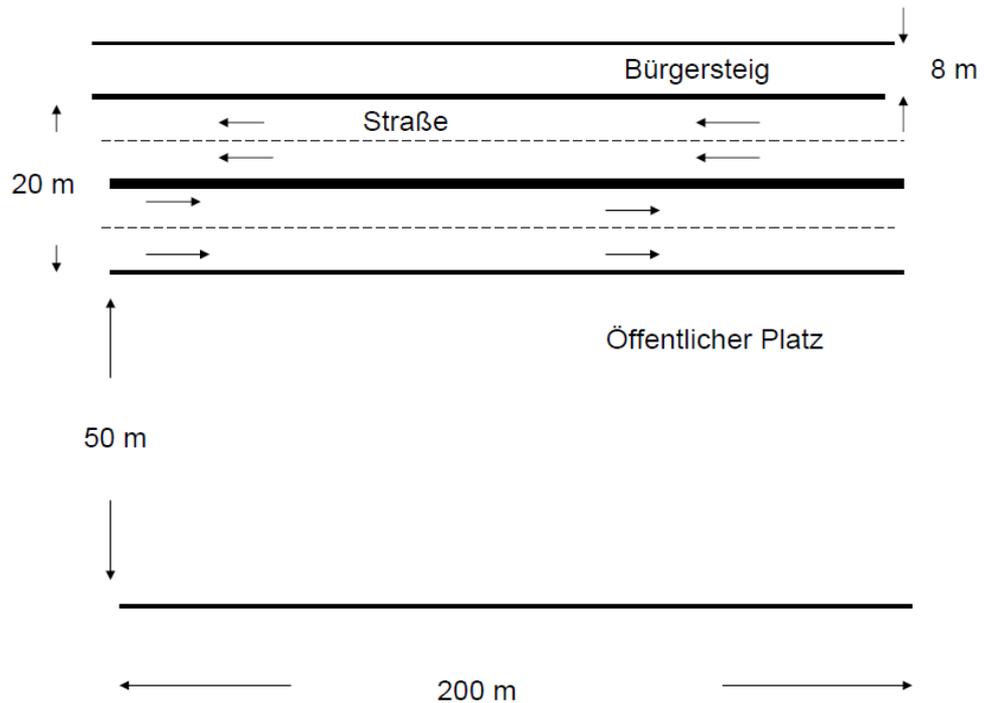


Abb. 6.1 Vereinfachte Darstellung eines kontaminierten urbanen Bereiches mit großem öffentlichen Platz und angrenzender 4-spüriger Straße mit Bürgersteig.

Auf den öffentlichen Flächen bewegen sich Personen der allgemeinen Bevölkerung und nach Erkennung der entstandenen radiologischen Situation auch Einsatzpersonal. Die breite Straße wird von privaten Fahrzeugen und von Fahrzeugen für diverse Einsätze befahren.

Eine Ursache für Aktivität in der Luft ist durch Wind resuspendierter radioaktiver Staub. Alle dem Wind ausgesetzten kontaminierten Flächen sind dabei Quellen luftgetragener Aktivität. Die Resuspensionsrate gibt an, welcher Anteil der Kontamination pro Zeiteinheit von der Fläche abgelöst und luftgetragen wird. Weitere Ursachen sind das Begehen und das Befahren von kontaminierten Flächen.

6.1.1 Windresuspension

Die Resuspensionsrate $R_R(t)$, also der pro Zeiteinheit durch windinduzierte Resuspension in die angrenzende Luft übergehende Anteil einer Kontamination, folgt näherungsweise der Beziehung

$$R_R(t) = A \cdot \frac{1}{t} , \quad [6.1]$$

wobei die Zeit t z.B. in den Zeiteinheiten s, min., h ausgedrückt sein kann. Die dimensionslose Größe A in der obigen Beziehung steigt gemäß den Messungen mit der Kanalapparatur mit der Potenz 2.5 der einwirkenden Windgeschwindigkeit u [m/s] an: $A \propto u^{2.5}$.

In dem vorausgegangen Bericht (Koch et al.,2012) ist für $u= 6$ m/s als vorsichtig gewählte Resuspensionsrate

$$R_R(t) = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{t} \quad [6.2]$$

ermittelt worden, wobei die Einheit der Zeit frei wählbar ist.

Zur Verdeutlichung: Die Höhe der Resuspension zum selben Zeitpunkt $t= 600$ s oder entsprechend $t= 10$ min. oder $t= 1/6$ h beträgt in den jeweils gleichen Einheiten:

$$R_R(t) = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1/(600 \text{ s}) = 5 \cdot 10^{-6} [1/\text{s}] \text{ oder}$$

$$R_R(t) = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1/(10 \text{ min.}) = 3 \cdot 10^{-4} [1/\text{min.}] \text{ oder}$$

$$R_R(t) = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1/(1/6 \text{ h}) = 1.8 \cdot 10^{-2} [1/\text{h}]$$

Aufgrund der Abhängigkeit der Resuspensionsrate von der Windgeschwindigkeit mit $u^{2.5}$ erniedrigt sich beispielsweise die Resuspensionsrate bei $u=4$ m/s auf $(4/6)^{2.5} = 0.36$ des Wertes bei $u= 6$ m/s

und bei 2 m/s auf $(2/6)^{2.5} = 6.4 \cdot 10^{-2}$ des Wertes bei $u = 6$ m/s. Dieser Einfluss der Windgeschwindigkeit spielt z.B. dann eine Rolle, wenn man die relativen Einflüsse einer durch Wind verursachten Resuspension mit einer Resuspension infolge einer Begehung durch Personen oder Befahrung mit Fahrzeugen vergleichen will.

Für Expositionsrechnungen ist der in einem Zeitintervall $(T_2 - T_1)$ durch Wind resuspendierte Anteil R_A einer Staubelegung relevant. Dafür gilt aufgrund einer $1/t$ -Abhängigkeit (Gleichung [6.2])

$$R_A(T_2 - T_1) = A \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad [6.3]$$

Dieser resuspendierte Anteil R_A wird hier exemplarisch für die in Abb. 6.1 skizzierte Fläche bestehend aus öffentlichem Platz, angrenzender breiter Straße und Bürgersteig bei einer anfänglichen Kontamination von 10^6 Bq/m² für die Zeitintervalle $T_1 = 1$ min. und $T_2 = 61$ min. sowie $T_1 = 540$ min. und $T_2 = 600$ min., also praktisch für die erste und für die 10. Stunde nach Eintreten der Kontamination, bestimmt ($A = 3 \cdot 10^{-3}$):

Tab. 6.1: Resuspendierte Anteile einer lungengängigen Staubkontamination ($< 10 \mu\text{m}$) während der 1. und 10. Stunde nach Eintritt der Kontamination für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten u (Die während einer Stunde resuspendierten Anteile R_A entsprechen der mittleren Resuspensionsrate während der Stunde R_R [1/h])

Zeitintervall	R_A bei $u=6$ m/s	R_A bei $u=4$ m/s	R_A bei $u=2$ m/s
1. min. bis 61. min.	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$7.9 \cdot 10^{-4}$
540. min. bis 600. min.	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$

Man erkennt die Abnahme des resuspendierten Anteils R_A einer Kontamination von der 1. Stunde bis zur 10. Stunde und den Einfluss der Windgeschwindigkeit. Die aufgeführten resuspendierten Anteile bei

Windeinwirkung beziehen sich auf die gesamte Fläche der Abb. 6.1, also $200 \text{ m} \cdot 78 \text{ m} (=15600 \text{ m}^2)$.

6.1.2 Begehung kontaminierter Flächen durch Fußgänger

Bei einem erstmaligen Auftreten auf ein Flächenelement kann aufgrund der Reinraumexperimente angenommen werden, dass bezogen auf die Schuhfläche von etwa $0,03 \text{ m}^2$ (300 cm^2) ein Anteil von $5 \cdot 10^{-3}$ der Flächenkontamination durch Resuspension luftgetragen wird. Von Personen vorwiegend betretene Flächen der Abb. 6.1 sind der öffentliche Platz mit 10000 m^2 und der an die breite Straße angrenzende Bürgersteig von 1600 m^2 , zusammen 11600 m^2 . Wenn während einer Stunde 500 Personen mit im Mittel 200 Schritten über diese Flächen gehen, würde etwa eine Fläche von $500 \text{ Personen} \cdot 200 \text{ Schritte} \cdot 0,03 \text{ m}^2/\text{Auftritt} = 3000 \text{ m}^2$ betreten. Das ist grob nur $\frac{1}{4}$ der Fläche von Platz und Bürgersteig mit zusammen 11600 m^2 . Überwiegend kommt es damit während der 1. Stunde nicht zum wiederholten Betreten ein und desselben Flächenelementes. Damit würde der mit der Kanalapparatur gemessene Rückgang des resuspendierten Anteils R_A nach n -fachem Betreten eines Flächenelementes auf einen Wert von mindestens $1/n$ des anfänglichen Wertes noch nicht wirksam. Der innerhalb der 1. Stunde durch laufende Personen resuspendierte Anteil R_A der Kontamination auf Platz und Bürgersteig wäre damit ca. $3000 \text{ m}^2/11600 \text{ m}^2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \approx 1,3 \cdot 10^{-3}$ und bezogen auf die Gesamtfläche bei Einbeziehung der Straßenfläche ergäbe sich ein $R_A = 3000 \text{ m}^2/15600 \text{ m}^2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \approx 9,6 \cdot 10^{-4}$.

Ein Vergleich mit den resuspendierten Anteilen R_A durch Windresuspension von der gesamten Fläche der Abb. 6.4 führt in diesem Beispiel zu dem Schluss, dass diese während der 1. Stunde für höhere Windgeschwindigkeiten von $u=4 \text{ m/s}$ und erst recht für $u=6 \text{ m/s}$ den höheren Beitrag zur luftgetragenen Aktivitätskonzentration liefert im

Vergleich zu der angenommenen Begehung durch Personen. Bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten von $u = 2$ m/s wären beide Beiträge – durch Windeinwirkung und durch laufende Personen – vergleichbar. Wäre hingegen die Frequenz von Fußgängern auf dem großen Platz und dem Bürgersteig deutlich höher, mit der Folge, dass der größte Teil dieser Flächen mehrfach durch Betreten beaufschlagt worden ist, würde die dadurch verursachte Resuspension schnell zurückgehen. Beim n -ten Auftritt auf ein Flächenelement würde weniger als $1/n$ des beim ersten Auftritt zu erwartenden Resuspensionsanteils von $R_A = 5 \cdot 10^{-3}$ resuspendiert, beim 5. Betreten wäre R_A damit $< 1 \cdot 10^{-3}$. Wegen dieses schnellen Rückgangs mit etwa $1/n$ würde auch der insgesamt nach 5 Auftritten auf dasselbe Flächenelement summierte resuspendierte Anteil mit $R_A = 5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5) = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2.3$ nur etwas mehr als das Doppelte des ersten Auftritts betragen.

6.1.3 Befahrung einer frisch mit Staub kontaminierten Straße

Bei der exemplarischen Kontaminationssituation in Abb. 6.1 wird radioaktiver Staub auch durch Fahrzeuge auf der 4-spurigen Straße resuspendiert. Bei einer ersten Befahrung mit einem Fahrzeug mit zügiger innerstädtischer Geschwindigkeit wird gemäß der Ausführungen in Kap. 5.2.3 angenommen, dass von der Fläche der Fahrspur ein Anteil $R_A(1) = 5 \cdot 10^{-2}$ durch Resuspension luftgetragen wird. Bei jeder der folgenden n Befahrungen vermindert sich der resuspendierte Anteil mindestens auf $R_A(n) = 1/n \cdot 5 \cdot 10^{-2}$, bei der 10. Befahrung folglich auf $R_A(10) = 5 \cdot 10^{-3}$.

Wenn beispielsweise in der 1. Stunde alle Spuren der Straße von jeweils 100 Fahrzeugen befahren werden, so wären mit diesen Annahmen etwa 25% der Kontamination resuspendiert worden und weitere Befahrungen würden zu keiner oder kaum einer weiteren Resuspension führen. Der Anteil der 20 m breiten Straße an der betrachteten Gesamtfläche der Abb. 6.1 beträgt rund 25 %. Damit wäre bei dem beispielhaften

Kontaminationsszenario der auf die Gesamtfläche bezogene resuspendierte Anteil durch Fahrzeuge $R_A = 6,3 \cdot 10^{-2}$.

