

# Die betriebliche Umsetzung des Risikokonzepts für krebserzeugende Gefahrstoffe

## Belastung durch polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe beim Recycling von Bahnschwellen und der Aufarbeitung kontaminierter Böden

M. Hagmann<sup>1</sup> U. Protz<sup>2</sup>  
 R. Hebisch<sup>2</sup> J. Sondermann<sup>1</sup>  
 A. Baumgärtel<sup>2</sup> S. Weßler<sup>1</sup>  
 S. Beelte<sup>1</sup> L. Wilms<sup>1</sup>  
 J. Karmann<sup>2</sup> T. Wolf<sup>4</sup>  
 M. Krug<sup>2</sup> T. Weiß<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Landesinstitut für Arbeitsgestaltung NRW (LIA.nrw), Düsseldorf

<sup>2</sup> Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund

<sup>3</sup> Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IPA),

Institut der Ruhr-Universität Bochum

<sup>4</sup> Zur Zeit der Untersuchung Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund

(eingegangen am 20.04.2017, angenommen am 07.06.2017)

### ABSTRACT / ZUSAMMENFASSUNG

#### The operational implementation of the risk concept for carcinogenic hazardous substances: Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons during the recycling of railway sleepers and the remediation of contaminated soils

**Aim:** Workplace measurements and biomonitoring studies were conducted in order to assess the implementation of the risk-related concept of measures according to the Technical Rule for Hazardous Substances (TRGS) 910 for activities with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) during the recycling of railway sleepers and remediation of contaminated soils.

**Methods:** Workplace measurements to determine inhalation exposure to benzo[a]pyrene (BaP) – a key component of PAH pollutants – were carried out at two railway sleeper recycling companies and a thermal soil remediation company. Biomonitoring of internal exposure, using 1-hydroxypyrene (1-OHP) as a marker, was carried out simultaneously with a total of 63 workers before and after the staged implementation of protective measures.

**Results:** As shown by workplace measurements, the tolerable concentration of benzo[a]pyrene (TRGS 910) was exceeded by up to three times in critical operations such as repairs, maintenance and feeding of the decontamination device during soil remediation. Regarding the recycling of railway sleepers, the highest concentrations were found when shredding. Biomonitoring based on the 1-OHP marker did not show any correlation with the workplace measurements. With 1-OHP values up to 350 µg/g creatinine, it was possible to detect very high occupational PAH exposure in an individual case. At the end of the study, the values were mostly in the range of the German BAR value (“Biologischer Arbeitsstoff-Referenzwert” – biological reference value for workplace substances).

**Conclusions:** In the course of the study, significant reductions in occupational exposure to PAH were achieved after several interventions. A successful implementation of the staged concept of measures (TRGS 910) thus appears possible. 1-OHP represents a suitable biomonitoring parameter together with workplace measurements to ensure the success of the measures on a lasting basis.

**Keywords:** PAH – biomonitoring – risk-related concept – 1-hydroxypyrene – workplace measurements

#### Die betriebliche Umsetzung des Risikokonzeptes für krebserzeugende Gefahrstoffe: Belastung durch polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe beim Recycling von Bahnschwellen und der Aufarbeitung kontaminierter Böden

**Ziel:** Um die Umsetzung des risikobezogenen Maßnahmenkonzeptes (TRGS 910) beim Recycling von Bahnschwellen und bei der Aufarbeitung kontaminierter Böden für Tätigkeiten mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) zu überprüfen, wurden Arbeitsplatzmessungen und Biomonitoring-Untersuchungen durchgeführt.

**Kollektiv und Methode:** In zwei Bahnschwellenbetrieben und einem Betrieb der thermischen Bodensanierung erfolgten Arbeitsplatzmessungen zur Ermittlung der inhalativen Exposition gegenüber Benzo[a]pyren (BaP) als Leitkomponente für die PAK-Belastung. Gleichzeitig wurde im Rahmen eines Biomonitorings die innere Belastung anhand des Markers 1-Hydroxypyren (1-OHP) bei den insgesamt 63 Beschäftigten vor und nach der gestuften Durchführung von Arbeitsschutzmaßnahmen bestimmt.

**Ergebnisse:** Bei den Arbeitsplatzmessungen zeigten sich Überschreitungen bis zum Dreifachen der Toleranzkonzentration der TRGS 910 von BaP bei kritischen Tätigkeiten wie z. B. beim Reparieren, Instandhalten oder Beschicken der Anlage in der Bodensanierung. Im Bahnschwellenrecycling fanden sich die höchsten Werte beim Schreddern. Beim Biomonitoring anhand des Markers 1-OHP ergab sich keine Korrelation zu den Arbeitsplatzmessungen. Mit 1-OHP-Werten bis zu 350 µg/g Kreatinin konnten im Einzelfall sehr hohe berufliche PAK-Belastungen nachgewiesen werden. Zum Ende der Studie fanden sich überwiegend Werte im Bereich des Biologischen Arbeitsstoff-Referenzwertes (BAR).

**Schlussfolgerungen:** Im Studienverlauf zeigten sich nach mehreren Interventionen in den Betrieben deutliche Verminderungen der beruflichen Belastung durch PAK. Eine erfolgreiche Umsetzung des gestuften Maßnahmenkonzeptes der TRGS 910 erscheint somit möglich. 1-OHP stellt im Zusammenspiel mit Arbeitsplatzmessungen einen geeigneten Biomonitoring-Parameter dar, um den Erfolg getroffener Maßnahmen dauerhaft sicherzustellen.

**Schlüsselwörter:** PAK – Biomonitoring – Risikokonzept – 1-Hydroxypyren – Arbeitsplatzmessungen

## Einleitung

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen in der Umwelt meist bei der unvollständigen Verbrennung organischen Materials. Bislang wurden rund 500 Vertreter dieser Stoffgruppe in der Luft nachgewiesen (Marquardt et al. 2013). Über die ubiquitäre Verbreitung hinaus können an industriellen Arbeitsplätzen sehr viel höhere Konzentrationen mit Werten des Benzo[a]pyren (BaP) im bis zu zweistelligen Mikrogrammbereich pro Kubikmeter auftreten (Preuss et al. 2003, 2006), insbesondere in Industriezweigen, die mit PAK-haltigen Rohstoffen (Teer, Pech) umgehen oder PAK durch Pyrolyseprozesse freisetzen (Kokereien) (Preuss 2005). PAK werden am Arbeitsplatz vor allem inhalativ und dermal aufgenommen, wobei der dermale Aufnahme bei der beruflichen Exposition offenbar eine maßgebliche Rolle zukommt (Fustinoni et al. 2010; van Rooij et al. 1992, 1993a,b). Die orale Aufnahme sollte bei Einhaltung arbeitshygienischer Maßnahmen minimiert sein. Aufgrund ihrer krebserzeugenden Wirkung werden die PAK als eine im hohen Maße relevante Schadstoffklasse angesehen. Neben signifikant erhöhten Krebsinzidenzen für Lunge, Harnblase und Haut finden sich in der Literatur auch Hinweise auf Krebs in weiteren Organen wie Niere, Kehlkopf, Speiseröhre und Magen (Greim 2008). Eine Ergänzung bzw. Erweiterung der Anlage 1 der Berufskrankheitenverordnung um Kehlkopf- und Harnblasenkrebs wurde aufgrund der Datenlage vom Ärztlichen Sachverständigenbeirat „Berufskrankheiten“ beim BMAS erst kürzlich empfohlen und begründet (Ärztlicher Sachverständigenbeirat 2016).

Die Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der DFG (MAK-Kommission) hat einige Vertreter der PAK aufgrund von Ergebnissen aus Tierversuchstudien in Kategorie 2 der krebserzeugenden Arbeitsstoffe (K2) eingestuft. Hierzu zählen Anthanthren, Benzo[a]anthracen, Benzo[b]fluoranthren, Benzo[j]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren, BaP, Chrysen, Cyclopenta[cd]pyren, Dibenz[a,h]anthracen, Dibenzo[a,e]pyren, Dibenzo[a,h]pyren, Dibenzo[a,i]pyren, Dibenzo[a,l]pyren, Indenol[1,2,3-cd]pyren und Naphthalin. Aufgrund der Daten nicht als krebserzeugend eingestuft sind hingegen Phenanthren und Pyren (Deutsche Forschungsgemeinschaft 2016). Komplexe Gemische, die durch Pyrolyse organischen Materials entstehen und einen besonders hohen Anteil an PAK enthalten, wie Braunkohlenteere, Steinkohlenteere, Steinkohlenteerpeche, Steinkohlenteeröle und Kokereirohgase, sind hingegen in Kategorie 1 (K1) eingestuft, da deren Kanzerogenität für den Menschen epidemiologisch nachgewiesen wurde (Greim 2008).

Für die Gefährdungsbeurteilung und die Ableitung von Schutzmaßnahmen sind die auf diesen wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhenden Legaleinstufungen der Europäischen Kommission sowie des Ausschusses für Gefahrstoffe (AGS) verbindlich. Nach TRGS 906 bzw. nach Anhang I der Richtlinie 2004/37/EG zählen auch Tätigkeiten oder Verfahren, bei denen Beschäftigte krebserzeugenden PAK ausgesetzt sind, die in Pyrolyseprodukten aus organischem Material (z. B. Steinkohlenruß, Steinkohlenteer oder Steinkohlenteerpech) vorhanden sein können, zu den krebserzeugenden Tätigkeiten (TRGS 906). Dabei ist es zulässig, als Bezugssubstanz für Pyrolyseprodukte mit krebserzeugenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen den Stoff BaP zu wählen. Gemäß TRGS 905 sind PAK-haltige Gefahrstoffe als krebserzeugend im Sinne des § 2 Absatz 3 der GefStoffV anzusehen, sofern der Massengehalt an BaP gleich oder größer als 0,005 % (50 mg/kg)

beträgt (TRGS 905). BaP ist nach Anhang VI der CLP-Verordnung unter anderem als krebserzeugend (Kategorie 1B), keimzellmutagen (Kategorie 1B) und reproduktionstoxisch (Kategorie 1B) eingestuft (CLP-VO). Bei Tätigkeiten mit Pyrolyseprodukten aus organischem Material ist zudem die TRGS 551 zu beachten (TRGS 551).

In der TRGS 900 ist für Naphthalin ein Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) in Höhe von 0,1 ppm bzw. 0,5 mg/m<sup>3</sup> (einatembare Fraktion) festgelegt (TRGS 900).

PAK enthaltende Teeröle (Kreosote) wurden insbesondere zur Imprägnierung von Holz für Bahnschwellen, Telegrafmasten oder Pfahlfüße eingesetzt (BAuA 2009). Diese Anwendungen sind heute jedoch deutlich eingeschränkt (RL 2011/71/EU). Ältere Holzbahnschwellen wurden bis ca. 1991 mit Kreosoten Typ WEI-A (West-Europäisches Institut für Holzimprägnierung) behandelt, die entsprechend DIN EN 13991 Gehalte bis zu 500 ppm an krebserzeugendem BaP enthielten (DIN EN 13991). Nach ihrer Nutzung sind die imprägnierten Hölzer zu entsorgen oder einer Wiederverwertung zuzuführen. Ebenso stellen mit PAK kontaminierte Böden ehemaliger Industriegelände ein Problem für die Umwelt und die Gesundheit der Menschen dar.

