

## Originalarbeiten

Staubfilterung und immissionshistorische Aspekte am Beispiel  
fassadenbegrünenden Wilden Weines (*Parthenocissus tricuspidata*)

Manfred Thönnessen

Universität zu Köln, Geographisches Institut, Forschungsgruppe Fassadenbegrünung, Albertus-Magnus-Platz, 50923 Köln  
(m.thoennessen@uni-koeln.de)DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2005.11.108>

## Zusammenfassung

**Ziel und Absicht.** Das Thema 'Feinstaub' steht derzeit im Fokus des öffentlichen und wissenschaftlichen Interesses. Ungeachtet technischer oder verkehrspolitischer Maßnahmen, erscheint es in diesem Kontext sinnvoll, an die Funktion der Vegetation als Zwischenspeicher für partikuläre Luftschadstoffe zu erinnern. Da großkronige Bäume sowohl Innenräume beschatten als auch die Luftdurchmischung im Straßenraum beeinträchtigen können, soll unter Darstellung naturwissenschaftlicher Ergebnisse und sozialwissenschaftlicher Aspekte auf die Potentiale von Fassadenbegrünungen hingewiesen werden.

**Methoden.** Zur Unterscheidung endogener und exogener Elementanteile werden mittels eines Stripping-Verfahrens auf der Basis von Polyvinyl-Butyral-Lackfilmen die immissionsbedingt eingetragenen Staubauflagen von den Blattoberflächen fassadenbegrünenden Wilden Weines entfernt. Der Reinigungserfolg wird anhand von REM-Aufnahmen belegt. Anhand von AAS- und ICP-MS Analysen werden die Elementkonzentrationen von Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Pt, Rh, Sb und Zn in ungereinigten und gereinigten Blattproben einer innerstädtischen Fassadenbegrünung zwischen 1991 und 1997 aufgezeigt.

**Ergebnisse und Schlussfolgerungen.** Die Ergebnisse belegen die zunehmenden Elementkonzentrationen im Verlauf der einzelnen Vegetationsperioden. Aufgrund des langen Untersuchungszeitraumes können immissionshistorische Aspekte wie das Ende der Nutzung verbleiter Otto-Kraftstoffe und die Einführung der katalytischen Abgasreinigung nachvollzogen werden. Ein Vergleich mit Staubbiederschlagsdaten verschiedener Städte belegt die Relevanz der Filterleistung von Fassadenbegrünungen mit Wildem Wein. Der Vergleich mit Untersuchungsergebnissen von Platanenblättern verweist auf gänzlich unterschiedliche Filtereigenschaften der Blattoberflächen.

**Empfehlungen und Ausblick.** Sachgemäße Planung und Pflege vorausgesetzt, können Fassadenbegrünungen einen sinnvollen Beitrag zu Luftreinhaltung und Wohnumfeldverbesserung darstellen. Wie anhand ausgewählter Ergebnisse von Befragungen gezeigt wird, haben aus Bürgersicht ästhetische und psycho-soziale Aspekte des Wohlbefindens Vorrang vor Umweltargumenten, so dass es sinnvoll erscheint, die unterschiedlichen Interessensebenen kombiniert zu vertreten.

**Schlagwörter:** Blei; Fassadenbegrünung; Feinstaub; Kletterpflanzen; Luftverschmutzung; *Parthenocissus tricuspidata*; Platin-Gruppen-Elemente; Schwermetalle; Stadtrökologie; Wilder Wein

## Abstract

Filtering of Particulate Matter and Long-term Monitoring of Air Pollution by Facade Climbing Japanese Creeper (*Parthenocissus tricuspidata*)

**Goal and Scope.** At the present, air borne particulate matter is in the focus of public and scientific interest. In this context, it makes sense to remember the buffer function of vegetation for particulate air pollutants, notwithstanding technical and traffic management measures. Since trees with large and dense crowns might be able to shade windows and minimise the turbulent dilution of pollutants, natural-scientific results and socio-scientific aspects will point to the potentials of vertical greening with creeping plants.

**Methods.** To differentiate the endogenous and exogenous element fractions, the pollution caused by dust that covers the facade climbing creepers leaves was removed by a polyvinyl-butyrals based stripping method. The cleaning success is proven by SEM-Scans. The results of cleaned and not cleaned leaf-samples from an inner-city vertical greening for the element concentrations of Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Pt, Rh, Sb and Zn between 1991 and 1997 are shown by AAS- and ICP-MS analyses.

**Results and Conclusion.** The results show the increasing element concentrations during the course of the separate vegetation periods. Due to the long investigation period, it is possible to detect historical aspects concerning pollution, such as the end of the use of leaded fuel and the introduction of the catalytic converters. The comparison of dust deposition data from different cities shows the relevance of the pollution filtering by vertical greenings with Japanese Creeper. The comparison of investigation results of sycamore leaves refer to entirely different filtering characteristics of the leaf-surfaces.

**Recommendation and Perspective.** If appropriate planning and maintenance is assured, vertical greening can be a useful contribution for air pollution control and neighbourhood improvement. As selected results from a survey show, from the citizens' point of view, the aesthetical and psychosocial aspects of well-being are of more relevant than ecological arguments. Therefore it seems to be wise to implement the combined fields of interest.

**Keywords:** Air pollution; creeping plant; heavy metals; Japanese creeper; lead; *Parthenocissus tricuspidata*; particulate matter; platinum-group-elements; urban ecology; vertical greening

## 1 Einleitung

Seit wenigen Monaten steht das von Öffentlichkeit und (Massen-)Medien bislang wenig beachtete Thema 'Feinstaub' im Fokus des Interesses und vermochte kurzzeitig selbst die Bedrohungen des internationalen Terrorismus und die Arbeitslosigkeit aus den Schlagzeilen zu verdrängen. Anlass hierfür ist die Rahmenrichtlinie Luftqualität (Rat der Europäischen Union 96/62/EG 1996) und ihre erste Tochter-

richtlinie (Rat der Europäischen Union 99/30/EG 1999) über Immissionsgrenzwerte u.a. für Partikel in der Luft. Im Herbst 2002 wurden diese Richtlinien von der Bundesregierung mit der Novellierung der 22. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV, BMU 2002) in nationales Recht umgesetzt. Seit dem 01.01.2005 gelten nun die neuen Grenzwerte. Bereits im Frühjahr 2005 wurde die Vorgabe von maximal 35 erlaubten Überschreitungen von 50 µg Feinstaub (PM10)

in 24 Stunden in verschiedenen deutschen Städten überschritten. Seitdem ist das bislang nur wenig beachtete Thema auf allen Ebenen akut.

Ungeachtet der Tatsache dass insbesondere Maßnahmen des technischen Emissionsschutzes sowie verkehrspolitisches Management gefragt sind (SRU 2005), erscheint es in diesem Kontext sinnvoll, an die Funktion der Vegetation als Zwischenspeicher für partikuläre Luftschadstoffe zu erinnern.

