

# Umweltforschung – Flechten als Bioindikatoren für die Luftverschmutzung im Ural: Eindrücke von einem gemeinsamen Forschungsprojekt

Christoph Scheidegger<sup>1</sup>, Irina Mikhailova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Zürcherstr. 111, CH-8903 Birmensdorf, Schweiz

E-mail: scheidegger@wsl.ch

<sup>2</sup> Institut für Pflanzen- und Tierökologie, 8 Marta 202, RU-620219 Jekaterinburg, Russland

E-mail: mikhailova@ipae.uran.ru

**Die Umgebung von Ekaterinburg (Sverdlovsk) gehört zu den grössten Industrie-  
regionen Russlands mit zahlreichen grossen Emittenten von Luftschadstoffen.  
Die räumliche Verteilung von Schadstoffen und ihre Auswirkungen auf Ökosysteme  
sind im Untersuchungsgebiet jedoch nur mangelhaft bekannt. Die Entwicklung  
einer Bioindikationsmethode zur flächendeckenden Erhebung einer Luft-  
Gesamtbelastung ist ein für dieses Gebiet erfolgversprechender Forschungs-  
ansatz, um kostengünstig flächendeckende Daten zur Umweltbelastungssituation  
des Untersuchungsgebietes zu liefern.**

## 1 Einleitung

Das Sverdlovsk-Gebiet gehört zu den grössten Industrieregionen Russlands. Dabei spielt die Schwerindustrie in über zehn in der Region entstandenen Zentren eine herausragende Rolle. Die Umweltsituation in der ganzen Gegend, speziell aber in der Umgebung der Industriestandorte, ist seit Jahrzehnten alarmierend; Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, auch auf die Lebenserwartung, sind der Bevölkerung bekannt. Zudem sind vor allem in

der näheren Umgebung der Industriekomplexe direkte Auswirkungen auf die Vegetation nicht zu übersehen: Industriewüsten sind weitgehend vegetationslos und dominieren die an die Industrieareale anschliessenden Gebiete im Umkreis von mehreren hundert Metern um die Industriekomplexe. Daran schliesst eine Serie von durch starke Luft- und Bodenverschmutzung geprägten Vegetationstypen. Am widerstandsfähigsten ist ein krüppelwüchsiges Birkengebüsch mit sehr lückiger Krautschicht. Wenige mehrjährige Krautarten wie *Epilobium angustifolium* wachsen aus tiefen Erosionsrinnen aus dem sandigen Boden (Abb. 1). Schliesslich folgt ein offener Fichtenwald mit spalierartig dem Boden anliegenden Ästen und stark reduziertem Zuwachs. In grösserer Entfernung von den Emittenten sind Schädigungen der Vegetation weniger auffällig, aber Forstwissenschaftler beobachten auch hier, beispielsweise bei Waldföhren-Pflanzungen, einen reduzierten Zuwachs.

Das Ziel der Forschungszusammenarbeit war es, die für das Gebiet bereits erprobte Bioindikation mittels baumbewohnender Flechten auf einem grösseren Untersuchungsgebiet anzuwenden und mit der Schwermetallbelastung des Oberbodens und der Flechten zu vergleichen. Von dieser Forschungszusammenarbeit mit einer flechtenkundlichen Arbeitsgruppe soll in diesem Bericht die Rede sein. Diese Arbeiten waren eingebettet in ein Projekt, in

dem zwei weitere russische Forschungsteams und ein weiterer westlicher Wissenschaftler involviert waren. Diese Arbeiten befassten sich speziell mit morphophysiologischen Messungen an 15- bis 25-jährigen Waldföhrenpflanzungen, welche hinsichtlich Zuwachs der Baumhöhen und der Stammdurchmesser sowie verschiedener physiologischer Kennwerte auf allfällige Schäden durch Umweltverschmutzung untersucht wurden (SCHEIDEGGER 1998; SCHEIDEGGER *et al.* 1998).

## 2 Das Projekt

Das Untersuchungsgebiet wurde westlich der Grossstadt Ekaterinburg gewählt, in der Umgebung der Industriestädte Revda und Pervouralsk; es umfasst eine Fläche von 750 km<sup>2</sup>, in der gegen 700'000 Einwohner leben (Abb. 2). Die Hauptquelle industrieller Luftverschmutzung stellt die Kupferschmelze SUMZ dar, die vor mehr als 50 Jahren gebaut wurde, um die in der Nähe der Stadt Degtyarsk gelegenen Kupfervorkommen zu verhütten. Heute sind diese Erzvorkommen nicht mehr wirtschaftlich; die Erze werden von weit entfernten Minen, beispielsweise aus Kazachstan, hergeholt. Der Ausstoss von SO<sub>2</sub> betrug in den späten achtziger Jahren zwischen 100 000 und 150 000 Tonnen pro Jahr. In den letzten zehn Jahren wurde die Produktion des Industriekomplexes stark reduziert – entsprechend hat sich auch der Ausstoss von Schadstoffen deutlich vermindert.