Die fachgerechte Entsorgung derart kontaminierter Hölzer und die Aufbereitung von Böden ist die Aufgabe spezialisierter Entsorgungsbetriebe. In diesen meist kleineren Betrieben der Recycling- und Entsorgungswirtschaft, stellte sich mit Erscheinen der Bekanntmachung zu Gefahrstoffen 910 (BekGS 910) die Frage, inwieweit die Vorgabe eines „risikobezogenen Maßnahmenkonzeptes“ mit wirtschaftlich vertretbaren und verhältnismäßigen Mitteln in der betrieblichen Praxis umgesetzt und das Ziel einer Unterschreitung der Akzeptanzkonzentration erreicht werden kann (BekGS 910). Inzwischen wurde die BekGS 910 in den Rang einer Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) erhoben, die die Pflichten nach § 10 Abs. 1 der Gefahrstoffverordnung konkretisiert (TRGS 910). Nach dieser TRGS dienen sog. Exposition-Risiko-Beziehungen (ERB) zur Beurteilung der inhalativen Exposition von Arbeitnehmern durch krebserzeugende Gefahrstoffe, für die kein Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) nach TRGS 900 abgeleitet werden kann. Auf dieser Basis sind Akzeptanz- und Toleranzkonzentrationen festgelegt worden. Die TRGS 910 enthält zudem ein risikobezogenes gestuftes Maßnahmenkonzept.

## Ziel

Im Einzelnen sollte im Rahmen der Studie folgenden Fragen nachgegangen werden:

- Inwieweit können auch in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) der Entsorgungswirtschaft die Vorgaben des risikobezogenen Maßnahmenkonzeptes für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen (TRGS 910) bezogen auf BaP in bestimmten PAK-Gemischen umgesetzt und das Ziel der Einhaltung der Akzeptanzkonzentration erreicht werden?
- Inwieweit korreliert die personenbezogen gemessene inhalative PAK-Exposition mit der inneren PAK-Belastung, abgeschätzt anhand des Parameters 1-Hydroxypyren (1-OHP) im Urin?
- Mit welchen Maßnahmen kann eine Minimierung der Belastung bis in den Bereich unterhalb der Akzeptanzkonzentration erreicht werden?
- Ist ein Stand der Technik in den betrachteten Bereichen beschreibbar?

## Kollektiv und Methode

### Beschreibung der untersuchten Betriebe

In die Studie wurden drei Betriebe einbezogen, die PAK-haltige Materialien entsorgen oder aufbereiten. Die Betriebe 1 und 2 recycelten Bahnschwellen; der Betrieb 3 betrieb eine Anlage zur thermischen Bodensanierung. Beim Recycling der Bahnschwellen wurden die Schwellen entweder für eine Wiederverwendung aufgearbeitet oder geschreddert und der Entsorgung zugeführt. Die Bahnschwellen wurden zuerst abgeplattet, d.h. die auf ihnen befestigten Metallhalterungen, Schrauben und Rippenplatten wurden entfernt. Dies erfolgte mit Druckluft-, Elektroschraubern oder Schraubern mit Verbrennungsmotor. Die danach als Rohlinge vorliegenden Schwellen wurden dann entweder durch Fräsen und Bohren aufbereitet oder geschreddert. Nach der Aufbereitung wurden beim sog. Aufplatten wieder neue oder recycelte Rippenplatten aufgelegt und verschraubt.

Bei der thermischen Bodensanierung (Betrieb 3) wurden mit PAK kontaminierte Böden, die aus Altlastenflächen stammten (z. B. ehemalige Gasometer), pyrolytisch aufbereitet und anschließend einer weiteren Nutzung zugeführt. Die PAK-Gehalte der aufzubereitenden Böden betragen bis etwa 10 g/kg. Die Böden wurden mittels Lkw angeliefert und in einer Halle abgekippt. Nachdem der Boden mechanisch zerkleinert, grobe Verunreinigungen entfernt und eisenhaltige Fremdkörper mit einem Magnetabscheider abgetrennt wurden, erfolgte dann mit einem Radlader die Beschickung der Pyrolyseanlage. Zur pyrolytischen Aufbereitung durchlief der Boden innerhalb von eineinhalb bis zwei Stunden bei etwa 500 °C die Anlage mit zwei

Drehrohröfen. Die dabei aus dem Boden freigesetzten Schadstoffe wurden im Nachgang bei Temperaturen oberhalb 1100 °C verbrannt und über eine Abgasnachbehandlung abgetrennt. Eine Übersicht über die verschiedenen Arbeitsbereiche und Tätigkeiten in den Betrieben des Bahnschwellenrecyclings und der thermischen Bodensanierung ist der **► Tabelle 1** zu entnehmen.

Die individuellen Untersuchungsergebnisse aus dem Biomonitoring wurden allen Probanden unter Mitwirkung der jeweiligen Betriebsärzte persönlich mitgeteilt. Die Zwischenergebnisse der Untersuchungen wurden auf der Kollektivebene im Rahmen von Besprechungen den Betroffenen und dem für den Arbeitsschutz verantwortlichen Personenkreis vorgetragen und die erforderlichen Interventionsmaßnahmen in die Wege geleitet.

### Studienablauf

Im Rahmen einer Interventionsstudie sollten in drei Betrieben sowohl die innere Belastung mittels Biomonitoring als auch die zugehörige äußere Belastung (beschränkt auf die inhalative Exposition) durch Arbeitsplatzmessungen mehrfach ermittelt werden.

Die Untersuchungsreihen fanden in den Betrieben zu den folgenden Zeitpunkten statt:

- Februar bis Mai 2013 (innere und äußere Belastung),
- Juni bis Juli 2013 (innere Belastung),
- Oktober/November 2013 (innere Belastung),
- März 2014 (innere und äußere Belastung),
- September/Oktober 2014 (innere und äußere Belastung),
- Juli bis September 2015 (innere und äußere Belastung).

**Tabelle 1:** Arbeitsbereiche und Tätigkeiten beim Bahnschwellenrecycling und thermischer Bodensanierung

Table 1: Working areas and activities in railway sleeper recycling and thermal soil remediation

	Arbeitsbereich	Tätigkeit
<b>Bahnschwellen-Recycling</b> (Betrieb 1)	Mechanische Tätigkeiten (Fräse/Bohrer)	Aufarbeitung in erster Linie gebrauchter, wieder verwendbarer Bahnschwellen
	Transport für mechanische Tätigkeiten (im Stapler)	Zur Bedienung der Fräse/des Bohrers wurden die Bahnschwellen mittels eines schutzbelüfteten Radladers im Arbeitsbereich transportiert
	Aufplattung	Aufgearbeitete Schwellen werden mit Rippenplatten und Schrauben versehen
	Aufplattung (neue Aufplattanlage)	Beheizbare Aufplattkabinen mit Förderband, Erfassung von Aerosolen, Schutzbelüftung, Zu-/Abführung der Schwellen von außen mit Staplern
	Abplattung und Sortierung (im Freien oder in der Halle)	Abplatten mit druckluft-/kraftstoffbetriebenen Schraubern in überdachten, teils seitlich offenen Bereichen oder einer Halle, Sortieren und Ab-/Verladen mit Staplern
	Abplattung und Sortierung (schutzbelüftete Abplattanlage)	Geschlossene, klimatisierte Abplattkabinen mit Transportband, Schrauben werden über Teleskoparme aus der Kabine heraus mit Elektroschraubern gelöst
	Schredderanlage (Radlader oder im Freien)	Zur Entsorgung werden nicht mehr verwendbare Schwellen in offen aufgebauten Schreddern zu sog. Hackschnitzeln (Brennstoff für Heizkraftwerke) verarbeitet
<b>Bahnschwellen-Recycling</b> (Betrieb 2)	Abplattung (im Freien)	Abplatten mit druckluft-/kraftstoffbetriebenen Schraubern im Freigelände
	Umsetzarbeiten (Teleskoplader, Greifbagger)	Auslegen/Sortieren der Bahnschwellen Entladen von Waggons, Stapeln der Bahnschwellen
	Sonstige	Lokrangierführer, Meister-/Aufsichtstätigkeit (Einteilung, Disposition, Qualitätskontrolle), Betonschwellen/-joche zerlegen, Schienenlager
<b>Thermische Bodensanierung</b> (Betrieb 3)	Instandhaltung der Anlagen	Wartungs- und Reparaturarbeiten (Reinigungs-/Schlosser-/Schweißarbeiten) im gesamten Bereich der Anlagen
	Aufbereitungshalle (mechanische Aufbereitungshalle)	Anlieferung durch Lkw, Einlagerung in Hautwerken per Radlader, mechanische Aufbereitung in einer Siebanlage und Beschickung der thermischen Anlage (Radlader), Labor
	Thermikhalle (thermische Anlage)	Rundgänge durch Thermikhalle mit den Drehrohröfen, Kontrolle der Messwarte sowie der Rauchgasreinigung, Büro-/Kontrolltätigkeiten einschließlich Werkstatt, Magazin

Anhand der jeweiligen Ergebnisse sollte die Minimierung der Gefahrstoffbelastung in den Betrieben gemäß der Rangfolge – technische Maßnahmen vor organisatorischen und personenbezogenen Maßnahmen – geplant und nachvollziehbar dokumentiert werden. Um Rückschlüsse auf besonders expositionsintensive Arbeiten ziehen zu können, wurden die Tätigkeiten während der Schichten der vorangegangenen Arbeitswoche protokolliert und durch Beobachtungen der Studiendurchführenden ergänzt. In den untersuchten Betrieben beteiligten sich insgesamt 63 Beschäftigte. Nähere Angaben zu den Probanden finden sich in **➔ Tabelle 2**, deren Daten mittels Fragebogen erhoben wurden. Jeder Proband gab am Ende der Schicht nach in der Regel vier Arbeitstagen eine Urinprobe (sog. Nachschichtprobe) ab, in der 1-OHP und Kreatinin bestimmt wurden. Es handelte sich in den drei Betrieben um überwiegend heterogene Tätigkeiten (z. B. Springertätigkeit, gemischte Tätigkeit), bei denen auch Expositionsspitzen nicht von vornherein ausgeschlossen werden konnten. Eine Einteilung in Expositionsgruppen (niedrig, mittel, hoch) erschien daher unzumutbar. Die Ethikkommission der Ärztekammer Nordrhein in Düsseldorf hat das Studienvorhaben begutachtet und dazu ihr zustimmendes Votum abgegeben (Ifd. Nummer 2013045).