## 2 Fassadenbegrünung

Bereits seit vielen Jahrhunderten werden Gebäude mit Pflanzen begrünt. Weinrebe oder Efeu ranken seit der Antike an Lauben und Wänden. Noch heute finden sich in Schottland, Island, den nordatlantischen Inseln und an anderen Orten Heide-, Gras- oder Torfhäuser, die zu Beginn des 20. Jahrhunderts vielfach noch genutzt wurden.

In den klimatischen Ungunstlagen von Mittel- und Hochgebirgen dienten Gebäudebegrünungen mit Spalierobst über Jahrhunderte der Versorgung mit Frischobst.

Im vergangenen Jahrhundert schließlich differenzierte sich die Gebäudebegrünung in die Dach- und die Fassadenbegrünung. Im Zuge des in der Bundesrepublik Deutschland erwachenden Umweltbewusstseins wurde Fassadenbegrünung in den 1970er Jahren zum Gegenstand stadtökologischer Planung. In den 1980er Jahren kam es zu einer regelrechten Begrünungseuphorie: Nahezu jede Großstadt initiierte ein eigenes Förderprogramm für Fassadenbegrünungen, zudem können Fassadenbegrünungen seit 1986 per Bebauungsplan vorgeschrieben werden (Chilla et al. 2000, Chilla 2004).

Trotz der Fördermaßnahmen und einer Flut populärwissenschaftlicher Artikel und Bücher wurden nur wenige wissenschaftlich-empirische Untersuchungen zum Thema durchgeführt: Eine Reihe von ökologischen Aspekten wird bei Barthfelder und Köhler (1987) erläutert, zur Bauschadensproblematik ist die Arbeit von Althaus (1986) zu nennen, zum Einfluss von Begrünungen auf den Wärme- und Feuchtehaushalt von Wänden und dem Schadensrisiko schließlich die Untersuchung von Kiessl und Rath (1989). 1995 folgt eine erste Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanzen durch die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung – Landschaftsbau e.V., die im Jahr 2000 erweitert und ergänzt wird (FLL 1995, 2000).

Sozialwissenschaftliche Aspekte und Akzeptanzfragen werden erstmals 1993 von Preuss et al. angesprochen.

Der Einsatz von Kletterpflanzen zur stadtökologisch wirksamen Begrünung von Fassaden ist offenbar ein rein deutscher Ansatz (Schuldt et al. 2002). Doch auch in Deutschland ging das Interesse an Fassadenbegrünungen infolge des steigenden Druckes auf die öffentlichen Kassen in den vergangenen Jahren stetig zurück und viele Städte haben in den 1990er Jahren ihre Begrünungsinitiativen eingestellt (Chilla et al. 2000, Chilla 2004).

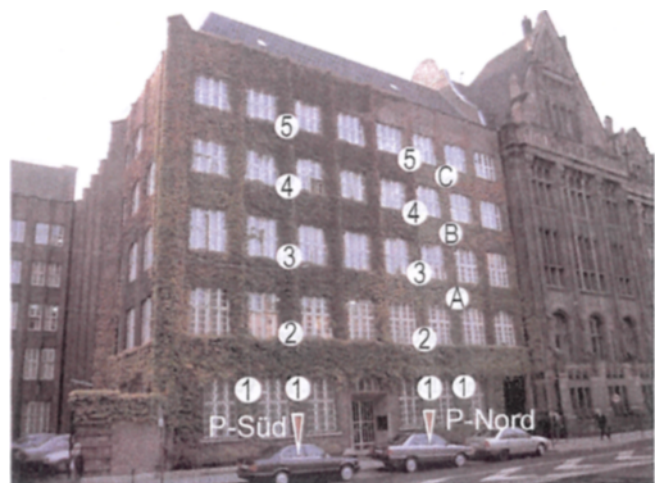
Seit 1996 widmet sich die 'Forschungsgruppe Fassadenbegrünung' am Geographischen Institut der Universität zu Köln

diesem Thema auf interdisziplinärer Ebene: Natur- und sozialwissenschaftliche Fragestellungen werden in engem Kontakt zu Praktikern und Bürgern bearbeitet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Aspekt der Filterung schwermetallhaltiger Stäube und Aerosole am Beispiel einer Fassadenbegrünung mit der landläufig als 'Wildem Wein' bezeichneten Dreispitzigen Jungfernebe (*Parthenocissus tricuspidata*) thematisiert (Thönnessen und Werner 1996, Thönnessen 2002). Ein Vergleich zwischen den Filtereigenschaften von Blättern der Dreispitzigen Jungfernebe mit Platanenblättern (*Platanus x hispanica* ehem. *P. x acerifolia*) sowie eine sozialwissenschaftliche Schlussbemerkung runden die hier dargelegten Untersuchungen ab.

## 3 Material und Methoden

Die detailliert untersuchte Fassadenbegrünung (Abb. 1) befand sich bis zum Jahr 1999 an einer stark befahrenen innerstädtischen Straße in Düsseldorf-Friedrichstadt, wurde jedoch im Rahmen von Sanierungsarbeiten entfernt. Das Verkehrsaufkommen liegt bei über 12.500 Fahrzeugen täglich und stellt lokal die Hauptbelastungsquelle dar.



**Abb. 1:** Ansicht der detailliert untersuchten Fassadenbegrünung in Düsseldorf-Karlstadt. 1–5: Beprobungspunkte für Blattproben A–C: Montagepunkte meteorologischer Messgeräte, P-Süd und P-Nord: Entnahmepunkte von Bodenproben

### 3.1 Probenahme und -vorbereitung

Zwischen 1991 und 1997 wurden Blattproben über die gesamte straßenseitige Vertikalerstreckung der Begrünung gesammelt. Eine Einzelprobe bestand aus 6 tiefgrünen, adulten Blattspreiten ohne Blattstiel, in jeder Beprobungshöhe wurden 12 Einzelproben je Beprobungstermin entnommen und tiefgefroren. Die Proben wurden gefriergetrocknet und mit der Planetenschnellmühle in Achatbechern gemahlen. Zur Elementanalytik wurde in Anlehnung an Kotz et al. (1972) eine Probenmenge von 0,4–0,5g in 50 ml-PTFE Gefäße eingewogen, mit 5 ml HNO<sub>3</sub> (65%) versetzt und in einer Druckaufschlussapparatur über einen Zeitraum von 5 Stunden bei 180°C aufgeschlossen. Der Probenaufschluss für die ICP-MS-Analytik der Platin-Gruppen-Elemente und Antimon

**Tabelle 1:** Oben: Übersicht zu den Analysemethoden: 1=Flammen-AAS, 2=Graphitrohrfen-AAS, 3=ICP-MS. Unten: Mittlere prozentuale Element-Entfernbarkeit von den Blattoberflächen von *Parthenocissus tricuspidata* mit Polyvinylbutyral-Abziehlacken

