Geographisches Laborpraktikum

Bericht

Geographisches Institut der Universität Tübingen
Sommersemester 2004

Leitung:
Dr. Rolf Beck

Vorgelegt von:

Christina Bocher
Christine Thiel
Tobias Schiller
Tobias Spaltenberger
Robin Struwe

Inhalt

1. Einführung 1
1.1 Einleitung 1
1.2 Straßenstäube als Indikatoren der Umweltbelastung 1

2. Methodik 2
2.1 Zur Methodik der Probenentnahme und deren Probleme 2
2.2 Probenvorbereitung 3
2.3 Mikroskopische Bestimmung der Stäube 3
2.4 Korngrößenanalyse 3
2.5 pH-Wert Bestimmung mittels Glaselektrode 5
2.6 Calciumcarbonat-Bestimmung/ $CaCO_3$-Bestimmung 5
2.7 Kohlenstoffgehalt 5
2.8 Königswasseraufschluss 5

3. Statistische und geostatistische Analysen 6
3.1 Statistik 6
3.2 Geostatistik 8

4. Ergebnisse der Schwermetallanalysen 10
4.1 Blei 10
4.2 Chrom 11
4.3 Eisen 12
4.4 Kupfer 13
4.5 Nickel 14
4.6 Zink 15
4.7 Gesamtbelastung 16

5. Diskussion 17

6. Fazit 20

Literatur 21

1. Einführung

1.1 Einleitung

Das Laborpraktikum am Geographischen Institut der Universität Tübingen im Sommersemester 2004 behandelte unter der Leitung von Dr. Rolf Beck die Analyse von Straßenstäuben der Nordstadt Tübingens. Dazu wurden an 104 festgelegten Punkten Straßenstäube entnommen und diese im Labor des Geographischen Instituts untersucht. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Schwermetallbelastung der Straßenstäube als Indikatoren der Umweltbelastung gerichtet.

Dieser Bericht legt einen Schwerpunkt sowohl auf die im Praktikum gewonnenen Erkenntnisse, als auch auf die Zusammenfassung der erlernten Methoden. Dabei gilt es jedoch nicht aus den Augen zu verlieren, dass aufgrund des Praktikumscharakters der Untersuchungen sowie der Anzahl der Arbeitsgruppen und der daraus resultierenden Koordinierungsschwierigkeiten die Ergebnisse stets mit Vorsicht zu betrachten sind. Auch traten bei der Entnahme der Proben Probleme auf, wie in Abschnitt 2.1 erläutert wird.

Zunächst soll jedoch eine überblicksartige, kurze Einführung in die Thematik „Straßenstäube“ gegeben werden. Diese orientiert sich im Wesentlichen an einer Arbeit von Beck (1996) zu „Schwermetalleinträge[n] in der Tübinger Südstadt – Straßenstaubanalyse und Moss-Bag-Monitoring“. Als nächster zentraler Punkt dieses Berichts soll dann auf die angewendeten Methoden eingegangen werden, aufgegliedert in eine Beschreibung der Probenentnahme, der Laborarbeiten und der anschließenden GIS-gestützten statistischen und räumlichen Analysen der gewonnenen Daten. Anschließend wird eine Vorstellung der gewonnen Ergebnisse insbesondere der statistischen Analysen vorgenommen, die im abschließenden Abschnitt noch kritisch diskutiert werden sollen.

1.2 Straßenstäube als Indikatoren der Umweltbelastung

Nach Beck (1996: 309) kann die versiegelte Fläche der Straße als Sammelbecken für Ablagerungen aus der Luft betrachtet werden. Der Straßenstaub wird als ein „heterogen zusammengesetztes, dynamisches Substrat“ beschrieben: „Heterogen, weil er aus einer Vielzahl von Einträgen unterschiedlichster Herkunft entsteht, dynamisch weil diese Stoff- und Schadstoffeinträge nicht zeitlich [...] fixiert werden können“ (ebd.).

Der Eintrag von belastenden Stoffen in den Straßenstaub erfolgt insbesondere durch den Verkehr (Reifenabrieb, Abgas-Feststoffpartikel). Ein Teil der Straßenstäube wird mit dem Niederschlagswasser gesammelt und in die Kanalisation verfrachtet; zum Teil gelangen sie über Verwehung direkt in die Umwelt. Es erfolgt sowohl eine Belastung der Luft als auch eine Kontaminierung der Böden und eine Verschmutzung des Wassers. „Somit kann der Straßenstaub mit seiner Schadstofffracht als in einer Art Zentrum urbaner Schadstofftransferprozesse stehend betrachtet werden“ (Beck 1996: 309.). Die vorgenannten Gründe lassen den Schluss zu, dass Straßenstaub als guter Indikator für urbane Belastungen gesehen werden kann.

Daten über den Schwermetallgehalt des Straßenstaubs sind von besonderem umweltanalytischen Interesse, liegt hier doch ein immenses Gefährdungspotenzial für den Menschen. Die Aufnahme in den menschlichen Körper erfolgt unmittelbar oral (z.B. bei spielenden Kindern), durch die Inhalation verwirbelter Stäube, sowie indirekt durch die Belastung von straßennahen Gartenböden durch verwehten Straßenstaub.

2. Methodik

2.1 Zur Methodik der Probenentnahme und deren Probleme

Wie in den vorangegangenen Ausführungen erläutert wurde, sammelt sich ein Teil der Straßenstäube mit dem Niederschlagswasser in den Rinnsteinen und wird dort zu den Gullys transportiert. Die Gullys können als Sammelbecken der Straßenstäube betrachtet werden. Auf Basis dieser Überlegungen erfolgte die Probenentnahme in der Tübinger Nordstadt an 104 Entnahmepunkten (vgl. Abb. 2). Entnommen wurden (mit Plastiklöffeln zur Vermeidung eines weiteren Metalleintrags) jeweils einige Gramm Straßenstaub aus Ritzen der Gullys und des Rinnsteins. Diese wurden sorgfältig verpackt und gekennzeichnet.

Probleme ergaben sich in der sehr unterschiedlichen Verfügbarkeit von Straßenstäuben an den Entnahmepunkten. Einige Beprobungsstellen ergaben große Mengen Straßenstaub, während bei anderen nur wenige Gramm gesammelt werden konnten. Da für die vielfältigen Untersuchungen, die im Rahmen des Laborpraktikums durchgeführt wurden, jedoch größere Mengen Straßenstaub „verbraucht“ wurden, verblieb bei einigen Proben nicht mehr genügend Material, um die Schwermetallgehaltbestimmung mittels Flammen-AAS durchführen zu können.

2.2 Probenvorbereitung

Die gesammelten Proben wurden drei Tage im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet, dann gemörsert und anschließend gesiebt.

Abhängig von der Probenmenge, welche sehr unterschiedlich war (vgl. dazu „Probleme bei der Probenentnahme“), erfolgten verschiedene Siebungen. Sichtbare Verunreinigungen wie beispielsweise Haare, Pflanzenstengel, Blattreste und Glassplitter wurden entfernt. War viel Probenmaterial vorhanden, so wurde die Probe in etwa zwei gleiche Anteile aufgeteilt, wobei der eine Teil mit einem Zweimillimetersieb gesiebt wurde. Das kleiner als 2 mm große Material wurde für die spätere Korngrößenanalyse verwendet. Das Grobmaterial wurde verworfen.

Der andere Teil wurde zunächst ebenfalls auf 2 mm gesiebt, wobei eine genauere Betrachtung des Materials erfolgte (vgl. Kap. 2.3: Mikroskopische Bestimmung). Eine Siebung mit der Maschenweite 0,63 mm folgte, um das noch feinere Material einer mikroskopischen Untersuchung zu unterziehen. Abschließend wurde mit einem Sieb der Maschenweite 0,063 mm das Feinmaterial, welches für die pH-Wert-Messung, $CaCO_3$-Bestimmung, C-Messung sowie Königswasseraufschluss (für die anschließende AAS-Analyse) benötigt wurde, gesiebt und in Fotodöschen aufbewahrt.

Mögliche Fehler der späteren Schwermetallanalyse können schon an dieser Stelle entstanden sein, da z. T. Metallsiebe verwendet wurden, was bei der Untersuchung von Schwermetallen eigentlich zu unterlassen ist.

2.3 Mikroskopische Bestimmung der Stäube

Die mikroskopische Bestimmung mittels Auflichtmikroskopie ergab, dass neben den zuvor erkannten Verunreinigungen wie Haare, organisches Material und Glassplitter, auch Quarz, Holzstückchen, Teer bzw. Asphaltstückchen, Granat, Gummi bzw. Reifenabrieb und Metallsplitter in den Bodenproben zu finden waren. Die Metallsplitter wurden mittels eines Magneten bestimmt.

Ergebnis: Fe: > 99% Bremsscheibenabrieb

2.4 Korngrößenanalyse

Die bei der Probenvorbereitung ausgesiebten Anteile wurden bezüglich ihrer Korngrößenzusammensetzung analysiert. Die Untersuchung erfolgte stichprobenhaft (n=38).

Da in den meisten Fällen weniger als 10 g pro Probe vorhanden waren, wurde von der Arbeitsanleitung im Laborskript (Beck et al. 1995: 122) abgewichen: Die Einwaage der Probe wurde auf 5 g und die Menge an Natriumpyrophosphat auf 12,5 ml halbiert. Der weitere Analyseverlauf der Sandfraktionen erfolgte nach den Anleitungen im Laborhandbuch.

