EMPA
Materials Science & Technology

Zusammenhang zwischen PAK-Gehalt in teerhaltigem Recyclinggranulat und in den emittierten Dämpfen beim Wiedereinbau

Relation entre la teneur en HAP des granulats recyclés renfermant du goudron et celle des vapeurs émises lors de la pose des enrobés

Correlation of PAH-concentration in tar-containing recycled asphalt pavement and emission of vapours during reconstruction

VSS 2000/453

Martin Hugener, Dr. phil. II, Abteilung Strassenbau / Abdichtungen, Projektleitung

Lukas Emmenegger, Dr. rer. nat., Abteilung Luftfremdstoffe / Umwelttechnik

Peter Mattrel, Dipl. Chem. ETH, Abteilung Analytische Chemie

Forschungsstelle: Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt

Partner bei Feldversuchen: Implenia AG

Fachliche Betreuung: VSS-Expertenkommission EK 4.03 und externe Begleitgruppe (SUVA, Umweltamt Kt. Thurgau)

Dank

An dieser Stelle sei allen Empa-Mitarbeitern, die in diesem Projekt mitgearbeitet haben, herzlichst gedankt. Insbesondere sind dies Peter Honegger, Kerstin Zeyer, Dr. Joachim Mohn, Regula Haag, Cornelia Seiler, Hans Kienast, Christian Meierhofer und Roland Takacs.

Ein besonderer Dank gebührt den Arbeitern des Strassenbauunternehmens Implenia AG (ehemals Batigroup AG) für ihren grossen Einsatz und ihre Mitarbeit in den Feldmessungen. Für die fachliche Beratung und Diskussion sei der Expertengruppe EK 4.03 der VSS und speziell auch Dr. Jürg Herz (Amt für Umwelt Kt. Thurgau) und Dr. Lucca Rossinelli (SUVA) bestens gedankt.

Inhaltsverzeichnis

1 PROBLEMSTELLUNG/ AUFTRAG 1

1.1 Ausgangslage 1

1.2 Ziele 1

1.3 Gesetzliche Grundlagen 2

1.4 Untersuchte Stoffklassen 4

1.4.1 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) 4
1.4.2 Phenole 4
1.4.3 Bitumendämpfe ("Asphalt Fume") 4

2 LABORVERSUCHE 6

2.1 Wahl und Validierung des Fume-Generators 6

2.1.1 Fume Generator 1 6
2.1.2 Fume-Generator 2 6
2.1.3 Wahl des Fume-Generators 7

2.2 Chemische Analysemethoden 8

2.2.1 Gesamtpartikelmasse (TPM) und Toluollösliche Anteile (TSM) 8
2.2.2 PAK-Bestimmung 8
2.2.3 Phenol- und Kresol-Bestimmung 11

2.3 Vorversuche 13

2.3.1 Probenahme 13
2.3.2 Bestimmung der optimalen Versuchsdauer 14
2.3.3 Wiederholbarkeit der Emissionsversuche im Labor 16

2.4 Hauptversuche 19

2.4.1 Versuchsbeschreibung 19
2.4.2 Probenahme 19
2.4.3 Verwendete Bindemittel 20
2.4.4 Variation des Teergehaltes 20
2.4.5 Variation der Temperatur 21

2.4.6 Variation der Viskosität ... 22

2.5 Resultate der Laborversuche ... 22

2.5.1 Variation des Teergehaltes ... 22
2.5.2 Variation der Temperatur ... 25
2.5.3 Variation der Viskosität ... 27

3 FELDVERSUCHE (FV) ... 29

3.1 Einführung ... 29

3.2 Durchführung der Feldversuche ... 30

3.2.1 Messkampagnen - Übersicht ... 30
3.2.2 Messtechnik Übersicht ... 31
3.2.3 Probenahme mittels Personal Sampler ... 32
3.2.4 Beprobung der heissen Belagsoberfläche ... 32
3.2.5 Beprobung von Vorratswanne und Einbaubohle ... 33

3.3 Charakterisierung der Messkampagnen ... 35

3.3.1 Wiggertal ... 35
3.3.2 Baregg ... 36
3.3.3 Thalheim ... 37

3.4 Resultate und Diskussion ... 37

3.4.1 Total Particulate Matter (TPM) ... 38
3.4.2 Toluol löslicher Anteil (TSM) ... 39
3.4.3 EPA-PAK ... 39
3.4.4 Benzo(a)pyren ... 39
3.4.5 Phenol/Kresol ... 40
3.4.6 Erfassungsrate ... 40
3.4.7 Massenflüsse ... 40

4 VERGLEICH DER RESULTATE ... 42

4.1 Vergleich von Labor- und Feldversuchen ... 42

4.2 Diskussion der PAK-Liste ... 43

4.2.1 PAK-Profil der Ausgangsmaterialien und der Emissionen ... 43
4.2.2 16-EPA-PAKs ... 44
4.2.3 Toxisches Potential der PAK-Emissionen ... 46

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN 50

5.1 Einfluss von Einbautemperatur, Teergehalt und Viskosität des Bindemittels 50

5.2 Beurteilung der Feldversuche 50

5.3 Gesamtbeurteilung 51

5.4 Weiterer Forschungsbedarf 52

6 LITERATURVERZEICHNIS 53

ANHANG 1 RESULTATE LABORVERSUCHE 55

ANHANG 2 RESULTATE FELDVERSUCHE 74

Wiggertal 74

Baregg 75

Thalheim 84

Abkürzungen

ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAFU	Bundesamt für Umwelt, ehemals BUWAL
BaP	Benzo(a)pyren, kanzerogener PAK
BUWAL	alte Bezeichnung für das Bundesamt für Umwelt
c	Konzentration
EPA-PAK	Liste von 16 PAK gemäss Liste der EPA (U.S. Envrionmental Protection Agency)
LRV	Luftreinhalte-Verordnung [1]
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentrationswerte gesundheitsgefährdender Stoffe
n.b.	Wert wurde nicht bestimmt
n.n.	Wert ist nicht nachweisbar (kleiner als Nachweisgrenze)
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
ppm	parts per million, z. B. mg/kg
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
TPM	Total particulate matter, gravimetrisch bestimmter Filterrückstand der Emissionen
TSM	Toluene soluble matter, Toluollöslicher Anteil der TPM

Zusammenfassung

Bei der Verwendung von teerhaltigem Recyclinggranulat bei der Herstellung neuer Strassenbeläge im Heisseinbau werden toxische Verbindungen, die im Teer enthalten sind freigesetzt. Es handelt sich dabei vor allem um Phenole und Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die speziell im Zentrum des Interesses stehen, da einige Vertreter dieser Stoffklasse kanzerogene und/oder mutagene Eigenschaften besitzen. Mischgut mit hohem Teergehalt kann bei den für den Heisseinbau herrschenden Temperaturen zu einer Gesundheitsgefährdung der Strassenarbeiter führen. Ein vollständiger Verzicht auf die Verwendung von Recyclinggranulat im heissen Recycling ist aufgrund der grossen Mengen hingegen auch nicht sinnvoll, da diese sonst grösstenteils deponiert werden müssten. Für die Festsetzung eines wissenschaftlich fundierten Richtwertes des maximal zulässigen Teergehalts im eingebauten Mischgut fehlten aus Sicht der Arbeitshygiene und der Luftreinhaltung bis anhin die notwendigen Grundlagen. Das vorliegende Forschungsprojekt wurde durchgeführt, um diese Wissenslücke zu schliessen.

In Laborversuchen an Bitumen-Teergemischen wurden verschiedene Einflussparameter auf die Bildung von Bindemitteldämpfen untersucht. Dazu wurde der Bitumendampf (TPM = total particulate matter), 23 PAK, Phenol und die 3 Kresole gemessen. Im untersuchten Temperaturintervall von 140 bis 240°C hatte erwartungsgemäss die Temperatur den grössten Einfluss auf die Emissionen. Eine Temperaturerhöhung um 12°C führte zu einer Verdoppelung des TPM-Wertes, hingegen wurde für die EPA-PAK nur eine Erhöhung von 25% gemessen. Der PAK-Gehalt im verwendeten Bindemittelgemisch hatte bis zu einer Konzentration von 20'000 mg/kg (EPA-PAK) keinen signifikanten Einfluss auf die TPM Freisetzung, führte aber zu einer proportional Erhöhung der PAK-Emissionen.

In drei Feldversuche wurde Mischgut mit einem Gehalt bis zu 5600 mg/kg EPA-PAK bei Temperaturen zwischen 145 und 160°C eingebaut. Die arbeitshygienische Belastung der Arbeiter wurde durch Personalsampler gemessen während die Gesamtemissionen durch Absaugen der Emissionen an der Bohle, der Vorratswanne und der Belagsoberfläche bestimmt wurden. Die TPM-Konzentrationen lagen im Bereich von 2-4 mg/m^3 und sind somit schon nahe am MAK-Wert für Bitumendämpfe (10 mg/m^3). Da in der Schweiz für EPA-PAK kein MAK-Wert festgelegt ist, konnte nur die Emission an Benzo(a)pyren (BaP), das oft als kanzerogene Leitsubstanz betrachtet wird, ausgewertet werden. Die gemessenen BaP-Konzentrationen lagen in allen Fällen mindestens um einen Faktor 3 unter dem MAK-Wert für BaP von 2 µg/m^3.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen scheint der aktuelle Richtwert des Bundesamtes für Umwelt von 5000 mg/kg EPA-PAK im Bindemittel als tolerierbar. Von einer Erhöhung dieses Wertes wird hingegen abgeraten, da die drei Feldversuche keinen "worst case" enthielten und der Abstand zu den gesetzlichen MAK-Werten nicht mehr gross ist.

Résumé

Lors de l'utilisation de granulats de recyclage renfermant du goudron pour la fabrication de nouveau revêtement routiers posés à chaud, les substances toxiques que renferme le goudron sont libérées. Ce sont là avant tout les phénols et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui sont particulièrement au centre de l'intérêt car quelques représentants de ces classes de substances sont cancérogènes et/ou mutagènes. Aux températures régnant pour la pose à chaud, un enrobé avec une teneur élevée en goudron peut présenter un risque pour la santé des ouvriers. Un renoncement total à l'utilisation de granulats de recyclage pour le recyclage à chaud n'est pas non plus judicieux du fait des grandes quantités de matériau qui devraient autrement être mises en décharge. Du point de vue de l'hygiène du travail, on manquait jusqu'ici des bases nécessaires pour la fixation d'une valeur scientifiquement fondée de la teneur maximale en goudron d'un enrobé en place.

On a procédé à une étude des différents paramètres qui influencent la formation de vapeur de liant avec des essais de laboratoire sur des mélanges bitume-goudron. Pour cela on a mesuré la vapeur de bitume (TPM = total particulate matter), 23 HAP et les 3 crésols. Dans l'intervalle de température étudié, c'est, comme on pouvait s'y attendre, la température qui exerce la plus grande influence sur les émissions. Une élévation de la température de 12°C conduisait à un doublement de la valeur de la TPM; par contre l'élévation mesurée pour les HAP-EPA n'atteignait que 25%. Jusqu'à une valeur de 20'000 mg/kg, la concentration des HAP dans le mélange de bitume n'exerçait aucune influence sur la hauteur de la valeur TPM mais conduisait à une augmentation proportionnelle des émissions des HAP.

Dans trois essais réels, des enrobés présentant des teneurs en HAP-EPA atteignant jusqu'à 600 mg/kg ont été posés à des températures variant entre 145 et 160°C. L'exposition des travailleurs a été déterminée durant toute la pose au niveau de la table de compactage et de la trémie de la finisseuse ainsi qu'à la surface de l'enrobé par aspiration des émissions au moyen d'échantillonneurs individuels. Les concentrations de TPM se situaient dans le domaine de 2 – 4 mg/m^3 et étaient ainsi déjà proches des valeurs maximale sur les places de travail applicables aux vapeurs de bitume (10 mg/m^3). Comme la Suisse ne fixe pas de valeur maximale aux places de travail pour les HAP-EPA, seules les émissions de benzo(a)pyrène (BaP), souvent considéré comme substance de référence pour les effets cancérogènes, ont été évaluées. Les concentrations de BaP mesurées étaient dans tous les cas au minimum inférieures d'un facteur 3 à la valeur maximale aux places de travail de 2 µg/m^3 valable pour le BaP.

Sur la base des examens effectués, il semble que la valeur indicative actuelle de 5000 mg/kg HAP-EPA dans le liant fixée par l'Office fédéral de l'environnement est tolérable. Il est toutefois déconseillé d'augmenter cette valeur car les trois essais réels réalisés ne comprenaient aucun «worst case» et que l'écart par rapport aux valeurs maximales aux places de travail fixées par la loi n'est plus très grand.

Abstract

Hot recycling in pavement construction leads to the emission of hazardous compounds when tar-containing recycled asphalt pavement (RAP) is used. This is due to the relatively high content of substances such as phenols and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in tar. The latter are of special interest, because some PAHs have carcinogenic and/or mutagenic properties. High tar content in combination with high pavement temperatures during construction increases the potential health risk for workmen. Switzerland does currently not consider a complete ban of RAP in hot recycling for economical and ecological reasons. Since RAP might always contain some tar, there is a need to fix a scientifically sound limit for the maximum tar content and pavement temperature. However, scientific data on the emissions of PAH and phenols, as well as the resulting occupational health risk was not sufficient. Thus, the present research project was initiated to close this gap.

Different test parameters such as temperature, PAH-content and viscosity were varied in the laboratory test program to investigate their influence on the resulting emissions. The fume was analysed for 23 PAHs, as well as for phenol and cresols. It was shown, that temperature is the major factor determining the emissions in the 140 to 240°C range. A temperature increase of 12°C doubled the emissions of total particulate matter (TPM) and lead to 25% higher EPA-PAH emissions. A PAH content of up to 20’000 ppm EPA-PAH in the RAP had no significant effect on TPM emissions. However, emissions of PAH in the fume increased proportionally with the PAH concentration in the RAP.

Three field tests were carried out with RAP containing up to 5600 ppm EPA-PAH. Temperatures in the hot mix were between 145 and 160°C. Occupational health data for the workmen were collected with personal samplers. Concentrations of TPM were with 2-4 mg/m^3 close to the occupational health limit value for bitumen fume (10 mg/m^3). Concentrations of Benzo(a)pyrene, which is often used as lead compound, were in all cases below the occupational health limit value of 2 µg/m^3 by at least a factor of three.

In addition to concentration measurements, the total mass flow from the three main sources – paving screen, hot mix conveyor and freshly paved surface – was determined. While the hot mix conveyer was the most important source, the total emission of TPM and BaP was below the existing Swiss legal limits for stationary sources.

This study indicates that the current recommended maximum value of 5000 ppm for EPA-PAH in the binder of RAP may be considered as adequate. However, conditions in the field trials did not include a worst case scenario and the gap to certain occupational health limit values is small. Therefore, an increase of the limit value is not advised. Furthermore, general legal request for the handling of toxic and carcinogenic substances require the minimization of the relevant exposition, as well as the replacement of hazardous by harmless compounds. Based on this research we recommend to minimize the content of toxic compounds – especially PAHs - in RAP, and to keep temperatures during pavement as low as technically feasible.

1 Problemstellung/ Auftrag

1.1 Ausgangslage

Im Rahmen von Sanierungen alter Strassenbeläge fallen oft grosse Mengen an teerhaltigem Recyclinggranulat an. Ähnlich wie bei nicht teerhaltigem Asphaltgranulat eignet sich dieses Material noch gut für ein Recycling und den Einsatz in neuen Strassenbelägen. Allerdings weisen Teerprodukte im Gegensatz zu Bitumenprodukten einen sehr hohen Gehalt an toxischen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK oder englisch PAH) und Phenolen auf. Der vom BAFU (Bundesamt für Umwelt) eingeführte Richtwert von 5000 ppm EPA-PAK[1] im Bindemittel des eingebauten neuen Mischgutes [2] basierte vor allem auf Überlegungen des Gewässerschutzes, da bezüglich der Emissionen keine Daten verfügbar waren.

Zudem war bekannt, dass in Deutschland intensive Bemühungen zur Reduktion der Emissionen beim Heisseinbau von Asphalt stattfanden, die als Bindemittel sogar nur reines Bitumen ohne Teer verwendeten. Da diese Bindemittel einen weit tieferen PAK-Gehalt aufweisen, stellte sich die Frage, ob Deutschland bezüglich der PAK-Gefahr besonders sensibel reagierte oder die Schweiz die Gesundheit der Strassenarbeiter vernachlässigte.

In der Zwischenzeit sind in Europa umfangreiche epidemiologische Untersuchungen durchgeführt worden, um das Gesundheitsrisikos bei Arbeiten mit bitumenhaltigen Belagsarbeiten beurteilen zu können. Während in Italien [3] und Schweden [4] keine Erhöhung der Krebsfälle festgestellt werden konnte, wurde in Finnland [5] und Norwegen [6] eine leicht höhere Mortalität bei Strassenarbeitern beobachtet. Dies konnte jedoch nicht eindeutig auf das Bitumen zurückgeführt werden, da die Anwesenheit von teerhaltigem Material nicht ausgeschlossen werden konnte [7].

Untersuchungen zeigen, dass schon beim Einbau von Gussasphalt ohne Teer in geschlossenen Räumen der MAK-Wert vom krebserregenden Benzo(a)pyren (BaP) von 2 µg/m^3 überschritten werden kann. Es ist daher zu befürchten, dass bei der Zugabe von teerhaltigem Asphaltgranulat dieser Grenzwert auch im Freien nicht immer eingehalten wird. Da jedoch die PAK-Emissionen nicht linear vom PAK-Gehalt im Bindemittel abhängig sind, sondern durch Temperatur und andere Faktoren beeinflusst werden, ist eine Abschätzung der Belastung von Strassenarbeitern sehr schwierig [8]. In der Übergangsregelung des BAFU wird die Einhaltung des MAK-Wertes für BaP vorgeschrieben, aber in der Regel nicht überprüft.

1.2 Ziele

Das vorliegende Forschungsprojekt hat zum Ziel, die verschiedenen Faktoren zu untersuchen, welche die Emission von teerhaltigen Materialien beeinflussen. In einer ersten Phase werden in Laboruntersuchungen Emissionen von unterschiedlichen teerhaltigen Bindemitteln produziert und analysiert. Dabei werden Teergehalt, Temperatur und Viskosität variiert. In der zweiten Phase werden die Emissionen bei

[1] Liste von 16 PAK des amerikanischen Umweltministeriums (EPA = US Environmental Protection Agency)

drei Feldeinbauten mit Walzasphalt bestimmt. Neben der Belastung der Strassenarbeiter werden auch die freiwerdenden Dämpfe aufgefangen und quantitativ erfasst.

Im Zusammenhang mit der Unterscheidung zwischen teerhaltig und teerfrei wird die Liste der zu untersuchenden PAK durchleuchtet. Die derzeitig verwendete Liste der 16 PAK nach EPA wird schon seit längerer Zeit kritisiert, da sie neben sehr toxischen PAK auch recht harmlose Substanzen wie Naphthalin enthält. Ebenso steht die Verwendung einer einzelnen Leitsubstanz als PAK-Marker zur Diskussion.

Die Resultate sollen als Grundlage dienen für die Festlegung eines definitiven Grenzwertes für den maximalen Teergehalt beim heissen Recycling von teerhaltigem Asphaltgranulat unter dem Gesichtspunkt der Arbeitshygiene und der allgemeinen Anforderungen zur Luftreinhaltung.

1.3 Gesetzliche Grundlagen

Die Verwendung von bitumen- und teerhaltigen Recyclingmaterialien im Strassenbau ist in einer Schweizer Norm geregelt [9]. Allerdings wird darin nur zwischen schwach und stark teerhaltigen Belägen unterschieden. Zudem hat diese Norm keinen gesetzlich bindenden Charakter und ist aus arbeitshygienischer Sicht zu wenig streng. Deshalb verhängte das Bundesamt für Strassenbau (ASTRA) bereits im Jahre 1996 bei Autobahnen ein Verbot für das Heissrecycling an Ort für teerhaltige Beläge [10], welches 2002 in der Baurichtlinie Luft bestätigt wurde [11]. Hingegen wurde das Recycling von Heissmischgut mit teerhaltigem Material das nicht an Ort (in-place) sondern in den Mischanlagen (in-plant) hergestellt wurde, damit nicht eingeschränkt.

Im Juli 1997 hat das BAFU eine Richtlinie herausgegeben, welche zum Ziel hat, als gesamtschweizerische Regelung die unterschiedlichen Praktiken für das Recycling teerhaltiger Strassenbeläge in den Kantonen zu vereinheitlichen [2]. Obwohl es sich hierbei nicht um eine zwingende Verordnung handelt, sind die Kantone angehalten, den Umgang mit teerhaltigen Strassenbelägen entsprechend zu handhaben und in den kantonalen Gesetzen zu regeln. In dieser BUWAL-Richtlinie ist festgelegt, dass für das Recycling von Asphaltgranulat ab 30 m^3 nachzuweisen ist, dass ein PAK-Gehalt von 5'000 ppm im Bindemittel nicht überschritten wird. In der Empfehlung des BAFU vom Mai 2004 wird dieses Kriterium insofern etwas flexibler gehandhabt, als auch Ausbauasphalt mit bis zu maximal 20'000 ppm PAK im Bindemittel wieder verwendet werden darf, wenn sichergestellt wird, dass durch Zumischung von neuem Material der PAK-Gehalt auf <5'000 ppm erniedrigt wird [12]. Zudem müssen die allgemein gültigen Anforderungen der LRV [1] (Luftreinhalte-Verordnung) und der MAK-Wert für Benzo(a)pyren [13] eingehalten werden .

Aufgrund von Tierversuchen wurden zahlreiche PAK als kanzerogen eingestuft. Für solche Stoffe soll die Exposition so niedrig wie möglich gehalten werden (Minimierungsgebot). Weiter sollen kanzerogene Stoffe, wenn möglich, durch unschädliche oder weniger schädliche ersetzt werden [14]. MAK-Werte gelten in der Schweiz für die beiden PAK Benzo(a)pyren (BaP) und Naphthalin von 2 μg/mg, bzw. 50 mg/m^3 als Mittelwert über 8h. Dabei wird der MAK-Wert von BaP als Leitsubstanz für kanzerogene PAK betrachtet. Weiter gilt ein Grenzwert von 10 mg/m^3 für Dämpfe und Aerosole der Heissverarbeitung von Bitumen[13].

In der Substanzklasse der Phenole sind MAK-Werte für Phenol (19 mg/m^3) und für die Summe der Kresolisomere (22 mg/m^3) festgesetzt [13].

Die geltende Luftreinhalte-Verordnung kennt Grenzwerte für BaP (100 μg/m^3), sowie für Naphthalin, Phenol und Kresole (je 20 mg/m^3), falls der entsprechende Massenstrom über 0.5 g/h (BaP), bzw. 0.1

kg/h (Naphthalin, Phenol, Kresole) liegt [1]. Untersuchungen der Emissionen bei der Verarbeitung von teerhaltigem Mischgut an stationären Anlagen haben ergeben, dass die Vorschriften der LRV (Luftreinhalteverordnung) bezüglich der Emissionen von PAK und Phenol/Kresol bei der Zugabe von kaltem, sehr stark teerhaltigem Recyclingmaterial eingehalten werden können [15, 16].

Im Bereich Wasser definiert die Gewässerschutzverordnung nur Grenzwerte für Trinkwasser (0.1 mg/l pro PAK-Einzelstoff), nicht aber für Abwässer, die in ein Gewässer und in die Kanalisation eingeleitet werden. In diesem Fall ist nur ein Summenparameter für Kohlenwasserstoffe (DOC < 10 mg/l) festgelegt [17].

In den EU-Staaten wird teerhaltiges Mischgut als Abfall bezeichnet und ist im europäischen Abfallverzeichnis, das seit 1.1.2002 in Kraft ist, unter der Nummer 17 03 01 kohlenteerhaltige Bitumengemische aufgeführt [18]. Die Grenze zwischen teerhaltig und nicht teerhaltig liegt bei 0.1 % Teer, da Teer als kanzerogener Gefahrenstoff klassifiziert ist. Dies entspricht einem Grenzwert von etwa 200 - 250 ppm EPA-PAK im Recyclinggranulat, respektive 4000 - 5000 ppm bezüglich des darin enthaltenen Bindemittels.

In Deutschland und Österreich gelten weit strengere Vorschriften für den PAK-Gehalt in Recyclingmaterialien, die etwa um einen Faktor 10 tiefer liegen als in der Schweiz. In Österreich sind die Anforderungen an den PAK-Gehalt vom Einsatzort und Einbauart des Asphaltgranulates abhängig [19]. In Grundwasserschutzgebieten ist in ungebundener Form nur die Qualitätsklasse A^+ mit einem Grenzwert von 4 ppm EPA-PAK (≈80 ppm im Bindemittel) zugelassen, was praktisch nur mit reinem Bitumen erreicht werden kann. In weniger sensiblen Gebieten und in gebundener Form ist die Qualitätsklasse B mit einem Grenzwert von 20 ppm EPA-PAK im Mischgut (≈400 ppm im Bindemittel) zugelassen.

In Deutschland wurden die Grenzewerte für teer- und bitumenhaltiges Recyclingmaterial bisher in den verschiedenen Bundesländern unterschiedlich definiert. Es ist aber geplant eine einheitliche Regelung, die auf Vorschlägen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) basiert, in ganz Deutschland einzuführen [20]. Die Grenzwerte für PAK sind von der vorgesehen Verwendung abhängig und werden in drei Einbauklassen definiert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Grenzwerte der technischen Regeln für Strassenausbau der LAGA [20].; Grenzwerte in Klammern gelten für Spezialfälle mit zusätzlichen baulichen Massnahmen oder günstigen hydrogeologischen Bodenverhältnissen

Einbauklasse	Z0	Z1	Z2
Einschränkungen	uneingeschränkter Einbau	eingeschränkter offener Einbau	eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmassnahmen
EPA-PAK [ppm] im Belag	1	5 (15)	75 (100)

In andern Ländern der Welt ist die Verwendung von teerhaltigen Materialien noch heute zugelassen. In Südafrika wird beispielsweise die Verwendung von Teer für das "Schaumbitumenverfahren" empfohlen [21]. Allerdings handelt es sich um Teerprodukte aus der Kohleverflüssigung, die im Vergleich zu Hochofenteeren einen zehnfach geringeren PAK-Gehalt aufweisen. Sogar in den USA werden heute

noch teerhaltige Bindemittel für die Oberflächenbehandlungen von Parkflächen [22] eingesetzt, was jedoch zunehmend kritisiert und eingeschränkt wird [23].

1.4 Untersuchte Stoffklassen

1.4.1 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Der aktuelle Richtwert des BAFU für die Rezyklierung basiert auf der Summe der 16 sogenannten EPA-PAK [2]. Allerdings ist ein Teil der von der SUVA (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt) zur Beurteilung der Arbeitsplatzbelastung empfohlenen PAK in den 16-EPA-PAK nicht enthalten. Zugleich sind in Deutschland Bestrebungen im Gang, die Zielliste der zu bestimmenden PAK den neueren Erkenntnissen zur Umweltrelevanz anzupassen. Die Arbeitsgruppe „Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)“ innerhalb der Senatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) empfiehlt eine modifizierte PAK-Liste zur routinemässigen Erfassung in Umweltproben [24]. Diese Liste enthält mit Ausnahme von Dibenzo[a,i]pyren auch alle von der SUVA zur Bestimmung empfohlenen karzinogenen PAK [13]. Um die Auswirkungen eines möglicherweise neu definierten PAK-Summenparameters abschätzen zu können, wurden deshalb die von der Arbeitsgruppe zusätzlich zu den EPA-PAK für ein Monitoring vorgeschlagenen PAK mit in die Zielliste aufgenommen. In den Ergebnistabellen sind die PAKs der DFG-Liste jeweils als "Summe DFG-PAK" zusammengefasst.

In Tabelle 2 sind die in die vorliegende Untersuchung mit einbezogenen PAK zusammengestellt. Die beiden 6-Ring-PAK Dibenzo[a,i]pyren und Dibenzo[a,h]pyren erwiesen sich als analytisch schwierig zugänglich und es musste eine neue, aufwendige Analysenmethode erarbeitet werden. Auf eine routinemässige Analyse wurde in der Folge verzichtet.

1.4.2 Phenole

Strassenteer enthält beträchtliche Mengen (bis zu 5%) an Phenolen. Der phenolische Anteil setzt sich vorwiegend aus Phenol, Methylphenolen (Kresole) und Dimethylphenolen (Xylenole) zusammen. Aufgrund der tiefen MAK-Werte und der Flüchtigkeit wurde die Emission von Phenol und Kresolen untersucht. Die Isomere ortho-, meta- und para-Kresol weisen den gleichen MAK-Wert auf [13]. In der Altlastenverordnung wird dagegen dem para-Kresol im Eluattest ein zehnfach geringerer Grenzwert zugeordnet als dem ortho- und meta-Kresol. Es wurde deshalb eine Analysenmethode entwickelt, die nebst Phenol eine Einzelbestimmung der drei Kresol-Isomeren ermöglichte.

1.4.3 Bitumendämpfe ("Asphalt Fume")

Für eine grobe Bestimmung von Bitumenemissionen wird oft der "Bitumendampf" (eng. Asphalt Fume), als Summe von Feststoffemission und Dampfkondensat bestimmt. Zur Bestimmung werden die Bitumendämpfe auf einem Filter gesammelt und die Gesamtpartikelmasse (total particulate matter TPM) gravimetrisch bestimmt. Durch Extraktion des Filters mit Benzol wird zusätzlich der benzollösliche Anteil (benzene soluble matter BSM) ermittelt. In amerikanischen und australischen Untersuchungen zur Arbeitsplatzbelastung bei Strassenbelagsarbeiten wurde die Gesamtpartikelmasse TPM als gewichtiges Beurteilungskriterium herangezogen [25]. Auch in der Schweiz ist für Bitumendämpfe eine maximale Arbeitskonzentration von 10 mg/m^3 (MAK-Wert) einzuhalten [13]. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Untersuchung der Bitumen-Teer-Dampf bei allen Versuchen mitbestimmt. Durch den gemeinsamen Bezugsparameter wird ein Vergleich der Ergebnisse mit bestehenden Untersuchungen im

Ausland ermöglicht. Auch können die Messergebnisse dadurch untereinander korreliert und ein eventueller Zusammenhang zwischen Schadstoffemission und Gesamtemission festgestellt werden.

Benzol als Filter-Extraktionsmittel wurde in dieser Untersuchung durch das weniger toxische Toluol ersetzt. Im vorliegenden Bericht wird deshalb von den toluollöslichen Anteilen (toluene soluble matter TSM) gesprochen. Die TSM-Werte können nicht direkt mit den BSM-Werten verglichen werden.

Tabelle 2: Zusammensetzung der PAK-Ziellisten (DFG: Deutsche Forschungsgemeinschaft)

PAK-Zielliste für diese Untersuchung	**Abkürzung**	**16-EPA-PAK**	**SUVA-PAK** [13]	**DFG-PAK** [24]
2-Ring-PAK				
Naphthalin	NAPH	x	x	x
3-Ring-PAK				
Acenaphthylen	ACN	x		
Acenaphthen	ACY	x		
Fluoren	FLN	x		
Phenanthren	PHEN	x		x
Anthracen	ANTC	x		
4-Ring-PAK				
Fluoranthen	FLT	x		
Pyren	PYR	x		x
Benz(a)anthracen	BaA	x	x	x
Chrysen	CHR	x	x	x
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophen	BNT21d			x
5-Ring-PAK				
Cyclopenta(cd)pyren	CPcdP			x
Benzo(a)pyren	BaP	x	x	x
Benzo(e)pyren	BeP			
Benzo(b)fluoranthen	BbFLT	x	x	x
Benzo(j)fluoranthen	BjFLT		x	x
Benzo(k)fluoranthen	BkFLT	x	x	x
Dibenz(a,h)anthracen	DBahA	x	x	x
6-Ring-PAK				
Anthanthren	ANT			x
Benzo(ghi)perylen	BghiP	x		
Indeno(1,2,3-cd)pyren	IndP	x	x	x
Dibenzo(ae)pyren	DBaeP		x	x
Dibenzo(ah)pyren	DBahP			x
Dibenzo(ai)pyren	DBaiP		x	
Dibenzo(al)pyren	DBalP		x	x

2 Laborversuche

2.1 Wahl und Validierung des Fume-Generators

Um den Einfluss verschiedener Faktoren auf das Emissionsverhalten teerhaltiger Strassenbeläge zu untersuchen, musste im Labor eine Reihe von möglichst aussagekräftigen Versuchen durchgeführt werden. Dafür sollte wenn möglich auf ein bereits publiziertes und validiertes Verfahren zurückgegriffen werden. Dies reduziert den Aufwand und vereinfacht den Vergleich mit früheren Untersuchungen. In der Literatur sind hauptsächlich zwei sogenannte Fume-Generatoren für die Herstellung von Emissionen aus bitumenhaltigen Bindemitteln im Labormassstab bekannt.

2.1.1 Fume Generator 1

Brandt hat in den 90iger Jahren verschiedene Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Bitumen durchgeführt [26]. Er entwickelte dazu einen einfachen Fume-Generator bestehend aus einem heizbaren, offenen Reaktorgefäss aus Glas, das mit einem mechanischen Rührgerät versehen war (Abbildung 1). Dieses Reaktorgefäss wurde mit 200 g Bitumen gefüllt und mit einer Heizkalotte kontrolliert erwärmt. Die dabei entstandenen Dämpfe wurden über zwei Filter mit nachgeschaltetem Absorptionsröhrchen abgesaugt.

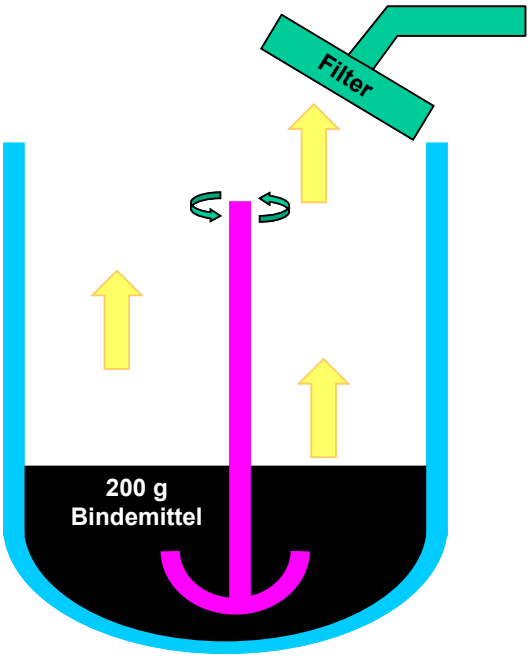


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Fume Generator 1

2.1.2 Fume-Generator 2

In den USA hat Kriech et. al. für toxikologische Studien einen Fume-Generator entwickelt, der in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist [27]. Im Vordergrund bei dieser Entwicklung stand die Forderung, möglichst Dämpfe mit gleicher Zusammensetzung zu erzeugen, wie sie bei einem Einbau der Strasse entstehen, da diese für toxikologische Studien benötigt wurden. Im Fume-Generator 2 fliesst das

Bindemittel kontinuierlich als dünner Film über eine schiefe Ebene in einen Auffangbehälter. Die ganze Versuchsanordnung ist in einem transparenten Gehäuse eingeschlossen, so dass alle Dämpfe kontrolliert abgezogen und entweder auf Adsorptionsröhrchens aufgefangen oder für Tierversuche weitergeleitet werden können. Die Bedingungen können über längere Zeit konstant gehalten werden. Dazu werden aber relativ grosse Bindemittelmengen (ca. 10 kg / h) benötigt.