Die Umweltsituation der Grossregion Ekaterinburg wurde in Form einer Karte dokumentiert, in welcher, basierend auf Modellrechnungen, zu erwartende Kontaminationen des Oberbodens dargestellt sind (Anonymous 1993). Eine flächendeckende Erfassung der Immissionsituation ist im Untersuchungsgebiet jedoch bisher nicht



Abb. 1. Offener Birkenbestand ohne Krautschicht. Tiefe Erosionsrinnen sind im Vordergrund sichtbar.

durchgeführt worden. Leider hat sich in früheren Versuchen örtlicher Institute die physikalisch-chemische Erfassung von Deposition im Untersuchungsgebiet nicht realisieren lassen. Es wurden zum Beispiel regelmässig auch einfachste Sammelgefässe entwendet, was abgesehen von den recht hohen Kosten, eine Messung über längere Perioden verunmöglichte. Deshalb wurden schon in früheren Jahren Bioindikationsarbeiten mittels unterschiedlichster Organismen durchgeführt (KAIGORODOVA und VOROBEICHIK 1996; VOROBEICHIK 1998; VOROBEICHIK und KHANTEMIROVA 1994).

Die Flechten-Bioindikation wurde bisher in zahlreichen Gebieten der Erde mit Erfolg zur Charakterisierung einer integralen Luft-Belastungssituation eingesetzt (HERZIG und URECH 1991; NASH und WIRTH 1988; NASH und GRIES 1991; RICHARDSON 1992). Seit den sechziger Jahren wurden auch in der ehemaligen Sowjetunion zahlreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen der Luftverschmutzung auf epiphytische Flechten durchgeführt, die meisten davon in Städten und Agglomerationen (z.B. GOLUBKOVA und MALYSHEVA 1978; MARTIN und EENSAAR 1983; PITERANS 1965). Nebst der Interpretation von

Verbreitungskarten und Karten der Arthäufigkeit hat TRASS (TRASS 1973) vorgeschlagen, zur Bewertung der Luftqualität einen Poleotoleranz-Index zu verwenden, der seither in zahlreichen Untersuchungen zur Anwendung gelangt ist. In stark bewaldeten Regionen, wie in unserem Untersuchungsgebiet, sind jedoch auch in Russland nur wenige Untersuchungen durchgeführt worden, beispielsweise auf der Kola-Halbinsel (GORSHKOV 1991a, b) oder in der Umgebung des Baikalsees (TRASS 1985) sowie in der Gegend von Ekaterinburg (MIKHAILOVA und VOROBEICHIK 1995).