Die Schluff- und Tonanteile wurden sedigraphisch ermittelt. Dabei war zu berücksichtigen, dass der Sedigraph insbesondere für die Tonfraktion (Tonminerale) zu geringe Werte ermittelt. Allerdings ist anzunehmen, dass bei der Untersuchung von reinen Stäuben, welche keine Tonminerale enthalten, die Ergebnisse als recht genau erachtet werden können (mündl. Mitt. v. Baumann 2005).

Als Ergebnis der Analyse ist festzuhalten, dass die Proben ein Spektrum der Bodenarten von sandigem Sand (Ss) bis hin zu sandigem Schluff (Us) aufweisen, wobei die am häufigsten auftretenden Bodenarten stark schluffiger Sand (Su2) und mittel schluffiger Sand (Su3) sind (vgl. Abb. 1).

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass man streng genommen bei Straßenstäuben nicht von Bodenart sprechen dürfte. Da die Proben bei den einleitenden Untersuchungen jedoch wie Bodenmaterial behandelt wurden, wird auch hier der Terminus „Bodenart“ verwendet.

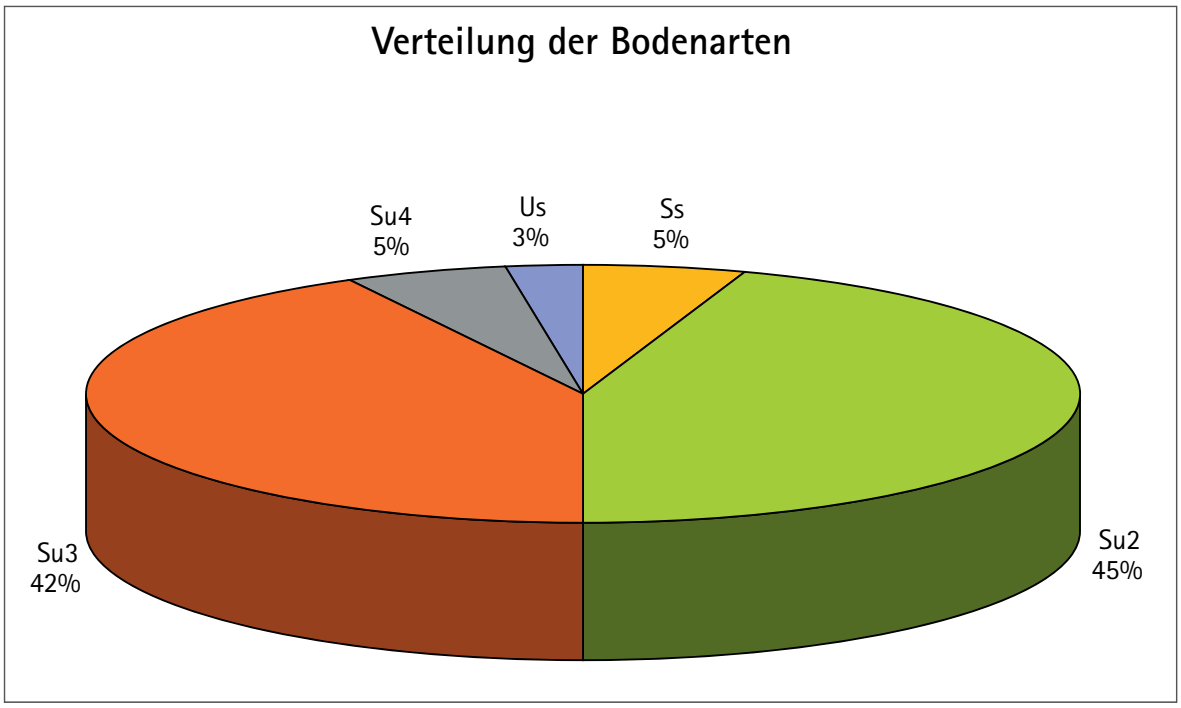

Abb. 1: Verteilung der Bodenarten *Quelle: Eigene Darstellung.*

Auffällig ist der hohe Sandanteil der Proben. Da Staub eigentlich durch Korngrößen im schluffigen Bereich gekennzeichnet (v.a. Grobschluff) ist, kann man vermuten, dass die sandigen Anteile bei der Probenahme fehlerhaft eingebracht wurden.

2.5 pH-Wert Bestimmung mittels Glaselektrode

Der pH-Wert wurde mittels Glaselektrode in Calciumchloridlösung bestimmt. Nach Scheffer & Schachtschabel (2002) simuliert die Lösung eine Bodenlösung wie sie ähnlich in landwirtschaftlich genutzten Böden des gemäßigt-humiden Bereichs vorkommen. Aufgrund der nicht immer ausreichenden Probenmenge konnten nur 17 % (n=18) der gesamten Bodenproben auf ihren pH-Wert überprüft werden. Die Proben lagen mit einem durchschnittlich pH-Wert von 6,9 alle im pH-neutralen Bereich (Minimum: 6,3 (Probe 39), Maximum: 7,4 (Probe 26)).

2.6 Calciumcarbonat-Bestimmung/ $CaCO_3$-Bestimmung

28 % (n=29) der Proben wurden nach der Scheibler-Methode auf ihren Calciumcarbonat-Gehalt hin bestimmt. Die Werte lagen hier zwischen 7,8 % (Probe 70) und 38,7 % (Probe 67). Der durchschnittliche $CaCO_3$-Gehalt lag bei 16,8 %. Anzumerken ist jedoch, dass bei dieser Methode nicht nur die Calciumcarbonate sondern alle in HCl löslichen Carbonate mitbestimmt werden. Zumeist ist der Fehler jedoch größenmäßig vernachlässigbar.

2.7 Kohlenstoffgehalt

Die Bestimmung von Kohlenstoff erfolgte nach der Lichterfelder-Methode. Berücksichtigung fanden alle vorhandenen Proben (n=104). Der minimale C-Gehalt (Probe 102) beträgt 3,1 %, während der Maximalgehalt bei 19,0 % liegt (Probe 79). Der durchschnittliche Kohlenstoffgehalt der Straßenstäube liegt bei 10,3 %.

2.8 Königswasseraufschluss

Mittels des Königswasseraufschlusses, welcher alle Schwermetalle erfasst, die kurzfristig mobil werden und in die Nahrungskette gelangen können, und des Flammen-AAS wurden die Gehalte von Eisen (Fe), Nickel (Ni), Blei (Pb), Chrom (Cr), Zink (Zn) und Kupfer (Cu) bestimmt. Berücksichtigt wurden beim Königswasseraufschluss alle Proben (n=104), fünf Proben konnten aufgrund zu geringen Probenmaterials jedoch nicht ausgewertet werden.

Aufgrund der geringen Probenmengen musste eine Abweichung von den Anleitungen im Laborskript erfolgen (Beck et al. 1995: 182): Die empfohlene Einwaage von 2 g wurde auf 0,5 bis 1 g erniedrigt. Eingewogen wurde ausschließlich Material der Größe < 0,063 mm.

3. Statistische und geostatistische Analysen

3.1 Statistik

Bevor eine statistische Analyse der im Flammen-AAS ermittelten Daten erfolgen konnte, war es notwendig, einzelne Ausreißer, die durch Fehler bei der Probenentnahme oder der chemischen Analyse entstehen konnten, zu ermitteln und zu entfernen. Mittels Streudiagrammen wurden diese Ausreißer identifiziert und entfernt. Dadurch verringerte sich der ursprüngliche Stichprobenumfang von 104 Proben auf 96 Proben, wobei anzumerken ist, dass bei fünf der zehn eliminierten Proben aufgrund zu geringen Probenmaterials keine AAS-Werte vorlagen (s.o.).

Die folgenden statistischen Analysen wurden mit SPSS für Windows in der Version 11.5 durchgeführt. Tab. 1 zeigt allgemeine statistische Kennzahlen für die analysierten Stichproben.

Bevor eine Korrelationsanalyse durchgeführt werden konnte, musste anhand geeigneter Tests festgestellt werden, ob die Werte der Stichproben normalverteilt sind. Das Ergebnis dieses Test bestimmt die Art der durchzuführenden Korrelationsanalyse. Aufgrund des relativ geringen Stichprobenumfangs bietet sich zum Prüfen der Normalverteilung der Kolmogorov-Smirnov-Test an, der für kleinere Stichprobenumfänge besser geeignet ist als der Chi-Quadrat-Test, da hierfür erst Klassen gebildet werden müssten. Ob die Verteilung der Probenwerte von der Normalverteilung signifikant abweicht, wird beim Kolmogorov-Smirnov-Test anhand eines Grenzwerts festgestellt.

Tab. 1: Deskriptive Statistiken

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
Blei	2,6129	552,3000	110,258745	91,1195101	8302,765
Eisen	8671,2600	34077,1000	20489,833958	4326,3095097	18716953,974
Kupfer	27,7531	417,6790	170,871969	86,8842575	7548,874
Nickel	15,6314	92,0974	40,416873	14,7761981	218,336
Zink	111,3380	1761,2800	603,698448	270,1619923	72987,502
Chrom	,8042	145,1700	62,711950	25,1192548	630,977

Tab. 2: Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests

		Blei	Eisen	Kupfer	Nickel	Zink	Chrom
Stichprobenumfang		96	96	96	96	96	96
Parameter der Normalverteilung(a,b)	Mittelwert	110.2	20,489.8	170.9	40.4	603.7	62.7
	Standardabweichung	91.1	4,326.3	86.9	14.8	270.2	25.1
Extremste Differenzen	Absolut	0.223	0.071	0.101	0.115	0.080	0.188

Dieser Grenzwert liegt bei dem uns vorliegenden Probenumfang n=96 bei 0,138 (Zöfel 2000:81). Wie aus Tab. 2 ersichtlich ist, sind die Werte für Kupfer, Nickel, Zink und Eisen normalverteilt, die Werteverteilung von Blei und Chrom weicht jedoch signifikant von der Normalverteilung ab.