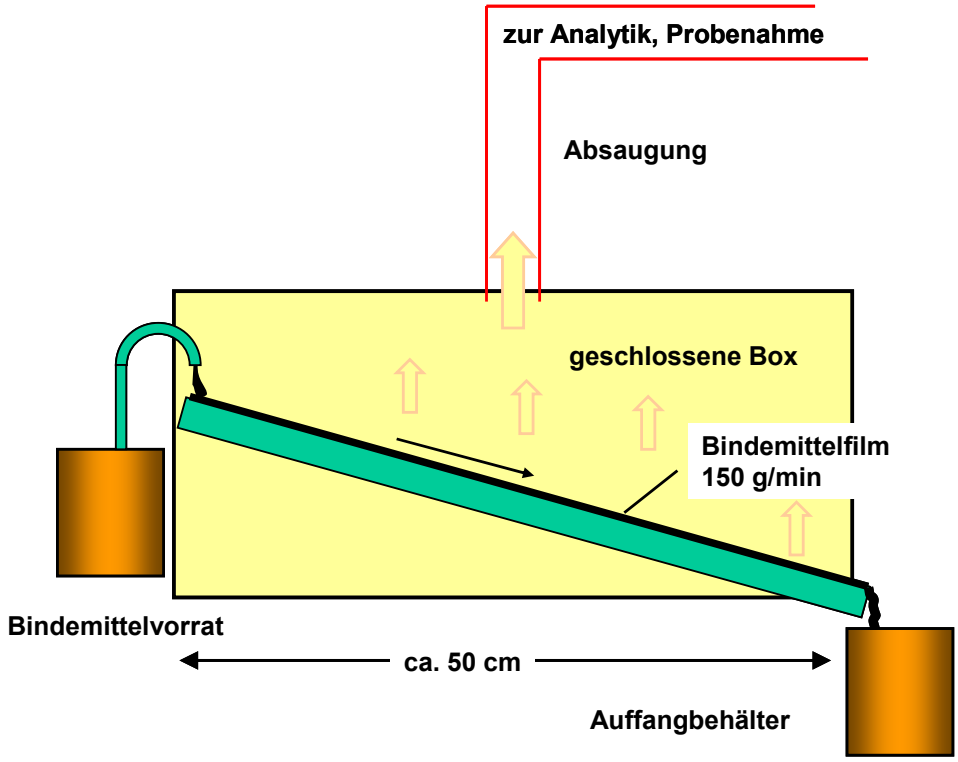


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Fume-Generator 2

2.1.3 Wahl des Fume-Generators

Beide beschriebenen Fume-Generatoren sind offene Systeme, welche den Einbau eines Strassenbelags grundsätzlich simulieren können. Der Fume-Generator 2 wurde in Feldmessungen relativ gründlich bezüglich der Zusammensetzung der Dämpfe validiert und simuliert die Situation im realen Einbau recht gut [28].

Auch für den Fume-Generator 1 von Brandt sind einige Vergleichsmessungen publiziert [29]. Weiter erlaubt dieses System auf Grund seines einfachen Konzepts und der geringeren Bindemittelmenge eine grössere Anzahl von Versuchen mit unterschiedlichen Parametern. Es ist genügend klar dokumentiert, um den Nachbau und die anschliessende Validierung zu ermöglichen.

Der Fume-Generator 2 musste ausgeschlossen werden, da die dafür benötigten Mengen an teerhaltigen Bindemitteln nicht vorhanden waren. Es sind nur noch einige kg Teer aus Rückstellmustern übrig, da Teer in der Schweiz schon seit mehreren Jahren nicht mehr hergestellt wird. Aus diesem Grund wurde der Fume Generator 1 für die Generierung von Bitumendämpfen in diesem Projekt gewählt.

2.2 Chemische Analysemethoden

2.2.1 Gesamtpartikelmasse (TPM) und Toluollösliche Anteile (TSM)

2.2.1.1 Bestimmung von TPM und TSM

Die Bitumendämpfe wurden auf ein teflonisiertes Glasfaserfilter (Pallflex Membranfilter, TX40HI20-WW, Durchmesser 37 mm, Flussrate 2 l/min) gesammelt. Die Gesamtpartikelmasse TPM wurde gravimetrisch bestimmt. Vor den Wägungen wurden die Filter während 24 h in kontrolliertem Klima (20 °C, 50 % rel. Feuchte) konditioniert.

Zur Bestimmung der toluollöslichen Anteile TSM wurden die Filter im Ultraschallbad mit Toluol extrahiert (2 x 2 ml, 0.9 ml Waschlösung). Die Extrakte und die Waschlösung wurden durch eine Filterspritze portionenweise in ein tariertes 6 ml-Vial filtriert (Filter RC 0.45 µm, Schleicher & Schuell) und die vereinigten Lösungen durch Wägen auf ein Volumen von exakt 5 ml gebracht. Bei einem Aliquot der Lösung (in der Regel 3 ml) wurde das Toluol im Stickstoffstrom bei 60°C abgeblasen, der Rückstand im Trockenrohr bei 40°C während einer Stunde unter leichtem Vakuum (250-300 mbar) getrocknet und der Abdampfrückstand ausgewogen.

2.2.1.2 Filterevaluation

Nebst dem oben beschriebenen Filter wurde ein ebenfalls beschichtetes Glasfaserfilter eines anderen Herstellers auf mit Toluol extrahierbare Anteile untersucht. Bei der Toluolextraktion im Ultraschallbad bildete sich bei diesem Filtertyp eine weisse, schwach schäumende Emulsion. Der Abdampfrückstand wies ein paraffinähnliches Aussehen auf und betrug ca. 0.5 mg pro Filter.

Der Pallflex-Filter erwies sich als geeigneter für die vorliegende Problematik. Der Untergrundwert an extrahierbaren Anteilen lag bei 0.10 mg pro Filter (Mittelwert aus 6 Bestimmungen). Da er jeweils auch bei zwei nachfolgenden Extraktionen konstant hoch blieb wurde auf eine Reinigung der Filter durch Vorextraktion verzichtet. Bedingt durch die grosse Streuung der Untergrundwerte (rel. Standardabweichung ±96% bei 6 Bestimmungen) wurden die TSM-Werte im Bericht nicht korrigiert.

2.2.2 PAK-Bestimmung

2.2.2.1 Probenahme

Die Dampfdrücke von Naphthalin als leichtflüchtigster Komponente der EPA-PAK-Zielliste und der 5- und 6-Ring-PAK unterscheiden sich um einen Faktor 10^9. Die PAK liegen entweder vorwiegend gasförmig (2- bis 3-Ring PAK) oder hauptsächlich partikelgebunden (4- bis 6-Ring-PAK) vor. Dies bedingt, dass zwei verschiedene Probenahmesysteme verwendet werden müssen: Ein adsorptives System für die leichtflüchtigen PAK und ein Filter für die partikelgebundenen PAK. Die PAK-Probenahme erfolgte gemeinsam mit der TPM-Bestimmung vom gleichen Filter wie oben beschrieben. Zur Abscheidung der leichtflüchtigen PAK wurden dem Filter zwei Adsorptionsröhrchen in Serie nachgeschaltet (ORBO-43, XAD-2, Supelco). In Vorversuchen wurde bei hohen Naphthalin-Gehalten ein Durchschlag festgestellt. In Fällen, wo eine hohe Naphthalin-Konzentration zu erwarten war, wurde deshalb eine separate Probenahme für Naphthalin mit zwei in Serie geschalteten ORBO-43-Röhrchen und reduzierter Flussrate (50 ml/min) durchgeführt.

2.2.2.2 Probenaufarbeitung

Bei der Probenaufarbeitung wurde zur Vermeidung von Verlusten an leichtflüchtigen PAK auf Extraktionen bei erhöhten Temperaturen und auf Aufkonzentrierungsschritte durch Abdampfen von Lösemittel verzichtet. Filter und Adsorptionsröhrchen wurden einzeln aufgearbeitet. Die Extraktion des Filters erfolgte wie bei der TSM-Bestimmung angegeben. Das Adsorptionsmaterial der ORBO-Röhrchen wurde zweimal mit je 2 ml Toluol überdeckt und während 30 Minuten unter leichtem Schütteln extrahiert. Nach dem Nachwaschen mit wenig Toluol wurde die Extraktionslösung und der Filterextrakt auf exakt 5 ml verdünnt. Je 1.5 ml der Extraktionslösungen von Filter und Adsorptionsröhrchen wurden vereinigt und zur PAK-Analyse mittels GC-MS und HPLC eingesetzt.

2.2.2.3 PAK-Bestimmung mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS)

GC-MS wurde zur Bestimmung der leichtflüchtigen PAK (Naphthalin und 3-Ring-PAK) und der mit HPLC schlecht detektierbaren Verbindungen Cyclopenta(cd)pyren und Benzo(b)naphtho(2,1d)thiophen eingesetzt. Bei der Methodenentwicklung hatte sich gezeigt, dass die Analysenergebnisse der schwerflüchtigen 5- und 6-Ring-PAK teilweise grosse Streuungen aufwiesen. Die Bestimmung dieser PAK erfolgte deshalb mittels HPLC.

Die Extraktionslösungen wurden vor der Chromatographie durch Festphasenextraktion (solid phase extraction SPE) an einer Kieselgelkartusche (Bakerbond silicagel, 3 ml) gereinigt. Jeweils 100 µl der Extraktionslösung wurden auf die Kartusche aufgebracht, die PAK mit 4.5 ml Toluol eluiert und das Eluat auf exakt 5 ml aufgefüllt. Vom Eluat wurden 100 µl mit einer Lösung von isotopenmarkierten PAK in Toluol als internem Bestimmungsstandard (Cambridge Isotope Laboratories, perdeuterierte16-EPA-PAK) versetzt und mittels GC-MS im MID-Modus (multi-ion detection) analysiert.

2.2.2.4 PAK-Bestimmung mittels Flüssigkeitschromatographie (HPLC)

Die wenig flüchtigen 4- bis 6-Ring PAK wurden mittels Reverse Phase-HPLC mit Fluoreszenz- und UV-Detektion bestimmt. Dazu wurden 2 ml der Analysenlösung am Rotavap bis fast zur Trockne eingeengt und mit Acetonitril auf ein exaktes Volumen eingestellt. Die Volumina lagen je nach zu erwartender PAK-Konzentration zwischen 0.25 bis 1.0 ml. Die Auswertung erfolgte über externe Kalibration.
Chromatographische Parameter
Trennsäule: Bakerbond Wide Pore C_{18}, 5 µm, 250 x 4 mm
Mobile Phase A: 7 Vol-% Acetonitril in Methanol, Mobile Phase B: Wasser
Gradient von 70% A auf 100% A in 50 Minuten, Flussrate 1 ml/min
Fluoreszenz-Detektion: Anregung bei 280 nm, Emission > 390 nm (Kantenfilter)
UV-Detektion: 270 nm

2.2.2.5 Validierung PAK-Analyse

Die Analysenmethode wurde mit einem zertifizierten PAK-Referenzmaterial des NIST (U.S. National Institute of Standards and Technology) überprüft. Beim eingesetzten Referenzmaterial SRM 1597 handelt es sich um einen in Toluol gelösten Kohlenteer-Extrakt, der somit exakt den Extraktionslösungen der vorliegenden Untersuchung entsprach. Die zertifizierten und die gefundenen PAK-Konzentrationen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Zertifizierte und gefundene PAK-Konzentrationen im NIST-Referenzmaterial SRM 1597

PAK	zertifizierte Konzentration [µg/ml]	gefundene Konzentration[1)] [µg/ml]	gefundene Konzentration [%]	Analysen-methode[2)]
2-Ring-PAK				
Naphthalin	1000 ± 50	1012	101	GC-MS
3-Ring-PAK				
Anthracen	87.4± 2.4	106	121	GC-MS
Phenanthren	400 ± 4	382 396	96 99	GC-MS HPLC-FL
4-Ring-PAK				
Benz[a]anthracen	85.3 ± 3.4	84.6	99	HPLC-FL
Chrysen	62 ± 1.1	46.8 47.4	76 80	HPLC-FL HPLC-UV
Fluoranthen	278 ± 4	285	103	HPLC-FL
5-Ring-PAK				
Benzo[a]pyren	82.9 ± 5.3	77.0	93	HPLC-FL
6-Ring-PAK				
Benzo[ghi]perylen	46.5 ± 6.7	47.0	101	HPLC-FL
Indeno[1,2,3-cd]pyren	52.1 ± 4	39.8 32.9	77 62	HPLC-FL HPLC-UV

- 1) Mittelwert aus zwei Aufarbeitungen
- 2) GC-MS: Gaschromatographie-Massenspektrometrie
  HPLC-FL: Flüssigchromatographie-Fluoreszenzdetektion
  HPLC-UV: Flüssigchromatographie-UV-Detektion

2.2.2.6 Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der HPLC-Analyse

Die Bestimmung der Nachweisgrenzen der HPLC-Analyse erfolgte durch Verdünnen von Standardlösungen. Es wurden jeweils 10 µl der PAK-Lösungen injiziert. Als Nachweisgrenze wurde ein 3:1-Verhältnis des Peaksignals zum Untergrundrauschen des Detektors definiert. Die Extraktionslösungen wurden für die HPLC- Analyse 2- bis 8fach aufkonzentriert. Für die in Tabelle 4 aufgeführten Nachweisgrenzen für die Filteranalysen wurde eine mittlere 5fache Aufkonzentrierung angenommen.

Bei den GC-MS-Bestimmungen war wegen der Abdampfverluste an leichtflüchtigen PAK keine Aufkonzentrierung der Analysenlösungen möglich. Dies wirkte sich für die Analytik nicht nachteilig aus, da die Lösungen in der Regel für die Analyse verdünnt werden mussten. In Tabelle 4 sind die Nachweisgrenzen der Filteranalyse für unverdünnte Lösungen angegeben. Der chromatographischen Nachweisgrenze wurde ein MS-Signal von 1'000 Counts zu Grunde gelegt.

Die Bestimmungsgrenzen wurden als fünffacher Betrag der Nachweiskonzentration festgelegt.

Tabelle 4: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der HPLC-Methode

PAK	Chromatographische Nachweisgrenze[1)] [ng/ml]	Nachweisgrenze Filteranalyse[2)] [ng/Filter]	Bestimmungsgrenze Filteranalyse[3)] [ng/Filter]	Analysenmethode[4)]
2-Ring-PAK				
Naphthalin	5	50	250	GC-MS
3-Ring-PAK				
Acenaphthylen	2	20	100	GC-MS
Acenaphthen	5	50	250	GC-MS
Anthracen	3	20	100	GC-MS
Fluoren	2	20	100	GC-MS
Phenanthren	3	30	150	GC-MS
4-Ring-PAK				
Fluoranthen	3 (200)	6	30	HPLC-FL
Pyren	37 (75)	74	370	HPLC-FL
Benz[a]anthracen	1 (73)	2	10	HPLC-FL
Chrysen	33	66	330	HPLC-FL
Benzo[b]naphtho[2,1-d]-thiophen	0.5	5	25	GC-MS
5-Ring-PAK				
Cyclopenta[cd]pyren	5	50	250	GC-MS
Benzo[a]pyren	2	4	20	HPLC-FL
Benzo[e]pyren	14	28	140	HPLC-FL
Benzo[b]fluoranthen	3	6	30	HPLC-FL
Benzo[j]fluoranthen	66	132	660	HPLC-FL
Benzo[k]fluoranthen	3	6	30	HPLC-FL
Dibenz[a,h]anthracen	4	8	40	HPLC-FL
6-Ring-PAK				
Anthanthren	6	12	60	HPLC-FL
Benzo[ghi]perylen	12	24	120	HPLC-FL
Indeno[1,2,3-cd]pyren	11	22	110	HPLC-FL
Dibenzo[ae]pyren	9	18	90	HPLC-FL
Dibenzo[al]pyren	3	6	30	HPLC-FL

- 1) HPLC: Verhältnis Signal/Untergrundrauschen 3:1, Einspritzmenge 10 µl (in Klammer UV-Signal). GC-MS: 10^3 counts, Einspritzmenge 1 µl
- 2) HPLC: 5fache Aufkonzentrierung der Extraktionslösung, Einspritzmenge 10 µl
  GC-MS: unverdünnte Extraktionslösung, Einspritzmenge 1 µl
- 3) 5facher Betrag der Nachweisgrenze
- 4) GC-MS: Gaschromatographie-Massenspektrometrie
  HPLC-FL: Flüssigchromatographie-Fluoreszenzdetektion
  HPLC-UV: Flüssigchromatographie-UV-Detektion

2.2.3 Phenol- und Kresol-Bestimmung

2.2.3.1 Probenahme

Die Probenahme basierte auf der NIOSH-Methode 2546 [30]. Die phenolischen Verbindungen wurden auf Adsorptionsröhrchen (ORBO-47, XAD-7, Supelco) mit einer Durchflussrate von 100 ml/min bei den Laborversuchen und 50-60 ml/min bei den Feldversuchen gesammelt. Die Probenahmemengen lagen

zwischen 9-13 Litern bei den Laborversuchen und 4-9 Litern bei den Feldversuchen. Die beladenen Adsorptionsröhrchen wurden bis zur Analyse bei -20°C aufbewahrt.

2.2.3.2 Probenaufarbeitung

Die Probenahmeröhrchen wurden in ein 5 ml-Vial entleert und die phenolischen Verbindungen während 10 Minuten im Ultraschallbad mit 2 ml Methanol desorbiert. Die methanolische Lösung wurde in einen 10-ml-Spitzkolben transferiert und das Sorptionsmaterial mit 3 x 1 ml Methanol nachgewaschen. Nach Zugabe von 10 µl einer Lösung von 2-Isopropylphenol in Methanol als internem Standard für die gaschromatographische Analyse (c= 0.3 mg/ml) und 400 µl Natronlauge (c= 1 mol/l) wurde das Methanol am Rotationsverdampfer abgedampft. Die verbliebene wässrige Phase im Spitzkolben wurde durch kräftiges Schütteln mit Cyclohexan (1 ml) extrahiert und die organische Phase nach der Phasentrennung mit einer Pasteurpipette sorgfältig abgehoben und verworfen. Der Spitzkolben wurde in ein Eisbad gestellt und die wässrige Phase durch Zugabe von 240 µl Salzsäure (c= 2 mol/l) sauer gestellt. Die Phenole wurden unter kräftigem Schütteln mit Methyl-t-butylether (MTBE, 1 ml) extrahiert und die MTBE-Lösung zur gaschromatographischen Analyse eingesetzt.

2.2.3.3 Bestimmung mittels Gaschromatographie-Flammenionisationsdetektion (GC-FID)

Die Quantifizierung erfolgte nach der Methode des internen Standards. Es wurde darauf geachtet, dass die Konzentrationen der einzelnen Phenole in der Analysenlösung 20 µg/ml nicht überstiegen. Bei der Methodenentwicklung hatte sich gezeigt, dass höhere Konzentrationen eine Verschlechterung der chromatographischen Auftrennung und eine grössere Streuung der Ergebnisse zur Folge hatten.

Chromatographische Parameter

Trennsäule: CP-Wax 52-CB (Chrompack), 25 m x 0.25 mm, Filmdicke 1.2 µm

Trägergas: Wasserstoff 100 kPa

Injektion: gesplittet, Injektortemperatur 250°C

Detektion: FID, Detektortemperatur 270°C

Temperaturprogramm Säulenofen: 50 – 170 °C mit 25°C/min Aufheizrate, 170 – 185°C mit 1.5°C/min

2.2.3.4 Bestimmung mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS)

Bei den Proben aus dem Feldversuch Thalheim wurde die Bestimmung von xy-Kresol durch eine nicht identifizierte Begleitkomponente gestört. Die betroffenen Proben wurden mittels selektiver massenspektrometrischer Detektion analysiert.

2.2.3.5 Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der Analysenmethoden

Die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die Bestimmungsgrenzen bei einem Probenahmevolumen von 5 Liter Luft liegen für die einzelnen Verbindungen rund 100fach unter den MAK-Werten der SUVA.

Tabelle 5: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der Phenole (GC-FID)

	chromatographische Nachweisgrenze[1)] [µg/ml]	Nachweisgrenze Luft[2)] [µg/m^3]	Bestimmungsgrenze Luft [µg/m^3]
Phenol + Kresole	0.20	40	200

- [1)] Verhältnis Signal/Untergrundrauschen 3:1, Einspritzmenge 1 µl
  [2)] bei einem Sammelvolumen von 5 l
  [3)] 5facher Betrag der Nachweisgrenze

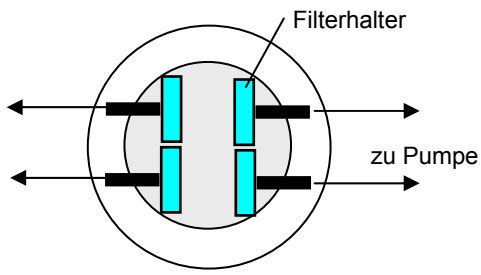
2.3 Vorversuche

2.3.1 Probenahme

Verschiedene Vorversuche waren notwendig, um die Wiederholbarkeit der Versuche, die gleichmässige Rauchbildung, sowie den zeitlichen Ablauf eines Emissionsversuches zu bestimmen. Ein weiterer wichtiger Punkt war die Wahl der Materialien für die Probenahme wie Pumpen, Adsorptionsröhrchen, Filter und Filterhalter.

In ersten Vorversuchen wurde die Temperatursteuerung so optimiert, dass die gewünschte Versuchstemperatur möglichst schnell erreicht wurde und anschliessend konstant blieb. Bei einer Versuchstemperatur von 160°C wurde diese nach 22 Minuten erreicht, wobei ein Überschwingen von weniger als 3°C eingehalten werden konnte. Nach rund 30 min war die Temperatur innerhalb von ±0.4°C konstant.

In einem weiteren Schritt wurde die Homogenität der Emissionen überprüft. Vier Filterhalter wurden symmetrisch über dem Reaktionsgefäss angeordnet und die Bitumendämpfe auf Partikelfiltern gesammelt (Abbildung 3). Die Auswertung dazu erfolgte gravimetrisch ohne weitere Analyse der Filter.



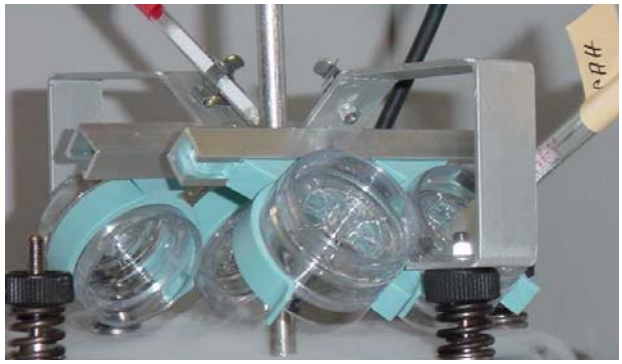


Abbildung 3: Schematische und photografische Darstellung der Filteranordnung

Bei diesen Versuchen zeigte sich, dass auf den hintern beiden Filtern mehr Material abgelagert wurde als vorne. Als Grund wurde die Kapellenlüftung vermutet, die die Luft nach hinten abzieht. Als Gegenmassnahme wurde diese abgestellt und ein spezieller Abzug direkt über dem Reaktionsgefäss installiert. Diese Verbesserungen waren aber immer noch nicht zufrieden stellend, weshalb zusätzlich eine Trennwand zu den Messgeräten , die teilweise beträchtliche Wärme und entsprechende Luftturbulenzen erzeugten, erstellt und ein Kragen aus Karton um das Reaktionsgefäss gezogen wurde (Abbildung 4). Durch diese konstruktiven Veränderungen konnte schliesslich eine gleichmässige Materialablagerung auf den 4 Filtern erreicht werden. Die relative Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert lag danach unterhalb von 20%.

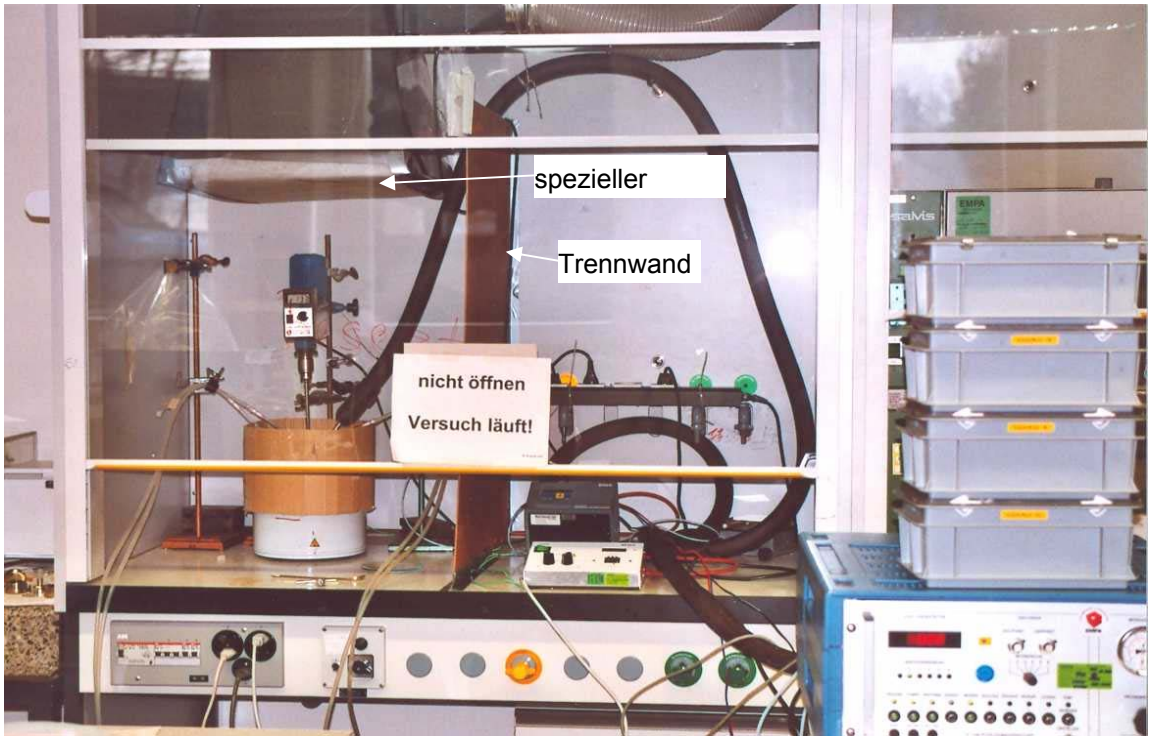


Abbildung 4: Versuchsanordnung nach den konstruktiven Anpassungen

2.3.2 Bestimmung der optimalen Versuchsdauer

Die optimale Versuchsdauer ist so zu wählen, dass von Anfang bis Ende des Versuches die Bedingungen möglichst gleich bleiben. Andererseits muss die Versuchsdauer lange genug sein, um genügend Material für die chemische Analyse sammeln zu können. Zur Bestimmung der optimalen Versuchsdauer wurde mit einem typischen teerhaltigen Bindemittel ein Versuch bei 180°C durchgeführt. Über eine Zeit von drei Stunden wurden im Abstand von einer Stunde drei Mal die Filter mit den Adsorptionsröhrchen gewechselt und analysiert.

Tabelle 6: Resultate der Versuche V24 - V26

	Emissionen pro Probe in µg			
Ringgrösse	Versuch V24	Versuch V25	Versuch V26	**Summe**
2-Ring-PAK	493	154	28.8	**676**
3-Ring-PAK	1260	1700	1223	**4190**
4-Ring-PAK	615	869	813	**2300**
5-Ring-PAK	24	35.8	39.1	**98.9**
6-Ring-PAK	2.2	3.9	4.0	**10.1**
Phenole	21.4	3.3	0.0	**24.7**
Summe PAK	2420	2770	2110	**7290**

Die Messung wurde gestartet bevor mit dem Heizen der Probe begonnen wurde, damit alle entstehenden Emissionen aufgefangen werden konnten. Der Temperaturverlauf in diesem Versuch ist noch nicht optimal, da die Zeit bis zur Erreichung der Solltemperatur zu lange ist (Abbildung 5).

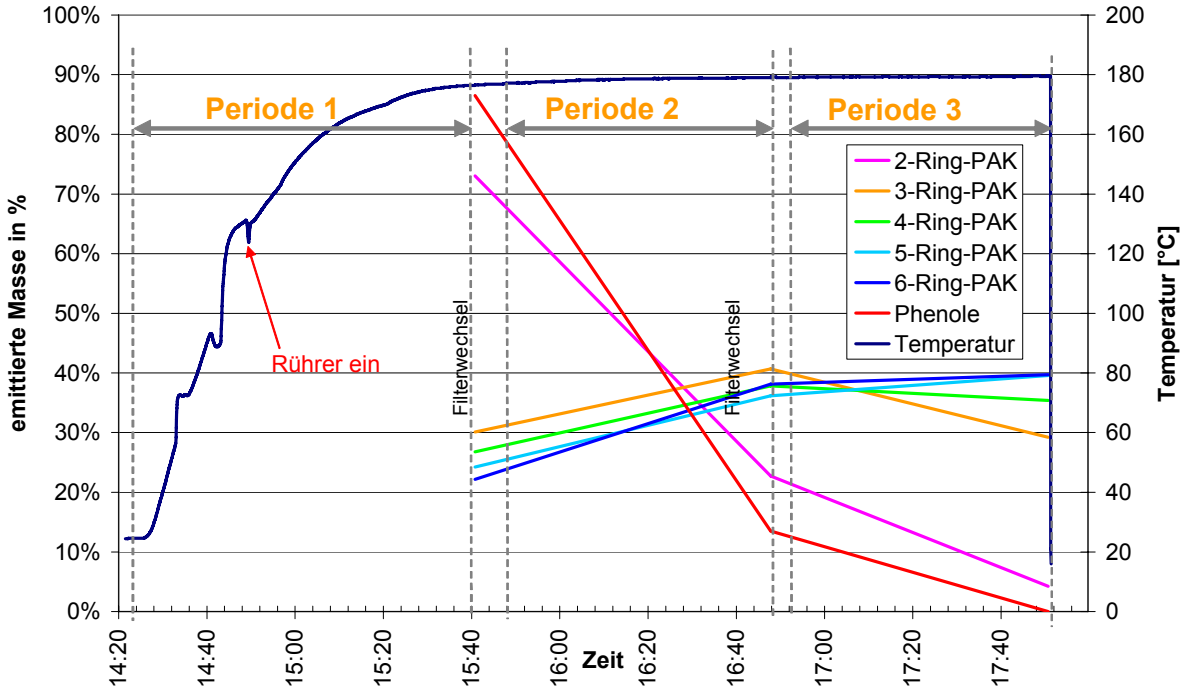


Abbildung 5: Emissionen als Funktion der Zeit und Temperatur

Dieser Vorversuch (Abbildung 5) zeigte deutlich, dass die Konzentration der 2 Ring- PAK (Naphthalin) und der Phenole sehr schnell abnimmt. Dies bedeutet für die Versuchsdurchführung, dass mit der Probenahme nicht gewartet werden kann, bis die Solltemperatur erreicht wird. Die Resultate nach der zweiten Periode für die anderen PAK-Verbindungen liegen durchwegs leicht höher als nach der ersten

Periode. Dies dürfte an der Aufwärmzeit liegen, die in die erste Periode fällt und niedrigere Temperaturen beinhaltet und somit am Anfang tiefere Emissionen ergibt.

Die 3-Ring-PAK zeigten ebenfalls eine leichte Abnahme der Konzentration in der 3. Periode, aber weit weniger stark als bei Naphthalin oder den Phenolen. Die 4-6-Ring-PAK zeigten für die zweite und dritte Periode praktisch identische Werte.

Die Auswertung der FID-Signale (Abbildung 6) zeigt, dass die Emissionen sprunghaft ansteigen, sobald das Rührwerk eingeschaltet wird. Es wurde deshalb entschieden, die Messung jeweils gleichzeitig mit dem Einschalten des Rührwerkes zu starten. Für die Hauptversuche wurde die Probenahme bei einer Bindemitteltemperatur von 130°C gestartet.

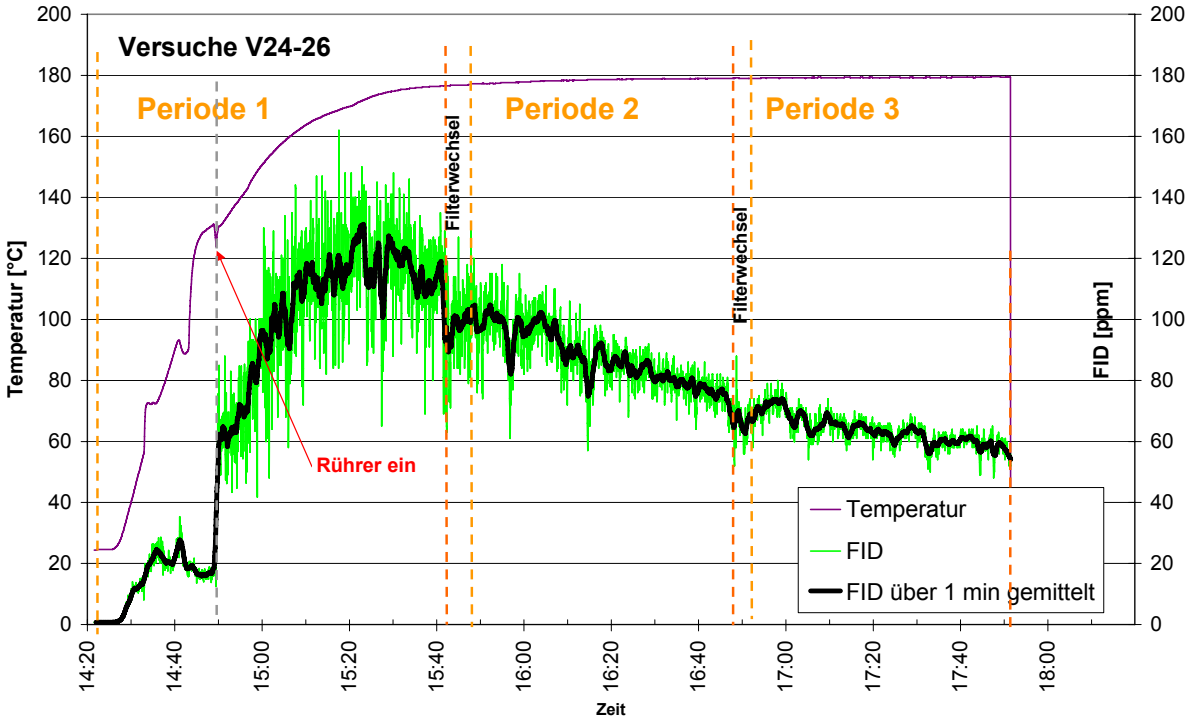


Abbildung 6: FID-Signal und Temperatur während dem Vorversuch

2.3.3 Wiederholbarkeit der Emissionsversuche im Labor

Nach der Optimierung der Lüftung und der Filterposition wurde mit drei identischen Versuchen die Wiederholbarkeit bestimmt (Tabelle 7). Ein Bindemittel TB2000 wurde während 2 Stunden bei einer Temperatur von 160°C beprobt. Die Solltemperatur wurde etwa 30 Minuten nach Heizbeginn erreicht, wobei die Messung etwa nach 15 Minuten gestartet wurde, so dass nur etwa während 10 min ausserhalb der Solltemperatur gemessen wurde (*Abbildung 7*).

Die Temperaturverläufe der drei Vergleichsversuche sind abgesehen von kurzen Abweichungen in der Aufwärmphase sehr gut reproduzierbar (*Abbildung 7*). Diese Abweichungen rühren daher, dass das Bindemittel am Anfang noch nicht überall geschmolzen und die Temperaturmessung dementsprechend ungenau ist. Erst ab einer Temperatur von etwa 120°C ist sämtliches Bindemittel geschmolzen und der Temperaturverlauf der drei Vergleichsversuche stimmt danach gut miteinander überein.