## Biomonitoring

### Untersuchte Parameter

Als Indikator für die innere PAK-Belastung wurde der seit längerem etablierte Leitparameter 1-Hydroxypyren (1-OHP) im Urin gewählt, der im menschlichen Körper aus dem nicht als krebserzeugend eingestuft Pyren entsteht. Hierfür wurde im Jahr 2012 ein Biologischer Arbeitsstoff-Referenzwert (BAR) der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) von 0,3 µg/g Kreatinin (Nichtraucher) festgesetzt (Klotz 2013). Für die Beurteilung bei Rauchern ist mit einer Verdopplung bis Verdreifachung der 1-Hydroxypyrenausscheidung zu rechnen (Klotz 2013).

### Analysenmethode

Die Bestimmung von 1-OHP in Urin erfolgte nach enzymatischer Hydrolyse der Phase-II-Konjugate des 1-OHP mittels Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC) mit online-Anreicherung und Fluoreszenzdetektion. Die Quantifizierung erfolgte über eine externe 7-Punkt-Kalibrierung, die in Urin angesetzt wurde. Zur internen Qualitätskontrolle wurden in jedem Analysengang zwei selbst in Urin angesetzte Qualitätskontrollstandards (6,2 und 25,4 µg/L) analysiert. Die Präzision in der Serie lag bei <2,9 % bzw. <8,6 % zwischen verschiedenen Serien. Die Wiederfindungen lagen im Bereich von 100 % (97–115 %) und verdeutlichen die Robustheit der entwickelten Methode. Die Bestimmungsgrenze lag bei 0,1 µg/L (Signal/Rausch-Verhältnis 9:1). Die Richtigkeit der Analyseergebnisse wurde zudem durch regelmäßige erfolgreiche Teilnahme an einem Biomonitoring-Ringversuch (G-EQUAS) sichergestellt.

## Arbeitsplatzmessungen

### Untersuchte Parameter

Zur Ermittlung der inhalativen Exposition der Beschäftigten wurden die 16 EPA-PAK in der Arbeitsplatzluft bestimmt (WHO 1998). Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf BaP gelegt, das als krebserzeugender Gefahrstoff gemäß TRGS 910 über eine Toleranz- und Akzeptanzkonzentration von 700 ng/m<sup>3</sup> bzw. 70 ng/m<sup>3</sup> verfügt (TRGS 910). Die Messwerte für Pyren wurden ebenfalls in die Auswertung mit einbezogen, um mögliche Korrelationen zu dem sich daraus bildenden Metaboliten 1-OHP zu untersuchen. Daneben kommt Naphthalin bei der Ermittlung der inhalativen Belastungen eine entsprechende Bedeutung zu, da ein AGW in Höhe von 0,5 mg/m<sup>3</sup> festgelegt wurde (TRGS 900).

### Probenahme und Analytik

In Betrieb 1 (Bahnschwellen) wurden personengetragene Messungen beim Abplatten und Sortieren alter Bahnschwellen sowie bei deren Aufarbeitung mittels Bohren, Fräsen und Aufplatten durchgeführt. Weiterhin erfolgten auch personengetragene Messungen beim Schreddern nicht mehr verwendbarer Bahnschwellen. Bei allen Tätigkeiten erfolgten zudem ortsfeste Messungen im Arbeitsbereich der Beschäftigten. In Betrieb 2 (Bahnschwellen) erfolgten personengetragene Arbeitsplatzmessungen beim Abplatten mit mobilen Geräten sowie beim Einsatz eines für den innerbetrieblichen Transport genutzten Greifbaggers bzw. Teleskopladens. Ergänzend wurden ortsfeste Messungen durchgeführt.

In Betrieb 3 (Bodensanierung) wurden die personengetragenen Messungen im Anlieferungsbereich beim Einlagern von angelieferten Böden und Beschicken der mechanischen Aufbereitungs- sowie der thermischen Anlage mittels eines schutzbelüfteten Radladers durchgeführt. Weitere personengetragene Messungen erfolgten in der Messwarte und bei den regelmäßig erfolgenden Rundgängen im Betrieb, die üblicherweise bis zu etwa einer Stunde dauerten. Vom Rundgänger werden im Wesentlichen Kontrolltätigkeiten ausgeübt. Die ergänzenden ortsfesten Messungen wurden in der Anlieferungshalle und der Messwarte während der personengetragenen Messungen durchgeführt. Zusätzlich wurden im Bereich der thermischen Anlage an zwei Punkten ortsfeste Messungen durchgeführt, um Informationen zur möglichen Belastungssituation in diesem Bereich

**Tabelle 2:** Angaben zu den untersuchten Probanden  
Table 2: Details of test subjects

	Gruppe Bahnschwellenbetriebe	Gruppe Bodensanierer
Zahl der untersuchten Personen (bis auf eine Ausnahme männlich)	40	23
Mittleres Alter (Jahre)	45	48
Altersspanne (Jahre)	21–64	27–63
Raucher	23	12
Nichtraucher	17	11
Verwendung von teerhaltigen Shampoos/Hautcremes	0	0
Private Nutzung einer Ofenheizung oder eines offenen Kamins	4	3
Genuss gegrillter/geräucherter Nahrungsmittel vor der Probenahme	8	10

zu erhalten. In der thermischen Anlage selbst befinden sich keine ständigen Arbeitsplätze. Hier halten sich die Rundgänger während ihrer Kontrollgänge auf oder Beschäftigte führen Instandhaltungsarbeiten durch.

Zur Probenahme wurde die Arbeitsplatzluft mittels einer personentragbaren Sammelpumpe Modell HFS-513A (Sensidyne, Clearwater, USA) mit einem Volumenstrom von 2 L/min durch ein Sammelsystem gesaugt, welches die simultane Erfassung der partikulären und der dampfförmigen Phase erlaubt (Hahn u. Assenmacher-Maiworm 2002). Die Abscheidung der partikulären PAK erfolgte dabei als einatembare Partikel entsprechend DIN EN 481 auf einem Teflonfilter mit einem Durchmesser von 20 mm (Macherey-Nagel, Düren (DIN EN 481)). Auf einem dahinter angebrachten Sammelröhrchen vom Typ ORBO 43 (Supelco, Bellefonte, USA) wurden die dampfförmigen Bestandteile der PAK gesammelt. Zur Vermeidung eines Durchbruchs der PAK auf dem Sammelröhrchen wurde die Probenahmedauer auf etwa 60 min begrenzt.

Die analytische Bestimmung erfolgte mittels HPLC mit UV- und Fluoreszenzdetektion (Shimadzu Nexera XR, Kyoto, Japan). Zur Kalibrierung wurde ein externer Standard verwendet (Labor Dr. Ehrenstorfer-Schäfers, Augsburg). Das Analysenverfahren wurde zur Bestimmung von BaP optimiert und lieferte bei einständiger Probenahme eine Bestimmungsgrenze von 17 ng/m<sup>3</sup>.

### Besondere Maßnahmen

Im Rahmen des risikobezogenen Maßnahmenkonzeptes der TRGS 910 sowie unter Berücksichtigung der in §7 Absatz 4 der Gefahrstoffverordnung vorgegebenen Rangfolge zu treffender Schutzmaßnahmen wurden nach den Beratungen in den Betrieben die folgenden, besonderen Maßnahmen (Maßnahmenkonzept nach §10 Abs. 1 GefStoffV) durchgeführt (LASI LV-55 2012):

- Sofortmaßnahmen (ab der 1. Untersuchungsreihe):  
Kurzfristig und mit einfachen Mitteln durchführbare Maßnahmen:
  - Aktualisierung von Betriebsanweisungen, Unterweisung und arbeitsmedizinisch-toxikologische Beratung der Beschäftigten
  - geändertes Management der Schutzkleidung, Gestellung durch einen externen Dienstleister
  - stringente Beachtung der Hygienevorschriften bei Pausen, getrennte Aufbewahrungsmöglichkeiten für Arbeits- und Straßenkleidung, Nutzung einer Stiefelreinigungsanlage
  - Nutzung von geeigneten Einmalschutzanzügen und Chemikalienschutzhandschuhen insbesondere bei Tätigkeiten mit Hautkontakt und expositionsintensiven Tätigkeiten, z. B. Instandhaltungsarbeiten, Schweißarbeiten
  - Anpassung des Atemschutzes an die Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung
  - Verkürzung der Reinigungsintervalle von kontaminierten Bereichen (Stapler, Radlader, Thermikhalle)
- Mittel- und langfristige Maßnahmen (ab der 2. Untersuchungsreihe):  
Technisch-organisatorische Maßnahmen, ggf. bauliche Veränderungen, für die ausreichende Mittel zur Verfügung standen, z. B.:
  - Realisierung einer Absaugung an einer Übergabestelle (Betrieb 3)
  - räumliche Abgrenzung, Warn- und Sicherheitszeichen

- Einrichtung einer Schwarz-Weiß-Trennung mit einer Beschaffenheit und Ausstattung der Umkleide- und Waschräume gemäß ASR A4.1 sowie zusätzlicher Waschgelegenheiten
- Minimierung der Expositionsdauer und der Exponentenzahl
- Beauftragung und Konstruktion einer Abplattanlage mit schutzbelüfteten, klimatisierten Kabinen (Betriebe 1 und 2)
- Errichtung einer Aufplattkabine mit Absaugvorrichtung (Betrieb 1)

## Ergebnisse

### Äußere Belastung

In allen Betrieben wurden personengetragene und ortsfeste Messungen zur Ermittlung der inhalativen Exposition bei verschiedenen Tätigkeiten durchgeführt. Für gleiche Tätigkeiten oder Arbeitsbereiche korrelierten die Messungen gut. Bei der Auswertung wurde daher nicht zwischen ortsfest und personengetragen unterschieden, da die Datenkollektive ansonsten sehr klein wären. Die zusammengefasste Darstellung der Messwerte ist in **➔ Tabelle 3** für die Summe der PAK (16 EPA-PAK), Naphthalin, Pyren und BaP dargestellt. Pyren wurde trotz eines fehlenden Beurteilungsmaßstabs in die detaillierte Auswertung einbezogen, da es sich um die Ausgangsstufe des im Urin gemessenen Biomarkers 1-OHP handelt.

Der Vergleich der drei Betriebe wird anhand der Medianwerte durchgeführt, da zum Teil aufgrund der kleinen Datenkollektive keine weiteren statistischen Kenngrößen abgeleitet werden konnten. Dabei weist Betrieb 3 entsprechend Tabelle 3 die mit Abstand höchsten Luftbelastungen für die Summe der PAK im Bereich der Aufbereitungshalle auf, in der die kontaminierten Böden angeliefert und der thermischen Aufbereitung zugeführt wurden. Diesbezügliche Schwankungen korrelieren gut mit dem Kontaminationsgrad der angelieferten aufzubereitenden Böden. Beim Schreddern von Bahnschwellen im Betrieb 1 wurden die zweithöchsten PAK-Konzentrationen als Summe gemessen, was auf die mechanische Zerstörung der Bahnschwellen und die dabei freigesetzten einatembaren Stäube zurückführbar ist. Alle anderen Tätigkeiten und Arbeitsbereiche weisen zum Teil deutlich niedrigere Konzentrationen für die Summe der PAK auf, ohne dass darauf näher eingegangen wird.