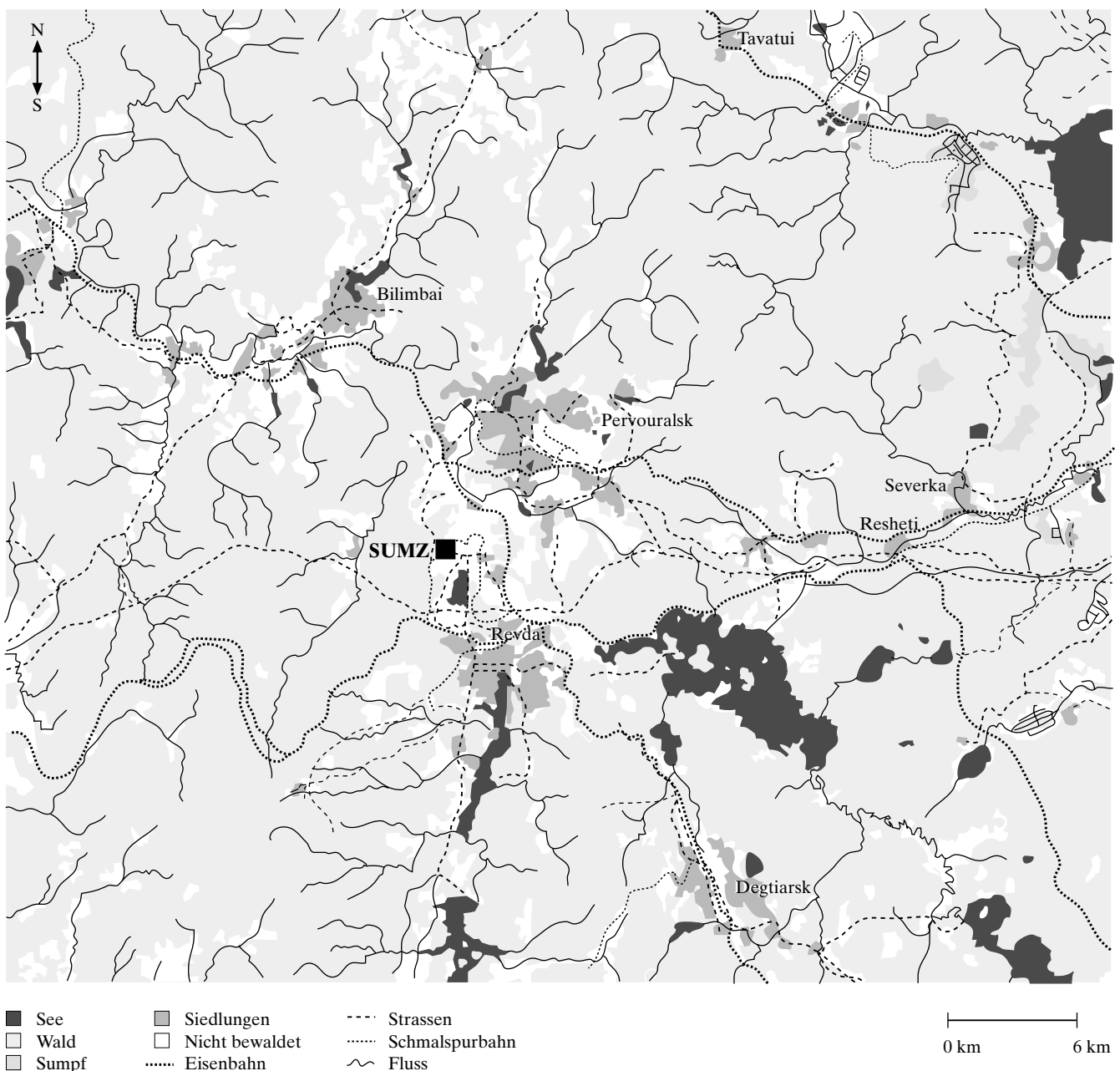


Abb. 2. Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes. Im Zentrum des Kartenausschnittes liegt SUMZ, der Hauptemittent industrieller Luftverschmutzung.

In unserer Untersuchung wurden 238 Probeflächen erfasst. Auf jeder Probefläche wurden auf zehn ca. 60jährigen Birken die borkenbewohnenden Flechtenarten erhoben und ihre Frequenz F in einer zehnteiligen Skala geschätzt. Aus allen Aufnahmen konnte für jede Art die mittlere Begleitartenzahl Q berechnet werden. Diese Erhebungen wurden separat für die Stammbasis und für den mittleren Stammbereich durchgeführt. Aus diesen Daten wurden die Anzahl Arten sowie ein in der Literatur oft verwendeter «Index of atmospheric purity» (IAP) (LEBLANC und DESLOOVER 1970), jeweils für die Stammbasis, den mittleren Stammbereich und für beide Bereiche zusammen berechnet.

$$IAP = \sum Q F$$

Weiter wurden Schwermetallkonzentrationen des Oberbodens und von *Hypogymnia physodes*, einer der häufigsten baumbewohnenden Flechten, bestimmt (SCHEIDEGGER 1998). Die Schwermetall-Belastung wurde einerseits als Konzentrationen der einzelnen Metalle angegeben, andererseits als dimensionsloser Index «K»

$$K_i = [Cu]_i / [Cu]_f + [Pb]_i / [Pb]_f + [Zn]_i / [Zn]_f + [Cd]_i / [Cd]_f$$

Dabei ist  $K_i$  der Boden-Kontaminationsindex der Probefläche  $i$ ,  $[i]$  ist die Konzentration eines Elementes in der  $i$ ten Probefläche, und  $[f]$  ist die Konzentration des Elementes in einer unbelasteten Kontrollzone. Der Index K gibt demgemäß an, wie oft der Hintergrundwert im belasteten Gebiet überschritten wird.

