

Beitragsserien

Beitragsserie: Projekt „Angewandte Ökologie“: Ökotoxikologie

Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Projekt „Angewandte Ökologie“ (PAÖ), Griesbachstraße 3, D-76185 Karlsruhe

Die Beitragsserie aus den Ausgaben 5/92, 6/92, 1/93, 2/93 und 3/93 wird hier fortgesetzt.

Optimierung eines Bioindikator-Meßnetzes

mit geostatistischen Methoden und einem geographischen Informationssystem*

Eva-Maria Forster, Michael Matthies¹⁾, Rainer Brüggemann

Projektgruppe Umweltgefährdungspotentiale von Chemikalien, GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, D-85764 Oberschleißheim

¹⁾ Jetzige Adresse: Universität Osnabrück, Angewandte Systemwissenschaft, D-49076 Osnabrück

Zusammenfassung. Zur räumlich differenzierten Feststellung von Schadstoffbelastungen ist es notwendig, flächendeckende Meßnetze einzurichten und zu beproben. Die regional unterschiedliche Hintergrundbelastung mit Schwermetallen wird anhand eines Bioindikators, des epiphytischen Laubmoos *Hypnum cupressiforme* erfaßt. Zeit- und Kostengründe führten zu der Überlegung, das Meßnetz räumlich hinsichtlich der Probenahmestandorte retrospektiv zu optimieren.

Ziel dieser Arbeit war, das landesweite Meßnetz des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, dessen Probenahmestellen durchschnittlich 16 x 16 km voneinander entfernt liegen, zu reduzieren ohne erhebliche Informationsverluste bezüglich der großräumigen Hintergrundbelastung hinnehmen zu müssen. Thematisch gesehen gliedert sich daher die Arbeit in zwei Bereiche: einerseits das Feststellen räumlicher Abhängigkeiten und andererseits die Auswahl der Probenahmestandorte. Hierzu wurden geostatistische Methoden (Semivariogrammanalyse und Kriging) eingesetzt.

Aufgrund der Semivariogrammanalyse läßt sich folgendes feststellen: Die hohe Variabilität der Meßwerte spiegelt sich in einem starken Grundrauschen wider und wird anhand des Nugget-Effekts quantifiziert. Obwohl die Semivariogramme in den untersuchten Jahren 1981 bis 1990 relativ stark variieren, läßt sich ein grundsätzliches Muster beschreiben. Das sphärische Modell gibt am besten die räumlichen Abhängigkeiten der Konzentrationen für jedes Element wieder. Durch die Rückschätzung der bekannten Meßwerte mit Hilfe der eingegebenen Modellparameter wurde die Güte des Modells getestet.

Kriging wurde für das Ausgangsmeßnetz mit 370 Standorten durchgeführt und als Vergleichsgrundlage für die neu entwickelten Meßnetze verwendet. Als Auswahlkriterien, inwieweit Standorte beprobt werden müssen, dienen die Krigingstandardabweichung, die Überschreitung des Konfidenzintervalls, die prozentuale Abweichung des Krigingfehlers, die prozentuale Abweichung der Schätzwerte im Vergleich zum Ausgangsmeßnetz und die bedingte Wahrscheinlichkeit, mit der ein festgelegter Schwellenwert überschritten wird.

Zudem sollen hochbelastete Standorte und Standorte in der Nähe

bestimmter Klimameßstationen für zukünftige vergleichende Auswertungen erhalten bleiben. Visualisiert und ausgewertet wurden die Parameter mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems. Schließlich wurde eine Meßnetzkonfiguration mit 126 Probenahmestellen als ausreichend betrachtet, um eine ähnliche Information über die Hintergrundbelastung zu erhalten wie mit 370 Standorten.

1 Einleitung

Zur räumlich differenzierten Feststellung von Schadstoffbelastungen ist es notwendig, flächendeckende Meßnetze einzurichten und zu beproben. Ein Beispiel dafür ist die Erfassung der regional unterschiedlichen Hintergrundbelastung anhand eines Bioindikators durch das Moosmeßnetz in Bayern. Die seit 1981 in einem regelmäßigen Raster genommenen Moosproben (*Hypnum cupressiforme*) werden jährlich auf ihren Gehalt an Schwermetallen untersucht. Zeit- und Kostengründe führten zu der Überlegung, das Meßnetz räumlich hinsichtlich der Probenahmestandorte retrospektiv zu optimieren. Um zu einer begründeten reduzierten Anzahl der Meßpunkte zu gelangen, ist es notwendig, zunächst die räumlichen Abhängigkeiten der einzelnen Meßwerte festzustellen. In dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit geostatistische Methoden ein geeignetes Mittel sind, ein derartiges Meßnetz zu optimieren. Die Verringerung der Anzahl der Standorte sollte mit einem möglichst geringen Informationsverlust einhergehen. Die Ergebnisse wurden in ein Geographisches Informationssystem eingelesen und weiterverarbeitet. Dabei wird von dem vorgegebenen Meßnetz ausgegangen, d.h. die vorhandene Struktur, die festgelegten Gitterpunkte, der Zeitpunkt der Beprobung oder die Anzahl der Mischproben wird nicht mehr geändert. Für die Untersuchung wurden fünf Elemente (Arsen, Cadmium, Chrom, Quecksilber und Blei) aus-

* Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, München, unterstützt.

gewählt, die ein relativ hohes toxisches Wirkungspotential aufweisen.