	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Pt	Rh	Sb	Zn
<b>Analysemethode</b>	1,2	2	2	2	2	1,2	2	2	3	3	3	1
<b>Mittlere Element Entfernbarkeit in %</b>	93,8	79,5	84,2	77,6	63,3	97,6	68,0	88,9	93,8	4,5	96,3	66,6

erfolgte in TFM-Gefäßen in einer mikrowellenunterstützten Druckaufschlussapparatur nach Probeneinwaage und Zugabe von 3 ml HNO<sub>3</sub>, 1 ml HCl und 1 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

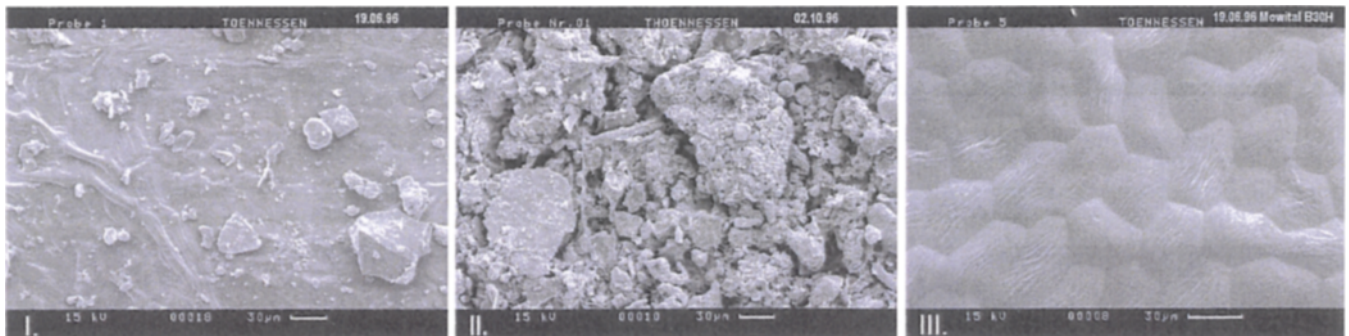
### 3.2 Analytik und Qualitätskontrolle

Bei der Elementanalytik kamen die Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) mittels Flammen-, Graphitrohrfen- und Kaltdampf-Technik sowie die ICP-MS zur Anwendung (Tab. 1). Nach Ermittlung der Nachweis- und Bestimmungsgrenzen wurde die Analysengüte anhand von Kontrolluntersuchungen verschiedener pflanzlicher Referenzmaterialien des Europäischen Bureau of Reference (BCR) überprüft.

### 3.3 Unterscheidung endogener und exogener Elementanteile

Ausgehend von der Überlegung, dass von den Blattoberflächen entfernbare Elementanteile immissionsbedingt eingetragen werden und somit der exogenen Elementdynamik zuzuordnen sind, wurden verschiedene Blattreinigungsmethoden getestet und sowohl elementanalytisch wie raster-elektronenmikroskopisch überprüft. Hierbei stellte sich heraus, dass die Reinigung der Blattoberflächen auf Basis flüssiger Detergentien (H<sub>2</sub>O, CHCl<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>EDTA, Alconox, vgl. Markert 1992) nur unvollständig gelingt. Aus diesem Grunde wurde ein von Rentschler 1982 vorgeschlagenes Stripping-Verfahren auf der Basis von Polyvinyl-Butyral-Lackfilmen optimiert und eingesetzt. Über den Reinigungserfolg informieren Tab. 1 sowie Abb. 2, 3 und 4.

Die überwiegend durch Pflanzenwurzeln bzw. Assimilation aufgenommene Elemente Stickstoff, Kohlenstoff, Calcium, Kalium oder Magnesium können von den Blattoberflächen durch das Stripping erwartungsgemäß kaum (<10%) entfernt werden und weisen in ihrer pflanzenphysiologisch bedingten, jahreszeitlichen wie vertikalen Verteilungsdynamik deutliche Unterschiede zu den immissionsbedingt eingetragenen Elementen auf. Auf eine vertiefende Betrachtung der endogenen Elementdynamik wird in diesem Rahmen verzichtet.

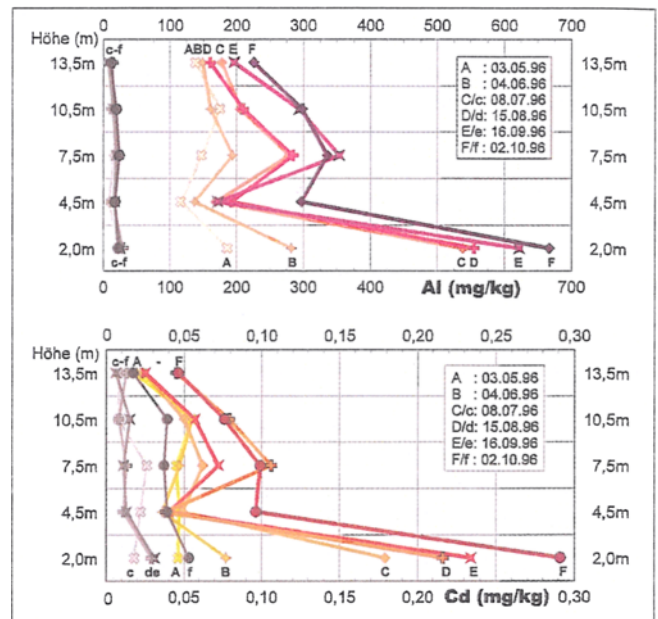


**Abb. 2:** Blattoberseiten von *Parthenocissus tricuspidata* im REM-Bild. Links: Ungereinigte Blattoberfläche im Juni 1996. Mitte: Ungereinigte Blattoberfläche im Oktober 1996. Rechts: Mit Polyvinyl-Butyralen gereinigte Blattoberfläche (Thönnessen 2002)

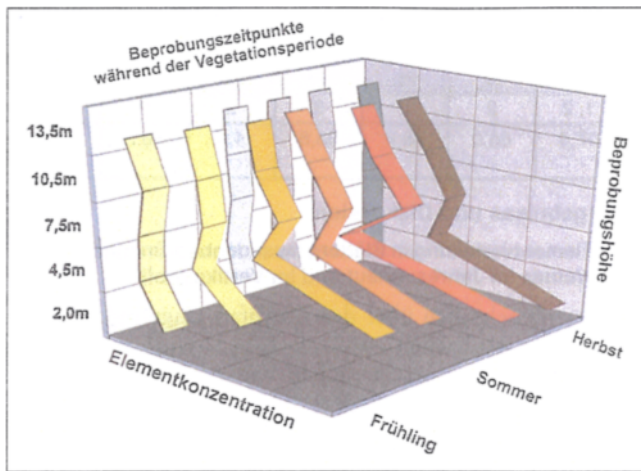
## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Elementverteilung in Blättern fassadenbegründenden Wilden Weines im Jahresverlauf und im Vertikalprofil