Die Schwermetall-Bodenkontamination K weist in der Umgebung von SUMZ sehr hohe Werte auf, mit Spitzenwerten von über 120. Östlich von SUMZ sind zudem weitere kleinere Emittenten vorhanden, generell nehmen aber die K-Werte mit zunehmender Distanz zu SUMZ ab (Abb. 3). Detailliertere Auswertungen und weitere Ausführungen zu den Untersuchungsmethoden sind im ausführlichen Schlussbericht des Projektes enthalten (SCHEIDEGGER 1998).

Die lichenologischen Untersuchungen haben 48 baumbewohnende Flechtenarten (Tab. 1) auf Birken nachgewiesen. In nur schwach belasteten Teilen des Untersuchungsgebietes konnten in der Regel 18 bis 22 Arten pro Probefläche nachgewiesen werden, dar-

unter auch generell als relativ sensitiv eingestufte Arten wie *Usnea hirta*, *Evernia mesomorpha* und *Bryoria implexa*. Die Anzahl Arten pro Probefläche reduzierte sich aber deutlich mit zunehmender Nähe zum Hauptemittenten

und in einer Umgebung von bis zu 2,5 km konnten keine Flechten an Birkenstämmen mehr nachgewiesen werden. In diesen Gebieten wurde denn auch eine massive Kontamination des Oberbodens nachgewiesen (K-Werte bis

Tab. 1. Liste der für die Berechnung der IAP-Werte verwendeten Flechtenarten.

<i>Amandinea punctata</i> (Hoffm.) Coppins und Scheideg.	<i>Lecanora piniperda</i> Körber
<i>Biatora efflorescens</i> (Hedl.) Räsänen	<i>Lecanora pulicaris</i> (Pers.) Ach.
<i>Bryoria implexa</i> (Hoffm.) Brodo und D.Hawksw.	<i>Lecanora symmicta</i> (Ach.) Ach.
<i>Buellia griseovirens</i> (Turn. und Borrer ex Sm.) Almb.	<i>Lecidea nylanderii</i> (Anzi) Th. Fr.
<i>Caloplaca</i> sp. Th. Fr.	<i>Lepraria incana</i> (L.) Ach.
<i>Candelariella vitellina</i> (Hoffm.) Müll. Arg.	<i>Micarea denigrata</i> (Fr.) Hedl.
<i>Cetraria sepincola</i> (Ehrh.) Ach.	<i>Micarea melaena</i> (Nyl.) Hedl.
<i>Chaenotheca chrysocephala</i> (Turner ex Ach.) Th. Fr.	<i>Micarea prasina</i> Fr.
<i>Chaenotheca ferruginea</i> (Turner und Borrer) Migula	<i>Mycobilimbia sphaeroides</i> (Dickson) V. Wirth
<i>Cladonia botrytes</i> (Hagen) Willd.	<i>Mycoblastus fucatus</i> (Stirton) Zahlbr.
<i>Cladonia cenotea</i> (Ach.) Schaerer	<i>Mycoblastus sanguinarius</i> (L.) Norman
<i>Cladonia coniocraea</i> auct.	<i>Parmelia olivacea</i> (L.) Ach. s. str.
<i>Cladonia fimbriata</i> (L.) Fr.	<i>Parmelia sulcata</i> Taylor
<i>Evernia mesomorpha</i> Nyl.	<i>Parmeliopsis ambigua</i> (Wulfen) Nyl.
<i>Fuscidea arboricola</i> Coppins und Tønsh.	<i>Parmeliopsis hyperopta</i> (Ach.) Arnold
<i>Fuscidea pusilla</i> Tønsh.	<i>Physcia</i> sp. (Schreber) Michaux
<i>Fuscidea recensa</i> (Stirton) Hertel, V.Wirth und Vezda	<i>Placynthiella uliginosa</i> (Schrader) Coppins und P. James
<i>Hypocenomyce friesii</i> (Ach.) P. James und G. Schneider	<i>Platismatia glauca</i> (L.) W. Culb. und C. Culb.
<i>Hypocenomyce scalaris</i> (Ach. ex Lilj.) Choisy	<i>Rinodina degeliana</i> Coppins
<i>Hypocenomyce sorophora</i> (Vainio) P. James und Poelt	<i>Rinodina efflorescens</i> Malme
<i>Hypogymnia physodes</i> (L.) Nyl.	<i>Ropalospora viridis</i> Tønsh.
<i>Imshaugia aleurites</i> (Ach.) S.F. Meyer	<i>Scoliosporum chlorococcum</i> (Graewe ex Stenh.) Vezda
	<i>Trapeliopsis flexuosa</i> (Fr.) Coppins und P. James
	<i>Trapeliopsis granulosa</i> (Hoffm.) Lumbsch
	<i>Usnea hirta</i> (L.) Weber ex Wigg.
	<i>Vulpicida pinastri</i> (Scop.) Mattson und Lai