Aufgrund dieser Tatsache scheidet für die Ermittlung des Korrelationskoeffizienten die Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson aus, da diese die Normalverteilung der Variablenwerte voraussetzt. Statt dessen ist der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman zu verwenden, bei dem eine Normalverteilung der Werte nicht Voraussetzung ist. Darüberhinaus ist der Rangkorrelationskoeffizienz nach Spearman Ausreißern gegenüber wesentlich unempfindlicher als die Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson.

Das Ergebnis dieser Analyse ist in Tab. 4 zu sehen. Demnach liegt nach der üblichen Einstufung (Tab. 3) bei den Variablenkombinationen Zink-Eisen (0,739) und Zink-Kupfer (0,736) eine hohe Korrelation, bei den Variablenkombinationen Blei-Zink (0,574), Eisen-Kupfer (0,592) und Kupfer-Chrom (0,558) eine mittlere Korrelation vor. Zwischen den anderen Variablenkombinatonen herrschen nur geringe bis sehr geringe Korrelationen.

Tab. 3: Einstufung des Korrelationskoeffizienten

Korrelationskoeffizient	Einstufung
$\lvert r\rvert < 0{,}2$	Sehr geringe Korrelation
$0{,}2 < \lvert r\rvert < 0{,}5$	Geringe Korrelation
$0{,}5 < \lvert r\rvert < 0{,}7$	Mittlere Korrelation
$0{,}7 < \lvert r\rvert < 0{,}9$	Hohe Korrelation
$0{,}9 < \lvert r\rvert < 1$	Sehr hohe Korrelation

Tab. 4: Korrelationskoeffizienten nach Spearman

	Blei	Eisen	Kupfer	Nickel	Zink	Chrom
Blei	*1.000*	0.467	0.388	0.153	**0.574**	0.087
Eisen		*1.000*	**0.592**	0.499	**0.739**	0.446
Kupfer			*1.000*	0.369	**0.736**	**0.558**
Nickel				*1.000*	0.380	0.484
Zink					*1.000*	0.486
Chrom						*1.000*

3.2 Geostatistik

Die im Folgenden beschriebenen geostatistischen Analysen wurden mit dem Softwarepaket ArcGIS Desktop 9.0 durchgeführt. Die Datengrundlage für die geostatistische Auswertung bildeten die von Dr. Rolf Beck zur Verfügung gestellten Karten mit den Standorten der Probenpunkte. Anhand dieser Vorlage wurden auf der georeferenzierten topographischen Karte Blatt 7420 im Maßstab 1:25000 die Probenpunkte digitalisiert (Abb. 2).

In einem zweiten Schritt wurden diese räumlichen Daten mit den quantitativen Daten aus der Laborauswertung anhand der gemeinsamen Standort-ID (Probennummer) zusammengeführt.

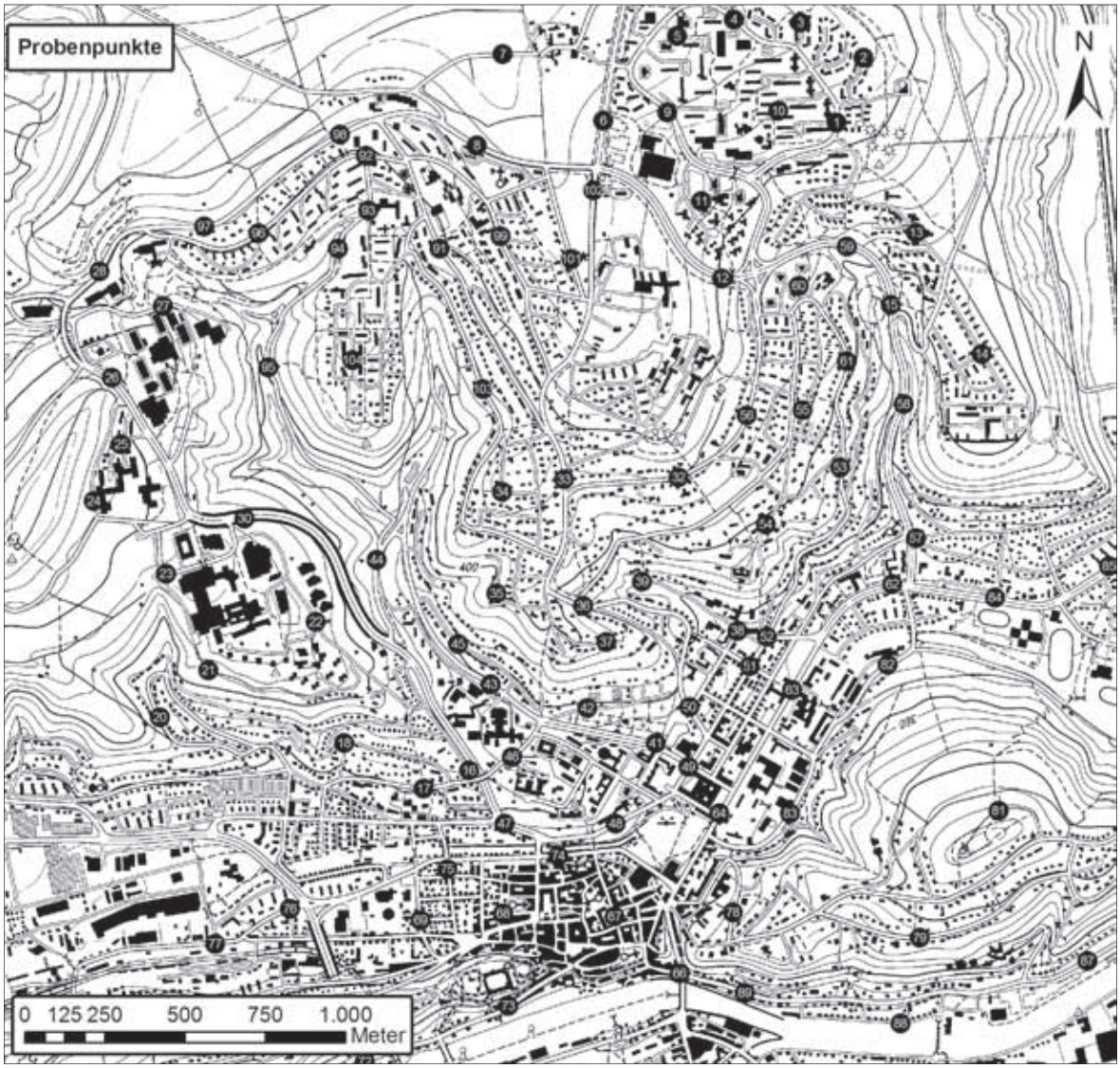

Abb. 2: Entnahmestellen der Proben *Quelle: Eigene Darstellung.*

Um Aussagen über die Verteilung der Schwermetalle in Tübingen zu treffen, war es notwendig, die vorhandenen Punktdaten flächenhaft für den gesamten Untersuchungsraum zu interpolieren. Dazu bietet sich ein bei der Verwendung von Geographischen Informationssystemen häufig verwendetes Verfahren an: das Inverse Distance Weighting (Inverse Distanzgewichtung). Inverse Distance Weighting bezeichnet eine Interpolationsmethode, die der Annahme zugrunde liegt, dass die punktuell gemessenen Daten abhängig von der Entfernung im Raum gewisse Ähnlichkeiten in den Werten aufweisen. Bei dieser Methode wird der Wert an einem beliebigen, nicht gemessenen Punkt durch ein gewichtetes Mittel der benachbarten, gemessenen Werte geschätzt. Dies ist bei genauer Betrachtung die mathematische Formulierung von Toblers „First Law of Geography: Everything is related to everything else, but near things are more related than those far apart." (Longley et al. 2001: 61). Ergebnis dieser Interpolation sind die Karten mit der flächendeckenden Verbreitung der Schwermetalle (Abb. 3 bis 9).

Um zu einer Gesamtbewertung der Schwermetallsituation im Untersuchungsgebiet zu gelangen, war es notwendig, die Belastungen durch die einzelnen Schwermetalle an einem Punkt zu einem einzigen Wert zu verrechnen. Dazu war eine Bildung von Klassen für die einzelnen Schadstoffe notwendig. Als Klassengrenzen wurden hierzu der jeweilige Grenzwert aus der Klärschlammverordnung (Tab. 5) und seine Vielfache herangezogen: Die Klasse 1 stellt die Werte dar, die kleiner als der Grenzwert sind, die Klasse 2 repräsentiert Werte größer dem Grenzwert und kleiner der doppelten Grenzwertüberschreitung, usw. usf. (Tab. 6). Die Klassifizierung erfolgte im GIS durch die „Reclassify"-Funktion. Die dadurch für jedes Schwermetall erzeugten Klassenkarten wurden abschließend mittels des „Raster Calculators" addiert, um so eine Einschätzung der kumulativen Schadstoffbelastung zu ermöglichen (Abb. 9).

