Stadtstrukturabhängige Ausweisung sensitiver Siedlungsräume bei thermischen Belastungen als Grundlage für die künftige Stadtentwicklung
– Darstellung sensitiver Gebiete bei thermischen Belastungen
– Anpassungsempfehlungen

Produkt 3.1.2c

Version: 2.0
Status: Final
Datum: 31.12.2011

TP 3.1.2
– Grün- und Freiflächen, städtebauliche Strukturen, biometeorologische Effekte –

TP-Leiter: Prof. Wolfgang Wende
Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR)

Bearbeiter: Franz Held
Dr. Tobias Krüger
Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR)

Kontakt: Tel.: 0351/4679-256
Fax: 0351/4679-212
E-Mail: t.krueger@ioer.de

REGKLAM
Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Förderkennzeichen: 01 LR 0802

Koordination: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)
Weberplatz 1, 01217 Dresden
Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Müller

www.regklam.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einordnung 1

1.1 Grundlagen der Methodik „Sensitive Siedlungsräume" 1

1.2 Eingangsparameter des Betroffenheitsindex 3

2 Bereitstellung der Eingangsparameter 4

2.1 Physiologische Äquivalenttemperatur PET 4

2.2 Demographiefaktor 7

2.3 Strukturtypenfaktor 13

3 Erste Ergebnisse und Beispielkarten 23

4 Anpassungsempfehlungen 28

4.1 Optionen zur Verbesserung der thermischen Belastung 28

4.2 Abschließende Bemerkungen 32

5 Literatur 33

6 Anhang 36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modellansatz zur Identifizierung sensitiver Siedlungsräume bei Hitzeereignissen (verändert nach Hoechstetter et al. 2010) 3

Abbildung 2: Verteilung der mittleren PET (rasterbasiert) in Dresden an einem heißen Tag 6

Abbildung 3: Übersicht der Ortsamtsbereiche, Ortschaften und Stadtteile in Dresden 8

Abbildung 4: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der Gesamtbevölkerung in Dresden 10

Abbildung 5: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der Gesamtbevölkerung im Zentrum Dresdens 11

Abbildung 6: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der älteren Bevölkerung (Ü75) im Zentrum Dresdens 12

Abbildung 7: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der Kleinkinder (U2) im Zentrum Dresdens 13

Abbildung 8: Mittelwertdiagramm zur Oberflächentemperatur an heißen Tagen bzgl. Stadtstrukturtypen 16

Abbildung 9: Mittelwertdiagramm zur Oberflächentemperatur an heißen Tagen gruppiert nach Strukturtypenklassen 19

Abbildung 10: Nettoblockbezogene Darstellung der bioklimatischen Relevanz $REL_{bioklim}$ der Stadtstrukturtypen in Dresden 20

Abbildung 11: Nettoblockbezogene Darstellung der Wichtungsfaktoren W_{SSTK} der Strukturtypen in Dresden 21

Abbildung 12: Darstellung des Belastungsindex der Gesamtbevölkerung in Dresden auf Basis Statistischer Bezirke 23

Abbildung 13: Nettoblockbezogene Darstellung des Belastungsindex der Gesamtbevölkerung in Dresden 24

Abbildung 14: Nettoblockbezogene Darstellung des Belastungsindex der Gesamtbevölkerung im Zentrum Dresdens 25

Abbildung 15: Nettoblockbezogene Darstellung des Belastungsindex der älteren Bevölkerung (>75 Jahre) im Zentrum Dresdens 26

Abbildung 16: Nettoblockbezogene Darstellung des Belastungsindex der Kleinkinder (<2 Jahre) im Zentrum Dresdens.....27

Abbildung 17: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der älteren Bevölkerung (Ü75) in Dresden 37

Abbildung 18: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der Kleinkinder (U2) in Dresden 38

Abbildung 19: Nettoblockbezogener Betroffenheitsindex der Älteren (Ü75) in Dresden ..39

Abbildung 20: Nettoblockbezogener Betroffenheitsindex der Kleinkinder (U2) in Dresden 40

Abbildung 21: Raumstrukturielles Leitbild des Landschaftsplanes Dresden (Entwurf) - "Die kompakte Stadt im ökologischen Netz" (Korndörfer 2008) 41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bedeutung der Werte des berechneten Betroffenheitsindex..... 2

Tabelle 2: Verwendete Datengrundlagen und Benennungskonventionen 3

Tabelle 3: Einteilung der PET-Klassen, verändert nach Matzarakis und Mayer (1996) 5

Tabelle 4: Einwohnerzahlen der Ortsamtsbereiche und Ortschaften in Dresden, Stand: 2007 (Quelle: Statistikstelle LHD)..... 7

Tabelle 5: Thermische Eigenschaften von Materialien (verändert, nach Helbig et al. 1999, Kuttler 2004) 14

Tabelle 6: SPSS - Statistik der Oberflächentemperatur an heißen Tagen bzgl. Stadtstrukturtypen 15

Tabelle 7: Zuweisung von Stadtstrukturtypen zu Typklassen mit bioklimatischer Relevanz 17

Tabelle 8: Statistik der Oberflächentemperatur an heißen Tagen bzgl. Strukturtypklassen 18

Tabelle 9: Herleitung der Wichtungsfaktoren für Strukturtypklassen 20

1 Einordnung

Gegenstand dieses Produktes ist die Entwicklung und Dokumentation einer Methodik zur Ausweisung sensitiver Siedlungsräume bei thermischen Belastungssituationen. Diese soll in weiteren Projektschritten zur Formulierung konkreter Handlungsempfehlungen, insbesondere zur Ausweisung von Vorranggebieten für Klimaanpassungsmaßnahmen in der Stadtentwicklung, herangezogen werden.

Zur Vorbereitung wurden umfangreiche Vergleiche bestehender Ansätze durchgeführt. Dadurch konnten die entscheidenden Faktoren für die Abgrenzung von sensitiven Siedlungsräumen definiert werden. Einen weiteren wichtigen Arbeitsschritt stellte die Sichtung der verfügbaren Datengrundlagen der Landeshauptstadt Dresden dar.

Das wesentliche Endergebnis dieses Teils von TP 3.1.2 sind kartographische kleinräumige Darstellungen der potentiellen Hitzebelastung innerhalb der Landeshauptstadt Dresden. Die entwickelte Methodik, die zu den vorliegenden Ergebnissen geführt hat, bezieht sich stark auf die vor Ort verfügbaren Geoinformations- und Statistikdaten. Eine Übertragbarkeit auf andere Kommunen hängt somit von der Verfügbarkeit an äquivalenten ab. Es wird jedoch an weiteren Methoden gearbeitet, die auf der Grundlage großflächig verfügbarer und generalisierter Eingangsdaten, ebenfalls zu brauchbaren Ergebnissen führen und eine Allgemeingültigkeit dieser gewährleisten sollen.

1.1 Grundlagen der Methodik „Sensitive Siedlungsräume"

Mit Hilfe der hier vorgestellten Methodik „Sensitive Siedlungsräume" werden Stadtgebiete identifiziert, in denen bei auftretenden Hitzeereignissen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der thermophysiologischen Belastung der dort ansässigen Bevölkerung erwartet werden kann.

Hierfür wird jedem statistischem Bezirk durch Verrechnung sozio-demographischer, stadtstruktureller und thermaler Daten ein Kennwert für dessen Sensitivität gegenüber Hitzeereignissen zugewiesen. Die Skala der Sensitivität orientiert sich an der Bewertung der thermophysiologischen Belastung, die durch Matzarakis & Mayer (1996) für Wertebereiche der Physiologischen Äquivalenttemperatur (PET) aufgestellt wurden (Tabelle 1). Der Wertebereich reicht von 0 (keine Betroffenheit) bis 6 (sehr hohe Betroffenheit).

Prinzipiell erfolgt die Identifikation sensitiver Siedlungsräume unter Berücksichtigung folgender wesentlicher Eingangsparameter:

- Soziodemographische Daten,
- Informationen zu Stadtstrukturtypen (SST),
- Thermaldaten (potentielle Physiologische Äquivalenttemperatur, PET_{pot}).

Für die Berechnung des Sensitivitätskennwertes (Betroffenheitsindex) wird zunächst die PET, die sich aus den mittleren Oberflächentemperaturen (s. REGKLAM-Teilprodukt 3.1.2a: Digitale Stadtstrukturkartierung –Analyse der stadtstrukturellen Grundlagen und thermale Charakterisierung von Stadtstrukturen) ableiten lässt, zugrundegelegt. Es handelt sich hierbei um eine potentielle Größe, da sich der PET-Wert nicht wie üblich aus

dem Zusammenwirken der Lufttemperatur und -feuchte, Wind und Strahlungsgegebenheiten, sondern aus den satellitengestützt ermittelten Oberflächentemperaturen herleitet. Wechselwirkungen wie Mehrfachreflexionen, Abschattungseffekte etc. werden dabei nicht berücksichtigt. Ergebnis ist eine Temperatur, die, unter Einbeziehung der von der Oberfläche ausgehenden Wärmestrahlung unter Annahme bestimmter meteorologischer Rahmenbedingungen, die potentielle thermophysiologische Belastung für den Menschen abschätzt.

Mittels Wichtungsfaktoren wird der demographischen Situation der sensiblen Bevölkerungsgruppe (Demographiefaktor) und der thermischen Sensitivität der betroffenen Stadtstrukturtypen (Erwärmungspotenzial) Rechnung getragen.

Der Betroffenheitsindex errechnet sich nach der Formel:

$$Betroffenheitsindex = \frac{PET_{pot} * W_{SST} + PET_{pot} * W_{Bev}}{2},$$

mit PET_{pot}: potentielle PET
W_{SST}: Stadtstrukturtypabhängiger Wichtungsfaktor,
W_{Bev}: Demographiefaktor (Bevölkerungsabhängiger Wichtungsfaktor)

Die räumliche Auflösung des Betroffenheitsindex ist von der Kleinräumigkeit der Eingangsdaten abhängig und kann prinzipiell auf beliebigen Maßstäben angewendet werden.

Tabelle 1: Bedeutung der Werte des berechneten Betroffenheitsindex

Betroffenheitsindex für Hitzeereignisse	**Bedeutung**
0 - 1	Keine Betroffenheit
>1 - 2	Sehr geringe Betroffenheit
>2 - 3	Geringe Betroffenheit
>3 - 4	Mäßige Betroffenheit
>4 - 5	Hohe Betroffenheit
>5 - 6	Sehr hohe Betroffenheit

Aus den Ergebnissen lässt sich ablesen, in welchen Bereichen des Stadtgebietes den Anpassungsmaßnahmen an zunehmende Hitzebelastungen eine besonders hohe Priorität eingeräumt werden sollte. Gegenüber herkömmlichen Klimakarten hat der vorgestellte Ansatz den Vorteil, dass bei der Berechnung des Index nicht nur die thermale Belastung selbst, sondern auch die Sensitivität des Siedlungsraumes gegenüber einer solchen Belastung berücksichtigt wird. Vor allem die Exposition der entscheidenden „Rezeptorgruppen" (z. B. ältere Bevölkerung oder Kleinkinder) spielt hierbei eine wichtige Rolle.

1.2 Eingangsparameter des Betroffenheitsindex

Eingangsdaten, die bei der Projektbearbeitung zur Verfügung standen, sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Verwendete Datengrundlagen und Benennungskonventionen

Daten	Beschreibung	Quelle
Soziodemographische Daten	a. Einwohnerzahlen der statistischen Bezirke, gegliedert nach Alterskohorten; Stand: 2007 b. Einwohnerzahlen der Nettoblöcke (Gesamtzahlen); Stand: 2007	Zentrale Statistikstelle der Landeshauptstadt Dresden
Grenzen der statistischen Bezirke	Polygondatensatz mit ID der statistischen Bezirke, korrespondierend zu Daten der Einwohnerstatistik	Umweltamt/ Vermessungsamt
Stadtstrukturdaten	Polygondatensatz mit Informationen zu Stadtstrukturtypen, Stand: 2006	Umweltamt/IÖR
Thermaldaten	Modellierte Verteilung der Physiologic Equivalent Temperature im Stadtgebiet von Dresden	Eigene Bearbeitung

Die Szenariofähigkeit des Ansatzes ist gegeben, indem insbesondere intrakommunale Bevölkerungsprognosen eingearbeitet werden können. Das Modell leistet damit einen Beitrag zur Formulierung von Anpassungsempfehlungen im Bereich „Städtebau – Bioklima".

In Abbildung 1 ist der grundlegende Modellansatz dargestellt.

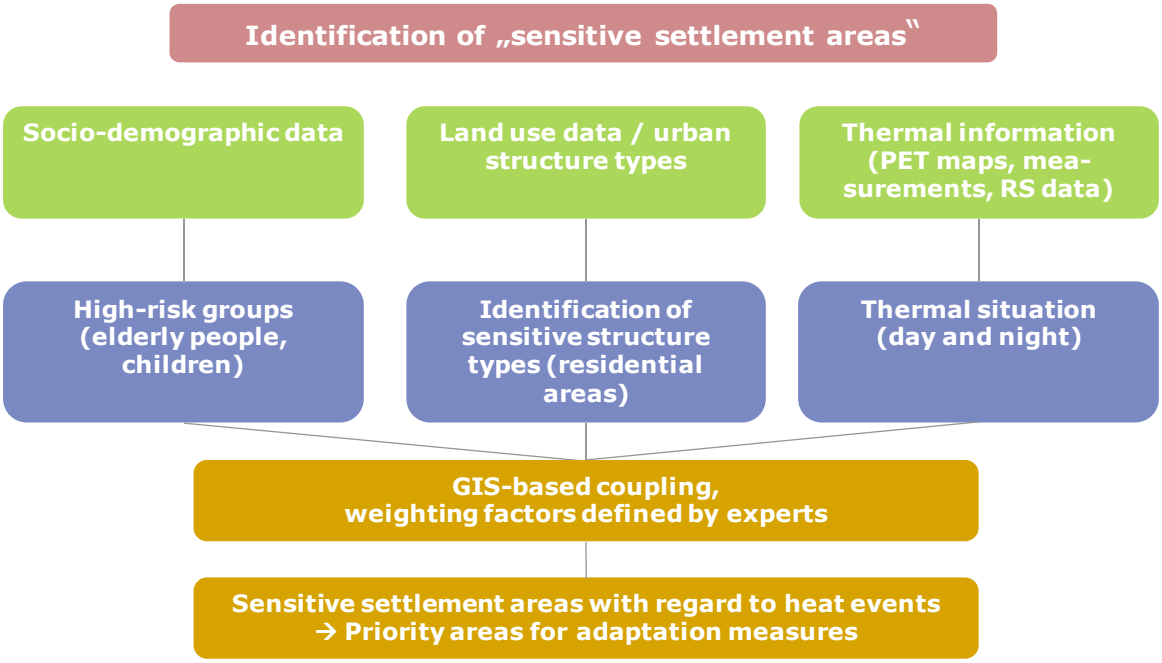


Abbildung 1: Modellansatz zur Identifizierung sensitiver Siedlungsräume bei Hitzeereignissen (verändert nach Hoechstetter et al. 2010)

2 Bereitstellung der Eingangsparameter

2.1 Physiologische Äquivalenttemperatur PET

Definition und Herleitung der PET

Die Physiologische Äquivalenttemperatur (engl. Physiological Equivalent Temperature, PET) gehört zu einer Gruppe biometeorologischer Indizes, die den aktuellen meteorologischen Atmosphärenzustand in thermischer Hinsicht für den Menschen bewertbar machen sollen. Der Vorteil der PET liegt zum einen in der guten physikalischen Verankerung über die Wärmebilanz des Menschen und zum anderen in der guten Verständlichkeit in der Bevölkerung, sodass dieser Index gut für eine transparente Aufklärung und mögliche Anpassungsmaßnahmen während auftretender Hitzeereignissen geeignet ist.