2 Moosmeßnetz

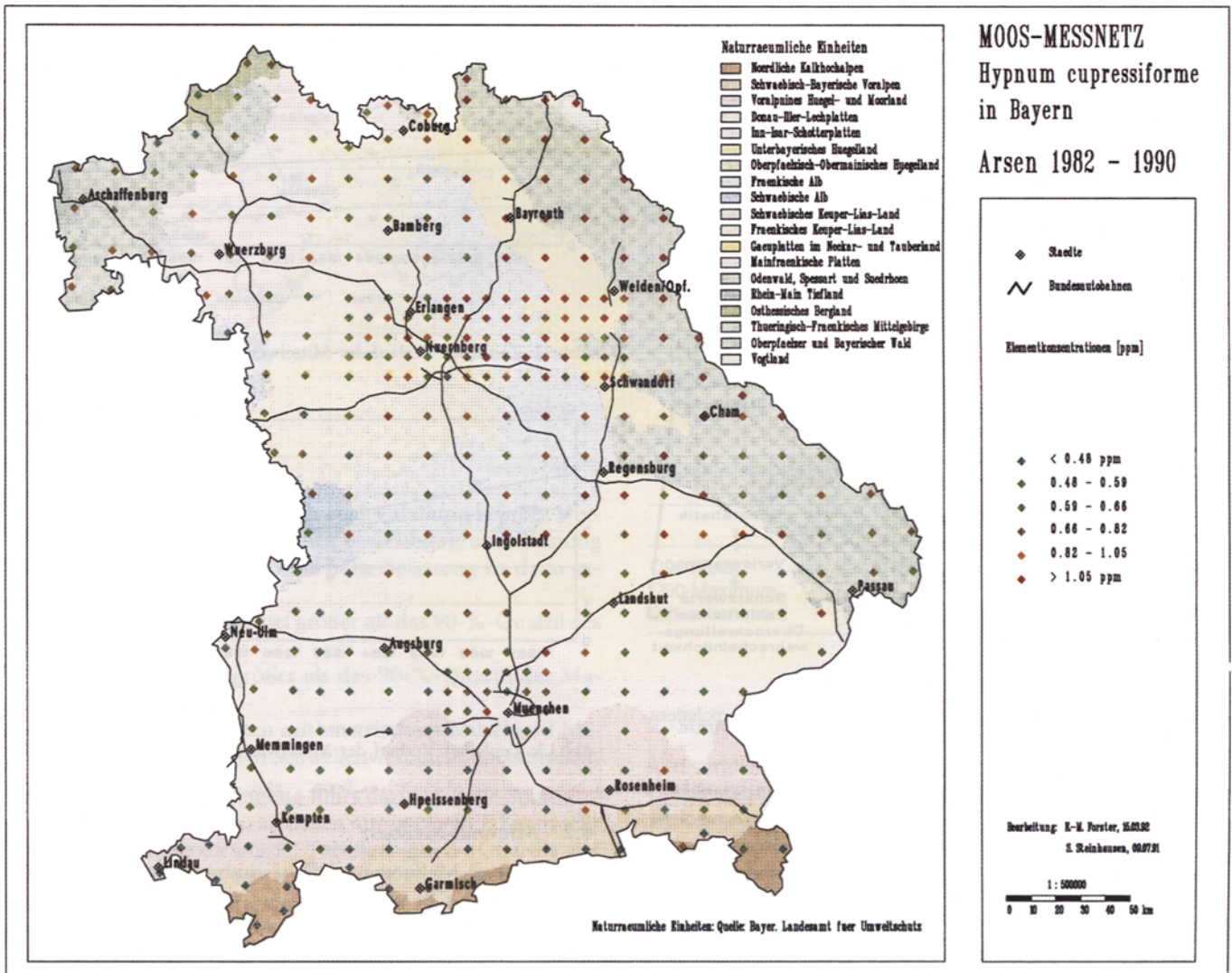
2.1 Probenahmestandorte

Das Rastermeßnetz umfaßt 370 Standorte, die im allgemeinen in einem Abstand von 16 km liegen. In den stärker industrialisierten Gebieten von Nürnberg/Fürth/Erlangen und München wurde in einem 8-km-Raster beprobt. Für die Auswertung wurden nur die Standorte berücksichtigt, an denen in den Jahren 1981 bis 1990 mindestens dreimal gemessen wurde (Arsen wurde 1981 noch nicht analysiert). Die Anzahl der beprobten Meßpunkte pro Jahr variierte zwischen 190 und 370, da nicht alle Standorte in jedem Jahr untersucht wurden. Karte 1 zeigt am Beispiel von Arsen die Verteilung der 370 untersuchten Standorte in Bayern. Die naturräumlichen Einheiten (Naturschutzgebiete und naturräumliche Gliederung, Hrsg.: BAYER. Landesamt für Umweltschutz) wurden den Meßwerten kartographisch

unterlegt. Zwischen den in *Hypnum cupressiforme* gemessenen Elementgehalten und den Naturräumen läßt sich auf dieser Maßstabsebene kein Zusammenhang erkennen. Die dargestellten Konzentrationen zeigen die durchschnittlichen jährlichen Mittelwerte für den Zeitraum 1982 – 1990, wobei 1989 keine Beprobung durchgeführt wurde. Die Klasseneinteilung erfolgte entsprechend der Häufigkeitsverteilung, d.h. die Klassenbreite wurde so gewählt, daß die Anzahl der Meßwerte pro Klasse ungefähr gleich hoch ist.

2.2 Probenahme- und Meßverfahren

Die Probenahmemethode wurde in einem Forschungsvorhaben am Lehrstuhl für Hydrologie der Universität Bayreuth entwickelt (THOMAS 1980). Die Moosproben wurden hauptsächlich an Stämmen von *Quercus robur*, *Fagus sylvatica* und *Carpinus betulus* genommen. Je Probenahmestelle wurden am Ende der Vegetationsperiode mindestens vier Bäume mit unterschiedlicher Exposition beprobt. Das gesammelte *Hypnum cupressiforme* sollte wenigstens 1 m über Grund wachsen. Nur der jährliche Zuwachs an Moos wurde untersucht. Die Proben wurden sorgfältig gereinigt. Frühere Untersu-



Karte 1

chungen zeigen, daß es nicht möglich ist, signifikante Mengen von Metallen von Moosproben abzuwaschen (GOODMAN & ROBERTS 1971, RÜHLING & TYLER 1969). Die Analysen wurden vom Institut für Ökologische Chemie, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit durchgeführt (PFEIFER et al. 1990). Mit Salpetersäure-Druckaufschluß wurden die sauberlich gereinigten und getrockneten Proben aufgeschlossen und die Metallkonzentrationen mit Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) bzw. Atomemissionspektrometrie mit induktiv gekoppelter Plasma (ICP-AES) gemessen.

3 Interpolationsmethode und Vorgehensweise

Kriging ist eine Interpolationsmethode, die auf der Theorie der regionalisierten Variablen beruht (MATHERON 1971). Hierbei geht man davon aus, daß näher zusammenliegende Standorte in ihrer Merkmalsausprägung ähnlicher sind als weiter entfernt liegende. Aufgrund dieser Tatsache läßt sich eine **Struktur im Raum** feststellen. Diese räumliche Struktur wird durch ein Variogramm-Modell beschrieben (vgl. DAVID 1977; JOURNEL & HUIJBREGTS 1978; DUTTER 1985; ISAAK & SRIVASTAVA 1989). Ist das Semivariogramm bekannt, können mit dem Kriging-Verfahren die unbekanntenen Werte interpoliert werden. Kriging gehört zu den Interpolationsmethoden, bei denen eine **durchschnittliche Gewichtung** durchgeführt wird. Abb. 1 zeigt die Stellung der Geostatistik im Vergleich zu anderen Interpolationsverfahren (→ Abb. 1). Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist die Ausgabe von Fehlerkarten, welche die Güte der Schätzung widerspiegeln.