Ein Vergleich mit durch Windeinwirkung resuspendierten Anteilen R_A während der 1. Stunde nach Eintritt der Kontamination (Tab. 6.1) zeigt, dass bei diesem Szenario die Resuspension von der befahrenen Straße sogar höher ist als die Windresuspension während der ersten Stunde bei der hohen Windgeschwindigkeit von 6 m/s mit $R_A = 1,2 \cdot 10^{-2}$. Das ist auf den hohen Wert des angenommenen resuspendierten Anteils $R_A = 5 \cdot 10^{-2}$ bei der ersten Befahrung einer Spur, der eher niedrig angesetzten Abnahme mit $1/n$ bei folgenden Durchfahrten und auch auf darauf zurückzuführen, dass hier der Einwirkungsbereich eines Fahrzeugs mit der gesamten Breite einer Fahrspur der Straße gleichgesetzt worden ist. Die Resuspensionsversuche mit der Kanalapparatur haben gezeigt, dass schon ein leichtes Besprühen von staubbelegten Flächen mit Wasser zu einer starken Unterdrückung der Resuspensionsrate führt. Der Reduktionsfaktor liegt dabei auch nach Trocknung des Wasserfilms im Bereich von 1 bis 2 Zehnerpotenzen. Eine solche relativ leicht durchzuführende Maßnahme bietet sich demnach insbesondere für die Frühphase einer entstandenen Kontaminationssituation an.

6.1.4 Exposition von Personen auf den kontaminierten urbanen Flächen

Bei dem in Kapitel 6.1 beschriebenen radiologischen Ereignis ist es zu einer Kontamination mit 10^6 Bq/m² auf den in Abb. 6.1 skizzierten öffentlichen Bereichen gekommen. Dabei besteht diese in einem Fall aus dem Beta-/Gamma-Strahler Cs 137 und im anderen betrachteten Fall aus dem Alpha-Strahler Pu 238. Eine durch Windeinwirkung, Begehung durch Personen und Befahrung mit Fahrzeugen verursachte Resuspension ist dabei durch den jeweiligen in einem Zeitintervall resuspendierten Anteil R_A der Kontamination beschrieben worden. Der pro Zeiteinheit resuspendierte Anteil einer Staubelegung entspricht der Resuspensionsrate von der Fläche, auf die sich die Einwirkung bezieht. Aus

dieser Größe ergibt sich jedoch nicht unmittelbar die luftgetragene Schadstoffkonzentration in der bodennahen Luft im Bereich der kontaminierten Fläche. Hierzu sind in Koch et al. (2012) Ausbreitungsrechnungen herangezogen worden, die für mittlere (neutrale) Wetterbedingungen eine Beziehung zwischen der Resuspensionsrate im Bereich einer kontaminierten repräsentativen Fläche und der bodennahen Luftkonzentration herstellen. Das entspricht dem Kontaminationsfaktor R_F gemäß Gleichung [2.1], der die Luftkonzentration, z.B. in [Bq/m³] zur Flächenkontamination in [Bq/m²] in Beziehung setzt. Im Ergebnis ist dort für eine Windgeschwindigkeit von $u = 6$ m/s folgende approximative numerische Beziehung abgeleitet worden:

$$R_F [1/m] \approx 6 \cdot R_R [1/s] \quad [6.4]$$

Das entspricht (numerisch)

$$R_F [1/m] \approx 6/3600 \cdot R_R [1/h] = 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot R_R [1/h] \quad [6.5]$$

Diese Beziehung kann auch auf andere Windgeschwindigkeiten übertragen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Resuspensionsrate mit der Potenz $u^{2.5}$ der Windgeschwindigkeit u ansteigt, während bei atmosphärischer Ausbreitung die zeitintegrierte bodennahe Luftkonzentration in Ausbreitungsrichtung mit $1/u$ abnimmt. Das ergibt im Effekt bei der Umrechnung der Beziehung eine Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit mit der Potenz 1.5. Damit führt Gleichung [6.5] zu den Beziehungen:

$$R_F [1/m] \approx 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot R_R [1/h] \cdot (2/3)^{1.5} = 9.2 \cdot 10^{-4} \cdot R_R [1/h] \quad [6.6]$$

für $u = 4$ m/s und

$$R_F [1/m] \approx 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot R_R [1/h] \cdot (1/3)^{1.5} = 3.2 \cdot 10^{-4} \cdot R_R [1/h] \quad [6.7]$$

für eine Windgeschwindigkeit von $u = 2$ m/s. Für das oben diskutierte Expositionsszenario mit 10^6 Bq/m² Flächenkontamination ergeben sich für die erste Stunde folgende resuspendierte Anteile R_A von der 200 m langen und 78 m breiten Fläche:

Tab. 6.2: Resuspendierte Anteile durch Wind, Fahrzeuge und Fußgänger für das urbane Kontaminationsszenario

Ursache	Resuspendierter Anteil in 1. Stunde	Resuspendierter Anteil in 10. Stunde
Wind 6 m/s	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$7.9 \cdot 10^{-4}$
Fahrzeuge	$6.3 \cdot 10^{-2}$	-
Fußgänger	$9.6 \cdot 10^{-4}$	-
Summe	$7.6 \cdot 10^{-2}$	

Insgesamt ergibt sich für die erste Stunde eine Resuspensionsrate $R_R = 7.6 \cdot 10^{-2}$ [1/h]. Die Flächenkontamination $FK = 10^6$ Bq/m² kann mit Gleichung [6.5] numerisch in eine bodennahe Aktivitätskonzentration AK [Bq/m³] umgerechnet werden:

$$AK \text{ [Bq/m}^3\text{]} = FK \text{ [Bq/m}^2\text{]} \cdot R_F = FK \cdot 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot R_R \text{ [1/h]}$$

und entspricht

$$AK \text{ [Bq/m}^3\text{]} = 10^6 \cdot 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot 7.6 \cdot 10^{-2} = 1.3 \cdot 10^2 \text{ [Bq/m}^3\text{]}$$

Eine bei Aufenthalt in einer solchen Aktivitätskonzentration resultierende Strahlenexposition einer erwachsenen Person ausgedrückt als effektive Dosis D_{eff} ist gegeben durch:

$$D_{eff} = AK \text{ [Bq/m}^3\text{]} \cdot AR \text{ [m}^3\text{/h]} \cdot T \text{ [h]} \cdot DF \text{ [Sv/Bq]} \quad [6.8]$$

Dabei ist AR die Atemrate, die für einen Erwachsenen rund $1 \text{ m}^3/\text{h}$ beträgt, T die Aufenthaltsdauer in Stunden und DF der Dosiskoeffizient der effektiven Dosis durch Inhalation. Für das Radionuklid Pu 238 kann hier angenommen werden, dass es in oxidischer Form freigesetzt worden ist. In diesem Fall beträgt der Inhalations-Dosiskoeffizient $D_{eff} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/Bq}$. Damit ergäbe sich bei dauerndem Aufenthalt in der für die erste Stunde nach Eintritt der Kontaminationssituation ermittelten Aktivitätskonzentration $AK = 1,3 \cdot 10^2 \text{ [Bq/m}^3\text{]}$ als eff. Dosis (Folgedosis): $D_{eff} = 2,1 \text{ mSv}$ (Pu 238). Im Fall einer Flächenkontamination von 10^6 Bq/m^2 mit dem Gamma-Strahler Cs 137 wäre die Inhalationsdosis in der ersten Stunde wegen des um nahezu einen Faktor 500 geringeren Dosiskoeffizienten ($3,9 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$) mit $D_{eff} = 5,1 \text{ } \mu\text{Sv}$ entsprechend geringer.

Die hier für die erste Stunde für das innerstädtische Kontaminationsszenario berechnete Aktivitätskonzentration in der umgebenden Luft wird dominiert durch den Beitrag durch Fahrzeuge auf der 4-spurig angenommenen Straße, Die dabei wahrscheinlich vorsichtig angesetzte Resuspension geht schnell zurück, ebenso wie die Resuspension durch Windeinwirkung, wie z.B aus Tab. 6.2 für die 10. Stunde ersichtlich. Dann dominiert im Fall des Gamma-Strahlers Cs 137 die Direktstrahlung auf den kontaminierten Flächen, die rund $2 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ bei einer Kontamination mit 10^6 Bq/m^2 beträgt.

6.2 Kontamination einer Halle mit radioaktivem Staub auf Bodenflächen

Es wird eine Halle betrachtet, in der es durch den Umgang mit Plutonium-Pulver oder durch eine unbeabsichtigte Freisetzung von solchem Staub zu einer Kontamination des Bodens gekommen ist. Beispielhaft wird eine Halle mit 200 m^2 Grundfläche und 3 m Höhe betrachtet, in der sich lungengängiger Staub von Pu 238 mit einer Konzentration von 10^4 Bq/m^2 auf dem Hallenboden abgelagert hat. Es kann angenommen werden, dass

das Plutonium in oxidischer Form, z.B. als PuO_2 , vorliegt. Die abgelagerte Gesamtaktivität beträgt damit $2 \cdot 10^6$ Bq. Bei der spezifischen Aktivität von Pu 238 von $6.3 \cdot 10^{11}$ Bq/g beträgt die deponierte Staubmasse mit $3.2 \cdot 10^{-6}$ g nur einige μg . Eine Kontamination mit 10^4 Bq/m² entspricht dem 10-fachen des in Anlage III StrlSchV für Pu 238 aufgeführten Kontaminationswertes. Gemäß § 44 StrlSchV gilt das 10-fache dieses Wertes einer nicht festhaftenden Oberflächenkontamination auf Verkehrsflächen, an Arbeitsflächen oder an der Kleidung in Überwachungsbereichen als Kriterium für die Einleitung von Maßnahmen. Es wird exemplarisch folgendes Expositionsszenario betrachtet: Eine Person betritt die länger nicht betretene Halle, in der sich radioaktiver Staub abgesetzt hat, geht dort innerhalb von 10 Minuten von Ort zu Ort, so dass 500 Schritte zusammen kommen (ein Fußgänger macht ca. 80-100 Schritte pro Minute). Bei 500 Schritten mit einer Auftrittsfläche eines Schuhs von rund 0,03 m² (300 cm²) sind dann etwa 15 m² des Hallenbodens betreten worden. Das ist nur ein kleiner Teil der mit 200 m² angenommenen Bodenfläche. Damit kann basierend auf den Reinraumversuchen mit einer dort herumlaufenden Person für diese überwiegend nur einmal betretene Bodenfläche ein resuspendierter Anteil pro Auftrittsfläche von $5 \cdot 10^{-3}$ der Staubkontamination angenommen werden. Bei einer Flächenkonzentration von 10^4 Bq/m² des Pu-Staubes und 15 m², die innerhalb von 10 Minuten betreten werden, ergibt sich eine resuspendierte Aktivität von $7.5 \cdot 10^2$ Bq (10^4 Bq/m² · 15 m² · $5 \cdot 10^{-3}$) des Pu 238-Staubes. Beim Herumlaufen der betrachteten Person in der Halle resuspendierter Staub wird zunächst bodennah luftgetragen, verteilt sich aber aufgrund der Hallenbelüftung vertikal relativ schnell. Es kann somit für eine Expositionsabschätzung angenommen werden, dass im Wesentlichen eine homogene Konzentration des radioaktiven Staubes über das Hallenvolumen von 600 m³ resultiert. Ohne Berücksichtigung eines teilweisen Abbaus der innerhalb von 10 Minuten resuspendierten und in der Raumluft verteilten Aktivitätskonzentration durch Luftaustausch infolge der Hallenbelüftung und erneute Deposition aus der Raumluft auf

den Hallenboden stellt sich innerhalb von 10 Minuten eine Aktivitätskonzentration AK [Bq/m^3] von $AK = 7.5 \cdot 10^2 Bq/600 m^3 = 1.2 Bq/m^3$ des lungengängigen Pu-Staubes ein. Die Atemrate einer erwachsenen Person entspricht rund $1 m^3/h$, der Inhalations-Dosiskoeffizient der effektiven Dosis für Pu 238 in oxidischer Form beträgt $1.6 \cdot 10^{-5} Sv/Bq$. Damit resultiert während der angenommenen Aufenthaltsdauer von 10 Minuten für das betrachtete Expositionsszenario eine effektive Dosis über Inhalation von

Eff. Dosis = $1.2 Bq/m^3 \cdot 1/6 m^3 \cdot 1.6 \cdot 10^{-5} Sv/Bq = 3.2 \mu Sv$. Für den Fall, dass sich eine Person länger in der Halle aufhält und dort regelmäßig herumgeht, oder bei mehreren dort laufenden Personen, würde bald die Situation eintreten, dass Flächen des Hallenbodens wiederholt betreten werden. Damit wäre ein schneller Rückgang des pro Auftritt resuspendierten Anteils der Staubkontamination verbunden. Als vorsichtiger Wert für weitere n wiederholte Auftritte an einem Flächenbereich kann aufgrund der Messungen mit der Kanalapparatur mindestens eine Abnahme mit $1/n$ angenommen werden. Damit würde die durch Schritte induzierte Resuspension beim 10. Auftritt höchstens noch $1/10$ des anfänglichen Wertes betragen.