Die PET wurde im Zuge des Energiebilanzmodells MEMI (Münchener Energiebilanz-Modell für Individuen) von Höppe (1984) auf Basis der Energiebilanzgleichung des Menschen entwickelt und ähnelt der Äquivalenttemperatur ET* von Gagge (1980). Die dem Modell zugrunde gelegte Gleichung lautet wie folgt (Höppe 1993):

$M + W + R_n + Q_H + Q_L + Q_{Sw} + Q_{Re} = 0$ (W) mit:

- M: Metabolische Rate = Gesamtenergieumsatz des Menschen
- W: Energieumsatz infolge mechanischer Leistung
- R_n: Strahlungsbilanz
- Q_H: Fluss fühlbarer Wärme
- Q_L: Fluss latenter Wärme durch Wasserdampfdiffusion
- Q_{Sw}: Fluss latenter Wärme durch Verdunstung von Schweiß
- Q_{Re}: Energieumsatz infolge von Erwärmung und Wasserdampfsättigung der Atemluft

Die PET ist auf Basis einer standardisierten Person, die sich im Freien aufhält und nachfolgende Kriterien erfüllt, als „diejenige Temperatur, bei der im typischen Innenraum die Energiebilanz eines Menschen bei gleichen Werten der Haut- und Kerntemperatur ausgeglichen ist", definiert (Höppe 1999). Es findet eine Adaption der real wahrgenommenen Bedingungen der Außenwelt in den Innenraum statt und ermöglicht es dem Menschen, den thermischen Zustand außerhalb mit seinen Erfahrungen im Innenraum in Relation zu setzen (Mayer 1993). Die PET ist auch Bestandteil der VDI-Richtlinie 3787 (Verein deutscher Ingenieure) (VDI 1998). Die Standardperson (Klima-Michel) für den die PET-Berechnung aufgestellt wurde, erfüllt dabei folgende Voraussetzungen (Jendritzky et al. 1990, Matzarakis & Mayer 1997):

- Geschlecht: männlich
- Alter: 35 Jahre
- Gewicht: 75 kg
- Größe: 1,75 m
- Körperoberfläche: 1,9 m²
- metabolische Rate: 80 W (leichte Tätigkeit, sitzend)
- Kleidungsfaktor: 0,9 clo

Die Adaption für den Innenraum erfolgt unter folgenden meteorologischen Gegebenheiten (Mayer & Höppe 1987):

- Windgeschwindigkeit: 0,1 m/s
- Wasserdampfdruck: 12 hPa
- Annahme, dass mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt} der Lufttemperatur T_a entspricht ($T_{mrt} = T_a$)

Unter diesen Voraussetzungen empfindet eine sich in der freien Umgebung aufhaltende Person bei 20°C optimale Behaglichkeit. Tabelle 3 verdeutlicht die sechs PET-Klassen in aufsteigender Reihenfolge von Kältestress über Behaglichkeit bis zu den Stufen des Hitzestresses (Matzarakis & Amelung 2008). Die Klassifizierung orientiert sich an der Klasseneinteilung des Predicted Mean Vote (PMV, dt: mittlerer vorhergesagter Wert über Behaglichkeit eines vorhandenen Kollektivs an Personen) (Müller et al. 1999) von Fanger (1972).

Tabelle 3: Einteilung der PET-Klassen, verändert nach Matzarakis und Mayer (1996)

PET-Intervall (°C)	Klasse	Thermisches Empfinden	Grad des physiologischen Stress‘
0 - 18	1	Leicht kühl und kälter	Kältestress
> 18 - 23	2	Behaglich	kein thermischer Stress
> 23 - 29	3	Leicht Warm	leichter Hitzestress
> 29 - 35	4	Warm	moderater Hitzestress
> 35 - 41	5	Heiß	starker Hitzestress
> 41	6	Sehr heiß	extremer Hitzestress

PET-Karte

Im Sommer 2009 wurden in Dresden im Rahmen des Meteorologischen Vertiefungspraktikums der Technischen Universität Dresden (TUD) Messungen zum Zweck des Nachweises stadtklimatologischer Effekte (erhöhte Lufttemperatur, geringere Luftfeuchtigkeit, etc.) durchgeführt. Hierfür wurden standardisierte meteorologische Messungen u.a. von Lufttemperatur, -feuchte, Wind etc. in den Parkanlagen des Großen Gartens und des Zwingerparks durchgeführt. Begleitet wurden diese Messungen von mobilen Messungen durch typische städtische Strukturen (u.a. Altstadt, Neustadt, Südvorstadt, Johannstadt und Friedrichstadt). Diese stellen die städtische Modifikation des Klimas gegenüber den Referenzdaten der Grünanlagen dar. Entlang der Fahrradmessroute wurden 102 äquidistante Messpunkte definiert, denen jeweils der Strukturtyp des Untergrundes und die Lufttemperatur der Messfahrt zugewiesen wurden.

Unter modellhaft angenommenen gleichen meteorologischen Bedingungen (Lufttemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeit, Feuchte etc.) konnte unter Verwendung des Mikroklimamodells *RayMan* sowohl die PET als auch die Oberflächentemperatur T_{LST} für die beiden Zeitschnitte 14 und 22 Uhr an verschiedenen Punkten ermittelt werden. Mittels Regressionsanalyse wurden unter Überprüfung der Modellgüte statische Zusammenhänge zwischen der Oberflächentemperatur T_{LST} und der berechneten PET nachgewiesen, sodass mittels linearer Regression von T_{LST} auf PET geschlossen werden konnte.

Dieser Zusammenhang wurde auf die von LANDSAT-7 abgetasteten Oberflächentemperaturen über Dresden angewandt und kann wie folgt zusammengefasst werden:

$$PET_{Tag} = 17.077 + 0.465 * T_{LST_Tag}$$

Abbildung 1 stellt die Verteilung der mittleren PET in Dresden an einem heißen Tag entsprechend der horizontalen Auflösung von 60 x 60 m der Landsat-7 Daten dar.

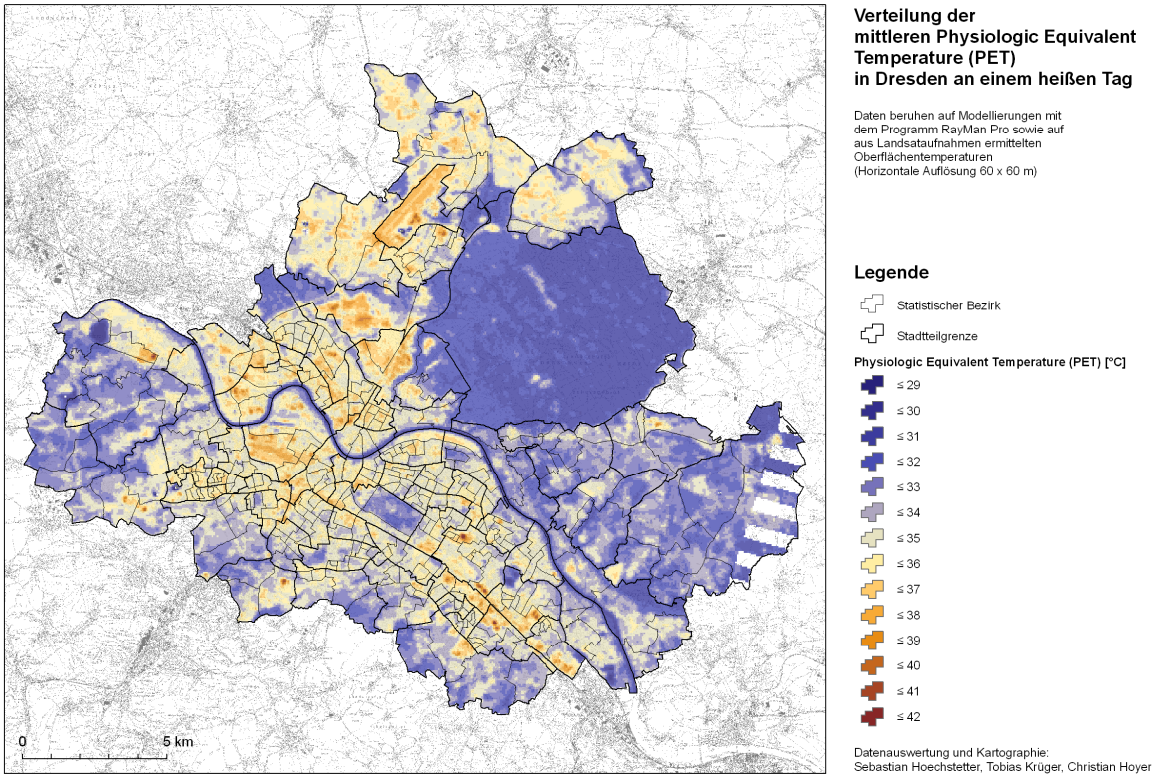


Abbildung 2: Verteilung der mittleren PET (rasterbasiert) in Dresden an einem heißen Tag

Deutlich gehen Oberflächen, die nach Anwendung obiger Gleichung eine direkte kühlende Wirkung auf die angrenzenden Luftschichten haben, und blau markiert sind aus Abbildung 2 hervor. Hierzu zählt vornehmlich die Dresdner Heide, die aufgrund ihrer vegetationsbestandenen Oberfläche deutlich kühler als anthropogene Oberflächen erscheint. Auch der Große Garten, das Elbtal und die umliegenden land- und forstwirtschaftlichen Flächen gehen als relativ kühle Flächen hervor.

Der dicht bebaute und stark versiegelte Stadtkern begünstigt infolge fehlender Vegetation und hoher Oberflächentemperaturen PET-Werte im Bereich thermischer Belastung. PET von über 35°C werden als heiß empfunden und gehen mit starkem Hitzestress einher (Tabelle 3). Diese Aussage gilt für alle stark anthropogen überprägten Flächen des Innenstadtbereichs, den Flughafen Klotzsche im Norden Dresdens und vereinzelte Flächen in den Siedlungsgebieten Prohlis, Gorbitz und Friedrichstadt.

Generell ist von einer hohen räumlichen Variabilität der PET auszugehen (Matzarakis et al. 1999). Der größte Einfluss wird hierbei über die mittlere Strahlungstemperatur T_{mrt}

ausgeübt. Die Ausprägung dieser Temperatur infolge von Strahlungsabsorption hängt wiederum von der vegetativen bzw. baulichen Ausstattung der Bestrahlungsfläche ab.

2.2 Demographiefaktor

Für die Bewertung der Sensitivität von Siedlungsbereichen sind detaillierte Informationen über die Struktur und die Verteilung der Bevölkerung notwendig. Die Statistikstelle der Landeshauptstadt Dresden hält zu diesem Zweck demographische Daten bereit. Die Daten haben einen älteren Aktualitätsstand, was jedoch deren Eignung zur Methodenentwicklung nicht beeinflusst.

Es liegen folgende Daten vor:

- Einwohnerzahlen der statistischen Bezirke, gegliedert nach Alterskohorten, Stand: 2007
- Einwohnerzahlen (Hauptwohner) der Nettoblöcke, Stand: 2007

Unter Nettoblock wird die Fläche der Baublöcke, die an allen Kanten durch Verkehrswege begrenzt werden, verstanden. Die Straßen- und Verkehrsflächen selbst sind nicht Bestandteil der Nettoblöcke.

Kleinräumige kohortenspezifischer Bevölkerungskennzahlen

Eine grobe Struktur der Bevölkerungsverteilung lässt sich aus Tabelle 4 ablesen. Hier sind stadtteilbezogene Einwohnerzahlen (Hauptwohner) Dresdens mit Ausweisung der Anteile der älteren Bewohner (mind. 75 Jahre) und der Kleinkinder (bis 2 Jahre) aufgeführt. Trotz der gröberen räumlichen Differenzierung wird aus der Tabelle 4 ersichtlich, dass die Anteile der besonders sensitiven Bevölkerungsteile (Ältere und Kleinkinder) in bestimmten Stadtteilen unterschiedlich ausfallen.

Wie der Tabelle 4 zu entnehmen ist, leben in allen Ortschaften bzw. Ortsamtsbereichen mit Ausnahme von der Neustadt und Altfranken, durchweg mehr Menschen, die älter als 75 Jahre alt sind als Kinder mit einem Alter unter 2 Jahren. Dies spiegelt sehr deutlich die demographische Situation der älter werdenden Bevölkerung in Deutschland wieder.

Tabelle 4: Einwohnerzahlen der Ortsamtsbereiche und Ortschaften in Dresden, Stand: 2007 (Quelle: Statistikstelle LHD)

Ortsamtsbereiche bzw. Ortschaften	Fläche [km²]	Hauptwohner gesamt	Ältere (Hauptwohner Ü75)		Kleinkinder (Hauptwohner U 2)	
			Absolut	Anteil %	Absolut	Anteil %
Blasewitz	14.5	80389	7217	9,0	4811	6,0
Altstadt	17.0	50337	8033	16,0	1753	3,5
Neustadt	14.8	41199	1852	4,5	2964	7,2
Pieschen	16.2	47596	3664	7,7	3230	6,8
Loschwitz	68.8	19148	1964	10,3	1187	6,2
Cotta	19.4	66038	4551	6,9	3537	5,4

Ortsamtsbereiche bzw. Ortschaften	Fläche [km²]	Hauptwohner gesamt	Ältere (Hauptwohner Ü75)		Kleinkinder (Hauptwohner U 2)	
Leuben	13.1	37711	3573	9,5	1979	5,2
Prohlis	21.1	54732	4829	8,8	2686	4,9
Klotzsche	27.1	19915	1759	8,8	1165	5,8
Plauen	15.8	50809	4396	8,7	2341	4,6
Langebrück	7.0	3700	337	9,1	231	6,2
Weixdorf	15.6	5909	442	7,5	297	5,0
Schönborn	5.2	478	26	5,4	24	5,0
Schönfeld-Weißig	41.2	12653	917	7,2	678	5,4
Cossebaude	8.1	5331	497	9,3	244	4,6
Oberwartha	2.0	351	19	5,4	16	4,6
Gompitz	11.7	3042	177	5,8	141	4,6
Altfranken	1.3	1107	33	3,0	43	3,9
Mobschatz	8.5	1470	100	6,8	81	5,5
Dresden gesamt	**328.5**	**501915**	**44386**		**27408**	

Eine räumliche Darstellung über die Lage der Ortsämter, Ortschaften und Stadtteile in Dresden gibt Abbildung 3.

Abbildung 3: Übersicht der Ortsamtsbereiche, Ortschaften und Stadtteile in Dresden

Unter der Annahme, dass die Bevölkerungsstruktur innerhalb der statistischen Bezirke annähernd homogen verteilt ist, lassen sich die kohortenspezifischen Bevölkerungszahlen über die Hauptwohnerzahlen der Nettoblöcke räumlich disaggregieren, sodass kleinräumige Aussagen sowohl über die Verteilung Gesamtbevölkerung als auch der sensitiven Bevölkerungsgruppen getroffen werden können.

Die räumliche Disaggregation wird durch folgende Gleichung realisiert:

$$Hauptwohner_{Nettoblock;Kohorte} = Hauptwohner_{Nettoblock;gesamt} \frac{Hauptwohner_{StatBezirk;Kohorte}}{Hauptwohner_{StatBezirk;gesamt}}$$

Als Ergebnis steht zur weiteren Verarbeitung ein Datensatz mit den geschätzten Einwohnerzahlen (Hauptwohner) der Gesamtbevölkerung (*EinwGesamt)*, der Bevölkerung älter als 75 Jahren (*EinwÜ75*) und der Kleinkinder (*EinwU2*) pro Nettoblock zur Verfügung.

Der bevölkerungsabhängige blockbezogene Demographiefaktor W_{Bev} für die Berechnung des Betroffenheitsindex wird als Verhältnis zwischen der Bevölkerungsdichte des Blocks zum Wert des Blocks mit der höchsten Bevölkerungsdichte innerhalb der Landeshauptstadt Dresden ausgedrückt:

$$W_{Bev} = \frac{EinwohnerdichteNettoblock}{EinwohnerdichteNettoblock_{MaximalwertStadt}}$$

Die W_{Bev} für einen Nettoblock nehmen – je nach betrachteter Kohorte ($W_{BevGesamt}$, $W_{BevÜ75}$, E_{BevU2}) – unterschiedliche Werte im Bereich zwischen 0 und 1 an.

Kartendarstellungen

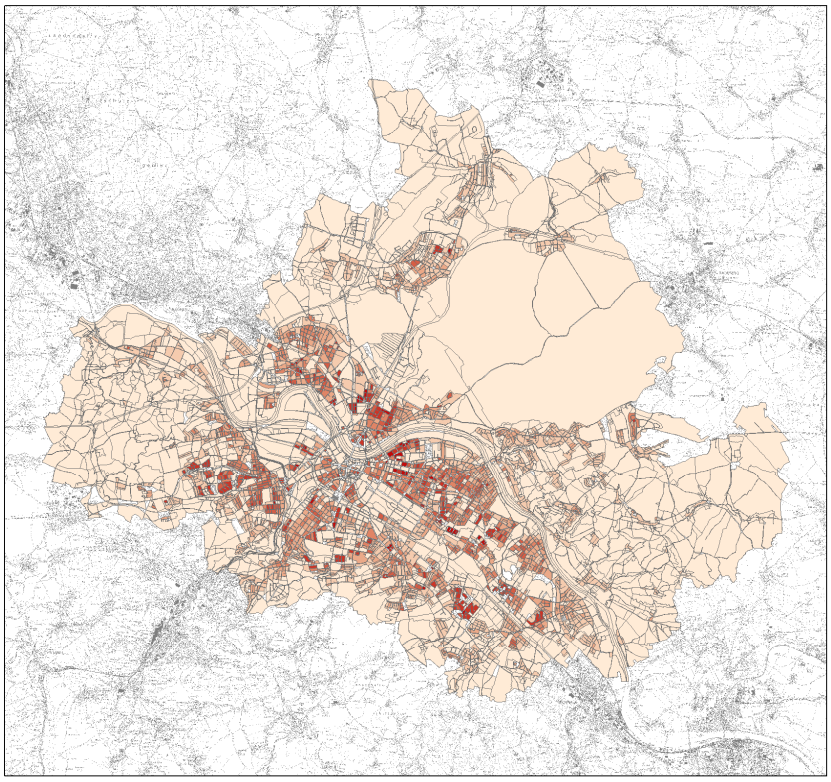
Dresden, flächenmäßig Deutschlands viertgrößte Stadt mit rund 328 km² (Stadt Dresden 2012), vereint in sich viele Stadtstrukturtypen unterschiedlicher räumlicher Ausdehnung, sodass die Darstellungen für die Gesamtfläche Dresdens nur schwer genaue Ergebnisse im Skalenbereich der Nettoblöcke erkennen lassen. Deshalb erfolgt die Visualisierung der Ergebnisse neben einem Überblick über die Gesamtstadt in einem Detailausschnitt des Stadtzentrums.