Bei den vornehmlich über den Luftpfad eingetragenen Elementen (Entfernbarkeit >60%, s. Tab. 1) wird die Ähnlichkeit sowohl der jahreszeitlichen wie auch der vertikalen Verteilungsdynamik deutlich (s. Abb. 3 bis 5): Im Vertikalprofil folgt auf die Maximalkonzentrationen in der unteren Beprobungshöhe stets ein Minimum in 4,5 m Höhe, darüber finden sich höhere Konzentrationen, die nach oben hin ausdünnen. Es ist zu vermuten, dass in Bodennähe die Stäube nicht nur auf die Blattoberflächen sedimentieren, sondern durch die verkehrsbedingten Turbulenzen geradezu aktiv in den Vegetationsbestand hineingedrückt werden. Darüber



**Abb. 3:** Aluminium- und Cadmiumkonzentrationen in ungereinigten (A–F) und gereinigten (c–f) Blättern fassadenbegründenden Wilden Weines der Vegetationsperiode 1996



**Abb. 4:** Typisches Elementverteilungsmuster weitgehend von den Blattoberflächen entfernbare Spurenelemente. Relativdarstellung anhand der Elementkonzentrationen von Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Pt, Sb in ungereinigten (gelb – rot) und gereinigten (grau) Blattproben der Vegetationsperioden 1995–97

minimieren die Verwirbelungen des fließenden Verkehrs die Sedimentation und erst oberhalb dieses anhand nur geringer Staubakkumulationen auffallenden Bereiches kommt es zum passiven Absetzen der Stäube, dies begründet das sekundäre Konzentrationsmaximum.

Im Verlauf der Vegetationsperiode fallen die stetig anwachsenden Staub- und Elementakkumulationen auf.

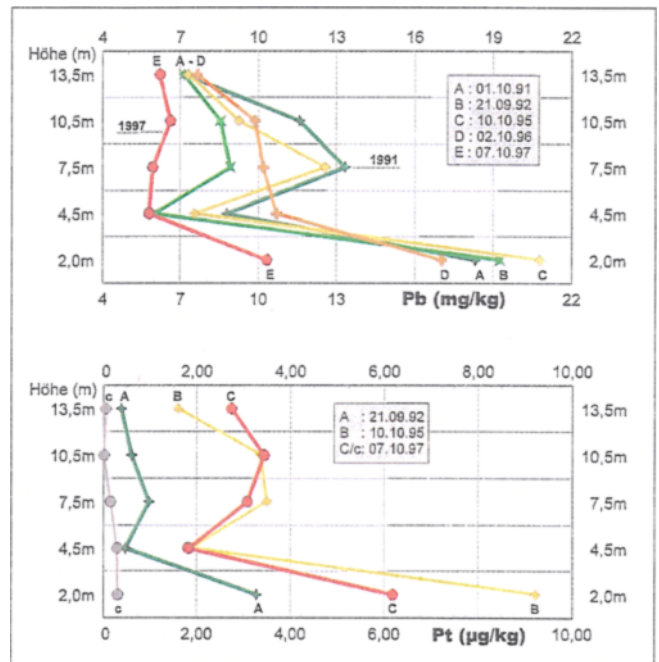
Die Ergebnisse der Korrelations- wie auch der Faktorenanalysen belegen die genannten Ähnlichkeiten unter den hoch entfernbaren Elementen: Auf den ersten Faktor der Hauptkomponentenanalysen der von den Blattoberflächen entfernbaren Elementanteile laden ausschließlich die zu über 60% von den Blättern entfernbaren Elemente mit Faktorladungen  $r > 0,8$ . Lediglich Zink (Entfernbarkeit 66,6%) weist geringere lineare Zusammenhänge zur ersten Hauptkomponente auf. Es ist somit davon auszugehen, dass an der untersuchten Begrünung in der Düsseldorfer Innenstadt die Emissions-, Verteilungs- und Immissionsdynamik dieser Elemente untereinander sehr ähnlich ist. Diese engen Zusammenhänge (siehe auch Abb. 3 und 5) erlauben die in Abb. 4 dargestellte Relativdarstellung der vertikalen und jahreszeitlichen Elementkonzentrationen gereinigter und ungereinigter Blattproben, bei der die jeweiligen Element-Maximalkonzentration der Vegetationsperioden 1995–97 gleich 100% gesetzt wurden.

**4.2 Immissionsquellen und historische Aspekte**

Neben der jahreszeitlichen und der vertikalen Elementverteilung lohnt aufgrund des langen Untersuchungszeitraumes auch die Betrachtung immissionshistorischer Aspekte, sowie der Blick auf die Quellstruktur der durch die Blätter herausgefilterten Elementgehalte.

**4.2.1 Quellgruppe: Verbleiteter Otto-Kraftstoff**

Seit dem 01.01.1971 begrenzt das Benzin-Blei-Gesetz den Bleigehalt von Otto-Kraftstoffen auf 0,4 g/l, die zweite Stu-



**Abb. 5:** Rückgang der Blei- und Zunahme der Platinkonzentrationen in der Trockensubstanz von Blättern fassadenbegründenden Wilder Weins

fe des Gesetzes schrieb ab 1976 maximal 0,15 g/l vor. In unverbleitem Kraftstoff (Einführung in Deutschland 1985) ist eine geogen bedingte Bleikonzentration von 13 mg/l erlaubt (Jentsch 1986). 1991 lag die Quote verbleiteter Otto-Kraftstoffes noch bei 25%, 1995 bei 6%, seit 1997 wird an deutschen Tankstellen nur noch unverbleiteter Kraftstoff angeboten (Plessow 2000). Blei-Emissionen erfolgen in Form von 0,01–0,1 µm großen Aerosolpartikeln, die sich zu größeren Teilchen (0,3–1 µm) akkumulieren können (Alloway 1999). Organische Bleitetraalkyle wurden dem Otto-Kraftstoff als Antiklopffmittel und zur Ventilzschmierung zugegeben. Der Rückgang der bleihaltiger Aerosole im PKW-Abgas und damit in der Luft lässt sich anhand der zwischen 1991 und 1997 abnehmenden Bleikonzentrationen in der untersuchten Fassadenbegrünung deutlich nachvollziehen (Abb. 5).

**4.2.2 Quellgruppe: Katalytische Abgasreinigung**

In der BRD kamen im Mai 1985 die ersten schadstoffreduzierten Fahrzeuge, damals noch mit unregulierten Oxidationskatalysatoren auf den Markt, 1991 machten diese PKW bereits die Hälfte des Gesamtbestandes aus (Stechmann 1993). Abgaskatalysatoren bestehen aus einem mit Aluminiumoxid beschichteten, wabenartigen Keramikkörper, der insgesamt mit bis zu 3 g katalytisch wirksamen Edelmetallen (Pt, Pd, Rh in unterschiedlichen Rezepturen, Pt, Pd Oxidations-, Rh Reduktionsreaktionen) überzogen ist (Claus et al. 1999). Mit der Verbreitung der katalytischen Abgasreinigung in PKW geht eine Immissionszunahme der PGE-Elemente einher. Wie vormals auch für Blei, ist in Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen die Abnahme der PGE-Gehalte in Böden oder Pflanzen mit zunehmender Entfernung von den Straßen typisch (siehe u.a. Fassbender 1996, Helmers 1996, Zereini et al. 1998). Auch dem Reifenabrieb werden gewisse Pt-Emissionen zugeschrieben (Kümmerer