Interpolation von Daten

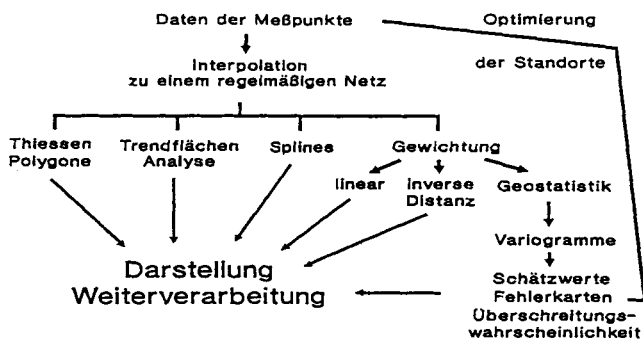


Abb. 1: Stellung der Geostatistik im Vergleich zu anderen Interpolationsmethoden (verändert nach BURROUGH 1992)

Dem Krigingverfahren wurden 370 Standorte und das „pooled“ Semivariogramm von 1981 bis 1990 zugrundegelegt, d.h. die für die einzelnen Jahre berechneten Semivariogrammwerte wurden gemittelt. Die Anzahl der Meßstandorte wurde allmählich verringert und das Krigingverfahren für jede Meßnetzkonfiguration durchgeführt. Die erhaltenen Schätzwerte und Krigingstandardabweichungen wurden dann mit denen des Ausgangsmeßnetzes (370 Standorte) verglichen. Die Veränderungen der Schätzwerte und der Krigingvarianz sowie

die mit Hilfe von Indikatorkriging (DUTTER 1985, ISAAK & SRIVASTAVA 1989) berechnete bedingte Wahrscheinlichkeit dienten als Maßstab für die Güte des „neuen“ Meßnetzes. Das schrittweise Reduzieren der Standorte, unter Beibehaltung der gesondert ausgewählten, nicht disponiblen Punkte (Minimalmeßnetz) führte dann zu dem optimierten Meßnetz.

4 Ergebnisse

4.1 Deskriptive statistische Analyse

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen den zeitlichen Verlauf der Mittelwerte (→ Abb. 2, 3). Allgemein zeigen die Schwermetallkonzentrationen eine abnehmende Tendenz, wobei die Werte von 1985 mit Ausnahme von Quecksilber auffallend gering sind. 1989 wurden keine Proben genommen. Die Werte von 1990 sind wiederum geringer als in den vorhergehenden Jahren. Die Quecksilbergehalte in Moosen liegen nahe der Nachweisgrenze. Zudem war keine räumliche Abhängigkeit erkennbar, so daß auf die weitere Auswertung von Quecksilber verzichtet werden mußte.

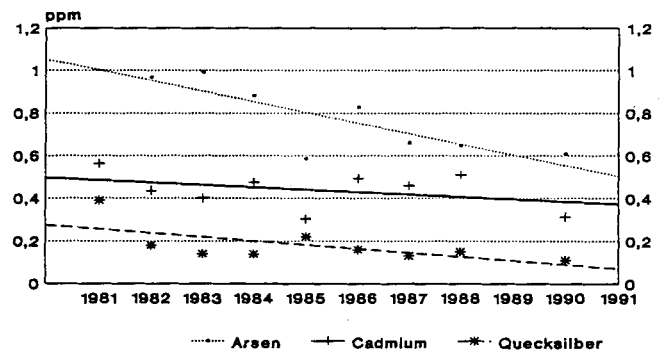


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte von As, Cd und Hg

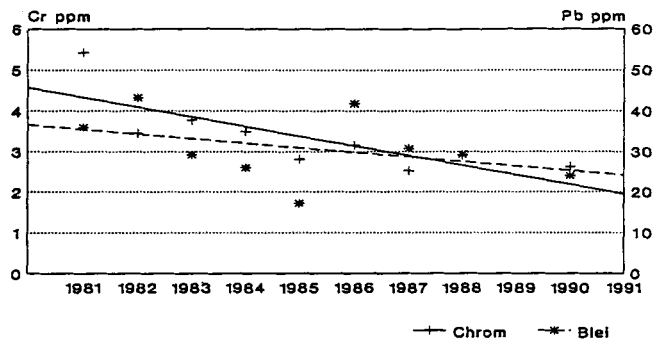
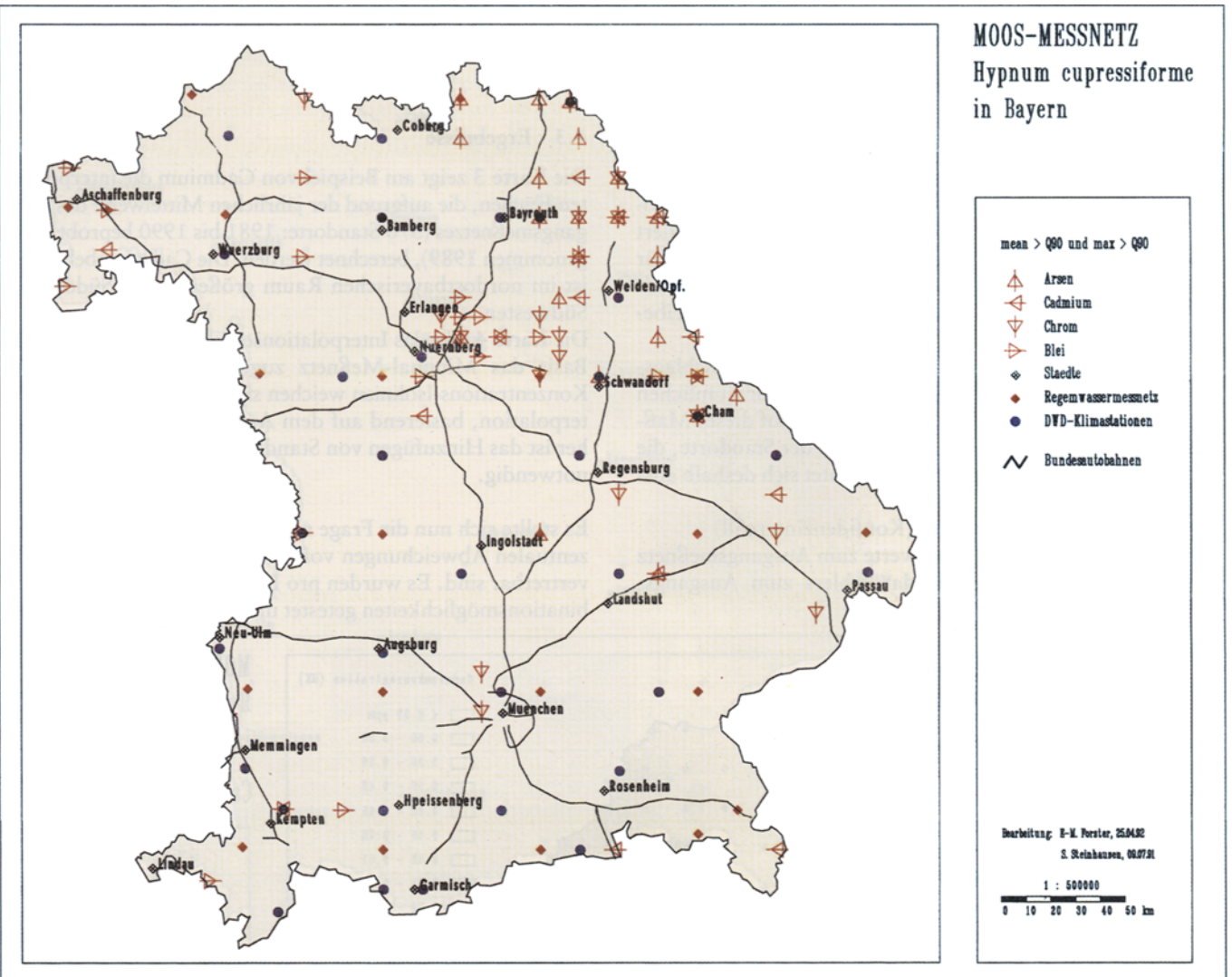