Tab 5: Grenzwerte aus der Klärschlammverordnung

Blei	100 mg/kg
Zink	200 mg/kg
Kupfer	60 mg/kg
Nickel	50 mg/kg
Chrom	100 mg/kg

Tab. 6: Einteilung der Schadstoffklassen

	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5	Klasse 6
Blei	< 100 mg/kg	< 200 mg/kg	< 300 mg/kg	< 400 mg/kg	< 500 mg/kg	> 500 mg/kg
Kupfer	< 60 mg/kg	< 120 mg/kg	< 180 mg/kg	< 240 mg/kg	< 300 mg/kg	> 300 mg/kg
Nickel	< 50 mg/kg	> 50 mg/kg				
Zink	< 200 mg/kg	< 400 mg/kg	< 600 mg/kg	< 800 mg/kg	< 1000 mg/kg	> 1000 mg/kg
Chrom	< 100 mg/kg	> 100 mg/kg				

4. Ergebnisse der Schwermetallanalysen

4.1 Blei

Der durch die AAS ermittelte Minimalwert von Blei beträgt im Untersuchungsgebiet 2,6 mg/kg, während der Höchstwert bei 551,2 mg/kg liegt.

Abb. 3 zeigt, dass es in dem untersuchten Gebiet drei Schwerpunkte hoher Bleikonzentrationen gibt: Zunächst sei die Altstadt genannt. Hier erfolgt eine zusätzliche Ausdehnung auf Bereiche südlich des Neckar. Weiterhin findet man hohe Bleikonzentrationen in den Straßenstäuben nordwestlich der Wilhelmstraße, wobei der Beginn in etwa auf Höhe des Kupferbaus zu finden ist. Die Erstreckung verläuft gen Nordosten und begleitet schließlich einen Abschnitt des Nordrings. Der dritte Schwerpunkt zeichnet sich im Norden Tübingens ab. Die geringsten Werte weisen der Österberg sowie vor

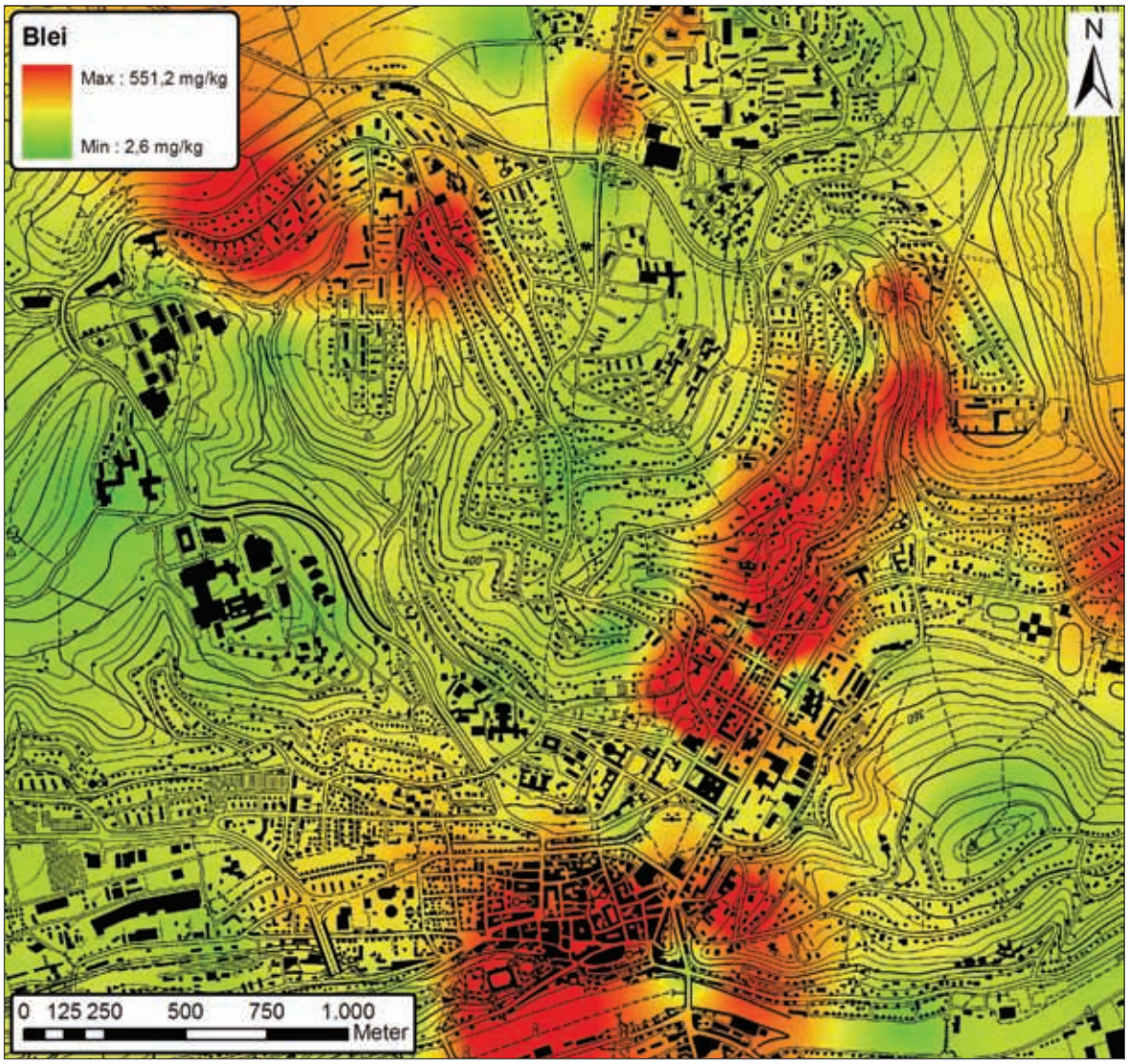

Abb. 3: Bleibelastung *Quelle: Eigene Darstellung.*

allem westlich von der Schnarrenbergklinik und der Unfallklinik liegende Bereiche auf. Auch zeigt die Weststadt verhältnismäßig geringe Konzentrationen.

4.2 Chrom

Minimalgehalt an Chrom im untersuchten Gebiet ist 0,9 mg/kg, wohingegen der gemessene Maximalwert 145,2 beträgt.

Die Chromkonzentrationen im Untersuchungsgebiet (Abb. 4) zeigen besonders hohe Werte im Universitätsviertel, wobei der Verlauf zum einen bei der Neckarbrücke und zum anderen nördlich der Altstadt beginnt. Die zwei „Finger“ stoßen etwa in Höhe des Alten Botanischen Gartens zusammen. Über das Universitätsviertel hinweg folgt der weitere Verlauf nordwestlicher Richtung. Weiterhin zeigen die Straßenstäube im Bereich des Neckar im östlichen Teil des untersuchten Gebietes sehr hohe Konzentra-

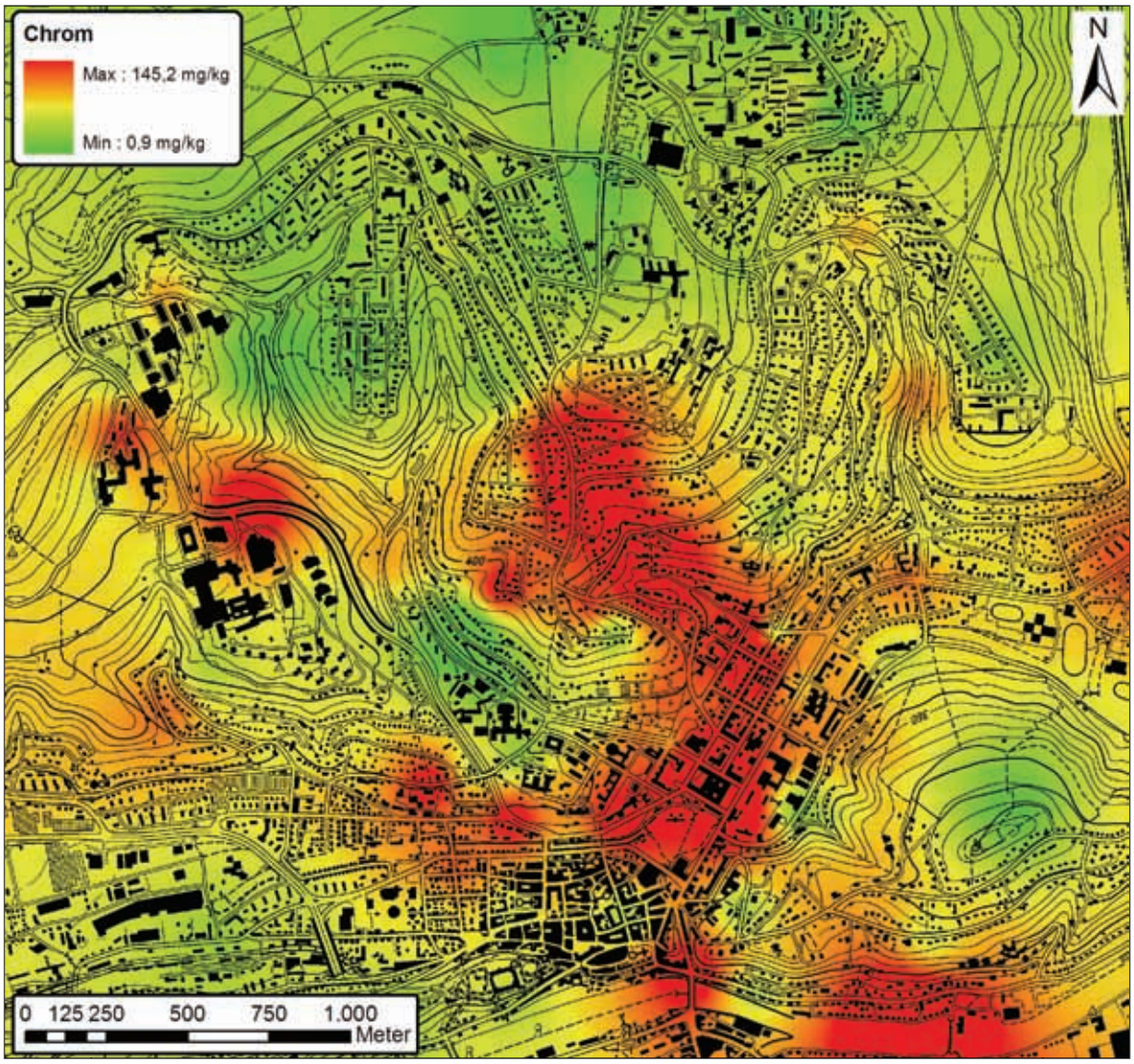

Abb. 4: Chrombelastung *Quelle: Eigene Darstellung.*

tionen. Zudem weisen Bereiche nördlich der Schnarrenbergklinik sehr hohe Chromgehalte auf.