1999). PGE-haltige Immissionen scheinen überwiegend in Partikelgrößen  $\leq 10 \mu\text{m}$  vorzuliegen (Alt et al. 1997, Rauch et al. 2000). Atmosphärische Platinemissionen erfolgen, von wenigen industriellen Punktquellen abgesehen, im Wesentlichen durch den PKW-Verkehr (Schäfer 1998, Kümmerer 1999). Die von einer Vielzahl von Autoren beschriebene Zunahme der PGE in verschiedenen Umweltkompartimenten kann in der *Parthenocissus tricuspidata*-Begrünung der Düsseldorf Innerstadt zwischen 1992 und 1997 anhand der Elementkonzentrationen von Platin und Rhodium ebenfalls nachvollzogen werden (s. Abb. 5). Aufgrund der in den 1990-er Jahren modifizierten Beschichtungen der Katalysatoren mit zunehmender Substitution von Platin durch Palladium erscheint der Trend nicht ganz eindeutig. Unklar bleibt weiterhin die geringe Entfernbarkeit des Rhodiums von den Blattoberflächen (s. Tab. 1).

#### 4.2.3 Quellgruppe: Dieselruß

Im Bereich der untersuchten Fassadenbegrünung ist auch der Dieselruß als wichtige Emissionsquelle zu nennen. Anorganische Bestandteile machen nur etwa 1 Gew.-% des im Wesentlichen in Partikelklassen  $< 0,1 \mu\text{m}$  vorliegenden Abgases aus (Ried et al. 1999). Neben höheren Konzentrationen von Ca, Cu, Fe, Pb und Zn (mg/kg- bis %-Niveau), kommen im Dieselruß auch nennenswerte Mengen von As, Cd, Co, Cr, Mn und Ni vor, Sb dagegen liegt nur in vernachlässigbar geringen Konzentrationen vor (siehe auch Dočekal et al. 1992, Stechmann 1993).

Für Kupfer stellen Dieselruß und Bremsabrieb die Hauptquellen dar (Heinrichs und Brumsack 1997).

#### 4.2.4 Quellgruppe: Bremsabrieb

Für den Bremsabrieb stellt Antimon gewissermaßen das 'Leitelement' dar, welches aufgrund seiner Funktion als Gleitmittel durch die beim Bremsvorgang entstehende Reibungshitze aus den Belägen freigesetzt wird. Bremsbeläge enthalten etwa 2% Sb in Form von Antimontrisulfid (Rauterberg-Wulff 1998). Der leichte Zunahmetrend der Antimongehalte ungereinigter Blattproben korrespondiert mit der Zunahme des Bremsabriebes von etwa 8.400 t im Jahr 1991 auf über 10.600 t im Jahr 1996 aufgrund des gestiegenen Kfz-Bestandes (Trend BRD siehe auch Dietl et al. 1997). Das toxikologische Potential von Sb stand über viele Jahre 'im Schatten' anderer Schwermetalle, wird in jüngerer Literatur jedoch in zunehmendem Maße diskutiert (Dietl et al. 1998, Gebel et al. 1998). Insbesondere ist fraglich, inwieweit das Antimontrisulfid der Bremsbeläge möglicherweise zu kanzerogenem Antimontrioxid umgesetzt werden kann (Rauterberg-Wulff 1998).

Neben Antimon enthalten Bremsbeläge eine Vielzahl weiterer Schwermetalle in herstellerabhängig unterschiedlichen Rezepturen (Heinrichs 2001).

Schließlich werden Chrom, Eisen und Mangan durch bremsbedingte Reibung in erhöhtem Maße auch aus den Bremscheiben freigesetzt.

Es ist davon auszugehen, dass nur etwa 3,2% des Bremsabriebes in die Atmosphäre gelangt, der überwiegende Teil fällt als grober Abrieb auf die Fahrbahndecke, ein nennenswerter Staubanteil von über 10% soll in der Bremsanlage selbst verbleiben (Rauterberg-Wulff 1998). Der quantitativ deutlich weniger bedeutsame Kupplungsabrieb weist materialbedingt Ähnlichkeiten zu den Bremsstäuben auf (Stechmann 1993).

#### 4.2.5 Quellgruppe: Reifenabrieb

Das Schwermetall Zink dient bei der Reifenherstellung als Vulkanisationsbeschleuniger. Die Zinkgehalte von Laufflächen schwanken zwischen 0,8% und 2,5%, häufig werden mittlere Gehalte zwischen 1,1% und 1,4% genannt (Rauterberg-Wulff 1998). Zwischen 1991 und 1996 ist aufgrund gestiegener PKW-Zahlen von einer Zunahme der jährlichen Staubfreisetzungen durch den Reifenabrieb von 81.000 t (1991) auf über 95.000 t (1996) auszugehen. Reifenabrieb erfolgt überwiegend in Partikelgrößen  $> 4 \mu\text{m}$  (Rauterberg-Wulff 1998). Aufgrund seines ubiquitären Charakters stellt Zink jedoch selbst an verkehrsnahen Standorten kein eindeutiges 'Leitelement' für den Reifenabrieb dar. Zudem haftet ein Großteil des Reifenabriebes der Fahrbahndecke an.

#### 4.2.6 Sonstige Quellen

Schließlich kommt Stauben aus dem Abrieb der Fahrbahndecke, Emissionen von Schmierölen (v.a. Cd, Co, Zn) sowie Stauben aus Verschleiß-, Abrieb- oder Korrosionsvorgängen (v.a. Al, Cr, Fe, Ni, Zn) eine gewisse Bedeutung zu; auch diese Emissionen sind der Quellgruppe 'Verkehr' zuzuordnen (s.a. Stechmann 1993).

Bei den Elementen Blei, Platin und Rhodium dokumentieren die Elementkonzentrationen der Blätter typische Immissionstrends infolge umweltpolitischer Entscheidungen. Auch die Elemente Antimon und Kupfer sind an straßennahen Standorten verkehrstypische 'Leitsubstanzen'. Schwach ansteigende bzw. gleichbleibende Elementgehalte stellen eine Folge weniger umweltverschmutzender Fahrzeugtechnologien bei ansteigenden Zulassungszahlen im vergangenen Jahrzehnt dar. Bei den übrigen Spurenmetallen ist trotz hoher verkehrsbedingter Emissionen aufgrund der Überlagerungen mit anderen urban-industriellen oder natürlichen Quellstrukturen keine eindeutige Zuordnung möglich. Eine eindeutige Zuordnung von Zink als 'Verkehrstracer' erscheint nach den vorliegenden Ergebnissen der Staubablagerungen auf den Blattoberflächen von *Parthenocissus tricuspidata* nicht gerechtfertigt (s.a. Monaci et al. 2000).

### 4.3 Staubfilterung durch Wilden Wein

Ein zentrales Argument der Befürworter von Fassadenbegrünungen war und ist die Bindung atmosphärischer Staubpartikel durch die Blattoberflächen. Während der 'Begrünungseuphorie' der 1980er Jahre (Chilla et al. 2000) wurde für den Fall einer konsequenten Begrünung eine Staub- und Schadstoffbindung von 70% und mehr prognostiziert (Doernach und Heid 1982, Minke und Witter 1983).