Für Naphthalin als Einzelkomponente ergibt sich nach Tabelle 3 ein vergleichbares Bild. Im Bereich der Aufbereitungshalle des Betriebes 3 muss regelmäßig von einer Überschreitung des AGW in Höhe von 0,5 mg/m<sup>3</sup> ausgegangen werden (TRGS 900). Selbst nach der Bodenaufbereitung können in dem nachfolgenden Arbeitsbereich Thermikhalle durchaus Konzentrationen in Höhe des AGW und darüber auftreten. Für die Schredderanlage im Freien des Betriebes 1 wurden ebenfalls Naphthalinkonzentrationen bis oberhalb des AGW ermittelt. In allen übrigen Arbeitsbereichen und bei den sonstigen Tätigkeiten lagen die Naphthalinkonzentrationen durchweg unterhalb 40 % des AGW für Naphthalin. Pyren zeigt bei den in Tabelle 3 dargestellten Messwerten zwar ebenfalls in der Aufbereitungshalle des Betriebes 3 die höchsten Konzentrationen, jedoch liegt die als Median ermittelte Pyrenkonzentration im Betrieb 1 für die Schredderanlage im Freien sogar höher als für die Aufbereitungshalle des Betriebes 3.

In der Aufbereitungshalle und der Thermikhalle des Betriebes 3 liegen die Konzentrationen für BaP mit bis 2090 ng/m<sup>3</sup> teilweise

deutlich oberhalb der Toleranzkonzentration für BaP in Höhe von 700 ng/m<sup>3</sup> (TRGS 910). Ein sehr hoher Messwert bei Instandhaltungsarbeiten an der Lüftung eines Drehrohrofens (personengetragen 44 700 ng/m<sup>3</sup> und ortsfest 16 200 ng/m<sup>3</sup>) wurde bei dieser Auswertung (in Tabelle 3) nicht einbezogen. Dieser weist aber deutlich darauf hin, dass bei Instandhaltungsarbeiten signifikant höhere Belastungen zu erwarten sind. Dies deckt sich mit anderen Untersuchungen zu Instandhaltungsarbeiten (BAuA F 2044 2011). Im Betrieb 3 zur thermischen Bodenaufbereitung muss – wie Tabelle 3 zeigt – grundsätzlich von Überschreitungen der Akzeptanzkonzentration in Höhe von 70 ng/m<sup>3</sup> und häufig auch der Toleranzkonzentration in Höhe von 700 ng/m<sup>3</sup> ausgegangen werden (TRGS 910).

Im Betrieb 1 sind Tätigkeiten am Schredder im Freien problematisch, da hier Überschreitungen der Akzeptanzkonzentration für BaP eher die Regel und der Toleranzkonzentration möglich sind. Insgesamt zeigen beim Bahnschwellenrecycling mechanische Bearbeitungen wiederholt Konzentrationen an BaP oberhalb der Akzeptanzkonzentration, wobei diese durchweg in der als einatembare Staubfraktion gemessenen Partikelphase auftreten. Eine Voraussage über die Höhe der Konzentration an BaP bei diesen Tätigkeiten ist jedoch nicht möglich, da Bahnschwellen unterschiedlichen Alters verwertet werden. So besaßen vor den Neunzigerjahren des letzten Jahrhunderts die für die Imprägnierung von Bahnschwellen verwendeten Teeröle deutlich höhere Gehalte an BaP. Seitdem kommen nur noch Teeröle der Typen WEI-B und WEI-C zum Einsatz, die entsprechend DIN EN 13991 maximal 50 ppm BaP enthalten (DIN EN 13991). Maßnahmen sollten präventiv so gestaltet sein, dass man in diesen Betrieben vom Recycling der älteren Bahnschwellen ausgeht.

Die einzelnen PAK zeigen über die verschiedenen Betriebe ein vergleichbares Verhalten. Die leichter flüchtigen Stoffe – Naphthalin bis Anthracen – treten bevorzugt in der Dampfphase auf. In Einzelfällen werden für diese beim Bahnschwellenrecycling aufgrund der Staubbefreiung durch mechanische Bearbeitungen, wie Bohren und Fräsen, auch höhere Anteile in der Partikelphase gefunden. Fluoranthren und Pyren sind häufig in vergleichbarer Größenordnung in der Dampf- und Partikelphase vorhanden. Die höher siedenden PAK ab Benzo[a]anthracen treten nahezu ausschließlich partikelgebun-

**Tabelle 3:** Messwerte für die Summe der 16-EPA-PAK, Naphthalin, Pyren und BaP (Dampf- und Partikelphase) in der Arbeitsplatzluft (alle Angaben in µg/m<sup>3</sup>, Mediane für weitere Betrachtungen hervorgehoben)  
*Table 3: Measured values for the sum of 16 EPA PAHs, naphthalene, pyrene, benzo[a]pyrene (vapour and particle fraction) in workplace air (all results in µg/m<sup>3</sup>, median emphasised for further considerations)*

		Summe EPA-PAK	Naphthalin	Pyren	BaP
<b>Betrieb 1 (Bahnschwellen-Recycling)</b>					
Mechanische Tätigkeiten (Fräse/Bohrer) (n=17)	Bereich	34,2–159	7,75–119	0,27–3,78	<0,02–0,31
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>81,2</b> 159	<b>25,0</b> 113	<b>0,96</b> 3,64	<b>0,04</b> 0,31
Transport/Beschickung für mechanische Tätigkeiten, Stapler (n=15)	Bereich	27,4–273	3,59–133	0,35–12,8	<0,02–0,31
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>83,7</b> 265	<b>21,7</b> 89,5	<b>1,13</b> 6,40	<b>0,05</b> 0,31
Aufplattung (neue Kabine) (n=11)	Bereich	11,0–186	<6,46–20,6	<0,26–1,86	<0,02–0,05
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>28,2</b> 167	<b>13,8</b> 20,6	<b>0,44</b> 1,73	<b>0,03</b> 0,05
Abplattung und Sortierung (im Freien) (n=12)	Bereich	4,2–251	<6,26–43,3	<0,43–4,27	<0,02–0,09
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>43,5</b> 251	<b>19,7</b> 39,4	<b>0,91</b> 4,27	<b>0,05</b> 0,07
Abplattung und Sortierung (in Halle) (n=19)	Bereich	106–325	46,3–199	0,63–10,6	0,03–0,31
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>188</b> 323	<b>93,6</b> 164	<b>1,55</b> 6,92	<b>0,25</b> 0,27
Abplattung und Sortierung (schutzelüftete Abplattanlage) (n=8)	Bereich	7,12–47,3	5,82–13,7	0,17–0,44	0,02–0,05
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>28,4</b> –	<b>10,3</b> –	<b>0,42</b> –	<b>0,03</b> –
Schredderanlage, Radlader (n=4)	Bereich	68,3–116	23,5–69,1	0,32–0,95	<0,02–0,1
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>113</b> –	<b>43,6</b> –	<b>0,51</b> –	<b>0,03</b> –
Schredderanlage, im Freien (n=4)	Bereich	367–1700	212–678	0,75–15,5	0,05–1,24
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>849</b> –	<b>496</b> –	<b>5,27</b> –	<b>0,57</b> –
<b>Betrieb 2 (Bahnschwellen-Recycling)</b>					
Abplattung (im Freien) (n=22)	Bereich	k. A.–191	8,08–108	<0,18–14,9	<0,02–0,34
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>12,1</b> 162	<b>20,8</b> 85,2	<b>0,45</b> 12,5	<b>0,05</b> 0,30
Umsetzarbeiten, Greifbagger/ Teleskoplader (n=9)	Bereich	k. A.–149	<2,21–88,0	<0,21–5,92	<0,03–0,31
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>0,19</b> –	<b>16,6</b> –	<b>0,40</b> –	<b>0,04</b> –
<b>Betrieb 3 (thermische Bodensanierung)</b>					
Aufbereitungshalle, Radlader (n=4)	Bereich	196–357	118–352	<0,36–22,7	0,04–0,26
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>243</b> –	<b>203</b> –	<b>0,40</b> –	<b>0,11</b> –
Aufbereitungshalle, Brecher (n=11)	Bereich	481–3100	404–2880	<0,30–46,7	0,08–1,78
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>2240</b> 3010	<b>2040</b> 2810	<b>3,10</b> 34,6	<b>0,51</b> 1,75
Thermikhalle, Abwurfband (n=13)	Bereich	37,8–1100	26,0–860	0,27–15,5	0,03–0,52
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>283</b> 808	<b>244</b> 700	<b>0,47</b> 15,0	<b>0,07</b> 0,36
Thermikhalle, Rauchgasreinigung (n=14)	Bereich	18,1–520	8,17–407	<0,26–17,3	0,03–0,61
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>113</b> 491	<b>95,6</b> 392	<b>0,88</b> 17,1	<b>0,07</b> 0,38
Thermikhalle, Rundgänger (n=9)	Bereich	90,5–506	58,3–451	<0,51–12,9	0,06–2,09
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>307</b> –	<b>185</b> –	<b>0,92</b> –	<b>0,10</b> –
Messwarte (n=26)	Bereich	k. A.–46,7	5,43–34,5	<0,27–19,0	<0,02–0,26
	<b>Median</b> 95. Perzentil	<b>11,7</b> 43,5	<b>10,9</b> 31,4	<b>0,39</b> 15,8	<b>0,03</b> 0,26
k. A. (keine Angabe): Für alle PAK wurden Konzentrationen unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze ermittelt.					

den auf. Bei der Gestaltung der Schutzmaßnahmen zur Reduzierung der inhalativen Exposition bedeutet dies, dass diese für Naphthalin schwerpunktmäßig gegen Dämpfe schützen müssen und beim BaP gegen Partikel.

Betrachtet man in den einzelnen Betrieben die während des Untersuchungsprogramms vorgefundenen Bedingungen und die schrittweise umgesetzten Maßnahmen, so zeigt sich für das Bahnschwellenrecycling, dass eine schutzbelüftete Abplattanlage die niedrigsten inhalativen Expositionen für die Beschäftigten mit sich bringt. Höher liegen die inhalativen Belastungen, wenn im Freien abgeplattet wird, und am höchsten, wenn dies in einer Halle geschieht. Dabei treten im Freien infolge unterschiedlicher Witterung große Schwankungen auf. Werden Bahnschwellen geschreddert, führt die Beschickung des Schredders mittels Radlader mit schutzbelüfteter Fahrerkabine zu signifikant niedrigeren Konzentrationen in der Radladerkabine im Vergleich zu den Konzentrationen im Freien.