In diesem Bereich ist von einer hohen Aufenthaltswahrscheinlichkeit aller Bevölkerungsgruppen auszugehen. Das Stadtzentrum ist nicht nur für die dort ansässige Bevölkerung, sondern auch für den Tourismus von Bedeutung, wenngleich Besucherzahlen derzeit nicht in die Sensitivitätsbewertung eingehen.

Dargestellt sind in den Detailausschnitten innerhalb Dresdens lediglich die Flächen, die für den Menschen aus bioklimatischer Sicht relevant sind (s. Tabelle 7).

Gesamtbevölkerung

Die gewonnen Daten lassen sich durch ihren räumlichen Bezug zu den Nettoblöcken kartographisch als Flächenkartogramme darstellen. Darin zeichnen sich die dichtbesiedelten Bereiche der innerstädtischen Gebiete in Dresden deutlich ab (Abbildung 4). Diese konzentrieren sich großflächig v.a. südlich der Elbe im Elbtal.



Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte in Dresden (Hauptwohner)

Datengrundlagen:
Bevölkerungsstatistik Landeshauptstadt Dresden
Stand: 2006

Legende

Hauptwohner/km²

- > 36000
- < 36000
- < 24000
- < 18000
- < 12000
- < 6000
- < 2000

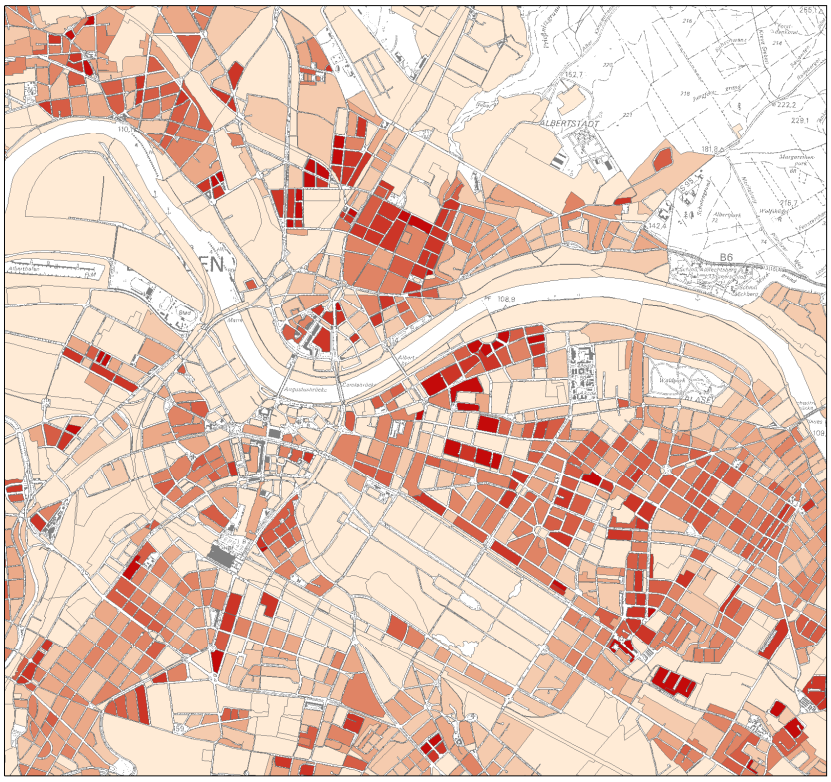
0 5 km

Datenauswertung und Kartographie:
Tobias Krüger, Franz Held

Abbildung 4: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der Gesamtbevölkerung in Dresden

Der rechtselbisch (nördlich) gelegene Teil Dresdens wird zum großen Teil durch das Waldgebiet der Dresdner Heide eingenommen, sodass sich hier die dichte Besiedlung auf die elbnahen Stadtteile (Wachwitz, Loschwitz, Radeberger Vorstadt, Antonstadt, Leipziger Vorstadt, Pieschen und Trachenberge) und Dresden-Klotzsche konzentriert. An den Stadträndern sind die dörflich geprägten Ortschaften zu erkennen.

Abbildung 5 visualisiert einen detaillierten Kartenausschnitt für das Dresdner Stadtzentrum und umfasst neben der Inneren Altstadt und Inneren Neustadt v. a. Teile der Johannstadt.



Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte in Dresden (Hauptwohner)

Datengrundlagen:
Bevölkerungsstatistik Landeshauptstadt Dresden
Stand: 2006

Legende

Hauptwohner/km²

- > 36000
- < 36000
- < 24000
- < 18000
- < 12000
- < 6000
- < 2000

0 2 km

Datenauswertung und Kartographie:
Tobias Krüger, Franz Held

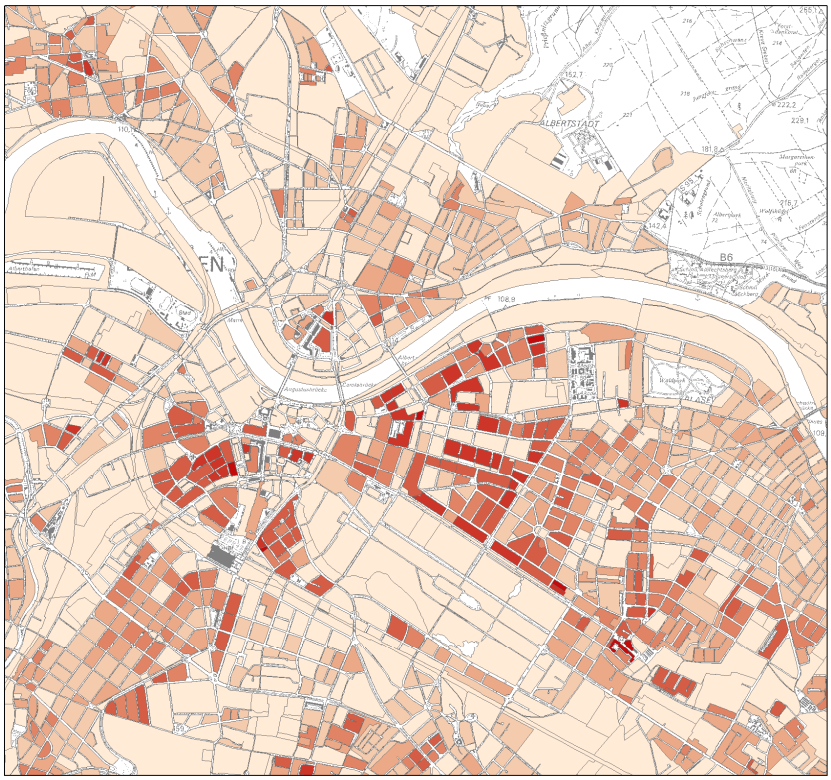
Abbildung 5: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der Gesamtbevölkerung im Zentrum Dresdens

Der Detailausschnitt lässt deutlich die Neustadt und Teile der Johannstadt als dichtbesiedelte Gebiete hervortreten. Die Altstadt erscheint weniger dicht besiedelt, da hier großflächige Infrastruktur vorhanden ist. Durch die detaillierte Betrachtungsweise und die hohe räumliche Auflösung lassen sich vereinzelt Nettoblöcke mit hoher Wohndichte in weniger dicht besiedelten Stadtteilen identifizieren und dementsprechende Anpassungsmaßnahmen entwickeln (Beispiel Gruna, südöstlich im Kartenausschnitt).

Ältere Bevölkerung (Ü75)

Durch die starke Abhängigkeit der sensitiven Kohorten zur Gesamtbevölkerung in Dichte und räumlicher Verteilung ergibt sich für Bevölkerungsdichte der älteren Bevölkerung in Abbildung 6 ein ähnliches Muster wie in Abbildung 5, jedoch treten kleinere Areale, die einen hohen Altenanteil aufweisen, deutlicher hervor. Insbesondere sind hier die innerstädtische Plattenbaugebiete der Altstadt und Johannstadt zu nennen. In der Überblickskarte über Dresden in Abbildung 17 (Anhang) treten zudem hohe Bevölkerungsdichten älterer Menschen in den Stadtgebieten Prohlis, Gorbitz und Leuben auf. Auch in diesen Stadtteilen überwiegen die Plattenbausiedlungen.

Der nördlich der Elbe gelegene Bereich (Neustadt, Pieschen) hat einen vergleichsweise geringen Anteil an älterer Bevölkerung.



Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte in Dresden (Hauptwohner älter als 75 Jahre)

Datengrundlagen:
Bevölkerungsstatistik Landeshauptstadt Dresden
Stand: 2006

Legende

Einwohnerdichte [Ew./km²]

Ältere (Ü75)

- > 7600
- < 7600
- < 4100
- < 2600
- < 1500
- < 800
- < 270

0 2 km

Datenauswertung und Kartographie:
Tobias Krüger, Franz Held

Abbildung 6: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der älteren Bevölkerung (Ü75) im Zentrum Dresdens

Kleinkinder (U2)

Bei der räumlichen Verteilung der Kleinkinder (jünger als 2 Jahre) in Abbildung 7 fallen deutlich die geringeren Siedlungsdichten und die damit einhergehende stärkere Konzentration im Vergleich zur älteren Bevölkerung in Abbildung 6 auf. Hohe Dichten von Kleinkindern sind vor allen in den Stadtteilen Pieschen, Neustadt und Striesen vorzufinden.

Offenbar kann von einer Umkehr der Dichteverteilung im Vergleich zur älteren Bevölkerung gesprochen werden. Die Stadtteile Johannstadt und Altstadt, die wie oben beschrieben von hohen Bevölkerungsdichten älterer Menschen gekennzeichnet sind, weisen indes nur geringe Wohndichten kleiner Kinder (mit Ausnahme von Johannstadt-Nord) auf.

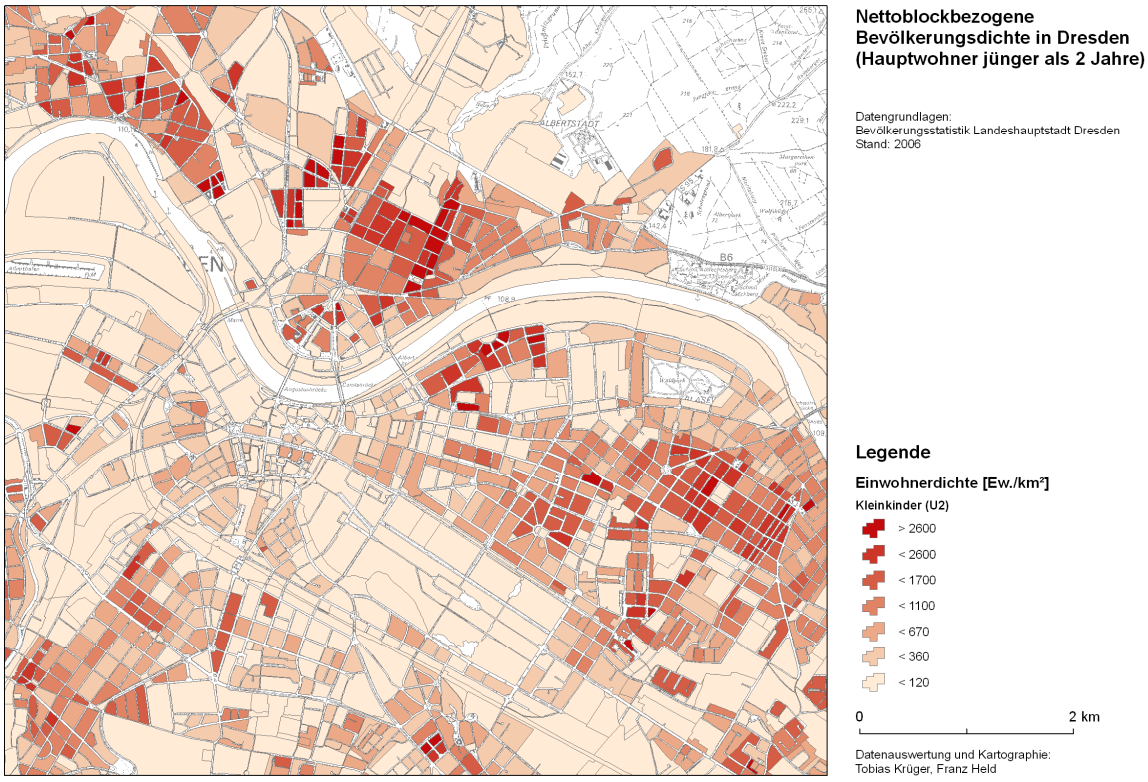


Abbildung 7: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der Kleinkinder (U2) im Zentrum Dresdens

Diese Aussage wird auch durch die Überblickskarte (Abbildung 18) unterstützt. Jedoch wird auch ersichtlich, dass viele Plattenbaugebiete hohe Einwohnerdichten sowohl bzgl. Älterer als auch bzgl. Kleinkinder aufweisen.

2.3 Strukturtypenfaktor

Der zweite Gewichtungsfaktor bezieht sich direkt auf das Erwärmungspotenzial der Stadtstrukturtypen im Zusammenhang mit deren bioklimatischen Relevanz. Insbesondere Gebäude, die eine Vervielfachung der horizontalen bebauten Fläche darstellen, üben enormen Einfluss auf die bioklimatische Situation der betrachteten Fläche aus. Durch die erweiterten versiegelten anthropogenen und meist nicht verschatteten und unbegrünten Flächen kann ein Vielfaches an Sonnenstrahlung gegenüber einer einfachen horizontalen Fläche absorbiert und nachts als Wärme wieder emittiert werden.

Einfluss der städtischen Siedlungsstrukturen auf die Oberflächentemperatur

Oberflächen der bebauten Umwelt, wie sie im urbanen Bereich konzentriert auftreten, heizen sich im Vergleich zu vegetationsbestandenen Flächen stärker auf. Anthropogene Oberflächen weisen geringere Reflektivitäten als natürliche Oberflächen vor, weshalb ersteren ein größeres Erwärmungspotential innewohnt (Helbig et al. 1999).

Eine weitere Ursache für die Erwärmung nichtnatürlicher Flächen ist neben dem offensichtlichen Fehlen von Vegetation auf die Wärmeeigenschaften der häufig verwendeten Baumaterialien zurückzuführen (Tabelle 5). Während natürliche, vegetative Flächen eine große Isolationsschicht aus Luft im Vegetationskörper vorweisen können, sind künstliche Baumaterialien wie Beton oder Stahl viel dichter und können durch Kombination mit der guten spezifischen Wärmeleitfähigkeit die absorbierte und in Wärmeenergie umgewandelte Solarstrahlung schnell in tiefere Schichten leiten. Nachts wird diese Wärmeenergie durch die guten Leitungseigenschaften wieder an die Oberfläche transportiert und an die Umgebungsluft abgegeben, die sich demzufolge stärker erwärmt als es über einer natürlichen, vegetationsbestandenen Oberfläche der Fall ist.

Tabelle 5: Thermische Eigenschaften von Materialien (verändert, nach Helbig et al. 1999, Kuttler 2004)

Strukturtyp	Dichte ρ ($kg*m^{-3}\ 10^3$)	Spezifische Wärmekapazität ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}\ 10^3$)	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	Temperaturleitfähigkeitskoeffizient ($m^2 s^{-1}\ 10^{-6}$)
Asphalt	2,11	0,92	0,75	0,38
Gasbeton	0,32	0,88	0,28	0,29
Schwerbeton	2,40	0,88	1,51	0,72
Ziegel	1,83	-	0,83	0,61
Holz	0,32	1,42	0,09	0,2
Stahl	7,85	0,50	53,3	13,6
Glas	2,48	0,67	0,74	0,44
Wasser	1,0	4,18	0,57	0,14
Stadt	2,2 - 2,5	-	1,7 - 4,6	0,74 - 20,0
Umland	2,2 - 2,4	-	0,21 - 2,1	0,30 - 0,80

Flugzeug- und satellitengestützte Thermalsensorsysteme registrieren von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung, mit deren Hilfe sich Oberflächentemperaturen bestimmen lassen. Diese kann damit über größere Gebietskulissen (je nach Auflösung des Sensors) aufgezeichnet werden und bietet damit die Möglichkeit einer flächendeckenden thermischen Beschreibung eines Untersuchungsgebiets. Aus diesem Grund werden Thermalsensordaten seit langem genutzt, um Verteilungsmuster von urbanen Hitzeinseln zu beschreiben.

Vegetationsbestandene Flächen erscheinen hingegen deutlich kühler, was zum einen auf die Abschattungswirkung der Vegetation an sich und auf die Transpirationskühle der Photosynthese zurückzuführen ist. Darüber hinaus weisen vegetative Flächen nur einen geringen Versiegelungs- und Bebauungsgrad auf, setzen somit das Aufwärmungspotential deutlich herab und stellen somit einen konkreten Gegensatz zu den massiven Wärmespeichern der bebauten Umwelt dar.

Über Modellierung mit dem Bioklimamodell RayMan konnte die Relevanz von Oberflächentemperaturen auch für das thermische Empfinden des Menschen nachgewiesen werden (Matzarakis et al. 2007, Matzarakis & Rutz 2008). Kühlere Oberflächen tragen demnach signifikant zu einer Erhöhung des thermischen Komforts bei.