Besonders niedrige Werte wurden für den Österberg und im Bereich der Innenstadtkliniken ermittelt. Bis auf einige wenige Ausnahmen weisen die nördlichen Stadtteile sehr geringe Gehalte auf.

4.3 Eisen

Die durch die AAS gemessene Minimal- und Maximalwerte von Eisen betragen 8691,0 mg/kg bzw. 33978,5 mg/kg.

Sehr hohe Eisengehalte finden sich in der Altstadt und südlich davon (vgl. Abb. 5). Neben diesem augenscheinlichen Schwerpunkt sind zahlreiche Stellen mit hohen Konzentrationen zu verzeichnen: So erstreckt sich ein Band entlang der Wilhelmstraße

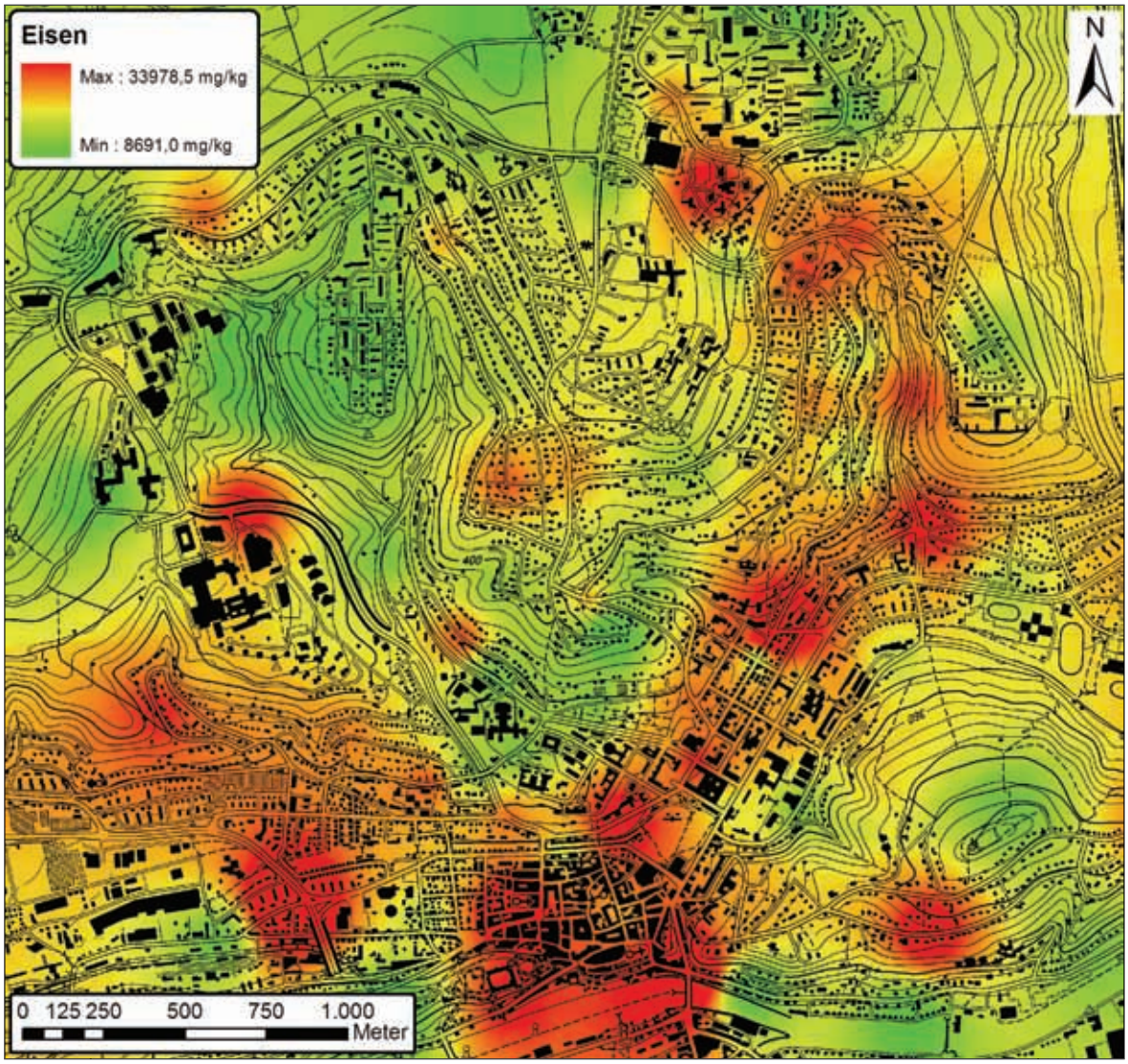

Abb. 5: Eisenbelastung *Quelle: Eigene Darstellung.*

respektive Hölderlinstraße (bzw. leicht nördlich davon - kann im Zusammenhang mit den Messstellen stehen), welches seine Fortsetzung im Nordring findet. Auch weist die Weststadt zu großen Teilen sehr hohe Eisenkonzentrationen auf. Schließlich wurden für einen Bereich nördlich der Schnarrenbergklinik sowie südlich des Österbergs hohe Gehalte festgestellt.

Der Österberg selbst ist jedoch durch niedrige Eisenwerte gekennzeichnet. Gleiches gilt für den östlichen Verlauf des Neckar und große Teile der Nordstadt.

4.4 Kupfer

Die Ergebnisse der AAS ergaben für Kupfer den Minimalwert von 27,8 mg/kg und den Maximalwert von 416,8 mg/kg. In der räumlichen Verteilung zeigen die Belastungen durch Kupfer in dem Untersuchungsgebiet einen von der Altstadt ausgehenden nordöstlich nehmenden Verlauf (vgl. Abb. 6). Dabei sind die Konzentrationen vor