Tabelle 7: Resultate der Wiederholversuche

		V29	V30	V31	alle Versuche		
Emissionen in µg / m^3		Mittelwerte	Mittelwerte	Mittelwerte	Mittelwert	Stdw	rel. Stdw
PAK	Summe	15'787	16'034	19'560	17'127	2'111	12%
EPA-PAK	Summe	15'662	15'909	19'414	16'995	2'098	12%
2-Ring-PAK	Summe	1'834	2'059	2'297	2'063	231	11%
3-Ring-PAK	Summe	10'672	10'569	12'685	11'309	1'193	11%
4-Ring-PAK	Summe	3'131	3'250	4'387	3'589	693	19%
5-Ring-PAK	Summe	129	133	160	141	17	12%
6-Ring-PAK	Summe	20	23	31	25	6	23%
Phenole	Summe	3'407	3'135	4'291	3'611	605	17%

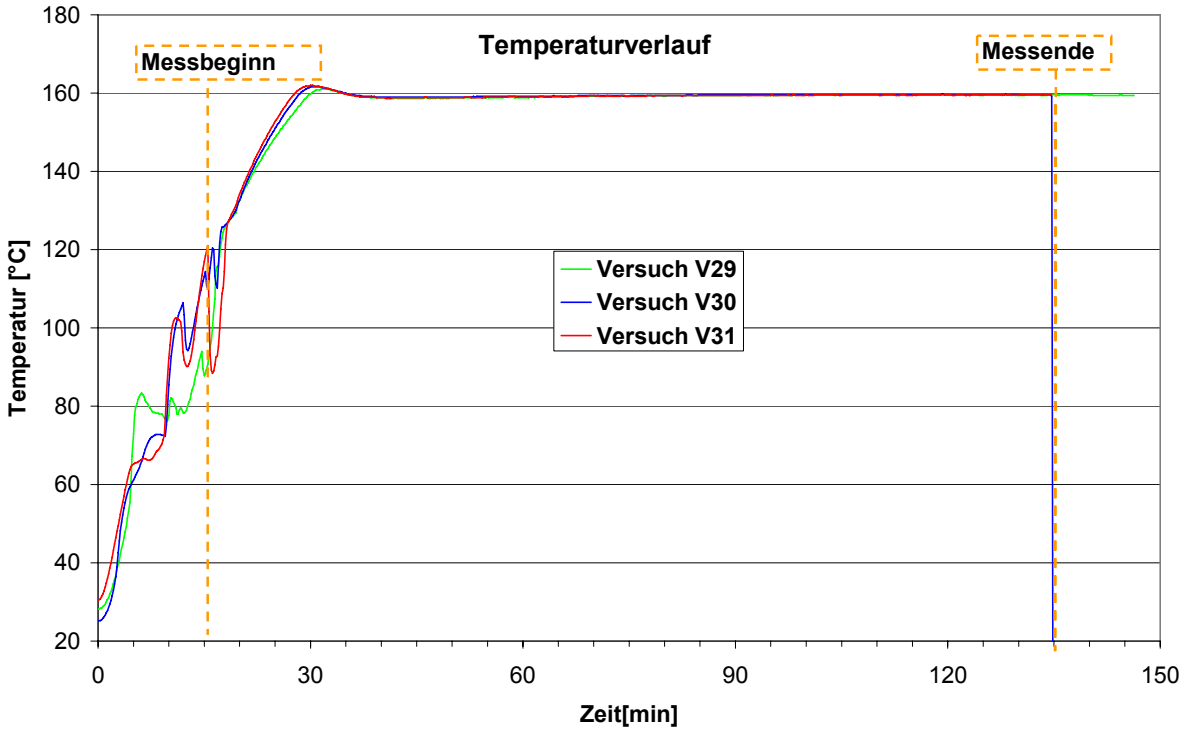


Abbildung 7: Temperaturverlauf der drei Versuche für die Bestimmung der Wiederholbarkeit

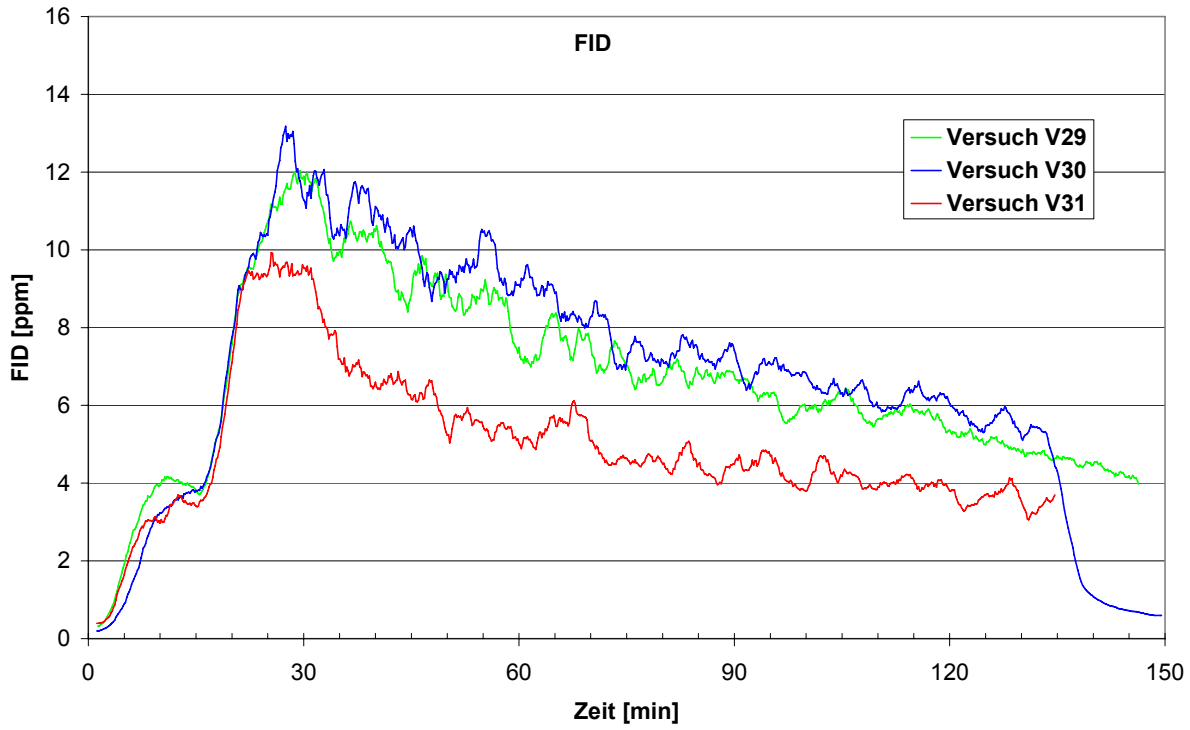


Abbildung 8: FID-Messungen der Versuche V29 - V31

Die FID-Resultate (*Abbildung 8*) zeigen eine starke zeitlich Fluktuation, die darauf hinweist, dass die Dämpfe nicht gleichmässig aufsteigen, sondern in zeitlich oder räumlich stark unterschiedlichen Mengen freigesetzt werden. Für die Vergleichsuntersuchung wurden die Daten über 2.5 Minuten gemittelt. Während der zeitliche Verlauf von Versuch V29 und V30 gut miteinander übereinstimmt, liegt die Kurve von Versuch V31 deutlich tiefer. Dies ist erstaunlich, da in Versuch V31 die höchsten PAK-Konzentrationen der drei Vergleichsversuche gemessen wurden. In späteren Messreihen wurde festgestellt, dass mit der Zeit die Empfindlichkeit des FID abnimmt, was vermutlich auf zunehmende Adsorptionsphänomene in der Leitung zwischen FID-Detektor und Reaktionsgefäss zurückzuführen ist. Der FID-Detektor ist deshalb als on-line-Messsystem für die Messung der Emissionen in dieser experimentellen Konfiguration nicht geeignet.

2.4 Hauptversuche

Basierend auf den in den Vorversuchen durchgeführten Optimierungen wurde die Erzeugung der Dämpfe gemäss nachfolgender Beschreibung durchgeführt.

2.4.1 Versuchsbeschreibung

Mit einem heissen Messer werden 200 g Bindemittel aus dem Probenbehälter entnommen und in ein 1l-Reaktionsgefäss gegeben. Alle Adsorptionsröhrchen und Filter werden in den Probehaltern befestigt und mit den Schläuchen zu den Pumpen verbunden (*Abbildung 9*). Der Temperaturfühler wird auf das Bindemittel gesetzt und die Temperaturaufzeichnung gestartet. Am Anfang wird mit der maximalen Heizleistung aufgeheizt, solange die vorgegebene maximale Manteltemperatur von 230°C nicht überschritten wird. Nach etwa 15 min ist ein Grossteil des Bindemittels geschmolzen, sodass der Temperaturfühler fixiert werden kann. Danach werden die Pumpen für die Probenahme eingeschaltet und der mechanische Rührer in das Bindemittel auf die markierte Position heruntergelassen. Zuerst wird mit einer niedrigen Drehzahl von 45 U/min gerührt, da ein Teil des Bindemittels noch nicht vollständig geschmolzen ist. Nach 3 min wird die Drehzahl des Rührers auf 200 U/min erhöht. Sobald die gemessene Temperatur 2°C unterhalb der Solltemperatur ist, wird die Aufheizrate reduziert. Danach werden bis zum Abbruch der Messung keine Änderungen am Temperaturprogramm mehr durchgeführt. Das Ende der Messung ist 2 h Stunden nach Einschalten der Pumpe erreicht. Die Pumpen werden abgestellt und die Heizung ausgeschaltet. Die Adsorptionsröhrchen werden ausgebaut und mit einer Plastikkappe verschlossen bis zur Analyse aufbewahrt. Die Filter werden in Glasschalen während 24 h bei Normalklima konditioniert und dann für die Bestimmung des TPM gewogen.

2.4.2 Probenahme

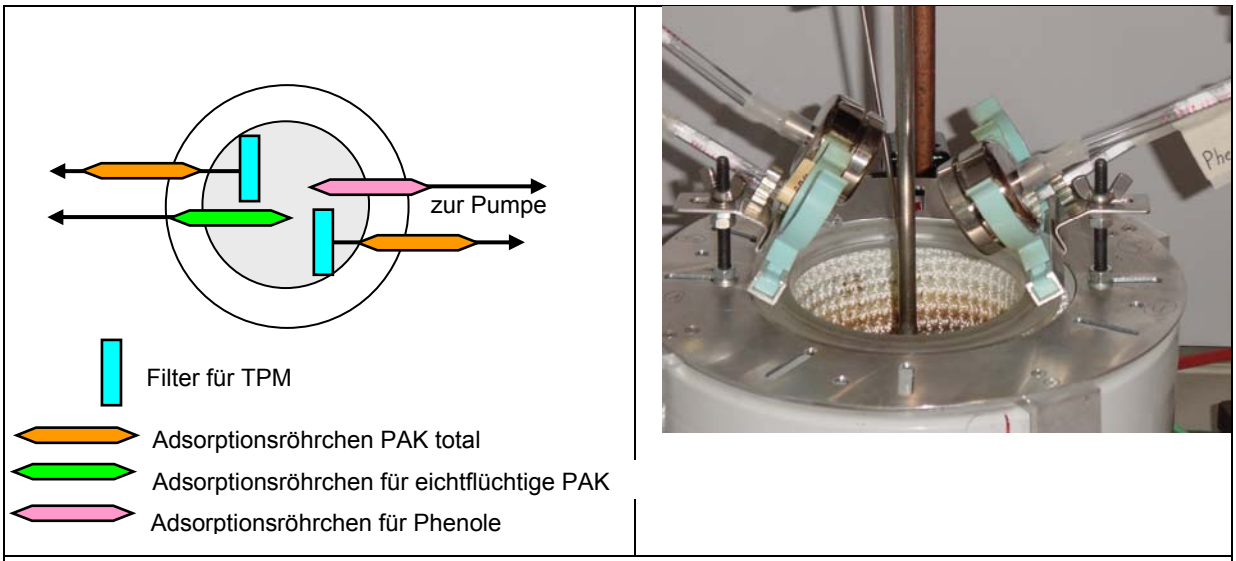


Abbildung 9: Probenahme bei den Hauptversuchen

2.4.3 Verwendete Bindemittel

Für die Durchführung der Emissionsversuche wurden verschiedene Bindemittel benötigt, um den Gehalt der PAK variieren zu können. Da teerhaltige Bindemittel in der Schweiz seit längerem nicht mehr hergestellt werden und der Produzent dieser Bindemittel nicht mehr existiert, musste auf noch vorhandene Rückstellproben zurückgegriffen werden.

Für die Variation der Temperatur wurde ein Teerbitumen TB2000 verwendet, ein Teerprodukt, das 10-20% Teer enthielt und oft für den Strassenbau verwendet wurde. Um den PAK-Gehalt im Bindemittel in einer grossen Bandbreite variieren zu können, musste ein reiner Strassenteer (=100% Teer) verwendet werden. Hier stand nur noch die Sorte Teer hv54 in grösserer Menge zur Verfügung. Die Verdünnung auf den gewünschten EPA-PAK-Wert erfolgte mit einem Strassenbaubitumen 70/100[2] aus der schweizerischen Raffinerie Cressier, das leicht angeblasen war. Ein weiches Bitumen B 160/220 wurde für die Variation der Viskosität des Bindemittels gewählt.

Tabelle 8: PAK-Gehalt der eingesetzten Bindemittel

Bindemittel	Teer hv 54	Teerbitumen TB 2000	Bitumen 70/100	Bitumen B180/220
Summe PAK	256'000	16'900	153	49
Summe EPA	233'000	15'300	105	27
2-Ring-PAK	10'600	607	3	2
3-Ring-PAK	62'800	3'730	20	15
4-Ring-PAK	114000	7'630	55	15
5-Ring-PAK	43'400	3'010	24	7
6-Ring-PAK	25'700	1'980	51	11
Benzo[a]pyren	11'000	770	4	0

2.4.4 Variation des Teergehaltes

Der Teergehalt und damit der PAK-Gehalt in alten Strassenbelägen kann theoretisch zwischen 0 und 100 % variieren, abhängig davon, was für ein Bindemittel verwendet wurde und wie oft der Belag schon recycliert wurde. Mit jedem Recycling wird der Teergehalt reduziert, da in der Praxis bisher mindestens 50% neues Mischgut dem Recyclingmaterial zugemischt wurde. Ein Teergehalt von 50% im eingebauten Recyclingbelag kommt deshalb praktisch nicht vor. Allerdings sind heute in neueren Mischanlagen mit paralleler Recyclingtrommel auch Zugaben von über 50% Recyclingmaterial möglich, weshalb die Untersuchung der Emissionen an stark teerhaltigem Recyclingmaterial plötzlich wieder aktuell ist.

---

[2] Bitumensorten werden durch ihre "Härte" bei 25°C, dem sogenannten Penetrationsbereich definiert, z.B. Bitumen 70/100 mit einer Penetration zwischen 70 und 100 10^{-1} mm {, 1999 #506}.

Für diese Forschungsarbeit wurde der Teergehalt zwischen 0 und 50 % variiert (Tabelle 9), was PAK-Konzentrationen zwischen 100 und 117000 mg/kg EPA-PAK im Bindemittel entspricht.

Tabelle 9: Versuchsparameter für die Variation des Teergehaltes, resp. des PAK-Gehaltes

Versuch	Bindemittel	EPA-PAK [mg/kg]	Temperatur [°C]
V42	Bitumen 70/100	105	160
V43	1% Teer hv 54 in Bitumen 70/100	2430	
V35	2.5% Teer hv 54 in Bitumen 70/100	5930	
V36	5% G Teer hv 54 Bitumen 70/100	11'800	
V45	10% Teer hv 54 in Bitumen 70/100	23'400	
V46	20% Teer hv 54 in Bitumen 70/100	46'700	
V40	50% Teer hv 54 in Bitumen 70/100	117'000	
V32	Teerbitumen TB2000	15'300	

2.4.5 Variation der Temperatur

Bei reinem Bitumen wurde festgestellt, dass die Temperatur bei der Herstellung und vor allem beim Heisseinbau mit dem Strassenfertiger, den grössten Einfluss auf die Emission von PAK zeigt [32]. Die Temperaturen beim Einbau von Walzasphalt liegen in der Schweiz üblicherweise um 160°C. Vor allem in Deutschland sind zur Emissionsverminderung Bestrebungen im Gange, um die Einbautemperatur zu senken, weshalb auch Temperaturen von 140°C untersucht wurden. Für Walzasphalt liegt die obere Temperatur bei etwa 180°C, bei Gussasphalt kann diese aber weit über 200°C betragen. Allerdings wird bei Gussasphalt heute in der Regel selten rezyklierter Walzasphalt verwendet, was sich aber in der Zukunft ändern kann, da die Tendenz vorhanden ist, Recyclingmaterial überall zu verwenden, wo dies technisch möglich ist. In dieser Versuchsreihe wurde deshalb die Temperatur zwischen 140 und 230°C variiert (Tabelle 10).

Tabelle 10: Versuchsparameter für die Variation der Temperatur

Versuch	Bindemittel	EPA-PAK [mg/kg]	Temperatur [°C]
V37	33% TB2000 in 67% Bitumen 70/100	5100	140
V33			160
V34			180
V41			210
V52	3.3% TB2000+ 97% Bitumen 70/100	600	140
V48			160
V49			180
V50			210
V53			230

Die Temperaturvariation wurde an zwei Bindemittelmischungen mit unterschiedlicher PAK-Konzentration durchgeführt. Die erste Bindemittelmischung wurde so eingestellt, dass die PAK-Konzentration etwa dem Richtwert des BAFUs von 5000 ppm entsprach [2]. Diese Bindemittelmischung wurde aus 33 % TB2000 und 67% Bitumen 70/100 hergestellt.

Die PAK-Konzentration der zweiten Mischung lag etwa um eine Faktor 10 tiefer, einer Konzentration, die in vielen Recyclingbelägen vorhanden sein dürfte. Hierzu wurde dem Bitumen 50/70 nur 3.3% TB2000 zugemischt. In der Schweiz gelten Strassenbeläge mit diesem PAK-Gehalt als teerfrei, während sie in Deutschland nicht uneingeschränkt verwendet werden dürfen (Kapitel 1.3).

2.4.6 Variation der Viskosität

Der Einfluss des zugemischten Bitumens auf die Emissionen wurde in einem Versuch durch die Verwendung eines weicheren Bitumens B 160/220 überprüft.

2.5 Resultate der Laborversuche

2.5.1 Variation des Teergehaltes

Der Teergehalt, respektive PAK-Gehalt im Bindemittel hat unterhalb 10'000 ppm keinen grossen Einfluss auf den TPM-Gehalt und steigt erst danach kontinuierlich an. Da reines Bitumen auch Emissionen erzeugt, geht die Kurve nicht durch den Nullpunkt.

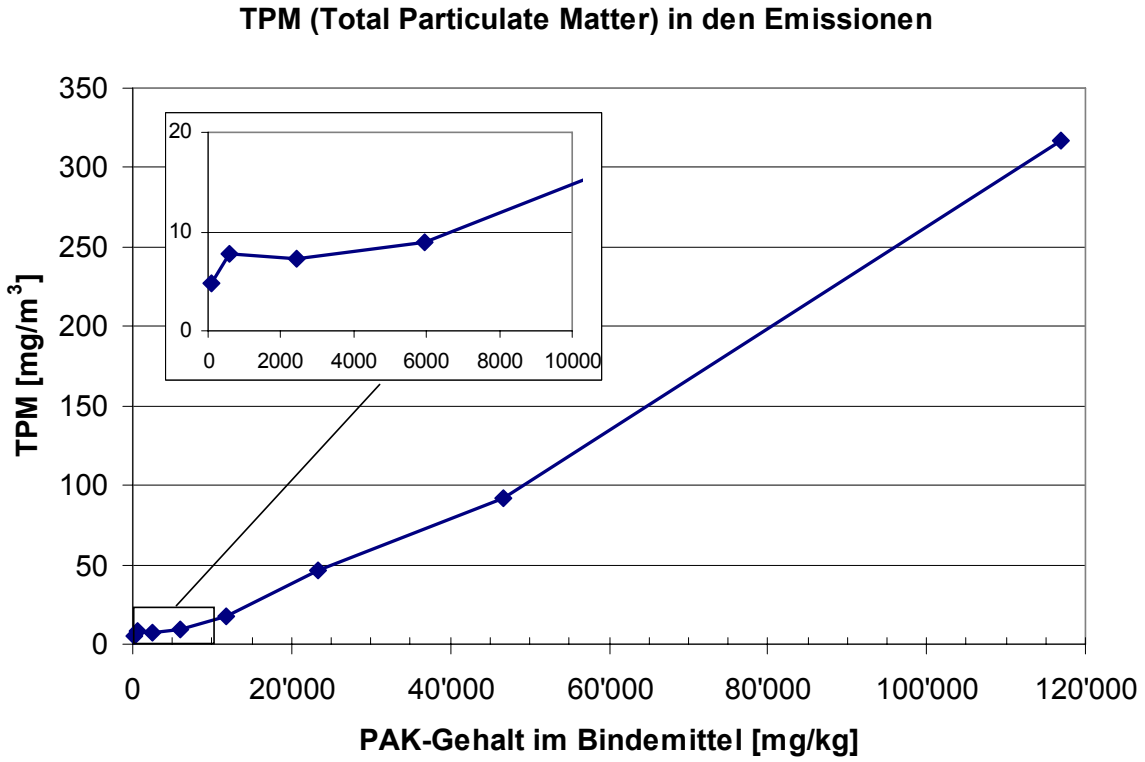


Abbildung 10: TPM in Abhängigkeit des PAK-Gehaltes bei 160°C

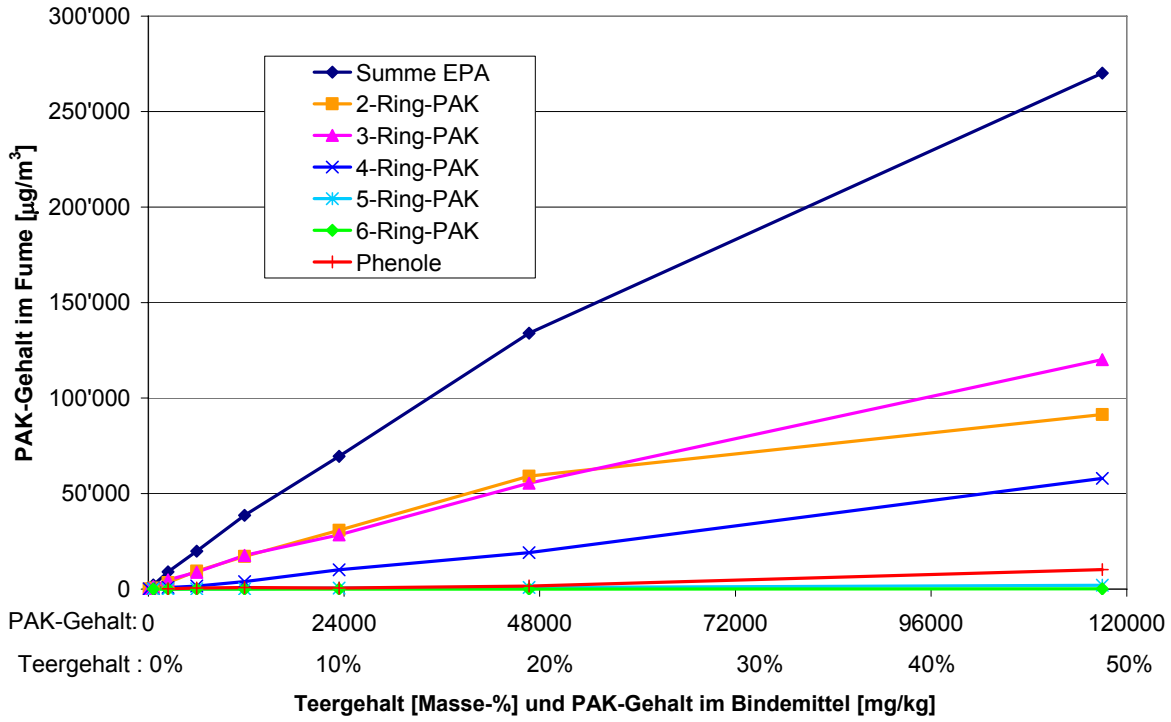


Abbildung 11: PAK-Emissionen als Funktion des Teergehaltes bei 160°C

Die PAK-Konzentrationen in den Dämpfen zeigen hingegen näherungsweise eine lineare Abhängigkeit zum PAK-Gehalt im Bindemittel (Abbildung 11). Insbesondere nimmt auch die BaP-Emission proportional zum Teergehalt zu (Abbildung 12). Eine Verdopplung des PAK-Gehaltes im Ausgangsbindemittel führt so zu einer Verdoppelung der PAK-Emissionen.

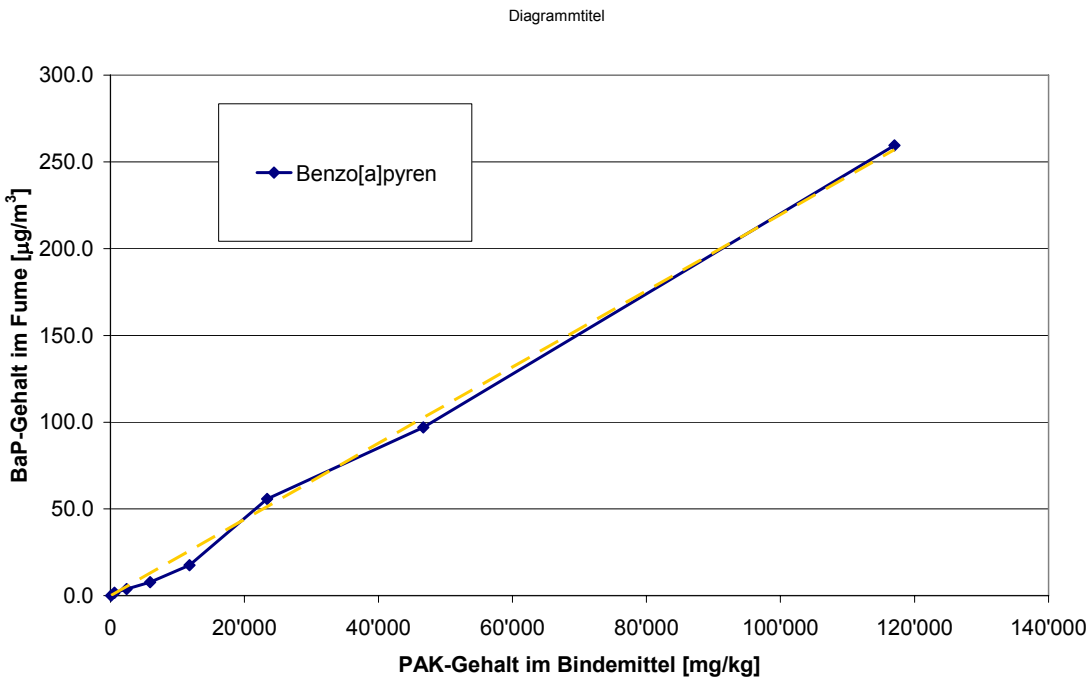


Abbildung 12: Emissionen von BaP als Funktion des Teergehaltes bei 160°C

Bei der Kurve für den Gesamt-PAK-Gehalt, aber auch bei Naphthalin ist bei einem Teergehalt von 20% ein Knick erkennbar. Dieser ist aufgrund der hohen Naphthalin-Konzentrationen vermutlich auf Schwierigkeiten bei der Probenahme zurückzuführen. Die schwerflüchtigen 5-6-Ring-PAK sind unterhalb einem PAK-Gehalt von 600 ppm im Bindemittel in den Dämpfen nicht mehr nachweisbar.

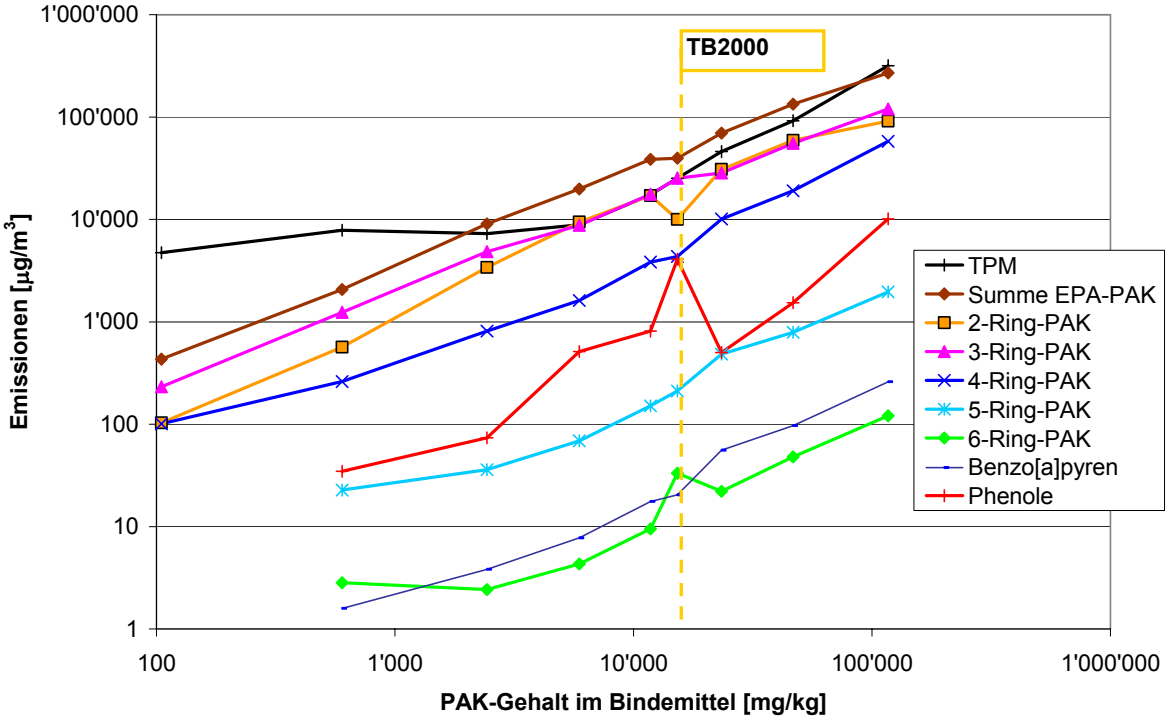


Abbildung 13: Logarithmische Darstellung der PAK-Abhängigkeit bei 160°C mit Einbezug des Bindemittels TB2000

In einem Versuch wurde anstelle von Teer hv 54 TB2000 verwendet, um Informationen über den Einfluss der Teersorte zu erhalten. Wie die Abbildung 13 zeigt, ist der Einfluss der Teersorte nur bei Naphthalin und bei den 6-Ring-PAK deutlich sichtbar.

Die Phenole schwanken relativ stark, nehmen aber prinzipiell in ähnlicher Weise zu wie die PAK.

2.5.2 Variation der Temperatur

Bei zwei Bindemitteln mit unterschiedlichem EPA-PAK-Gehalt (600 und 5100 ppm EPA-PAK) wurden die Emissionen im Bereich von 140 und 230°C gemessen. Die Gesamtpartikelmasse TPM zeigt für beide untersuchten Bindemittel eine gute Korrelation zum Dampfdruck resp. 1/T (Abbildung 14). Der Unterschied in der TPM-Konzentration zwischen dem Bindemittel mit 600 ppm und 5100 ppm EPA-PAK ist jedoch nicht sehr gross, was darauf zurückzuführen ist, dass der grösste Teil der Emissionen nicht aus aromatischen Verbindungen besteht, wie dies auch schon in der Literatur erwähnt wurde [33]. Im Bereich zwischen 140 und 210°C wird pro 12°C Temperaturerhöhung etwa eine Verdoppelung der TPM gemessen. Oberhalb von 210°C steigt dieser Wert jedoch nicht mehr so stark an und geht eher in eine lineare Abhängigkeit über. Da mit 5000 ppm im Bindemittel die Emissionen bei 230°C so hoch waren, dass die Filter überladen wurden, liegt für diese Temperatur nur eine Messung vor.

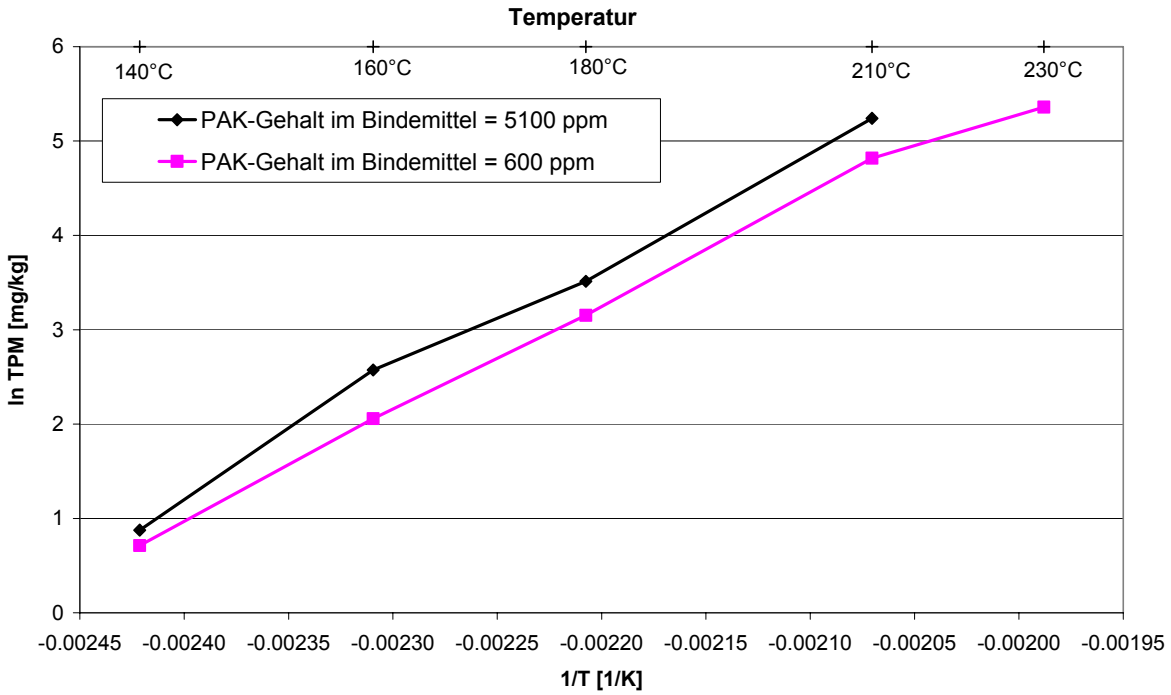


Abbildung 14: Dampfdruckabhängigkeit des Fume

Die Temperaturabhängigkeit Emissionen der 4-6-Ring-PAK verhält sich identisch zu den TPM (Abbildung 15). Die Zunahme der 2-3-Ring-PAK-Emissionen ist jedoch deutlich geringer und beeinflussen als Hauptkomponenten auch die Gesamt-PAK-Emissionen in ähnlicher Weise. Bei TPM wird pro 12°C eine Verdoppelung der Emissionen festgestellt, während eine Verdoppelung der PAK-Gesamtemissionen erst nach einer Temperaturerhöhung von 50°C eintritt. Dies bedeutet dass bei einer Temperaturerhöhung um 10°C nur ein Anstieg der PAK-Emissionen um 20% zu erwarten ist. Dieses unterschiedliche Verhalten ist zumindest beim Naphthalin auch auf die Verarmung im Bindemittel zurückzuführen. Zudem sind die PAK-Emissionen deutlich vom PAK-Gehalt im Ausgangsbindemittel abhängig, wie dies schon vorigem Kapitel beschrieben wurde.