Das Sensitivitätsmodell zur Bewertung von Siedlungsräumen sieht eine strukturtypenbasierte Gewichtung von innerstädtischen Teilräumen hinsichtlich der potenziellen thermischen Belastung vor. Neben der Wirkung des Strukturtyps auf die Wärmeverteilung im Siedlungsraum soll der Relevanz des SST hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit der Betroffenheit der Bevölkerung bei dieser Wichtung Rechnung getragen werden.

Strukturtypenspezifische statistische Auswertung der Oberflächentemperatur

Zunächst wurden die verfügbaren Datensätze der Oberflächentemperatur, die jeweils an heißen Tagen (T_{max} > 30 °C) aufgezeichnet wurden, gemittelt (s. Produktbericht 3.1.2a). Der resultierende Datensatz kann als zu erwartendes Wärmeverteilungsmuster aufgefasst werden und dient im Folgenden als Referenz für die Auswertung auf stadtstruktureller Ebene.

Da die Thermaldaten sensorbedingt (Landsat) im 60-m-Raster vorliegen, ist zunächst die Stadtstrukturkartierung von 2006 unter Verwendung des Flächendominanzprinzips gerastert worden, so dass jedem Pixel ein Stadtstrukturtyp zugewiesen werden kann.

Die Fläche der Landeshauptstadt Dresden wird durch ca. 90.000 Punkte, die mit 60 m Abstand im quadratischen Gitter angeordnet sind, beschrieben. Für jeden der Punkte (bzw. für jede Quadratgitterzelle) wurde zunächst der mittlere Wert der Oberflächentemperatur abgegriffen, wobei Bereiche, für die von Thermaldaten nicht abgedeckt waren, eliminiert wurden (s. Produktbericht 3.1.2a, Karte 1).

Für eine strukturbasierte Bewertung der Hitzebelastung bzw. Hitzesensitivität von Siedlungsbereichen sind zunächst die Erwärmungspotenziale der verschiedenen Stadtstrukturtypen zu ermitteln.

Dazu wird, ausgehend von der Stadtstrukturtypenkartierung von 2006, die zeitlich mit den verfügbaren thermalen Satellitendaten korrespondiert, eine statistische Analyse der mittleren Oberflächentemperatur, gruppiert nach den einzelnen Stadtstrukturtypen, durchgeführt (Tabelle 6).

Tabelle 6: SPSS - Statistik der Oberflächentemperatur an heißen Tagen bzgl. Stadtstrukturtypen

Strukturtyp	N	Mittelwert	Std.abw.	Standard-fehler	95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert		Minimum	Maximum
					Unter-grenze	Ober-grenze		
1. Geschlossene Blockbebauung	423	312.67	1.29	0.06	312.55	312.79	308.74	315.73
2. Offene Blockbebauung	3415	310.71	1.91	0.03	310.64	310.77	299.56	319.03
3. Zeilen-/Reihenhausbebauung	4363	311.09	1.57	0.02	311.04	311.13	303.25	320.10
4. Einzel-/Doppelhausbebauung	7216	309.22	2.25	0.03	309.17	309.27	301.36	317.29
5. Mischformen	5917	310.31	2.55	0.03	310.25	310.38	299.25	318.88
6. Großflächige Bebauung	7220	312.79	3.14	0.04	312.72	312.86	297.56	326.47
7. Sport-/Freizeitanlagen	666	310.41	2.53	0.10	310.22	310.61	300.94	316.27
8. Kleingärten	2607	310.42	2.09	0.04	310.34	310.50	303.32	320.32
9. Gleisanlagen	1085	311.94	4.22	0.13	311.69	312.19	300.68	320.60
A. Acker	22284	308.05	2.96	0.02	308.01	308.09	298.30	318.67
B. Grünland/Gärtnereien	7719	309.34	3.04	0.03	309.27	309.41	298.74	322.84
C. Parkanlagen/Zoos	964	308.06	2.60	0.08	307.90	308.23	301.56	314.87
D. Friedhof	590	308.02	2.48	0.10	307.82	308.22	303.92	315.23

Strukturtyp	N	Mittelwert	Std.abw.	Standard-fehler	95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert		Minimum	Maximum
E. Wald	20963	304.19	2.85	0.02	304.15	304.23	299.20	321.00
F. Wasser	1685	303.83	3.78	0.09	303.65	304.01	297.49	316.23
G. Abgrabungen/Aufschüttungen	469	310.11	3.47	0.16	309.80	310.43	299.40	318.39
H. Baustellen	24	310.82	1.91	0.39	310.01	311.63	306.93	313.32
I. Verkehrsflächen/Garagen	539	311.33	2.65	0.11	311.10	311.55	300.10	318.17
K. Brachflächen	172	311.18	1.69	0.13	310.93	311.43	304.46	317.54
L. Blockrestflächen	1811	311.38	2.33	0.05	311.27	311.49	299.83	319.00
Gesamt	90132	308.31	3.92	0.01	308.29	308.34	297.49	326.47

Die Strukturtypen, die sich durch eine besonders ausgeprägte (Wohn-)Bebauung kennzeichnen und deshalb für die Bewertung der Hitzebelastung der städtischen Bevölkerung von besonderem Interesse sind, weisen eine relativ geringe Standardabweichung auf.

Das Mittelwertdiagramm zeigt eine deutlich sichtbare Differenzierung der 20 Strukturtypen (Abbildung 8). Deutlich wird, dass mit abnehmender Bebauungsdichte in Siedlungsstrukturen (SST 1-5) tendenziell mit einer geringeren Erwärmung zu rechnen ist. Alle anthropogen beeinflussten Strukturtypen weisen gegenüber Wald (Typ E) und Wasser (Typ F) eine deutliche Erwärmung auf. Ackerflächen und in die Siedlungstätigkeit einbezogene Flächen mit hohem Vegetationsanteil wie Grünanlagen, Zoos und Friedhöfe erwärmen sich weniger stark.

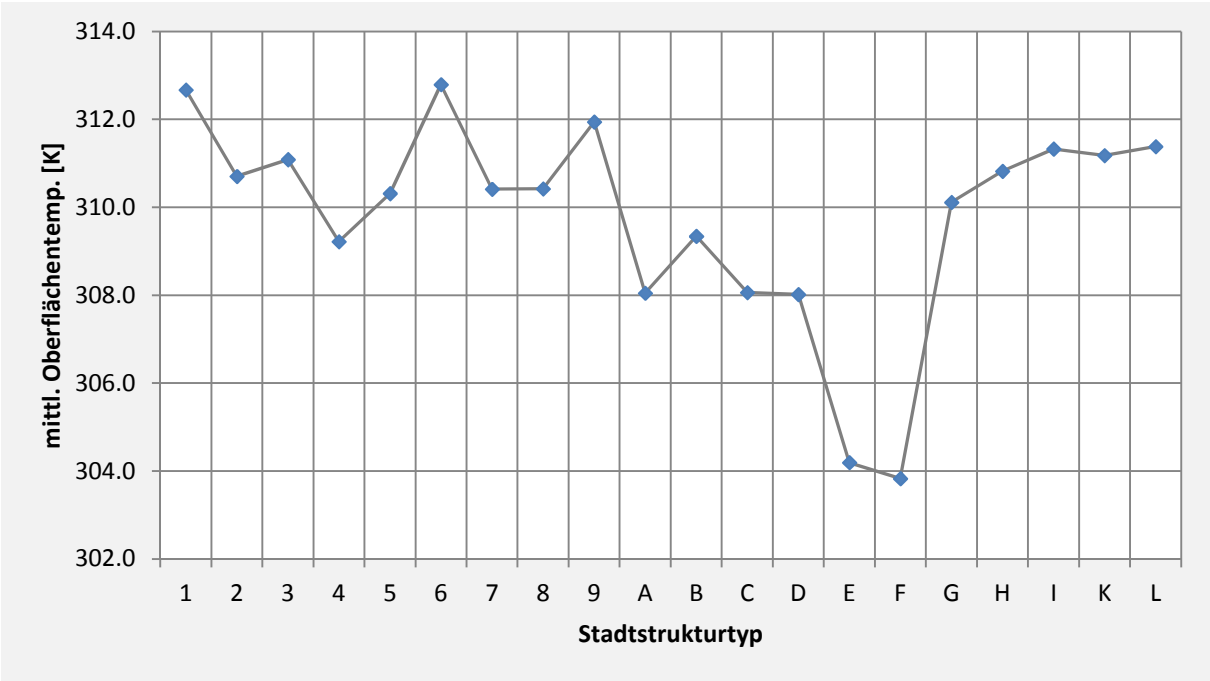


Abbildung 8: Mittelwertdiagramm zur Oberflächentemperatur an heißen Tagen bzgl. Stadtstrukturtypen

Wichtungsfaktoren der Stadtstrukturtypen

Die Formel zur Berechnung der Hitzesensitivität von Siedlungsbereichen bietet die Möglichkeit, die potenzielle Hitzebelastung abhängig von deren Strukturtyp zu gewichten. Ausgehend von den im vorigen Abschnitt dargestellten Erwärmungspotenzialen werden nachfolgend Wichtungsfaktoren dargestellt, die zum einen auf der Analyse der Oberflä-

chentemperaturen beruhen und zum anderen eine Zuordnung der Relevanz bzgl. seiner Bedeutung für die Rezeptoren, d.h. für die Bevölkerung, für jeden Strukturtyp vorsieht.

Das Erwärmungspotenzial der einzelnen Strukturtypen wird im Wesentlichen durch die Temperaturdifferenz zum Strukturtyp Wald bestimmt, dessen Oberflächentemperatur aufgrund des hohen Grünvolumens und der damit verbundenen hohen Verdunstungsrate als Referenz für die größtmögliche Abkühlung dienen soll. Lediglich Wasserflächen können aufgrund der hohen Wasserverfügbarkeit eine höhere Verdunstung aufweisen. Jedoch wird sie hier nicht als Referenz herangezogen, da die Wasserflächen einerseits nur in geringer Zahl in die Statistik eingehen und diese andererseits nur geringfügig vom Mittel der Oberflächentemperatur des Waldes abweichen.

Zunächst werden die 20 Strukturtypen anhand ähnlicher Temperaturmittelwerte gruppiert und in Typklassen eingeteilt. Funktionale Eigenschaften können dabei auch dazu führen, dass Typen in unterschiedliche Klassen aufgenommen werden, obwohl die Temperaturwerte korrespondieren (Tabelle 7).

Tabelle 7: Zuweisung von Stadtstrukturtypen zu Typklassen mit bioklimatischer Relevanz

Struktur-typ	Beschreibung	Klasse	Beschreibung	Bioklimat. Relevanz
1	Geschlossene Blockbebauung,	a	Siedlungsbebauung mit hoher Dichte	4
2	Offene Blockbebauung	b	Siedlungsbebauung mit mittlerer Dichte und Mischformen	
3	Zeilen-/Reihenhausbebauung			
5	Mischformen			
4	Einzel-/Doppelhausbebauung	c	Siedlungsbebauung geringerer Dichte	
6	Großflächige Bebauung (Industrie-/Gewerbegebiete)	d	Industrielle Nutzung und Eisenbahnflächen	3
9	Gleisanlagen			
7	Sport-/Freizeitanlagen,	e	Freizeit- und Erholungsflächen inkl. Brachflächen	
8	Kleingärten,			
K	Brachflächen			
B	Grünland/Gärtnereien,	f	Grünland und Grünstrukturen	
C	Parkanlagen/Zoos,			
D	Friedhöfe			
E	Wald	g	Wald	2
F	Wasserflächen	h	Wasser	
I	Verkehrsflächen/Garagen,	i	Straßenverkehr und Restflächen	3
L	Blockrestflächen			
G	Abgrabungen/Aufschüttungen	j	Baustellen sowie Abbau- und Ablagerungsflächen	2
H	Baustellen			
A	Acker	k	Ackerflächen	1

Die Relevanz zur bioklimatischen Bewertung wird auf einer vierstufigen Skala festgelegt, wobei der Siedlungsbebauung der Höchstwert 4 zugewiesen wird. Eine hohe Relevanz von 3 haben auch Strukturtypen, wo sich Menschen tagsüber häufig bzw. langfristig auf-

halten, die jedoch üblicherweise nicht Wohnzwecken dienen. Wälder und Wasserflächen wird eine Relevanz von 2 zugewiesen. Ackerflächen erhalten die geringste bioklimatische Relevanz, da davon ausgegangen wird, dass sich nur selten Personen hier aufhalten.

Statistische Auswertung der Oberflächentemperatur in den SST-Klassen

Die Typklassen der Stadtstrukturtypen wurden einer statistischen Auswertung bzgl. ihrer Ausprägung der Oberflächentemperatur an einem heißen Tag unterzogen (Tabelle 8).

Für den Wald, den Stadtstrukturtyp mit dem größten Grünvolumen, wurde die geringste Oberflächentemperatur ermittelt. Er wurde daher als Referenzoberfläche bestmöglicher Abkühlungswirkung gewählt. Das Erwärmungspotenzial der anderen SST wird demnach durch die Differenz der Oberflächentemperatur zum Wald verstanden.

Der Stadtstrukturtyp Wasser besitzt eine ähnlich geringe Oberflächentemperatur wie Wald, nimmt jedoch in Dresden einen geringen Flächenanteil ein, weswegen dieser Strukturtyp nicht als Referenz für eine Bewertung der Temperaturunterschiede herangezogen wird.

Tabelle 8: Statistik der Oberflächentemperatur an heißen Tagen bzgl. Strukturtypklassen

Typklasse	N	Mittelwert	Std.abw.	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert		Minimum	Maximum
					Untergrenze	Obergrenze		
a Siedlungsbebauung mit hoher Dichte	423	312.67	1.29	0.06	312.55	312.79	308.74	315.73
b Siedlungsbebauung mit mittlerer Dichte und Mischformen	13695	310.66	2.15	0.02	310.62	310.69	299.25	320.10
c Siedlungsbebauung geringerer Dichte	7216	309.22	2.25	0.03	309.17	309.27	301.36	317.29
d Industrielle Nutzung und Eisenbahnflächen	8305	312.68	3.32	0.04	312.61	312.75	297.56	326.47
e Freizeit- und Erholungsflächen inkl. Brachflächen	3445	310.46	2.17	0.04	310.38	310.53	300.94	320.32
f Grünland und Grünstrukturen	9273	309.12	3.00	0.03	309.06	309.18	298.74	322.84
g Wald	20963	304.19	2.85	0.02	304.15	304.23	299.20	321.00
h Wasser	1685	303.83	3.78	0.09	303.65	304.01	297.49	316.23
i Straßenverkehr und Restflächen	2350	311.37	2.41	0.05	311.27	311.47	299.83	319.00
j Baustellen sowie Abbau- und Ablagerungsflächen	493	310.15	3.41	0.15	309.85	310.45	299.40	318.39
k Ackerflächen	22284	308.05	2.96	0.02	308.01	308.09	298.30	318.67
Gesamt	90132	308.31	3.92	0.01	308.29	308.34	297.49	326.47

Das Diagramm der Mittelwerte zeigt den erwarteten Verlauf mit sinkenden Oberflächentemperaturen für Strukturtypklassen mit steigendem Grünanteil (Abbildung 9).

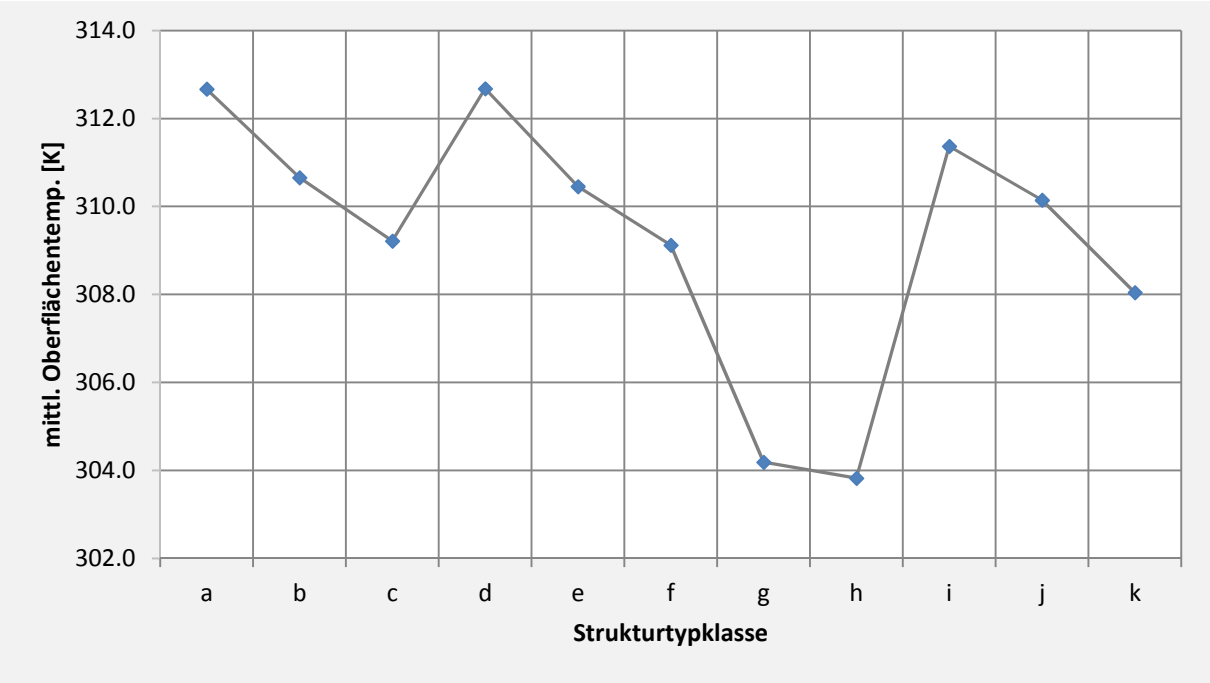


Abbildung 9: Mittelwertdiagramm zur Oberflächentemperatur an heißen Tagen gruppiert nach Strukturtypenklassen

Berechnung der Wichtungsfaktoren

Die Wichtungsfaktoren werden strukturtypabhängig unter Berücksichtigung der Erwärmungspotenziale und der bioklimatischen Relevanz bestimmt. Mit Erwärmungspotenzial wird hier die Differenz der spezifischen Differenz der Oberflächentemperatur einer Strukturtypklasse zur Klasse Wald bezeichnet. Der Referenzwert für Waldoberflächen ergibt sich aus Tabelle 8 mit $LST_{mean,Wald}$ = 304,19 K.