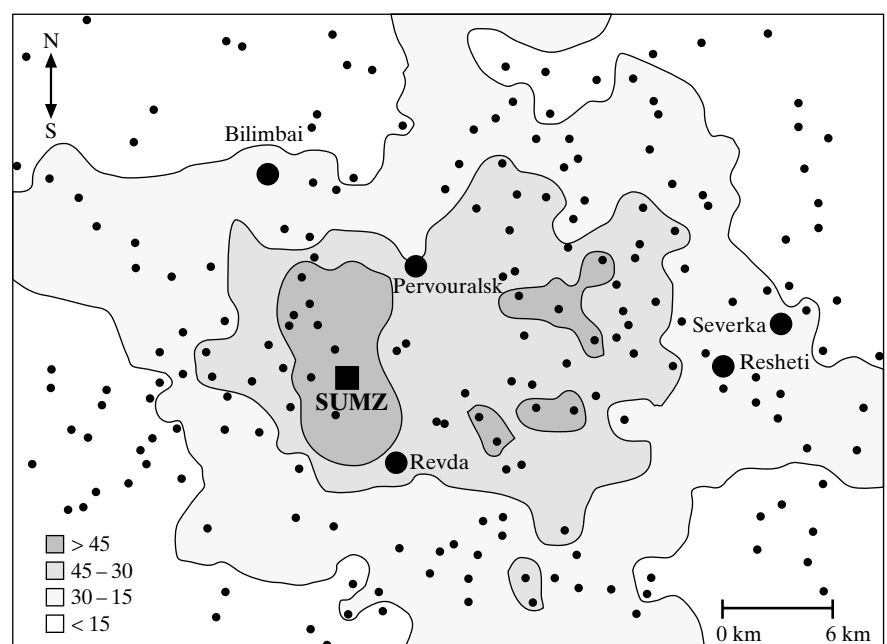


Abb. 3. Karte der Schwermetall-Bodenkontamination im Untersuchungsgebiet (Boden-Kontaminations-Index). Die Punkte bezeichnen die Probeflächen.

128). An diese, gemeinhin als «Flechtenwüste» bezeichnete Zone schliesst ein Bereich an mit weniger als 4 Flechtenarten pro Probefläche, in der auch die Frequenz der beobachteten Arten sehr gering ist. Die Arten sind meist sehr unauffällige, extrem acidophytische Arten wie *Scoliciosporum chlorococcum* oder *Micarea denigrata*. Der Boden-Kontaminationswert K überschreitet meist den Wert 45.

Bei weiter abnehmender Umweltverschmutzung nehmen sowohl Anzahl Arten als auch der IAP-Wert zu (Abb. 4).

Ein Vergleich zwischen Boden-Kontaminationsindex K und IAP-Wert ergibt in den meisten Fällen hochsignifikante Korrelations-Koeffizienten (Tab. 2), obschon wir einen der wichtigsten Parameter,  $\text{SO}_2$  und seine Folgeprodukte, in der Untersuchung nicht erfassen konnten.

Für das Untersuchungsgebiet konnte damit gezeigt werden, dass mit der IAP-Methode sehr kostengünstig flächendeckend Informationen zur Immissionsituation eines Gebietes erarbeitet werden können. Das etablierte

Messnetz erlaubt zudem, die Entwicklung der Immissionsituation zu verfolgen. Seither haben Projektpartner weitere, durch die Region finanzierte Projekte akquirieren können und setzen auch in anderen Gebieten die IAP-Methode zur Umweltbeobachtung ein.

### 3 Forschungszusammenarbeit

Die Projekteingabe konnte dank einem längeren Forschungsaufenthalt von Prof. Shavnin (Uralische Forsttechnische Akademie, UFA, Ekaterinburg) an der WSL gemeinsam mit dem Koordinator und dem zweiten westlichen Partner ausgearbeitet werden. Wir entschieden uns, ein anwendungsorientiertes Projekt einzureichen, in der Überzeugung, dass das Projekt eine Basis für weitere umweltwissenschaftliche Forschung an der UFA schaffen soll. Ein Subkontraktor, der die Flechtenbioindikation im Rahmen des Projektes bearbeiten würde, stand während der Planung noch nicht fest, konnte dann aber nach Bewilligung des Projektes bald gefunden werden.