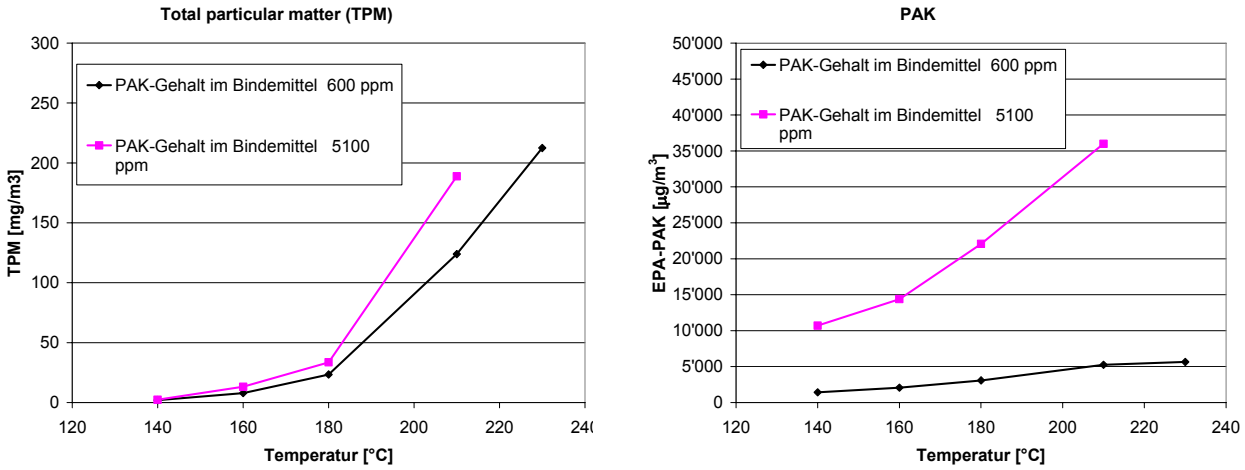


Abbildung 15: Abhängigkeit von TPM und EPA-PAK von der Temperatur

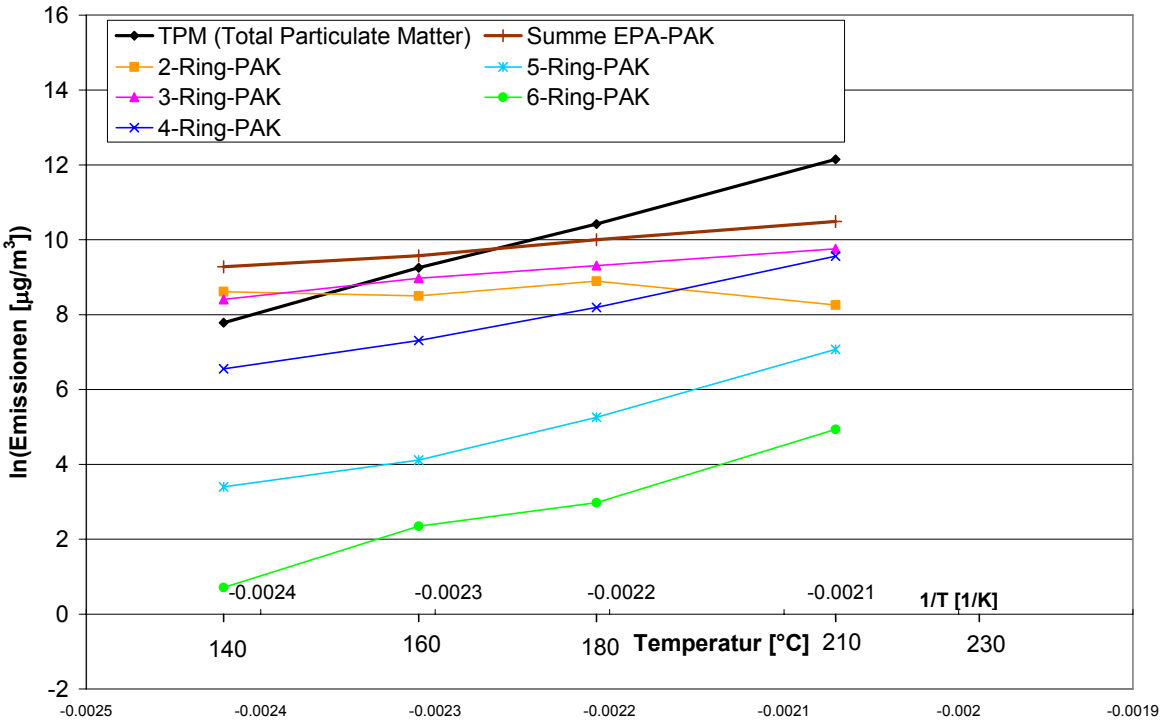


Abbildung 16: Einfluss der Temperatur auf die Emissionen (EPA-PAK im Bindemittel = 5100 ppm)

2.5.3 Variation der Viskosität

Der Einfluss der Viskosität ist nicht einfach zu bestimmen, da diese nicht variiert werden kann, ohne das Bindemittel zu verändern. Die Viskosität kann verändert werden, indem ein härteres oder weicheres Bitumen verwendet wird. Die folgende Grafik zeigt den Einfluss auf die Emissionen bei 160°C, wenn anstelle eines Bitumen 70/100 ein weicheres Bitumen B160/220 verwendet wird, wobei der PAK-Gehalt im gemischten Bindemittel etwa 5000 ppm betrug.

Die Abbildung 17 zeigt, dass durch die Verwendung eines weicheres Bitumen sich die PAK-Emissionen um 60% erhöhen, wobei die Erhöhung durch die Zunahme der 2-3-Ring-PAK verursacht wird. Die schwerflüchtigen 4-6-Ring-PAK nehmen hingegen sogar ab. Da diese aber prozentual einen geringeren Anteil in den Emissionen haben, zeigt die Gesamtbilanz eine markante Zunahme. Allerdings ist zu bemerken, dass das Bitumen B160/220 aus einer anderen Raffinerie stammt und so neben der Viskosität auch die Provenienz und Herstellungsart des Bitumens die Emissionen beeinflussen können. Jedoch ist diese Erhöhung nicht auf die Inhaltstoffe des Bitumens selbst zurückzuführen, da beide nur sehr geringe PAK-Anteile enthalten.

Zudem wurde bei den Versuchen, bei denen der Teergehalt variiert wurde, die Viskosität ebenfalls verändert, da der verwendete Teer hv 54 eine etwa 10fach tiefere Viskosität aufweist als das Bitumen.

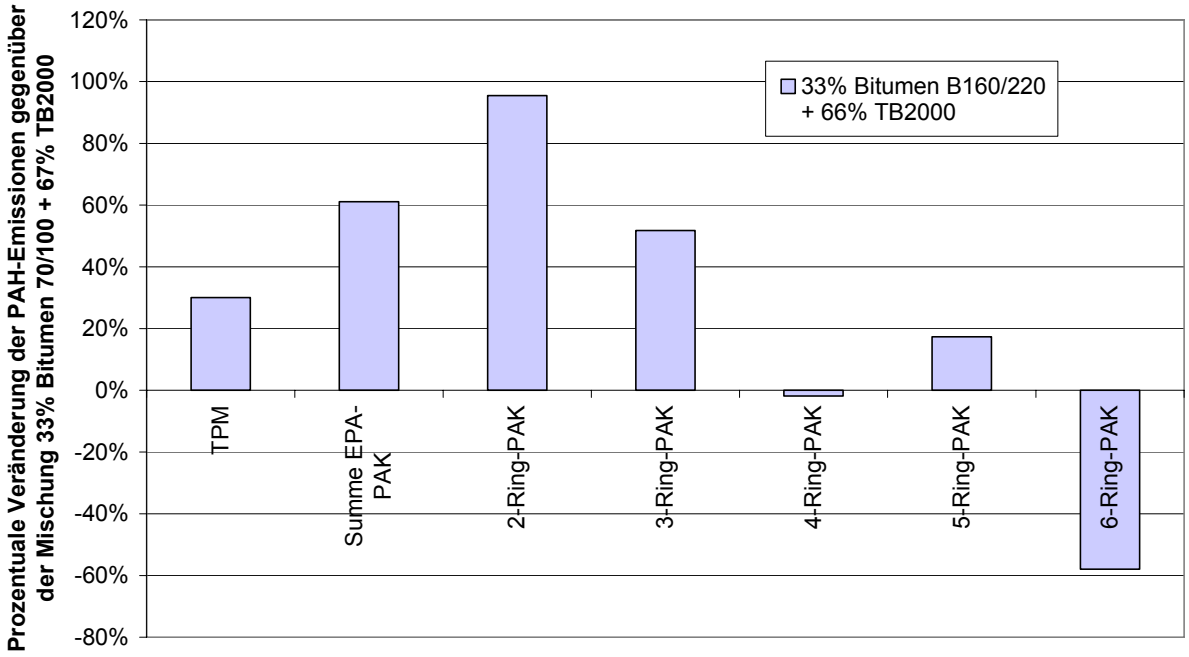


Abbildung 17: Prozentuale Veränderung der Emissionen bei 160°C durch die Verwendung eines weicheren Bitumens B160/220 anstelle des Bitumens 70/100 für die Teer-Bitumenmischung

3 Feldversuche (FV)

3.1 Einführung

Die Messungen der PAK-Emissionen beim heissen Wiedereinbau des Recyclingasphalts schaffen den Bezug zwischen den Laborversuchen und der Praxis. Während im Labor der Zusammenhang zwischen Emissionen und verschiedenen Parametern, wie Temperatur, Teergehalt, Viskosität, etc. untersucht wurde, ergeben sich aus den Feldversuchen absolute Konzentrationen und Emissionsmengen. Zudem kann die Belastung der einzelnen Arbeiter abgeschätzt werden, und schliesslich sollen auch die Stärke und der relative Beitrag der wichtigsten Emissionsquellen beim Einbau bestimmt werden. Letzteres ergibt einerseits Hinweise auf mögliche Massnahmen und ermöglicht andererseits den Vergleich mit den sogenannten Bagatellmassenströmen gemäss Luftreinhalteverordnung [1].

Um diese Ziele zu erreichen, wurden zwei sich ergänzende Konzepte zur Probenahme verfolgt:

(i) Probenahme mittels Personal Sampler bei den einzelnen Arbeitern
(ii) Erfassung der wesentlichen Emissionsquellen beim Wiedereinbau des Mischguts.

Die Belastung einzelner Arbeiter lässt sich durch Probenahmen mit Personal Samplern grob abschätzen (siehe Kapitel 3.2.3). Sie hängt jedoch stark vom individuellen Verhalten am Arbeitsort und von den lokalen Windverhältnissen ab [34]. Demgegenüber ist die Stärke der Hauptemissionsquellen weniger vom Verhalten des einzelnen Arbeiters und von den meteorologischen Verhältnissen abhängig. Als wichtigste Emissionsquellen kommen die folgenden Bereiche in Frage:

A: Einfüllen des heissen Mischguts vom Lastwagen in die Vorratswanne des Fertigers

B: Verteilen und Verdichten des heissen Mischguts am hinteren Ende des Fertigers (Einbaubohle)

C: Verdampfung von der Oberfläche des eingebauten, heissen Belags (Flächige Emission).

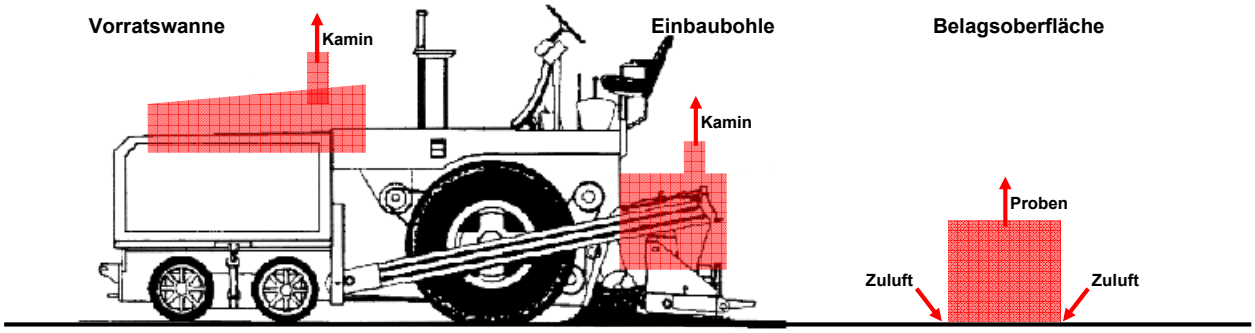


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Hauptemissionsquellen und der jeweiligen Probenahme

Für eine Bestimmung der Gesamtemission (Emissionsfaktor) müssen alle wesentlichen Emissionsquellen berücksichtigt werden. Die einzelnen Quellen werden durch eine mechanische Absaugung möglichst vollständig und reproduzierbar erfasst und beprobt. Der Anteil der einzelnen Prozesse an der Gesamtemission ist aus der Literatur nicht genau bekannt. In den USA wird aus arbeitshygienischen Gründen eine Abdeckung der Bohle mit Absaugung sogar für nicht teerhaltige Beläge mit reinem Bitumen vorgeschrieben [35]. Es kann deshalb vermutet werden, dass die PAK-Emissionen beim Austritt des heissen Mischgutes bei der Einbaubohle am höchsten sind.

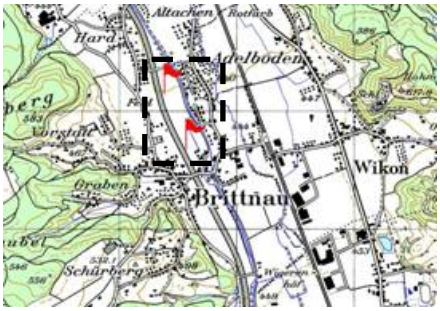
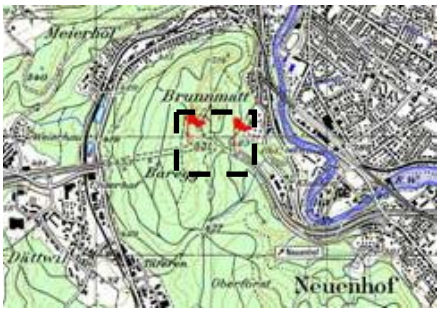
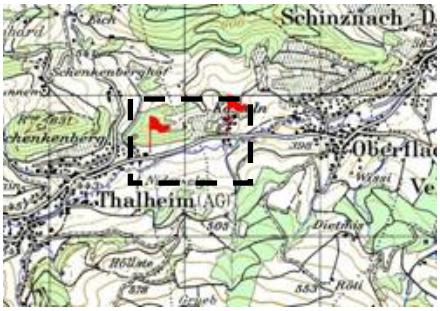
3.2 Durchführung der Feldversuche

Ursprünglich waren 3 - 4 Messkampagnen geplant, bei denen verschiedene Teergehalte und Einbautemperaturen hätten untersucht werden sollen. Es zeigte sich aber bei der Planung, dass es sehr schwierig ist, grössere Baustellen eines im voraus bestimmten Bauunternehmers zu finden, bei denen mit grosser Sicherheit teerhaltiges Recyclingmischgut verwendet wird. Zudem sollte möglichst immer derselbe Fertiger verwendet werden, welcher für diese Untersuchung umgebaut wurde. Die hier beschriebenen 3 Messkampagnen sind deshalb ein Kompromiss zwischen den Möglichkeiten und Ansprüchen der Forscher und der Bauunternehmung. Trotzdem konnten mit zwei Messungen im Freien und einer Tunnelmessung interessante und repräsentative Situationen untersucht werden.

3.2.1 Messkampagnen - Übersicht

Alle Feldversuche wurden unter Mithilfe der Batigroup AG (heute Teil der Implenia AG) durchgeführt, die auch den eigentlichen Einbau des Belags durchführte und einen Fertiger für die notwenigen messtechnischen Anpassungen zur Verfügung stellte. Die Messorte und wichtige Kennzahlen sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Übersicht über die Messorte der Feldversuche

	Bezeichnung:	Wiggertal
	Ort:	Autobahn A2, Pannenstreifen, nördlich von Brittnau
	Datum:	31.7.2003
	Bemerkungen	Vorversuch für die Beprobung und Analytik. Kein teerhaltiges Recyclingmaterial (unerwartet).
	Bezeichnung:	Baregg
	Ort:	Bareggtunnel, Neubau mittlere Röhre, nahe Ostportal
	Datum:	29.3.2004
	Bemerkungen	Tunneleinbau mit potentiell hoher Belastung.
	Bezeichnung:	Thalheim
	Ort:	Fahrradstreifen zwischen Thalheim und Oberflachs
	Datum:	17.5.2005
	Bemerkungen	Offenes Gelände

Um sowohl die Gesamtemissionen, als auch die Arbeitsplatzkonzentrationen bestimmen zu können, wurden die Hauptversuche in zwei Teilen durchgeführt: (Beprobung A) Messungen mit möglichst vollständiger Absaugung der Hauptemissionsquellen, und (Beprobung B) Messungen ohne Absaugung der Hauptemissionsquellen.

3.2.2 Messtechnik Übersicht

Eine Übersicht über die Messparameter gibt Tabelle 12. Die technischen Details zu einzelnen Messtechniken werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Tabelle 12: Übersicht über die Messparameter

Bezeichnung	Beschreibung	Probenahme	Analytik	Bemerkungen
T(Oberfläche)	Oberflächentemperatur des Belags	-	IR Sensor RAYRPM30L2D (Raytek, USA)	Berührungsloser Sensor
T(Belag) T(Mischgut)	Temperatur des angelieferten Mischguts, bzw. des Belags	-	Pt100 mit Testo 645 (Testo GmbH, D)	Einstechfühler
T(Umgebung)	Umgebungstemperatur	-	Thermistor und Logger, Hobo 12 bit (Onset Corp., USA)	
Wind	Windgeschwindigkeit - und Richtung	-	Meteoanlage g.500.1u-150, Schiltknecht, Gossau	
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	flüchtige: 2 Adsorptionsröhrchen in Serie. nichtflüchtige: Membranfilter + 1 Adsorptionsröhrchen in Serie.	GC-MS und HPLC-FL	Details siehe Kapitel 2.2
TPM	Total Particulate Matter Bestimmung der Aerosolmasse auf einem Filter	ca. 2 l/min	Gravimetrisch nach 24 h Äquilibrierung, Mettler AT 201, 0.01 mg Auflsg.	
SF_6	Schwefelhexafluorid	Tedlarbag, ca. 50 ml/min	GC-ECD, Nachweisgrenze ca. 1 ppt	Hintergrundkonzentration ca. 5 ppt.
Phenole/ Kresole	(ortho, meta, para) Kresol bzw. Phenol	1 XAD-7 Adsorptionsröhrchen	GC-FID und GC-MS	Details siehe Kapitel 2.2
υ	Strömungsgeschwindigkeit im Messkanal	-	Prandtl Rohr und Manometer (ManoAir 500, Schiltknecht, ± 2000 Pa)	Für die beiden Kamine mit Ventilatoren
q_v	Volumenstrom der Personal Sampler	-	DryCal DC-2 (Bios Int. Corp., USA)	Kalibration der Pumpenregelung der Personal Sampler

3.2.3 Probenahme mittels Personal Sampler

Um die arbeitshygienische Belastung der Arbeiter zu bestimmen wurden diese mit kleinen Pumpen (Personal Air Sampler) ausgestattet (GilAir5, Sensidyne, USA). Die Probenahme erfolgte durch Abscheidung und Absorption an einem Palflex Membranfilter (EMFAB TX40H120-WW37 mm, Pall Corpration, USA, Artikel. Nr. 7217) in einem open-face PS Filterhalter (GC037050, Sensidyne, USA) mit einem nachgeschaltetem PAK Adsorptionsröhrchen (Supelco OrboTM-43). Der Volumenstrom betrug ca. 2 l/min. Die Personal Sampler haben geregelte Pumpen, welche leichte Veränderungen des Unterdrucks - beispielsweise durch die Belegung des Filters - kompensieren. Kann der Volumenstrom nicht innerhalb von ± 5% des Sollwerts gehalten werden, so wird die Probenahme automatisch unterbrochen. Die Personal Sampler wurden jeweils vor und nach der Messung kalibriert und der Mittelwert des Kalibrationsfaktors für die Berechnungen verwendet. Es wurden 7-8 Arbeiter für diese Art der Probenahme ausgerüstet, wobei darauf geachtet wurde, dass alle wichtigen Positionen im Arbeitsablauf repräsentiert waren.

Abbildung 19: Beprobung der Arbeiter für PAK und TPM

3.2.4 Beprobung der heissen Belagsoberfläche

Das eingebaute Belagsmaterial bleibt relativ lange heiss und hat eine grosse Oberfläche. Die von dieser Fläche freigesetzten PAK-Emissionen sind bisher nicht bekannt. Sie wurden durch eine modifizierte Flec Zelle erfasst, welche ursprünglich für die Bestimmung der Emissionen von Materialien im Innenbereich entwickelt wurde [36, 37].

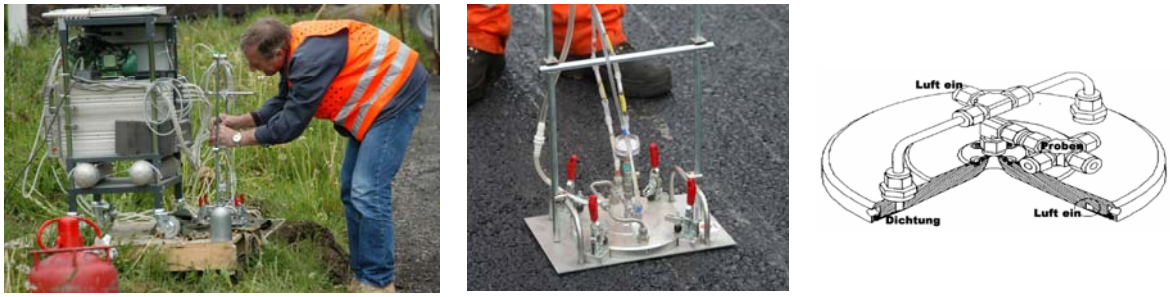


Abbildung 20: Beprobung der heissen Belagsoberfläche. Setup mit Volumensteuerung, Gasflaschen und Pumpen (links); Absaugung, Filter und Adsorptionsröhrchen (Mitte); Konzeptskizze der Flec Zelle (rechts).

Durch die Flec Zelle wird eine definierte Fläche (177 cm^2) des heissen Belags abgedeckt und das darüberstehende Volumen konstant abgesaugt und beprobt. Der dafür verwendete Volumenstrom betrug ca. 600 ml/min, wobei der zugeführte Luftvolumenstrom etwas grösser war als das für die Proben entnommene Gasvolumen um das Ansaugen von weniger belasteter Umgebungsluft zu vermeiden. Die

zugeführte Luft stammte aus Gasflaschen und wurde auf ca. 50% relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Alle Gasflüsse wurden durch elektronische Massenflussregler (MKS, USA) kontrolliert.

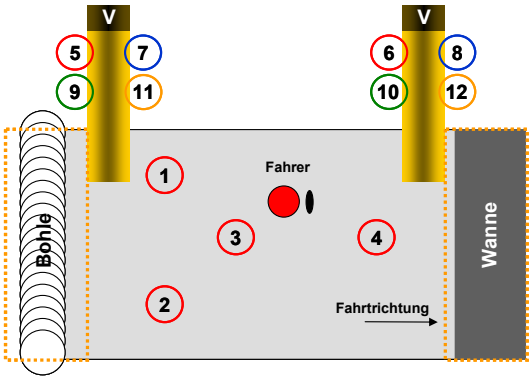
Die Emissionen an der Belagsoberfläche nehmen mit sinkender Temperatur stark ab. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass während der Probenahmedauer von 15 - 30 Minuten der grösste Teil der emittierten Dämpfe erfasst wird. Aus den analytischen Resultaten [g/Probe] und der Fläche der Flec Zelle [m^2] lässt sich deshalb leicht eine Emission pro Fläche [g/m^2] berechnen. Wird diese mit der Einbaugeschwindigkeit [m^2/h] multipliziert, so ergibt sich daraus ein Massenstrom [g/h] für die Emissionen aus der Belagsoberfläche der Baustelle.

Die an der Belagsoberfläche beprobten Parameter und eine detaillierte Charakterisierung der Probenahme sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Beprobung der heissen Belagsoberfläche

Parameter	Probenmaterial	Volumenstrom	Bemerkungen
schwerflüchtige PAK	Palflex Membranfilter EMFAB TX40H120-WW 37mm, PALL + Supelco OrboTM-43 SupelpackTM20u	ca. 400 ml/min	
Fume	Palflex Membranfilter EMFAB TX40H120-WW 37mm	ca. 400 ml/min	gleicher Filter wie PAK
leichtflüchtige PAK	Adsorptionsröhrchen, Supelco OrboTM-43 SupelpackTM20u	ca. 50 ml/min	2 Röhrchen in Serie
Phenole/Kresole	Adsorptionsröhrchen, Supelco OrboTM-47	ca. 50 ml/min	

3.2.5 Beprobung von Vorratswanne und Einbaubohle



1-6	PAK & Fume
7-8	flüchtige PAK
9-10	Phenole & Kresole
11-12	SF_6

Abbildung 21: Schematische Darstellung des Fertigers mit den verschiedenen Probenahmen. Die Positionen 1-4 waren am Fertiger montiert. Die Positionen 5-12 sind Probenahmen an den beiden Kaminen mit Ventilatoren (V), welche der Absaugung der wichtigsten Emissionsquellen dienen (gestrichelte Linien).

Es wurden Abdeckungen für die Erfassung der Emissionen bei der Vorratswanne und der Einbaubohle entwickelt und mit Hilfe von Rauchversuchen optimiert. Da keine vollständige Erfassung der emittierten Dämpfe möglich ist, wurde zur Bestimmung der Erfassungsrate an Bohle und Wanne kontinuierlich eine bekannte Menge Schwefelhexafluorid (SF_6) zudosiert. Dieser Tracer ist sehr innert, kommt in der Umgebungsluft kaum vor und kann mit sehr hoher Empfindlichkeit und Präzision analysiert werden. Die Dosierung geschah durch Zugabe von je ca. 50 ml/min SF_6 mit einer Konzentration von ca. 100 ppm an insgesamt 4 Punkten, welche möglichst repräsentativ für die Emissionsquellen gewählt wurden. Der Fluss des Tracergases wurde durch Massenflussregler (MKS, USA) eingestellt, und die Proben mittels einer peristaltischen Pumpe in Tedlarbags mit einem Volumen von 8 l gepumpt. Das Tracergas wurde aus konzentriertem SF_6 durch Verdünnung in zwei Schritten hergestellt und dessen Konzentration mittels Fourier Transform Infrarotspektroskopie (FTIR) und einem zertifizierten Standard bestimmt.

Abbildung 22: Umgebauter Fertiger in Wiggertal (links), Einrichtung für SF_6 Zudosierung und Absaugung (rechts).

In der Abbildung 22 ist der umgebaute Fertiger sichtbar. Die Abdeckung der Bohle (hinten) bestand zum grossen Teil aus Plexiglas, während die vordere Abdeckung jeweils von Hand über den hinteren Teil des Lastwagens mit dem Mischgut gelegt wurde. Auf die Kamine mit 185 mm Innendurchmesser wurden Ventilatoren montiert, welche die kontaminierte Luft der Wanne, bzw. der Bohle mit einem Volumenstrom von ca. 8 m^3/min absaugten. Die Stromversorgung wurde auf dem Fertiger durch einen benzinbetriebenen 220 VAC Generator sichergestellt. Eine Übersicht über die Parameter und Probenahme im Bereich des Fertigers gibt Tabelle 14.

Tabelle 14: Beprobung im Bereich des Fertigers

Parameter	Probenmaterial	Volumenstrom	Bemerkungen
schwerflüchtige PAK	Palflex Membranfilter EMFAB TX40H120-WW 37mm, PALL + Supelco OrboTM-43 SupelpackTM20u	ca. 2000 ml/min	
Fume	Palflex Membranfilter EMFAB TX40H120-WW 37mm	ca. 2000 ml/min	gleicher Filter wie PAK
leichtflüchtige PAK	Adsorptionsröhrchen, Supelco OrboTM-43 SupelpackTM20u	ca. 50 ml/min	2 Röhrchen in Serie
Phenole/Kresole	Adsorptionsröhrchen, Supelco OrboTM-47	ca. 50 ml/min	
SF_6	Tedlarbag, V = 8 l		

Die Einrichtungen für Probenahme und Zudosierung von Tracergas wurden an den Labors und Werkstätten in Dübendorf aufgebaut. Der Fertiger wurde von der Batigroup im Werkhof Buchs für die Messkampagnen angepasst. Eine besondere Herausforderung war dabei, dass alle Elemente - insbesondere die Absaugung und die beiden Kamine - einfach zu montieren und demontieren sein sollten. Weiter durfte der Arbeitsablauf und die Sicht des Fahrers nicht wesentlich behindert werden.

Für den 3. Feldversuch musste ein neuer Fertiger umgebaut werden, weil die zuvor verwendete Maschine ausser Betrieb genommen worden war. Die erneuten Anpassungen wurden von der Batigroup vorgenommen. Auch wenn der zuvor vorhandene Standard nicht ganz erreicht wurde, so war die neue Version genügend und zweckmässig. Die Wiederfindungsrate der Tracer (Kapitel 3.4.6) zeigte zudem, dass die Qualität der Absaugung mit dem ursprünglich angepassten Fertiger vergleichbar war.

3.3 Charakterisierung der Messkampagnen

3.3.1 Wiggertal

Die Messung in Wiggertal sollte als Vorversuch dienen um den Einsatz aller Komponenten in der rauen Realität des Strassenbaus zu testen. Zudem sollte das Zusammenspiel zwischen den Bedürfnissen des Bauunternehmens und jenen der Forschung erprobt werden.

Bezeichnung:	Wiggertal
Meteo	Bewölkt, Wind ca. 1.3 m/s SW, T(Mittel) = 18.9°C, T(Min) = 15.9°C, T(Max) = 22.4°C
Einbau	Pannenstreifen
T(Einbau)	155±5°
Belagsmaterial	HMT 32 H mit ca. 30% Recycling-granulat % 170 - 200 ppm EPA-PAK im Bindemittel

Abbildung 23: Feldversuch 1 (Vorversuch)

Aus diesen Gründen wurden nur 4 Arbeiter mit Personal Samplern ausgerüstet. Zudem wurde bloss eine Probe genommen, dies im Gegensatz zu den Feldversuchen 2-3, bei welchen jeweils eine Probe mit, und eine Probe ohne Absaugung von Bohle und Wanne bestimmt wurden. Nachträglich wurde festgestellt, dass das verwendete Belagsmaterial keine signifikanten Mengen von teerhaltigem Ausbauasphalt enthielt. Diese Erfahrung führte dazu, dass für die Feldversuche 2-3 das vorgesehene Material jeweils vorgängig durch die Empa halbquantitativ auf dessen PAK-Gehalt untersucht wurde.

3.3.2 Baregg

Der Einbau im Tunnel wurde untersucht, weil dabei einerseits relativ gut definierte meteorologische Bedingungen herrschen und andererseits eine eher hohe Belastung der Arbeiter erwartet wurde. Es zeigte sich allerdings, dass bei der Verwendung eines grossen Ventilators der Feuerwehr (Nennleistung 137'000 km/h) ein sehr guter Luftwechsel erreicht wird. Im Bereich der Arbeiter lag die Windgeschwindigkeit eher über dem berechneten Mittelwert von 0.7 m/s und war teilweise bereits störend. Hingegen wurde die Luftqualität von den Arbeitern subjektiv als sehr gut eingestuft, was offenbar nicht bei allen Arbeiten in Tunnels der Fall ist.

Bezeichnung:	Baregg
Meteo	Ventilation unregelmässig, im Mittel ca. 0.7 m/s Windgeschwindigkeit, T(Mittel) = 13°C, T(Min) = 11°C, T(Max) = 15°C (auf Fertiger)
Einbau	Fahrspur, Breite ca. 3.5 m, Geschw. ca. 3.0 m/min
T(Einbau)	146±4°C
Belagsmaterial	65 % Recyclingmaterial 5600 ± 300 ppm EPA-PAK im Bindemittel

Abbildung 24: Feldversuch 2

Um einen raschen Einbau des Belags zu gewährleisten wurde im Baregg mit 2 Fertigern parallel gearbeitet. Unsere Messkampagne war jedoch auf eine Maschine und das dafür zuständige Personal fokussiert. Deshalb fuhr dieser Fertiger an vorderer Stelle, windaufwärts, in einem Abstand von ca. 100-200 m bezüglich des zweiten Fertigers. Wegen der guten Lüftung kann davon ausgegangen werden, dass keine signifikante Kontamination durch die zweite Maschine stattfand.

Nach ungefähr der Hälfte der Belagsarbeiten wurden sämtliche Proben gewechselt. Gleichzeitig wurde die Absaugung abgeschaltet und die wesentlichen Elemente der angebauten Absaugeinrichtungen im Bereich von Wanne und Bohle entfernt. Dadurch entstand eine Situation, wie sie mit einem nicht modifizierten Fertiger zu erwarten wäre.

3.3.3 Thalheim

Der 3. Feldversuch fand in offenem Gelände in der Nähe von Thalheim statt. Es wurde dafür ein neuer Fertiger umgebaut, weil die zuvor verwendete Maschine ausser Betrieb genommen worden war (vgl. Kapitel 3.2.5).

Bezeichnung:	Thalheim
Meteo	leicht bewölkt Ostwind, mittlere Geschw. 1.8 m/s T(Mittel) = 13.6°C, T(Min) = 6.7°C, T(Max) = 21.03 °C
Einbau.	Fahrspur, Breite ca. 2.5 m, Geschw. ca. 3.2 m/min
T(Einbau)	158±5°C
Belagsmaterial	ca. 50 % Recyclingmaterial 2300 ± 150 ppm EPA-PAK im Bindemittel

Abbildung 25: Feldversuch 3

Nach ungefähr der Hälfte der Belagsarbeiten wurden sämtliche Proben gewechselt. Gleichzeitig wurde die Absaugung abgeschaltet und die wesentlichen Elemente der angebauten Absaugeinrichtungen im Bereich von Wanne und Bohle entfernt. Dadurch entsteht eine Situation, wie sie mit einem nicht modifizierten Fertiger zu erwarten wäre.

3.4 Resultate und Diskussion

Für die Feldversuche wurde der Fertiger jeweils am Vorabend mit den nötigen messtechnischen Einrichtungen versehen. Kurz vor Arbeitsbeginn wurden alle Filter und Adsorptionsröhrchen befestigt und die Massenflussregler und Pumpen aufgewärmt. Zudem wurden alle Arbeiter mit Personal Samplern und entsprechenden Adsorptionsröhrchen und Filtern ausgerüstet (vgl. Abbildung 19).

Während der ersten Probe (A-Probe) wurden die Dämpfe im Bereich der Bohle und der Wanne abgesaugt und über die Kamine ausgestossen. Anschliessend (B-Probe) wurden die Absaugeinrichtungen entfernt um eine ungestörte Probenahme zu ermöglichen. Allerdings betrug die Erfassungsrate, bestimmt aus der Wiederfindung von SF_6, nur maximal 24 % (vgl. Tabelle 19). Zudem wird der Kaminausstoss nicht vollständig aus dem System entfernt, sondern nur leicht verlagert. Wir gehen deshalb davon aus, dass die normale Streuung der Messwerte für die Arbeiter grösser ist als die Veränderung, welche durch die Absaugung von Bohle und Wanne hervorgerufen wird. Trotzdem werden im Folgenden die A- und B-Proben separat dargestellt und, wo sinnvoll, bezüglich des Arbeitsablaufes und der Meteorologie diskutiert.

Die Konzentrationswerte werden für 3 Gruppen von Messpunkten separat dargestellt: die Kolonne ***Fertiger*** stellt jene 4 Proben dar, welche fix auf dem Fertiger fixiert waren. Da diese nicht vom Verhalten der Arbeiter abhängig sind, geben sie Aufschluss über die Änderungen, welche auf den Arbeitsablauf oder die Meteorologie zurückzuführen sind. Der ***Fahrer*** wird in einer separaten Kolonne aufgeführt, da auf Grund von Literaturdaten erwartet wurde, dass dieser der höchsten Belastung ausgesetzt ist. Schliesslich umfasst die Gruppe der ***Arbeiter*** alle anderen Mitarbeiter, welche mit Personal Samplern ausgerüstet waren. Die detaillierten Messwerte, sowie weitere Angaben zu den Arbeitern und der Probenahme sind im Anhang 2 dargestellt.

3.4.1 Total Particulate Matter (TPM)

Unter TPM verstehen wir jene Aerosole, welche sich unter den in Kapitel 3.2 definierten Bedingungen auf einem Filter abscheiden. Die Methoden zur Bestimmung dieser Masse unterscheiden sich leicht von Land zu Land [38] [39]. Sinngemäss lassen sich aber die hier bestimmten Daten mit den Grenz- oder Richtwerten folgender Länder vergleichen:

Deutschland: Bitumendampf = 10 mg/m^3; Arbeitsplatzgrenzwert [40]
USA: Asphalt Fume = 5 mg/m^3; REL= Recommended Exposure Limit [41]
Schweiz: MAK, Bitumen, Dämpfe und Aerosole der Heissverarbeitung = 10 mg/m^3 [13]

Der MAK-Wert für Bitumendämpfe bezieht sich auf die Infrarot-Absorption des Extrakts von auf einem Filter und XAD-2 gesammelten Aerosolen und Dämpfen [42]. Dieses Verfahren ist deutlich verschieden vom hier verwendeten gravimetrischen Vorgehen. Da letzteres aber die Summe aller abgeschiedenen Feststoffe erfasst, und die filtergängigen PAK massenmässig wenig relevant sind, kann der Wert auch zur qualitativen Beurteilung des MAK-Werts für Bitumendämpfe verwendet werden. Der in der SUVA Richtlinie vorgesehene allgemeine Staubgrenzwert beträgt zudem ebenfalls 10 mg/m^3, wodurch die Beurteilung unabhängig vom verwendeten Parameter wird.