Das Erwärmungspotenzial einer Strukturtypklasse (SSTK) ΔLST_{SSTK} errechnet sich aus der Differenz des Temperaturmittels $LST_{mean;SSTK}$ zum Wald:

$$\Delta LST_{SSTK} = LST_{mean;SSTK} - LST_{mean;Wald}.$$

Die mittleren Oberflächentemperaturen der einzelnen Typklassen sind der Spalte „Mittelwert" aus Tabelle 8 zu entnehmen.

Die Gewichtungen der einzelnen Strukturtypenklassen W_{SST} errechnen sich als Produkt aus dem Erwärmungspotenzial und der bioklimatischen Relevanz, skaliert auf den Wertebereich zwischen 0 und 1, wobei W_{SST} = 0,1 ein definiertes nicht zu unterschreitendes Minimum darstellt.

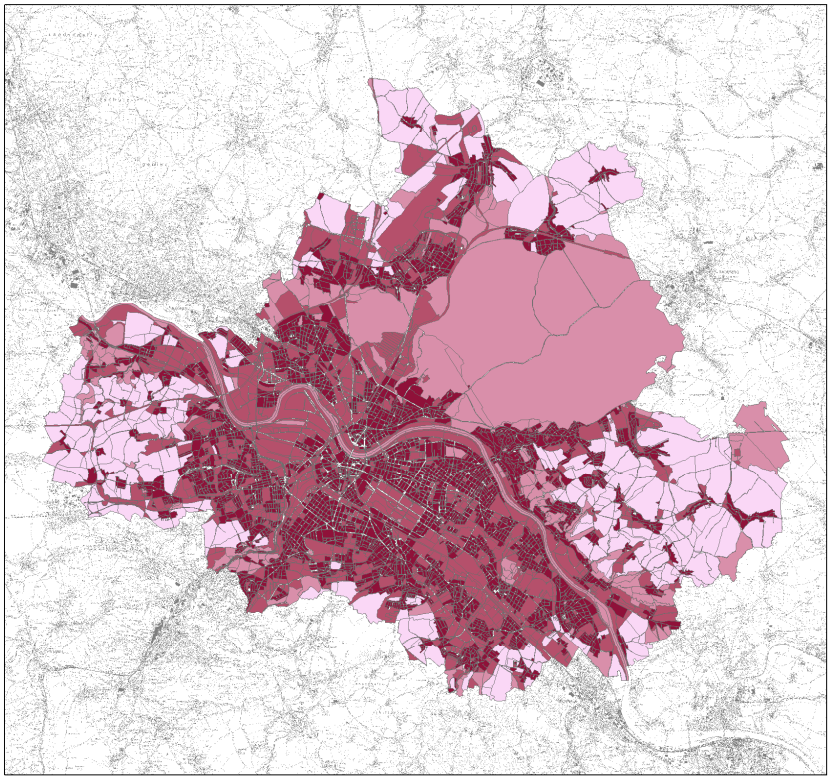
$$W_{SSTK} = \begin{cases} \Delta LST_{SSTK} \cdot REL_{bioklim}/MAX(PT_{SSTK}) \\ 0{,}1, wenn\ \Delta LST_{SSTK} \cdot REL_{bioklim}/MAX(\Delta LST) < 0{,}1 \end{cases}$$

mit: W_{SSTK}: Wichtungsfaktor des Stadtstrukturtyps
ΔLST_{SSTK}: Erwärmungspotenzial des Strukturtyps
$LST_{mean,Wald}$: mittlere Oberflächentemperatur des Strukturtyps Wald
$REL_{bioklim}$: bioklimatische Relevanz
$MAX(\Delta LST_{SSTK})$: maximaler Wert aller ΔLST_{SSTK}.

Wird das definierte Minimum von 0,1 unterschritten, wird der Wichtungsfaktor $W_{SST,min}$ = 0,1 gesetzt. Die resultierenden Gewichte dieser Herleitung sind in Tabelle 9 in Spalte W_{SSTK} aufgeführt.

Tabelle 9: Herleitung der Wichtungsfaktoren für Strukturtypklassen

SST-Klasse	$\Delta LST_{SST;Wald}$	$REL_{bioklim}$	Produkt	Skalierung	W_{SSTK}
a. Siedlung dicht	8.5	4	33.9	1.0	1.0
b. Siedlung mittel/misch	6.5	4	25.9	0.8	0.8
c. Siedlung offen	5.0	4	20.1	0.6	0.6
d. Großflächig	8.5	3	25.5	0.8	0.8
e. Freizeit	6.3	3	18.8	0.6	0.6
f. Grünstrukturen	4.9	3	14.8	0.4	0.4
g. Wald	0.0	2	0.0	0.0	0.1
h. Wasser	-0.4	2	-0.7	0.0	0.1
i. Verkehrs- und Restflächen	7.2	3	21.5	0.6	0.6
j. Bau- und Ablagerung	6.0	2	11.9	0.4	0.4
k. Acker	3.9	1	3.9	0.1	0.1



Bioklimatische Relevanz der Stadtstrukturtypen in Dresden

Legende

Bio-Relevanz

- 4 (sehr hoch)
- 3 (hoch)
- 2 (gering)
- 1 (sehr gering)

0 5 km

Datenauswertung und Kartographie: Tobias Krüger, Franz Held

Abbildung 10: Nettoblockbezogene Darstellung der bioklimatischen Relevanz $REL_{bioklim}$ der Stadtstrukturtypen in Dresden

Abbildung 10 veranschaulicht die bioklimatische Relevanz der Stadtstrukturtypenklassen entsprechend der Nomenklatur der Tabelle 9. Dunkelrote Bereiche kennzeichnen die baulich stark überprägten Siedlungs- und Infrastrukturgebiete, die durch längere Aufenthaltszeiten des Menschen gekennzeichnet sind und der bioklimatischen Relevanzklasse 4 (=sehr hoch) entsprechen.

Eine hohe bioklimatische Relevanz haben Grün- und Freiflächen, die während sommerlicher Hitzeperioden oft von der städtischen Bevölkerung zur Akklimatisierung und zur Freizeitgestaltung aufgesucht werden. Auch Verkehrs- und Blockrestflächen haben eine Biorelevanz von 3, d.h. es halten sich hier über den Tag viele Menschen auf bzw. ist deren Aufenthaltszeit deutlich länger als beispielsweise bei einem Waldbesuch.

Markant in Abbildung 10 ist die Dresdner Heide, die mit einer Größe von etwa 50 km² etwa 21% des Stadtgebietes von Dresden einnimmt (Dresdner Stadtteile 2011). Sie ist ein bedeutendes Naherholungsgebiet für die städtische Bevölkerung. Da sich Menschen tagsüber nur wenig bzw. nicht dauerhaft in Wäldern aufhalten, diese jedoch aus bioklimatischer Sicht durch ihre vegetative Ausstattung eine große Bedeutung für das Stadtklima und den Menschen besitzen, werden sie mit einer bioklimatischen Relevanz von 2 bewertet.

Flächen der Biorelevanz 1 sind, wie oben beschrieben, Ackerflächen, die aus bioklimatischer Sicht aufgrund von nur kurzzeitig anzunehmenden Aufenthaltsdauern des Menschen von geringerer Bedeutung.

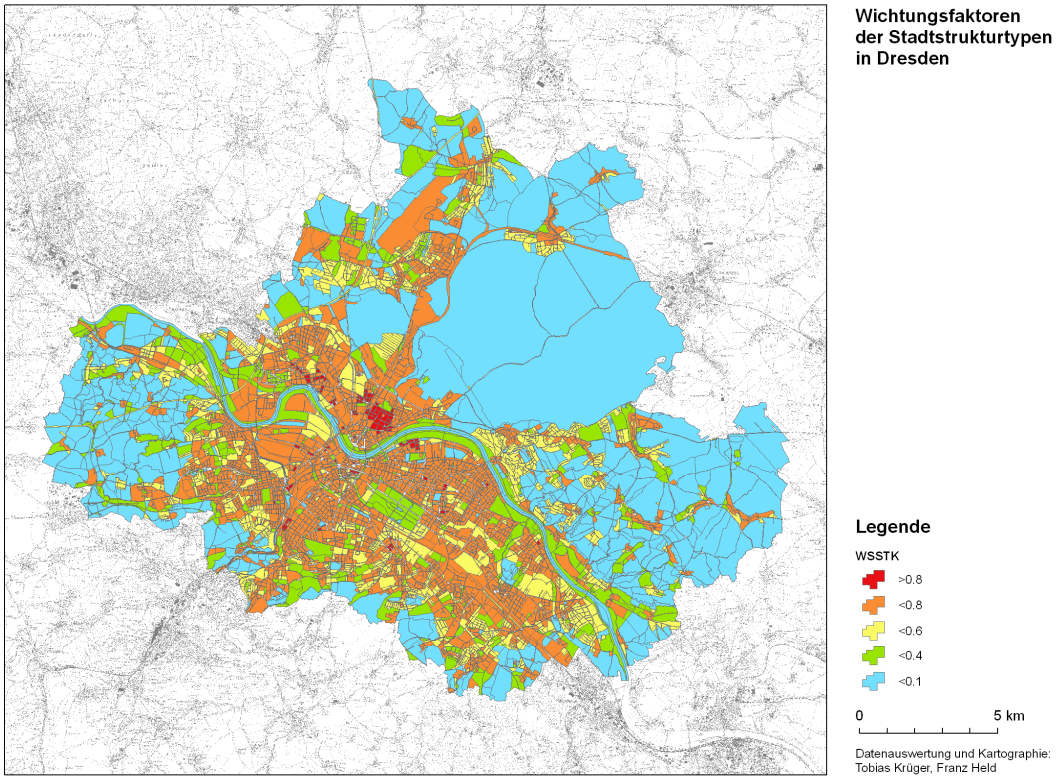


Abbildung 11: Nettoblockbezogene Darstellung der Wichtungsfaktoren W_{SSTK} der Strukturtypen in Dresden

Abbildung 11 visualisiert die Verteilung der Wichtungsfaktoren W_{SSTK} entsprechend der auftretenden Stadtstrukturtypenklassen (SSTK) aus Tabelle 9. Wie der Karte entnommen werden kann, nehmen die bebauten Flächen (rot) mit einer Biorelevanz von 0,8 bzw. 1,0 den Großteil der Stadtfläche ein. Nur vereinzelt wird die dichte Bebauung von Grünflächen (grün) unterbrochen, u.a. durch den Großen Garten als größte Parkanlage der Stadt.

Verkehrs- und Brachflächen erhalten aufgrund ihrer Relevanz (vgl. Abbildung 10) ebenfalls eine mittlere Gewichtung (gelb).

Land- und forstwirtschaftliche Flächen, in der Abbildung blau dargestellt, finden sich an den Stadträndern. Größter zusammenhängender Repräsentant ist die Dresdner Heide, nordöstlich des Stadtzentrums, die als wichtiger Freizeit- und Erholungsort von der Stadtbevölkerung genutzt wird.

3 Erste Ergebnisse und Beispielkarten

Zu Beginn der Arbeiten im TP 3.1.2 wurde ein Ansatz zur Sensitivitätsanalyse verfolgt, der sensitive Siedlungsräume auf Basis der statistischen Bezirke der Stadt Dresden ausweist. Das Ergebnis ist in Abbildung 12 ersichtlich. Ein Vergleich mit dem nun entwickelten nettoblockbasierten, kohortenspezifischen Ansatz zeigt einige Vorteile auf. Der Vorteil des nettoblockbasierten Ansatzes liegt primär in der höheren Auflösung der Daten. Dadurch wird eine detailliertere Visualisierung der Ergebnisse erreicht sowie die Möglichkeit spezifische lokale Handlungsempfehlungen entwickeln und anpassen zu können gegeben. Im ursprünglichen Ansatz wurden durch die Zusammenfassung zu statistischen Bezirken kleinräumige Heterogenitäten der Belastung nicht realitätstreu abgebildet, wie die Gegenüberstellung der Abbildung 12 und Abbildung 19 für die Kohorte der Älteren verdeutlicht.

Auch Grünflächen und das Elbtal werden durch die detailliertere Wiedergabe in ihrer Wirkung als Erholungs- und thermische Ausgleichsflächen besser repräsentiert. Diese gingen bislang bei der Betrachtung ganzer statistischer Bezirke in der Mittelung aller in dieser Zone vorkommenden Flächen unter.

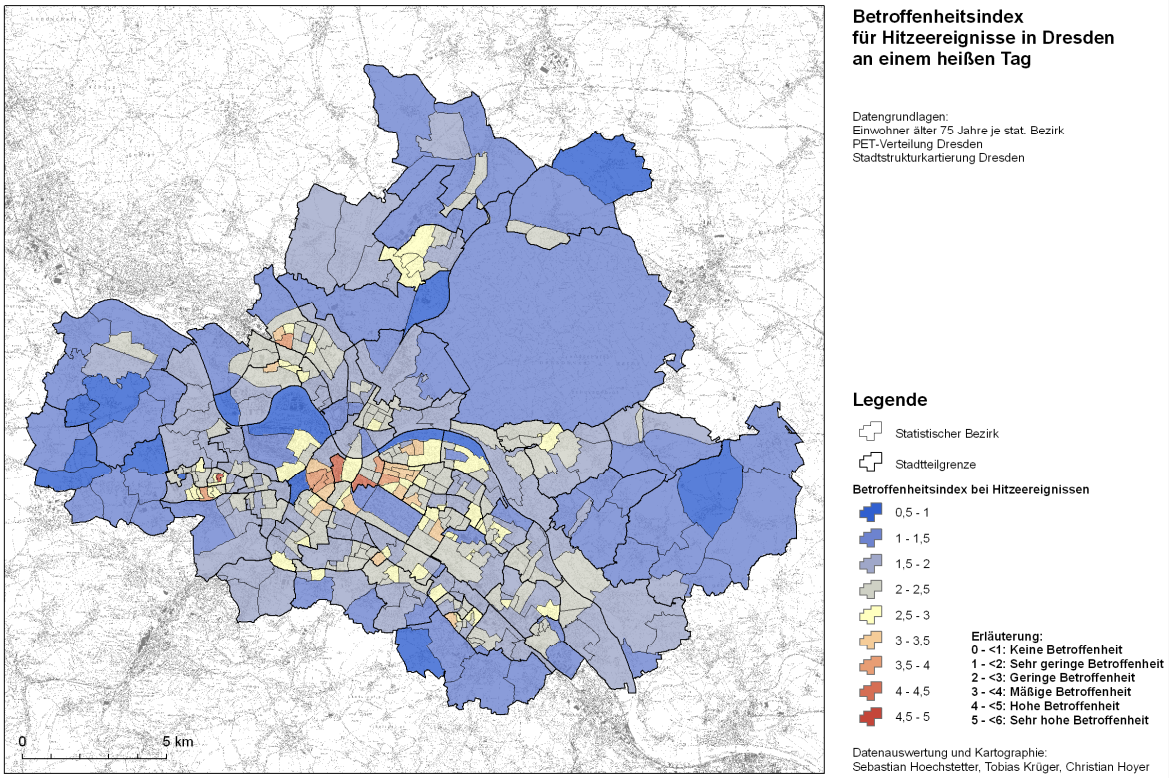


Abbildung 12: Darstellung des Belastungsindex der Gesamtbevölkerung in Dresden auf Basis Statistischer Bezirke

Die kohortenspezifische Bewertung der Sensitivität besonders sensitiver Bevölkerungsgruppen bietet die Möglichkeit, auf kleinräumiger Ebene besonders relevante Quartiere aufzuzeigen und spezifische Anpassungsmaßnahmen für die jeweilig sensible Bevölkerungsgruppe zu entwickeln.

Gesamtbevölkerung

Abbildung 13 veranschaulicht den Betroffenheitsindex für die gesamte Dresdner Bevölkerung. Wie einleitend erörtert, fließt in diese Darstellung neben der thermischen Situation (PET), auch die soziodemographische Verteilung sowie die strukturtypische Zusammensetzung des jeweiligen Nettoblocks mit ein. Diese beeinflusst maßgeblich über das Verhältnis von versiegelter zu vegetativer Fläche die Ausprägung und Höhe der PET.