Bei der thermischen Bodensanierung treten im Aufbereitungsbereich bei der Materialanlieferung und der Materialaufgabe am Brecher regelmäßig deutlich oberhalb des AGW und der Toleranzkonzentration liegende Messwerte für Naphthalin bzw. BaP auf. Dies erfordert zwingend insbesondere technische Schutzmaßnahmen, wie eine schutzbelüftete Fahrerkabine des eingesetzten Radladers. Zusätzlich sind gebläseunterstützte Helme als persönliche Schutzausrüstung von den vor Ort tätigen Beschäftigten einzusetzen. Die Expositionsdauer für die Beschäftigten ist auf ein Minimum zu begrenzen. In der Thermikhalle, in der der aufbereitete Boden anfällt, sind ebenfalls Schutzmaßnahmen zur Reduzierung der inhalativen Exposition der Beschäftigten umzusetzen, da auch hier Konzentrationen in der Luft oberhalb des AGW für Naphthalin und der Akzeptanzkonzentration für BaP auftreten können. Dies wird auch durch die personengetragen ermittelten Messwerte bei Rundgängen belegt,

da diese mit Instandhaltungsmaßnahmen einhergehen können, die zu deutlich erhöhten Belastungen führen. Aufgrund der wechselnden Arbeitsplätze in der Halle und der begrenzten Expositionsdauer während des Rundgangs von ca. einer Stunde wird insbesondere Atemschutz als persönliche Schutzausrüstung eingesetzt.

### Innere Belastung

Bei der Auswertung des im Rahmen der Studie untersuchten Parameters der inneren Belastung 1-OHP zeigten sich Werte im Konzentrationsbereich zwischen 0,1 und 350 µg/g Kreatinin. Dies bestätigt die Erkenntnis aus den Arbeitsplatzmessungen, dass im Einzelfall sehr hohe berufliche PAK-Belastungen auftreten können. Eine detaillierte Übersicht über die Lagemaße der 1-OHP-Ausscheidung der Beschäftigten bei den sechs durchgeführten Untersuchungen (Betrieb 2 ohne 6. Untersuchung) zeigt **➔ Tabelle 4**. Da die Zusatzexposition durch Zigarettenrauch marginal ist im Vergleich zur beruflichen Exposition, wurden Raucher und Nichtraucher im Folgenden zusammengefasst betrachtet (Förster et al. 2008).

Vergleicht man die Medianwerte der 1-OHP-Konzentrationen in den Urinproben der Beschäftigten in Tabelle 4 bzw. **➔ Abb. 1** im zeitlichen Verlauf, so lagen diese zu Beginn der Studie im Jahre 2013 (1. und 2. Untersuchung) zwischen 4,5 und 8,8 µg/g Kreatinin. Diese Werte sind gegenüber dem Biologischen Arbeitsstoff-Referenzwert (BAR) von 0,3 µg/g Kreatinin um etwa das 15- bis 30fache erhöht und belegen eine durch die berufliche Tätigkeit bedingte Zusatzbelastung durch PAK (Deutsche Forschungsgemeinschaft 2016).

Beim Bahnschwellenrecycling traten die höchsten Belastungen in Betrieb 1 mit Maximalwerten bis 92,9 µg/g Kreatinin auf. In Betrieb 2 waren die maximalen Belastungen lediglich halb so hoch (48,3 µg/g Kreatinin). Solch hohe Werte traten beispielsweise nach Arbeitsschichten auf, bei denen sehr große Stückzahlen besonders hoch

**Tabelle 4:** Auswertung der Messergebnisse für die 1-OHP-Konzentration im Urin nach mehreren vorangegangenen Arbeitsschichten (Nachschichtwerte) in µg/g Kreatinin im zeitlichen Verlauf

Table 4: Analysis of measurements for 1-OHP concentration in urine after several previous working shifts (night shift values) in µg/g creatinine over the course of time

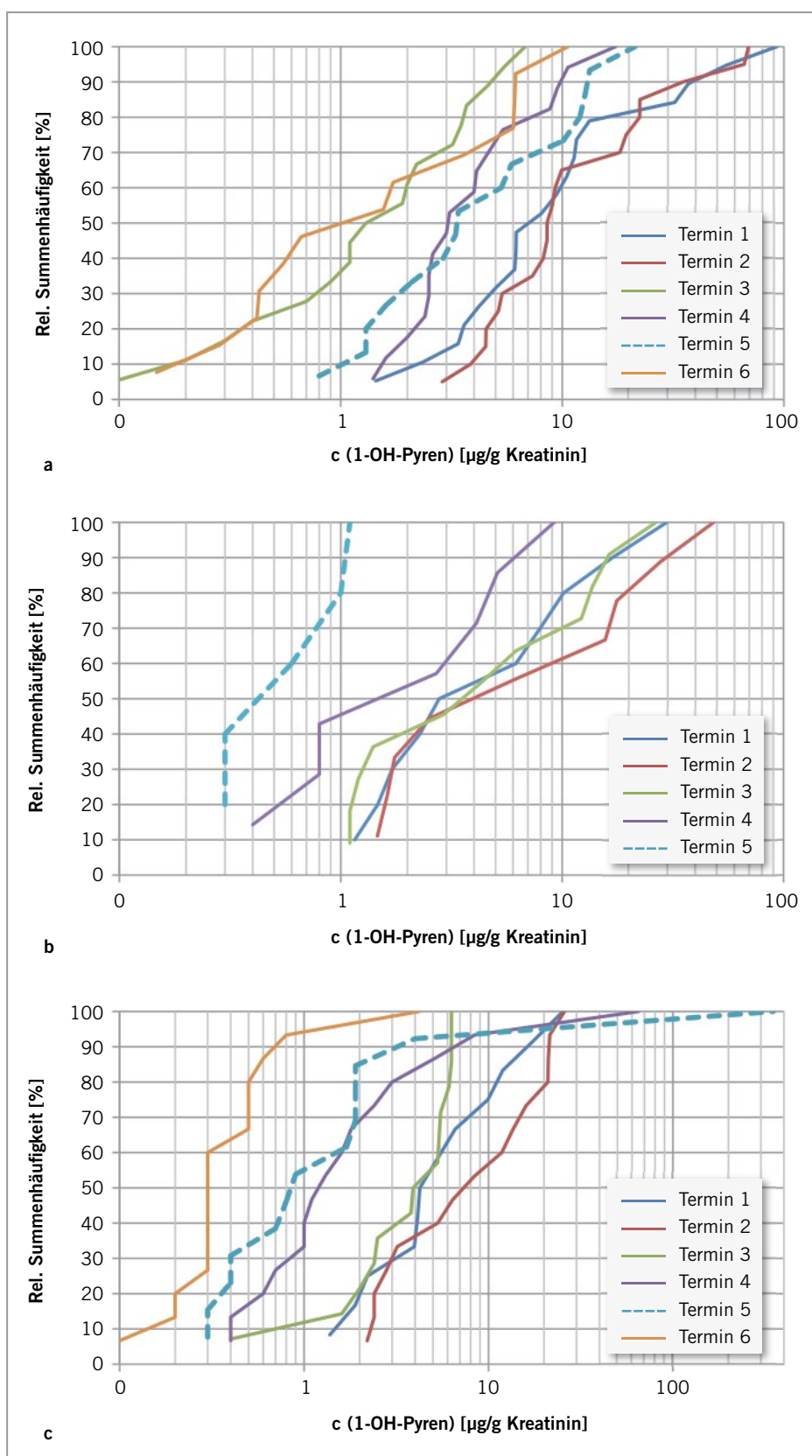
	1. Untersuchung (02–05/2013)	2. Untersuchung (06–07/2013)	3. Untersuchung (10–11/2013)	4. Untersuchung (03/2014)	5. Untersuchung (10–11/2014)	6. Untersuchung (07–09/2015)
<b>Betrieb 1 (Bahnschwellen-Recycling)</b>						
Anzahl Daten	19	20	18	17	15	13
Bereich	1,4–92,9	2,9–69,3	0,1–6,8	1,4–17,4	0,8–21,3	0,1–10,6
<b>Median</b>	<b>8,0</b>	<b>8,8</b>	<b>1,6</b>	<b>3,1</b>	<b>3,4</b>	<b>1,6</b>
95. Perzentil	58,8	66,4	5,7	12,0	15,7	7,9
<b>Betrieb 2 (Bahnschwellen-Recycling)</b>						
Anzahl Daten	10	9	11	7	5	k. W.
Bereich	1,2–29,7	1,5–48,3	1,1–26,5	0,4–9,2	0,3–1,1	k. W.
<b>Median</b>	<b>4,5</b>	<b>6,1</b>	<b>4,3</b>	<b>2,7</b>	<b>0,6</b>	<b>k. W.</b>
95. Perzentil	23,9	–	21,4	–	–	k. W.
<b>Betrieb 3 (thermische Bodensanierung)</b>						
Anzahl Daten	12	15	14	15	13	15
Bereich	1,4–25,3	2,2–25,8	0,4–6,3	0,4–64,9	0,3–350	0,1–4,2
<b>Median</b>	<b>4,8</b>	<b>8,4</b>	<b>4,6</b>	<b>1,3</b>	<b>0,9</b>	<b>0,3</b>
95. Perzentil	21,0	22,8	6,3	25,3	142	1,8
k. W. (keine Angabe) = keine Werte, da keine Messungen durchgeführt wurden.						

belasteter Altschwellen (vor 1991 mit einem Teeröl WEI-A imprägniert) abgeplattet wurden. Die Höchstwerte in der Bodensanierung (Betrieb 3) fanden sich mit 25,8 µg/g Kreatinin bei Instandhaltungsarbeiten.

Bei der 3. Untersuchung in Betrieb 1 fiel ein unerwartet niedriger Median der 1-OHP-Konzentration von 1,6 µg/g Kreatinin auf, der auf nicht repräsentative Betriebsbedingungen in der Arbeitswoche (kein Abplatten, ausschließlich Reinigungs- und Aufräumarbeiten, Baggerfahren) zurückzuführen sein dürfte. In Betrieb 2 fand sich, nach höheren Belastungswerten in der 2. Untersuchung, in Folge der Einführung eines täglichen Wechsels der gesamten Arbeitskleidung (inklusive Unterwäsche), bei der 3. Untersuchung wieder ein mit dem der 1. Untersuchung vergleichbarer Median. Hervorhebenswert ist zudem, dass sich in Betrieb 3 (Bodensanierung) trotz der durchgeführten Instandhaltungsarbeiten offenbar die weiter verbesserten Arbeitsschutzmaßnahmen, insbesondere die Nutzung von geeigneten Einmalschutzanzügen und Chemikalienschutzhandschuhen, positiv ausgewirkt haben (Median 4,6 µg/g Kreatinin). Zuvor wurden bei Instandhaltungsarbeiten wiederholt erhöhte Biomonitoringwerte ermittelt.

Vor der 4. Untersuchung wurde als wesentliche technische Arbeitsschutzmaßnahme in einem der beiden Bahnschwellenbetriebe (Betrieb 1) eine Aufplattanlage mit Absaugvorrichtung zur Erfassung der entstehenden Aerosole in Betrieb genommen. Gegenüber den beiden ersten Untersuchungsreihen zeigte sich hier ein deutlicher Rückgang der inneren Belastung mit einem Median von 3,1 µg/g Kreatinin. Der Maximalwert von 17,4 µg/g Kreatinin wurde noch bei Abplatttätigkeiten hochbelasteter Altschwellen festgestellt. Auch in Betrieb 2 konnte eine Verbesserung anhand des Medians (2,7 µg/g Kreatinin) festgestellt werden. In der Bodensanierung fand sich bei insgesamt rückläufiger Tendenz der Werte in der 4. Untersuchung mit 64,9 µg/g Kreatinin ein aus dem Rahmen fallender Maximalwert beim Umlagern von kontaminiertem Material mit dem Radlader und der Reinigung des Radladers.