Tabelle 15: TPM Konzentrationen (mg/m^3)

	Fertiger		Fahrer		Arbeiter	
	A	B	A	B	A	B
Wiggertal	0.3 - 0.6	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Baregg	2.79 - 3.85	0.64 - 1.12	2.0	0.7	1.2 - **3.8**	0.8 - 1.1
Thalheim	0.26 - 1.49	0.45 - 1.65	1.3	2.8	0.1 - 1.3	0.2 - 2.8

Aus Tabelle 15 lässt sich entnehmen, dass in keinem der Versuche der tiefste oben erwähnte Wert von 5 mg/m^3 übertroffen wird. Die Bitumendampfkonzentrationen streuen bei allen Messungen relativ stark. Am tiefsten waren sie bei den Messungen in Wiggertal, wobei dort die Datenmenge (N=4) gering ist. Im Baregg ist die Belastung offenbar relativ homogen zwischen Fertiger, Fahrer und den anderen Arbeitern verteilt. Dies trifft in Thalheim nicht zu. Bei den Arbeitern ist nur ein einzelner Wert mit 2.8 mg/m^3 etwas höher und wurde bei jener Person gemessen, welche immer sehr nahe beim Fertiger arbeitete. Alle anderen Werte sind deutlich tiefer und liegen im Durchschnitt unter 0.3 mg/m^3. Es scheint, dass im Tunnel eine etwas höhere allgemeine Belastung mit Staub oder Bitumendampf auftritt. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass trotz der starken Lüftung eine mittlere Windgeschwindigkeit erreicht wird, welche mit ca. 0.7 m/s deutlich unter derjenigen von Thalheim (1.8 m/s) liegt.

3.4.2 Toluol löslicher Anteil (TSM)

In dieser Untersuchung wurde der lösliche Anteil der auf dem Filter abgeschiedenen Aerosole durch Extraktion mit Toluol bestimmt. Der Blindwert in Vorversuchen betrug trotz Optimierung der Filtermaterialien bei 6 Wiederholmessungen 0.1 ± 0.1 mg/Filter. Bei einem Erweiterungsfaktor von 2 für ein 95% Vertrauensintervall ergibt sich eine Unsicherheit durch den Blindwert von 0.2 mg/Filter. Da über 80% aller Messungen mittels Personal Samplern unterhalb dieses Wertes lagen, wird der TSM hier nicht weiter besprochen.

3.4.3 EPA-PAK

Tabelle 16: PAK gemäss EPA ($\mu g/m^3$)

	Fertiger		Fahrer		Arbeiter	
	A	B	A	B	A	B
Wiggertal	36 - 45	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Baregg	185 - 508	95 - 160	79	91	23 - 101	41 - 120
Thalheim	80 - 207	130 - 439	375	431	19 - 62	11 - 64

Für die Summe der PAK gibt es in der Schweiz keinen Grenz- oder Referenzwert. Dies ist insofern sinnvoll, als die Toxizität der einzelnen Stoffe sehr unterschiedlich ist. Nebst der grossen Streuung der Werte fällt auf, dass beim Fahrer in Thalheim die weitaus höchsten Werte gemessen wurden. Damit wird die besonders hohe Belastung des Fahrers (vgl. TPM) bestätigt. Absolut gesehen wird die Summe der PAK durch Naphthalin und die 3-Ring PAK dominiert. Die deutlich höheren Werte des Fahrers in Thalheim werden in den TPM Daten nicht wiedergegeben. Dies illustriert deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung der Aerosole.

3.4.4 Benzo(a)pyren

Aufgrund seiner hohen kanzerogenen Potenz und seines Anteils von typischerweise 1–10 % in PAK-Mischungen (Baregg 8%, Thalheim 6%) wird Benzo(a)pyren (BaP) häufig als Leitsubstanz zur orientierenden Bestimmung einer PAK-Exposition gebraucht. Der MAK-Wert für Benzo(a)pyren von 2 $\mu g/m^3$ stellt eine Grösse dar, die keine exakte Beurteilung der Kanzerogenität einer PAK-Mischung erlaubt, jedoch zu einer groben Einschätzung herangezogen werden kann.

Tabelle 17: Benzo(a)pyren ($\mu g/m^3$)

	Fertiger		Fahrer		Arbeiter	
	A	B	A	B	A	B
Wiggertal	0.01 - 0.05	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Baregg	0.2 - 0.7	0.1 - 0.3	0.11	0.06	0.01 - 0.16	0.03 - 0.**2**
Thalheim	0.00 - 0.04	0.00 - 0.04	0.03	0.07	0.003 - 0.010	0.003 - 0.020

Die gemessen Werte für Benzo(a)pyren lagen meist mehr als eine Grössenordnung, mindestens aber einen Faktor 3 unter dem gültigen MAK-Wert. Aufgrund der tiefen Konzentrationen ist eine detailliertere Analyse der Daten nicht sinnvoll.

3.4.5 Phenol/Kresol

In teerhaltigem Belagsmaterial werden zum Teil erhebliche Mengen Phenole und Kresole gefunden. Am Arbeitsplatz gelten für diese Stoffe in der Schweiz die MAK-Werte von 19 bzw. 22 mg/m^3. Bei der Probenaufbereitung und ersten halbquantitativen Analysen zeigte sich jedoch, dass die Konzentrationen sehr klein waren. Es wurden deshalb nur wenige Proben analysiert. Diese Werte liegen ungefähr zwei Grössenordnungen unter den MAK-Werten.

Tabelle 18:Summe der Phenole und Kresole (mg/m^3)

	Fertiger		Fahrer		Arbeiter	
	A	B	A	B	A	B
Wiggertal	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Baregg	n.n.	n.n.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Thalheim	0.29 - 0.43 (N=2)	0.57 - 0.78 (N=2)	n.b	n.b.	n.b.	n.b.

3.4.6 Erfassungsrate

Die Erfassungsrate entspricht jenem Anteil, der im Bereich der Einbaubohle, bzw. Vorratswanne erfassten Gase und Aerosole, welche über den Kamin abgesaugt werden. Die am Kamin bestimmten Massenströme entsprechen demzufolge nur ca. 15 - 24 % der effektiv im Bereich der Bohle oder Wanne anfallenden Emissionen (vgl. Kapitel 3.2.5). In Wiggertal wurde die Absaugung nur optisch durch den Einsatz einer Rauchmaschine beurteilt. Bei den Messungen Baregg und Thalheim wurde das SF_6 jeweils während der A-Probe (mit Absaugung) zugegeben und daraus eine mittlere Erfassungsrate bestimmt (Tabelle 19).

Tabelle 19: Erfassungsrate (%)

	Einbaubohle	Vorratswanne
Wiggertal	n.b.	n.b.
Baregg	24	15
Thalheim	19	22

3.4.7 Massenflüsse

Über 80% der Aerosole werden im Bereich der Einbaubohle emittiert. Unseres Wissens wurden die anderen Quellen noch nie systematisch erfasst, weshalb ein Vergleich mit Literaturwerten nicht möglich ist. Als Referenzgrösse kann die allgemeine, vorsorgliche Emissionsbegrenzung für Gesamtstaub

gemäss LRV, Ziffer 4, betrachtet werden [1]. Der Konzentrationswert von 50 mg/m^3 muss gemäss LRV dann eingehalten werden, wenn der Massenstrom von 500 g/h überschritten wird. Der Massenstrom war im Baregg deutlich grösser als in Thalheim, aber die Summe von Bohle, Wanne und Belagsoberfläche lag mit 79 g/h immer noch weit unter der Bagatellgrenze von 500 g/h.

Tabelle 20: TPM (Fume) → Massenfluss und Anteil der wichtigsten Emissionsquellen

	Einbaubohle		Vorratswanne		Belagsoberfläche	
	g/h	%	g/h	%	g/h	%
Baregg	68	85	8	10	4.7	5.8
Thalheim	16	80	3	15	0.9	4.5

Tabelle 21: PAK gemäss EPA → Massenfluss und Anteil der wichtigsten Emissionsquellen

	Einbaubohle		Vorratswanne		Belagsoberfläche	
	g/h	%	g/h	%	g/h	%
Baregg	14	81	1.6	9	2.1	11
Thalheim	3	55	1.4	25	1.1	20

Auch bei den PAK gemäss EPA (Tabelle 21) lagen die Emissionen im Baregg höher als in Thalheim. Weiter bestätigen diese Werte, dass der grösste Teil der Emissionen im Bereich der Einbaubohle auftreten. Allerdings war der Anteil von 55 % in Thalheim etwas kleiner als bei allen anderen Parametern. Der relativ hohe Beitrag der Belagsoberfläche von 9 % (Baregg), bzw. 20% (Thalheim) ist vor allem auf die eher leichtflüchtigen 2- und 3-Ring PAK zurückzuführen. Es ist durchaus plausibel, dass bei diesen Stoffen die heisse Belagsoberfläche eine wesentliche Emissionsquelle darstellt.

Tabelle 22: BaP →Massenfluss und Anteil der wichtigsten Emissionsquellen

	Einbaubohle		Vorratswanne		Belagsoberfläche	
	g/h	%	g/h	%	g/h	%
Baregg	0.042	91	0.004	9	0.00024	0.5
Thalheim	0.00016	70	0.00007	30	n.n.	-

Für BaP gilt in der LRV (Ziffer 8) ein Bagatellmassenstrom von 0.5 g/h. Dieser wird um mehr als eine Grössenordung unterschritten. Wieder dominierte die Einbaubohle als Emissionsquelle. Im Gegensatz zur Summe der PAK gemäss EPA (Tabelle 21) spielt die heisse Belagsoberfläche bei diesem schwerflüchtigen 5-Ring PAK keine Rolle.

4 Vergleich der Resultate

4.1 Vergleich von Labor- und Feldversuchen

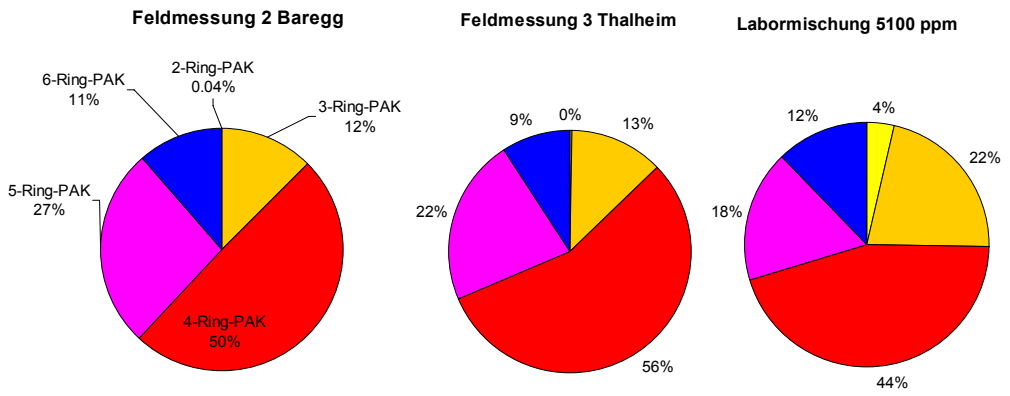


Abbildung 26: PAK-Zusammensetzung der teerhaltigen Bindemittel in den Labor- und Feldversuchen

In Abbildung 26 und Abbildung 27 werden die Bindemittel und Emissionen aus den Labor und Feldversuchen miteinander verglichen. Als Laborreferenz wurde der Versuch mit 5100 ppm PAK bei 160°C verwendet. Die Bindemittel in den Feldversuchen sind in der Zusammensetzung der PAK dem zusammengemischten Bindemittel im Labor sehr ähnlich. Ein Unterschied besteht im höheren Naphthalingehalt des Bindemittels für die Laborversuche. Die Bindemittel im Feld enthalten praktisch kein Naphthalin und einen etwas geringeren Anteil an 3-Ring-PAK. Dieser Befund ist auf den teilweisen Verlust der flüchtigen PAK beim ersten Belagseinbau zurückzuführen. Die Temperatur des Bindemittels, respektive des eingebauten Mischgutes lag zwischen 140 und 160°C.

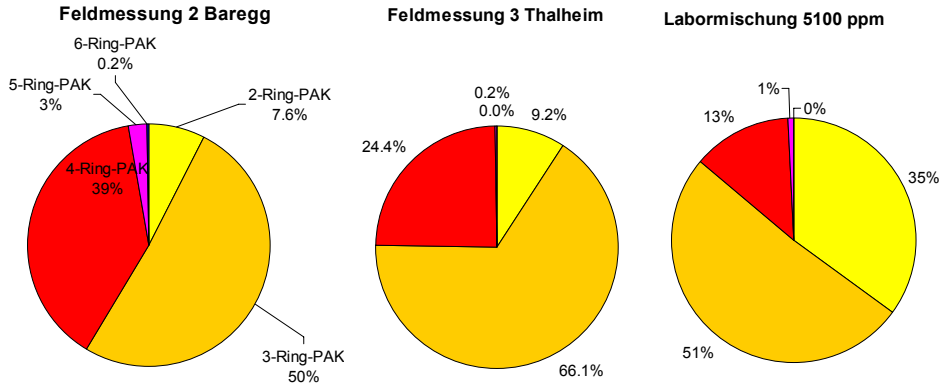


Abbildung 27: PAK-Zusammensetzung der Emissionen in den Labor- und Feldversuchen

In den Emissionen dominieren die 2-4-Ring-PAK sowohl in den Feld- als auch in den Labormessungen mit einem Anteil von über 97% (m/V) klar. Überraschend sind die deutlich messbaren Naphthalinwerte (2-Ring-PAK) von bis zu 9% in den Emissionen der Feldversuche, obwohl diese im Ausgangsmaterial kaum

mehr nachweisbar sind. Die Emissionen nehmen mit steigender Ringgrösse stark ab, wobei die 3-Ring-PAK in allen Messungen den grössten Anteil ausmachen. Dies steht in guter Übereinstimmung mit dem Dampfdruck der einzelnen PAK.

4.2 Diskussion der PAK-Liste

4.2.1 PAK-Profil der Ausgangsmaterialien und der Emissionen

Von den in der Zielliste enthaltenen PAKs konnten Acenaphthylen (EPA-Liste) und Benzo[j]fluoranthen (DFG-Liste) in den für die Laborversuche eingesetzten Bindemitteln nicht nachgewiesen werden. In beiden Feldversuchen war dagegen Benzo[j]fluoranthen im Bindemittel nachweisbar und beim Feldversuch Baregg in geringen Mengen auch Acenaphthylen.

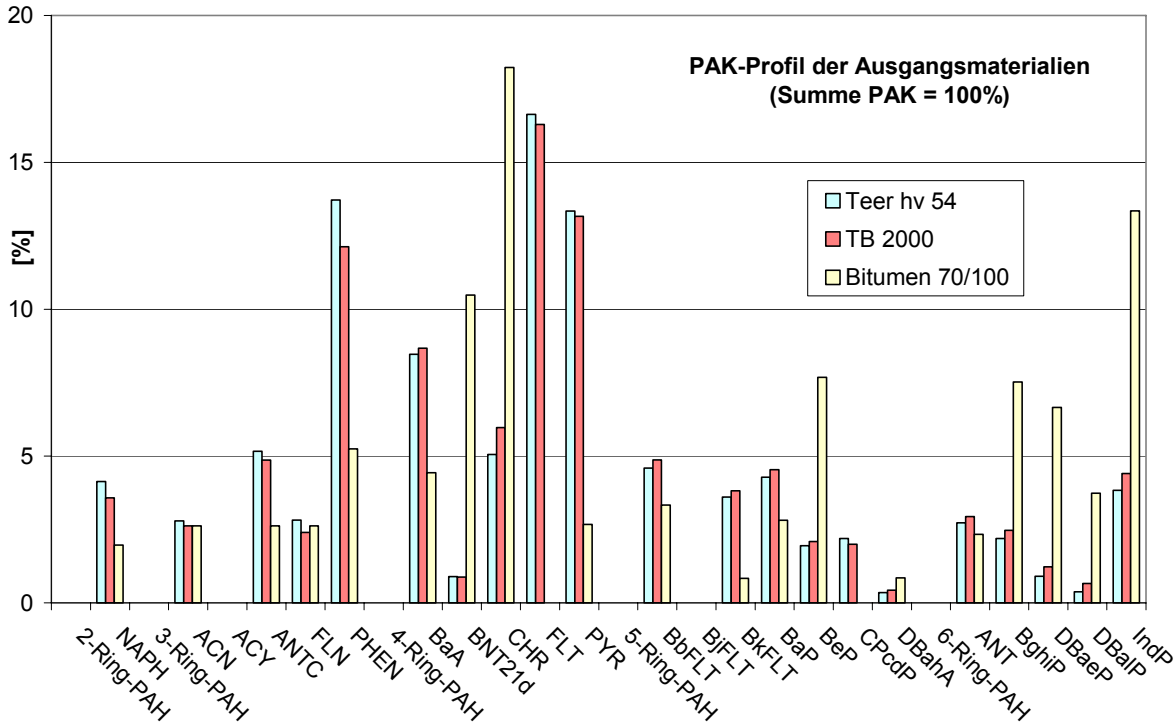


Abbildung 28 PAK-Profile (100% = Summe der PAK im jeweiligen Bindemittel) von verschiedenen Bindemitteln (Abkürzungen siehe Tabelle 2)

Wie Abbildung 28 zeigt, ist die relative Verteilung der einzelnen PAKs im Teer hv 54 und im Teerbitumen TB 2000 beinahe identisch, dies bei Gesamt-PAK-Gehalten von 26% im Falle des Teers und 1.7% beim Teerbitumen. Ein deutlich unterschiedliches PAK-Profil weist dagegen das für die Mischungen eingesetzte Bitumen 70/100 auf. Bei einem Gesamt-PAK-Gehalt von nur 0.015% ist der Beitrag des reinen Bitumen zum PAK-Profil allerdings auch bei den Mischungen mit tiefem TB 2000-Anteil gering.

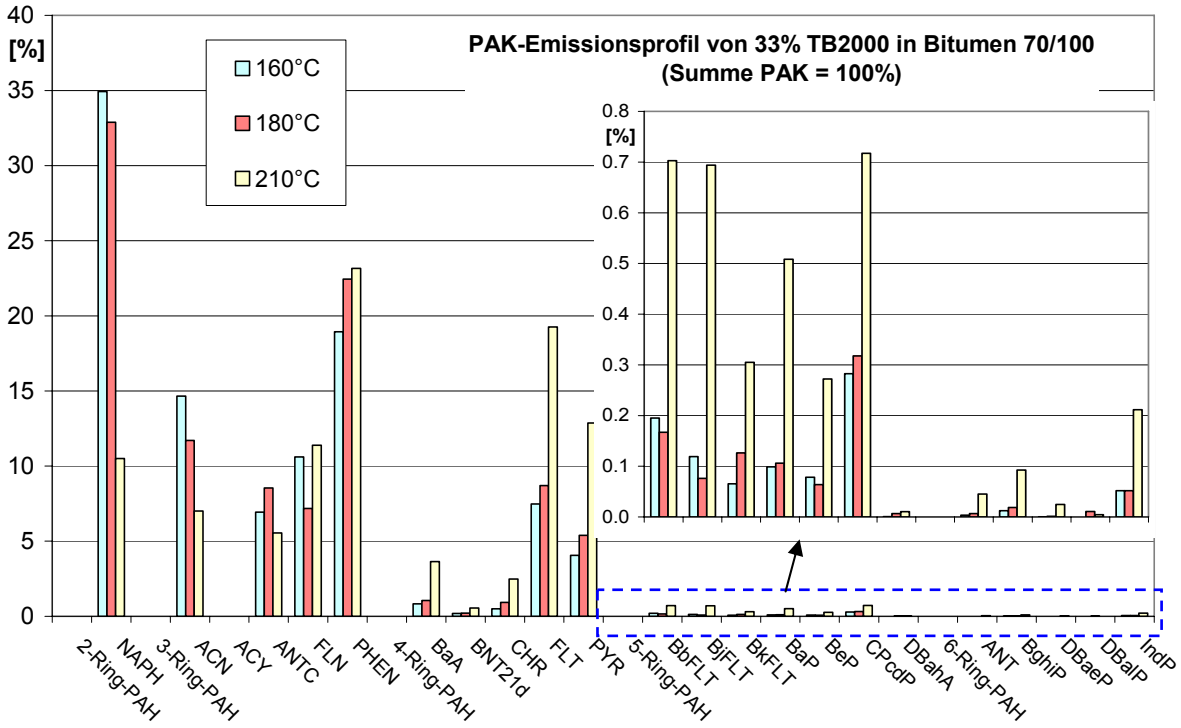


Abbildung 29: Änderung des PAK-Profils mit der Temperatur (Abkürzungen siehe Tabelle 2)

In Abbildung 29 ist der Einfluss der Temperatur auf die Zusammensetzung der PAK-Emission am Beispiel der TB2000-B70/100-Mischung mit 5100 ppm EPA-PAK dargestellt. Obwohl bei Erhöhung der Temperatur von 160°C auf 180°C die Emission mengenmässig um 50% zunimmt, verändert sich das PAK-Profil nur unwesentlich. Bei 210°C findet dagegen eine deutliche Verschiebung zu höheren Ringzahlen - und damit zu PAKs mit hohem kanzerogenen Potential - statt.

4.2.2 16-EPA-PAKs

Die Summe der EPA-PAKs wird in teer- und teerbitumenhaltigen Materialien durch die vier PAKs Phenanthren, Benz[a]anthracen, Fluoranthen und Pyren dominiert. Bei den für die Laborversuche verwendeten Bindemitteln trugen sie 57% (Teer hv54) und 56% (TB 2000) zum EPA-PAK-Summenwert bei (Abbildung 30). Bei den Feldversuchen machte ihr Anteil 58% (Baregg) und 63% (Thalheim) aus. Dieser konstante Beitrag zum EPA-Summenwert und die gute analytische Zugänglichkeit lässt diese vier Verbindungen als geeignet erscheinen zum schnellen und kostengünstigen Screening auf teerhaltige Bindemittel und zur Hochrechnung auf den Gehalt an EPA-PAK.

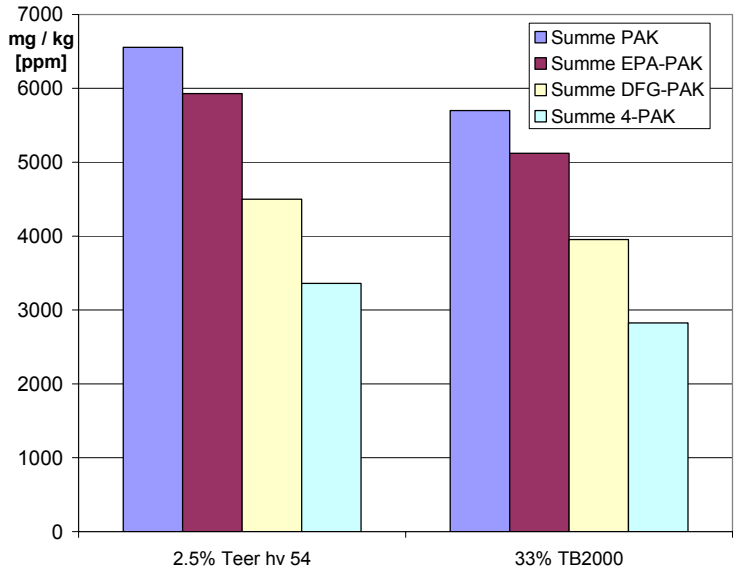


Abbildung 30: PAK-Gehalt im Bindemittel

Obwohl 17 PAKs zur Summenbildung der DFG-PAKs (vgl. Tabelle 2) herangezogen werden, liegen die Summenwerte durchwegs tiefer als die der 16 EPA-PAKs. Besonders ausgeprägt ist dies bei den Emissionswerten (Abbildung 31). Hier liegen die DFG-PAK um einen Drittel und mehr unter den EPA-PAK-Werten. Auch der Beitrag der vier Hauptkomponenten zur Summe der EPA-PAK ist mit 24% und 32% deutlich geringer als beim Ausgangsmaterial. In den in Abbildung 31 dargestellten Versuchsergebnissen ist die Hauptkomponente der PAK-Emission das leichtflüchtige Naphthalin mit Beiträgen von 47% (Teer hv54 160°C) und 35% (TB 2000 160°C).

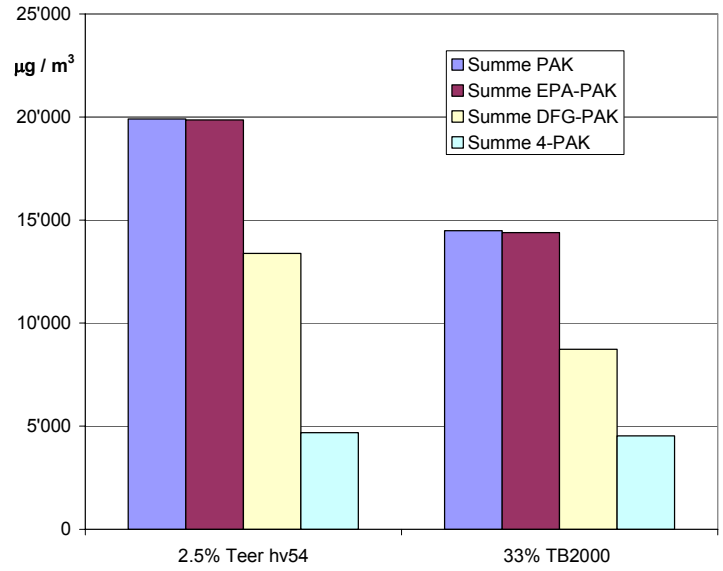


Abbildung 31 PAK-Gehalte der Emissionen bei 160°C

4.2.3 Toxisches Potential der PAK-Emissionen

4.2.3.1 Toxizitätsäquivalenzwert (TEQ)

Der Summenwert der EPA-PAKs setzt sich aus toxikologisch sehr unterschiedlich eingestuften PAKs zusammen. Um trotzdem einen Vergleich des Toxischen Potentials unterschiedlicher PAK-Belastungen zu ermöglichen wird deshalb für ein PAK-Profil oft auch der sogenannte Toxizitätsäquivalenzwert (TEQ) berechnet. Dazu werden die Konzentrationen der einzelnen PAKs mit einem Toxizitätsäquivalenzfaktor (TEF) gewichtet, wobei Benzo[a]pyren ein TEF von 1.00 zugeordnet wird. Verbreitet sind die Toxizitätsäquivalenzfaktoren nach EPA [43] und Nisbet-LaGoy [44] (Tabelle 23). Während für die Berechnung des EPA-TEQ-Werts vorwiegend die schwerflüchtigen partikelgebundenen PAKs herangezogen werden, sind bei Nisbet-LaGoy alle 16 EPA-PAKs miteinbezogen. Da sich die PAK-Emissionen in der vorliegenden Untersuchung hauptsächlich aus flüchtigen PAKs zusammensetzen, wurden für die folgenden gewichteten Emissionsprofile (Abbildung 32) die TEQ-Werte mit den umfassenderen Nisbet-LaGoy-TEFs berechnet.

Tabelle 23 Toxizitätsäquivalenzfaktoren TEF für PAKs [44]

Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF)	**EPA**	**Nisbet-LaGoy**
2-Ring-PAK		
Naphthalin	0	0.001
3-Ring-PAK		
Acenaphthylen	0	0.001
Acenaphthen	0	0.001
Fluoren	0	0.001
Phenanthren	0	0.001
Anthracen	0	0.01
4-Ring-PAK		
Fluoranthen	0	0.001
Pyren	0	0.001
Benz(a)anthracen	1	0.1
Chrysen	1	0.01
5-Ring-PAK		
Benzo(a)pyren	1	1
Benzo(b)fluoranthen	1	0.1
Benzo(k)fluoranthen	1	0.1
Dibenz(a,h)anthracen	1	5
6-Ring-PAK		
Benzo(ghi)perylen	0	0.01
Indeno(1,2,3-cd)pyren	1	0.1

4.2.3.2 TEF-Gewichtung der Emissionen

In Abbildung 32 sind die PAK-Profile der Emissionen eines Bindemittels bestehend aus 33% TB2000 und 67% Bitumen 70/100 (EPA-PAK-Gehalt 5100 mg/kg) bei 160°C und 180°C bezüglich der Massenkonzentration und der TEF-gewichteten Konzentration gegenübergestellt. Während der Beitrag der 5- und 6-Ring PAK zur Masse der EPA-PAK vernachlässigbar ist, machen insbesondere die 5-Ring PAK zusammen mit Benz[a]anthracen einen Grossteil des kanzerogenen Potentials aus. Dies äussert sich darin, dass durch die Temperaturerhöhung des Bindemittels das TEQ-Emissionsprofil weit stärker beeinflusst wird als das Massenkonzentrationsprofil.

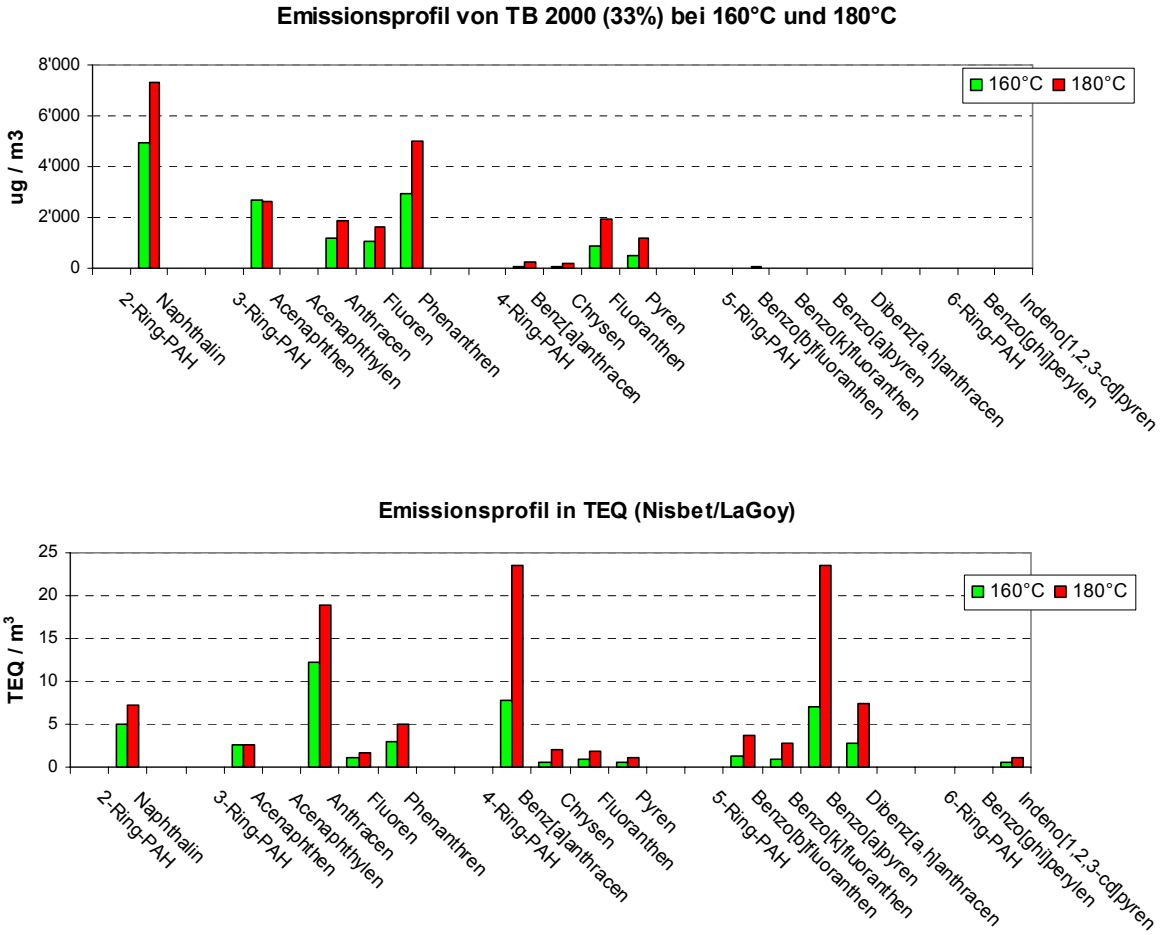


Abbildung 32: Emissionsprofile mit Gewichtung

In Abbildung 33 sind die Summenwerte der Emissionsprofile aus Abbildung 32 dargestellt, ergänzt um die Ergebnisse der Emission bei 160°C eines teerhaltigen Bindemittels mit 5900 mg EPA-PAK/kg (2.5% Teer hv 54 in Bitumen 70/100). Während die EPA-PAK-Konzentration der Emission bei 160°C beim Teerbitumen rund 35% unter derjenigen des Teers hv 54 liegt, verringert sich der TEQ-Wert lediglich um 12%. Eine Temperaturerhöhung von 160°C auf 180°C führte beim teerbitumenhaltigen Bindemittel zu einer Zunahme der PAK-Emission um 57%, während sich das kanzerogene Potential um 224% erhöhte.

Es zeigt sich, dass eine rein massenmässige Erfassung der PAK-Emission einer Abschätzung der Gesundheitsgefährdung nicht genügend gerecht wird.

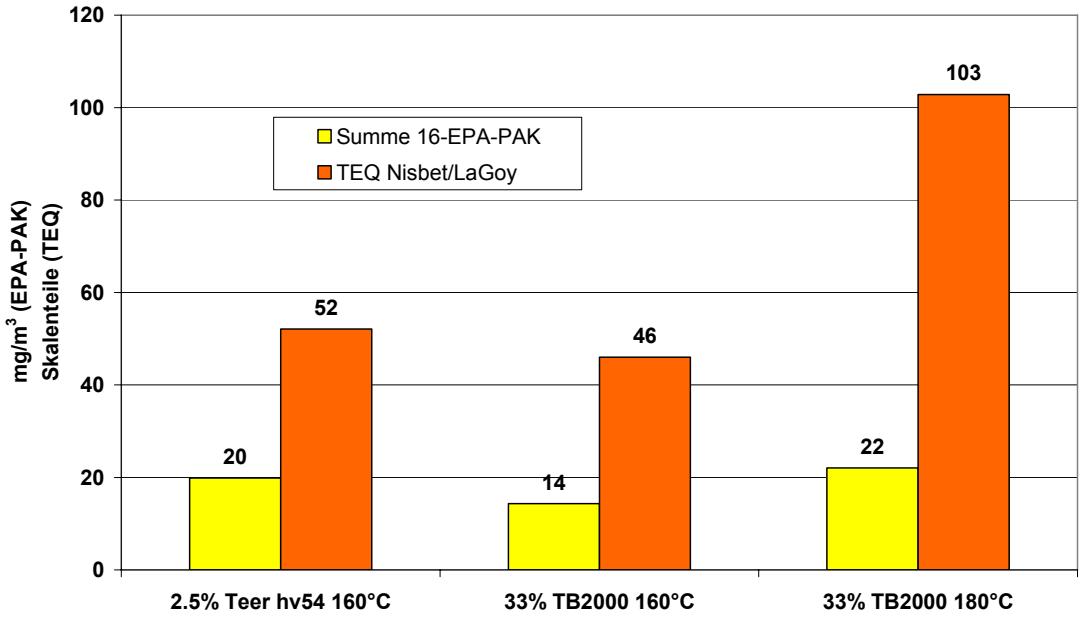


Abbildung 33: Einfluss der TEQ-Gewichtung auf die EPA-PAK-Summenwerte

4.2.3.3 Benz[a]pyren als Leitkomponente

Benzo[a]pyren wird wegen seines hohen kanzerogenen Potentials oft als Leitkomponente für eine PAK-Belastung verwendet. Dies äussert sich zum Beispiel darin, dass der TEQ-Wert einem Benzo[a]pyren-Äquivalenzwert entspricht. In Abbildung 34 sind die TEQ-Werte von zwei Laborversuchsreihen den entsprechenden BaP-Gehalten gegenübergestellt. In der ersten Versuchsreihe wurde der EPA-PAK-Gehalt im Bindemittel durch Zugabe von Teer hv 54 schrittweise von 2400 auf 47000 mg/kg erhöht bei einer unveränderten Temperatur von 160°C.