Zu Beginn des Projektes wurden anlässlich eines vierwöchigen gemeinsamen Workshops in Ekaterinburg das Untersuchungsgebiet festgelegt und die Untersuchungsmethoden diskutiert. Während dieses Aufenthaltes wurde auch klar, unter welchen schwierigen Bedingungen das Projekt durchzuführen war: Die Durchführung einfachster Messungen der Staub- und Niederschlagsdeposition scheiterte daran, dass auch billige Kunststoffgefässe in Vorversuchen regelmässig verschwanden, deshalb keine auch nur einigermaßen befriedigende Daten erhoben werden konnten und dadurch auf für ein derartiges Projekt sehr wichtige Messungen verzichtet werden musste. Der Koordinator hat sich zudem in der Planungsphase falsche Vorstellungen über die Zugänglichkeit des Gebietes gemacht. Leicht erreichbare Beobachtungsflächen konnten zwar mit dem Zug erreicht werden – aber auch dann nur nach oft stundenlangem Marsch durch schwieriges Gelände. Zudem waren längst nicht alle Regionen mit vertretbarem Aufwand erreichbar. Die Auswahl der Probeflächen musste deshalb auf durch Verkehrswege erschlossene Gebiete beschränkt werden. Erst später hat sich herausgestellt, dass für spezielle Untersuchungen das Material

Tab. 2. Korrelationskoeffizienten zwischen Schwermetallgehalten und Flechten-IAP-Werten. \*  $P < 0,05$  \*\*  $P < 0,01$  \*\*\*  $P < 0,001$

	Arten pro Probefläche	Anzahl Arten pro Stamm		IAP-Wert		
		Stamm-basis	1,3 m	Stamm-basis	1,3 m	Ganzer Stamm
<i>Schwermetalle im Oberboden</i>						
Cu	-0,53 ***	-0,52 ***	-0,40 ***	-0,53 ***	-0,45 ***	-0,52 ***
Cd	-0,39 ***	-0,34 ***	-0,33 ***	-0,38 ***	-0,34 ***	-0,38 ***
Pb	-0,37 ***	-0,31 ***	-0,29 ***	-0,37 ***	-0,31 ***	-0,37 ***
Zn	-0,32 ***	-0,24 **	-0,23 **	-0,25 ***	-0,21 **	-0,24 **
K-Wert	-0,53 ***	-0,48 ***	-0,40 ***	-0,51 ***	-0,43 ***	-0,50 ***
<i>Schwermetalle in Flechten</i>						
Cu	-0,38 ***	-0,38 ***	-0,49 ***	-0,41 ***	-0,44 ***	-0,46 ***
Cd	-0,02	-0,22 *	-0,14	-0,18 *	-0,26 **	-0,23 **
Pb	-0,32 ***	-0,31 ***	-0,44 ***	-0,36 ***	-0,44 ***	-0,43 ***
Zn	-0,43 ***	-0,45 ***	-0,43 ***	-0,32 ***	-0,35 ***	-0,37 ***
S	-0,26 **	-0,31 ***	-0,48 ***	-0,41 ***	-0,42 ***	-0,46 ***
K-Wert	-0,30 ***	-0,36 ***	-0,42 ***	-0,37 ***	-0,44 ***	-0,43 ***