**Tabelle 2:** Filterleistung von *Parthenocissus tricuspidata*. Konzentrationen verschiedener Metalle je m<sup>2</sup> begrünter Fassadenfläche berechnet für die Vegetationsperiode (165 Tage) bzw. umgerechnet für das gesamte Jahr. Zum Vergleich Metallkonzentrationen im Staubbiederschlag im unmittelbaren Fassadenbereich, in Düsseldorf [D] sowie im Großraum München (Dietl et al. 1998)

Element	Parthenocissus tricuspidata in D' dorf-Innenstadt 1996 & 1997			Staubbiederschlag Städte-Vergleichsdaten		
	Maximal entfernbarer Anteil	Filterleistung je m <sup>2</sup> begrünter Fassadenfläche		D-City im Fassadenbereich	Düsseldorf	München
		Vegetationsperiode	Gesamtes Jahr	05.92-01.93	1992 (a=1991)	1996
	(mg/kg)	(µg/m <sup>2</sup> /d)				
Al	644,80	586,20	265,00	-	-	352,00
Cd	0,17	0,15	0,07	0,38	0,7	0,10
Co	0,66	0,60	0,27	-	-	0,47
Cr	21,40	19,50	8,79	-	-	4,80
Cu	31,40	28,50	12,90	35,57	-	37,70
Fe	2.212,90	2.011,70	909,40	-	-	1.387,00
Ni	8,18	7,44	3,36	-	11,0 (a)	3,30
Pb	15,60	14,20	6,41	79,15	41,0	21,00
Pt	5,81 µg/kg	5,28 ng/m <sup>2</sup> /d	2,39 ng/m <sup>2</sup> /d	-	-	-
Sb	2,62	2,38	1,08	-	-	4,60
Zn	57,30	52,10	23,50	316,27	-	130,00

Auf der Basis einer Vielzahl von Blattflächenmessungen in den unterschiedlichen Beprobungshöhen bietet Tab. 2 einen Vergleich zwischen der flächenhaft umgerechneten Filterleistung der innerstädtischen Untersuchungs begrünung mit Staubbiederschlagsdaten nach Bergerhoff. Diese wurden einerseits im Rahmen eigener Untersuchungen direkt an der Untersuchungsfassade gewonnen, andererseits erfolgt der Vergleich mit Mittelwertsdaten für Düsseldorf und München. Es ist darauf hinzuweisen, dass hier begrünte Vertikalflächen mit Horizontalflächen verglichen werden, niederschlagsbedingte Abwaschungen von den Blättern nicht erfasst werden konnten, und dass ausschließlich die Immissionsseite betrachtet wird. In diesem Kontext erscheint die Filterleistung der Fassadenbegrünung als durchaus relevant. Der Vergleich mit den tatsächlich anfallenden Emissionsmengen steht jedoch noch aus.

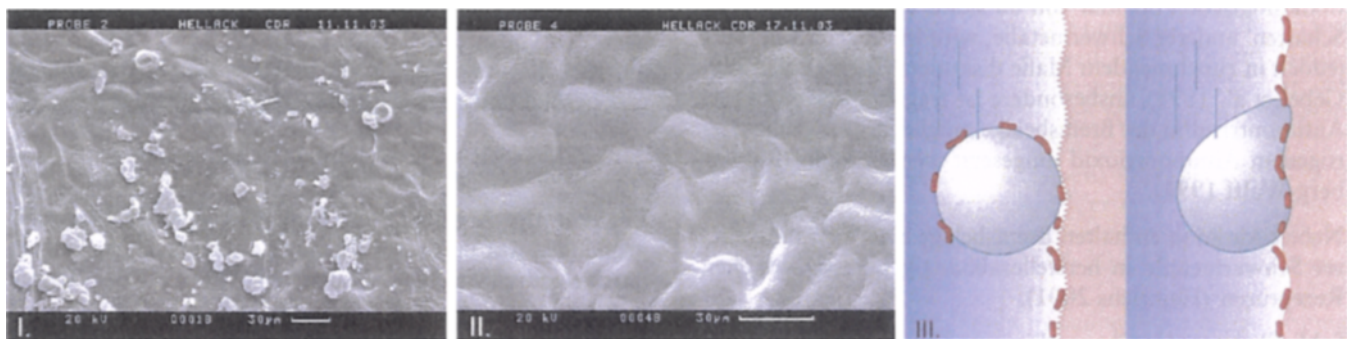
**4.4 Elementkonzentrationen in Platanenblättern im Vergleich zu Dreispitziger Jungfernebe**

An dieser Stelle erscheint der Vergleich der bislang dargelegten Ergebnisse fassadenbegrünender Dreispitziger Jungfernebe mit Platanenblättern (*Platanus x hispanica*) interessant, da rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen und Element-

analysen gänzlich andere Ergebnisse aufzeigen: Die Oberflächen von Platanenblättern selbst verkehrsreicher innerstädtischer Standorte erscheinen kurz vor dem herbstlichen Laubfall weitaus geringer staubbelastet als Blätter fassadenbegrünenden Wilden Weines. Die ermittelten Elementkonzentrationen liegen niedriger und auch die Element-Entfernbarkeit ist geringer (Hellack 2005). Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass nach neueren botanisch-systematischen Erkenntnissen die Familien der Platanaceae wie auch die Nelumbonaceae der Ordnung Proteales angehören, ist zu vermuten, dass Platanenblätter ähnliche Selbstreinigungseffekte aufweisen wie der Lotus (*Nelumbo nucifera*) (Barthlott und Neinhuis 1997, Abb. 6).

Der Vergleich der Blätter verweist auf unterschiedliche Strategien im Umgang mit Staubbeklastungen: Die Jungfernebeblätter akkumulieren Partikelimmissionen über den gesamten Verlauf der Vegetationsperiode ohne nennenswerte Blattreinigung durch Niederschläge. Demgegenüber weisen Platanen offenbar einen dem Lotus-Effekt (siehe Abb. 6) ähnlichen Selbstreinigungseffekt auf.