Die 5. Untersuchung erfolgte im Betrieb 1 (Bahnschwellen) nach Inbetriebnahme einer Abplattanlage, bei der ein direkter Kontakt mit den Bahnschwellen nicht mehr gegeben ist. Obwohl auch im Betrieb 2 als technische Maßnahme der Bau einer Abplattanlage in



**Abb. 1:** Relative Summenhäufigkeiten der 1-OHP-Konzentrationen im Urin der Beschäftigten im zeitlichen Verlauf der Studie, a) Betrieb 1, b) Betrieb 2 und c) Betrieb 3

*Fig. 1: Relative cumulative frequencies of 1-OHP concentrations in the urine of workers over the course of the study, a) Company 1, b) Company 2 and c) Company 3*



Auftrag gegeben wurde, konnte diese im Zuge des Projektes nicht mehr realisiert und auf ihre Wirksamkeit geprüft werden. Die Median-Werte der 1-OHP-Ausscheidung dieses Untersuchungstermins (Betrieb 1: 3,4 µg/g Kreatinin; Betrieb 2: 0,6 µg/g Kreatinin) waren zwar deutlich niedriger als bei der 1. und 2. Untersuchung, jedoch fiel noch eine relativ hohe Exposition bei Reinigungsarbeiten in Betrieb 1 (Maximalwert 21,3 µg/g Kreatinin) auf. In Betrieb 2 stellte die 5. Untersuchung die letzte innerhalb der Studie dar. Die positive, stark rückläufige Tendenz konnte fortgesetzt werden. Mit einem Maximalwert von 1,1 µg/g Kreatinin und einem Median von 0,6 µg/g Kreatinin fanden sich Werte in einer mit der unbelasteten Allgemeinbevölkerung vergleichbaren Größenordnung. Zu diesem Zeitpunkt waren zahlreiche Maßnahmen zur Verbesserung des Arbeitsschutzes umgesetzt. Hierzu zählten insbesondere die Einrichtung einer Schwarz-Weiß-Trennung in der Sanitäranlage und die Optimierung der persönlichen Schutzausrüstung unter Verwendung von gebläseunterstützten Helmen. Allerdings fanden manuelle Abplattarbeiten zum ersten Mal seit einer mehr als zweimonatigen Expositionspause statt. Inwieweit die Messung demnach als repräsentativ betrachtet werden kann, erscheint fraglich.

In der Bodensanierung (Betrieb 3) bestätigte sich mit vier Messergebnissen im Bereich  $\leq 1,0$  µg/g Kreatinin zwar eine tendenziell rückläufige Entwicklung der Werte. Es wurde jedoch mit 350 µg/g Kreatinin, wie schon bei der vorangegangenen Messung, ein aus der gesamten Datenmenge herausragender Maximalwert bei diversen Tätigkeiten in der Aufbereitungshalle (Schwarzbereich) gemessen. Dieser hohe Wert wurde dahingehend interpretiert, dass es hierzu vermutlich durch einen Hygienefehler in Verbindung mit einer erheblichen dermalen Aufnahme von PAK gekommen war. Eine erneute Unterweisung und nochmalige Überprüfung der eingesetzten Schutzausrüstung wurde umgehend veranlasst.

Die 6. Untersuchung zeigte in beiden betrachteten Gewerken gegenüber den vormaligen Terminen einen weiteren Rückgang der Werte auf. Insgesamt ist von einem deutlichen Effekt der zahlreich durchgeführten Arbeitsschutzmaßnahmen auszugehen. So fand sich im Bahnschwellen-Recycling (Betrieb 1) ein um rund 80 % reduzierter Medianwert von 1,6 µg/g Kreatinin im Vergleich zu den Eingangswerten der Studie von 8,0 (1. Untersuchung) bzw. 8,8 µg/g Kreatinin (2. Untersuchung). Sechs Messergebnisse lagen bei Betrieb 1 im Bereich  $\leq 1,0$  µg/g Kreatinin, also in der gleichen Größenordnung wie der Hintergrundwert der beruflich unbelasteten Allgemeinbevölkerung. Bei der Bodensanierung (Betrieb 3) konnte eine Reduktion des Medians im Vergleich zu den Werten der 1. und 2. Untersuchung um rund 96 % erzielt werden. Bei 14 von 15 Mitarbeitern lagen die Werte im Bereich  $\leq 1,0$  µg/g Kreatinin.

### Beziehungen zwischen äußerer und innerer Belastung

Zwischen den Messergebnissen der äußeren und der inneren Belastung wurde keine Korrelation festgestellt. Dies gilt sowohl für die Beziehung zwischen dem Pyren-Metaboliten 1-OHP im Urin mit Pyren in der Luft als auch zwischen 1-OHP im Urin mit BaP in der Luft.

### Ableitung eines Standes der Technik im Bereich Bahnschwellenrecycling

Angestoßen durch die hohen PAK-Belastungen haben die beiden Betriebe 1 und 2 unabhängig voneinander begonnen, intensiver technische Lösungen für die Abplattung von Bahnschwellen zu entwickeln. Die oftmals am Boden im Freien durchgeführten Arbeiten wurden dazu in schutzbelüftete oder abgesaugte Kabinen verlegt. Die somit bekannten und verglichenen Verfahren können wie in **➔ Tabelle 5** den Technikständen im Sinne der TRGS 460 zugeordnet werden (TRGS 460).

### Diskussion und Schlussfolgerungen

Die kanzerogene Wirkung PAK-haltiger Gemische wird meistens durch die Quantifizierung von BaP bewertet (Greim 2008; IARC 1985). BaP kommt anteilmäßig in solchen Gemischen zwar nur zu einem relativ geringen Anteil vor, besitzt aber im Vergleich zu den anderen PAK ein deutlich höheres krebs erzeugendes Potenzial. Die i. d. R. an modernen Arbeitsplätzen vorkommenden geringen BaP-Konzentrationen stellen sowohl die Luftmessungen als auch das Biomonitoring aus chemisch-analytischer Sicht vor große Herausforderungen. In Vorbereitung zu dieser Studie ist es gelungen, die Bestimmungsgrenze für BaP bei simultaner Erfassung der PAK in der Dampf- und Partikelphase in der Luft soweit abzusenken (17 ng/m<sup>3</sup> bei einstündiger Probenahmedauer), um auch noch Konzentrationen unterhalb der Akzeptanzkonzentration von 70 ng/m<sup>3</sup> sicher mit einem nach TRGS 402 bedingt geeigneten Messverfahren erfassen zu können (TRGS 402). Daneben erlaubt das Verfahren gleichzeitig die sichere und empfindliche Erfassung der restlichen 15 sog. EPA-PAK.

Für das Humanbiomonitoring hat sich seit mehreren Dekaden hingegen der Pyren-Metabolit 1-OHP im Urin als diagnostisch empfindlicher Surrogatmarker für PAK-Belastungen etabliert. Für diesen Biomarker besteht eine große Datenbasis, die eine Einordnung der Projektergebnisse insbesondere auch zu historischen Messwerten erlaubt. Pyren ist jedoch selbst nicht kanzerogen. Daher erscheint es wünschenswert, auch für das BaP einen Biomonitoringparameter zu etablieren, um die PAK-Belastung im Hinblick auf ihre kanzerogene Wirkung besser abbilden zu können. Im Jahr 2000 wurde erstmals ein hochkomplexes, aufwändiges analytisches Verfahren zur Quantifizierung des BaP-Metaboliten 3-Hydroxybenzo[a]pyren (3-OHBP) im Urin publiziert (Simon et al. 2000) und später auch vereinzelt auf arbeitsmedizinische Fragestellungen angewandt (Förster et al.

**Tabelle 5:** Zuordnung der beobachteten Verfahren zu den Technikständen  
Table 5: Assignment of the observed procedures to levels of technology

Technikstand	Abplatten von Bahnschwellen	Aufplatten von Bahnschwellen
Branchenübliches Verfahren	Manuelles Abplatten im Freien oder teilweise eingehausten Bereichen auf Boden- oder Staplerhöhe	Manuelles Aufplatten im Freien oder (teilweise) eingehausten Bereichen auf Boden- oder Staplerhöhe
Stand der Technik	Mit Teleskoparmen unterstütztes manuelles Abplatten aus klimatisierter und schutzbelüfteter Kabine heraus	Manuelles Aufplatten der Bahnschwellen auf Förderband (externe Zu- und Abführung) in Arbeitsbereich mit gezielter Luftführung
Stand von Wissenschaft und Technik (fehlende positive Praxiserfahrung)	Theoretisch Automatisches Abplatten durch eine Maschine	Theoretisch Automatisches Aufplatten durch eine Maschine

2008; Lafontaine et al. 2004). Mittlerweile liegen Modifikationen bzw. Varianten der Methode von Simon et al. vor (Barbeau et al. 2011; Lafontaine et al. 2006). Allerdings ist 3-OH-BaP sowohl aus analytischer Sicht als auch hinsichtlich seiner diagnostischen Empfindlichkeit nicht unproblematisch. BaP wird zum überwiegenden Teil mit den Fäzes und nicht über die Nieren ausgeschieden. Das hat vor dem Hintergrund der sehr niedrig liegenden BaP-Expositionen zur Folge, dass 3-OH-BaP auch nur in sehr geringen Konzentrationen im Urin vorhanden ist. So fanden sich bei BaP-exponierten Arbeitern überwiegend Messwerte im dreistelligen pg/L-Bereich (Förster et al. 2008), während für die nicht exponierte Allgemeinbevölkerung Werte im zweistelligen (Nichtraucher) bis unteren dreistelligen (Raucher) pg/L-Bereich gefunden wurden (Lafontaine et al. 2006). Darüber hinaus bestehen derzeit noch Unklarheiten hinsichtlich der Eliminationskinetik. 3-OH-BaP kann somit auch vor dem Hintergrund der bislang publizierten, aufwändigen und somit teuren Analysenverfahren nicht als routinefähiger Biomonitoring-Parameter bezeichnet werden.