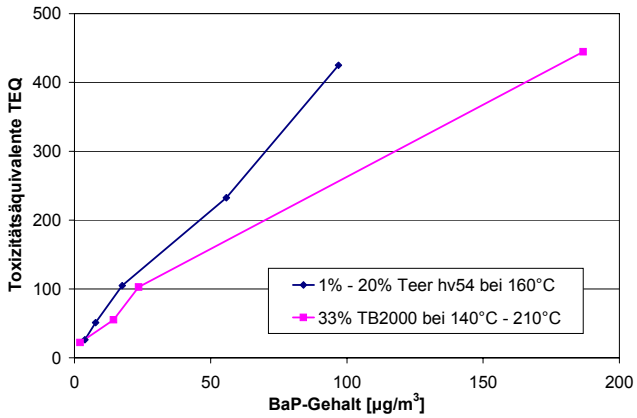


Abbildung 34: Korrelation zwischen TEQ und BaP in den Emissionen

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde die Bindemitteltemperatur bei einer TB2000-Mischung mit gleichbleibendem PAK-Gehalt (5100 mg/kg) schrittweise von 140°C auf 210°C erhöht. Mit Ausnahme eines einzigen Wertepaares (210°C bei der TB2000-Mischung) resultiert eine sehr gute Korrelation zwischen BaP-Gehalt und TEQ-Wert. Keine Korrelation ist dagegen zwischen dem EPA-PAK-Gehalt und dem TEQ-Wert feststellbar (Abbildung 35). Es scheint, dass BaP tatsächlich sehr gut als Leitkomponente für das kanzerogene Potential der Bitumendämpfe von teerhaltigen Bindemitteln herangezogen werden kann.

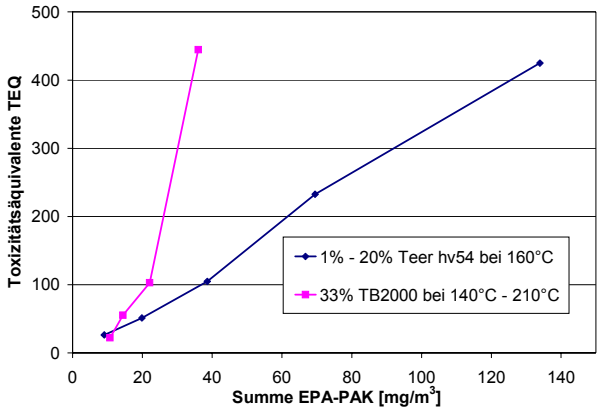


Abbildung 35: Korrelation zwischen TEQ und EPA-PAK in den Emissionen

5 Schlussfolgerungen

5.1 Einfluss von Einbautemperatur, Teergehalt und Viskosität des Bindemittels

Die Laborversuche haben gezeigt, dass die Temperatur des teerhaltigen Bindemittels, die der Einbautemperatur des Mischgutes im Feld entspricht, den grössten Einfluss auf die Gesamtpartikelmasse (TPM) hat. Im Temperaturbereich zwischen 140 und 210°C wurde bezüglich TPM etwa pro 12°C eine Verdoppelung der Emissionen festgestellt. Bei Temperaturen über 210°C kann der Anstieg der Emissionen mit den vorhanden Daten nicht mehr schlüssig beurteilt werden.

Im Unterschied zu den TPM steigen die EPA-PAK-Emissionen weniger stark mit der Temperatur an. Eine Erhöhung um 12°C hat aber immer noch eine Erhöhung der EPA-PAK-Emissionen um etwa 25% zu Folge.

Der Teergehalt im Bindemittel des eingebauten Mischgutes hat einen verhältnismässig geringen Einfluss auf die TPM-Emissionen. Unterhalb von 10'000 ppm EPA-PAK im Bindemittel ist praktisch kein Einfluss auf die TPM feststellbar. Die PAK-Emissionen verlaufen hingegen über den ganzen Konzentrationsbereich proportional zum PAK-Gehalt im Ausgangsbindemittel.

Die Viskosität des eingesetzten Bitumens hat einen deutlichen Einfluss auf die PAK-Emissionen. Vor allem die Emissionen der leichtflüchtigen PAK steigen beim weichem Bitumen um bis zu 80% an, während der Ausstoss an schwerflüchtigen PAK abnimmt.

5.2 Beurteilung der Feldversuche

Wie bei Feldversuchen zu erwarten, streuen alle Werte relativ stark, sowohl innerhalb eines einzelnen Versuchs, als auch von Feldversuch zu Feldversuch. Trotzdem lassen sich viele relevante Schlüsse ziehen. In diesem Kapitel beschränken wir uns auf jene Parameter, für welche national oder international relevante Richt- bzw. Grenzwerte existieren. Auf die Berücksichtigung der Toxizität einzelner PAKs wird im Kapitel 4.2 näher eingegangen.

Benzo(a)pyren (BaP), als Leitsubstanz für PAK, lag meist mehr als eine Grössenordnung, mindestens aber einen Faktor 3 unter dem gültigen MAK-Wert. Die Einhaltung dieses Parameters dürfte deshalb keine Probleme bieten, falls die Arbeiten bei ähnlichen Bedingungen stattfinden, wie sie hier untersucht wurden. Dasselbe gilt auch für die Summe der Phenole und Kresole, welche so tief waren, dass nur wenige Proben quantitativ analysiert wurden.

Der Massenfluss für die Gesamtemission lag bei beiden diesbezüglich ausgewerteten Feldversuchen deutlich unter der Bagatellgrenze von 500 g/h, jener für BaP um mehr als eine Grössenordnung unter dem entsprechenden Bagatellmassenstrom von 0.5 g/h. Daraus kann geschlossen werden, dass die Einbauarbeiten keine wichtigen Schadstoffquellen im Sinn der Luftreinhalteverordnung sind. Für die Beurteilung bezüglich Arbeitshygiene sind diese Zahlen aber nicht relevant.

Die Verteilung der Emissionen zwischen Einbaubohle, Vorratswanne und Belagsoberfläche ist bedeutsam bezüglich möglicher Massnahmen. Es zeigte sich, dass die Emissionen von TPM und EPA-PAK aus der Einbaubohle dominieren. Dies ist nicht überraschend, da das Material an diesem Punkt stark bewegt wird und immer noch sehr heiss ist. Trotz dieser Dominanz können die anderen Quellen -

Vorratswanne und Belagsoberfläche - nicht ganz vernachlässigt werden. Die Erfassung der Emissionen aus dem Bereich der Bohle scheint uns deshalb kein effizientes Mittel zu sein, um die Emissionen sehr deutlich, d.h. um mindestens eine Grössenordnung, zu reduzieren. Klar vernachlässigbar ist die Emission von BaP von der heissen Belagsoberfläche.

Die TPM Konzentrationen lagen oft im Bereich von 2-4 mg/m^3, und damit recht nahe beim US-Grenzwert für Asphalt Fume (5 mg/m^3) und dem MAK-Wert für Bitumendämpfe (10 mg/m^3). Bezüglich der Arbeitshygiene besteht hier also wenig Spielraum. Der Lüftung kommt deshalb eine grosse Bedeutung zu. Sicher ist im Tunnelbau eine sehr starke künstliche Lüftung wichtig, wie sie in unserem Baregg - Feldversuch eingesetzt wurde. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug in Thalheim 1.8 m/s, ein Wert, der im Mittelland oft unterschritten wird. Die Einbautemperaturen lagen in den Feldversuchen zwischen 146 und 158 °C, der PAK-Gehalt im teerhaltigen Bindemittel bei maximal 5600 ppm. Aus den Laborversuchen lässt sich klar zeigen, dass die TPM Konzentration steigender Temperatur und steigendem PAK-Gehalt ansteigt.

In den Feldversuchen wurde teerhaltiges Mischgut mit einem Gehalt bis 5600 ppm EPA-PAK bei Temperaturen zwischen 150 und 160°C eingebaut. Hierbei wurde keiner der MAK-Grenzwerte überschritten. Wenn der Belag mit 5600 ppm EPA-PAK im Baregg mit einer 12°C höherer Einbautemperatur eingebaut worden wäre, das heisst also bei 158°C, wäre eine Verdoppelung der TPM von 3.8 auf 7.6 mg/m^3 zu erwarten gewesen. Damit wäre der Grenzwert von 10 mg/m^3 schon beinahe erreicht. Wenn wir davon ausgehen, dass alle Feldversuche dank guter Lüftung keinen "worst case" darstellen, so ist bei höheren PAK-Gehalten oder bei einer höheren Einbautemperatur eine Überschreitung der MAK-Werte für Bitumendämpfe und BaP zu erwarten.

5.3 Gesamtbeurteilung

Nebst den in diesem Bericht beschriebenen Resultaten aus Labor- und Feldversuchen müssen die beiden untenstehenden relevanten Gesetzestexte bei der Gesamtbeurteilung berücksichtigt werden.

SUVA-Richtlinie Grenzwerte am Arbeitsplatz, Kapitel 1.3.1.1 [13]

Kanzerogene Stoffe sollten, wenn möglich, durch unschädliche oder weniger schädliche ersetzt werden. Ist aber ihre Verwendung nicht zu umgehen, so sind geeignete technische und arbeitsmedizinische Massnahmen zu treffen, um die Gefährdung der damit Beschäftigten soweit als möglich oder ganz auszuschalten.

Eidgenössische Verfügung über die Vermeidung von Berufskrankheiten, Artikel 2 [14]

Stoffe, welche die Gesundheit gefährden, sind durch harmlosere zu ersetzen, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist.

Aus den Laborversuchen wird klar, dass der PAK-Gehalt im Bindemittel und die Einbautemperatur möglichst stark reduziert werden müssen um der SUVA-Richtlinie und der Eidgenössischen Verfügung zu genügen. Eine möglichst tiefer PAK-Gehalt widerspricht jedoch beim heute üblichen Vorgehen dem Verdünnungsverbot [2].

Die stoffspezifischen, gesetzlichen Grenz- und Richtwerte werden bei den hier untersuchten Bedingungen eingehalten.

Es muss also im Wesentlichen die technische Machbarkeit und wirtschaftliche Tragbarkeit von tiefen Einbautemperaturen und niedrigem PAK-Gehalt im Bindemittel beurteilt werden. Berücksicht werden müssten wohl auch Überlegungen zu Sicherheit und Ökologie von alternativen Verfahren der Entsorgung von teerhaltigem Recyclinggranulat. Diese Aspekte waren jedoch nicht Teil der nun vorliegenden Untersuchungen.

Aus der Sicht der Autoren dieser Studie lässt sich eine Beibehaltung des heute maximalen PAK-Gehalts von 5000 ppm im Bindemittel bei maximalen Einbautemperaturen von 160 °C rechtfertigen, weil damit die MAK-Werte im Normalfall eingehalten werden. Eine weitere Reduktion der Einbautemperatur, sowie alternative Entsorgungswege für stark teerhaltiges Recyclingmaterial wären jedoch wünschenswert.

Für die Beurteilung der Emissionen aus teerhaltigem Mischgut genügt die Messung des BaP-Gehaltes, da dieser Wert gut mit den gewichteten PAK-Emissionen (TEQ) korrelieren, die das gesundheitliche Risiko widerspiegeln.

5.4 Weiterer Forschungsbedarf

Es hat sich gezeigt, dass die Daten aus den zwei Feldversuchen mit teerhaltigem Material nicht ausreichen, um eine Korrelation zwischen Labor- und Feldversuchen durchführen zu können. Um die notwendige Datenbasis zu erhalten, müssten noch zusätzliche Feldmessungen durchgeführt werden.

In diesem Forschungsprojekt wurden keine Feldversuche mit Gussasphalt durchgeführt. In den Laborversuchen hat sich jedoch gezeigt, dass die Emissionen bei den üblichen Einbautemperaturen von 220 bis 250°C sehr stark ansteigen. Dies bedeutet, dass auch schon Spuren von Teer im Gussasphalt dazu führen könnten, dass die MAK-Werte von BaP überschritten werden könnten. Die Daten für eine zuverlässige Abschätzung der Emissionen von Gussasphalt mit geringem Teeranteil sind momentan nicht ausreichend und müssten noch erarbeitet werden.

Allerdings wird behauptet, dass bisher für die Herstellung von Gussasphalt kein Recyclinggranulat aus Walzasphalt verwendet wird, sondern höchstens Recyclingmaterial aus der Gussasphaltherstellung selbst. Andererseits werden neue Anwendungsbereich für die den überschüssigen Recyclingasphalt gesucht, weshalb eine Verwendung von Recycling-Walzasphalt in der Zukunft nicht ausgeschlossen werden kann. Es wird deshalb empfohlen, zusätzliche Feldmessungen durchzuführen, wenn sich herausstellt, dass rezyklierter Walzasphalt auch im Gussasphalt eingesetzt wird.

6 Literaturverzeichnis

[1] Schweiz. Eidgenössisches Departement des Innern, *Luftreinhalte-Verordnung (LRV,* 1985.

[2] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Schweiz, *Abfall - Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle,* 1997.

[3] Cavallo, D., et al., *Assessment of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons during road paving;* Giornale Italiano di Medicina del Lavoro ed Ergonomia, **2003**, 25(SUPPL. 3): p. 98-99.

[4] Bergdahl, I.A. and B. Järvholm, *Cancer morbidity in Swedish asphalt workers;* American Journal of Industrial Medicine, **2003**, 43(1): p. 104-108.

[5] Kauppinen, T., et al., *Mortality and cancer incidence of workers in finnish road paving companies;* American Journal of Industrial Medicine, **2003**, 43(1): p. 49-57.

[6] Randem, B.G., et al., *Mortality from non-malignant diseases among male Norwegian asphalt workers;* American Journal of Industrial Medicine, **2003**, 43(1): p. 96-103.

[7] Burstyn, I., et al., *Mortality from Obstructive Lung Diseases and Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons among Asphalt Workers;* Am J Epidemiol, **2003**, 158: p. 468-478.

[8] Hugener, M., H. Deschwanden, and T. Bühler, EMPA, *Umweltgerechtes Recycling von teerhaltigen Belägen - Teilprojekt 1: Erfassung des Status-Quo und Abklärung der Bedürfnisse;* **1999**, 102 Seiten.

[9] *SN 640741 Recycling von Bauschutt: Verwertung von Ausbauasphalt*, Schweizer Norm **1993**.

[10] *Brief vom 16.9.1996 an die Kantonsingenieure*.

[11] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Schweiz, *Richtlinie Luftreinhaltung auf Baustellen, Baurichtlinie Luft,* 2002.

[12] Bundesamt für Umwelt, *Empfehlung, Entsorgung von teerhaltigem Ausbauasphalt;* **2004**.

[13] Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, *Grenzwerte am Arbeitsplatz*, 2005.

[14] Eidgenössisches Departement des Innern, *Verfügung des Eidgenössischen Departementes des Innern über die technischen Massnahmen zur Verhütung von Berufskrankheiten, die durch chemische Stoffe verursacht werden*, **1960**.

[15] Emmenegger, L., M. Hugener, and P. Mattrel, EMPA-Bericht 417556, *Emissionsmessungen (PAK, Phenol und Kresole) bei der Herstellung von teerhaltigen Strassenbelägen;* **2001**, 16.

[16] Emmenegger, L., et al., EMPA, *Emissionsmessungen (PAK) in der Abluft der Belagsmischerwaage der Firma Belag und Beton AG in Rothenburg;* **2000**, EMPA-Bericht 409302.

[17] Amtliche Sammlung des Bundesrechts (Schweiz), SR 814.01, *Gewässerschutzverordnung (GSchV)*, 1998.

[18] *Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis – Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV (European Waste Catalogue);* **2001**.

[19] Hirnschall, H., *Richtlinie für Recycling-Baustoffe;* **2004** (6. Auflage), 19 Seiten.

[20] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln - der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)*, 1997.

[21] Morton, B.S., A.T. Visser, and E. Horak. *Foamed tar technology: an innovation in pavement stabilization*. in *Federal aviation administration airport technology transfer conference*. **2002** South Africa.

[22] Mahler, B.J., et al., *Parking Lot Sealcoat: An Unrecognized Source of Urban Polycyclic Aromatic Hydrocarbons;* Environ. Sci. Technol., **2005**, 39: p. 5560 - 5566.

[23] *Coal tar pavements products*, **2005**, City of Austin (USA). p. 3.

[24] Jacob, J. and A. Seidel, Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft, **2002**, 62: p. 239-246.

[25] Ramond, B. *Bitumen Fume Testing Aimed at Improving Practices in the Workplace*. in *2nd Eurasphalt& Eurobitume Congress*. **2000** Barcelona.

[26] Brandt, H.C.A. and P.C.d. Groot, *A laboratory rig for studying health aspects related to bitumen fume exposure;* Rassegna del bitume, **1994**, 23: p. 9-15.

[27] Kurek, J.T., et al., *Laboratory generation and evaluation of paving asphalt fumes;* Transportation Research Record, **1999**, 1661: p. 35-40.

[28] *Laboratory generation and evaluation of paving asphalt fumes*, Asphalt Institute.

[29] Brandt, H.C.A. *Personal exposures to bitumen fumes and PAC during road paving and in laboratory simulations*. in *5th Eurasphalt congress*. **1992** The Hague, The Netherlands.

[30] NIOSH, National Institute for Occupational Security and Help (NIOSH), *"Cresol and Phenol";* **1994**, Method 2546: p.

[31] EN 12591 *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Anforderungen an Strassenbaubitumen,* Europäische Norm 1999..

[32] Brandt, H.C.A. and P.C. de Groot, *A laboratory rig for studying aspects of worker exposure to bitumen fumes;* American Industrial Hygiene Association Journal, **1999**, 60(2): p. 182-190.

[33] Brandt, H.C.A. *Polycyclic aromatics emissions from hot bitumens*, Symposium on Health Aspects on Asphalt Production and Paving, Stockholm **1990**.

[34] Heikkilä, P., et al. *The composition and measurement of bitumen vapours and fumes*, Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996, Strassburg **1996**.

[35] NIOSH, *Part 1: New Highway-Class Pavers*, in *Engineering Control Guidelines for Hot Mix Asphalt Pavers*. **1997**, National Institute for Occupational Safety and Health (US.),: [Atlanta, Ga.].

[36] ENV 13419-2, *Building products - Determination of the emission of volatile organic compounds - Part 2: Emission test cell method;* **1999**.

[37] Wolkoff, P., *An emission cell for measurement of volatile organic compounds emitted from building materials for indoor use - The field and laboratory emission cell FLEC;* Gefahrstoffe Reinhaltung Der Luft, **1996**, 56(4): p. 151-157.

[38] Brandt, H.C.A., et al., *Sampling and Analysis of Bitumen Fumes;* Annals of Occupational Hygiene, **1985**, 29(1): p. 27-80.

[39] Ekstrom, L.G. and e.a. . *International studies to compare methods for personal sampling of bitumen fumes;* Journal Of Environmental Monitoring, **2001**, 3(5): p. p. 439-445.

[40] *Bearbeitungsliste des AGS zur TRGS 900*, 2006.

[41] National Institute for Occupational Safety and Health., *NIOSH pocket guide to chemical hazards*. **2005**, Cincinnati, Ohio: U.S. Dept. of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. xxiv, 429 p.

[42] Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (BGIA), *Bitumen – Dämpfe und Aerosole 6305;* Messung von Gefahrstoffen, BGIA-Arbeitsmappe, **1997**, 19. Lieferung(6305).

[43] United States Environmental Protection Agency EPA, *Provisional guidance for quantitative risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons;* **1993**.

[44] Nisbet, I.C.T. and P.K. LaGoy, *Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs);* Regulatory Toxicology and Pharmacology **1992**, 16: p. 290-300.

Anhang 1
Resultate Laborversuche

Probe 1: Filter + Adsorptionsröhrchen als Backup

Probe 2: Filter + Adsorptionsröhrchen als Backup

Probe 3: Adsorptionsröhrchen mit niedrigerem Flow

Phenol: Adsorptionsröhrchen mit niedrigerem Flow

Vorversuche V29 - V31

Bindemittel TB2000
Temperatur 160°C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	*mg / m³*	**V29 Probe 1**	**V29 Probe 2**	**V30 Probe 1**	**V30 Probe 2**	**V31 Probe 1**	**V31 Probe 2**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [l]		206	199	205	200	200	197
TPM (Total Particulate Matter)		26.4	23.5	22.2	24.7	28.3	26.6
TSM (Toluene Soluble Matter)		26.7	23.6	22.2	24.8	28.3	27.0
% TSM		101	100	100	100	100	102

PAH	*µg / m³*	**V29 Probe 1**	**V29 Probe 2**	**V30 Probe 1**	**V30 Probe 2**	**V31 Probe 1**	**V31 Probe 2**
Summe PAH		17'466	14'108	15'253	16'816	20'693	18'428
Summe EPA		17'332	13'993	15'151	16'668	20'543	18'285
Summe DFG		9'079	7'573	7'764	8'774	10'334	9'395
2-Ring-PAH							
Naphthalin		1'808	1'860	2'014	2'104	2'433	2'161
3-Ring-PAH	*Summe*	*11'542*	*9'802*	*9'971*	*11'168*	*13'621*	*11'749*
Acenaphthen		2'361	2'081	2'410	2'350	3'337	2'755
Acenaphthylen		*n.n. (0.05)*	*n.n. (0.05)*	*n.n. (0.05)*	*n.n. (0.05)*	*n.n. (0.05)*	*n.n. (0.05)*
Anthracen		1'449	1'173	1'173	1'408	1'498	1'304
Fluoren		2'332	1'985	2'131	2'395	2'997	2'547
Phenanthren		5'400	4'563	4'257	5'015	5'789	5'144
4-Ring-PAH	*Summe*	*3'943*	*2'320*	*3'142*	*3'359*	*4'439*	*4'334*
Benz[a]anthracen		221	128	174	185	231	247
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		39	45	34	45	45	51
Chrysen		120	100	116	137	179	204
Fluoranthen		2'235	1'286	1'766	1'877	2'513	2'409
Pyren		1'327	761	1'051	1'115	1'471	1'424
5-Ring-PAH	*Summe*	*149*	*109*	*109*	*156*	*168*	*153*
Benzo[b]fluoranthen		28	19	21	28	32	32
Benzo[j]fluoranthen		20	6.2	8.8	16	25	17
Benzo[k]fluoranthen		23	14	17	21	25	24
Benzo[a]pyren		13	12	10	17	20	19
Benzo[e]pyren		7	7	7	8	10	14
Cyclopenta[cd]pyren		58	50	44	65	55	46
Dibenz[a,h]anthracen		1.0	0.9	0.8	1.2	1.5	1.5
6-Ring-PAH	*Summe*	*24*	*16*	*18*	*29*	*32*	*30*
Anthanthren		1.7	1.2	1.4	1.4	1.7	1.6
Benzo[ghi]perylen		2.3	2.3	1.8	4.4	4.8	4.5
Dibenzo[a,e]pyren		0.3	0.4	0.2	0.5	0.5	0.4
Dibenzo[a,l]pyren		7.6	5.1	5.8	12.7	13.3	12.8
Indeno[1,2,3-cd]pyren		11.6	7.5	8.5	10.0	11.7	10.6

Phenole	*mg / m³*	**V29**	**V30**	**V31**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [l]		10.9	10.3	11.6
Summe Phenole		3.41	3.13	4.29
Phenol		1.18	1.03	1.37
o-Kresol		0.44	0.42	0.57
m-Kresol		1.13	1.05	1.47
p-Kresol		0.65	0.63	0.88

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch D32

Bindemittel TB2000
Temperatur 160°C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		28.2	22.4		25.3
TSM (Toluene Soluble Matter)		27.6	21.6		24.6
% TSM		98	96		97

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		202.2	179.7		
Summe PAH		41'790	37'875		39'832
Summe EPA		41'593	37'682		39'637
Summe DFG		23'060	19'575		21'318
2-Ring-PAH					
Naphthalin		11'803	8'168		9'986
3-Ring-PAH	*Summe*	*24'918*	*25'578*		*25'248*
Acenaphthen		7883	7459		7'671
Acenaphthylen					
Anthracen		2'961	3'167		3'064
Fluoren		5'169	5'457		5'313
Phenanthren		8'903	9'496		9'200
4-Ring-PAH	*Summe*	*4'814*	*3'895*		*4'355*
Benz[a]anthracen		278.7	205.4		242
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		47.0	50.1		49
Chrysen		195.5	154.6		175
Fluoranthen		2'700	2'203		2'452
Pyren		1'593	1'282		1'437
5-Ring-PAH	*Summe*	*220*	*203*		*211*
Benzo[b]fluoranthen		36.9	31.2		34.0
Benzo[j]fluoranthen		18.1	13.3		15.7
Benzo[k]fluoranthen		27.5	23.2		25.3
Benzo[a]pyren		21.5	19.4		20.5
Benzo[e]pyren		10.4	9.9		10.1
Cyclopenta[cd]pyren		104	104		104
Dibenz[a,h]anthracen		1.4	1.3		1.3
6-Ring-PAH	*Summe*	*36*	*31*		*33*
Anthanthren		1.7	1.6		1.6
Benzo[ghi]perylen		4.8	4.7		4.8
Dibenzo[a,e]pyren		0.57	0.5		0.52
Dibenzo[a,l]pyren		15.7	13.3		14.5
Indeno[1,2,3-cd]pyren		12.9	10.8		11.8

Phenole	*mg / m³*
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]	10.97
Phenole	4'076
Phenol	1'321
o-Kresol	523
m-Kresol	1'389
p-Kresol	843

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V33

Bindemittel 33% TB2000 + 67% B 70/100
Temperatur 160°C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		10.4	10.5		10.5
TSM (Toluene Soluble Matter)		10.4	10.7		10.6
% TSM		101	102		101

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		218.5	201.9	11.6	
Summe PAH					14'389
Summe EPA					14'345
Summe DFG					8'562
2-Ring-PAH					
Naphthalin				4'922	4'922
3-Ring-PAH	*Summe*	*5'002*	*5'449*		*7'903*
Acenaphthen				2'677	2'677
Acenaphthylen				n.n.	n.n.
Anthracen		1'158	1'268		1'213
Fluoren		1'021	1'134		1'078
Phenanthren		2'824	3'047		2'935
4-Ring-PAH	*Summe*	*1'409*	*1'576*		*1'493*
Benz[a]anthracen		72.0	85.4		79
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		13.7	19.8		17
Chrysen		59.6	68.7		64
Fluoranthen		812	896		854
Pyren		452	507		479
5-Ring-PAH	*Summe*	*60*	*63*		*61*
Benzo[b]fluoranthen		12.1	13.1		12.6
Benzo[j]fluoranthen		5.3	8.0		6.6
Benzo[k]fluoranthen		8.6	9.3		9.0
Benzo[a]pyren		7.0	7.2		7.1
Benzo[e]pyren		3.8	4.7		4.2
Cyclopenta[cd]pyren		23	20		21
Dibenz[a,h]anthracen		0.5	0.6		0.5
6-Ring-PAH	*Summe*	*10*	*11*		*10*
Anthanthren		0.5	0.4		0.4
Benzo[ghi]perylen		1.8	1.7		1.8
Dibenzo[a,e]pyren		0.28	0.3		0.27
Dibenzo[a,l]pyren		3.2	3.2		3.2
Indeno[1,2,3-cd]pyren		4.7	4.9		4.8

Phenole	*mg / m³*
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]	11.7
Summe Phenole	506
Phenol	170
o-Kresol	63
m-Kresol	161
p-Kresol	111

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V34

Bindemittel 33% TB2000 + 67% B 70/100
Temperatur 180°C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		31.4	35.8		33.6
TSM (Toluene Soluble Matter)		31.4	35.6		33.5
% TSM		100	99		100

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		E33EF2	E33EF4	E33EN6	
Summe PAH					22'200
Summe EPA					22'076
Summe DFG					14'159
2-Ring-PAH					
Naphthalin				7'300	7'300
3-Ring-PAH	*Summe*	*7'850*	*9'096*		*11'073*
Acenaphthen				2'600	2'600
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		1'880	1'910		1'895
Fluoren		1'314	1'876		1'595
Phenanthren		4'656	5'310		4'983
4-Ring-PAH	*Summe*	*3'510*	*3'722*		*3'616*
Benz[a]anthracen		229.5	240.9		235
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		51.1	42.9		47
Chrysen		183.5	222.6		203
Fluoranthen		1'893	1'973		1'933
Pyren		1'154	1'242		1'198
5-Ring-PAH	*Summe*	*173*	*211*		*192*
Benzo[b]fluoranthen		38.8	35.3		37.0
Benzo[j]fluoranthen		n.n.	33.7		16.8
Benzo[k]fluoranthen		27.6	28.4		28.0
Benzo[a]pyren		23.2	24.0		23.6
Benzo[e]pyren		12.9	15.4		14.1
Cyclopenta[cd]pyren		70	71		71
Dibenz[a,h]anthracen		0.5	2.5		1.5
6-Ring-PAH	*Summe*	*21*	*18*		*20*
Anthanthren		1.4	1.5		1.5
Benzo[ghi]perylen		3.9	4.3		4.1
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	0.5		0.24
Dibenzo[a,l]pyren		4.7	n.n.		2.3
Indeno[1,2,3-cd]pyren		10.9	12.0		11.5

Phenole	*mg / m³*
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]	11.7
Summe Phenole	2.33
Phenol	0.73
o-Kresol	0.31
m-Kresol	0.79
p-Kresol	0.51

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V35

Bindemittel 2.5% Teer hv 54 in Bitumen 70/100
Temperatur

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	*mg / m^3*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		8.4	9.3		8.9
TSM (Toluene Soluble Matter)		8.2	9.1		8.6
% TSM		98	97		97

PAH	*µg / m^3*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		1.7	2.1	112.0	
Summe PAH					19'909
Summe EPA					19'862
Summe DFG					13'385
2-Ring-PAH					
Naphthalin				9'433	9'433
3-Ring-PAH	*Summe*	*5'417*	*5'592*		*8'789*
Acenaphthen				3'285	3'285
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		1'076	1'115		1'096
Fluoren		1'285	1'213		1'249
Phenanthren		3'056	3'264		3'160
4-Ring-PAH	*Summe*	*1'509*	*1'719*		*1'614*
Benz[a]anthracen		91.4	102.3		97
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		20.3	17.8		19
Chrysen		66.3	72.8		70
Fluoranthen		827	953		890
Pyren		504	573		538
5-Ring-PAH	*Summe*	*64*	*74*		*69*
Benzo[b]fluoranthen		13.0	14.6		13.8
Benzo[j]fluoranthen		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.7)
Benzo[k]fluoranthen		9.3	10.1		9.7
Benzo[a]pyren		7.3	8.3		7.8
Benzo[e]pyren		4.2	4.7		4.4
Cyclopenta[cd]pyren		30	36		33
Dibenz[a,h]anthracen		0.2	0.2		0.2
6-Ring-PAH	*Summe*	*4*	*5*		*4*
Anthanthren		0.4	0.4		0.4
Benzo[ghi]perylen		0.8	1.1		0.9
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.09)
Dibenzo[a,l]pyren		0.1	0.5		0.3
Indeno[1,2,3-cd]pyren		2.4	2.9		2.7

Phenole	*mg / m^3*
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]	1.8
Summe Phenole	0.51
Phenol	0.17
o-Kresol	*0.08*
m-Kresol	0.17
p-Kresol	*0.09*

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V36

Bindemittel 5% Teer hv 54 in Bitumen 70/100
Temperatur

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		17.1	17.6		17.4
TSM (Toluene Soluble Matter)		16.7	16.9		16.8
% TSM		97	96		97

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		1.7	2.1	112.0	
Summe PAH					38'692
Summe EPA					38'591
Summe DFG					25'496
2-Ring-PAH					
Naphthalin				17'077	17'077
3-Ring-PAH	*Summe*	*11'627*	*11'380*		*17'620*
Acenaphthen				6'117	6'117
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		2'048	1'808		1'928
Fluoren		2'923	3'161		3'042
Phenanthren		6'656	6'411		6'534
4-Ring-PAH	*Summe*	*3'918*	*3'749*		*3'834*
Benz[a]anthracen		236.8	217.7		227
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		40.2	37.5		39
Chrysen		166.8	154.7		161
Fluoranthen		2'143	2'052		2'097
Pyren		1'332	1'288		1'310
5-Ring-PAH	*Summe*	*159*	*144*		*152*
Benzo[b]fluoranthen		31.0	27.2		29.1
Benzo[j]fluoranthen					n.n. (< 0.7)
Benzo[k]fluoranthen		23.0	20.4		21.7
Benzo[a]pyren		18.6	16.5		17.6
Benzo[e]pyren		10.5	9.3		9.9
Cyclopenta[cd]pyren		75	70		73
Dibenz[a,h]anthracen		0.4	0.3		0.4
6-Ring-PAH	*Summe*	*10*	*9*		*10*
Anthanthren		1.0	0.9		1.0
Benzo[ghi]perylen		2.4	2.1		2.3
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.09)
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.03)
Indeno[1,2,3-cd]pyren		6.7	5.8		6.3

Phenole	*mg / m³*	
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		1.8
Summe Phenole		0.81
Phenol		0.27
o-Kresol		*0.13*
m-Kresol		0.28
p-Kresol		*0.13*

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V37

Bindemittel 33% TB2000 + 67% B 70/100
Temperatur 140°C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		2.3	2.5		2.4
TSM (Toluene Soluble Matter)		2.5	2.8		2.7
% TSM		110	111		111

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		211.5	190.3	12.0	
Summe PAH					10'727
Summe EPA					10'702
Summe DFG					7'342
2-Ring-PAH					
Naphthalin				5'512	5'512
3-Ring-PAH	*Summe*	*3'262*	*2'533*		*4'484*
Acenaphthen				1'587	1'587
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		671	562		617
Fluoren		832	688		760
Phenanthren		1'759	1'282		1'521
4-Ring-PAH	*Summe*	*777*	*621*		*699*
Benz[a]anthracen		25.1	25.8		25
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		9.5	5.3		7
Chrysen		18.7	18.5		19
Fluoranthen		473	367		420
Pyren		252	205		228
5-Ring-PAH	*Summe*	*30*	*30*		*30*
Benzo[b]fluoranthen		4.3	3.9		4.1
Benzo[j]fluoranthen		4.7	4.6		4.6
Benzo[k]fluoranthen		2.9	2.8		2.9
Benzo[a]pyren		2.2	1.9		2.1
Benzo[e]pyren		1.4	1.2		1.3
Cyclopenta[cd]pyren		14	16		15
Dibenz[a,h]anthracen		0.1	0.1		0.1
6-Ring-PAH	*Summe*	*2*	*2*		*2*
Anthanthren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.06)
Benzo[ghi]perylen		0.4	0.4		0.4
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.09)
Dibenzo[a,l]pyren		0.6	0.6		0.6
Indeno[1,2,3-cd]pyren		1.1	1.1		1.1

Phenole	*mg / m³*	
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		12.5
Summe Phenole		1.52
Phenol		0.48
o-Kresol		0.19
m-Kresol		0.51
p-Kresol		0.33

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V40

Bindemittel 50% Teer hv 54 in Bitumen 70/100
Temperatur 160 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		294.5	339.3		316.9
TSM (Toluene Soluble Matter)		290.4	339.6		315.0
% TSM		99	100		99