In Bezug auf die (Fein-)Staubbeklastung stellt sich hier zwingend die Frage, ob und inwieweit Stäube, die von den Blattoberflächen mit Selbstreinigungseffekt abgewaschen werden



**Abb. 6:** Blattoberseiten im REM-Bild. Links: Ungereinigte Blattoberfläche von *Platanus x hispanica* (Oktober 2002). Mitte: Mit Polyvinyl-Butyralen gereinigte Blattoberfläche von *Platanus x hispanica* (Hellack 2005). Rechts: Lotus-Effekt: Selbstreinigung mikrorau strukturierter hydrophober Oberflächen infolge ausbleibender Oberflächenbenetzung ([www.dasumwelthaus.de](http://www.dasumwelthaus.de))

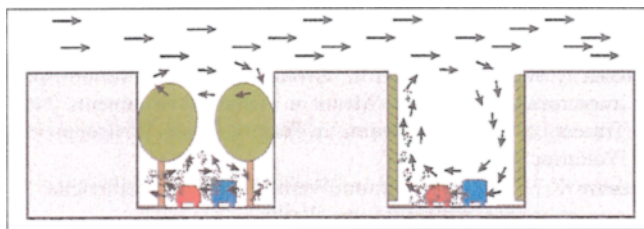


Abb. 7: Verteilung von Luftschadstoffen in unterschiedlich begrünten Straßenräumen

erneut in die Luft gelangen können. Zudem ist die Filterleistung von Gehölzen mit selbstreinigenden Blättern zu quantifizieren. Weiterhin ist es bedeutsam herauszufinden, ob die Selbstreinigung aufgrund höherer Vitalität der Blätter einen Konkurrenzvorteil darstellt.

## 5 Schlussfolgerungen

Anhand der Blattreinigung mit Polyvinyl-Butyral-Abziehlacken konnte im Zeitraum 1991–1997 am Beispiel einer innerstädtischen Fassadenbegrünung mit Wildem Wein für eine Vielzahl von Nähr- und Schadelementen die endogene und exogene Elementdynamik sowohl im Vertikalprofil als auch im Verlauf der Vegetationsperiode dargestellt werden.

Die Verteilungsdynamik sämtlicher in hohem Maße von den Blattoberflächen entfernbaren Metalle ist nahezu gleich und verweist auf ähnliche Herkunfts- und Transportstrukturen. Anhand der Blei- und Platingehalte wird hierbei der Wechsel von verbleiten auf unverbleite Kraftstoffe und die damit einhergehende Einführung der katalytischen Abgasreinigung deutlich. Auch anhand der Antimon- und Kupferkonzentrationen sind immissionshistorische Aspekte erkennbar. Im Vergleich urbaner Staubbiederschlagsdaten mit den Filterbeträgen begrünter Vertikalflächen erscheinen diese durchaus relevant. Da sich Fassadenbegrünungen exakt an der Schnittstelle zwischen Innen- und Außenraum befinden, ist zudem von positiven Auswirkungen auf die Luftqualität von Innenräumen auszugehen.

Wie durch Abb. 7 deutlich wird, ist es möglich, dass sich Bäume in engen Straßenräumen in Bezug auf die Schadstoffgehalte der Luft auch kontraproduktiv auswirken und durch Minimierung des Luftaustausches zu erhöhten Belastungen führen (s.a. Bruse 2003). Fassadenbegrünungen behindern die Verdünnung von Emissionen und Immissionen im Gegensatz hierzu nicht und können somit, gerade in hochverdichteten innerstädtischen Räumen, einen sinnvollen Bestandteil urbaner Grünplanung darstellen. Da sich Fassadenbegrünungen vielfach im sensiblen Grenzbereich zwischen öffentlichem und privatem Raum befinden, ist die Abstimmung von Planung, Anlage und Pflege hier jedoch von besonderer Bedeutung.

## 6 Sozialwissenschaftliche Bemerkung

Zum Abschluss erscheint es sinnvoll, darauf hinzuweisen, dass es verfehlt wäre, innerstädtisches Grün nur monokausal, im Kontext der aktuellen Feinstaubdiskussion zu betrachten. Gerade in Städten und Ballungsräumen kommen Pflanzen

vielfältige Bedeutungsebenen zu, die über naturwissenschaftlich quantifizierbare Funktionalitäten weit hinausreichen.

Ogleich sich das Wesen ästhetischer und emotionaler Inhalte einer rational-intellektuellen Betrachtung vollständig entzieht, wird nach Befragung von über 1550 Bewohnern begrünter Gebäude deutlich, dass auf der Seite der Vorteile von Fassadenbegrünungen, weit vor ökologischen oder sonstigen 'Umweltargumenten', von den Bürgern ästhetische und psycho-soziale Aspekte des Wohlbefindens genannt werden: Das direkte Erleben der Jahreszeiten oder das Rascheln der Blätter im Wind stellen für Stadtmenschen einen direkten Bezug zur Natur dar und sind somit gegenwärtiger als eher abstrakt erscheinende Wirkungen wie die Modifikation des Mikroklimas oder die Zwischenspeicherung von Stäuben auf den Blattoberflächen (Löschmann 2001, Thönnessen 2002). Diese Ergebnisse dürften auf weite Bereiche des städtischen Grüns übertragbar sein: Ungeachtet aller wissenschaftstheoretischen Diskussionen über das Verhältnis von Stadt und Natur (Chilla 2005) berührt die unmittelbare Naturerfahrung, auch und vielleicht gerade im urbanen Kontext, eine tiefe Sehnsucht vieler Menschen (Gerdes 2005).

Somit bietet die aktuelle Feinstaubdiskussion durch die sinnvolle und gezielte Integration verschiedener Grünelemente auch die Chance der Verknüpfung urbaner Immissionsschutzmaßnahmen mit bürgernaher Wohnumfeldverbesserung.

## 7 Literatur

- Alloway BJ (1999): Herkunft von Schwermetallen in Böden. In: Alloway BJ (Hrsg) (1999), Schwermetalle in Böden. Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen. Berlin, Heidelberg, New York, 540 S
- Alt F, Eschnauer HR, Mergler B, Messerschmidt J, Tölg G (1997): A Contribution to the Ecology and Enology of Platinum. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 357, 1013–1019
- Althaus C (1987): Fassadenbegrünung. Ein Beitrag zu Risiken, Schäden und präventiver Schadensverhütung. Berlin, Hannover
- Bartfelder F, Köhler M (1987): Experimentelle Untersuchungen zur Funktion der Fassadenbegrünungen. Berlin-Forschung, FU Berlin, FB Landschaftsentwicklung
- Barthlott W, Neinhuis C (1997): Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202, 1–8
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2002): Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. 11. September 2002, BGBl 2002, 3626
- Bruse M (2003): Stadtgrün und Stadtklima. Wie sich Grünflächen auf das Mikroklima in Städten auswirken. *LÖBF-Mitteilungen* 1/03, 66–70
- Chilla T (2004): 'Natur'-Elemente in der Stadtgestaltung. Diskurs, Institutionalisierung und Umsetzungspraxis am Beispiel von Fassadenbegrünung. Universität zu Köln, Geographisches Institut. *Kölner Geographische Arbeiten* Heft 85
- Chilla T (2005): Stadt und Natur – Dichotomie, Kontinuum, sozialen Konstruktion? *Raumforschung und Raumordnung* 63, 179–188
- Chilla T, Bardo A, Thönnessen M, Radtke U (2000): Fassadenbegrünung: 'Ich dachte, das Thema ist durch?' *Landschaftsarchitektur* 12, 25–28