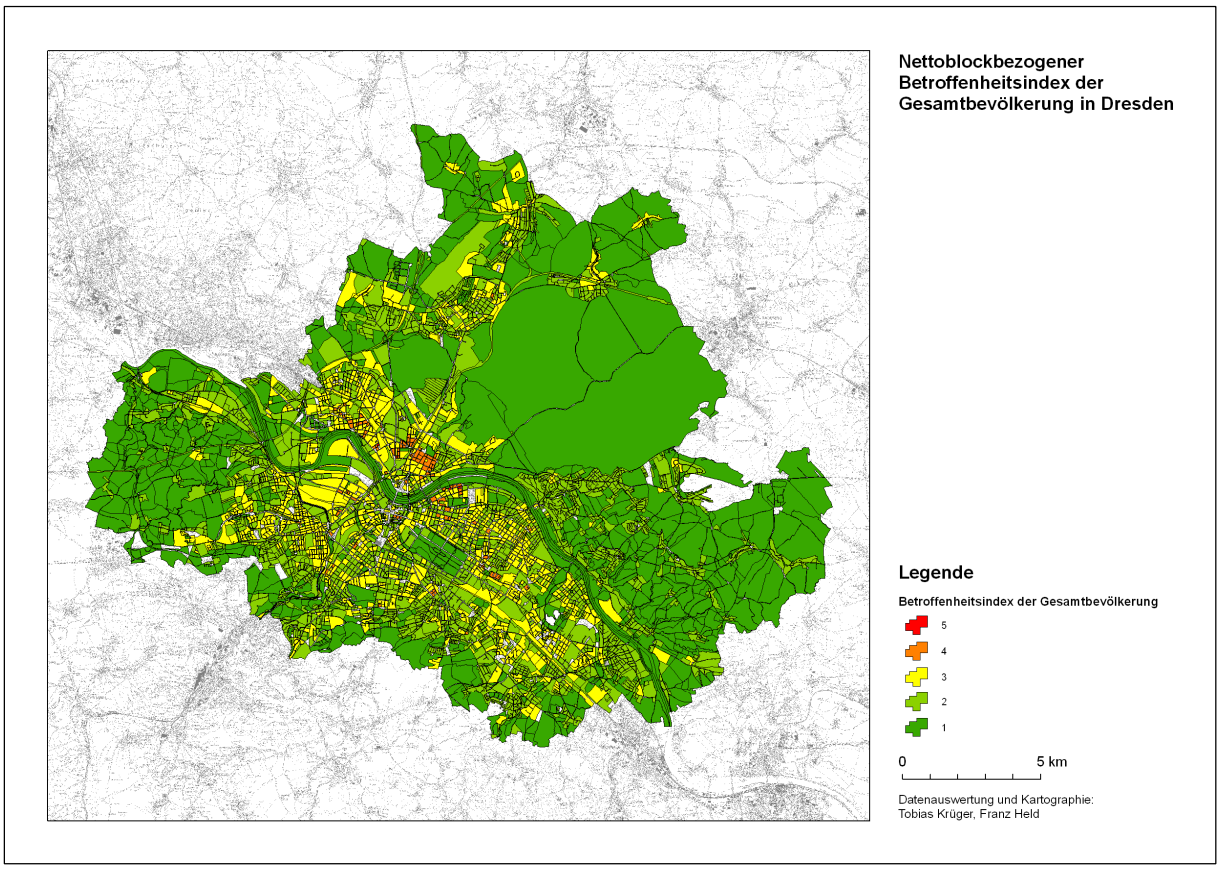


Abbildung 13: Nettoblockbezogene Darstellung des Belastungsindex der Gesamtbevölkerung in Dresden

Entsprechend der Tabelle 1 ist in den Bereichen mit einem Betroffenheitsindex von 0 bis 1 (dunkelgrün in Abbildung 13) von keinen Einschränkungen aufgrund von Hitzebelastungen an heißen Tagen (T_{max} > 30°C) auszugehen. Dies gilt vorrangig für die innerstädtischen Grünflächen sowie für weite Teile des Elbgrünzugs, der zudem durch die große Wasserfläche ein hohes Kühlpotenzial aufgrund der Verdunstungswirkung bereitstellt. Auch die Dresdner Heide und weitere umliegende land- und forstwirtschaftliche Flächen mit hohem Vegetationsanteil haben keine Hitzebelastung zu erwarten und dienen somit als bioklimatisch-neutrale Flächen, die ggfs. bei Hitzebelastung von der Bevölkerung zur thermischen Akklimatisierung genutzt werden können.

Einen besseren Einblick in die mikroskaligen räumlichen Heterogenitäten des Belastungsindex gibt der Detailausschnitt des Stadtzentrums (Abbildung 14).

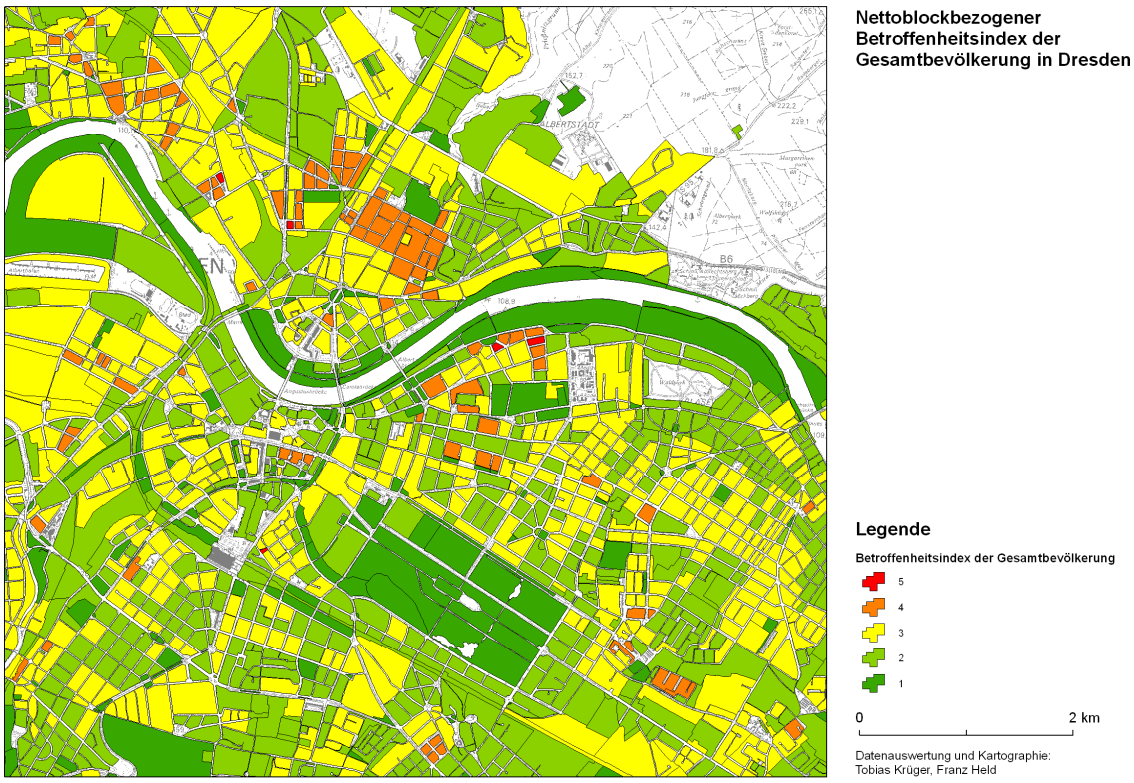


Abbildung 14: Nettoblockbezogene Darstellung des Belastungsindex der Gesamtbevölkerung im Zentrum Dresdens

In Abbildung 14 sind viele hellgrüne Flächen, die sehr geringe Betroffenheit der Bevölkerung gegenüber Hitzestress verkörpern, vorzufinden. Dies gilt zudem auch für gelbe Flächen, die eine geringe Sensitivität der Bevölkerung gegenüber thermischen Belastungen an Hitzetagen repräsentiert.

Mäßige Betroffenheit (Belastungsindex zwischen 3 und 4, orange in Abbildung) tritt in vereinzelten Nettoblöcken der Johannstadt und Pieschen auf. Hingegen wird in der Neustadt, die, wie die Abbildung 5 und Abbildung 11 zeigen, ein dichtbesiedelter, stark bebauter und nur wenig begrünter Stadtteil ist, von einer mäßigen Betroffenheit der Bevölkerung gegenüber Hitzestress ausgegangen. Aufgrund des erhöhten Erwärmungspotenzials der Gebäude ist die Wohlfahrtswirkung der anteiligen Vegetation im Nettoblock je nach Grünausstattung schnell erschöpft, sodass es zu mäßigen Hitzebelastungen kommen kann.

Eine hohe Betroffenheit (Index 5) tritt in Dresden nur selten in vereinzelten Nettoblöcken auf. Eine sehr hohe Betroffenheit (Index 6) konnte weder bzgl. der Gesamtbevölkerung noch bzgl. der besonders sensitiven Kohorten festgestellt werden.

In den orangefarbenen und roten Bereichen, jenen Gebieten mit einem Betroffenheitsindex von > 4, muss mit Einschränkungen für die Bevölkerung während Hitzeperioden gerechnet werden. Die vorzugsweise dichte Bebauung und das damit einhergehende Fehlen von thermisch-kompensierenden Grünflächen begünstigen die Überwärmung des Gebie-

tes und somit die Ausprägung hoher PET-Werte. Im Stadtzentrum entsprechen einige Nettoblöcke diesem Schema, da sich oft an diesen Stellen historische Stadtkerne mit neuen infrastrukturellen Bebauungen verknüpfen. Aus stadtstruktureller Sicht sind diese Flächen besonders für Überwärmung anfällig, jedoch sind diese Blöcke nicht so dicht bewohnt, wie es beispielsweise in den Plattenbaugebieten der Fall ist. Dennoch halten sich tagsüber viele Menschen gerade im Innenstadtbereich auf, sodass nicht allein von der Wohnsituation auf die Sensibilität von Stadtgebieten geschlossen werden kann.

Ältere Bevölkerung

Die kohortenspezifische Verteilung des Belastungsindex für die ältere Bevölkerung orientiert sich entsprechend an deren Dichteverteilung (vgl. Abbildung 6). Da die stadtstrukturelle Zusammensetzung (vgl. Abbildung 11 der W_{SSTK}) im Zentrum Dresdens eher homogen der dichten Siedlungs- und Blockbebauung folgt, ergeben sich dementsprechend hohe PET-Werte in von älteren Menschen dichtbesiedelten und zugleich stark anthropogen überprägten Stadtgebieten.

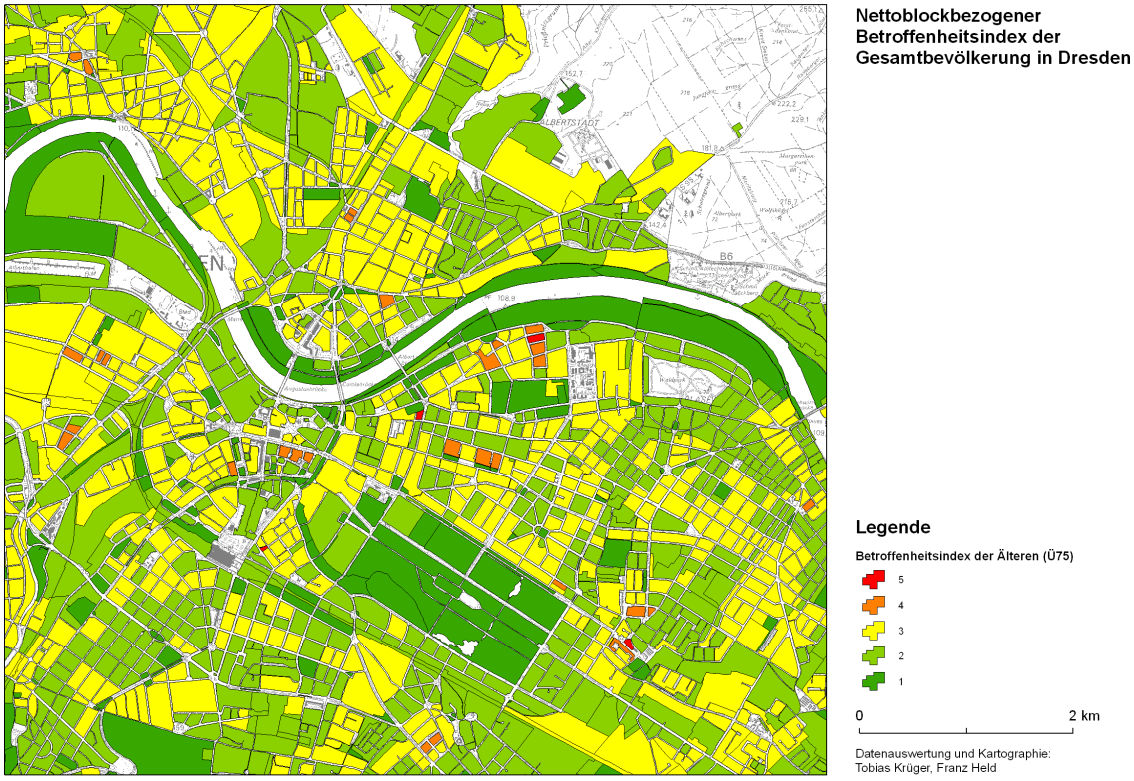


Abbildung 15: Nettoblockbezogene Darstellung des Belastungsindex der älteren Bevölkerung (>75 Jahre) im Zentrum Dresdens

Folglich reagieren die Gebiete mit den größten Einwohnerdichten älterer Menschen am sensibelsten auf Hitzeereignisse. Die erhöhte Belastung wird dementsprechend in den Wohngegenden, in denen mehr ältere Menschen leben, wie Gorbitz, Prohlis und der Altstadt, empfunden (vgl. Abbildung 19).

Kleinkinder

Die Verteilung des Belastungsindex der Kleinkinder in Abbildung 16 veranschaulicht deutlich mehr rote und orangefarbene Flächen und dementsprechend höhere Belastungen der Kleinkinder gegenüber Hitze in den Gebieten der Neustadt und Pieschen. Dies geht auch aus der Übersichtsdarstellung in Abbildung 20 hervor. Vereinzelt treten auch Baublöcke in anderen Stadtteilen (Gorbitz, Prohlis und Striesen) als Flächen mit höherem Belastungspotenzial der Kleinkinder in Erscheinung.

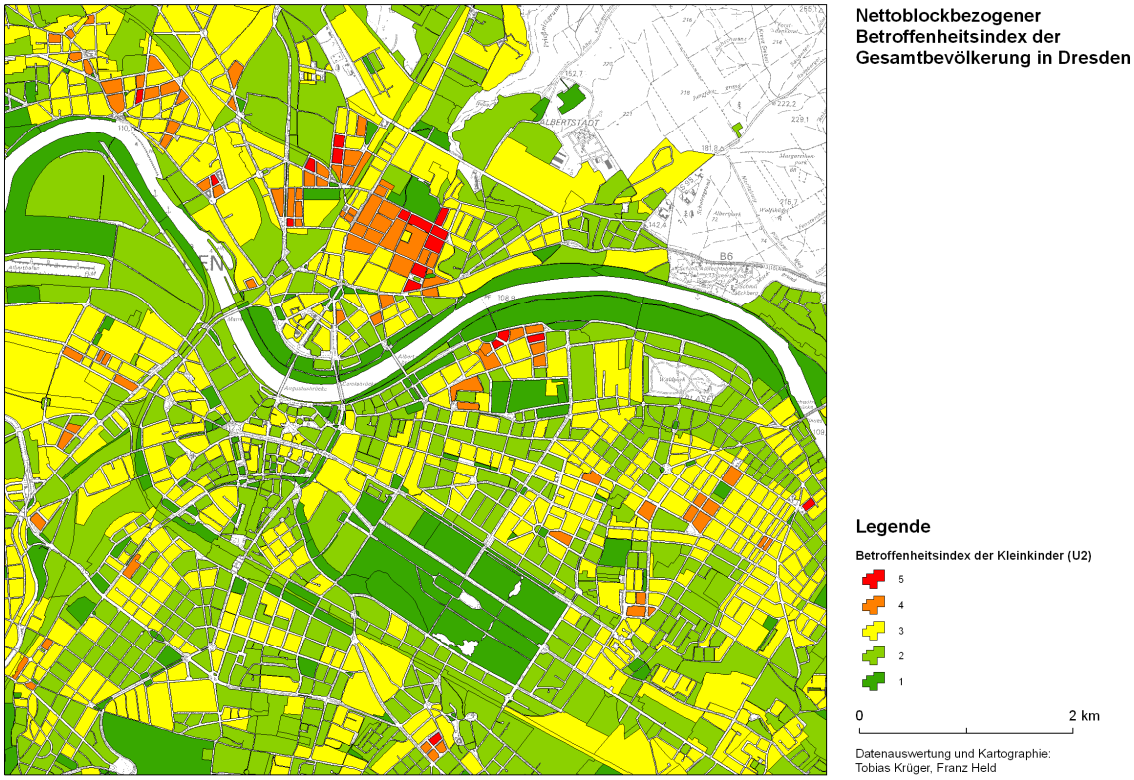


Abbildung 16: Nettoblockbezogene Darstellung des Belastungsindex der Kleinkinder (<2 Jahre) im Zentrum Dresdens

Im Vergleich zur Verteilung des Belastungsindex für die ältere Bevölkerung (Abbildung 15) zeigen sich teils deutliche Verschärfungen der Sensitivität in einigen Quartieren, besonders in der Neustadt und in Pieschen. Durch die stärkere Konzentration der Kleinkinder auf bestimmte Stadtgebiete muss gegenüber dem Betroffenheitsindex der älteren Bevölkerung von einer stärkeren Lokalisierung ausgegangen werden. Dies bietet die Möglichkeit konkrete Anpassungsmaßnahmen auf die konzentrierten und besonders sensiblen Bereiche zu formulieren und diesen besondere Priorität einzuräumen (Gill et al. 2007).