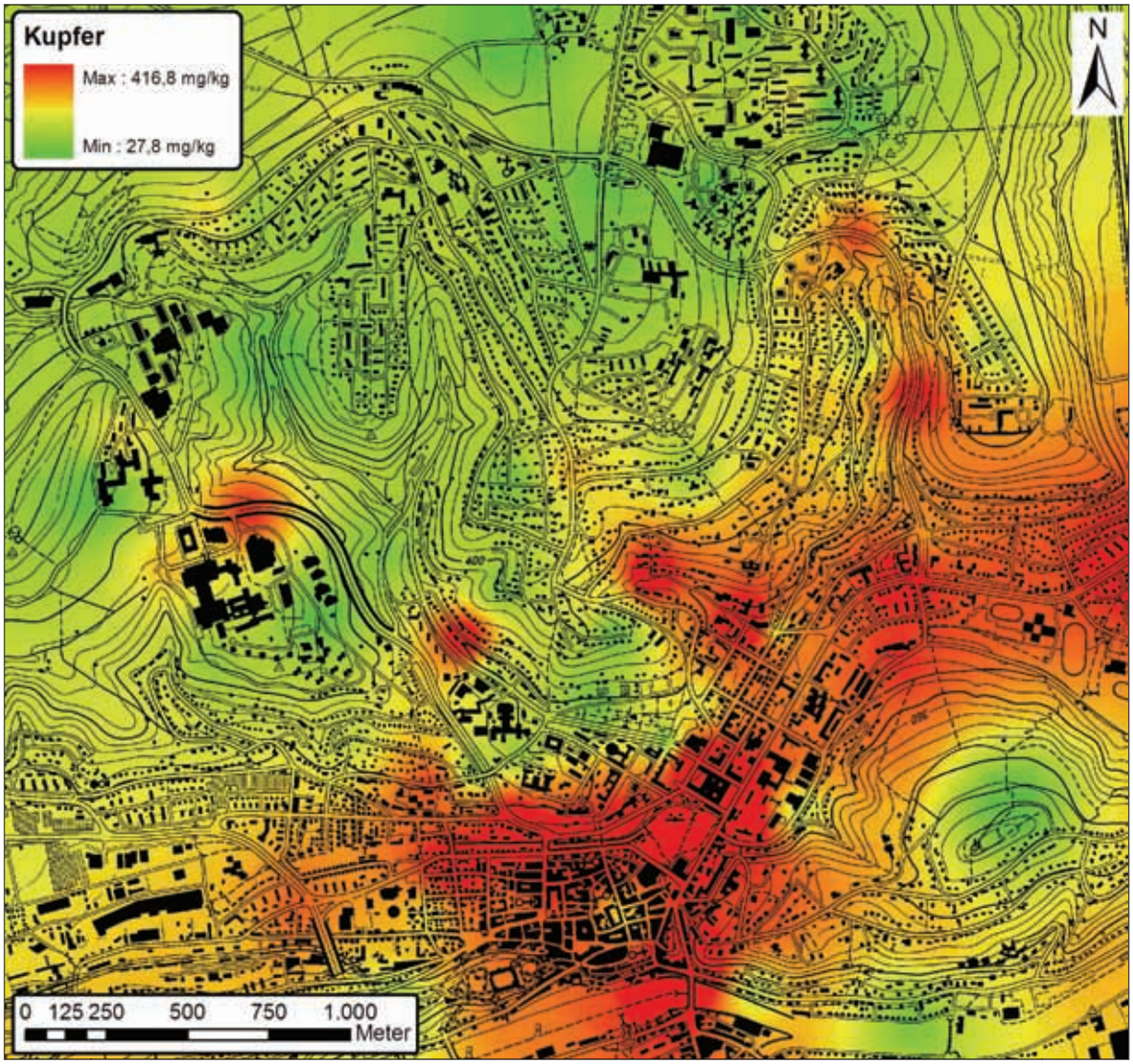

Abb. 6: Kupferbelastung *Quelle: Eigene Darstellung.*

allem in der Mühlstraße sowie der Rümelinstraße sehr hoch (zumindest im Vergleich zu großen Teilen der Altstadt höher). Der Verlauf folgt zum einen der Wilhelmstraße bzw. den Seitenstraßen, zieht sich aber auch den Nordring hinauf. Neben diesem Band sind sowohl nördlich der Innenstadtkliniken als auch nördlich der Schnarrenbergklinik hohe Kupferkonzentrationen ermittelt worden. Auffällig geringe Konzentrationen weist hingegen der Österberg auf. Auch sind die Kupfergehalte im Großen und Ganzen im nordwestlichen Bereich relativ gering.

4.5 Nickel

Die geringste gemessene Nickelkonzentration im Untersuchungsgebiet beträgt 15,6 mg/kg, während der Maximalwert bei 92,1 mg/kg liegt. Sehr hohe Nickelgehalte wurden im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes ermittelt (vgl. Abb. 7). Die verhältnismäßig flächenhafte Ausdehnung erstreckt sich im Nordosten weiter gen Norden als im westlichen Teil der Fläche. Auffällig ist weiterhin, dass im Bereich der

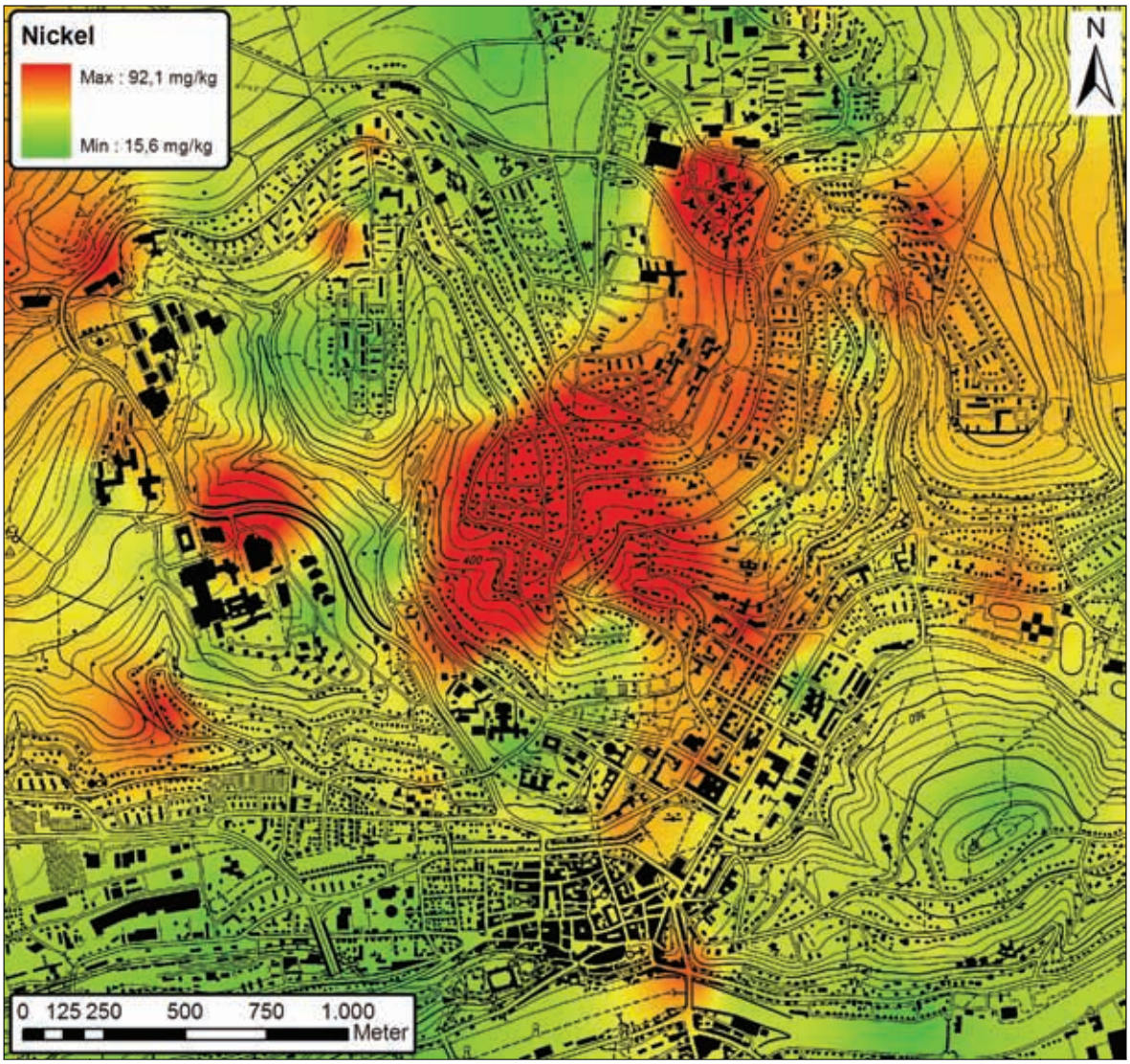

Abb. 7: Nickelbelastung *Quelle: Eigene Darstellung.*

Schnarrenbergklinik eine hohe Belastung zu verzeichnen ist. Gleiches gilt für den nordwestlichen Teil um die Morgenstelle herum. Neben dem Österberg weisen auch die Weststadt, die Schlossanlage sowie die zentral gelegenen nördlichen Bereiche geringe Nickelkonzentrationen auf.

4.6 Zink

Zink weist im Untersuchungsgebiet einen Minimalwert von 112,0 mg/kg und einen Höchstwert von 1759 mg/kg auf. Räumlich zeichnet sich auch bei den hohen Zinkkonzentrationen ein Band ab, welches südlich der Altstadt beginnt und gen Nordosten verläuft (Abb. 8). Besonders große Belastungen liegen in diesem Fall nordöstlich des Geographischen Instituts im Bereich der nördlichen Hölderlinstraße sowie auf dem Sandäcker vor. Weiterhin wurden nördlich der Schnarrenbergklinik hohe Zinkgehalte ermittelt. Sehr niedrige Konzentrationen finden sich am Österberg sowie um die Morgenstelle herum.