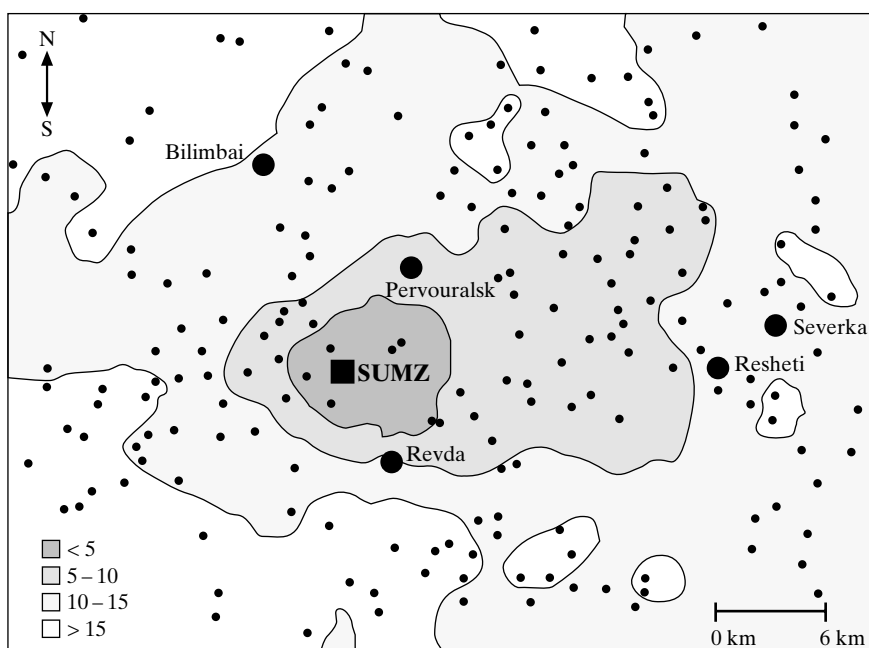


Abb. 4. Karte des «Index of Atmospheric Purity», IAP im Untersuchungsgebiet. Die Punkte bezeichnen die Probeflächen.

nicht in genügend frischem Zustand untersucht werden konnte – somit Artefakte den Wert der Messungen relativierten. Die wissenschaftlichen Erwartungen an das Gesamtprojekt mussten deshalb in der zweiten Projekthälfte stark nach unten korrigiert und die Hoffnung auf eine überzeugende Synthese der Teilprojekte aufgegeben werden. Auch die Publikation der Teilprojekte braucht mehr Zeit als vorgesehen, war doch ein Hauptziel des Koordinators, mit verschiedenen involvierten wissenschaftlichen Partnern die Resultate der Forschung in internationalen Zeitschriften zu publizieren, wofür aber deutlich mehr Zeit benötigt wird, als während des Projektes zur Verfügung stand. Dafür sind bisher einige Arbeiten zu Spezialthemen entstanden, die eigentlich gar nicht im Rahmen des Projektes geplant waren, sich aber durch eine spontane Zusammenarbeit entwickelten.

Trotz der beschriebenen Schwierigkeiten ist für die involvierten Projektpartner das Projekt erfolgreich abgeschlossen worden. Dank der Kooperation konnten die russischen Partner geplante, aber aus finanziellen Gründen anders nicht realisierbare Forschungsvorhaben durchführen. Die zahlreichen Analysen stellen wertvolle Basisdaten für die künftige Umweltforschung in der Region dar, auf die bereits jetzt, nach Ablauf des Projektes, aufgebaut wird.

Selbstverständlich konnten sich im Projekt involvierte Wissenschaftler, trotz der zum Teil beträchtlichen, vom Geldgeber geforderten administrativen Aufgaben, wissenschaftlicher Arbeit widmen und erhielten durch das Projekt die Möglichkeit, sich an internationalen Kongressen zu orientieren. Im Rahmen des Projektes konnten Beteiligte wertvolle Erfahrung im Projektmanagement machen, was sich mittlerweile auch auf ihre Positionen an den Instituten ausgewirkt hat. Es muss aber hier auch klar die Gefahr erkannt werden, dass die vergleichsweise hohen Saläre der in solchen Projekten angestellten Personen Neider auf den Plan gerufen haben. Als wichtigster Punkt der Forschungs Kooperation wird aber von den Wissenschaftlern betont, dass längere, mehrere Monate dauernde Aufenthalte an einem ausländischen Institut ihre wissenschaftliche Arbeit am wirkungsvollsten unterstützt habe. Es war vor allem die Möglichkeit, an schwer erhältliche Literatur heranzukommen, und eine moderne Infrastruk-

tur für die Forschungsarbeit benutzen zu können.

Ein neues, vom Schweizerischen Nationalfonds im Rahmen von SCOPES finanziertes Projekt wird es für die nächsten drei Jahre erlauben, mit verschiedenen, bereits im ersten Projekt involvierten Personen die Forschungs Kooperation weiterzuführen.

#### Dank

Für wertvolle Unterstützung während der Durchführung des Projektes danken wir den involvierten Institutionen herzlich. Ohne wesentliche Eigenleistungen wären die konstruktiven Forschungsaufenthalte nicht möglich gewesen. Speziell dankt Christoph Scheidegger der USFEA und Irina Mikhailova der WSL für diese Unterstützung. Christoph Scheidegger dankt herzlich für die gute Zusammenarbeit und die intensiven Diskussionen mit Sergey Shavnin, Vladimir Kriouk, Efim Axelrod und Eugene Vorobeichik. Valery Fomin danken wir für die Abbildungen 2 bis 4.