Eine Resuspension vom kontaminierten Hallenboden durch mit der Ventilation der Halle verbundene Luftströmung wäre auf Grund der Resuspensionsmessungen mit der Kanalapparatur äußerst gering. Diese Messungen ergaben bei kontinuierlicher Windgeschwindigkeit mit $2 m/s$ eine über die erste Stunde gemittelte Resuspensionsrate um $5 \cdot 10^{-4} 1/h$. Bei einer für belüftete Räume eher hohen Luftgeschwindigkeit von $0.2 m/s$ wäre aufgrund der im Bereich 2 bis $10 m/s$ gemessenen Abhängigkeit der Resuspensionsrate von der Windgeschwindigkeit mit der Potenz 2.5 die mittlere Resuspensionsrate in der ersten Stunde nur etwa $2 \cdot 10^{-6} 1/h$. Damit würden bei einer Kontamination des Hallenbodens von $200 m^2$ mit $10^4 Bq/m^2$ während der ersten Stunde nur $4 Bq$ der Plutoniumkontamination

luftgetragen. Das ist weit weniger als die oben abgeschätzten 750 Bq in den ersten 10 Minuten bei der angenommenen Begehung des Raumes.

7 Inhalationsbelastung von Einsatzpersonal in einer Notfallstation

7.1 Einleitung

In dem vorangegangenen Vorhaben (Koch et al., 2012) ist die Resuspension lungengängiger Partikel von kontaminierter Kleidung experimentell bestimmt worden. Dabei bewegten sich Versuchspersonen mit definierter Staubbelegung auf Kleidungsoberflächen in einer ventilierten Reinraumkammer mit fest eingestellter Luftwechselzahl, wobei der zeitliche Verlauf der Partikelkonzentration in der Raumluft gemessen wurde. Aus diesen Messungen wurde für die Frühphase nach einer Kontamination mit Staub die Resuspensionsrate ermittelt, mit der auf Kleidung abgelagerter lungengängiger Staub durch typische Bewegungen in die Raumluft übergeht. Im Ergebnis kann für die Resuspensionsrate von kontaminierter Kleidung ein Wert von $R_R = 5 \cdot 10^{-3}$ 1/h als Mittelwert für die ersten zwei Stunden nach erfolgter Staubbelegung durch trockene Ablagerung angenommen werden. Damit steht ein experimentell gestützter Wert für die Resuspensionsrate von Kleidung durch übliche Bewegungen von Personen wie Laufbewegungen zur Verfügung. Analog zu den Messungen der zeitlichen Abnahme der Resuspensionsrate bei Windresuspension zeigten die Messungen in der Reinraumkammer einen zeitlichen Abfall der Resuspensionsrate, der auf die Verteilung der wirksamen Haftkräfte von Staubpartikeln auf Kleidung und auf lokale Variationen in den wirksamen Ablösekräften von der Kleidung zurückgeführt werden kann. Partikel, deren Haftung schwächer ist, werden leichter und damit eher abgelöst als Partikel, auf die stärkere Haftkräfte wirken. Für „normale“ Bewegungsvorgänge, die Personen ausführen, liegen die anfänglichen Resuspensionsraten nach erfolgter Kontamination für Zeiten < 10 Minuten im Bereich von einigen Prozent pro Stunde. Die Resuspensionsrate nimmt in der ersten Stunde um eine Zehnerpotenz ab und liegt dann im Bereich von $R_R = 10^{-3}$ [1/h].

Personen, deren Kleidung mit radioaktivem Staub kontaminiert ist, stellen bei Aufenthalt in Innenräumen eine Quelle für Staubpartikel in der Raumluft dar, die durch mechanische Einwirkung wie Bewegungen und andere mechanische Krafteinwirkungen von der Kleidung abgelöst werden. Diese Quelle luftgetragener Staubpartikel steht in Konkurrenz zu Prozessen, die einen Abbau der in der Raumluft befindlichen Staubpartikel bewirken. Diese „Senken“ sind einmal der Luftaustausch mit unkontaminierter Frischluft, der als Luftwechselrate (Γ), z.B. in der Einheit [1/h] angegeben wird. Zum anderen bewirken Abscheideprozesse auf Oberflächen im Raum, insbesondere auf horizontalen Flächen durch Sedimentation, einen Abbau der Staubkonzentration in der Raumluft.

Die Ablagerung von (radioaktiven) Staubpartikeln auf dem Boden von Innenräumen führt im Laufe der Zeit zu einer Erhöhung der Aktivitätskonzentration [Bq/m^2] auf dem Boden durch Staubpartikel, die von kontaminierter Kleidung sich im Raum bewegend Personen abgelöst und luftgetragen worden sind. Damit bildet sich eine zusätzliche Quelle zur Erhöhung der Raumluftkonzentration durch eine erneute Resuspension infolge der Einwirkung durch Schritte von dort herumgehenden Personen. Zur Erfassung dieser sich im Laufe der Zeit durch sich akkumulierende Deposition verstärkenden Quelle radioaktiver Partikel in der Raumluft sind in diesem Vorhaben gezielte Experimente wiederum unter Verwendung des Reinraumes und der Messung der zeitlichen Entwicklung der Staubkonzentration in der Raumluft durchgeführt worden. Quelle für die Erhöhung der Raumluftkonzentration durch Resuspensionsprozesse ist in diesem Fall eine durch trockene Ablagerungsprozesse erzeugte Staubkonzentration auf dem Boden in Verbindung mit einer Einwirkung durch das Auftreten dort herumgehender Personen.

Im Folgenden wird der Betrieb einer Notfallstation bei einem schweren Reaktorunfall der obersten Stufe 7 auf der internationalen INES-Skala be-

handelt in Hinblick auf eine durch Resuspensionsprozesse im sogenannten Schwarzbereich sich einstellende Aktivitätskonzentration in der Raumlufte und damit verbundene Dosisbelastung von Einsatzpersonal durch Einatmen. Eine solche Analyse ist bereits in dem Vorhaben (Koch et al., 2012) durchgeführt worden, jedoch ohne Einbeziehung der Abreicherung radioaktiver Staubpartikel durch Ablagerung auf horizontalen Oberflächen wie dem Boden als zusätzliche Senke und ohne Berücksichtigung einer erneuten Resuspension in die Raumlufte durch dort herumgehende Personen. Dadurch kann der Beitrag dieses Expositionspfades – Deposition von radioaktivem Staub auf dem Boden, erneute Resuspension durch dessen Begehung und resultierende Inhalation durch Einsatzpersonal – quantifiziert werden und auf mögliche Gegenmaßnahmen geachtet werden. Zu möglichen Gegenmaßnahmen zählen der Einsatz von Atemschutz wie das Tragen von filtrierenden Halbmasken und Maßnahmen zur Reduzierung einer Resuspension vom Boden.

Um eine in sich geschlossene Darstellung zu erhalten, werden einige beschreibende Passagen aus dem Projekt (Koch et al., 2012) teilweise übernommen. Gleichzeitig werden bei der Abschätzung zu sich einstellenden Aktivitätskonzentrationen in der Raumlufte einer Notfallstation differenziertere Annahmen zur Kontamination von Kleidung und Hautoberflächen von Personen getroffen, die die Notfallstation aufsuchen. Die unterstellten Kontaminationswerte stellen immer noch pessimistische aber nicht mehr ganz so ungünstige Annahmen dar.

7.1.1 Betriebsweise einer Notfallstation

Bei einem Unfall in einem Kernkraftwerk mit erheblicher Freisetzung radioaktiver Stoffe können größere Gebiete in der Umgebung der Anlage kontaminiert werden. Im Rahmen von Katastrophenschutzplanungen, für die das jeweilige Land zuständig ist, sind Schutzmaßnahmen vorausge-

plant. Zur Erzielung einer bundeseinheitlichen Vorgehensweise sind dazu von den Ländern und vom Bund die „Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen“ (Rahmenempfehlungen 2008) erarbeitet und veröffentlicht worden. Die letzte Aktualisierung erfolgte 2008. Zusammen mit den „Radiologischen Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden“ sind sie auch von der Strahlenschutzkommission (SSK) publiziert. (SSK, 2009). Für den Fall, dass Personen während des Durchzugs der radioaktiven Wolke, z.B. beim Aufenthalt im Freien exponiert und/oder äußerlich kontaminiert worden sind, ist die Einrichtung und der Betrieb einer Notfallstation vorgeplant. In Band 4 der Veröffentlichungen der SSK (SSK 2007) „Medizinische Maßnahmen bei Kernkraftwerksunfällen“ sind die Planung, die Zielsetzung und der Betrieb einer Notfallstation ausführlich behandelt. Wesentliche Aufgaben einer Notfallstation sind

- Befragung und Registrierung der Betroffenen einschließlich der Dosisabschätzung
- Kontaminationsmessung und Dekontamination falls erforderlich
- Ärztliche Beurteilung und Entscheidung über weitere Maßnahmen.

Das Aufsuchen einer Notfallstation ist als Angebot an die Bevölkerung zu verstehen, sich bei Verdacht einer Exposition oder Kontamination von Kleidung und anderen Körperflächen zur Beurteilung weiterer Maßnahmen überprüfen zu lassen. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten einschließlich vorhandener Parkmöglichkeiten und nach Geschlechtern getrennter Duschen und Toilettenanlagen sind insbesondere Schulen, Hallenbäder oder Sporthallen als Notfallstation geeignet. Der Veröffentlichung Band 4 der SSK (SSK, 2007) ist zur Veranschaulichung das in Abb. 7.1 dargestellte Organisationsschema entnommen.

Der Bereich der Notfallstation, wo Personen noch äußerlich kontaminiert sein können und folglich von ihrer Kleidung und anderen Körperoberflächen radioaktive Stoffe abgelöst werden können, wird als „Schwarzbereich“ bezeichnet. Der sich nach Registrierung, Kontaminationsvorprüfung, dem Kontaminationsnachweis und dann ggf. erfolgter Dekontamination anschließende Bereich ist der „Weißbereich“. Für Besucher, bei denen eine äußerliche Kontamination oberhalb einer Entscheidungsschwelle festgestellt worden ist, beinhaltet die Dekontamination das Ablegen und Abgeben ihrer Kleidung, eine Säuberung durch Duschen und nach entsprechender Überprüfung des Dekontaminationserfolges eine neue Einkleidung mit in der Notfallstation bereitgestellter Ersatzkleidung.

Die Überprüfung auf Kontamination kann entweder über eine Messung mit einem Gammadosisleistungsmessgerät bei einem Abstand von etwa 1 m oder durch ein nah an der zu überprüfenden Oberfläche gehaltenes Kontaminationsmessgerät erfolgen. Bei einem radiologischen Ereignis, das zu einer Kontamination mit alpha-emittierenden Radionukliden geführt hat, ist eine Kontaminationsmessung mit einem Kontaminationsmessgerät mit Alpha-Empfindlichkeit durchzuführen.