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		19.9	19.1	3.3	
Summe PAH					271'510
Summe EPA					270'146
Summe DFG					171'492
2-Ring-PAH					
Naphthalin				91'385	91'385
3-Ring-PAH	*Summe*	*84'915*	*96'811*		*120'118*
Acenaphthen				29'255	29'255
Acenaphthylen				n.n. (< 3)	*n.n. (< 3)*
Anthracen		19'182	23'667		21'425
Fluoren		15'266	17'398		16'332
Phenanthren		50'467	55'746		53'106
4-Ring-PAH	*Summe*	*54'976*	*60'869*		*57'922*
Benz[a]anthracen		2626.3	2897.7		2'762
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		351.5	365.7		359
Chrysen		1434.3	1530.8		1'483
Fluoranthen		31'069	34'611		32'840
Pyren		19'494	21'464		20'479
5-Ring-PAH	*Summe*	*1795*	*2134*		*1964*
Benzo[b]fluoranthen		335.8	419.3		377.5
Benzo[j]fluoranthen		254.8	296.5		275.7
Benzo[k]fluoranthen		149.4	184.8		167.1
Benzo[a]pyren		226.6	292.6		259.6
Benzo[e]pyren		121.1	152.8		137.0
Cyclopenta[cd]pyren		703	784		743
Dibenz[a,h]anthracen		3.8	4.6		4.2
6-Ring-PAH	*Summe*	*112*	*130*		*121*
Anthanthren		14.4	13.7		14.1
Benzo[ghi]perylen		27.0	32.7		29.8
Dibenzo[a,e]pyren		3.77	n.n.		1.88
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.3)
Indeno[1,2,3-cd]pyren		66.5	83.6		75.1

Phenole	*mg / m³*
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]	2.8
Summe Phenole	10.13
Phenol	3.37
o-Kresol	1.80
m-Kresol	3.29
p-Kresol	1.67

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V41

Bindemittel 33% TB2000 + 67% B 70/100
Temperatur 210 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		210.4	167.3		188.8
TSM (Toluene Soluble Matter)		206.0	165.1		185.5
% TSM		98	99		98

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		46.9	52.6	4.7	
Summe PAH					36'725
Summe EPA					35'988
Summe DFG					20'724
2-Ring-PAH					
Naphthalin				3'858	3'858
3-Ring-PAH	*Summe*	*15'900*	*13'556*		*17'300*
Acenaphthen				2'572	2'572
Acenaphthylen				n.n. (< 2)	*n.n. (< 2)*
Anthracen		2'198	1'882		2'040
Fluoren		4'674	3'688		4'181
Phenanthren		9'028	7'985		8'507
4-Ring-PAH	*Summe*	*15'877*	*12'620*		*14'249*
Benz[a]anthracen		1486.7	1186.1		1'336
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		234.8	171.1		203
Chrysen		995.8	825.5		911
Fluoranthen		7'885	6'260		7'073
Pyren		5'275	4'178		4'726
5-Ring-PAH	*Summe*	*1313*	*1045*		*1179*
Benzo[b]fluoranthen		290.3	225.8		258.0
Benzo[j]fluoranthen		281.9	227.8		254.8
Benzo[k]fluoranthen		122.9	101.1		112.0
Benzo[a]pyren		205.0	168.4		186.7
Benzo[e]pyren		109.5	90.4		100.0
Cyclopenta[cd]pyren		299	228		263
Dibenz[a,h]anthracen		4.3	3.2		3.7
6-Ring-PAH	*Summe*	*152*	*126*		*139*
Anthanthren		18.1	15.0		16.6
Benzo[ghi]perylen		39.4	28.8		34.1
Dibenzo[a,e]pyren		9.20	8.8		9.00
Dibenzo[a,l]pyren		3.2	n.n.		1.6
Indeno[1,2,3-cd]pyren		82.0	73.3		77.7

Phenole	*mg / m³*
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]	5.4
Summe Phenole	1.31
Phenol	0.42
o-Kresol	*0.18*
m-Kresol	0.44
p-Kresol	*0.27*

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V42

Bindemittel Bitumen 70/100
Temperatur 160 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		5.0	4.5		4.7
TSM (Toluene Soluble Matter)		4.8	4.4		4.6
% TSM		95	98		97

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		205.9	205.8	9.7	
Summe PAH					437
Summe EPA					432
Summe DFG					199
2-Ring-PAH					
Naphthalin				103	103
3-Ring-PAH	*Summe*	*107*	*151*		*232*
Acenaphthen				103	103
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		53	63		58
Fluoren		15	24		19
Phenanthren		39	63		51
4-Ring-PAH	*Summe*	*92*	*110*		*101*
Benz[a]anthracen		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.01)
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		9.7	n.n.		5
Chrysen		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.3)
Fluoranthen		48	65		57
Pyren		35	45		40
5-Ring-PAH	*Summe*				
Benzo[b]fluoranthen		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.03)
Benzo[j]fluoranthen		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.7)
Benzo[k]fluoranthen		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.03)
Benzo[a]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.02)
Benzo[e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.2)
Cyclopenta[cd]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.3)
Dibenz[a,h]anthracen		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.04)
6-Ring-PAH	*Summe*				
Anthanthren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.06)
Benzo[ghi]perylen		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.1)
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.09)
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.03)
Indeno[1,2,3-cd]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.1)

Phenole	*mg / m³*
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]	10.6
Summe Phenole	
Phenol	n.n. (< 0.02)
o-Kresol	n.n. (< 0.02)
m-Kresol	n.n. (< 0.02)
p-Kresol	n.n. (< 0.02)

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V43

Bindemittel 1% Teer hv 54 in Bitumen 70/100
Temperatur 160 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		7.9	6.7		7.3
TSM (Toluene Soluble Matter)		8.1	6.1		7.1
% TSM		104	91		97

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		206.9	206.8	9.7	
Summe PAH					9'078
Summe EPA					9'050
Summe DFG					5'720
2-Ring-PAH					
Naphthalin				3'396	3'396
3-Ring-PAH	*Summe*	*3'954*	*3'245*		*4'834*
Acenaphthen				1'235	1'235
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		865	701		783
Fluoren		938	803		870
Phenanthren		2'151	1'741		1'946
4-Ring-PAH	*Summe*	*881*	*740*		*810*
Benz[a]anthracen		38.9	38.4		39
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		9.7	4.8		7
Chrysen		25.7	24.8		25
Fluoranthen		511	423		467
Pyren		295	250		272
5-Ring-PAH	*Summe*	*39*	*33*		*36*
Benzo[b]fluoranthen		5.9	5.8		5.8
Benzo[j]fluoranthen		9.7	8.1		8.9
Benzo[k]fluoranthen		2.5	2.6		2.5
Benzo[a]pyren		3.8	3.8		3.8
Benzo[e]pyren		2.5	2.6		2.6
Cyclopenta[cd]pyren		14	10		12
Dibenz[a,h]anthracen		0.3	0.2		0.3
6-Ring-PAH	*Summe*	*3*	*2*		*2*
Anthanthren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.06)
Benzo[ghi]perylen		0.8	0.6		0.7
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.09)
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.03)
Indeno[1,2,3-cd]pyren		2.1	1.5		1.8

Phenole	*mg / m³*	
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		10.7
Summe Phenole		0.07
Phenol		0.07
o-Kresol		n.n. (< 0.02)
m-Kresol		n.n. (< 0.02)
p-Kresol		n.n. (< 0.02)

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V44

Bindemittel 33% TB2000 + 67% B 160/220
Temperatur 160 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		13.3	13.9		13.6
TSM (Toluene Soluble Matter)		12.2	12.4		12.3
% TSM		92	89		91

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		205.8	205.7	9.7	
Summe PAH					23'154
Summe EPA					23'111
Summe DFG					14'385
2-Ring-PAH					
Naphthalin				9'621	9'621
3-Ring-PAH	*Summe*	*8'042*	*7'667*		*11'992*
Acenaphthen				4'138	4'138
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		1'837	1'823		1'830
Fluoren		1'939	1'974		1'956
Phenanthren		4'266	3'870		4'068
4-Ring-PAH	*Summe*	*1'444*	*1'486*		*1'465*
Benz[a]anthracen		81.8	87.7		85
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		4.9	4.9		5
Chrysen		62.5	61.3		62
Fluoranthen		828	850		839
Pyren		467	482		475
5-Ring-PAH	*Summe*	*69*	*75*		*72*
Benzo[b]fluoranthen		13.2	13.2		13.2
Benzo[j]fluoranthen		16.3	16.7		16.5
Benzo[k]fluoranthen		5.6	5.8		5.7
Benzo[a]pyren		8.9	9.0		8.9
Benzo[e]pyren		5.5	5.7		5.6
Cyclopenta[cd]pyren		19	24		22
Dibenz[a,h]anthracen		0.1	0.2		0.2
6-Ring-PAH	*Summe*	*4.5*	*4.3*		*4.4*
Anthanthren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.06)
Benzo[ghi]perylen		1.2	1.2		1.2
Dibenzo[a,e]pyren		0.30	n.n.		0.15
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.03)
Indeno[1,2,3-cd]pyren		3.0	3.1		3.1

Phenole	*mg / m³*
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]	10.6
Summe Phenole	1.15
Phenol	0.40
o-Kresol	0.12
m-Kresol	0.40
p-Kresol	0.23

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V45

Bindemittel 10% Teer hv 54 in Bitumen 70/100
Temperatur 160 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		55.0	37.0		46.0
TSM (Toluene Soluble Matter)		53.6	34.9		44.2
% TSM		97	94		96

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		51.9	43.0	5.1	
Summe PAH					69'828
Summe EPA					69'493
Summe DFG					43'775
2-Ring-PAH					
Naphthalin				30'844	30'844
3-Ring-PAH	*Summe*	*19'098*	*16'175*		*28'373*
Acenaphthen				10'737	10'737
Acenaphthylen				n.n. (< 2)	*n.n. (< 2)*
Anthracen		2'599	2'766		2'682
Fluoren		7'913	6'368		7'140
Phenanthren		8'586	7'042		7'814
4-Ring-PAH	*Summe*	*12'367*	*7'842*		*10'105*
Benz[a]anthracen		737.5	486.3		612
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		77.0	46.5		62
Chrysen		721.1	429.1		575
Fluoranthen		6'662	4'224		5'443
Pyren		4'169	2'656		3'413
5-Ring-PAH	*Summe*	*583*	*384*		*484*
Benzo[b]fluoranthen		105.9	68.8		87.4
Benzo[j]fluoranthen		126.4	84.8		105.6
Benzo[k]fluoranthen		42.4	28.2		35.3
Benzo[a]pyren		66.9	44.6		55.7
Benzo[e]pyren		47.7	41.0		44.4
Cyclopenta[cd]pyren		193	116		154
Dibenz[a,h]anthracen		0.9	0.7		0.8
6-Ring-PAH	*Summe*	*26*	*19*		*22*
Anthanthren		4.2	3.2		3.7
Benzo[ghi]perylen		5.8	4.8		5.3
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.4)
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.1)
Indeno[1,2,3-cd]pyren		15.5	10.7		13.1

Phenole	*mg / m³*	
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		5.1
Summe Phenole		0.50
Phenol		0.16
o-Kresol		0.08
m-Kresol		0.16
p-Kresol		0.10

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V46

Bindemittel 20% Teer hv 54 in Bitumen 70/100
Temperatur 160 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		87.1	96.6		91.9
TSM (Toluene Soluble Matter)		82.1	98.3		90.2
% TSM		94	102		98

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		51.6	42.7	5.1	
Summe PAH					134'461
Summe EPA					133'938
Summe DFG					86'596
2-Ring-PAH					
Naphthalin				59'160	59'160
3-Ring-PAH	*Summe*	*35'355*	*40'128*		*55'430*
Acenaphthen				17'689	17'689
Acenaphthylen					
Anthracen		6'086	6'996		6'541
Fluoren		12'017	13'805		12'911
Phenanthren		17'251	19'327		18'289
4-Ring-PAH	*Summe*	*17'574*	*20'491*		*19'032*
Benz[a]anthracen		937.2	1081.0		1'009
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		77.5	93.6		86
Chrysen		582.7	904.3		744
Fluoranthen		9'865	11'420		10'642
Pyren		6'111	6'992		6'552
5-Ring-PAH	*Summe*	*761*	*821*		*791*
Benzo[b]fluoranthen		139.6	156.2		147.9
Benzo[j]fluoranthen		138.6	159.1		148.8
Benzo[k]fluoranthen		58.4	61.2		59.8
Benzo[a]pyren		96.9	96.9		96.9
Benzo[e]pyren		74.1	65.9		70.0
Cyclopenta[cd]pyren		252	281		266
Dibenz[a,h]anthracen		1.5	0.8		1.1
6-Ring-PAH	*Summe*	*46*	*50*		*48*
Anthanthren		8.2	7.8		8.0
Benzo[ghi]perylen		10.9	10.9		10.9
Dibenzo[a,e]pyren		2.91	4.1		3.50
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.1)
Indeno[1,2,3-cd]pyren		24.2	26.9		25.6

Phenole	*mg / m³*	
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		5.1
Summe Phenole		1.54
Phenol		0.51
o-Kresol		0.26
m-Kresol		0.54
p-Kresol		0.22

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V48

Bindemittel 3.3% TB2000 in 97% Bitumen 70/100
Temperatur 160 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		8.2	7.5		7.8
TSM (Toluene Soluble Matter)		8.4	7.6		8.0
% TSM		103	101		102

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		212.8	207.2	10.6	
Summe PAH					2'090
Summe EPA					2'064
Summe DFG					1'170
2-Ring-PAH					
Naphthalin				566	566
3-Ring-PAH	*Summe*	*954*	*767*		*1'238*
Acenaphthen				377	377
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		237	181		209
Fluoren		209	174		191
Phenanthren		508	413		460
4-Ring-PAH	*Summe*	*294*	*227*		*260*
Benz[a]anthracen		12.6	9.8		11
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		9.4	9.1		9
Chrysen		16.5	13.8		15
Fluoranthen		159	120		140
Pyren		96	74		85
5-Ring-PAH	*Summe*	*27*	*18*		*23*
Benzo[b]fluoranthen		3.3	2.6		2.9
Benzo[j]fluoranthen		7.0	6.1		6.5
Benzo[k]fluoranthen		1.2	0.9		1.0
Benzo[a]pyren		1.8	1.4		1.6
Benzo[e]pyren		2.1	1.7		1.9
Cyclopenta[cd]pyren		12	6		9
Dibenz[a,h]anthracen		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.04)
6-Ring-PAH	*Summe*	*3*	*3*		*3*
Anthanthren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.06)
Benzo[ghi]perylen		0.9	0.7		0.8
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.09)
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	0.5		0.2
Indeno[1,2,3-cd]pyren		1.9	1.8		1.8

Phenole	*mg / m³*	
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		9.9
Summe Phenole		0.03
Phenol		0.03
o-Kresol		*n.n. (< 0.02)*
m-Kresol		n.n. (< 0.02)
p-Kresol		*n.n. (< 0.02)*

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V49

Bindemittel 3.3% TB2000 in 97% Bitumen 70/100
Temperatur 180 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		26.4	20.3		23.4
TSM (Toluene Soluble Matter)		26.4	20.3		23.4
% TSM		100	100		100

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		211.3	205.8	10.5	
Summe PAH					3'136
Summe EPA					3'078
Summe DFG					1'646
2-Ring-PAH					
Naphthalin				497	497
3-Ring-PAH	*Summe*	*1'690*	*1'199*		*2'013*
Acenaphthen				568	568
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		426	283		355
Fluoren		301	243		272
Phenanthren		963	673		818
4-Ring-PAH	*Summe*	*642*	*483*		*563*
Benz[a]anthracen		35.4	25.6		31
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		24.4	18.7		22
Chrysen		46.7	38.1		42
Fluoranthen		330	244		287
Pyren		206	157		181
5-Ring-PAH	*Summe*	*64*	*46*		*55*
Benzo[b]fluoranthen		9.9	7.0		8.5
Benzo[j]fluoranthen		19.7	11.3		15.5
Benzo[k]fluoranthen		3.5	2.5		3.0
Benzo[a]pyren		5.5	3.9		4.7
Benzo[e]pyren		5.9	4.5		5.2
Cyclopenta[cd]pyren		19	17		18
Dibenz[a,h]anthracen					n.n. (< 0.04)
6-Ring-PAH	*Summe*	*10.6*	*5.3*		*7.9*
Anthanthren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.06)
Benzo[ghi]perylen		2.4	1.6		2.0
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.09)
Dibenzo[a,l]pyren		1.6	n.n.		0.8
Indeno[1,2,3-cd]pyren		6.5	3.7		5.1

Phenole	*mg / m³*
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]	9.8
Summe Phenole	*Spuren (≤ 0.02)*
Phenol	*Spuren (≤ 0.02)*
o-Kresol	*n.n. (< 0.02)*
m-Kresol	*n.n. (< 0.02)*
p-Kresol	*n.n. (< 0.02)*

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V50

Bindemittel 3.3% TB2000 in 97% Bitumen 70/100
Temperatur 210 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		137.5	110.2		123.9
TSM (Toluene Soluble Matter)		139.2	107.1		123.2
% TSM		101	97		99

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		211.0	205.5	10.5	
Summe PAH					5'532
Summe EPA					5'254
Summe DFG					3'205
2-Ring-PAH					
Naphthalin				287	287
3-Ring-PAH	*Summe*	*2'590*	*2'460*		*2'836*
Acenaphthen				311	311
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		722	644		683
Fluoren		252	330		291
Phenanthren		1'616	1'487		1'551
4-Ring-PAH	*Summe*	*2'401*	*1'823*		*2'112*
Benz[a]anthracen		190.4	138.4		164
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		122.0	89.3		106
Chrysen		181.0	162.9		172
Fluoranthen		1'152	863		1'007
Pyren		756	570		663
5-Ring-PAH	*Summe*	*308*	*225*		*266*
Benzo[b]fluoranthen		46.8	34.8		40.8
Benzo[j]fluoranthen		103.9	70.8		87.3
Benzo[k]fluoranthen		16.6	13.1		14.8
Benzo[a]pyren		26.6	20.8		23.7
Benzo[e]pyren		28.7	20.7		24.7
Cyclopenta[cd]pyren		85	65		75
Dibenz[a,h]anthracen					n.n. (< 0.04)
6-Ring-PAH	*Summe*	*35*	*27*		*31*
Anthanthren		1.1	n.n.		0.5
Benzo[ghi]perylen		12.3	10.2		11.2
Dibenzo[a,e]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.09)
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.03)
Indeno[1,2,3-cd]pyren		21.7	17.0		19.4

Phenole	*mg / m³*	
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		9.8
Summe Phenole		0.04
Phenol		0.04
o-Kresol		*n.n. (< 0.02)*
m-Kresol		n.n. (< 0.02)
p-Kresol		*n.n. (< 0.02)*

n.n. : nicht nachweisbar

Versuch V52

Bindemittel 3.3% TB2000 + 97% Bitumen 70/100
Temperatur 140 °C

Bitumen Fumes, PAH und Phenole in der Dampfphase — Gehalte pro m³

Bitumen fumes	*mg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
TPM (Total Particulate Matter)		1.9	2.2		2.0
TSM (Toluene Soluble Matter)		2.1	2.1		2.1
% TSM		107	99		103

PAH	*µg / m³*	**Probe 1**	**Probe 2**	**Probe 3**	**Mittelwert**
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		226.3	203.5	10.4	
Summe PAH					1'438
Summe EPA					1'427
Summe DFG					912
2-Ring-PAH					
Naphthalin				633	633
3-Ring-PAH	*Summe*	*380*	*448*		*643*
Acenaphthen				229	229
Acenaphthylen				n.n. (< 1)	*n.n. (< 1)*
Anthracen		91	107		99
Fluoren		95	116		106
Phenanthren		194	225		210
4-Ring-PAH	*Summe*	*141*	*160*		*150*
Benz[a]anthracen		4.3	5.1		5
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		2.5	2.9		3
Chrysen		3.4	4.0		4
Fluoranthen		86	96		91
Pyren		45	51		48
5-Ring-PAH	*Summe*	*10*	*10*		*10*
Benzo[b]fluoranthen		1.0	1.1		1.0
Benzo[j]fluoranthen		1.1	1.2		1.1
Benzo[k]fluoranthen		0.4	0.4		0.4
Benzo[a]pyren		0.6	0.6		0.6
Benzo[e]pyren		0.8	1.0		0.9
Cyclopenta[cd]pyren		6	6		6
Dibenz[a,h]anthracen		0.0	0.0		0.0
6-Ring-PAH	*Summe*	*1*	*0*		*0*
Anthanthren		0.1	0.0		0.0
Benzo[ghi]perylen		0.2	0.1		0.1
Dibenzo[a,e]pyren		0.05	0.0		0.03
Dibenzo[a,l]pyren		n.n.	n.n.		n.n. (< 0.03)
Indeno[1,2,3-cd]pyren		0.3	0.1		0.2

Phenole	*mg / m³*	
Sammelvol. 0°C/1013 mbar [Liter]		9.7
Summe Phenole		0.11
Phenol		0.04
o-Kresol		0.02
m-Kresol		0.05
p-Kresol		0.01

n.n. : nicht nachweisbar

Anhang 2
Resultate Feldversuche

Wiggertal

Fertiger Probe A
31.7.04, 07:15-10.40

Röhrchen PAH+Filter	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Volumen [l]
PAK A1-1 + PAK A1-2	1	1	1996	222
PAK A2-1 + PAK A2-2	2	2	1992	221
PAK A3-1 + PAK A3-2	3	3	1973	219
PAK A4-1 + PAK A4-2	4	4	2000	222
PAK A5-1 + PAK A5-2	5	5	1986	220
PAK A6-1 + PAK A6-2	6	6	1996	222

flüchtige PAH	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Volumen [l]
PAKfl A8-1 +PAKfl A8-2	X	7	48.2	5.4
PAKfl A10-1 +PAKfl A10-2	X	9	49.6	5.5

Phenol	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Volumen [l]
Phen-A7	X	8	49.8	5.5
Phen-A9	X	10	46.3	5.1

[1)] Betriebsbedingungen

Personal Sampler Probe A
31.7.04, 07:15-10.40

Funktion	Röhrchen PAH+Filter	Filter	PS-Nr	PS-Flow [ml/min]1)	Laufzeit min.	Volumen [l]
Fahrer Fertiger	P-A-	9	5	2017	230	464
Walzenführer	P-A-	10	4	1943	224	435
Belag Polier	P-A-	11	6	1986	30	60
Maschinen Einsteller	P-A-	12	2	1970	228	449

Flec-Zelle Probe A
31.7.04, 07:15-10.40

Röhrchen	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min]1)	Laufzeit min.	Volumen [l]
S-PAK-A1-1 + S-PAK-A1-2		2	49.7	86	4.3
S-PAKfl-A1-1 + S-PAKfl-A1-2	X	3	380	86	32.7
S-Phen-A1	X	1	49.7	86	4.3

Baregg

Fertiger Probe A
29.3.04, 08:15-09:30

Röhrchen PAH+Filter	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
1A-1 + 1A-2	57	1	2285	75	171
2A-1 + 2A-2	64	2	2307	75	173
3A-1 + 3A-2	63	3	2245	75	168
4A-1 + 4A-2	62	4	2289	75	172
5A-1 + 5A-2	59	5	2265	75	170
6A-1 + 6A-2	58	6	2285	75	171

flüchtige PAH	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
8A-1 + 8A-2	X	8	57.3	75	4.3
10A-1 + 10A-2	X	10	57.3	75	4.3

Phenol	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
7A	X	7	55.6	75	4.2
9A	X	9	57.0	75	4.3

[1)] Betriebsbedingungen

Fertiger Probe B
29.3.04, 08:15-09:30

Probenahmezeit	Röhrchen PAH+Filter	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
11:50-14:00	1B-1 + 1B-2	46	1	2285	130	297
11:50-14:00	2B-1 + 2B-2	48	2	2307	130	300
11:50-14:00	3B-1 + 3B-2	42	3	2245	130	292
11:50-14:00	4B-1 + 4B-2	45	4	2289	130	298
10:10-11:30	5B-1 + 5B-2	34	5	2265	80	181
10:10-11:30	6B-1 + 6B-2	35	6	2285	80	183

Probenahmezeit	flüchtige PAH	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
10:10-11:30	8B-1 + 8B-2	X	8	57.3	80	4.6
10:10-11:30	10B-1 + 10B-2	X	10	57.3	80	4.6

Probenahmezeit	Phenol	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
10:10-11:30	7B	X	7	55.6	80	4.4
10:10-11:30	9B	X	9	57.0	80	4.6

[1)] Betriebsbedingungen

Personal Sampler Probe A
29.3.04, 07:40 - 10:00

Funktion	Raucher	Röhrchen PAH+Filter	Filter	PS-Nr	PS-Flow [ml/min][1)]	Laufzeit min.	Volumen [l]
Bati-Group-Hilfsfahrer	ja	P1-A	56	12	1990	153	304
Bati-Group-Hilfsarbeiter	ja	P2-A	50	14	2001	149	298
Walo-Fahrer		P3-A	60	10	2216	155	343
Bati-Group-Fahrer	ja	P4-A	49	13	2044	154	315
Bati-Group-Hilfsarbeiter *		P5-A	52	1	2347	151	354
Bati-Group-Hilfsarbeiter		P6-A	51	6	2090	110	230
Batic-Group-Fahrer Walze	ja	P7-A	55	4	2241	159	356
Bati-Group-Hilfsarbeiter		P8-A	54	3	2396	128	307

Personal Sampler Probe A
29.3.04, 12:00-14:00

Funktion	Raucher	Röhrchen PAH+Filter	Filter	PS-Nr	PS-Flow [ml/min][1)]	Laufzeit min.	Volumen [l]
Bati-Group-Hilfsfahrer	ja	P1-B	10	12	1990	122	243
Bati-Group-Hilfsarbeiter	ja	P2-B	9	14	2001	112	224
Walo-Fahrer		P3-B	13	10	2216	118	261
Bati-Group-Fahrer	ja	P4-B	14	13	2044	120	245
Bati-Group-Hilfsarbeiter [1)]		P5-B	11	1	2347		
Bati-Group-Hilfsarbeiter [2)]		P6-B	12	k.M.			
Batic-Group-Fahrer Walze	ja	P7-B	44	4	2241	119	267
Bati-Group-Hilfsarbeiter		P8-B	43	3	2396	108	259

[1)] Schlauch abgerissen
[2)] nicht mehr anwesend

Schnüffler (Flec-Zelle) Probe A
29.3.04, 08:17-09:17

Röhrchen	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min]1)	Laufzeit min.	Volumen [l]
Flec/Schnüffler-PAH+Filter A	31	3	441	52	22.9
Flec/Schnüffler-PAH flüchtig A	X	2	57.5	52	3.0
Flec/Schnüffler-Phenol A	X	1	57.5	52	3.0

Probe B verworfen

Schnüffler (Flec-Zelle) Probe C
29.3.04, 11:00-11:30

Röhrchen	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min]1)	Laufzeit min.	Volumen [l]
Flec/Schnüffler-PAH+Filter C	1	3	441	26	11.5
Flec/Schnüffler-PAH flüchtig C	X	2	57.5	26	1.5
Flec/Schnüffler-Phenol C	X	1	57.5	26	1.5

PAH-Gehalte im Bindemittel Baregg

Proben							
		Probe 1+2	**Probe 3+4**	**Probe 5+6**	**Probe 7+8**	**Mittelwert**	**rel. SD [%]**
Anteil Bindemittel	*[%]*						
Abdampfrückstand		4.28	4.37	5.30	5.40	4.84	12
Summe PAH	*µg / g [ppm]*	6'247	6'854	6'811	6'498	6'603	4
Summe EPA		5'314	5'795	5'768	5'557	5'609	4
Summe DFG		4'340	4'922	4'791	4'565	4'654	6
2-Ring-PAH							
Naphthalin		2.6	3.6	2.7	2.6	2.9	17
3-Ring-PAH	***Summe***	***1'022***	***818***	***708***	***711***	***815***	***18***
Acenaphthen		49	44	49	45	47	5
Acenaphthylen		3.1	2.5	2.5	2.5	2.7	10
Anthracen		277	212	183	175	212	22
Fluoren		60	48	40	38	46	21
Phenanthren		633	511	434	450	507	18
4-Ring-PAH	***Summe***	***2'898***	***3'243***	***3'503***	***3'433***	***3'269***	***8***
Benz[a]anthracen		484	578	583	580	556	9
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		103	105	107	103	104	2
Chrysen		363	490	485	432	443	13
Fluoranthen		1081	1100	1267	1237	1'171	8
Pyren		868	970	1061	1082	995	10
5-Ring-PAH	***Summe***	***1'606***	***1'970***	***1'827***	***1'630***	***1'758***	***10***
Benzo[b]fluoranthen		397	497	469	426	447	10
Benzo[j]fluoranthen		228	275	266	225	248	10
Benzo[k]fluoranthen		182	221	215	191	202	9
Benzo[a]pyren		429	533	434	379	444	15
Benzo[e]pyren		215	259	242	213	232	10
Cyclopenta[cd]pyren		123	142	160	153	144	11
Dibenz[a,h]anthracen		32	44	41	43	40	14
6-Ring-PAH	***Summe***	***718***	***820***	***769***	***721***	***757***	***6***
Anthanthren		101	83	101	87	93	10
Benzo[ghi]perylen		222	267	236	223	237	9
Dibenzo[a,e]pyren		63	72	54	61	62	12
Dibenzo[a,l]pyren		101	124	114	100	110	10
Indeno[1,2,3-cd]pyren		231	274	265	250	255	7

Baregg Fertiger Proben A

Bitumen Fumes, PAH und Phenole Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**1A**	**2A**	**3A**	**4A**	**5A**	**6A**
Sammelvolumen [Liter]	171	173	168	172	170	171
mg / m3						
TPM (Total Particulate Matter)	3.764	2.861	3.848	2.790	21.054	1.692
TSM (Toluene Soluble Matter)	1.070	0.771	0.594	0.583	20.895	1.653
% TSM	28	27	15	21	99	98

PAH	**1A**	**2A**	**3A**	**4A**	**5A**	**6A**
Sammelvolumen [Liter]	171	173	168	172	170	171
µg / m3						
Summe PAH	516	301	231	186	4'351	347
Summe EPA	508	299	230	185	4'264	345
Summe DFG	248	145	117	103	2'098	158
2-Ring-PAH						
Naphthalin	43	31	31	39	329	46
3-Ring-PAH *Summe*	*356*	*211*	*160*	*121*	*2'219*	*189*
Acenaphthen	101	55	45	33	414	67
Acenaphthylen	9	3	*n.n. (< 0.08)*	*n.n. (< 0.08)*	22	*n.n. (< 0.08)*
Anthracen	42	30	17	16	431	23
Fluoren	55	35	31	20	233	38
Phenanthren	149	88	68	53	1'119	60
4-Ring-PAH *Summe*	*108*	*56*	*37*	*24*	*1'676*	*106*
Benz[a]anthracen	7	3	3	1.8	98	7
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	2.5	0.8	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	18	1.3
Chrysen	4	1.5	1.4	1.0	42	4
Fluoranthen	60	32	21	14	1'141	60
Pyren	35	19	12	7	378	34
5-Ring-PAH *Summe*	*8*	*1.9*	*2.2*	*1.6*	*118*	*5*
Benzo[b]fluoranthen	1.6	0.6	0.7	0.5	21	1.7
Benzo[j]fluoranthen	1.1	0.5	0.5	0.4	11	1.1
Benzo[k]fluoranthen	0.7	0.3	0.3	0.2	9	0.8
Benzo[a]pyren	0.7	0.2	0.3	0.2	13	0.9
Benzo[e]pyren	0.9	0.4	0.4	0.3	10	0.9
Cyclopenta[cd]pyren	2.9	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	54	*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	0.10	0.03
6-Ring-PAH *Summe*	*0.66*	*0.39*	*0.33*	*0.39*	*7.82*	*0.71*
Anthanthren	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	0.81	*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen	0.09	0.05	0.05	0.05	1.07	0.10
Dibenzo[a,e]pyren	*Spuren (≤ 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	0.15	*Spuren (≤ 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren	*n.n. (< 0.02)*	0.03	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0.57	0.32	0.28	0.34	5.79	0.61

Phenole	**7A**	**9A**
Sammelvolumen [Liter]	4.2	4.3
mg / m3		
Summe Phenole		
Phenol	*n.n. (< 0.04)*	*n.n. (< 0.04)*
o-Kresol	*n.n. (< 0.04)*	*n.n. (< 0.04)*
m-Kresol	*n.n. (< 0.04)*	*n.n. (< 0.04)*
p-Kresol	*n.n. (< 0.04)*	*n.n. (< 0.04)*

n.n. : nicht nachweisbar

Baregg Fertiger Proben B

Bitumen Fumes, PAH und Phenole Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**1B**	**2B**	**3B**	**4B**	**5B**	**6B**
Sammelvolumen [Liter]	297	300	292	298	181	183
mg / m3						
TPM (Total Particulate Matter)	10.191	1.120	0.641	1.049	1.722	2.155
TSM (Toluene Soluble Matter)	10.661	0.611	0.571	0.616	1.012	2.097
% TSM	105	55	89	59	59	97

PAH	**1B**	**2B**	**3B**	**4B**	**5B**	**6B**
Sammelvolumen [Liter]	297	300	292	298	181	183
µg / m3						
Summe PAH	1'943	161	96	140	965	396
Summe EPA	1'897	160	95	140	964	388
Summe DFG	956	77	48	75	366	189
2-Ring-PAH						
Naphthalin	20	12	9	22	252	44
3-Ring-PAH *Summe*	*843*	*99*	*66*	*88*	*656*	*187*
Acenaphthen	49	27	18	22	403	73
Acenaphthylen	4	2.7	*n.n. (< 0.08)*	2.8	25	4.6
Anthracen	182	11	7	10	20	18
Fluoren	48	15	10	13	123	32
Phenanthren	561	43	30	40	85	60
4-Ring-PAH *Summe*	*1'012*	*48*	*20*	*29*	*53*	*152*
Benz[a]anthracen	56	2.9	1.2	1.3	5.5	12.7
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	13	0.6	0.3	0.3	1.1	2.2
Chrysen	31	1.4	0.8	0.8	3.1	6.6
Fluoranthen	697	28	11.8	17.0	26.3	79.4
Pyren	216	15.9	6.3	9.4	16.7	50.9
5-Ring-PAH *Summe*	*63*	*1.7*	*0.7*	*0.8*	*3.0*	*12*
Benzo[b]fluoranthen	15	0.7	0.3	0.4	1.3	2.9
Benzo[j]fluoranthen	7	*Spuren (≤ 0.5)*	*Spuren (≤ 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	0.5
Benzo[k]fluoranthen	6	0.3	0.1	0.2	0.5	1.2
Benzo[a]pyren	9	0.3	0.1	0.1	0.6	1.6
Benzo[e]pyren	7	0.4	0.2	0.2	0.6	1.2
Cyclopenta[cd]pyren	19	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	5.1
Dibenz[a,h]anthracen	0.05	*n.n. (< 0.03)*	*Spuren (≤ 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*Spuren (≤ 0.03)*
6-Ring-PAH *Summe*	*5*	*0.3*	*0.3*	*0.1*	*0.6*	*1.8*
Anthanthren	0.10	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen	0.69	0.04	0.02	0.03	0.06	0.11
Dibenzo[a,e]pyren	0.09	*Spuren (≤ 0.07)*	*Spuren (≤ 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*Spuren (≤ 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren	0.02	*n.n. (< 0.02)*	0.11	*n.n. (< 0.02)*	0.19	0.84
Indeno[1,2,3-cd]pyren	3.97	0.26	0.13	0.11	0.40	0.80

Phenole	**7B**	**9B**
Sammelvolumen [Liter]	4.4	4.6
mg / m3		
Summe Phenole		
Phenol	*n.n. (< 0.04)*	*n.n. (< 0.04)*
o-Kresol	*n.n. (< 0.04)*	*n.n. (< 0.04)*
m-Kresol	*n.n. (< 0.04)*	*n.n. (< 0.04)*
p-Kresol	*n.n. (< 0.04)*	*n.n. (< 0.04)*

n.n. : nicht nachweisbar

Baregg **Personal Sampler A 1-6**

Bitumen Fumes, PAH und Phenole

Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**P1-A**	**P2-A**	**P3-A**	**P4-A**	**P5-A**	**P6-A**
Sammelvolumen [Liter]	304	298	343	315	354	230
mg / m3						
TPM (Total Particulate Matter)	1.642	2.049	2.242	1.960	1.180	3.846
TSM (Toluene Soluble Matter)	0.355	0.363	0.787	0.424	0.235	0.798
% TSM	22	18	35	22	20	21