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte von Cr und Pb

4.2 Minimal-Meßnetz

Das Minimal-Meßnetz umfaßt bestimmte, aus übergeordneten Kriterien, z.B. im Hinblick auf zukünftige Auswertungen, gesondert ausgewählte Standorte, sogenannte nicht disponible Meßpunkte. Die Kriterien für die Beibehaltung eines Standorts sind im folgenden näher erläutert und anhand der Karte 2 ersichtlich.

MOOS-MESSNETZ
Hypnum cupressiforme
in Bayern



Karte 2

1. Hochbelastete Standorte

Hochbelastete Standorte sollen auch zukünftig beprobt werden, um einen weiteren Anstieg der Hintergrundbelastung identifizieren zu können. Eine hohe Belastung ist dann gegeben, wenn

- das arithmetrische Mittel größer als das 90%-Quartil des Mittelwerts und
- der Maximalwert größer als das 90%-Quartil der Maximas ist und
- die Differenz zwischen arithmetischem Mittel und Median einen bestimmten Schwellenwert nicht überschreitet.

Die letztgenannte Bedingung führt dazu, daß die Standorte ausgeschlossen werden, an denen nur in einem Jahr ein sehr hoher Wert gemessen wurde. Tabelle 1 gibt die Quartile und Schwellenwerte der einzelnen Elemente an (→ Tabelle 1). Je nach Element sind demnach 16 bis 21 Standorte als hoch belastet einzustufen.

Tabelle 1: Quartile und Schwellenwerte der einzelnen Elemente in ppm

	As	Cd	Cr	Pb
Q90-Mean	1,17	0,59	4,99	44,80
Q90-Maximum	2,50	1,12	12,00	96,00
Diff.:mean-med.	0,50	0,22	2,90	26,00

2. Standorte in der Nähe von Klima-Stationen

Um vergleichende Untersuchungen z.B. mit den Gehalten in Niederschlagswässern durchführen zu können, werden Moosstandorte, die sich in der Nähe von Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes befinden, beibehalten. An 33 Stationen werden die Niederschlagshöhe, Temperatur, relative Feuchte, Wind, Regen- und Nebeltage gemessen. Mit Ausnahme der Temperatur beeinflussen diese klimatologischen Parameter die Aufnahme der Stoffe durch die Moose, weshalb die Moosstandorte, die in der Nähe dieser Meßstellen liegen, weiterhin beprobt werden sollen.

3. Regenwassermeßstellen

Das Regenwassermeßnetz des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz umfaßt 25 Meßstellen. Seit 1991 werden nicht nur Sulfat, Nitrat, Protonen, Calcium und Ammonium, sondern auch Schwermetalle gemessen. Die Meßergebnisse von 1991 standen zur Zeit der Arbeit noch nicht zur Verfügung, so daß diese nicht miteinbezogen werden konnten. Die Ionenaustauschrate ist vom pH-Wert abhängig und korreliert laut Literatur mit den Inhaltsstoffen der Niederschläge. Für spätere diesbezügliche Auswertungen sollen die Moosstandorte, die sich in der Nähe der Meßstellen befinden, beibehalten werden.

Zusammenhänge zwischen der langjährigen Niederschlagsverteilung und den Meßwerten bzw. der naturräumlichen Gliederung und den Meßwerten lassen sich auf dieser Maßstabebene nicht erkennen. Die Auswahl der Standorte, die wieder hinzugefügt werden müssen, richtet sich deshalb ausschließlich nach:

- dem Krigingstandardfehler (Konfidenzintervall)
- der Veränderung der Schätzwerte zum Ausgangsmeßnetz
- der Veränderung des Standardfehlers zum Ausgangsmeßnetz

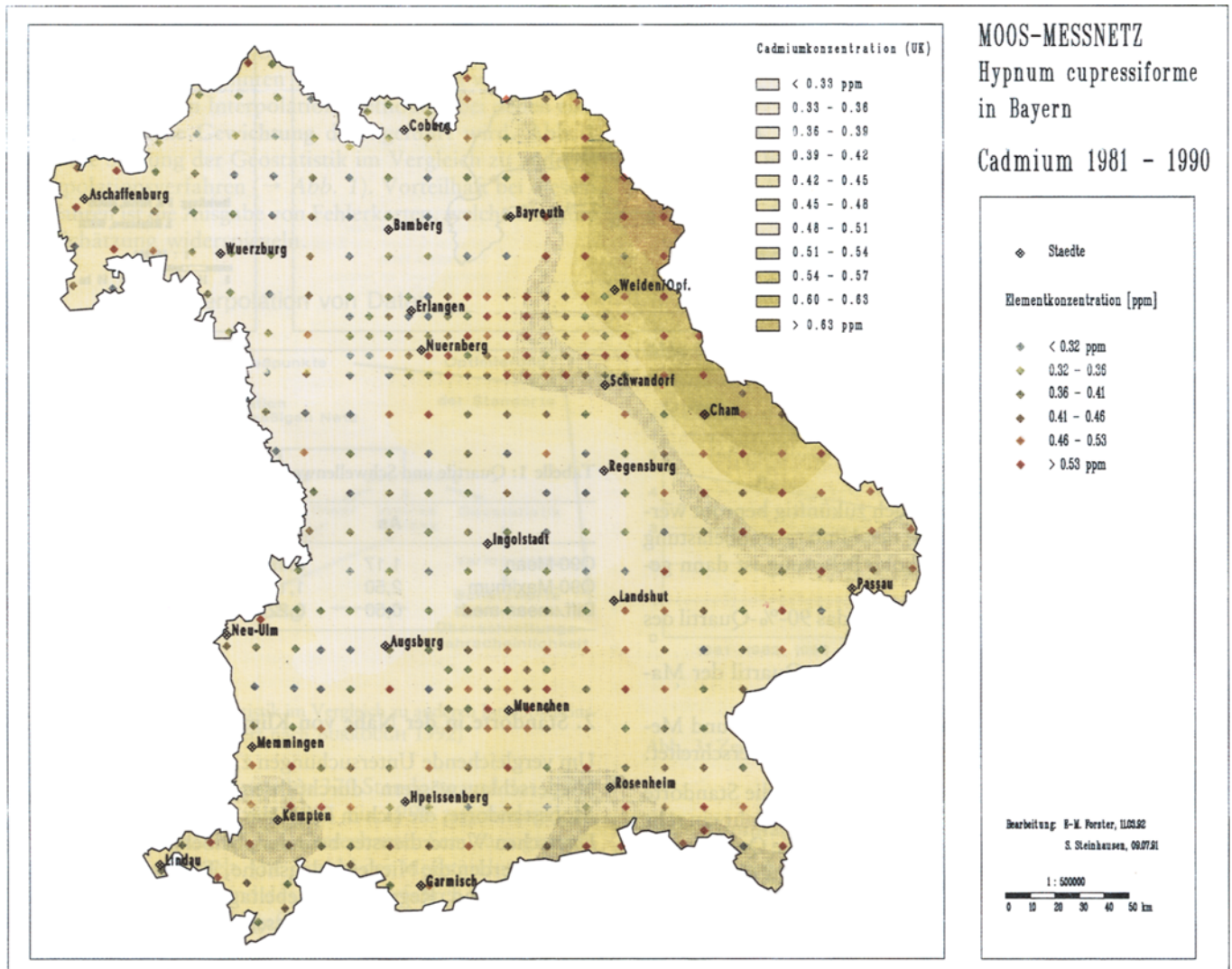
- sowie der Wahrscheinlichkeit, mit dem das Q75 über- bzw. unterschritten wird.