Bei einem Kernkraftwerksunfall werden überwiegend Spaltprodukte freigesetzt, die Beta-/Gammastrahler sind und folglich über Direktstrahlung gemessen werden können. In Band 4 der SSK (SSK 2007) wird ein Entscheidungsschema bei Kontamination der Haut (und damit auch Kleidung) mit Richtwerten für abgestufte Maßnahmen vorgeschlagen. Die niedrigste Schwelle ist dabei eine Kontamination von 40 Bq/cm^2 ($4 \cdot 10^5 \text{ Bq/m}^2$) eines typischen Nuklidgemisches eines Kernkraftwerkunfalles, bei dem die Gammadosisleistung in einem Meter Abstand $0.1 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ unterschreitet. Unterhalb dieser Schwelle ist eine Dekontamination nicht erforderlich, bei Überschreitung bis zu einem Faktor 10 ist diese zu erwägen und darüber in jedem Fall erforderlich. Bei der obersten Schwelle von $> 40 \text{ kBq/cm}^2$ entsprechend $4 \cdot 10^8 \text{ Bq/m}^2$ wäre eine vorrangige Dekontamination durchzuführen. In diesem Fall würde die einfach zu messende Gammadosisleistung in 1 m Abstand für ein zu erwar-

tendes Nuklidgemisch $> 40 \mu\text{Sv/h}$ betragen. (Zur Orientierung: Im Mittel liegt die Dosisleistung durch externe Strahlung aus natürlichen terrestrischen und kosmischen Ursprüngen in Deutschland bei Werten unterhalb von $0.1 \mu\text{Sv/h}$.)

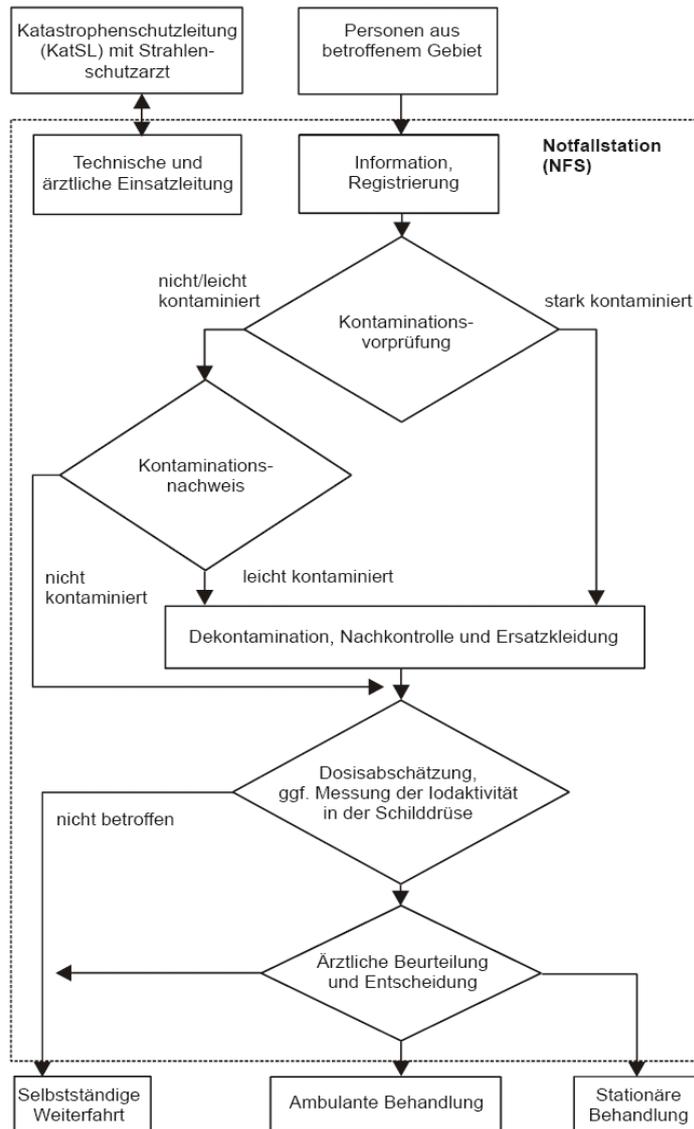


Abb. 7.1 Organisationsschema einer Notfallstation (Quelle (SSK, 2007))

7.1.1.1 Aktivitätskonzentration in der Raumlufth durch Resuspension von Kleidung

Personen, die eine Notfallstation aufsuchen, durchlaufen sukzessive und abhängig von ihrer Kontamination einzelne Stationen gemäß dem Organisationsschema in Abb. 7.1. Die durch Resuspension radioaktiver Partikel von ihrer Kleidung und anderen Körperflächen in die Raumlufth übergehende Aktivität führt zu einer Luftkonzentration im Schwarzbereich. Zur Abschätzung der dadurch verursachten Inhalationsbelastung und zur Beurteilung erforderlicher Atemschutzmaßnahmen und ggf. anderer Schutzmaßnahmen sind folglich Kenntnisse erforderlich, welcher Anteil der Kontamination pro Zeiteinheit und unter den Bedingungen einer Innenraumsituation durch Resuspensionsprozesse in den luftgetragenen Zustand übergeht. Die bereits in Vorhaben (Koch et al., 2012) beschriebenen Versuche zur Resuspension von mit Staub kontaminierten Kleidungsflächen einer Person in einem Reinraum sind so konzipiert und gefahren worden, dass sie der Situation im Schwarzbereich einer Notfallstation hinreichend ähnlich sind und auf diese übertragen werden können. Die sich bei realitätsnahen Bewegungen und auch Verweilphasen eines Probanden in dem Reinraum einstellende zeitabhängige Staubkonzentration resuspendierter Partikel ist bei bekanntem Kontaminationsniveau auf Kleidungsflächen und bei bekannten Einflussgrößen wie Raumvolumen und Luftwechselrate gemessen worden.

Die mit der empfindlichen Aerosolmesstechnik im Reinraum ermittelte Luftkonzentration, hier ausgedrückt als Aktivitätskonzentration AK [Bq/m^3] ist durch folgende Einflussgrößen unter Einbeziehung von Abscheideprozessen auf horizontalen Oberflächen wie dem Boden des Raumes bestimmt:

- Volumen des Raumes V [m^3]
- Größe der kontaminierten Fläche F [m^2] (hier Kleidung)

- Flächenkontamination FK [Bq/m²] (auf Kleidung)
- Resuspensionsrate $R_R(t)$ [1/s] von Kleidungsoberflächen
- Luftwechselrate Γ [1/s]
- Abscheiderate v_d/H von Staubpartikeln durch Sedimentation auf horizontalen Oberflächen, bestimmt durch die Sedimentationsgeschwindigkeit v_d [m/s] und die (effektive) Raumhöhe H_{eff} [m]

$$AK(t) = \frac{F \cdot FK \cdot R_R(t)}{V \cdot \left(\Gamma + \frac{v_d}{H_{eff}} \right)} . \quad [7.1]$$

Diese Beziehung folgt aus der Gleichung [2.2], in der für eine Innenraumsituation ein Resuspensionsfaktor definiert worden ist. Die Aktivitätskonzentration AK entspricht dem sich einstellenden Konzentrationsgleichgewicht zwischen der Emission von Staubpartikeln durch Resuspension und deren Entfernung durch Luftaustausch und Abscheideprozesse auf Oberflächen. Bei Kenntnis der Resuspensionsrate $R_R(t)$ von kontaminierter Kleidung aufgrund der Messungen mit der Reinraumkammer lässt sich die Aktivitätskonzentration in der Raumluft einer Notfallstation bei Kenntnis der übrigen in Gleichung [7.1] eingehenden Größen unmittelbar ermitteln und damit die Inhalationsbelastung von Personal, das sich dort für längere Zeiten aufhält, bestimmen. An der Beziehung ist leicht erkennbar, dass die sich in der Raumluft einstellende Konzentration proportional zur Größe der kontaminierten Fläche F , der Höhe der Kontamination FK und der Resuspensionsrate $R_R(t)$ ansteigt. Die Raumluftkonzentration ist umgekehrt proportional zum Raumvolumen V , in dem sich die resuspendierten Partikel verteilen, und zu dem Term $(\Gamma + v_d/H_{eff})$. Je höher die Luftaustauschrate Γ umso schneller ist der Abbau des radioaktiven Staubes in der Raumluft. Der Term v_d/H_{eff} erfasst die Abbaurrate von Staubpartikeln in der Raumluft durch Ablagerungsprozesse. Dabei ist die Größe v_d die Depositionsgeschwindigkeit von Partikeln im lungengängigen Bereich, die mit v_d

= $2 \cdot 10^{-3}$ m/s angenommen werden kann, und H_{eff} steht für die effektive Raumhöhe. In einem leeren Raum entspricht H_{eff} der Raumhöhe H . Befinden sich noch andere horizontale Flächen im Raum, z.B. von Möbelstücken, dann kann dem dadurch Rechnung getragen werden, dass man eine geringere effektive Höhe H_{eff} einsetzt. Die Abbaurate von Partikeln in der Raumluft durch Sedimentation auf horizontalen Oberflächen wie dem Boden steigt entsprechend mit der Sedimentationsgeschwindigkeit v_d an und nimmt mit der (effektiven) Raumhöhe ab. Für Partikel im lungengängigen Bereich $< 10 \mu\text{m}$ kann eine schnelle Durchmischung in der Raumluft nach lokalem Eintrag, z.B. durch Resuspension, angenommen werden.

7.1.1.2 Kontamination von Oberflächen in der Notfallstation durch radioaktive Partikel infolge Resuspension von Kleidung

Die sich in der Raumluft des Schwarzbereiches der Notfallstation gemäß Gleichung [7.1] einstellende Raumluftkonzentration AK [Bq/m^3] stellt ein Gleichgewicht dar zwischen der fort dauernden Emission durch Resuspension von der Kleidung sich dort aufhaltender Personen und der Entfernung von Staubpartikeln durch den Luftaustausch mit der Rate Γ und der Abscheidung auf vornehmlich horizontalen Oberflächen durch Sedimentation. Dabei führt die Ablagerung von radioaktiven Partikeln zu einem kontinuierlichen Transfer auf den Boden und andere horizontale Flächen des Schwarzbereiches und damit zu einem Kontaminationsaufbau.

Die Aktivität $A(t)$ radioaktiver Staubpartikel in der Luft des Schwarzbereiches mit dem Volumen V [m^3] ist durch das Produkt aus der Aktivitätskonzentration und dem Raumvolumen V gegeben.

$$A(t) = AK(t) \cdot V \quad [7.2]$$

Die durch Abscheidung im Zeitintervall (t_2-t_1) auf horizontalen Flächen deponierte Aktivität A_{dep} entspricht:

$$A_{dep}(t_1 \rightarrow t_2) = \frac{v_d}{H} \cdot A(t) \cdot (t_2 - t_1) \quad [7.3]$$

Die Aktivitätskonzentration auf den dadurch kontaminierten Oberflächen OF ist durch A_{dep}/OF gegeben und steigt mit der Zeit kontinuierlich an.

7.1.2 Übertragung auf eine Notfallstation

Die Ergebnisse zur Resuspension von kontaminierter Kleidung mit der Reinraumkammer werden hier exemplarisch auf Bedingungen einer Notfallstation unter Anwendung der Gleichung [7.1] übertragen. Danach ist die sich in der Raumluft des Schwarzbereiches einstellende Aktivitätskonzentration AK mit den dort eingeführten Bezugsgrößen gegeben durch

$$AK(t) = \frac{F \cdot FK \cdot R_R(t)}{V \cdot \left(\Gamma + \frac{v_d}{H_{eff}} \right)} \quad [7.4]$$

Zur beispielhaften Quantifizierung dieser Größen wird hier von folgenden Annahmen ausgegangen:

Der Durchsatz an Personen, die die Notfallstation aufsuchen, sei 1000 Personen pro 24 h. Das ist zweifellos ein hoher Wert. 200 dieser Personen weisen eine deutlich erhöhte Kontamination von Kleidung und freien Körperoberflächen auf. Von diesen 200 Personen haben 160 eine Kontamination $FK=4 \cdot 10^6$ Bq/m², 30 Personen von $FK=4 \cdot 10^7$ Bq/m² und 10 Personen von $FK=4 \cdot 10^8$ Bq/m². Diese Annahme wird weiter unten diskutiert. Die mittlere Kontamination dieser 200 Personen ist damit $2.9 \cdot 10^7$ Bq/m². Die Aufenthaltsdauer einer Person mit festgestellter Kontamination im Schwarzbereich bis zum Ablegen und Abgeben der kontaminierten Kleidung betrage 2h. Die kontaminierte Oberfläche einer Person beträgt 2 m².