Zwischen den Ergebnissen der Arbeitsplatzmessungen und denen des Biomonitorings konnte in der vorliegenden Studie kein Zusammenhang festgestellt werden. Dieses Ergebnis ist wenig erstaunlich, wenn man die verschiedensten, die äußere und innere Belastung beeinflussenden Faktoren an den untersuchten Arbeitsplätzen bedenkt. Wie die Luftmessungen zeigen, unterschied sich das Verhältnis der PAK untereinander (PAK-Profil) sowohl zwischen den einzelnen Betrieben als auch zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten innerhalb der gleichen Betriebe. Dabei ist das PAK-Profil in der Luft wesentlich vom PAK-Profil der zu bearbeitenden unterschiedlichen Materialien und jeweiligen Chargen beeinflusst. Aber auch zum gleichen Untersuchungszeitpunkt unterschied sich das PAK-Profil in der Luft an den verschiedenen Arbeitsplätzen innerhalb der gleichen Betriebe teils erheblich. Dies ist vermutlich auf die zwischen den Arbeitsplätzen differierenden Bedingungen zurückzuführen, wie z. B. die zwischen den Arbeitsplätzen teils erheblich differierende Verarbeitungstemperatur des zu bearbeitenden Materials. Diese Heterogenitäten im PAK-Expositionsprofil erklären den nicht vorhandenen Zusammenhang zwischen BaP und Pyren in der Luft sowie zwischen BaP in der Luft und 1-OHP im Urin, jedoch noch nicht, warum kein Zusammenhang zwischen Pyren in der Luft und 1-OHP im Urin zu beobachten war.

Aus der Literatur bekannt ist aber, dass PAK gut über die Haut aufgenommen werden. Die dermale Aufnahme von PAK kann sogar die inhalative Aufnahme übertreffen. So konnten beispielsweise Van Rooij et al. (1993a) bei Kokereiarbeitern zeigen, dass im Mittel 75 % (Bereich 28–95 %) der Pyren-Aufnahme dermal erfolgte. Dies erklärt den fehlenden Zusammenhang zwischen Pyren in der Luft und 1-OHP im Urin.

Im Laufe der Studie wurden insbesondere an Arbeitsplätzen mit hoher BaP-Belastung in der Arbeitsplatzluft Maßnahmen ergriffen, die sowohl auf eine Reduktion der inhalativen (z. B. Atemschutz, Absaugvorrichtungen, schutzbelüftete Kabinen) als auch der dermalen Belastung (z. B. Einmalschutzanzüge, Chemikalienschutzhandschuhe, täglicher Wechsel der Arbeitskleidung) abzielten. In Folge der unterschiedlichen an den Arbeitsplätzen implementierten Maßnahmen differiert der jeweilige Anteil der inhalativen und dermalen Belastung an der Gesamtbelastung an Pyren, BaP und den weiteren PAK.

Im Bahnschwellen-Recycling (Betrieb 1) konnte nach den durchgeführten Maßnahmen, insbesondere nach Errichtung einer Auf-

platt- sowie einer Abplattanlage, die Exposition erheblich gemindert werden. Zwar konnte eine Absenkung der Biomonitoringwerte in den Bereich der Hintergrundbelastung bislang noch nicht an allen Arbeitsplätzen erreicht werden. Wie jedoch der Medianwert der inneren Belastung zeigt, kann ein deutlicher Effekt mit einer Verringerung auf ein Fünftel der Eingangs-Medianwerte festgestellt werden. Bei der 6. Untersuchung lagen bereits sechs Messergebnisse in der Größenordnung des BAR. Betrieb 2 zeichnete sich zunächst durch ständig wechselnde Umgebungs- und Arbeitsbedingungen aus, da hier sämtliche Tätigkeiten im Freien stattfanden. Eine Einhausung wie in Betrieb 1 war nicht gegeben. Dementsprechend fanden sich die Luftmesswerte für BaP stets unterhalb der Bestimmungsgrenze, so dass eine Aussage über die beruflich bedingte Zusatzbelastung der Mitarbeiter nur anhand der Biomonitoring-Ergebnisse möglich war. Die Ergebnisse lassen nach Auffassung der Autoren die Beschreibung des Standes der Technik im Sinne der TRGS 460 für das Bahnschwellenrecycling zu.

In der Bodensanierung (Betrieb 3) zeigte sich in der 6. Untersuchung bei 14 von 15 untersuchten Mitarbeitern ebenfalls eine Absenkung der Biomonitoringwerte in den Bereich des BAR. Insgesamt befinden sich die gefundenen 1-OHP-Konzentrationen somit in einem Bereich, der in einer früheren Studie bei nichtrauchenden Bodensanierern in Finnland festgestellt wurde (Elovaara et al. 2006).

Die Verlaufsbeobachtung über die Projektdauer zeigte aber auch, dass es trotz der auf der Kollektivebene positiven Werteentwicklung in Einzelfällen zu sehr hohen Expositionen kommen kann, wie es insbesondere in der Bodensanierung (Betrieb 3) bei der 5. Untersuchung mit dem Höchstwert der Studie von 350 µg/g Kreatinin deutlich wurde. Aufgrund der bekannt hohen dermalen Aufnahme von PAK können Werte in dieser Größenordnung offenbar nur bei äußerster Achtsamkeit und konsequenter Umsetzung aller möglichen Maßnahmen mit einem Höchstmaß an Arbeitshygiene und adäquatem Management der Schutzkleidung vermieden werden. Die im Laufe der Studie im Einzelfall gemessenen hohen inneren Belastungen dürften dem Bereich hohen Risikos oberhalb des Toleranzrisikos zuzuordnen sein, was sich jedoch derzeit nur durch die Ergebnisse von Luftmessungen belegen lässt. In diesen Fällen sind verpflichtend weitere geeignete technische Schutzmaßnahmen auf der Basis einer erneuten Gefährdungsbeurteilung der jeweiligen Arbeitsplatzsituation einschließlich einer Wirksamkeitsprüfung zu ergreifen.

Derartig hohe beruflich bedingte Belastungen treten auch in anderen Branchen und Gewerken auf, wie ein Blick in vergleichbare Studien zeigt. So berichten Rossbach et al. beispielsweise über 1-OHP-Ausscheidungen von Beschäftigten bei der Herstellung feuerfester Materialien zwischen 0,31 und 280 µg/g Kreatinin (Median 8,22), in der Fertigung von Graphitelektroden zwischen <NWG und 90,8 µg/g Kreatinin (Median 5,5) und in Kokereien zwischen 0,51 und 34,8 µg/g Kreatinin (Median 4,33) (Rossbach et al. 2007). Lediglich in einem Vergleich aller bis 2002 in der Literatur beschriebenen Werte zur inneren PAK-Belastung von Kokereiarbeitern finden sich nochmals höhere Ausscheidungen bis zu 520 µg/g Kreatinin (Strunk et al. 2002). In den vier von den Autoren untersuchten Kokereien wurden Mediane zwischen 4,1 und 11,7 µg/g Kreatinin (n=3) ermittelt.

Neben den beschriebenen technischen Maßnahmen haben offensichtlich auch organisatorische Maßnahmen wie die Einrichtung von Sanitäranlagen mit Schwarz-Weiß-Trennung und insbesondere

ein täglicher Wechsel der Arbeitskleidung deutlichen Einfluss auf die Höhe der 1-OHP-Ausscheidungen. Da dies aber im Rahmen der Studie nicht näher untersucht werden konnte, erscheinen weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet in Anbetracht der Hautgängigkeit der PAK dringend geboten. Erst zum Ende der Studie finden sich überwiegend Biomonitoringwerte im Bereich des BAR, also in Höhe der Hintergrundbelastung der beruflich unbelasteten Allgemeinbevölkerung. Die Expositionen an diesen Arbeitsplätzen liegen demnach im Bereich des geringen Risikos.

Die Mehrzahl der gemessenen Biomonitoringwerte war überwiegend laut TRGS 910 in Verbindung mit einer gemeinsamen Empfehlung des Ausschusses für Gefahrstoffe (AGS) und des Ausschusses für Arbeitsmedizin (AfAMed)<sup>1</sup> dahingehend zu interpretieren, dass das Akzeptanzrisiko (übergangsweise gleich dem Referenzwert) überschritten wird und somit zumindest von einem mittleren Risiko ausgegangen werden musste (AfAMed). Somit muss der Arbeitgeber ein geeignetes, risikobezogenes Maßnahmenkonzept nach Gefahrstoffverordnung anwenden, um das Minimierungsgebot umzusetzen. Auch die Ergebnisse der Arbeitsplatzmessungen bestätigen diese Schlussfolgerungen.

Mit Blick auf die Ergebnisse muss eindringlich darauf hingewiesen werden, dass der Arbeitgeber bei Tätigkeiten mit PAK gemäß Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV) eine Pflichtvorsorge vor Aufnahme der Tätigkeit und anschließend in regelmäßigen Abständen zu veranlassen hat (ArbMedVV). Hierbei sind die Pflichten des Arztes oder der Ärztin gemäß § 6 und das dortige Gebot der Nutzung eines Biomonitorings unbedingt zu beachten. Wie zudem in der Arbeitsmedizinischen Regel (AMR) 6.2 (Biomonitoring) dargelegt, ist ein Biomonitoring u. a. insbesondere bei Tätigkeiten angezeigt, bei denen unmittelbarer Hautkontakt besteht, bei Tätigkeiten mit Exposition gegenüber krebserzeugenden Stoffen sowie bei Tätigkeiten, bei denen die Gefahrstoffe durch Luftmessungen schwer erfassbar sind (Reparaturarbeiten, Arbeiten im Freien, stark schwankende Raumluftkonzentrationen, häufig wechselnde Stoffe im Chargenbetrieb) (AMR 6.2).

Wenngleich in der vorliegenden Arbeit die Belastung der Beschäftigten sowie die Entwicklung der Höhe der Belastung im Laufe der Studie größtenteils anhand von Biomonitoring-Ergebnissen dargestellt wurde, kann eine wissenschaftlich valide Bewertung des Erfolgs getroffener Arbeitsschutzmaßnahmen insbesondere an Arbeitsplätzen mit stark schwankenden äußeren Belastungen nur durch die parallele Durchführung von Luftmessungen und Biomonitoring erfolgen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich bei der äußeren Belastung das Verhältnis zwischen BaP und Pyren zwischen einzelnen Gewerken bzw. Betrieben erheblich unterscheiden kann und somit eine vergleichende Beurteilung der krebserzeugenden Einwirkung anhand des Biomonitoringmarkers 1-OHP zwischen einzelnen Gewerken bzw. Betrieben erschwert ist. Gleichwohl stellt das 1-OHP einen geeigneten und vergleichsweise kostengünstigen Biomonitoringparameter dar, um im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung, ggf. im Zusammenspiel mit Arbeitsplatzmessungen, Tätigkeiten bzw. Arbeitsplätze mit erhöhter Belastung zu identifizieren, die Effizienz getroffener Arbeitsschutzmaßnahmen zu beurteilen und im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge den Erfolg der getroffenen Maßnahmen auf Dauer sicherzustellen (➔ **Abb. 2**).



**Abb. 2:** Abplattenanlage in Betrieb 1 mit schutzbelüfteter klimatisierter Abplattkabine

Fig. 2: Railway sleeper dismantling machine in company 1 with protective ventilated cabin

## Literatur

Ärztlicher Sachverständigenbeirat: Empfehlungen für vier neue Berufskrankheiten beschlossen; 2016. [www.bmas.de/DE/Presse/Meldungen/2016/vier-neue-berufskrankheiten-anerkannt.html](http://www.bmas.de/DE/Presse/Meldungen/2016/vier-neue-berufskrankheiten-anerkannt.html) (Zugriff am 15.02.2017).