INTAS danken wir für die finanzielle Unterstützung des Projektes 93–1645.

#### 4 Literatur

- Anonymous, 1993: Ecological map of the industrial areas of the Sverdlovsk region. Federalnaja slushba geodesii i kartografi Rossii. Zentr. Aerokosmoecologia, ul. Frunse 76, 620144 Ekaterinburg, GSP-963, Moskva.
- GOLUBKOVA, N.; MALYSHEVA, N., 1978: The influence of city growth on lichens and lichen indication of atmospheric pollution of Kazan. *Botanicheskii Zhurnal* [Leningrad] 63: 1145–1154.
- GORSHKOV, V., 1991a: Destruction by atmospheric pollution of the epiphytic lichen cover on pines of the Kola Peninsula. *Soviet Journal of Ecology* 22, 4: 221–227.
- GORSHKOV, V., 1991b: Effect of atmospheric pollution on the destruction of the epiphytic lichen cover of pine trunks in pine forests for Kola Peninsula. *Ekologiya*. 20–27.
- HERZIG, R.; URECH, M., 1991: Flechten als Bioindikatoren. Integriertes biologisches Messsystem der Luftverschmutzung für das Schweizer Mittelland. *Bibl. Lichenol.* 43.
- KAIGORODOVA, S.Y.; VOROBEICHIK, E.L., 1996: Changes in Certain Properties of Grey Forest Soil Polluted with Emissions from a Copper-smelting Plant. *J. Ecol.* 27: 177–183.
- LEBLANC, F.; DESLOOVER, J., 1970: Relation between industrialisation and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Can. J. Bot.* 48: 1485–1496.
- MARTIN, L.; EENSAAR, A., 1983: Lichen indication and mathematical modeling of SO<sub>2</sub> dispersal in Thallinn [In Russian]. *Proc. of Estonian Academy of Sciences, Ser. Biol.* 206–215.
- MIKHAILOVA, I.; VOROBEICHIK, E., 1995: Epiphytic lichenosynusia under conditions of chemical pollution: dose-effect dependencies. *Russian Journal of Ecology* 26, 6: 425–431.
- NASH, T.; WIRTH, V. (eds) 1988: Lichens, Bryophytes and Air Quality. *Bibliotheca Lichenologica* 30.
- NASH, T.; GRIES, C., 1991: Lichens as indicators of air pollution. – In: HUTZINGER, O. (ed) *The Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 4, Part C. Heidelberg, New York, Springer. 1–29.
- PITERANS, A., 1965: Zones of lichens distribution in Riga. In: *Problems of fungi and lichens studies* [In Russian]. Tartu.
- RICHARDSON, D.H.S., 1992: Pollution monitoring with lichens. Slough, Richmond.
- SCHIEDEGGER, C., 1998: Lichen Bioindication and Morphophysiological Characterisation of Tree Stands for an Ecological Monitoring of Forests in Polluted Areas in the Middle Urals (Russia, Sverdlovsk Region). Brussels, INTAS.
- SCHIEDEGGER, C.; SHAVNIN, S.; MIKHAILOVA, I.V.F.; MAKHNEV, A.; STEINMEIER, C.; PEZZOTTA, D., 1998: Lichen bioindication and morphophysiological characterisation of tree stands for an ecological monitoring of forests in polluted areas in the Middle Urals. In: CINDJAEV, A.S. (ed) *Lesi urala i hozjajstvo v nih*. Yekaterinburg, Uralskaja gosudarstvennaja lesotehniceskaja akademija; Birmensdorf, Swiss Federal Research Institute WSL. 393–405.
- TRASS, H., 1973: Lichen sensitivity to air pollution and index of poleotolerance (I.P.). *Folia Cryptogam. Est.* 3: 19–22.
- TRASS, H., 1985: Classes of poleotolerance and ecological monitoring. *Problems of ecological monitoring and ecosystem modelling* 8: 122–137.
- VOROBEICHIK, E.L., 1998: Populations of Earthworms (Lumbricidae) in Forests of the Middle Urals in Conditions of Pollution by Discharge from Copper Works. *Russian Journal of Ecology* 29: 85–91.
- VOROBEICHIK, E.L.; KHANTEMIROVA, E.V., 1994: Reaction of Forest Phytocenoses to technogenic Pollution: Dose-Effect Dependencies. *Russian Journal of Ecology* 25: 171–180.