Das Luftvolumen des Schwarzbereiches mit 400 m² angenommener Grundfläche und 2.5 m Höhe beträgt $V=1000$ m³. Als Luftwechselrate im Schwarzbereich kann für Gebäude, die als Notfallstation infrage kommen, ein Wert von $\Gamma = 3$ 1/h ($8.3 \cdot 10^{-4}$ 1/s) angesetzt werden. Damit wird ein Anteil von $8.3 \cdot 10^{-4}$ der Raumluft pro Sekunde ausgetauscht. Als Resuspensionsrate von kontaminierter Kleidung über die Aufenthaltsdauer von 2 h im Schwarzbereich wird $R_R = 5 \cdot 10^{-3}$ 1/h angenommen. Das entspricht $R_R = 1.4 \cdot 10^{-6}$ 1/s. Mit der Annahme, dass die Aufenthaltsdauer dieser Personen im Schwarzbereich 2 h beträgt, befinden sich dort im Mittel 17 Personen, von deren Kleidung und freien Oberflächen durch Resuspensionsprozesse Aktivität in die Raumluft übergeht. Die mittlere Flächenkontamination $FK(\text{mittel})$ dieser 17 Personen beträgt $FK(\text{mittel}) = 2.9 \cdot 10^7$ Bq/m². Insgesamt beträgt die kontaminierte Fläche $F = 17 \cdot 2$ m² = 34 m². Die Rate, mit der Staubpartikel aus der Raumluft des Schwarzbereiches auf den Boden und andere horizontale Oberflächen durch Deposition entfernt werden, ist durch eine eher niedrig angesetzte effektive Raumhöhe $H_{\text{eff}} = 2$ m (um neben dem Boden die horizontalen Flächen von Einrichtungsgegenständen zu berücksichtigen) und die angenommene mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit für lungengängige Partikel $v_d = 2 \cdot 10^{-3}$ m/s gegeben und ergibt $v_d / H_{\text{eff}} = 10^{-3}$ 1/s .

Damit sind alle in Gleichung [7.1] eingehenden Größen definiert:

$$\begin{aligned}
 AK &= \frac{F \cdot FK \cdot R_R(t)}{V \cdot \left(\Gamma + \frac{v_d}{H_{\text{eff}}} \right)} \\
 &= \frac{34 \text{ m}^2 \cdot 2,9 \cdot 10^7 \text{ Bq/m}^2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/s}}{10^3 \cdot \text{m}^3 \cdot (8,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/s} + 10^{-3} \text{ 1/s})} = 7,5 \cdot 10^2 \text{ Bq/m}^3
 \end{aligned}
 \tag{7.5}$$

Als sich unter diesen Bedingungen einstellende Aktivitätskonzentration AK erhält man $AK = 7.5 \cdot 10^2$ Bq/m³. Ohne Berücksichtigung von Abschei-

deprozessen durch Sedimentation lungengängiger Partikel mit der Rate gemäß Gl. [7.3] wäre die Luftkonzentration unter den getroffenen Annahmen mit $1.4 \cdot 10^3 \text{ Bq/m}^3$ annähernd um einen Faktor 2 höher.

Zu ihrer Bewertung kann die pro Stunde resultierende effektive Dosis durch Inhalation bei Aufenthalt im Schwarzbereich abgeschätzt werden: Die Atemrate einer erwachsenen Person beträgt etwa $1 \text{ m}^3/\text{h}$. Als Inhalationsdosiskoeffizient DF der effektiven Dosis für ein zu erwartendes Spaltproduktgemisch bei einem schweren Reaktorunfall kann näherungsweise ein Wert von $DF = 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ für einen Erwachsenen genommen werden. Damit würde sich eine als Dosisrate ausgedrückte interne Exposition (eff. Dosis als Folgedosis) von

$$\text{Dosisrate} = 7.5 \cdot 10^2 \text{ Bq/m}^3 \cdot 1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1.0 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq} = 7.5 \text{ } \mu\text{Sv/h}$$

ergeben. Bei einer Aufenthaltszeit von Einsatzpersonal im Schwarzbereich von beispielsweise 10 Stunden ergäbe sich somit insgesamt nur eine Inhalationsdosis unterhalb von $0,1 \text{ mSv}$. Mit einer solchen Exposition über Inhalation wäre sicher kein ins Gewicht fallendes Strahlenrisiko für das Einsatzpersonal verbunden. Wenn zusätzlich für das Personal eine einfache Halbmaske z.B. vom Typ FFP2 Filtermaske als Atemschutz vorgesehen wäre, würde sich die Strahlenexposition durch Inhalation bei einer Einsatzzeit von 10 h noch um etwa einen Faktor 20 reduzieren, also im Bereich von $< 5 \text{ } \mu\text{Sv}$ liegen. Es sollte möglich sein, dass dieser zusätzliche Schutz des Einsatzpersonals ohne formale Zulassung eines solchen Filtermaskentyps für diesen Zweck realisiert werden kann. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass auf eine solche Situation in einer Notfallstation relativ leicht reagiert werden kann, falls sich bei der Kontaminationsvorprüfung herausstellt, dass ein größerer Anteil der Personen, die die Notfallstation aufsuchen, so hohe Kontaminationen aufweist wie hier angenommen.

Die Messungen in der Reinraumkammer im Vorhaben [Koch et al., 2012] haben gezeigt, dass während mechanischer Beanspruchung kontaminierter Kleidung mit einer erhöhten Resuspension zu rechnen ist. Das ist in einer Notfallstation in Raumbereichen zu erwarten, wo kontaminierte Personen vor einer Reinigung durch Duschen ihre Kleidung ablegen und diese dann mit Unterstützung durch Einsatzkräfte in Plastiksäcken oder anderen Behältnissen verstaut wird. Für das hierbei eingesetzte Personal ist das vorsorgliche Tragen eines Atemschutzes, z.B. einer wenig belastenden FFP2 oder FFP3 Halbmaske, zu empfehlen.

7.1.3 Annahmen zur Kontamination von Personen, die eine Notfallstation aufsuchen.

In die hier durchgeführte Abschätzung zur sich im Schwarzbereich einer Notfallstation infolge Resuspensions- und Abscheideprozessen einstellenden Raumlufkonzentration an radioaktivem Staub geht die Anzahl der sich dort aufhaltenden kontaminierten Personen und deren Kontaminationsgrad (Flächenkontamination FK [Bq/m²] direkt ein. Ergebnisse von Unfallanalysen für Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren, bei denen es zu einer Kernschmelze kommt, und Erfahrungen aus schwerwiegenden Unfällen wie im März 2011 bei den Reaktorblöcken 1 bis 3 in Fukushima haben ergeben, dass die radiologisch dominanten Freisetzungen durch kurzlebige Jodisotope (I 131, I 132, I 133), Te 132 (zerfällt mit Halbwertszeit von ca. 3 d in I 132) und die beiden Cs-Isotope Cs 134 (Halbwertszeit ca. 2.1 a) und Cs 137 (Halbwertszeit ca. 30 a) bestimmt werden. Aufgrund des höheren Kerninventars und der zu erwartenden etwas höheren Freisetzunganteile von Jod im Vergleich zu Cäsium kann zur Orientierung grob eine um einen Faktor 10 höhere Freisetzung der Jodisotope gegenüber den beiden Cs-Isotopen angenommen werden.

Nur unter den Bedingungen einer schwerwiegenden Freisetzung bei einem Kernkraftwerksunfall und Daueraufenthalt im Freien in der näheren Umgebung der Anlage unter der Schadstofffahne kann es zu Kontamina-

tionen im Bereich $FK = 4 \cdot 10^8$ Bq/m² oder auch höher kommen. Mit größerem Abstand von einigen km oder bei Aufenthalt in seitlichem Abstand von der Fahnenachse sind unter diesen Bedingungen niedrigere Kontaminationswerte zu erwarten. Falls es während der Schadstoffausbreitung zu nasser Deposition infolge Regen kommt, könnten auch höhere Kontaminationswerte resultieren, allerdings wäre dann die Resuspensionsrate von kontaminierten Oberflächen wie Kleidung erheblich geringer, wie aus vorliegenden Ergebnissen des Vorhabens (Koch et al., 2012) und aus dieser Studie geschlossen werden kann.

Für die Zwecke einer vorsichtigen Abschätzung der sich im Schwarzbereich einer Notfallstation durch Resuspension einstellenden Luftkonzentration AK [Bq/m³] werden hier folgende Annahmen getroffen:

Von 1000 Personen, die innerhalb von 24 h die Notfallstation aufsuchen, weisen 200 eine deutlich erhöhte Kontamination von Kleidung und freien Körperoberflächen auf.

Von diesen 200 Personen haben 160 eine Kontamination $FK=4 \cdot 10^6$ q/m², 30 Personen von $FK=4 \cdot 10^7$ Bq/m² und 10 Personen von $FK=4 \cdot 10^8$ Bq/m². Das entspricht einer mittleren Kontamination dieser 200 Personen von rund $3 \cdot 10^7$ Bq/m².

Insgesamt dürften die hier getroffenen Annahmen zur Kontamination von Personen, die eine Notfallstation aufsuchen, einer oberen Abschätzung entsprechen. Solche Bedingungen wären nur bei einem sehr schweren Kernkraftwerksunfall der Stufe 7 auf der internationalen INES Skala möglich.

7.1.4 Kontamination des Bodens im Schwarzbereich einer Notfallstation durch von Kleidung resuspendierten radioaktiven Staub

Die sich im Schwarzbereich einer Notfallstation einstellende Aktivitätskonzentration $AK(t)$ ist gemäß Gleichung [7.1] bestimmt durch die Emissionsrate infolge Resuspension radioaktiver Staubpartikel von kontaminierter Kleidung und die Rate mit der durch Luftaustausch und durch Abscheideprozesse auf Boden und anderen horizontalen Oberflächen die Aktivität in der Raumluft abgebaut wird. Mit den plausiblen Zahlenwerten der Ventilationsrate der Raumluft von $8.3 \cdot 10^{-4}$ pro Sekunde (vgl. Kapitel 7.1.2) und der Abscheiderate durch Sedimentation vornehmlich auf dem Boden im Schwarzbereich von 10^{-3} 1/s lässt sich unmittelbar schließen, dass von der partikelförmigen Aktivität, die durch Resuspensionsprozesse von der Kleidung kontaminierter Personen in die Raumluft des Schwarzbereiches gelangt, etwa eine Hälfte durch den Luftaustausch ins Freie gelangt und der andere Teil auf dem Boden abgeschieden wird. Eine Resuspensionsrate von $5 \cdot 10^{-3}$ 1/h bedeutet, dass bei einer Aufenthaltsdauer von 2 Stunden im Schwarzbereich 1 % der Kontamination auf Kleidung von Personen, die die Notfallstation aufsuchen, in die Raumluft des Schwarzbereiches gelangt.

Mit den Zahlenwerten von Kapitel 7.1.2 wird innerhalb von 24 h durch die Kontamination auf Kleidung von Personen eine Aktivität von $F \cdot FK = 200$ Personen $\cdot 2$ m²/Person $\cdot 2,9 \cdot 10^7$ Bq/m² = $1.2 \cdot 10^{10}$ Bq in die Notfallstation eingebracht. Davon gelangt etwa 1% während des Aufenthaltes im Schwarzbereich durch Resuspension in die Raumluft und rund die Hälfte dieser Aktivität wird auf dem Boden und anderen horizontalen Oberflächen abgelagert. Bei einer angenommenen Bodenfläche des Schwarzbereiches von 400 m² steigt somit die Kontamination innerhalb von 24 h auf einen Wert von etwa $6 \cdot 10^7$ Bq/400 m² = $1.5 \cdot 10^5$ Bq/m². Verglichen mit der angenommenen mittleren Kontamination von $2.9 \cdot 10^7$ Bq/m² der hoch

kontaminierten 200 Personen, die innerhalb von 24 h die Notfallstation aufsuchen, ist die über 24 h aufgebaute Bodenkontamination gering.

Mit den experimentellen Daten des aktuellen Vorhabens dieses Berichtes lässt sich auch abschätzen, welchen Beitrag zur Aktivitätskonzentration in der Raumluft das Herumgehen von Besuchern der Notfallstation und von Personal im Schwarzbereich liefert bei einer über 24 h akkumulierten Bodenkontamination von $1.5 \cdot 10^5$ Bq/m².