- Claus T, Zereini F, Urban H (1999): Verteilung und Konzentration von Platin, Palladium und Rhodium in Umweltmaterialien an der Bundesautobahn A 5 (Akm 459-Akm 524). In: Zereini F, Alt F (Hrsg) (1999), Emissionen von Platinmetallen. Analytik, Umwelt- und Gesundheitsrelevanz. Berlin, Heidelberg, New York Das Umwelthaus: Die Natur als Vorbild für selbstreinigende Oberflächen. <<http://www.dasumwelthaus.de>>
- Dietl C, Faus-Kessler T, Wegenke M, Peichl L (1998): Verkehrsbezogenen Immissionen und Immissionswirkungen von Antimon und anderen Metallen. Aktives Biomonitoring, fraktionierte Staubsammlung, Depositionsmessung und toxikologische Bewertung. Bayrisches Landesamt für Umweltschutz. Schriftenreihe Heft 153, München
- Dočekal B, Krivan V, Pelz N (1992): Trace and Minor Element Characterization of Diesel Soot. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry 343, 873–878
- Doernach R, Heid G (2/1982): Das Naturhaus. Wege zur Naturstadt. Frankfurt
- Fassbender K (1996): Quantitative Bestimmung von Platin in straßennahen Böden. Köln
- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) (1995): Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanzen. Troisdorf
- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) (2/2000): Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanzen. Troisdorf
- Gebel T, Claussen K, Dunkelberg H (1998): Human Biomonitoring of Antimony. International Archives of Occupational and Environmental Health 71, 221–224
- Gerdes J (2005): Mit der Natur reden – statt über sie. GAIA 14, 90–95
- Heinrichs H, Brumsack HJ (1997): Anreicherung von umweltrelevanten Metalle in atmosphärisch transportierten Schwebstäuben aus Ballungszentren. In: Matschullat J, Tobschall HJ, Voigt H-J (Hrsg) (1997), Geochemie und Umwelt. Relevante Prozesse in Atmo-, Podo- und Hydrosphäre. Berlin, Heidelberg, New York
- Hellack B (2005): Innerstädtische Parkvegetation und Luftschadstoffe. Analytik anorganischer Nähr- und Schadelemente am Beispiel von Platanenblättern des Essener Stadtgartens. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Köln
- Helmers E (1996): Elements Accompanying Platinum emitted from Automobile Catalysts. Chemosphere 33, 405–419
- Jentsch C (1986): Unverbleite Ottokraftstoffe. Chemie in unserer Zeit 20 (4) 105–110
- Kiessl K, Rath J (1989): Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf den Wärme- und Feuchtehaushalt von Außenwänden und Schadensrisiko. Forschungsberichte des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, F 2129. Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart
- Kotz L, Kaiser G, Tschöpel P, Tölg G (1972): Aufschluss biologischer Matrices für die Bestimmung sehr niedriger Spurenelementgehalte bei bezogener Einwaage mit Salpetersäure unter Druck in einem Teflongefäß. Zeitschrift für Analytische Chemie 260, 207–209
- Kümmerer K (1999): Relevanz von Platinemissionen durch Krankenhäuser. In: Zereini F, Alt F (Hrsg) (1999), Emissionen von Platinmetallen. Analytik, Umwelt- und Gesundheitsrelevanz. Berlin, Heidelberg, New York
- Löschmann L (2001): Leben im begrünenden Haus – eine Bürgerbefragung in Köln. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Köln
- Markert B (1992): Aspects of Cleaning environmental Materials for Multi-Element Analysis, e.g. Plant Samples. Fresenius Journal of Analytical Chemistry 342, 409–412
- Minke G, Witter G (1983): Häuser mit grünem Pelz. Ein Handbuch zur Hausbegrünung. Frankfurt
- Monaci F, Moni F, Lanciotti E, Grechi D, Bargali R (2000): Bio-monitoring of Airborne Metals in Urban Environments: New Tracers of Vehicle Emission, in Place of Lead. Environmental Pollution 107, 321–327
- Plessow K (2000): Herkunft und Verbleib schwermetallreicher atmosphärischer Schwebstäube. Berlin
- Preuss S, Riedel U, Szemeitzke B (1993): Fassadenbegrünung als stadtökologische Bewohneraktivität. POLIS-Institut für Mensch-Umwelt-Beziehungen, Bremen
- Rat der Europäischen Union (1996): Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27. September 1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität; ABI. Nr. L 296 vom 21.11.1996
- Rat der Europäischen Union (1999): Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft; ABI. Nr. L 163 vom 29.06.1999
- Rauch S, Lu M, Morrison GM (2001): Heterogeneity of Platinum Group Metals in Airborne Particles. Environmental Science and Technology 35 (3) 595–599
- Rauterberg-Wulf A (1998): Beitrag des Reifen- und Bremsabriebs zur Rußimmission an Straßen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 15 Nr. 202 Düsseldorf
- Rentschler I (1982): Eine Methode zur Trennung abgelagerter und eingebauter Stoffe in Pflanzenblättern. Naturwissenschaften 69, 240
- Ried T, Klein H, Lox E, Kreuzer T (1999): Diesel-Partikel-Emissionen von PKW – Neue Einblicke in strukturelle Veränderungen im Verlauf der Abgasnachbehandlung unter Verwendung von Dieseloxydationskatalysatoren. Tagung Abgasnachbehandlung von Fahrzeugdieselmotoren 'Haus der Technik'
- Schäfer J (1998): Einträge und Kontaminationspfade Kfz-emittierter Platin-Gruppen-Elemente (PGE) in verschiedenen Umweltkompartimenten. Karlsruher Geochemische Hefte. Schriftenreihe des Instituts für Petrographie und Geochemie, Karlsruhe
- Schuldt N, Chilla T, Thönnessen M (2002): Fassadenbegrünung in England, Kanada und Deutschland. Ein Vergleich aktueller Entwicklungstendenzen. Stadt und Grün 51 (6) 46–49
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2005): Feinstaub durch Straßenverkehr – Bundespolitischer Handlungsbedarf - Stellungnahme. <<http://www.umweltrat.de>>
- Stechmann H (1993): Charakterisierung kraftfahrzeugspezifischer partikelförmiger Emissionen und Quantifizierung ihrer Beiträge zu Aerosolen und Gewässerunreinigungen. Hamburg
- Thönnessen M (2002): Elementdynamik in fassadenbegrünendem Wilden Wein (*Parthenocissus tricuspidata*). Nährelemente, Anorganische Schadstoffe, Platin-Gruppen-Elemente, Filterleistung, Immissionshistorische Aspekte, Methodische Neu- und Weiterentwicklungen. Universität zu Köln, Geographisches Institut. Kölner Geographische Arbeiten Heft 78
- Thönnessen M, Werner W (1996): Die fassadenbegrünende Dreispitzige Jungfernebe als Akkumulationsindikator. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 56 (8) 351–357
- Zereini F, Dirksen F, Skerstupp B, Urban H (1998): Sources of Anthropogenic Platinum-Group-Elements (PGE): Automotive Catalysts versus PGE-Processing Industries. Environmental Science and Pollution Research 5 (4) 223–230

Eingegangen: 14. Juli 2005

Akzeptiert: 23. November 2005

OnlineFirst: 24. November 2005