4 Anpassungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, in welchen Bereichen des Stadtgebietes den Anpassungsmaßnahmen an zunehmende Hitzebelastungen eine besonders hohe Priorität eingeräumt werden soll. Ausgehend von den Erkenntnissen aus dem Teilprojekt sind folgende Maßnahmen, wie sie teilweise bereits verfolgt werden, als besonders geeignet für die Verminderung der Auftretenswahrscheinlichkeit thermischen Stresses anzusehen. Die dargestellten Handlungsempfehlungen unterstützen das Leitbild der „kompakten Stadt im ökologischen Netz" der Landeshauptstadt Dresden (Abbildung 21) und sind geeignet, sowohl positive Wirkungen für die (bio-) klimatische Situation zu entfalten als auch die Aufenthaltsqualität der Bevölkerung, die Biodiversität, den Hochwasserschutz und die Grundwasserneubildung zu begünstigen (Korndörfer 2008).

4.1 Optionen zur Verbesserung der thermischen Belastung

Erhöhung der Grünflächendichte

Die Schaffung weiterer Grünflächen bzw. die Aufstockung vorhandener Grünflächen mit weiterem Grün innerhalb der Stadt ist von zentraler Bedeutung. Messbare positive Effekte für die thermische und lufthygienische Komponente des Stadtklimas erhöhen sich mit steigender Baumzahl (Matzarakis & Streiling 2004). Viele Studien ergaben, dass viele kleinere Grünflächen (> 1 ha) eine effektivere Abkühlung der Stadtluft zur Folge haben, als wenige große (Bongardt 2006, Matzarakis 2008, Stülpnagel 1987, Yu & Hien 2006).

Die Grünflächen sollten dabei so angelegt werden, dass sowohl die Tag- als auch Nachtsituation und deren besonderen Anforderungen an das Grün Berücksichtigung findet. Während tagsüber bei Hitzeperioden vor allem auf Beschattung und kühle, feuchte Luft durch Verdunstung/Photosynthese abgezielt werden sollte, wird nachts neben der Verdunstungsleistung die vermehrte Kaltluftproduktion angestrebt. Die Grünflächen sollten folglich sowohl hochstämmige Vegetation (Beschattung, Verdunstungsleistung) als auch ausreichend große Grasflächen (die nicht von einem Kronendach verdeckt sind und somit genügend Kaltluft durch große Ausstrahlungsleistung produzieren können) beinhalten. Bei der Auswahl der einzusetzenden Stadtbaumarten sind insbesondere Standorteignung und Resistenz gegen Klimaänderungen zu beachten. Auf diese Problematik wird ausführlich im REGKLAM-Produktbericht 3.1.2d (Anpassungsbedarf für den Stadtbaumbestand – Dendrochronologische und ökophysiologische Ergebnisse) eingegangen.

Ferner sollte neben der Pflanzung von Stadtbäumen auch die Bereitstellung von Grünvolumen in Wirkhöhe des Menschen angestrebt werden, z.B. durch Pflanzung von niederflurigem Grün wie Hecken oder Sträuchern. Dieses kann seine abkühlende Wirkung direkt auf der für den Menschen relevanten Höhe entfalten und dient zugleich als effektiver Luftschadstofffilter (Matzarakis & Streiling 2004). Entlang von Verkehrswegen kann diese Art der Begrünung zudem platzsparend und an einer der Hauptquellen des Schadstoffausstoßes realisiert werden.

Vernetzung von Grünflächen

Grünflächen sind durch ihre Verdunstungsleistung zur Temperaturverminderung geeignet. Insbesondere Großgrünbestand kann durch zusätzlich auftretende Abschattungseffekte zur Schaffung von thermischen Erholungsflächen beitragen. Insofern sind neben der Schaffung bzw. Erhaltung großer Grünflächen und Parkanlagen insbesondere punktuelle Vegetationsflächen kleinerer Dimensionen wichtig, die in kürzeren Abständen angeordnet sind, um eine gute Erreichbarkeit durch die Bevölkerung zu gewährleisten. Die Vernetzung der Grünflächen durch Grünsäume kann durch die Einbeziehung von Verkehrsbegleitflächen befördert werden. Eine Verbesserung des Stadtklimas ist nur über die Vernetzung individueller grüner Stadtstrukturen erreichbar (Mayer und Höppe 1987).

Ein weiterer Aspekt ist die Dispergierung der in der Nähe der Grünflächen liegenden Quartiere. Je lockerer diese gestaltet sind, desto weiter reicht die Wohlfahrtswirkung der Grünfläche (Shoura 1989). Trifft die kühle, feuchte Luft von der Grünfläche direkt im Anschluss an überwärmte, stark versiegelte Quartiere, wird diese Luft erwärmt und die positive Wirkung geht verloren.

Eine gute Vernetzung der Grünflächen ist im Sinne des Leitbildes der „kompakten Stadt im ökologischen Netz" geeignet, neben der thermischen auch die innerstädtische lufthygienische Situation u.a. durch die Begünstigung alternativer Fortbewegungsmittel nachhaltig zu verbessern (Korndörfer 2008).

Verkürzung der Entfernung zu Erholungsflächen

Kurze Entfernungen zwischen innerstädtische Grünflächen bzw. Grünoasen tragen zur Erhöhung von deren Wohlfahrtswirkung bei, da die Hitzebelastung der sensitiven Bevölkerungsgruppen durch die schnellere Erreichbarkeit der thermischen Komfortzonen vermindert wird. Effektiv ist dieses Ziel durch eine Erhöhung der Grünflächendichte und –vernetzung erreichbar, was durch die planvolle Einbeziehung von Brachflächen und Verkehrsbegleitflächen unterstützt werden kann (s.o.).

Nutzung des Brachflächenpotenzials

Brachflächen sind als Plätze für die Entwicklung von innerstädtischen Freiraumzonen geeignet. Neben der meist praktizierten Duldung von wildem Vegetationsaufwuchs durch dauerhafte Nichtnutzung der Fläche nach ihrer bisherigen Bestimmung ist die aktive Realisierung von Zwischenbewirtschaftungslösungen sinnvoll. Denkbar sind Aufforstung von urbanem Wald oder eine landwirtschaftliche (Zwischen-) Nutzung. Urbaner Wald kann nachweislich die bioklimatische Situation in dem betroffenen Stadtquartier verbessern, indem beispielsweise die Lufttemperatur im Mittel gesenkt werden kann.

Die Revitalisierung leergefallener Bausubstanz leistet einen essenziellen Beitrag zur Nachverdichtung der Siedlungsstruktur im Innenbereich und beugt damit einer weiteren Zersiedelung im Außenbereich vor. Dadurch werden wichtige Kaltluftentstehungsgebiete am Stadtrand geschont.

Entsiegelung

Versiegelte Böden heizen sich, analog zu Gebäudestrukturen, schneller und dauerhafter auf als unversiegelte und vegetationsbestandene Flächen (Matzarakis 2001). Daher ist eine Entsiegelung, anzuraten, um Potenzial für das Pflanzenwachstum zu schaffen. Insbesondere ist hier an „grüne Parkplätze" zu denken oder die aktive Entsiegelung von Brachflächen, um gezielt Raum für die Ansiedlung urbaner Biotope zu schaffen. Zudem kommt eine entsiegelte Fläche dem Wasser- und Energiehaushalt zugute.

Gebäudebegrünung

Wie die vorliegende Analyse zeigt, sind v.a. die dicht bebauten Siedlungsgebiete am sensitivsten gegenüber Hitzebelastungen. Dies liegt u. a. daran, dass die vertikalen Gebäudestrukturen eine Vervielfachung der Reflexionsflächen für Wärmestrahlung darstellen. Da diese Effekte mit der dargestellten Methodik nicht abzubilden sind, ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die thermische Belastungssituation im dicht bebauten Siedlungsbereich tendenziell unterschätzt wird.

Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, z.B. durch Fassaden- und Dachbegrünungsmaßnahmen die Absorption solarer Strahlung und die daraus resultierende Emission von Wärme durch die Gebäudeoberfläche zu minimieren. Damit können durch Maßnahmen direkt am Gebäudebestand positive Auswirkungen für den Außen- und Innenraum erreicht werden (Alexandri & Jones 2008, Lükenga & Wessels 2001, Takebayashi & Moriyama 2007).

Begleitgrünausstattung und Umgestaltung von Verkehrsflächen

Verkehrsflächen werden bei der nettoblockbezogenen Betrachtung nicht berücksichtigt. Jedoch sind die thermischen Eigenschaften dieser dicht versiegelten anthropogenen Nutzungsform ein wichtiger Faktor bei der Ausprägung der städtischen Wärmeinsel (s. Tabelle 5). Die Ausstattung dieser Flächen durch Straßengrün ist geeignet, einerseits die Verkehrsflächen abzuschatten und deren Aufheizung und Emission aufgenommener Wärme zu vermindern und andererseits direkt an einer großen Emissionsquelle von Luftschadstoffen Filtrations- und Verdunstungsleistung zu installieren.

Wenn durch geeignete Maßnahmen der Platzbedarf an versiegelten Flächen für den ruhenden Verkehr (große innerstädtische Parkplätze) reduziert werden kann, wird sich dies neben der Verringerung des Schadstoffausstoßes auch in bioklimatischer Hinsicht positiv auswirken, sofern diese Flächen zu thermischen Komfortzonen umgestaltet werden.

Freihaltung von Kaltluftschneisen und Grünachsen

Dresden wird durch eine Beckenlage charakterisiert, d.h. dass sich warme und trockene Luft während Hitzeereignissen gut im Stadtzentrum (dicht bebaut und stark versiegelt) sammelt. Das Stadtzentrum ist durch flächige Bebauung in sich geschlossen und oft reicht die Bebauung nah an die Elbe bzw. die Elbwiesen heran. Eine gute Durchlüftung, die frische und kühle Luft heranführt und die warme Stadtluft, die zudem mit Luftschadstoffen angereichert ist, abtransportiert ist daher von entscheidender Bedeutung.

Aus den vorliegen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass Handlungsbedarf bzgl. einer vernetzten Durchgrünung der Stadt Dresden gegeben ist, um die dichte zusammenhängende Siedlungs- und Bebauungsstruktur zu dispergieren, mit flächenhafter Begrünung zu vereinen und damit das Erwärmungspotenzial des Stadtgebiets zu verringern.

Die Freihaltung und Begrünung von Schneisen vom Zentrum zu den umliegenden Kaltluftentstehungsgebieten von neuer blockierender Bebauung gewährleistet die Frischluftzufuhr und den Abtransport überwärmter und mit Schadstoffen aus Emissionen angereicherter Luftmassen.

Einbindung von Wasserflächen in Grünsysteme

Wasser erwärmt sich aufgrund seiner thermischen Eigenschaften (hohe spezifische Wärmekapazität, mäßige Wärmeleitfähigkeit und geringes Temperaturleitvermögen, vgl. Tabelle 5) im Vergleich zu anthropogenen Oberflächenmaterialien sehr langsam (Kuttler 2004). Zudem ist es kein starrer Körper, sodass durch Umschichtungen im Wasserkörper die Wassertemperatur nur langsam steigt und vom täglichen Zyklus der Lufttemperatur entkoppelt wird (Entstehung Land-See-Wind aufgrund thermischer Gradienten, die auf unterschiedlich starkes Erwärmungspotential von Land und Wasser zurückzuführen sind) (Oke 1987).

Wasser reflektiert in Abhängigkeit des Sonneneinfallswinkels einen Großteil der einfallenden Sonnenstrahlung. Zudem hält die Wasserfläche durch das große potentielle Verdunstungsäquivalent ein großes Abkühlungspotential für die naheliegende Umgebung bereit. Wasserflächen sollten zudem in einem räumlichen Zusammenhang mit Grünflächen stehen, um den Weitertransport der kühlen und feuchten Luft zu unterstützen und das Wohlfahrtspotential für angrenzende Stadtquartiere zu erhalten.

Die Offenlegung verrohrter Fließgewässer ist eine weitere Möglichkeit, kühlere und feuchtere Luft der warmen, trockenen und schadstoffreichen Stadtluft entgegenzustellen. Die gewonnene Fläche der Freilegung kann zudem den Rückhalt von Oberflächenwasser in der Stadt erhöhen und gut mit Grünflächen verbunden werden. Auch ist die Retention im Hochwasserfall als weitere positive Wirkung aufzuführen. Darüber hinaus sind die Investitions- und Wartungskosten pro laufendem Meter Gewässerlauf geringer (vgl. Krämer 2006).

Generell sollte auf einen vermehrten Rückhalt von Niederschlagswasser zur Verdunstung innerhalb der Stadt hingearbeitet werden, da für jeden Liter Wasser rund 2500 KJ Wärme erforderlich sind. Mit dieser Wärmemenge können 100 m³ Luft um 18°C erwärmt werden (Klimafiebel 2008). Eine langsame oberflächige Abführung von Niederschlagswasser bzw. die kurze Zwischenspeicherung könnte damit die Erwärmung von innerstädtischen Luftmassen verzögern.

Durchmischung der Bevölkerungsstruktur

Die potenzielle bioklimatische Belastung von Siedlungsbereichen hängt stark von der Zahl der Einwohner sensitiver Bevölkerungsgruppen ab. So reagieren Stadtviertel mit durchschnittlich sehr hohem Altenanteil bzw. hohem Kleinkinderanteil sensitiver auf hohe Temperaturen als andere und weisen vergleichsweise hohe Belastungsindizes aus.

Eine gute Durchmischung der Alterskohorten der Wohnbevölkerung ist daher angebracht, um die thermische Sensitivität von Siedlungsbereichen zu verringern.

Der Zuzug bestimmter Bevölkerungsgruppen, die dazu geeignet sind, den Anteil der weniger betroffenen Einwohner zu erhöhen, kann dazu beitragen, die Klimasensitivität von Siedlungsgebieten zu vermindern. Dies kann nur über die gezielte Schaffung von Anreizen, etwa durch die Bereitstellung einer ausgewogenen, viele Zielgruppen ansprechenden, Infrastruktur, und einer guten Erreichbarkeit durch öffentlichen Nahverkehr unterstützt werden. Des Weiteren ist durch quantitativen Rückbau bei gleichzeitigem qualitativen Umbau von problematischen Siedlungsbereichen (Großwohnsiedlungen) mit einer Verminderung der Hitzesensitivität zu rechnen.

4.2 Abschließende Bemerkungen

Voraussetzungen für die kleinräumige Kartierung und Klassifizierung von sensitiven Siedlungsräumen sind die eingangs aufgezählten Daten der thermischen Situation, der Bevölkerungsstruktur und eine Stadtstrukturtypenkartierung. Die flächenbezogenen Daten sollten zwischen bebauter Fläche, Siedlungs- und Verkehrsfläche sowie Grünflächendichten unterscheiden, um eine Typisierung der Flächen in Stadtstrukturtypen gewährleisten zu können.

Die Mindestanforderungen an bevölkerungsspezifischen Daten, die erfüllt werden sollten, um eine ausreichend genaue kohortenspezifische Aufschlüsselung der Sensitivität zu garantieren, sind:

- Einwohnerzahl in den Nettoblöcken,
- alterskohortenspezifische Bewohnerzahlen zur Disaggregation auf Blockebene.

Durch die vorliegende Analyse konnte innerhalb Dresdens kein Bereich mit einer sehr hohen Hitzesensitivität (Betroffenheitsindex = 6) identifiziert werden. Dies ist u.a. der Tatsache geschuldet, dass die Einwohnerzahlen der Nettoblöcke unmittelbar in die Berechnung eingehen. Zudem wird die angenommene homogene Verteilung der Bevölkerung der statistischen Bezirke auf die Nettoblöcke durch die räumliche Disaggregierung den realen Wohnverhältnissen nicht gerecht. Weiterhin fallen Verkehrsflächen aus der Betrachtung aus. Da sich ein erheblicher Teil der Bevölkerung aber für die alltäglichen Wege auf Verkehrsflächen aufhält, ist hier eine Weiterentwicklung des Ansatzes unter Hinzuziehung von Verkehrszahlen angebracht. Analog gehen derzeit weder Touristen- noch Arbeitnehmerzahlen in den Index ein. Das Vorliegen entsprechender Werte könnte die Güte des Betroffenheitsindex erhöhen.

Der entwickelte Ansatz zur Bestimmung des Betroffenheitsindex ist unter den genannten Voraussetzungen geeignet, für die städtische Wohnbevölkerung nach Altersgruppen gegliederte lokalisierte Aussagen zur Sensitivität bzgl. Hitzeereignissen zu treffen.

5 Literatur

Alexandri, E., Jones, P. (2008): Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. Building and Environment No. 43, S. 480-493.