Die Messungen in der Reinraumkammer haben ergeben, dass von lungengängigem Staub, der sich durch trockene Ablagerung auf dem Boden befindet, pro Schritt ein bestimmter Anteil im Bereich der Trittläche aufgewirbelt wird und in die Raumluft gelangt. Als mittlerer Wert für den resuspendierten Anteil pro Schritt kann ein Wert von $R_A = 5 \cdot 10^{-3}$ bezogen auf die mit dem Schuh betretene Fläche verwendet werden. Für die Trittläche kann man rund 300 cm² ansetzen. Beim ständigen Gehen erfolgen rund 100 Schritte pro Minute. Damit summiert sich in einer Minute insgesamt eine Fläche von 3 m², die von einer Person betreten wird. In einer Stunde sind es dann 180 m², die von Schritten beaufschlagt werden. Bei einem Raum mit einer Bodenfläche F_B wird durch eine ständig herumlaufende Person folglich innerhalb einer Stunde ein Flächenanteil F_A von

$$F_A = \frac{\text{betretene Fläche}}{\text{Bodenfläche } F_B} = \frac{180 \text{ m}^2}{F_B [\text{m}^2]} \quad [7.6]$$

überdeckt. Davon gelangt ein Anteil $R_A = 5 \cdot 10^{-3}$ der Staubelegung durch Resuspension in die Raumluft. Das entspricht einer Resuspensionsrate R_R von

$$R_R [1/h] = \frac{F_A}{1 \text{ h}} \cdot R_A \quad [7.7]$$

Das Herumgehen von Personen, die sich im Schwarzbereich aufhalten, dürfte insgesamt vorsichtig erfasst sein, wenn man dort von einem permanenten Gehen von 10 Personen ausgeht. Bei einer Bodenfläche des Schwarzbereiches von $F_B = 400 \text{ m}^2$ resultiert damit eine Resuspensionsrate R_R von

$$R_R [1/h] = \frac{10 \cdot 180 \text{ m}^2}{400 \text{ m}^2} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/h} \quad [7.8]$$

Anfangs ist der Boden im Schwarzbereich noch frei von radioaktivem Staub, der durch Resuspension von Kleidung und anderen Oberflächen kontaminierter Personen in die Raumlufte gelangt und von dort zum Teil über Ablagerungsprozesse zu einer sekundären Kontamination des Bodens führt.

Weiter oben ist nach einer Betriebsdauer der Notfallstation von 24 h eine Bodenkontamination von $1.5 \cdot 10^5 \text{ Bq/m}^2$ abgeschätzt worden. Davon würde durch die Schrittbeaufschlagung pro h ein Anteil $R_R = 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/h}$ durch Resuspension vom Boden in die Raumlufte übergehen. In einer Stunde geht davon bei einer Resuspensionsrate von $2.3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/h}$ eine Aktivität A_{Boden} als lungengängiger Staub von

$$A_{\text{Boden}} [\text{Bq/h}] = 400 \text{ m}^2 \cdot 1.5 \cdot 10^5 \text{ Bq/m}^2 \cdot 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/h} = 1.3 \cdot 10^6 \text{ Bq/h}$$

in die Raumlufte über. Diese Aktivitätsmenge kann mit der Aktivität verglichen werden, die in einer Stunde durch Resuspension von Kleidung und anderen Oberflächen von Besuchern der Notfallstation mit hoher Kontamination in die Raumlufte des Schwarzbereiches übergeht. Mit den Zahlenwerten des Zählers der Gleichung [7.3] ($F[\text{m}^2] \cdot FK [\text{Bq/m}^2] \cdot R_R [1/h] = 34 \text{ m}^2 \cdot 2.9 \cdot 10^7 \text{ Bq/m}^2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/h}$) ergibt sich ein Aktivitätseintrag A_{Kleidung} pro Stunde von $A_{\text{Kleidung}} [\text{Bq/h}] \approx 5 \cdot 10^6 \text{ Bq/h}$. Dieser direkte Resuspensionsbeitrag von Kleidung ist somit um rund einen Faktor 4 höher als der indi-

rekte zusätzliche Beitrag durch Resuspension vom Boden infolge einer Schrittbeaufschlagung durch dort gehende Personen, nachdem sich im Verlauf von 24 h eine Kontamination auf dem Boden des Schwarzbereiches aufsummiert hat. Somit ist der Beitrag einer Resuspension vom Boden des Schwarzbereiches zur Aktivitätskonzentration in der Raumluft auch nach längerer Betriebsdauer noch gering im Vergleich zur direkten Quelle durch Resuspension von Kleidung. Wie Versuche mit der Kanalapparatur gezeigt haben, kann eine Resuspension von kontaminierten Flächen wie dem Boden stark unterdrückt werden, indem man diese im Laufe der Zeit leicht mit Wasser besprüht. Eine solche Maßnahme wäre damit zur Unterdrückung dieser sekundären Quelle für Resuspension empfehlenswert.

8 Informationen und Empfehlungen für den Einsatzfall bei kontaminierten Flächen

8.1 Einleitung

Zu einer Kontamination von Oberflächen mit radioaktiven Stoffen kann es durch eine Vielzahl von Ereignissen kommen. Häufig resultiert eine Kontamination aus einer vorausgegangen Freisetzung radioaktiver Stoffe in die umgebende Luft und einer anschließenden Ablagerung auf Oberflächen. Mögliche auslösende Ereignisse einer Kontamination von Oberflächen sind durch Handhabungsfehler, Unfälle oder durch böswillige Handlungen verursachte Einträge staubförmiger radioaktiver Stoffe in die Raumluft oder die freie Atmosphäre. Daran schließt sich eine Dispersion im der umgebenden Luft in Innenräumen oder durch atmosphärische Ausbreitung im Freien an, die mit Abscheideprozessen, z.B. durch Sedimentation, auf Oberflächen einhergeht. Je nach Eigenschaften der radioaktiven Ausgangssubstanz und bei dem auslösenden Ereignis einwirkenden mechanischen und thermischen Energien weisen die zunächst luftgetragenen radioaktiven Stoffe eine Verteilung von Partikelgrößen auf. Für eine Inhalationsbelastung von Personen sind

Partikelgrößen im lungengängigen Bereich bis etwa 10 µm aerodynamischem Durchmesser maßgeblich.

Abgesehen von Personen, die unmittelbar durch das Freisetzungseignis entstandenen erhöhten Aktivitätskonzentration in der Raumluft oder der vorbeiziehenden Schadstoffwolke im Freien ausgesetzt worden sind, beruht eine spätere Exposition durch Einatmen luftgetragener Aktivität auf nach Deposition einsetzenden Resuspensionsprozessen, die zu einem erneuten Eintrag in die umgebende Luft führen. In der Regel kommt Einsatzpersonal, z.B. als „First Responder“, erst nach dem auslösenden Ereignis in vorab kontaminierten Bereichen zum Einsatz.

Solche Einsatzbedingungen sind natürlich nicht auf Kontaminationsszenarien mit radioaktiven Stoffen beschränkt sondern bestehen auch nach einer Freisetzung und anschließenden Deposition von partikelförmigen biologischen und chemischen Noxen.

Im Fall von radioaktiven Stoffen ist eine Kontamination meist relativ leicht und mit guter Empfindlichkeit nachweisbar, da mit radioaktiven Zerfällen die Aussendung von ionisierenden Teilchen in Form von Alpha- Beta- und Gamma-Partikeln und in ganz seltenen Fällen auch von Neutronen verbunden ist. Bei der überwiegenden Anzahl der in Medizin, Forschung und Technik eingesetzten Radionuklide wird gleichzeitig Beta- und Gamma-Strahlung beim Zerfall emittiert. Wesentlich seltener sind Radionuklide, bei denen die Alpha-, Beta- oder Neutronen-Strahlung dominiert und ein Beitrag durch Gamma-Strahlung gering oder gar nicht vorhanden ist.

Die Menge eines radioaktiven Stoffes wird in der Einheit Becquerel [Bq] angegeben. Diese Größe entspricht der Anzahl der radioaktiven Zerfälle pro Sekunde (1 Bq = 1 Zerfall/s). Die Kontamination einer Fläche wird

gewöhnlich als Aktivitätsmenge eines Radionuklids pro Flächeneinheit angegeben, z.B. als Bq/m².

Von Bedeutung für eine Strahlenexposition von Personen sowie den Nachweis der Strahlung durch Messgeräte sind die unterschiedlichen Reichweiten der aufgeführten Strahlungsarten in Materie, also auch lebendem Gewebe:

Gamma-Strahlung hat ein hohes Durchdringungsvermögen in Materie. Daher kann sie sowohl bei Herkunft außerhalb des Körpers als auch innerhalb des Körpers zu einer Bestrahlung von Gewebe und damit zu einer Dosis führen. Beispiel für eine Exposition durch Radionuklide im Körper ist der übliche Gehalt an Radionukliden aus natürlichen Ursachen. Bei einer erwachsenen Person bewegt sich die Aktivitätsmenge an den natürlich vorkommenden Radionukliden Kohlenstoff 14 (C 14) und Kalium 40 (K 40) im Bereich von 8000 Bq, entsprechend 8000 Zerfällen pro Sekunde. Zu einer dauerhaften Strahlenexposition des Körpers, die von außerhalb des Körpers befindlichen Quellen herrührt, führen beispielsweise der natürliche Gehalt an radioaktiven Stoffen in der Erde, die Gamma-Strahlung emittieren, oder die kosmische Strahlung, die auf Quellen außerhalb unseres Planeten zurückzuführen ist.

Nur vergleichsweise wenige Radionuklide senden beim radioaktiven Zerfall Alpha-Strahlung aus. Deren Reichweite in Materie ist sehr gering, so dass Alpha-Partikel nur Luftschichten von wenigen cm durchdringen können und durch das oft erwähnte Blatt Papier vollständig abgeschirmt werden. Sie erreichen somit auch im Fall einer direkten Hautkontamination selten die strahlenempfindliche Basalschicht der obersten Hautschicht (Epidermis). Für Alpha-Strahlung ist die Aufnahme in den Körper die dominante Ursache einer Strahlenbelastung. Mögliche Aufnahmewege sind Einatmen luftgetragener Radionuklide (Inhalation), durch Nahrungsaufnahme (Ingestion) oder über vorhandene Verletzungen der Haut bei Kontakt mit Kontamination in den Körper gelangte Radionuklide.

Menschen erhalten auch durch Alpha-Strahlung aus natürlichen Ursachen eine Strahlenexposition durch das Einatmen des Radionuklids Radon-222 (Rn 222) und seiner Zerfallsprodukte. Dieses Edelgas ist auf den natürlichen Urangehalt im Boden und in Baumaterialien von Häusern zurückzuführen und gelangt durch Diffusion in die umgebende Luft. Diese auf das Edelgas Rn 222 und seine durch radioaktiven Zerfall entstehenden Töchternuclide, zurückzuführende interne Strahlenexposition durch Alpha-Emitter liefert mit einem mittleren Wert von etwa 0,8 mSv effektive Dosis pro Jahr einen wichtigen Beitrag zur natürlichen Strahlenexposition in Deutschland.

Im Falle des in diesem Bericht interessierenden Eintrags von radioaktivem Staub in die umgebende Luft ist die Ursache eine Kontamination von Oberflächen mit nachfolgender Resuspension durch diverse Einwirkungen wie Luftströmungen und Vibration.

Bei einer Kontamination mit beta-strahlenden Radionukliden trägt sowohl eine direkte Bestrahlung der Haut von Außen als auch eine Aufnahme in den Körper, z.B. durch Einatmen, zur Strahlenexposition bei. Die Reichweite in Luft hängt von der Energie der Beta-Strahlung ab und kann für hohe Zerfallsenergien einige Meter betragen. Damit kann Beta-Strahlung ausgehend von einer kontaminierten Fläche zu einer externen Strahlenexposition (vornehmlich der Haut) führen und bei luftgetragener Aktivität zu einer internen Strahlenexposition, nachdem das Radionuklid durch Einatmen in den Körper gelangt ist.

Für den Schutz von Personen und damit für die Planung und Durchführung von Schutz- und Gegenmaßnahmen durch Einsatzpersonal ist von großer Bedeutung, dass ionisierende Strahlung mit relativ einfach handhabbaren Messgeräten empfindlich nachgewiesen werden kann. Bei den meisten Kontaminationssituationen wird leicht nachweisbare Gamma-Strahlung beteiligt sein, die aufgrund ihres hohen

Durchdringungsvermögens mit gängigen Dosisleistungs- und Dosismessgeräten gut erfassbar ist. Die Kontamination von Flächen kann dabei durch Kontaminationsmonitore bestimmt werden, die nah an der jeweiligen Oberfläche gehalten werden.