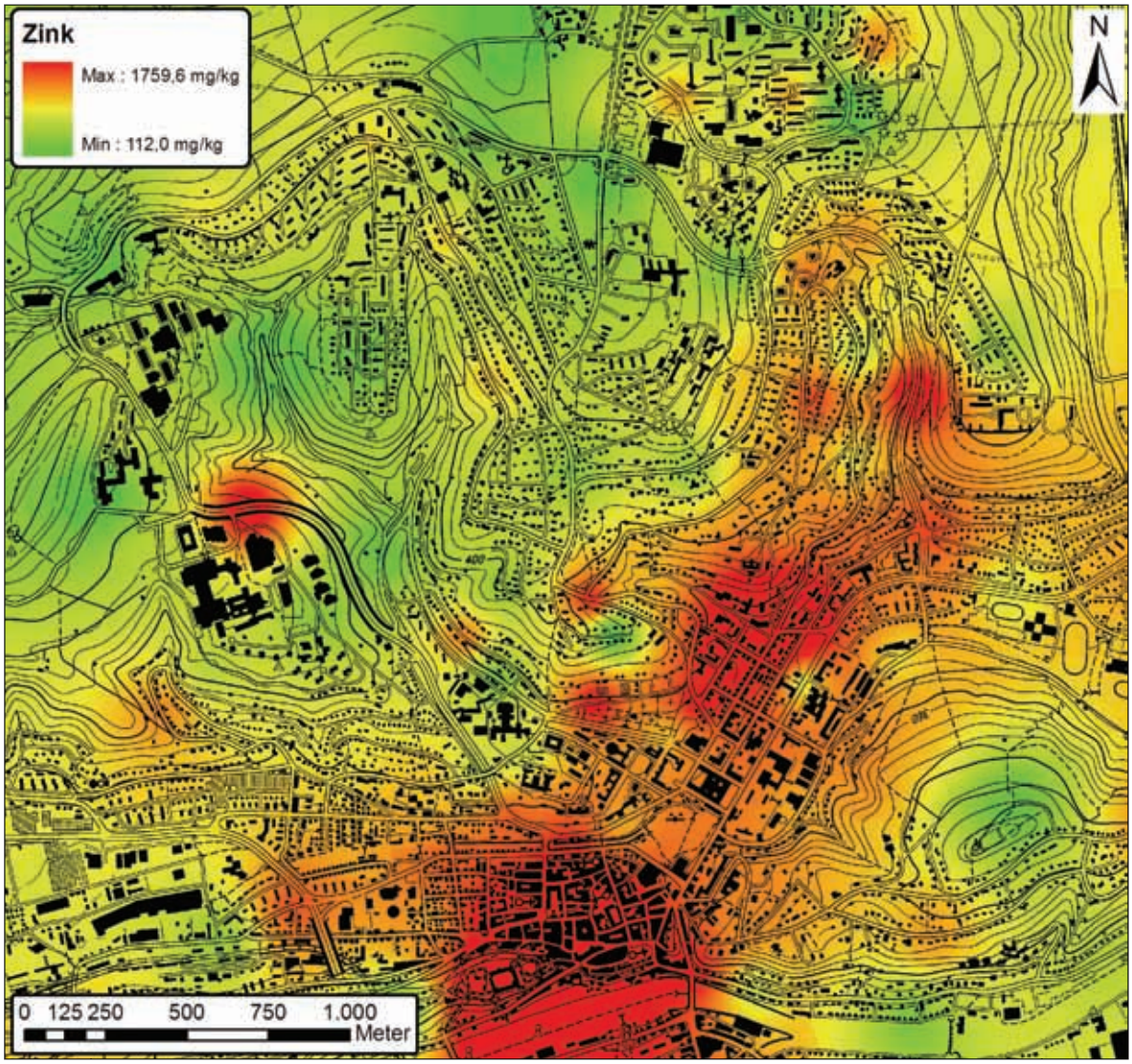

Abb. 8: Zinkbelastung *Quelle: Eigene Darstellung.*

4.7 Gesamtbelastung

Betrachtet man abschließend die Gesamtbelastung (vgl. Kap. 3.2), so stellt man fest, dass sich ausgehend von der Altstadt, andeutungsweise auch südlich davon, ein Nordost gerichtetes Band hoher Konzentrationen entlang der Wilhelmstraße bzw. nördlich davon verläuft, das schließlich einem Teil des Nordringes folgt (vgl. Abb. 9). Bemerkenswert ist der ebenfalls durch sehr hohe Gesamtgehalte gekennzeichnete Bereich um die Schnarrenbergklinik. Geringe Konzentrationen zeigen dagegen der Österberg, sämtliche Bereiche nördlich sowie westlich der Schnarrenbergklinik. Insgesamt weist der Nordteil des untersuchten Gebietes verhältnismäßig geringere Gesamtbelastungen auf als die übrigen Bereiche.

Die Gesamtbelastungen zeichnen somit das nach, was auch schon bei der Betrachtung der einzelnen Schwermetalle anzuschätzen war. Eine Ausnahme stellt dabei

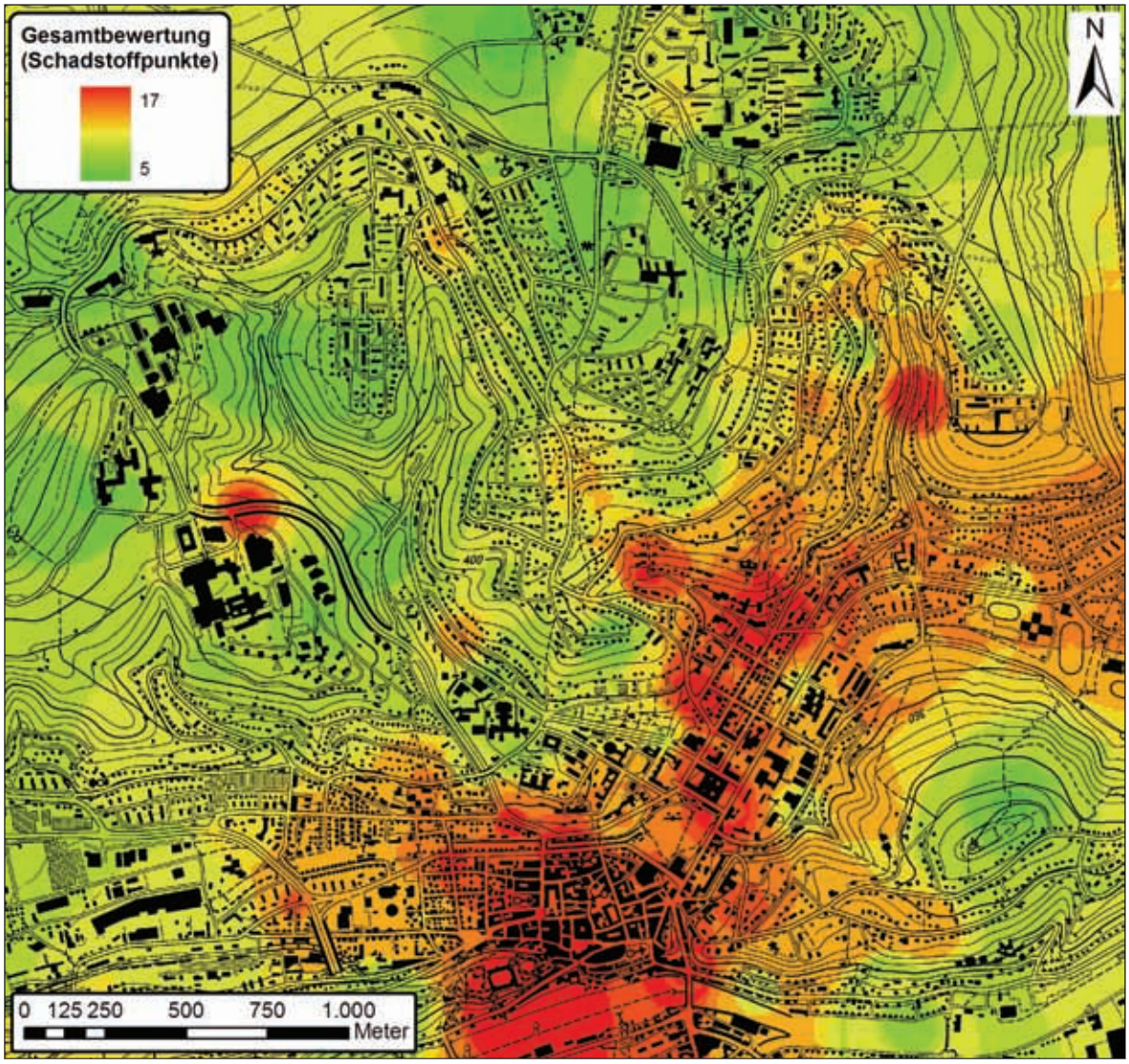

Abb. 9: Gesamtbelastung *Quelle: Eigene Darstellung.*

die Verteilung der Nickelgehalte dar (vgl. Abb. 7), da in diesem Fall die Konzentrationen vor allem im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes hoch sind, aber an den sonst stark belasteten Stellen höchstens durchschnittliche Werte erreicht werden (Ausnahme: Schnarrenbergklinik).

5. Diskussion

Generell ist bei der Auswertung ist zu beachten, dass man die Werte einzelner Elemente schwer miteinander, sondern nur untereinander vergleichen kann. Ein Nickelwert von 50 mg/kg ist schwerwiegender als ein Zinkwert von gleicher Höhe. Grund dafür ist, dass die verschiedenen Elemente unterschiedliche Auswirkungen auf und Gefährdungen für Mensch und Umwelt darstellen. Die Klärschlammverordnung, welche in der statistischen Auswertung die Grundlage der Bewertung ist, zeigt dies mit den gesetzten Grenzwerten sehr deutlich.

Betrachtet man zunächst einmal die Werte der einzelnen Elemente, so lässt sich feststellen, dass die höchsten Konzentrationen bei Eisen erreicht werden (Spanne von 8691 mg/kg bis 33 978,5 mg/kg). Da Eisen nicht als Schwermetall gilt und auch keine Grenzwerte in der Klärschlammverordnung existieren, kann man nicht beurteilen, ob eine Verschmutzung durch Eisen gegeben ist. Es ist jedoch anzumerken, dass die optische Untersuchung der Straßenstäube schon gezeigt hat, dass in den gesammelten Proben reichlich eisenhaltiges Feinmaterial zu finden ist. Ursprung dieses Materials ist der Straßenverkehr. Somit unterstützen die Ergebnisse der Eisenanalysen zumindest, dass man die Feinstäube als Indikatoren urbaner Belastungen heranziehen kann.

Zink hat mit einem Maximalwert von 1759 mg/kg eine sehr hohe Abweichung von dem in der Klärschlammverordnung festgesetzten Grenzwert von 200 mg/kg. Auch der Minimalwert ist mit 112,0 mg/kg schon recht hoch. Diese Grenzwerte als Standard heranziehend kann man von einer außerordentlich hohen Belastung durch Zink in Tübingen sprechen. Kupfer weist mit einem gemessenen Maximalwert von 416,8 mg/kg eine fast siebenfache Überschreitung des in der Klärschlammverordnung gesetzten Wertes auf. Auch die Bleiwerte für das Untersuchungsgebiet sind bezogen auf diesen Standard sehr hoch und zeigen eine bis zu fünfeinhalbfache Überschreitung des zulässigen Grenzwertes. Chrom und Nickel hingegen weisen keine sonderlich auffällig hohen Abweichungen auf, übersteigen jedoch auch die Grenzwerte. So zeigt Nickel einen Maximalwert von 92,1 mg/kg, wobei der gesetzte Wert in der Klärschlammverordnung bei 50 mg/kg liegt. Für Chrom wiederum wurde ein Höchstwert

von 145,2 mg/kg gemessen, während 100mg/kg der zulässige Grenzwert wäre. Bei Chrom ist jedoch zu bemerken, dass der ermittelte Minimalwert von 0,9 mg/kg sehr gering ist. Diese Spanne zeigt, dass die Chrombelastung innerhalb des Untersuchungsgebietes inhomogen, jedoch gering einzuschätzen ist.