4.3 Ergebnisse

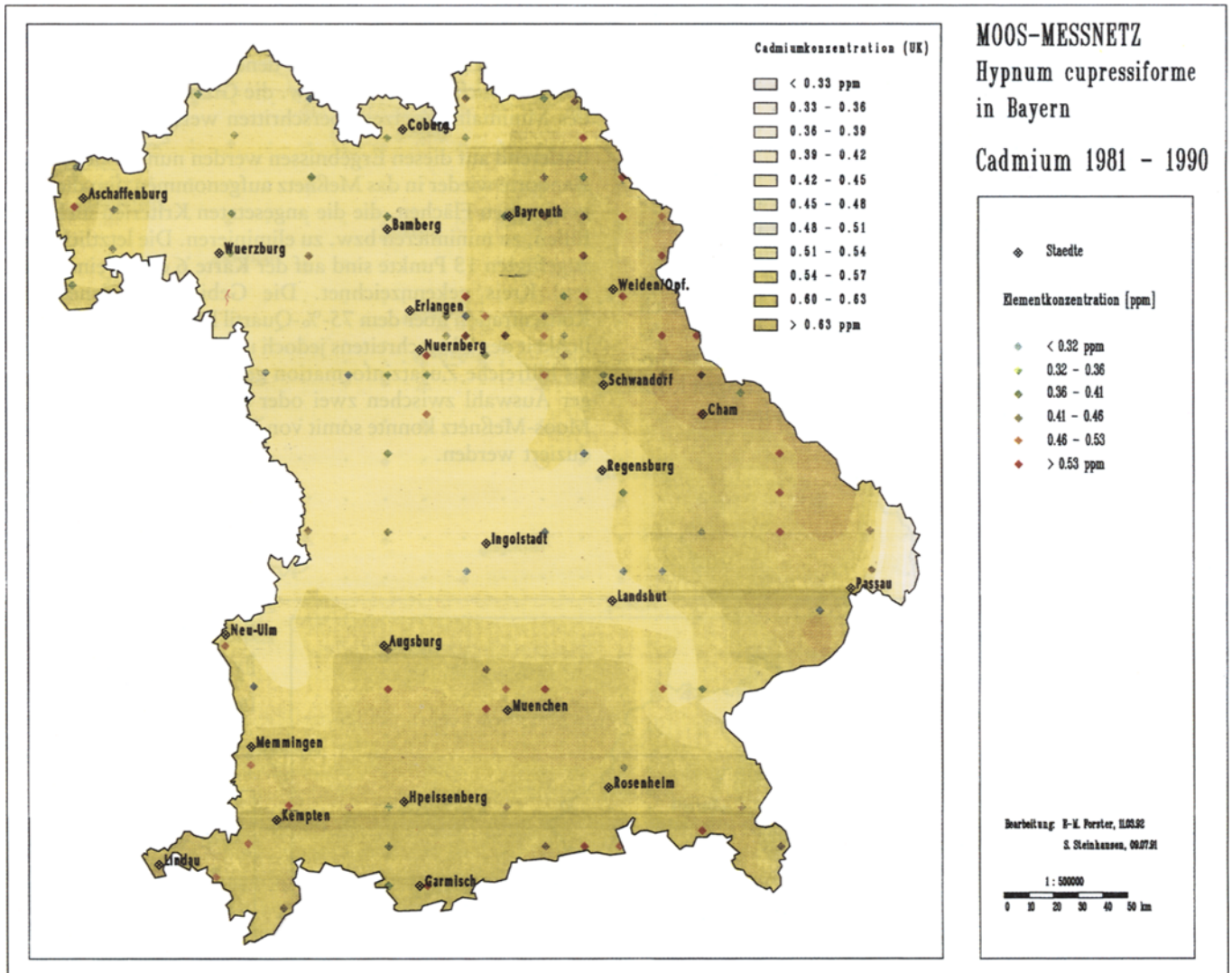
Die Karte 3 zeigt am Beispiel von Cadmium die interpolierten Flächen, die aufgrund der jährlichen Mittelwerte des Ausgangsmeßnetzes (370 Standorte: 1981 bis 1990 beprobt, ausgenommen 1989), berechnet werden. Die Cadmiumbelastung ist im nordostbayerischen Raum größer als im Süden und Südwesten.

Die Karte 4 gibt das Interpolationsergebnis wieder, wenn als Basis das Minimal-Meßnetz zugrunde gelegt wird. Die Konzentrations-Isolinien weichen sichtlich von denen der Interpolation, basierend auf dem Ausgangsmeßnetz, ab. Daher ist das Hinzufügen von Standorten für die Interpolation notwendig.