Für den Nachweis von Alpha- und Beta-Strahlung sind wegen der geringen Reichweite in Materie spezielle Kontaminationsmessgeräte mit dünnen Fensterflächen erforderlich, für deren Einsatz einige Erfahrung erforderlich ist.

8.2 Aus den Resuspensionsmessungen abgeleitete Informationen und Empfehlungen für den Einsatzfall

Nach einem Ereignis, bei dem der Verdacht oder der Hinweis vorliegt, dass es zu einer Kontamination von öffentlichen zugänglichen Flächen gekommen ist, wird Einsatzpersonal zu vielfältigen Schutz- und Gegenmaßnahmen eingesetzt. Zu den Tätigkeiten zählen:

- Dringende Maßnahmen der Gefahrenabwehr und Schadensbegrenzung
- Die Erfassung der entstandenen radiologischen Lage durch Messungen
- Die Einrichtung eines Gefahrenbereiches, in dem Referenzwerte der Dosisleistung oder der Kontamination überschritten sind, und eines darum liegenden für die Öffentlichkeit zunächst abgesperrten Bereiches
- Die Erstversorgung und Betreuung von verletzten Personen
- Das Einrichten eines Dekont-Platzes an einem Übergang vom Gefahrenbereich zum abgesperrten Bereich zur Überprüfung von Personen und Gegenständen beim Verlassen des Gefahrenbereiches auf Kontamination und ggf. zur erforderlichen Dekontamination

- Initiierung und ggf. Durchführung von geeigneten Schutzmaßnahmen, die eine Verminderung weiterer Strahlenexpositionen von Personen der allgemeinen Bevölkerung und von Einsatzpersonal bewirken sollen.

Bei allen diesen Tätigkeiten ist wichtig, dass der Eigenschutz des Einsatzpersonals durch Messgeräte unterstützt wird, die die Ortsdosisleistung und die erhaltene Körperdosis durch externe Gamma-Strahlung anzeigen, und ev. auch das Setzen von Alarmschwellen dieser Größen ermöglichen. Im Fall einer Kontamination mit alpha- oder beta-strahlenden Radionukliden ohne oder nur schwachem Beitrag durch Gamma-Strahlung, wären auf Alpha- oder Beta-Strahlung empfindliche Kontaminationsmessgeräte zur näherungsweise Erfassung der Höhe der Flächenkontamination erforderlich.

Weiterhin soll ein der Lage angepasster Atemschutz angewandt werden, der in vernünftiger Relation zur möglichen Aufnahme luftgetragener radioaktiver Stoffe durch Einatmen und der damit verbundenen Dosisbelastung steht. Dabei ist auch zu bedenken, dass ein hoher Atemschutz durch belastendes Gerät einen effizienten Einsatz erheblich erschweren kann und auch zulasten von einsatzfähigen Personalressourcen geht. Nicht zuletzt ist auch die psychologische Wirkung beim Umgang mit Personen der allgemeinen Bevölkerung zu bedenken, so dass auch aus diesem Aspekt auf gerechtfertigten und in vernünftiger Relation zur Gefährdungslage stehendem Atemschutz zu achten ist.

Bei einer Kontamination von Flächen in Innenräumen und im Freien mit partikelgetragenen radioaktiven Stoffen, kann ein Übergang in die umgebende Luft durch diverse Resuspensionsprozesse bewirkt werden, die Gegenstand der in diesem Bericht und in dem Vorhaben (Koch W. et al, 2012) durchgeführten experimentellen und analytischen

Untersuchungen sind. Daraus werden hier für den praktischen Einsatz wichtige Erkenntnisse zusammengefasst:

Bei Messungen mit der Kanalapparatur und in einem Reinraum sind die wesentlichen Effekte untersucht und quantitativ erfasst worden, die zu einer erneuten Aufwirbelung (Resuspension) von zuvor abgelagerten Staubpartikeln führen. Bei diesen Untersuchungen wurde eine Vielzahl von Oberflächen einbezogen, die als repräsentativ für häufige Arten von Oberflächen in städtischen Bereichen anzusehen sind. Zusätzlich wurde auch im Hinblick auf durch abgelagerten Staub kontaminierte Kleidung von Personen die Resuspension von Kleidung bei typischen Bewegungen wie Gehen oder leichter Klopfbelastung untersucht. Bei der vorausgehenden definierten Kontamination der untersuchten Oberflächen wurden auch unterschiedliche Stäube eingesetzt, wobei vornehmlich Partikelgrößen im lungengängigen Bereich interessierten. Dabei erwies sich der Einfluss stofflicher Eigenschaften der Teststäube als relativ gering im Vergleich zu anderen Einflussgrößen. In den meisten Fällen erfolgte die Kontamination durch eine „trockene“ Ablagerung auf den untersuchten Oberflächen infolge Sedimentation. Es wurden aber auch auf Testflächen eine Kontamination durch nasse Deposition (wie durch Regen) erzeugt oder vorab befeuchtete Oberflächen mit Stäuben kontaminiert, um den Effekt von Nässe auf nachfolgende Resuspension durch Windeinwirkung zu erfassen. Erst nachdem die so beaufschlagten Oberflächen wieder abgetrocknet waren, wurden die Messungen durchgeführt.

Bei den Messungen zur Resuspension von Oberflächen sind als wesentlich erachtete Ursachen für Resuspensionsprozesse mit einbezogen worden.

Diese sind:

- Durch Wind verursachte Resuspension, Der Einfluss der Windgeschwindigkeit wurde untersucht durch Messungen bei eher niedrigen Werten von 2 m/s bis herauf zu hohen

Geschwindigkeiten von 20 m/s. Dabei wurde insbesondere die zeitliche Entwicklung der Resuspensionsraten im Verlaufe einer Windeinwirkung bestimmt. Die Messdauern lagen überwiegend im Bereich weniger Stunden, wurden aber auch auf einen Zeitraum von 2-3 Tagen ausgedehnt.

- Durch Fußgänger auf kontaminierten Oberflächen verursachte Resuspension. Hierbei wurde als Ergänzung zu den Reinraummessungen mit Hilfe der Kanalapparatur und pulsartiger Lufteinwirkung auch der Einfluss von wiederholter Begehung von Flächen ermittelt.
- Durch Fahrzeuge beim Befahren kontaminierter Oberflächen verursachte Resuspension. Hierzu sind Messungen mit der Kanalapparatur bei pulsartiger Luftströmung mit veröffentlichten Messungen zur Resuspension beim Befahren kontaminierter Flächen kombiniert worden.

Im Hinblick auf die Beurteilung der Wirksamkeit einfacher Maßnahmen zu einer Unterdrückung der Resuspension nach erfolgter (trockener) Kontamination von Oberflächen wurde auch der Einfluss einer Besprühung mit Wasser oder mit einem Wasser/Glycerin-Gemisch auf die nachfolgende Resuspension untersucht. Auch in diesem Fall erfolgten die Resuspensionsmessungen bei Windeinwirkung erst nach Abtrocknung der besprühten Oberflächen.

Windresuspension, also der Übergang von auf Oberflächen abgelagerten Stäuben in die umgebende Luft, erfolgt von allen einer Windeinwirkung ausgesetzten Flächen. Sie ist folglich weniger leicht durch Einsatzpersonal zu beeinflussen im Vergleich zur Resuspension durch Begehen oder Befahren kontaminierter Flächen oder bei kontaminierter Kleidung von Personen.

Die Resuspension durch Windeinwirkung zeigt eine starke Zunahme mit der Windgeschwindigkeit an der jeweiligen Oberfläche. Generell nimmt die Windgeschwindigkeit durch Reibungseffekte in Bodennähe ab, so dass in urbanen Bereichen Windgeschwindigkeiten über Bodenflächen nur selten 6 m/s erreichen. Die Messungen mit der Kanalapparatur haben gezeigt, dass beispielsweise eine Verdreifachung der Windgeschwindigkeit von z.B. 2 m/s auf 6 m/s die Resuspensionsrate um etwa einen Faktor 15 erhöht. Für vorsichtige Abschätzungen einer Inhalationsbelastung von Einsatzpersonal (und sonstigen Personen) ist in diesem Bericht bei Szenarienanalysen eine hohe Windgeschwindigkeit am Einsatzort von 6 m/s unterstellt worden. Bei höher gelegenen staubbelegten Oberflächen wie Dachflächen treten bei stärkeren Winden auch höhere Windgeschwindigkeiten auf.

Messungen mit der Kanalapparatur haben gerade für die ersten Stunden und Tage eines Personaleinsatzes zur Gefahrenabwehr die ausgeprägte Abnahme der Resuspension mit der Zeit nach einem Kontaminationsereignis aufgezeigt. Danach nimmt die Rate, mit der von einer kontaminierten Fläche Staub in die umgebende Luft übergeht, mit der Dauer der Einwirkung schnell ab und entspricht mathematisch ausgedrückt in guter Näherung einer $1/t$ – Abhängigkeit. Mit der Zeit t wird ein immer geringerer Anteil der noch verbleibenden Staubebelegung bei Einwirkungen durch Luftströmung (Wind, Fahrzeuge, Fußgänger beim Auftreten) oder durch induzierte Vibration abgelöst. Damit eng verbunden ist, dass von der ursprünglichen Kontamination in der Regel nur ein begrenzter Anteil durch Resuspensionsprozesse abgelöst wird. da die wirksamen Haftkräfte zu stark sind und sich im Laufe der Zeit eher noch verstärken.

Diese Zeitabhängigkeit der Windresuspension wird in Abb. 8.1 veranschaulicht. Dabei ist angenommen, dass nach Eintritt des Kontaminationsereignisses eine hohe Windgeschwindigkeit von $u=6$ m/s

über die staubbelegte Fläche im Freien weht und Einsatzpersonal schon 10 Minuten nach dem Ereignis eintrifft. Auf der Achse der Abb. 8.1 ist der resuspendierte Anteil der Kontamination in den Stunden nach Eintreffen des Notfallpersonals angegeben. Die ersten 10 Minuten sind hier also nicht mit erfasst. Die aufgeführten resuspendierten Anteile sind Messungen mit der Kanalapparatur bei $u = 6 \text{ m/s}$ entnommen und entsprechen einer Resuspensionsrate $R_R(t) = 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^{-1}$ ($[t] = \text{h, min oder s}$).

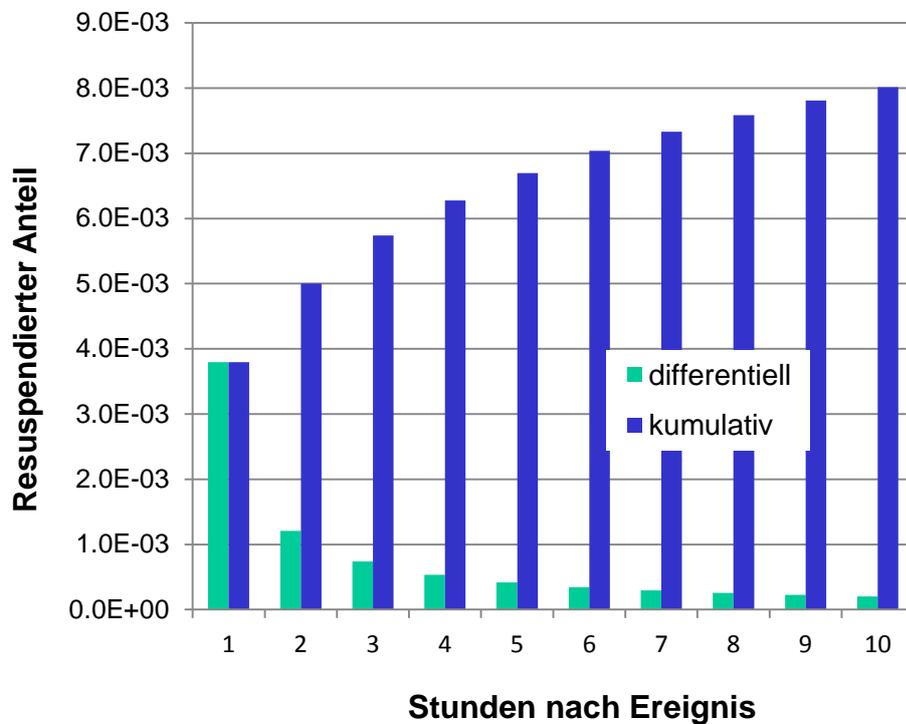


Abb. 8-1 Windresuspension von kontaminierter Fläche ab 10 Minuten nach Kontaminationsereignis: Resuspendierter Anteil der Kontamination pro Stunde bei 6 m/s und summierte Resuspension bis 10 Stunden.