Ausschuss für Arbeitsmedizin (AfAMed): Bekanntmachung von Arbeitsmedizinischen Regeln hier: AMR 6.2 Biomonitoring; AMR 6.2. GMBI Nr. 5 vom 24. Februar 2014, S. 91. <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Ausschuesse/AfAMed/AMR/AMR-6-2.html?sessionid=91FB8F15FE624E1BAC56E99BD3A12EF8.s2t1> (Zugriff am 15.02.2017).

Ausschuss für Arbeitsmedizin (AfAMed): Bekanntmachung von Empfehlungen für Biomonitoring bei Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen; GMBI Nr. 62 vom 8. November 2010, S. 1257–1260. [http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Ausschuesse/AfAMed/pdf/Bekanntmachung-Biomonitoring.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Ausschuesse/AfAMed/pdf/Bekanntmachung-Biomonitoring.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (Zugriff am 15.02.2017).

Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Bekanntmachung zu Gefahrstoffen 910 „Risikowerte und Exposition-Risiko-Beziehungen für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen“; BekGS 910. Ausgabe Juni 2008 (GMBI S. 883, 2010 S. 914) Außer Kraft am 2. April 2014 durch die Bek. vom 13. Februar 2014 (GMBI S. 258).

Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 906 „Verzeichnis krebserzeugender Tätigkeiten oder Verfahren nach § 3 Abs. 2 Nr. 3 GefStoffV“; TRGS 906. <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-906.html> (Zugriff am 15.02.2017).

Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 900 „Arbeitsplatzgrenzwerte“; TRGS 900. BA rBl. Heft 1/2006 S. 41–55 zuletzt geändert und ergänzt; GMBI 2016 S. 886–889 [Nr. 45] vom 04.11.2016. <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-900.html> (Zugriff am 15.02.2017).

Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 402 „Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition“; TRGS 402. GMBI 2010, S. 231 253 [Nr. 12] vom 25.02.2010, zuletzt geändert und ergänzt; GMBI 2016 S. 843–846 vom 21.10.2016 [Nr. 43]. <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-402.html> (Zugriff am 15.02.2017).

Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 460 „Handlungsempfehlung zur Ermittlung des Standes der Technik“; TRGS 460. GMBI 2013 S. 1175–1191 [Nr. 59] berichtigt; GMBI 2014 S. 72 [Nr. 3/4]. <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-460.html> (Zugriff am 15.02.2017).

Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 910 „Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen“; TRGS 910. GMBI 2014 S. 258–270 vom 02.04.2014 [Nr. 12] Zuletzt geändert und ergänzt; GMBI 2015 S. 1191 vom 06.11.2015 [Nr. 60] 2016 S. 606–609 [Nr. 31] v. 29.07.2016. <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-910.html> (Zugriff am 15.02.2017).

<sup>1</sup> Rechtlich nicht verbindlich.

- Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 551 „Teer und andere Pyrolyseprodukte aus organischem Material“: TRGS 551. GMBI 2015 S. 1066–1083 [Nr. 54] (vom 06. 10. 2015) geändert und ergänzt: GMBI 2016, S. 8–10 [Nr. 1] (vom 27. 01. 2016). <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-551.html> (Zugriff am 15. 02. 2017).
- Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 905 „Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe“: TRGS 905. GMBI 2016 S. 378–390 [Nr. 19] vom 03. 05. 2016. <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/TRGS-905.html> (Zugriff am 15. 02. 2017).
- Barbeau D, Maitre A, Marques M: Highly sensitive routine method for urinary 3-hydroxybenzo(a)pyrene quantitation using liquid chromatography-fluorescence detection and automated off-line solid phase extraction. *Analyst* 2011; 136: 1183–1191.
- Bundesministerium für Arbeit und Soziales: Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge: ArbMedVV. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2768), zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 1 der Verordnung vom 15. November 2016 (BGBl. I S. 2549). <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbmedvv/gesamt.pdf> (Zugriff am 15. 02. 2017).
- Deutsche Forschungsgemeinschaft: MAK- und BAT-Werte-Liste 2016. Weinheim: Wiley-VCH, 2016.
- DIN EN 481: „Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel (Deutsche Fassung)“. Berlin: Beuth, 1993.
- DIN EN 13991: „Derivate der Kohlenpyrolyse – Öle aus Steinkohlenteer: Kreosot – Anforderungen und Prüfverfahren (Deutsche Fassung)“. Berlin: Beuth, 2003.
- Elovaara E, Mikkola J, Makela M, Paldanius B, Priha E (2006) Assessment of soil remediation workers' exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH): bio-monitoring of naphthols, phenanthrols, and 1-hydroxypyrene in urine. *Toxicol Lett* 2006; 162: 158–163.
- Europäische Kommission: Richtlinie 2011/71/EU der Kommission vom 26. Juli 2011 zur Änderung der Richtlinie 98/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zwecks Aufnahme des Wirkstoffs Kreosot in Anhang I: RL 2011/71/EU. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:195:0046:0051:DE:PDF> (Zugriff am 15. 02. 2017).
- Europäisches Parlament und der Europäische Rat: Verordnung (EG) 1272/2008 des Europäischen Parlamentes und des Europäischen Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006: CLP-VO. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:02008R1272-20170101> (Zugriff am 15. 02. 2017).
- Förster K, Preuss R, Rossbach B, Bruning T, Angerer J, Simon P: 3-Hydroxybenzo(a)pyrene in the urine of workers with occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in different industries. *Occup Environ Med* 2008; 65: 224–229.
- Fustinoni S, Campo L, Cirila PE, Martinotti I, Buratti M, Longhi O, Foa V, Bertazzi P: Dermal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in asphalt workers. *Occup Environ Med* 2010; 67: 456–463.
- Greim H: Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) [MAK Value Documentation in German language, 2008]. The MAK-collection for occupational health and safety. Weinheim: Wiley-VCH, 2002 bis heute, S. 1–210.
- Hahn JU, Assenmacher-Mairworm H: Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) [Air Monitoring Methods in German language, 2003a]. The MAK-collection for occupational health and safety. Weinheim: Wiley-VCH, 2002 bis heute, S. 1–14.
- Hebisch R, Holthenrich D, Karmann J, Riechert F, Berger M, Kersten N: Arbeitsplatzbelastungen bei der Verwendung von bioziden Produkten: Projektnummer: F 1809. <http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/F1809.html> (Zugriff am 15. 02. 2017).
- International Agency for Research on Cancer (IARC): Polynuclear Aromatic Compounds, Part 4: Bitumens, Coal-Tars and Derived Products, Shale-Oils and Soots. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol1-42/mono35.pdf>
- Klotz K: Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) [BAT Value Documentation in German language, 2013]. The MAK-collection for occupational health and safety. Weinheim: Wiley-VCH, 2002 bis heute, S. 1–29.
- Kuhlmann G, Elbeshausen F, Hebisch R, Wolf T: Stoffbelastungen der Mitarbeiter von Servicefirmen bei Reinigungs-, Wartungs- und Reparaturarbeiten: Forschung Projekt F 2044. <https://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/F2044.html> (Zugriff am 15. 02. 2017).
- Lafontaine M, Champmartin C, Simon P, Delsaut P, Funck-Brentano C: 3-Hydroxybenzo(a)pyrene in the urine of smokers and non-smokers. *Toxicol Lett* 2006; 162: 181–185.
- Lafontaine M, Gendre C, Delsaut P, Simon P: Urinary 3-hydroxybenzo(a)pyrene as a biomarker of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: An approach for determining a biological limit value. *Polycyclic Aromatic Compounds* 2004; 24: 441–450.
- Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik: Handlungsanleitung für die Umsetzung der Bekanntmachung 910 (BekGS 910).
- Marquardt H, Schäfer SG, Barth H: Toxikologie, 3. Aufl. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlags-Gesellschaft, 2013.
- Preuss R: Erarbeitung eines analytischen Verfahrens zum Biomonitoring von Naphthalin und dessen Anwendung in der umwelt- und arbeitsmedizinischen Diagnostik. Dissertation. Erlangen-Nürnberg, 2005.
- Preuss R, Rossbach B, Müller J, Angerer J: Eine deutschlandweiter Studie zur inneren und äußeren Exposition gegenüber polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) am Arbeitsplatz. *Gefahrst Reinhalt Luft* 2003; 63: 7–14.
- Preuss R, Rossbach B, Wilhelm M, Bruning T, Angerer J: External and internal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) among workers in the production of fire-proof materials – proposal of a biological monitoring guidance value. *Int J Hyg Environ Health* 2006; 209: 575–580.
- Rossbach B, Preuss R, Letzel S, Drexler H, Angerer J: Biological monitoring of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) by determination of monohydroxylated metabolites of phenanthrene and pyrene in urine. *Int Arch Occup Environ Health* 2007; 81: 221–229.
- Simon P, Lafontaine M, Delsaut P, Morel Y, Nicot T: Trace determination of urinary 3-hydroxybenzo(a)pyrene by automated column-switching high-performance liquid chromatography. *J Chromatogr B Biomed Sci Appl* 2000; 748: 337–348.
- Strunk P, Ortlepp K, Heinz H, Rossbach B, Angerer J: Ambient and biological monitoring of coke plant workers – determination of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Int Arch Occup Environ Health* 2002; 75: 354–358.
- The MAK-collection for occupational health and safety: Weinheim: Wiley-VC, 2002 bis heute.
- van Rooij JG, Bodelier-Bade MM, Jongeneelen FJ: Estimation of individual dermal and respiratory uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons in 12 coke oven workers. *Brit J Ind Med* 1993a; 50: 623–632.
- van Rooij JG, Bodelier-Bade MM, Loeff AJ de, Dijkmans AP, Jongeneelen FJ: Dermal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons among primary aluminium workers. *Med Lav* 1992; 83: 519–529.
- van Rooij JG, Roos J de, Bodelier-Bade MM, Jongeneelen FJ: Absorption of polycyclic aromatic hydrocarbons through human skin: differences between anatomical sites and individuals. *Toxicol Environ Health* 1993b; 38: 355–368.
- World Health Organisation (WHO): Selected non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons. Geneva: World Health Organization, 1998

**Danksagung.** Wir danken allen, die durch ihre engagierte Mitarbeit diese Untersuchung ermöglichten, insbesondere den beteiligten Unternehmen, deren Beschäftigten, den Beschäftigten der beteiligten Behörden sowie den Sicherheitsfachkräften und Betriebsärzten für die Kooperation bei der Durchführung der Untersuchungen und Umsetzung der Arbeitsschutzmaßnahmen im Betrieb.

**Interessenkonflikt.** Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

#### Für die Verfasser

Dr. med. Michael Hagmann

Landesinstitut für Arbeitsgestaltung NRW

Ulenbergstr. 127-131

40225 Düsseldorf

Michael.Hagmann@lia.nrw.de