Es stellte sich nun die Frage nach solchen Werten bzw. prozentualen Abweichungen vom Ausgangsmeßnetz, die noch vertretbar sind. Es wurden pro Element verschiedene Kombinationsmöglichkeiten getestet und auf ihre räumliche Aus-



Karte 3



Karte 4

wirkungen untersucht. Folgende Parameter wurden ausgewählt:

- Die geschätzten Werte sollen die obere Grenze eines Konfidenzintervall nicht überschreiten. Daher wurde zu den berechneten Schätzwerten die Krigingstandardabweichung addiert bzw. subtrahiert (v. MEIRVENNE 1991). 68 % der Werte liegen innerhalb der Grenzen.
- Als zweites Kriterium wurde die prozentuale Abweichung der Konzentration im Vergleich zum Ausgangsmessnetz angelegt. Sie sollte 5 % nicht übersteigen. Die Fehlertoleranz wurde mit 5 % gewählt, da dieser Wert vielfach in der Statistik als Irrtumswahrscheinlichkeit akzeptiert wird.
- Außerdem sollte die prozentuale Veränderung des Krigingstandardfehlers einen bestimmten Prozentsatz nicht übersteigen (→ Tabelle 2). Bei den Elementen Arsen, Cadmium und Chrom wirkt sich dieses Kriterium kaum aus, da die prozentuale Abweichung beim Überschreiten der Intervallgrenze meist größer als der angesetzte Prozentsatz ist. Tabelle 2 gibt die durchschnittliche Krigingstan-

ardabweichung bei 370 Meßpunkten und die Werte für die relative Veränderung wieder. Da die Krigingstandardabweichung unabhängig von der Größe des Meßwerts berechnet wird, müssen für die Festlegung der Grenze die absoluten Meßwerte berücksichtigt werden. Für Cadmium und Arsen scheint ein prozentualer Anstieg um 40 % zu hoch, während er für Blei zu niedrig angesetzt ist. Als Überschreitungsgrenze werden daher für As und Cd 20 %, für Cr 40 % und für Pb 50 % angesetzt.

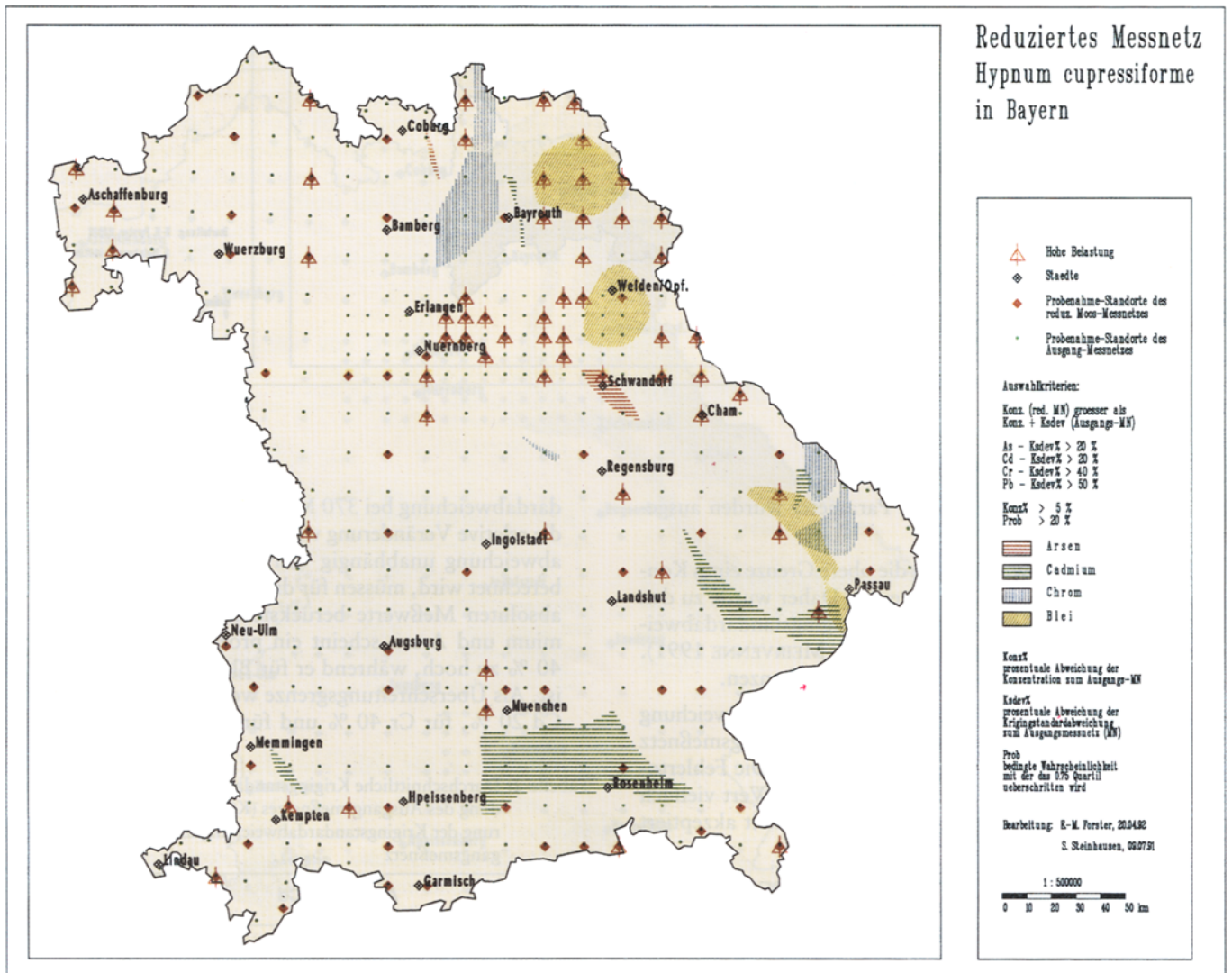
Tabelle 2: Durchschnittliche Krigingstandardabweichung bei Verwendung des Ausgangsmessnetzes (Ksdev) und relative Veränderung der Krigingstandardabweichung im Vergleich zum Ausgangsmessnetz