Man erkennt, dass der resuspendierte Anteil in der ersten Stunde rund $4 \cdot 10^{-3}$ (0,4 %) beträgt, also einer Resuspensionsrate von $R_R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ [1/h]}$ entspricht. Die schnelle zeitliche Abnahme des resuspendierten Anteils der Kontamination ist an den (grünen) Balken gut erkennbar. So beträgt der über die 2. Stunde gemittelte resuspendierte Anteil mit etwa $1 \cdot 10^{-3}$ nur

rund $1/3$ und in der 3. Stunde nur noch rund $1/5$ der 1. Stunde. Diese schnelle Abnahme des durch Windeinwirkung wieder aufgewirbelten Anteils der Kontamination entspricht folglich der geringe Anstieg des aufsummierten (kumulierten) Anteils der Kontamination mit der Zeit nach Eintreffen des Einsatzpersonals (blaue Balken). Eine Inhalationsbelastung von Einsatzpersonal würde diesem Verlauf der summierten Resuspension entsprechen. Der zusätzliche Beitrag der Stunden 2 bis 10 zum gesamten Anteil, der von der kontaminierten Fläche wieder in den luftgetragenen Zustand übergegangen Kontamination entspricht dem Wert der ersten Stunde.

Bemerkenswert ist der sehr begrenzte Anteil einer Kontamination, der in der Zeit nach den ersten 10 Minuten selbst bei einem recht starken Wind von 6 m/s abgelöst und luftgetragen wird. Dieser resuspendierte Anteil bewegt sich nach den ersten 10 Minuten im Bereich von einem Prozent der Kontamination. In Bezug auf eine Strahlenbelastung von Einsatzpersonal durch Einatmen resuspendierter Radionuklide verdeutlicht Abb. 8.1 den schnellen Rückgang mit der Zeit nach der Kontamination und die Begrenzung des insgesamt durch Windeinwirkung abgelösten Anteils einer Staubkontamination auf Werte um 1 % oder wenige Prozent.

Damit wird auch ersichtlich, dass frühe Maßnahmen zur Unterdrückung von Resuspensionsprozessen sowohl im Hinblick auf eine Exposition durch Einatmen und auch auf eine „Verwehung“ in geringer kontaminierte Bereiche besonders wirkungsvoll sind. Für den praktischen Einsatz haben die Untersuchungen gezeigt, dass sich die Resuspension mit einfachen Maßnahmen stark unterdrücken lässt. Ein Befeuchten kontaminierter Oberflächen mit Wasser und noch wirkungsvoller mit einem gesundheitlich völlig unbedenklichen Wasser-Glycerin-Gemisch, führt zu einer Fixierung der Kontamination und damit zur starken Abnahme von Resuspensionsprozessen. Besprühen mit Wasser bewirkt einen Rückgang

um einen Faktor 10 und mehr, ein Glycerin-Wasser-Gemisch sogar um einen Faktor 100 und mehr.

Eine zum nachträglichen Besprühen mit Wasser analoge Reduktion der Resuspension ergab sich, wenn von vorneherein die Kontamination durch nasse Deposition (Regen) oder auf nasse Oberflächen erfolgte.

Es gibt aber auch Bedingungen, bei denen Flächen während des Einsatzes immer wieder erneut durch resuspendierten Staub kontaminiert werden. Das ist z.B. am Dekont-Platz oder in einer Notfallstation der Fall, wenn dort höher kontaminierte Personen betreut und dekontaminiert werden. In diesen Fällen sind vornehmlich staubbelegte Kleidung und Körperoberflächen Quellen einer Resuspension. Sie führen zu einer Schadstoffkonzentration in der umgebenden Luft, wovon sich ein Teil wieder auf dem Boden und anderen horizontalen Oberflächen ablagert. Zur Resuspension vom Boden am Dekont-Platz oder in einer Notfallstation trägt insbesondere das dortige Herumlaufen von Personen bei. Auch dieser Beitrag zu einer Resuspension nimmt mit wiederholter Begehung von Flächen schnell ab. Es empfiehlt sich aber, von vorneherein solche Flächen leicht zu befeuchten und dies in zeitlichen Abständen zu wiederholen.

Im Hinblick auf eine Strahlenexposition von Einsatzpersonal sind Kontaminationssituationen analysiert worden, insbesondere

- Betrieb einer Notfallstation nach einem schweren Kernkraftwerksunfall
- Kontamination von urbanen Bereichen nach Umsetzung einer „Schmutzigen Bombe“.

Als Beispiele radioaktiver Beimengungen sind dabei Cs 137 als Beta/Gamma-Strahler und Pu 238 als Alpha-Strahler betrachtet worden.

In vielen Fällen wird die entstandene Kontaminationssituation durch Gamma-Strahlung leicht nachweisbar sein. So kann ein Gefahrenbereich beispielsweise gemäß Feuerwehrdienstvorschrift 500 (FwDV 500, 2003) durch eine Dosisleistung von 25 $\mu\text{Sv/h}$ abgegrenzt werden. Eine

Strahlenexposition von Einsatzpersonal erfolgt in solchen Fällen durch externe Strahlung (durchdringende Direktstrahlung von Außen) und durch Inhalation resuspendierter Radionuklide.

Für die Strahlenbelastung von Personal durch Einatmen resuspendierten radioaktiven Staubes spezielle Situation liegt vor, wenn alpha-strahlende Radionuklide eine Kontamination dominieren. In solchen Fällen ist ein Beitrag durch externe Strahlung zur Strahlendosis gering oder gar nicht vorhanden. Durch Inhalation aufgenommene Alpha-Strahler führen bei gegebener Aktivitätsaufnahme zu einer deutlich höheren Dosis im Vergleich zu Beta/Gamma-Strahlern.

Das untersuchte Szenario einer „Schmutzigen Bombe“, bei dem auf einem von der Ausdehnung engeren urbanen Bereich eine Kontamination mit 10^6 Bq/m² eines Alpha-Strahlers wie Pu 238 erfolgt, stellt sicher besonders ungünstige Einsatzbedingungen dar. Dabei sind zusätzlich zur Einwirkung durch Wind auf der gesamten Fläche noch ein regelmäßiges Begehen und Befahren von Teilflächen einbezogen worden als Ursache für luftgetragenen radioaktiven Staub infolge Resuspension. Auch unter solchen ungünstigen Bedingungen bliebe bei einem beispielsweise 10-stündigen Einsatz kurz nach Eintritt des Kontaminationsereignisses eine Strahlenbelastung beim Tragen einer wenig belastenden FFP 2 Halbmaske unterhalb von 1 mSv.

Durch weitere zu empfehlende Maßnahmen zur Unterdrückung von Resuspensionsprozessen ließe sich eine Exposition von Personen noch deutlich verringern. Einfach umsetzbare Verhaltensregeln und Empfehlungen für den Einsatz, die sich aus den experimentellen und analytischen Untersuchungen ableiten lassen werden hier aufgeführt:

- Fixierung von abgelagertem Staub durch Befeuchten von Oberflächen mit Wasser oder noch wirkungsvoller mit einer Mischung aus Wasser und Glycerin. Auf öffentlichen Flächen und

Straßen können Oberflächen auch durch Fahrzeuge und Personal der Straßenreinigung befeuchtet werden.

- An Einsatzorten wie Dekont-Platz oder in einer Notfallstation, wo insbesondere bei der Kontrolle von Personen auf Kontamination von Kleidung und anderen Körperoberflächen, bei der weiteren Betreuung und ggf. Dekontamination mit einer wiederholten Ablagerung von radioaktiven Stoffen auf Boden und anderen Oberflächen zu rechnen ist, sollten diese Flächen möglichst von vornherein und danach immer mal wieder befeuchtet werden.
- Die schnelle Abnahme einer Resuspension durch Windeinwirkung nach Ablagerung von Staub auf Oberflächen macht frühe Maßnahmen zur Fixierung empfehlenswert. Das gilt auch im Hinblick auf die Reduzierung von Resuspensionsprozessen durch Personen oder Fahrzeuge, die sich auf kontaminierten Flächen bewegen, da auch beim Auftreten oder Befahren induzierte Luftströmungen eine Staubablösung bewirken.
- Sowohl bei Versuchen zur Resuspension durch gehende Personen als auch durch Fahrzeuge sind langsamere Gangarten oder Fahrzeuggeschwindigkeiten mit geringerer Resuspension verbunden.
- Im Vergleich zu anderen biologischen oder chemischen Schadstoffen sind Kontaminationen mit radioaktiven Stoffen durch Messgeräte wie handgeführte Kontaminationsmonitore einfach erfassbar. Eine Strahlenexposition durch Einatmen von resuspendierten radioaktivem Staub bleibt in der Regel bei niedrigen und unbedenklichen Werten der effektiven Dosis. Erst bei Kontaminationen von Oberflächen, die weit oberhalb der Nachweisschwellen von Kontaminationsmonitoren liegen und damit leicht nachweisbar sind, ist für Einsatzpersonal ein Atemschutz zweckmäßig. Auch dann ist bis auf eventuelle Ausnahmesituationen ein einfacher und wenig belastender Schutz

durch eine FFP 2 Halbmaske aus Sicht des Strahlenschutzes ausreichend.

9 Literatur

Eisner, A.D., Rosati, J., Wiener, R. (2010), Experimental and theoretical investigation of particle-laden airflow under a prosthetic mechanical foot in motion. *Building and Environment*, 45, 878-886

Feuerwehr-Dienstvorschrift FwDV 500 "Einheiten im ABC – Einsatz", 2003

Karlsson, E, Berglund, T., Strömquist, M., Nordstrand, M., Fängmark, I. (1999), The effect of resuspension caused by human activities on the indoor concentration of biological aerosols. *J. Aerosol Sci.*, 30, S1, 737-738

Koch, W., Lödding, H. , Lange, F. (2012), Experimentelle Bestimmung von Resuspensionsdaten partikelgebundener radioaktiver Stoffe von relevanten kontaminierten Oberflächen bei radiologischen Notfällen zur Beurteilung einer Exposition von Einsatzpersonal und betroffenen Personen durch Resuspension - Vorhaben 3609S70005S Schutzanforderungen für Einsatzpersonal in radiologischen Notfällen.

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-201201167025>

Khalifa, E. et al. (2007), Particle Levitation Due to a Uniformly Descending Flat Object , *Aerosol Sci. Technol.*, 41, 33 – 42

Kubota, Y., Hall, J.W., Higuchi, H. (2009), An experimental investigation of the flowfield and dust resuspension due to idealized human walking. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 131, 0811041 - 0811046

Maedler, L., and Koch, W. (1997). Particle Resuspension from Surfaces by Impacting Objects, *J. Aerosol Sci.* 28:S85–S86.

Maedler, L. and Koch, W. (1999). Particle Resuspension Burst from Dust Layers Induced by Impacting Objects, *J. Aerosol. Sci.* 30:S731–S732.

Nicholson, K.W., Branson, J.R. (1990), Factors affecting resuspension by road traffic, *The Sci. Tit. Environm.* , 93, 349-358

Qian, J., Ferro, A.R. (2008) Resuspension of dust particles in a chamber and associated environmental factors, *Aerosol Sci. Technol.*, 42, 566-578.

Rahmenempfehlungen (2008) Rahmenempfehlungen für den Katastrophenschutz in der Umgebung kerntechnischer Anlagen, GMBI Nr. 62/63 vom 19. Dezember 2008

Reeks, M.W., Reed, J., Hall, D. (1988), On the resuspension of small particles by a turbulent flow, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 21, 574-589

Sehmel, G.A. (1973), Particle Resuspension from an asphalt road caused by car and truck traffic, *Atmospheric Environment*, 7, 291-309

Sehmel, G.A. (1980), Particle resuspension: A review, *Environment International* 4, 107-127

Shaughnessy, R., Vu, H. (2012), Particle loadings and resuspension related to floor coverings in chamber and in occupied school environments. *Atmospheric Environment*, 55, 515-524

SSK (2007), Medizinische Maßnahmen bei Kernkraftwerksunfällen, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 4

Thatcher, L.T., Layton, D.W. (1995) Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence, *Atmospheric Environment*, 29, 1487-1497