Die Auswertung der räumlichen Verteilung zeigt, dass es im Wesentlichen drei Bereiche gibt, die hohe Belastungen aufweisen. Zunächst einmal sei die Altstadt zu nennen, die hohe Werte für Blei, Kupfer, Eisen und Zink zeigt. Geht man von Straßenverkehr als Hauptverursacher der Belastungen aus, so ist die Tübinger Altstadt zwar relativ arm an motorisiertem Verkehr, ist jedoch bezüglich der Straßenbeläge und der Gebäudeanordnung eine Besonderheit innerhalb des Untersuchungsgebietes. Der motorisierte Verkehr der Altstadt beschränkt sich fast ausschließlich auf Anwohner und Zulieferer der Geschäfte und des wöchentlichen Marktes. Gerade die Zulieferer befahren die Altstadt mit schweren Fahrzeugen, welche durch das Kopfsteinpflaster starken Erschütterungen ausgesetzt sind. Sämtliche Stäube, die aus dem Fahrzeug stammen und sich an demselben festgesetzt haben, könnten durch derartige Erschütterungen freigesetzt werden und in den Stäuben akkumulieren.

Weitere Schwierigkeit des Kopfsteinpflasters ist die Griffigkeit, die insbesondere bei nassem Belag eingeschränkt sein kann. Auch müssen die Fahrzeuge durch die vielen Fußgänger relativ oft bremsen, was eine Belastung der Bremsbeläge darstellt, welche oft Ursprung von Schwermetallen in Straßenstäuben sind. Nach dem Abbremsen erfolgt zwangsläufig eine Beschleunigung, die erhöhte Abgase mit sich bringen kann. Diese Problematiken treten an steilen Bereichen verstärkt auf.

Die ausgestoßenen Stäube können sich sehr gut in den Rillen des Kopfsteinpflasters festsetzen und werden auch durch Regenfälle nur schwer beseitigt. Die enge Gebäudeanordnung in der Innenstadt trägt zudem dazu bei, dass die Stäube nur schwer windverfrachtet werden können, da die Luftzirkulation eingeschränkt ist.

Der zweite Bereich mit sehr hoher Belastung ist die Wilhelmstraße; bei Kupfer beginnt die Belastung sogar schon in der Mühlstraße und erstreckt insgesamt als ein recht breites Band in westliche Richtung. Hohe Werte werden von Blei, Chrom, Eisen, Kupfer und Zink erreicht. Erstaunlich ist, dass das Band nicht direkt auf der Wilhelmstraße verläuft. Grund dafür werden die Messpunkte sein, die nicht direkt auf der Wilhelmstraße liegen (Probennahme gestaltet sich dort zu schwierig). Entsprechend der GIS-Methodik, die Punktdaten interpoliert, wurde bei der Erstellung der Karten der Messpunkt als Mittelpunkt genommen. Es ist zu vermuten, dass Proben direkt von der Wilhelmstraße entnommen ähnliche oder gar höhere Werte ergeben hätten.

Grund für die hohen Belastungen in der Wilhelmstraße und ihren seitlichen Erstreckungen kann der hohe Verkehr sein. Gleiches gilt auch für die Mühlstraße, die vor allem tagsüber eine hohe Belastung durch Busse erfährt. Durch den Ampelverkehr, welcher am Ende der Neckarbrücke beginnt, wird der Verkehrsfluss häufig abgebremst, was schließlich zum erneuten Anfahren und Gasgeben führt. Ähnliches gilt auch für die Wilhelmstraße selbst; neben der hohen Fahrzeugfrequenz findet man dort zahlreiche Ampeln.

Letzter Bereich ist der Nordring bzw. der südliche Teil davon. Ähnlich wie in der Wilhelmstraße ist auch hier der Verkehr sehr hoch. Zudem werden oftmals höhere Geschwindigkeiten gefahren. Sind Ampeln vorhanden, so kann es zum Abbremsen kommen, welches bei höheren Geschwindigkeiten, wenn nicht rechtzeitig gebremst, zu vermehrtem Abrieb der Bremsbeläge führen kann.

Auffällig ist jedoch, dass die Belastungen vorwiegend im südlichen Teil des Nordrings zu finden sind. Gäbe es keine Probeentnahmestellen im nördlichen Teil, so könnte man davon ausgehen, dass darin der Grund zu suchen ist. Da jedoch zahlreiche Proben im Norden entnommen wurden (vgl. Abb. 2), kann man vermuten, dass entweder die Verkehrsbelastung im südlichen Abschnitt größer ist, oder durch Abfluss die Stäube nach unten geschwemmt und dort vermehrt akkumuliert wurden.

Einige Stellen hoher Belastungen sind jedoch schwer erklärlich, wie z.B. die hohen Chrom-, Eisen-, Kupfer- und Zinkgehalte in Höhe der Schnarrenbergkliniken. Zu vermuten ist an dieser Stelle, dass ein Messfehler oder falsche Probeentnahme vorliegt. Die GIS-Methodik in Verbindung mit fehlenden Probeentnahmepunkten in der Umgebung trägt zudem dazu bei, dass diese Stelle ins Auge fällt. Um zu verifizieren, ob es sich um einen Fehler handelt, müsste man an dieser Stelle erneut eine Probe nehmen und diese analysieren. Auch wären Proben aus der näheren Umgebung wichtig, um ein Verteilungsmuster zu identifizieren, was dann eine Interpretation zuließe. Eine mögliche Erklärung könnte erneut hoher Verkehr sein, wenn man an Stellen südlich und nördlich des Straßenverlaufs ebenfalls hohe Werte ermittelt.

Als abschließende Besonderheit sei Nickel zu nennen. Die räumliche Verteilung von Nickel korreliert in keiner Weise mit den anderen Elementen. Wie man in Abb. 7 sieht, befindet sich eine verhältnismäßig hohe Nickelbelastung im zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes. Nickel stammt nicht aus dem Straßenverkehr, sondern hat seinen Ursprung in geologischen Komponenten (Beck 1996). Somit wird eine geologische Formation ursächlich sein. Hieraus wird erkenntlich, dass hohe Konzentrationen nicht immer anthropogenen Ursprungs sein müssen. Überschreitungen von Grenzwer-

ten wie die Klärschlammverordnung können somit auch durch natürlich vorkommende Konzentrationen überschritten werden.

6. Fazit

Im Rahmen eines Laborpraktikums des Geographischen Instituts Tübingen wurden Straßenstäube in Tübingen bezüglich ihres Schwermetallgehalts mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) untersucht. Hohe Gehalte wurden insbesondere für Eisen, Blei, Kupfer und Zink gefunden, während Nickel und Chrom in geringen Mengen nachzuweisen war. Besonders hohe Belastungen weisen die Altstadt, die Wilhelmstraße und Teile des Nordrings auf.

Dieser Bericht basiert auf der grundlegenden Überlegung, dass die gesammelten Stäube und die in ihnen befindlichen Schwermetalle vorwiegend aus dem Straßenverkehr und der in der Nähe befindlichen Industrie stammen. Um den wirklichen Ursprung der Stäube zu bestimmen, müsste man jedoch eine isotopenchemische Untersuchung der Stäube vornehmen. Die Isotopenverhältnisse sind wie Fingerabdrücke sowohl von geologischen Formationen als auch von Straßen- oder Industrieausstößen. Die Methodik ist jedoch sehr zeitaufwendig und konnte im Rahmen des Laborpraktikums nicht durchgeführt werden.

Auch hätte man die ermittelten Ergebnisse mit Verkehrszählungen korrelieren können. Jedoch standen für den Zeitraum keine sinnvollen Daten zur Verfügung. Eine eigene Zählung hätte wiederum den Rahmen des Praktikums gesprengt.

Literatur

Alloway, B. J. (Hrsg., 1999): Schwermetalle in Böden. Analytik, Konzentrationen, Wechselwirkungen. Berlin, Heidelberg.

Baumann, F. (2005): Studentische Hilfskraft im Labor des geographischen Instituts Tübingen. Mündliche Mitteilung.

Beck, R. (1996): Schwermetalleinträge in der Tübinger Südstadt – Straßenbauanalyse und Moss-Bag-Monitoring. – In: Tübinger Geographische Studien, **116**: 307-328. Tübingen.

Beck, R., D. Burger. & K.-H. Pfeffer (1995): Laborskript - Ein Handbuch für die Benutzer der Laboratorien der Physischen Geographie der Universität Tübingen. - Kl. Arb. Geogr. Inst. Uni. Tübingen, **11**: 217 S.; Tübingen.

Longley, P.A., M.F. Goodchild, D.J. Maguire & D.W. Rhind (2001): Geographic Information Systems and Science. Wiley, Chichester, New York.

Scheffer, F., P. Schachtschabel & H.-P. Blume (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg, Berlin.

Zöfel, A. (2000): Statistik verstehen. Ein Begleitbuch zur computerunterstützten Anwendung. Addison-Wesley, München.