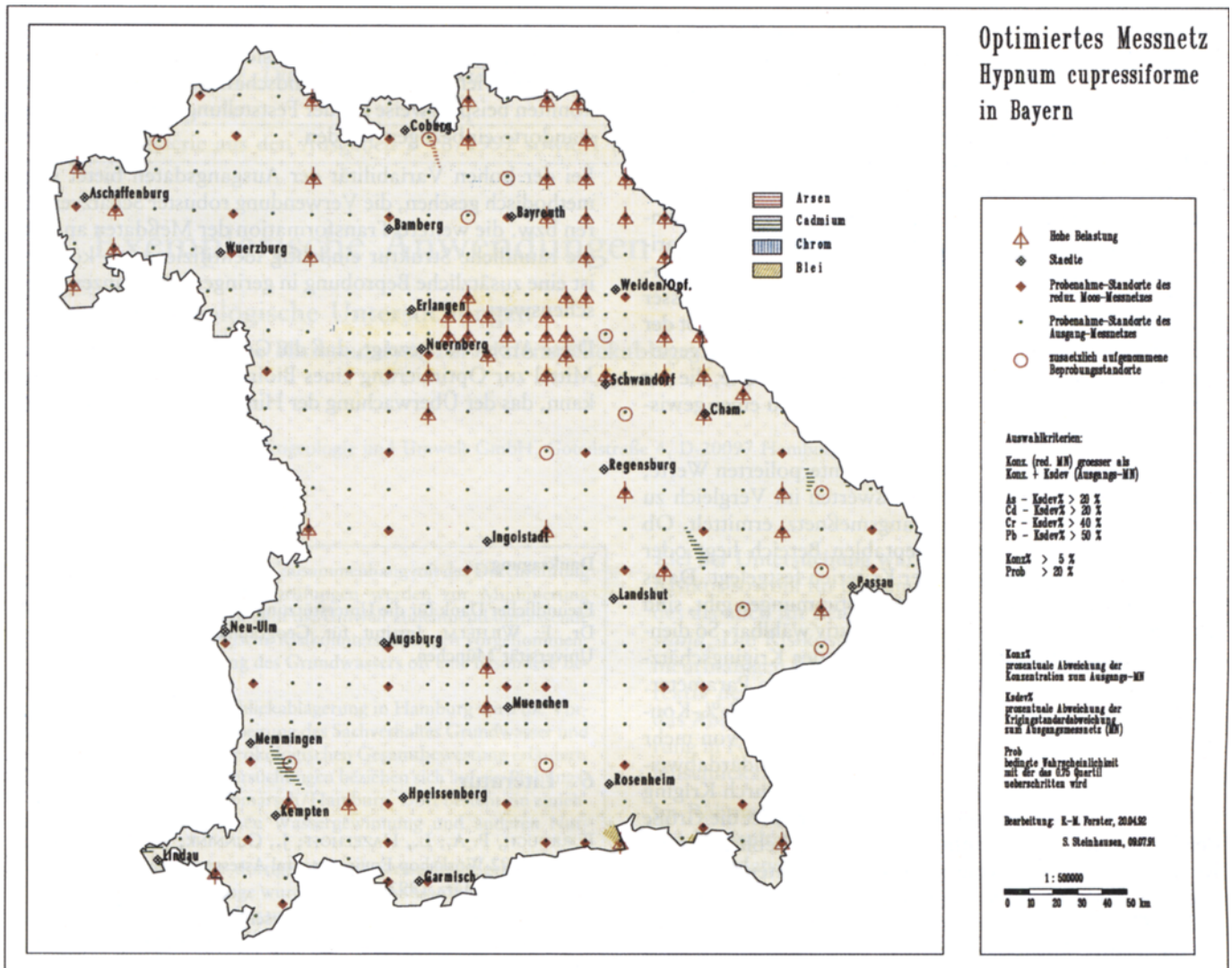
	As	Cd	Cr	Pb
Ksdev	.162	.135	.151	.163
10 % Ksdev	.18	.15	.17	.18
20 % Ksdev	.20	.16	.18	.20
40 % Ksdev	.23	.19	.21	.23
50 % Ksdev	.24	.20	.23	.24

– Ein weiteres zusätzliches Kriterium ist die bedingte Wahrscheinlichkeit, mit der das 75%-Quartil überschritten wird. Bei einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 20 % sollten diese Gebiete durch Meßpunkte abgedeckt werden. Trotz des sehr niedrigen Wertes von 20 % wirkt sich das Kriterium auf die Flächenauswahl aus. Bei der Frage nach der Hintergrundbelastung sind vor allem höhere Werte von Interesse. Daher wird auf eine Hinzunahme von Probenahmestandorten verzichtet, wenn die Wahrscheinlichkeit geringer als 20 % ist, daß ein Wert größer als das 75%-Quartil gemessen wird. Gerade im Bereich niedriger Konzentrationen schwanken die Meßwerte oftmals stark, so daß das Kriterium der bedingten Wahrscheinlichkeit dem Bestreben, Gebiete mit niedrigen Konzentrationen auszuschließen, entgegenkommt.

Die Karte 5 zeigt für die vier Elemente Arsen, Cadmium, Chrom und Blei die Gebiete, in denen die zugrundegelegten Kriterien nicht erfüllt sind bzw. die Grenzen bei Grundlage des Minimalmeßnetzes überschritten werden.

Basierend auf diesen Ergebnissen werden nun Probenahmestandorte wieder in das Meßnetz aufgenommen, um die ausgewiesenen Flächen, die die angesetzten Kriterien nicht erfüllen, zu minimieren bzw. zu eliminieren. Die letztlich hinzugefügten 13 Punkte sind auf der Karte 6 durch einen (roten) Kreis gekennzeichnet. Die Gebiete, in denen die Konzentration über dem 75%-Quartil liegt, die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens jedoch unter 75 % liegt, werden als hilfreiche Zusatzinformation genutzt bei evtl. schwieriger Auswahl zwischen zwei oder mehreren Punkten. Das Moos-Meßnetz konnte somit von 370 auf 126 Standorte reduziert werden.





Karte 6

4.4 Diskussion

Die hier durchgeführte Optimierung orientiert sich an dem Ausgangsmeßnetz (370 Standorte) und dem dadurch vorhandenen, begrenzten Datenmaterial, d.h. es werden keine zusätzlichen Proben genommen bzw. neue Probenahmestellen geschaffen. Die getesteten Meßnetze werden im Vergleich zum ursprünglichen Meßnetz betrachtet. Daher werden Nachteile, die dieses Meßnetz mit sich bringt, weder erfasst noch verbessert.

Im folgenden werden zum einen die **angewandte Methode** (Semivariogrammanalyse und Kriging), zum anderen die **angesetzten Kriterien** kurz diskutiert.

Die Interpolation mit Kriging basiert auf der Feststellung der räumlichen Struktur mit Hilfe der Semivariogrammanalyse. Daher ist die Güte der Interpolation von dem zugrunde gelegten Semivariogramm abhängig. Für die Berechnung sollen die Daten normal verteilt sein und die intrinsische Hypothese, d.h. schwache Stationarität, muß gegeben sein. Die Schwermetallkonzentrationen sind lognormal verteilt, weshalb die Schätzwerte rücktransformiert werden mußten. Die

intrinsische Hypothese wurde mit Hilfe von Homogenitätstests überprüft. Obwohl von annähernd gleichbleibenden Mittelwerten und Varianzen ausgegangen werden kann, wäre die Aufteilung des Meßnetzes in zwei Bereiche, nämlich NO-Bayern und restliches Bayern, möglich gewesen. Aufgrund der bei der Berechnung der Semivariogramme auftretenden Grenzprobleme erschien es jedoch sinnvoller, das Meßnetz im Ganzen bestehen zu lassen. Diese Problematik könnte möglicherweise durch ein neueres Verfahren, **Moving Window Kriging** (HAAS 1992), umgangen werden.