PAH		**P1-A**	**P2-A**	**P3-A**	**P4-A**	**P5-A**	**P6-A**
Sammelvolumen [Liter]		304	298	343	315	354	230
µg / m3							
Summe PAH		72	102	97	79	23	87
Summe EPA		67	101	97	79	23	87
Summe DFG		40	50	47	42	13	44
2-Ring-PAH							
Naphthalin		10	8.3	10	13	3.7	10
3-Ring-PAH	*Summe*	*48*	*71*	*71*	*54*	*17*	*62*
Acenaphthen		12	18	20	14	3.6	14
Acenaphthylen		1.4	1.4	1.3	1.4	*n.n. (< 0.06)*	1.5
Anthracen		5.5	8.5	7.1	6.3	2.5	7.6
Fluoren		8.4	13	14	10	2.8	11
Phenanthren		20	31	30	23	8.6	27
4-Ring-PAH	*Summe*	*10*	*21*	*15*	*12*	*1.8*	*15*
Benz[a]anthracen		0.64	1.70	1.23	1.09	0.08	1.10
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		1.62	0.38	0.34	0.26	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Chrysen		0.48	0.91	0.64	0.62	0.16	0.64
Fluoranthen		4.63	10.89	8.04	6.15	1.08	8.32
Pyren		2.64	6.94	4.44	3.67	0.52	4.68
5-Ring-PAH	*Summe*	*4.0*	*1.3*	*0.81*	*0.72*	*0.16*	*0.75*
Benzo[b]fluoranthen		0.22	0.44	0.29	0.26	0.06	0.26
Benzo[j]fluoranthen		0.14	0.27	0.14	0.11	0.02	0.15
Benzo[k]fluoranthen		0.10	0.17	0.12	0.11	0.03	0.10
Benzo[a]pyren		0.03	0.16	0.12	0.11	0.01	0.09
Benzo[e]pyren		0.16	0.24	0.14	0.12	0.04	0.14
Cyclopenta[cd]pyren		3.37	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen		*Spuren (≤ 0.03)*	*Spuren (≤ 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*Spuren (≤ 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*
6-Ring-PAH	*Summe*	*0.14*	*0.19*	*0.13*	*0.14*	*0.04*	*0.17*
Anthanthren		*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen		0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03
Dibenzo[a,e]pyren		*Spuren (≤ 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*Spuren (≤ 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren		*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren		0.12	0.16	0.11	0.11	0.03	0.14

n.n. : nicht nachweisbar

Baregg Personal Sampler A 7-8

Bitumen Fumes, PAH und Phenole

Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**P7-A**	**P8-A**
Sammelvolumen [Liter]	356	307
mg / m3		
TPM (Total Particulate Matter)	1.920	2.501
TSM (Toluene Soluble Matter)	0.234	0.652
% TSM	12	26

PAH		**P7-A/F55**	**P8-A/F54**
Sammelvolumen [Liter]		356	307
µg / m3			
Summe PAH		81	54
Summe EPA		80	54
Summe DFG		43	29
2-Ring-PAH			
Naphthalin		8	5.4
3-Ring-PAH	*Summe*	*56*	*38*
Acenaphthen		12	7
Acenaphthylen		1.3	*n.n. (< 0.06)*
Anthracen		6.8	5.7
Fluoren		9.3	6
Phenanthren		27	19
4-Ring-PAH	*Summe*	*15*	*10*
Benz[a]anthracen		0.99	0.87
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		0.30	0.22
Chrysen		0.73	0.55
Fluoranthen		8.41	5.50
Pyren		5.00	3.03
5-Ring-PAH	*Summe*	*1.26*	*0.56*
Benzo[b]fluoranthen		0.27	0.20
Benzo[j]fluoranthen		0.10	0.08
Benzo[k]fluoranthen		0.11	0.09
Benzo[a]pyren		0.03	0.06
Benzo[e]pyren		0.13	0.12
Cyclopenta[cd]pyren		0.61	*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen		*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*
6-Ring-PAH	*Summe*	*0.14*	*0.11*
Anthanthren		*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen		0.03	0.01
Dibenzo[a,e]pyren		*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren		*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren		0.11	0.10

n.n. : nicht nachweisbar

Baregg Personal Sampler B 1-6

Bitumen Fumes, PAH und Phenole Gehalte pro m^3

(Personal Sampler B 5 und B 6 nicht ausgewertet, abgerissener Schlauch, resp. Person entfernte sich von der Baustelle)

Bitumen fumes	**P1-B**	**P2-B**	**P3-B**	**P4-B**	**P5-B**	**P6-B**
Sammelvolumen [Liter]	243	224	261	245		
mg / m3						
TPM (Total Particulate Matter)	1.067	0.821	1.025	0.701		
TSM (Toluene Soluble Matter)	1.030	0.744	1.020	0.544		
% TSM	97	91	100	78		

PAH	**P1-B**	**P2-B**	**P3-B**	**P4-B**	**P5-B**	**P6-B**
Sammelvolumen [Liter]	243	224	261	245		
µg / m3						
Summe PAH	109	70	115	91		
Summe EPA	104	70	113	91		
Summe DFG	54	34	61	44		
2-Ring-PAH						
Naphthalin	5	4.1	6	9		
3-Ring-PAH *Summe*	*84*	*55*	*78*	*71*		
Acenaphthen	19	12	18	18		
Acenaphthylen	1.9	1.6	2.0	2.0		
Anthracen	11.5	8.1	10.6	9.1		
Fluoren	14.3	9	13	12		
Phenanthren	37	25	34	30		
4-Ring-PAH *Summe*	*15*	*10*	*29*	*11*		
Benz[a]anthracen	1.08	0.79	5.69	0.77		
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	1.16	0.12	0.22	*n.n. (< 0.02)*		
Chrysen	0.62	0.50	1.46	0.48		
Fluoranthen	8.04	5.08	8.48	6.42		
Pyren	4.26	3.12	12.88	3.57		
5-Ring-PAH *Summe*	*3.78*	*0.54*	*1.59*	*0.46*		
Benzo[b]fluoranthen	0.24	0.21	0.33	0.20		
Benzo[j]fluoranthen	*Spuren (≤ 0.5)*	*Spuren (≤ 0.5)*	*Spuren (≤ 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*		
Benzo[k]fluoranthen	0.11	0.09	0.15	0.09		
Benzo[a]pyren	0.07	0.07	0.11	0.06		
Benzo[e]pyren	0.12	0.12	0.85	0.12		
Cyclopenta[cd]pyren	3.20	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*		
Dibenz[a,h]anthracen	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*		
6-Ring-PAH *Summe*	*0.12*	*0.12*	*0.12*	*0.12*		
Anthanthren	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*		
Benzo[ghi]perylen	0.01	0.02	0.01	0.02		
Dibenzo[a,e]pyren	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*		
Dibenzo[a,l]pyren	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*		
Indeno[1,2,3-cd]pyren	0.10	0.11	0.11	0.10		

n.n. : nicht nachweisbar

Baregg Personal Sampler B 7-8

Bitumen Fumes, PAH und Phenole

Gehalte pro m^3

Bitumen fumes		**P7-B**	**P8-B**
Sammelvolumen [Liter]		267	259
	mg / m3		
TPM (Total Particulate Matter)		0.934	0.920
TSM (Toluene Soluble Matter)		0.812	0.451
% TSM		87	49

PAH		**P7-B**	**P8-B**
Sammelvolumen [Liter]		267	259
	µg / m3		
Summe PAH		121	41
Summe EPA		120	41
Summe DFG		62	20
2-Ring-PAH			
Naphthalin		6	2.9
3-Ring-PAH	*Summe*	*84*	*31*
Acenaphthen		17	6
Acenaphthylen		1.8	*n.n. (< 0.08)*
Anthracen		12.0	5.6
Fluoren		12.9	5
Phenanthren		40	14
4-Ring-PAH	*Summe*	*30*	*6.6*
Benz[a]anthracen		2.08	0.46
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		0.20	*n.n. (< 0.02)*
Chrysen		1.22	0.38
Fluoranthen		15.28	3.67
Pyren		10.82	2.07
5-Ring-PAH	*Summe*	*0.96*	*0.33*
Benzo[b]fluoranthen		0.44	0.16
Benzo[j]fluoranthen		*n.n. (< 0.5)*	*Spuren (≤ 0.5)*
Benzo[k]fluoranthen		0.19	0.07
Benzo[a]pyren		0.12	0.03
Benzo[e]pyren		0.21	0.07
Cyclopenta[cd]pyren		*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen		*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*
6-Ring-PAH	*Summe*	*0.24*	*0.10*
Anthanthren		*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen		0.01	0.01
Dibenzo[a,e]pyren		*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren		0.09	0.03
Indeno[1,2,3-cd]pyren		0.15	0.05

Baregg **Schnüffler**

Bitumen Fumes, PAH und Phenole

Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**Versuch A**	**Versuch C**
mg / m3		
TPM (Total Particulate Matter)	5.802	5.933
TSM (Toluene Soluble Matter)	0.727	5.817
% TSM	13	98

PAH		**Versuch A**	**Versuch C**
µg / m3			
Summe PAH		2'518	4'290
Summe EPA		2'515	3'474
Summe DFG		1'107	2'415
2-Ring-PAH			
Naphthalin		316	669
3-Ring-PAH	*Summe*	*2'111*	*2'704*
Acenaphthen		654	1'006
Acenaphthylen		*n.n. (< 7)*	154
Anthracen		276	257
Fluoren		438	407
Phenanthren		743	880
4-Ring-PAH	*Summe*	*82*	*327*
Benz[a]anthracen		9	8
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		*n.n. (< 2)*	231
Chrysen		7	6
Fluoranthen		41	51
Pyren		25	31
5-Ring-PAH	*Summe*	*8*	*588*
Benzo[b]fluoranthen		2.8	2.6
Benzo[j]fluoranthen		1.4	0.4
Benzo[k]fluoranthen		1.3	1.2
Benzo[a]pyren		0.3	0.4
Benzo[e]pyren		1.9	1.1
Cyclopenta[cd]pyren		*n.n. (< 17)*	582
Dibenz[a,h]anthracen		*n.n. (< 0.4)*	*n.n. (< 0.8)*
6-Ring-PAH	*Summe*	*1.2*	*1.5*
Anthanthren		*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 1.0)*
Benzo[ghi]perylen		0.2	0.1
Dibenzo[a,e]pyren		*n.n. (< 0.8)*	*n.n. (< 1.6)*
Dibenzo[a,l]pyren		*n.n. (< 0.3)*	0.5
Indeno[1,2,3-cd]pyren		1.0	0.9

Phenole	**Versuch A**	**Versuch C**
mg / m3		
Summe Phenole		
Phenol	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.13)*
o-Kresol	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.13)*
m-Kresol	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.13)*
p-Kresol	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.13)*

n.n. : nicht nachweisbar

Thalheim

Fertiger Probe A
17.5.05, 09:15-11:50

Röhrchen PAH+Filter	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
AK A1-1 + PAK A1	35	1	2150	155	333
AK A2-1 + PAK A2	33	2	2267	155	351
AK A3-1 + PAK A3	36	3	2223	155	345
AK A4-1 + PAK A4	37	4	2275	155	353
AK A5-1 + PAK A5	34	5	2264	155	351
AK A6-1 + PAK A6	38	6	2139	155	332

flüchtige PAH	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
Kfl A8-1 +PAKfl A	X	8	56.5	155	8.8
fl A10-1 +PAKfl A	X	10	56.6	155	8.8

Phenol	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
Phen-A7	X	7	54.7	155	8.5
Phen-A9	X	11	35.3	155	5.5

Fertiger Probe B
12:30-14:50

Röhrchen PAH+Filter	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
AK B1-1 + PAK B1	42	1	2150	140	301
AK B2-1 + PAK B2	46	2	2267	140	317
AK B3-1 + PAK B3	41	3	2223	140	311
AK B4-1 + PAK B4	44	4	2275	140	319
AK B5-1 + PAK B5	43	5	2264	140	317
AK B6-1 + PAK B6	45	6	2139	140	299

flüchtige PAH	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
Kfl B8-1 +PAKfl B	X	8	56.5	140	7.9
fl B10-1 +PAKfl B	X	10	56.6	140	7.9

Phenol	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Zeit min	Volumen [l]
Phen-B7	X	7	54.7	140	7.7
Phen-B9	X	11	35.3	140	4.9

[1)] Betriebsbedingungen

Personal Sampler Probe A
09:30-11:20

Funktion	Raucher	Röhrchen PAH+Filter	Filter	PS-Nr	Bemerkungen	PS-Flow [ml/min][1)]	Laufzeit min.	Volumen [l]
Fertiger	ja	P-A-1	9	7		2112	111	234
Nähe Fertiger	ja	P-A-2	10	8		2120	113	240
kleine Walze	ja	P-A-3	11	9		2122	114	242
grosse Walze		P-A-4	12	10		2112	113	239
Nähe Fertiger	ja	P-A-5	13	11		2103	118	248
Umgebung		P-A-6	14	12		2085	114	238
Nähe Fertiger		P-A-7	15	13		2087	115	240

Personal Sampler Probe B
12:00-14:30

Funktion	Raucher	Röhrchen PAH+Filter	Filter	PS-Nr	Bemerkungen	PS-Flow [ml/min][1)]	Laufzeit min.	Volumen [l]
Fertiger	ja	P-B-1	21	7		2112	152	321
Nähe Fertiger	ja	P-B-2	23	8		2120	152	322
kleine Walze [1)]	ja	P-B-3	20	9	Riss im Silico	2122	151	320
grosse Walze		P-B-4	24	10		2112	154	325
Nähe Fertiger [2)]	ja	P-B-5	19	11	längere Pause	2103	149	313
Umgebung [2)]		P-B-6	17	12	längere Pause	2085	147	306
Nähe Fertiger		P-B-7	22	13		2087	147	307

[1)] Schlauchriss
[2)] längere Pause

Schnüffler (Flec-Zelle) Probe A
09:27-09:47

Probenahmezeit	Röhrchen	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Laufzeit min.	Volumen [l]
09:27-09:47	S-PAK-A1-1 + S-PAK-A1-2	1	3	0	20	8.8
09:27-09:47	S-PAKfl-A1-1 + S-PAKfl-A1-2	X	2	0.0	20	1.1
09:27-09:47	S-Phen-A1	X	1	0.0	20	1.1

Schnüffler (Flec-Zelle) Probe B
10:28-10:43

Probenahmezeit	Röhrchen	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Laufzeit min.	Volumen [l]
10:28-10:43	S-PAK-B1-1 + S-PAK-B1-2	2	3	0	15	6.6
10:28-10:43	S-PAKfl-B1-1 + S-PAKfl-B1-2	X	2	0.0	15	0.8
10:28-10:43	S-Phen-B1	X	1	0.0	15	0.8

Schnüffler (Flec-Zelle) Probe C
11:30-11:50

Probenahmezeit	Röhrchen	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Laufzeit min.	Volumen [l]
11:30-11:50	S-PAK-C1-1 + S-PAK-C1-2	3	3	0	20	8.8
11:30-11:50	S-PAKfl-C1-1 + S-PAKfl-C1-2	X	2	0.0	20	1.1
11:30-11:50	S-Phen-C1	X	1	0.0	20	1.1

Schnüffler (Flec-Zelle) Probe D
14:30-14:50

Probenahmezeit	Röhrchen	Filter	MFC-Nr	MFC-Flow [ml/min][1)]	Laufzeit min.	Volumen [l]
14:30-14:50	S-PAK-D1-1 + S-PAK-D1-2	4	3	0	20	8.8
14:30-14:50	S-PAKfl-D1-1 + S-PAKfl-D1-2	X	2	0.0	20	1.1
14:30-14:50	S-Phen-D1	X	1	0.0	20	1.1

PAH-Gehalte im Bindemittel Thalheim

Proben							
		Probe 1+2	**Probe 3+4**	**Probe 5+6**	**Probe 7+8**	**Mittelwert**	**rel. SD [%]**
Anteil Bindemittel	*[%]*						
Abdampfrückstand		4.12	3.35	3.82	3.81	3.78	8
Summe PAH	*µg / g [ppm]*	2'413	2'701	2'586	2'384	2521	6
Summe EPA		2'191	2'459	2'376	2'179	2301	6
Summe DFG		1'558	1'762	1'684	1'538	1636	6
2-Ring-PAH							
Naphthalin		4.0	4.6	3.9	4.0	4.1	8
3-Ring-PAH	***Summe***	***291***	***326***	***323***	***333***	***318***	***6***
Acenaphthen		14	18	16	16	16	9
Acenaphthylen		*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	
Anthracen		61	72	73	75	70	9
Fluoren		22	28	23	24	24	11
Phenanthren		194	209	211	219	208	5
4-Ring-PAH	***Summe***	***1'335***	***1'519***	***1'467***	***1'319***	***1'410***	***7***
Benz[a]anthracen		198	230	221	194	211	8
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	
Chrysen		168	193	185	167	179	7
Fluoranthen		547	607	593	547	573	6
Pyren		421	489	467	411	447	8
5-Ring-PAH	***Summe***	***543***	***601***	***555***	***520***	***555***	***6***
Benzo[b]fluoranthen		138	155	147	130	142	8
Benzo[j]fluoranthen		64	66	60	66	64	4
Benzo[k]fluoranthen		80	89	87	76	83	7
Benzo[a]pyren		141	157	148	130	144	8
Benzo[e]pyren		113	126	106	104	112	9
Cyclopenta[cd]pyren		*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	
Dibenz[a,h]anthracen		6.9	7.6	6.1	13.0	8.4	37
6-Ring-PAH	***Summe***	***240***	***251***	***237***	***208***	***234***	***8***
Anthanthren		*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	
Benzo[ghi]perylen		98	88	91	81	89	8
Dibenzo[a,e]pyren		44	51	43	35	43	14
Dibenzo[a,l]pyren		*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	
Indeno[1,2,3-cd]pyren		97	112	103	91	101	9

n.n. : nicht nachweisbar

Thalheim Fertiger Proben A

Bitumen Fumes, PAH und Phenole

Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**F-A1**	**F-A2**	**F-A3**	**F-A4**	**F-A5**	**F-A6**
Sammelvolumen [Liter]	333	351	345	353	351	332
mg / m3						
TPM (Total Particulate Matter)	1.492	0.603	0.258	0.627	6.164	1.526
TSM (Toluene Soluble Matter)	1.251	0.522	0.242	0.473	5.130	0.955
% TSM	84	86	94	75	83	63

PAH	**F-A1**	**F-A2**	**F-A3**	**F-A4**	**F-A5**	**F-A6**
Sammelvolumen [Liter]	333	351	345	353	351	332
µg / m3						
Summe PAH	208	135	80	143	1'293	642
Summe EPA	207	134	80	143	1'292	641
Summe DFG	96	67	43	77	566	287
2-Ring-PAH						
Naphthalin	34	16	18	28	120	67
3-Ring-PAH *Summe*	*121*	*91*	*52*	*97*	*855*	*465*
Acenaphthen	34	19	11	20	189	100
Acenaphthylen	3	*n.n. (< 0.08)*	1.1	1.9	11	5
Anthracen	11	12	7	11	103	54
Fluoren	32	21	12	23	220	123
Phenanthren	41	39	21	41	333	182
4-Ring-PAH *Summe*	*51*	*27*	*9*	*18*	*316*	*109*
Benz[a]anthracen	0.2	0.4	0.2	0.2	2.6	0.8
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0.4	0.4	*n.n. (< 0.02)*	0.4	2.3	0.8
Chrysen	2.1	1.3	0.5	1.1	10	3.2
Fluoranthen	31	16	5	11	205	72
Pyren	17	9	3	5	96	32
5-Ring-PAH *Summe*	*0.7*	*0.4*	*0.2*	*0.5*	*3.2*	*1.2*
Benzo[b]fluoranthen	0.37	0.26	0.10	0.25	1.72	0.57
Benzo[j]fluoranthen	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*
Benzo[k]fluoranthen	0.18	0.13	0.06	0.14	0.95	0.27
Benzo[a]pyren	0.03	0.01	0.00	0.04	0.06	0.04
Benzo[e]pyren	0.11	0.04	0.05	0.07	0.45	0.18
Cyclopenta[cd]pyren	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen	*n.n. (< 0.03)*	*Spuren (≤ 0.03)*	*Spuren (≤ 0.03)*	0.04	*n.n. (< 0.03)*	0.10
6-Ring-PAH *Summe*	*0.11*	*0.01*	*0.01*	*0.04*	*0.30*	*0.01*
Anthanthren	*Spuren (≤ 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen	0.03	0.01	0.01	0.04	0.06	0.01
Dibenzo[a,e]pyren	0.09	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren	*Spuren (≤ 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*	0.24	*n.n. (< 0.09)*

Phenole	**A7**	**A9**
Sammelvolumen [Liter]	8.5	5.5
mg / m3		
Summe Phenole	0.29	0.42
Phenol	0.17	0.29
o-Kresol	0.03	0.04
m-Kresol	0.04	0.05
p-Kresol	0.04	0.04

n.n. : nicht nachweisbar

Thalheim Fertiger Proben B

Bitumen Fumes, PAH und Phenole Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**F-B1**	**F-B2**	**F-B3**	**F-B4**	**F-B5**	**F-B6**
Sammelvolumen [Liter]	301	317	311	319	317	299
mg / m3						
TPM (Total Particulate Matter)	1.648	0.671	0.447	0.487	7.885	2.020
TSM (Toluene Soluble Matter)	1.883	0.683	0.268	0.576	7.467	1.948
% TSM	114	102	60	118	95	96

PAH	**F-B1**	**F-B2**	**F-B3**	**F-B4**	**F-B5**	**F-B6**
Sammelvolumen [Liter]	301	317	311	319	317	299
µg / m3						
Summe PAH	441	211	130	305	1'737	704
Summe EPA	439	210	130	305	1'733	703
Summe DFG	195	96	60	143	778	312
2-Ring-PAH						
Naphthalin	23	12	16	34	109	49
3-Ring-PAH *Summe*	*319*	*146*	*96*	*222*	*1'177*	*515*
Acenaphthen	56	26	16	44	229	94
Acenaphthylen	3	*n.n. (< 0.08)*	2	3	14	6
Anthracen	49	23	20	34	146	71
Fluoren	78	35	20	51	285	130
Phenanthren	133	63	38	90	504	214
4-Ring-PAH *Summe*	*98*	*51*	*18*	*50*	*445*	*139*
Benz[a]anthracen	0.4	1.0	0.1	0.7	6.9	0.8
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	1.8	0.5	*n.n. (< 0.02)*	0.5	3.8	1.2
Chrysen	3.8	1.9	0.8	1.5	11	3.4
Fluoranthen	61	30	12	30	284	91
Pyren	32	17	5	17	139	42
5-Ring-PAH *Summe*	*1.3*	*0.7*	*0.2*	*0.4*	*5.2*	*1.2*
Benzo[b]fluoranthen	0.69	0.35	0.16	0.27	2.41	0.66
Benzo[j]fluoranthen	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*
Benzo[k]fluoranthen	0.35	0.20	0.05	0.15	1.56	0.38
Benzo[a]pyren	0.01	0.04	0.00	0.02	0.24	0.03
Benzo[e]pyren	0.21	0.10	*Spuren (≤ 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	0.96	0.10
Cyclopenta[cd]pyren	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*
6-Ring-PAH *Summe*					*0.24*	
Anthanthren	*n.n. (< 0.05)*	*Spuren (≤ 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen	*n.n. (< 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	0.24	*Spuren (≤ 0.1)*
Dibenzo[a,e]pyren	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren	*n.n. (< 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*	*n.n. (< 0.09)*	*n.n. (< 0.09)*	*n.n. (< 0.09)*	*n.n. (< 0.09)*

Phenole	**B7**	**B9**
Sammelvolumen [Liter]	7.7	4.9
mg / m3		
Summe Phenole	0.78	0.57
Phenol	0.51	0.41
o-Kresol	0.09	0.07
m-Kresol	0.10	0.05
p-Kresol	0.08	0.04

n.n. : nicht nachweisbar

Thalheim Personal Sampler A 1-6

Bitumen Fumes, PAH und Phenole Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**P-A-1**	**P-A-2**	**P-A-3**	**P-A-4**	**P-A-5**	**P-A-6**
Sammelvolumen [Liter]	234	240	242	239	248	238
mg / m3						
TPM (Total Particulate Matter)	1.280	0.096	0.343	0.314	0.161	0.236
TSM (Toluene Soluble Matter)	1.351	0.070	0.276	0.279	0.134	0.210
% TSM	106	72	80	89	83	89

PAH	**P-A-1**	**P-A-2**	**P-A-3**	**P-A-4**	**P-A-5**	**P-A-6**
Sammelvolumen [Liter]	234	240	242	239	248	238
µg / m3						
Summe PAH	376	36	19	36	50	62
Summe EPA	375	36	19	36	50	62
Summe DFG	168	16	9	12	20	26
2-Ring-PAH						
Naphthalin	34	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*
3-Ring-PAH Summe	*274*	*30*	*18*	*29*	*46*	*55*
Acenaphthen	53	3	*n.n. (< 0.2)*	7	7	9
Acenaphthylen	4	*n.n. (< 0.08)*	*n.n. (< 0.08)*	*n.n. (< 0.08)*	*n.n. (< 0.08)*	*n.n. (< 0.08)*
Anthracen	42	7	5	5	10	12
Fluoren	67	7	4	9	10	11
Phenanthren	108	14	9	9	19	23
4-Ring-PAH Summe	*67*	*5*	*1.3*	*6*	*4*	*7*
Benz[a]anthracen	0.8	0.1	0.02	0.2	0.1	0.2
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	0.7	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Chrysen	2.5	0.3	0.1	0.5	0	0.6
Fluoranthen	42	3	0.8	4	3	4
Pyren	21	1.6	0.4	2.0	1.3	2.2
5-Ring-PAH Summe	*0.7*	*0.1*	*0.02*	*0.1*	*0.0*	*0.2*
Benzo[b]fluoranthen	0.44	0.05	0.01	0.08	0.02	0.10
Benzo[j]fluoranthen	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*
Benzo[k]fluoranthen	0.22	0.03	0.01	0.05	0.01	0.06
Benzo[a]pyren	0.032	0.003	0.002	0.003	0.005	0.004
Benzo[e]pyren	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*
Cyclopenta[cd]pyren	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*
6-Ring-PAH Summe						
Anthanthren	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*
Dibenzo[a,e]pyren	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren	*Spuren (≤ 0.09)*	*n.n. (< 0.09)*	*n.n. (< 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*	*n.n. (< 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*

n.n. : nicht nachweisbar

Thalheim Personal Sampler A 7

Bitumen Fumes, PAH und Phenole Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**P-A-7**
Sammelvolumen [Liter]	240
mg / m3	
TPM (Total Particulate Matter)	0.112
TSM (Toluene Soluble Matter)	0.139
% TSM	123

PAH		**P-A-7**
Sammelvolumen [Liter]		240
µg / m3		
Summe PAH		46
Summe EPA		46
Summe DFG		19
2-Ring-PAH		
Naphthalin		*n.n. (< 0.2)*
3-Ring-PAH	*Summe*	*40*
Acenaphthen		6
Acenaphthylen		*n.n. (< 0.08)*
Anthracen		9
Fluoren		9
Phenanthren		17
4-Ring-PAH	*Summe*	*5*
Benz[a]anthracen		0.2
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		*n.n. (< 0.02)*
Chrysen		0.4
Fluoranthen		3
Pyren		2
5-Ring-PAH	*Summe*	*0.2*
Benzo[b]fluoranthen		0.09
Benzo[j]fluoranthen		*n.n. (< 0.5)*
Benzo[k]fluoranthen		0.06
Benzo[a]pyren		0.01
Benzo[e]pyren		*Spuren (≤ 0.1)*
Cyclopenta[cd]pyren		*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen		*Spuren (≤ 0.03)*
6-Ring-PAH	*Summe*	
Anthanthren		*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen		*Spuren (≤ 0.1)*
Dibenzo[a,e]pyren		*n.n. (< 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren		*n.n. (< 0.02)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren		*Spuren (≤ 0.09)*

n.n. : nicht nachweisbar

Thalheim Personal Sampler B 1-6

Bitumen Fumes, PAH und Phenole Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**P-B-1**	**P-B-2**	**P-B-3**	**P-B-4**	**P-B-5**	**P-B-6**
Sammelvolumen [Liter]	321	322	320	325	313	306
mg / m3						
TPM (Total Particulate Matter)	2.823	2.787	0.119	0.203	0.753	0.173
TSM (Toluene Soluble Matter)	2.181	0.362	0.156	0.205	0.106	0.109
% TSM	77	13	132	101	14	63

PAH	**P-B-1**	**P-B-2**	**P-B-3**	**P-B-4**	**P-B-5**	**P-B-6**
Sammelvolumen [Liter]	321	322	320	325	313	306
µg / m3						
Summe PAH	432	23	11	57	29	59
Summe EPA	431	23	11	57	29	59
Summe DFG	176	9	6	30	16	30
2-Ring-PAH						
Naphthalin	24	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*
3-Ring-PAH *Summe*	*259*	*18*	*10*	*43*	*24*	*48*
Acenaphthen	86	5	*n.n. (< 0.2)*	6	3	7
Acenaphthylen	5	*n.n. (< 0.08)*	*n.n. (< 0.08)*	*n.n. (< 0.08)*	*n.n. (< 0.08)*	*n.n. (< 0.08)*
Anthracen	17	2	1	5	4	7
Fluoren	58	4	3	6	3	7
Phenanthren	94	7	6	25	14	26
4-Ring-PAH *Summe*	*148*	*5*	*0.7*	*15*	*5*	*11*
Benz[a]anthracen	2.3	0.07	0.01	0.23	0.04	0.13
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	1.8	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Chrysen	5.4	0.2	0.1	0.5	0.2	0.5
Fluoranthen	90	3	0.4	9	3	7
Pyren	48	2	0.1	5	2	3
5-Ring-PAH *Summe*	*1.9*	*0.13*	*0.04*	*0.17*	*0.12*	*0.14*
Benzo[b]fluoranthen	0.99	0.06	0.02	0.10	0.06	0.09
Benzo[j]fluoranthen	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*
Benzo[k]fluoranthen	0.58	0.04	0.01	0.06	0.04	0.05
Benzo[a]pyren	0.07	0.02	0.004	0.01	0.01	0.004
Benzo[e]pyren	*Spuren (≤ 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*
Cyclopenta[cd]pyren	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen	0.26	*Spuren (≤ 0.03)*	*Spuren (≤ 0.03)*	*n.n. (< 0.03)*	*Spuren (≤ 0.03)*	*Spuren (≤ 0.03)*
6-Ring-PAH *Summe*						
Anthanthren	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*	*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen	*Spuren (≤ 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*	*Spuren (≤ 0.1)*
Dibenzo[a,e]pyren	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*	*n.n. (< 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*	*n.n. (< 0.02)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren	*n.n. (< 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*	*Spuren (≤ 0.09)*

n.n. : nicht nachweisbar

Thalheim Personal Sampler B 7

Bitumen Fumes, PAH und Phenole Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**P-B-7**
Sammelvolumen [Liter]	307
mg / m3	
TPM (Total Particulate Matter)	0.297
TSM (Toluene Soluble Matter)	0.109
% TSM	37

PAH		**P-B-7**
Sammelvolumen [Liter]		307
µg / m3		
Summe PAH		64
Summe EPA		64
Summe DFG		33
2-Ring-PAH		
Naphthalin		*n.n. (< 0.2)*
3-Ring-PAH	*Summe*	*49*
Acenaphthen		7
Acenaphthylen		*n.n. (< 0.08)*
Anthracen		6
Fluoren		8
Phenanthren		28
4-Ring-PAH	*Summe*	*15*
Benz[a]anthracen		0.1
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen		*n.n. (< 0.02)*
Chrysen		0.5
Fluoranthen		10
Pyren		4
5-Ring-PAH	*Summe*	*0.2*
Benzo[b]fluoranthen		0.11
Benzo[j]fluoranthen		*n.n. (< 0.5)*
Benzo[k]fluoranthen		0.06
Benzo[a]pyren		0.003
Benzo[e]pyren		0.05
Cyclopenta[cd]pyren		*n.n. (< 0.2)*
Dibenz[a,h]anthracen		*Spuren (≤ 0.03)*
6-Ring-PAH	*Summe*	
Anthanthren		*n.n. (< 0.05)*
Benzo[ghi]perylen		*Spuren (≤ 0.1)*
Dibenzo[a,e]pyren		*n.n. (< 0.07)*
Dibenzo[a,l]pyren		*n.n. (< 0.02)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren		*Spuren (≤ 0.09)*

n.n. : nicht nachweisbar

Thalheim **Schnüffler**

Bitumen Fumes, PAH und Phenole

Gehalte pro m^3

Bitumen fumes	**Probe A**	**Probe B**	**Probe C**	**Probe D**
mg / m3				
TPM (Total Particulate Matter)	3.740	2.569	0.453	1.020
TSM (Toluene Soluble Matter)	1.889		1.889	1.889
% TSM	51		417	185

PAH	**Probe A**	**Probe B**	**Probe C**	**Probe D**
µg / m3				
Summe PAH	4'811	4'200	2'129	3'523
Summe EPA	4'811	4'200	2'130	3'523
Summe DFG	2'151	2'332	1'091	1'565
2-Ring-PAH				
Naphthalin				
3-Ring-PAH *Summe*	*4'795*	*4'194*	*2'054*	*3'508*
Acenaphthen	451	344	158	729
Acenaphthylen	332	*n.n. (< 20)*	*n.n. (< 20)*	*n.n. (< 20)*
Anthracen	1'152	977	646	661
Fluoren	714	543	189	560
Phenanthren	2'146	2'329	1'061	1'557
4-Ring-PAH *Summe*	*16*	*6*	*73*	*14*
Benz[a]anthracen	0.2	0.3	4.5	1.5
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophen	*n.n. (< 5)*	*n.n. (< 5)*	*n.n. (< 5)*	*n.n. (< 5)*
Chrysen	0.3	0.7	8.1	2.2
Fluoranthen	11	3	44	7
Pyren	5	2	16	3
5-Ring-PAH *Summe*	*0.1*	*0.2*	*1.9*	*1.0*
Benzo[b]fluoranthen	0.07	0.15	1.01	0.52
Benzo[j]fluoranthen	*n.n. (< 3)*	*n.n. (< 3)*	*n.n. (< 3)*	*n.n. (< 3)*
Benzo[k]fluoranthen	0.04	0.08	0.89	0.36
Benzo[a]pyren	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	*n.n. (< 0.1)*	0.10
Benzo[e]pyren	*n.n. (< 0.7)*	*n.n. (< 0.7)*	*n.n. (< 0.7)*	*Spuren (≤ 0.7)*
Cyclopenta[cd]pyren	*n.n. (< 5)*	*n.n. (< 5)*	*n.n. (< 5)*	*n.n. (< 5)*
Dibenz[a,h]anthracen	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*Spuren (≤ 0.2)*
6-Ring-PAH *Summe*				
Anthanthren	*n.n. (< 0.3)*	*n.n. (< 0.3)*	*n.n. (< 0.3)*	*n.n. (< 0.3)*
Benzo[ghi]perylen	*n.n. (< 0.6)*	*n.n. (< 0.6)*	*n.n. (< 0.6)*	*Spuren (≤ 0.6)*
Dibenzo[a,e]pyren	*n.n. (< 0.4)*	*n.n. (< 0.4)*	*n.n. (< 0.4)*	*n.n. (< 0.4)*
Dibenzo[a,l]pyren	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*	*n.n. (< 0.2)*
Indeno[1,2,3-cd]pyren	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*n.n. (< 0.5)*	*Spuren (≤ 0.5)*

Phenole	**Probe A**	**Probe B**	**Probe C**	**Probe D**
mg / m3				
Summe Phenole	1.31	0.13	0.38	0.25
Phenol	0.75	0.09	0.14	0.19
o-Kresol	0.16	0.02	0.06	0.03
m-Kresol	0.22	0.01	0.09	0.02
p-Kresol	0.18	0.01	0.08	0.01

n.n. : nicht nachweisbar