Das Erkennen der **räumlichen Struktur** ist vielfach schwierig, insbesondere dann, wenn die Ausgangsdaten eine starke Variation aufweisen. Die Semivariogramme unterscheiden sich von Jahr zu Jahr zum Teil beträchtlich. Deshalb wurden die einzelnen Jahres-Semivariogramme 1981 bis 1990 ermittelt und anschließend ein durchschnittliches Semivariogramm berechnet, das dem Krigingverfahren zugrundegelegt wurde. Somit wurde die räumliche Struktur, die über einen längeren Zeitraum vorhanden ist, relativ zuverlässig erfasst. Die Variabilität der Meßergebnisse *biologischer* Proben ist

im allgemeinen größer als bei physikalischen Messungen. Dies kann nur durch eine verbesserte Probenahmetechnik verändert werden. Die Semivariogramme basieren auf einem Raster von durchschnittlich 16 km. Ein geringerer Beprobungsabstand wäre zur Erfassung der räumlichen Struktur bis 16 km wünschenswert. Aus diesem Grund wurden Semivariogramme berechnet, die sich allein auf die Verdichtungszone (8-km-Beprobung) im Raum Nürnberg/Fürth/Erlangen beziehen. Bei der Annahme, daß schwache Stationarität gewährleistet ist, wurden diese auf die ganze Fläche übertragen. Dadurch konnte die lokale Mikrovariabilität besser erfaßt und der Nugget reduziert werden. Trotzdem bleibt der Nugget relativ hoch. Ein hoher Nugget führt zu nur geringen Unterschieden in der Gewichtung der Meßwerte, die zur Schätzung herangezogen werden und damit zu einer gewissen Nivellierung der Schätzwerte.

Prinzipiell wurde die Veränderung der interpolierten Werte, basierend auf den reduzierten Meßwerten im Vergleich zu denen, basierend auf dem Ausgangsmeßnetz, ermittelt. Ob die Veränderung noch im akzeptablen Bereich liegt oder nicht, wurde anhand bestimmter Kriterien festgelegt. Da es für Moose keine gültigen Grenzwertbestimmungen gibt, sind die angesetzten Kriterien nicht rein objektiv wählbar. So dienen vor allem die relative Veränderung der Krigingschätzwerte und der Krigingstandardabweichung als Parameter. Es wurden rein statistische Größen, nämlich das 68%-Konfidenzintervall, die Abweichung der Schätzwerte von mehr als 5 % und die Abweichung der Krigingstandardabweichung gewählt. Da die Standardabweichung durch Kriging mit Hilfe der Kovarianzen berechnet wird, besitzt die Größe des Meßwertes keinen Einfluß. Blei weist erheblich höhere Konzentrationen auf als die anderen untersuchten Elemente, aber eine ähnlich hohe Standardabweichung. Dies wirkt sich auf die Größe des Streubereichs des Konfidenzintervalls und auf die relative Abweichung der Krigingstandardabweichung aus. Bezüglich der Absolutwerte ist nur eine minimale Verschlechterung festzustellen. Daher wurde eine höhere relative Abweichung von Blei als akzeptabel betrachtet.

Natürlich müssen sich die angesetzten Parameter nach der Zielsetzung des Meßnetzes richten. Da das bayerische Moosmeßnetz der Feststellung der Hintergrundbelastung dient, sind vorwiegend hohe Werte von Interesse. Daher sollen vor allem Gebiete mit einer starken Belastung ausreichend mit Meßstellen belegt sein. Für den Vergleich der Kriterien und der Elemente eignet sich ein Geographisches Informationssystem sehr gut. Die Interpolationsergebnisse, d.h. die Veränderung der Schätzwerte, der Krigingstandardabweichung und die Wahrscheinlichkeit, mit der ein bestimmter Schwellenwert überschritten wird, können gut miteinander verglichen und ausgewertet werden.

5 Schlußfolgerung und Ausblick

Die angewandten geostatistischen Methoden erweisen sich als praktikabel, um die Konsequenzen für die Immissionsüberwachung bei veränderter Meßnetzkonfiguration zu be-

rechnen. Die Randbedingungen, die zur Auswahl der Meßpunkte festgelegt wurden, lassen sich entsprechend der Fragestellung vielfach variieren; landschaftsökologische Aspekte könnten beispielsweise bei der Feststellung der Probenahmeorte einbezogen werden.

Bei der hohen Variabilität der Ausgangsdaten bietet sich, methodisch gesehen, die Verwendung robuster Schätzverfahren bzw. die weitere Transformation der Meßdaten an. Um die räumliche Struktur eindeutig identifizieren zu können, ist eine zusätzliche Beprobung in geringeren Distanzen wünschenswert.

Diese Arbeit hat gezeigt, daß die Geostatistik ein geeignetes Mittel zur Optimierung eines Bioindikator-Meßnetzes sein kann, das der Überwachung der Hintergrundbelastung dient.

Danksagung

Freundlicher Dank für die Unterstützung dieser Arbeit gilt Herrn Prof. Dr. F. WILHELM, Institut für Geographie, Ludwig-Maximilians-Universität München.

6 Literatur

- BURROUGH, P. A.; L., HAZELHOFF, J., GUNNINK, J., HASLETT 1992; EGIS '92 Workshop Environmental Assessment and GIS. München 23. – 26. März 1992.
- DAVID, M. (1977): Geostatistical ore reserve estimation. Developments in Geomathematics 2. Elsevier Scientific Publishing Comp Amsterdam, Oxford, New York
- DUTTER, R. (1985): Geostatistik, Mathematische Methoden in der Technik 2, Teubner Verlag Stuttgart
- GOODMAN, G. T.; T. M. ROBERTS (1971): Plants and soils as indicator of metals in the air. Nature 231, 287 – 292
- HAAS, C. T.; (1992): Krig user's manual, University of Wisconsin-Milwaukee
- ISAAK, E. H.; R. M. SRIVASTAVA (1989): An introduction to applied geostatistics, Oxford University Press
- JOURNAL, E. H.; CH. J. HUIJBREGTS (1978): Mining Geostatistics. Academic Presse London, New York, San Francisco
- MATHERON, G. (1971): The theory of regionalized variables and its applications, Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique 5, Fontainebleau, France
- MEIRVENNE, M. van (1991): Characterization of soil spatial variation using geostatistics. Gent
- PFEIFFER, K.; E., RUDOLPH, H. SCHMID (1990): Bericht über Feststellung und weitergehende Untersuchung von Immissionswirkungen in Bayern, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.) München
- RÜHLING, A.; G. TYLER (1969): Ecology of heavy metals – a regional and historical study. Bot. Notiser 122, 248 – 259
- THOMAS, W. (1981): Entwicklung eines Immissionsmeßnetzes für PCA, Chlorkohlenwasserstoffe und Spurenmetalle mittels epiphytischer Moose – angewandt auf den Raum Bayern. Bayreuther Geowissenschaftliche Arbeiten 3