Bongardt, B. (2006): Stadtklimatische Bedeutung kleiner Parkanlagen dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. Dissertation, Universität Duisurg-Essen.

Dresdner Stadtteile Homepage (2011): Verfügbar unter: http://www.dresdner-stadtteile.de [Zugriff am 29.12.2011].

Fanger, P.O. (1972): Thermal Comfort. McGraw-Hill, New York.

Gagge, A.P. (1980): The new effective temperature ET* - an index of human adaption to warm environments. In: Environmental Physiology: Aging, Heat and Altitude. Elsevier, S. 59-77.

Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R., Pauleit, S. (2007): Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. Built Environment No. 33, S. 115-133.

Helbig, A., Baumüller, J., Kirschgens, M. J. (Hrsg.) (1999): Stadtklima und Luftreinhaltung. Springer, Berlin.

Hoechstetter, S., Krüger, T., Goldberg, V., Kurbjuhn, C., Hennersdorf, J., Lehmann, I. (2010): Using geospatial data for assessing thermal stress in cities. In: Car, A.; Griesebner, G.; Strobl, J. (Hrsg.): Geospatial Crossroads @ GI_Forum `10. Wichmann Verlag (ISBN 978-3-87907-496-9), S. 101–110.

Höppe, P. (1984): Die Energiebilanz des Menschen. Dissertation. Wissenschaftliche Mitteilung des Meteorologischen Instituts der Universität München No. 49.

Höppe, P. (1993): Heat Balance Modelling. Experientia No. 49, S. 741-746.

Höppe, P. (1999): The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology No. 35, S. 71-75.

Jendritzky, G. (1990): Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen. Akademie für Raumforschung und Landesplanung. ARL Beiträge No. 114.

Korndörfer, C. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf deutsche Großstädte - Ansätze zur Bewältigung der Klimafolgen in der Landeshauptstadt Dresden. Sachsenlandkurier No. 5.

Krämer, I. (2006): Verrohrte Fließgewässer bei der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie - mögliche Lösungen und deren ökonomische Auswirkungen im Peeneeinzugsgebiet. Diplomarbeit, Universität Greifswald.

Kuttler, W. (2004): Stadtklima - Teil 1: Grundzüge und Ursachen. In: Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung (UWSF) - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, No. 16, S. 187-199.

Lükenga, W., Wessels, K. (2001): Oberflächentemperaturen von Dachflächen. Das thermische Verhalten städtischer Dächer bei sommerlichen Strahlungswetterlagen - ein Plädoyer für Gründächer. Stadt und Grün No. 6, S. 399-403.

Matzarakis, A., Mayer, H. (1996): Another Kind of Environmental Stress: Thermal Stress. NEWSLETTERS No. 18, S. 7-10. WHO Colloborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control.

Matzarakis, A., Mayer, H. (1997): Human-Biometeorologische Bedingungen im Sommer im Hochschwarzwald. Annalen der Meteorologie No. 33. 3. Fachtagung BIOMET. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, S. 39-44.

Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M. G. (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. International Journal of Biometeorology No. 43, S. 76-84.

Matzarakis, A. (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas. Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg No. 6.

Matzarakis, A., Streiling, S. (2004): Stadtklimatische Eigenschaften von Bäumen. Falluntersuchung in Freiburg im Breisgau. Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft No. 64, S. 307-310.

Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H. (2007): Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model. International Journal of Biometeorology No. 51, S. 323-334.

Matzarakis, A., Amelung, B. (2008): Physiological Equivalent Temperature as Indicator for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort of Humans. In: Thomson, M.C.; Garcia-Herrera, R.; Beniston, M. (Hrsg.): Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health. Health and Climate. Springer (ISBN 978-9-04817-747-9), S. 161-172.

Matzarakis, A., Rutz, F. (2008): RayMan - A Tool for Research and Education in Applied Climatology. 8th Conference on Meteorology-Climatology-Atmospheric Physics, Athen, 24.-26.05.2006.

Matzarakis, A. (2008): Klimawandel und Städte -Stadtklimatischer Einfluss von Bäumen. Osnabrücker Baumpflegetage - Aktiv für Bäume.

Mayer, H., Höppe, P. (1987): Thermal Comfort of Man in Different Urban Environments. Theoretical and Applied Climatology No.38, S. 43-49.

Mayer, H. (1993): Urban bioclimatology. Experientia No. 49, S. 957-963.

Müller, U., Kuttler, W., Tetzlaff, G. (1999): Workshop Stadtklima. 17./18. Februar 1999 in Leipzig. Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e.V. Leipzig No. 13, S. 100 - 115.

Oke, T.R. (1987): Boundary Layer Climates. Routledge, New York.

Shoura, G. (1989): Die Bedeutung der Vegetation innerstädtischer Freiräume für die Verbesserung der stadtklimatisch-ökologischen Bedingungen in der trocken-warmen Zone (Beispiel Damaskus). Dissertation, Technische Universität Dresden.

Stadt Dresden Homepage (2012): Verfügbar unter: http://www.dresden.de/de/02/06/c_01.php [Zugriff am 18.01.2012]

Städtebauliche Klimafiebel Online (2008): Verfügbar unter: http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/index-1.htm [Zugrff am 29.11.2010].

Stülpnagel, A. (1987): Klimatische Veränderungen in Ballungsgebieten unter besonderer Berücksichtigung der Ausgleichswirkung von Grünflächen, dargestellt am Beispiel Berlin (West). Dissertation, Technische Universität Berlin.

Takebayashi, H., Moriyama, M. (2007): Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. Building and Environment No. 42, S. 2971-2979.

VDI 3787, Blatt 2 (1998): Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.

Yu, C.; Hien, W. N. (2006): Thermal benefits of city parks. Energy and Buildings No. 38, S. 105-120.

6 Anhang

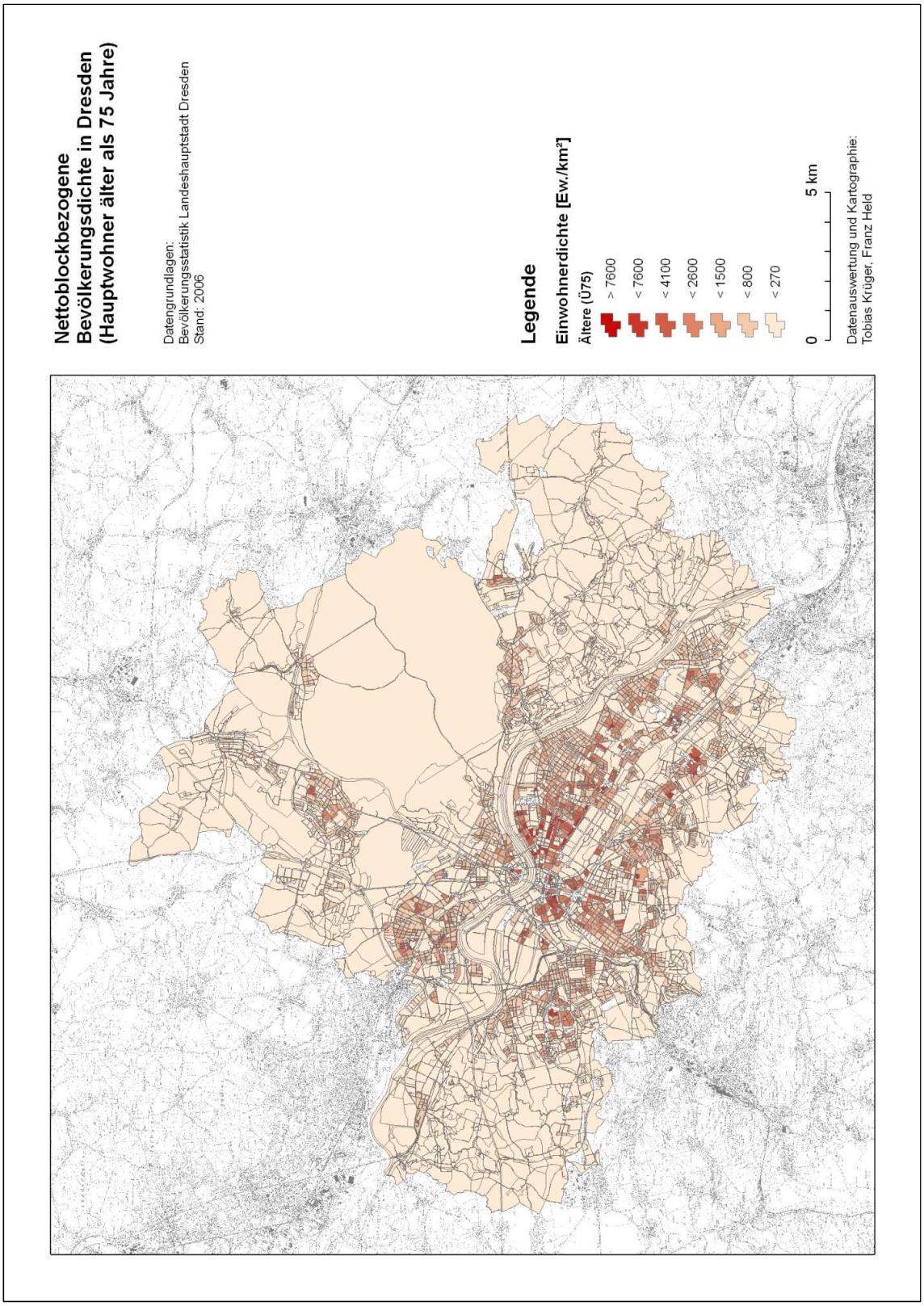


Abbildung 17: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der älteren Bevölkerung (Ü75) in Dresden

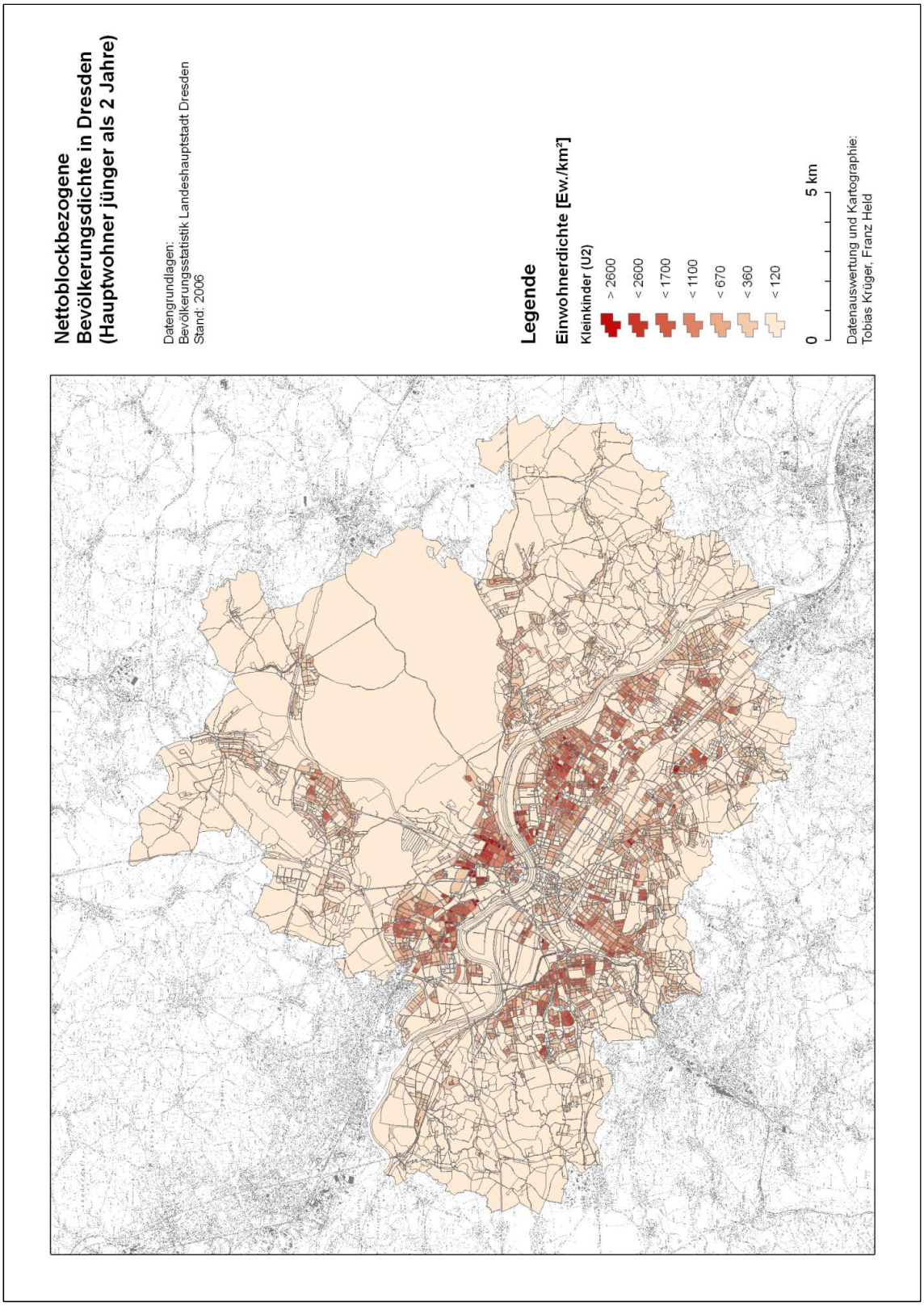


Abbildung 18: Nettoblockbezogene Bevölkerungsdichte der Kleinkinder (U2) in Dresden

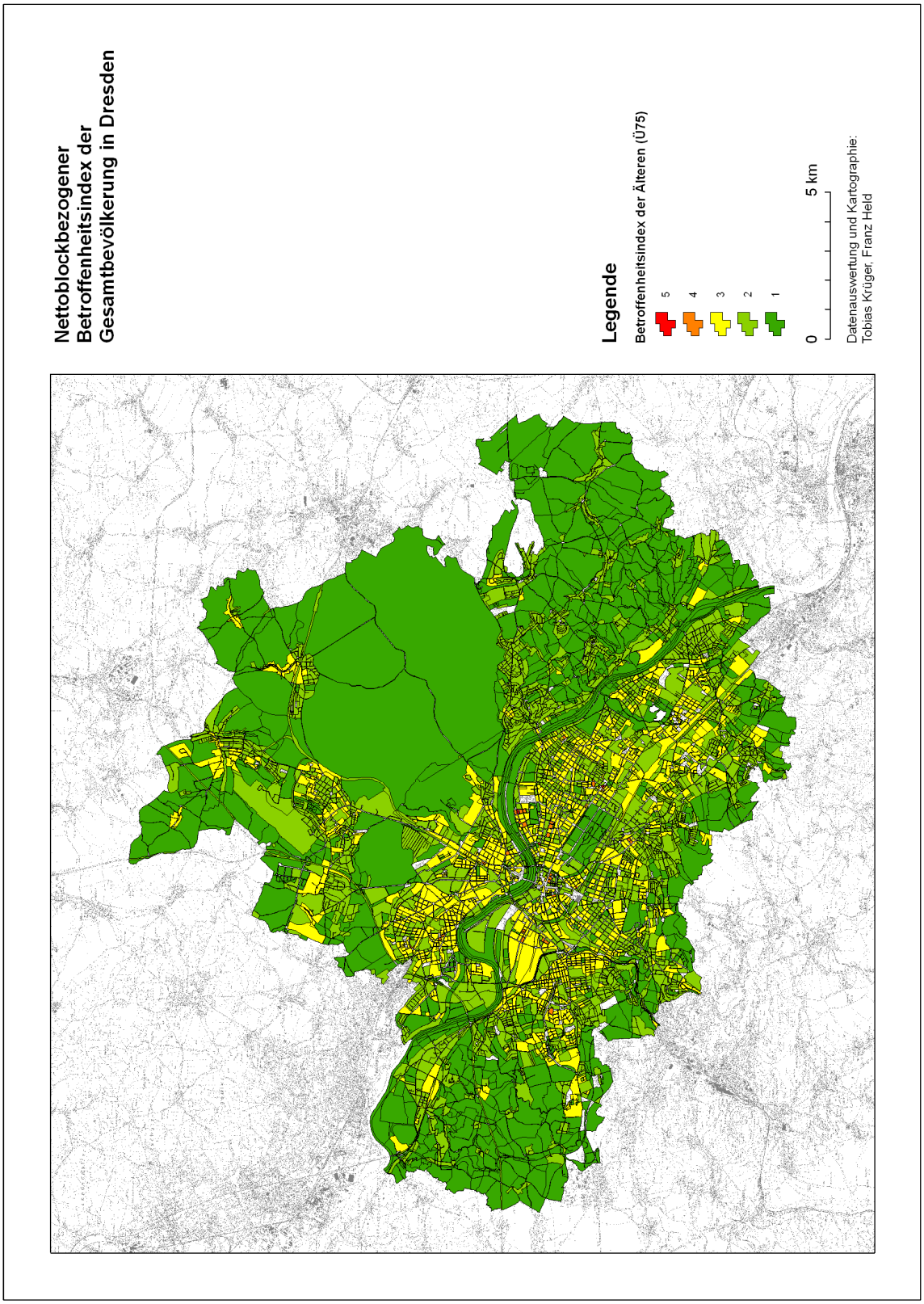


Abbildung 19: Nettoblockbezogener Betroffenheitsindex der Älteren (Ü75) in Dresden

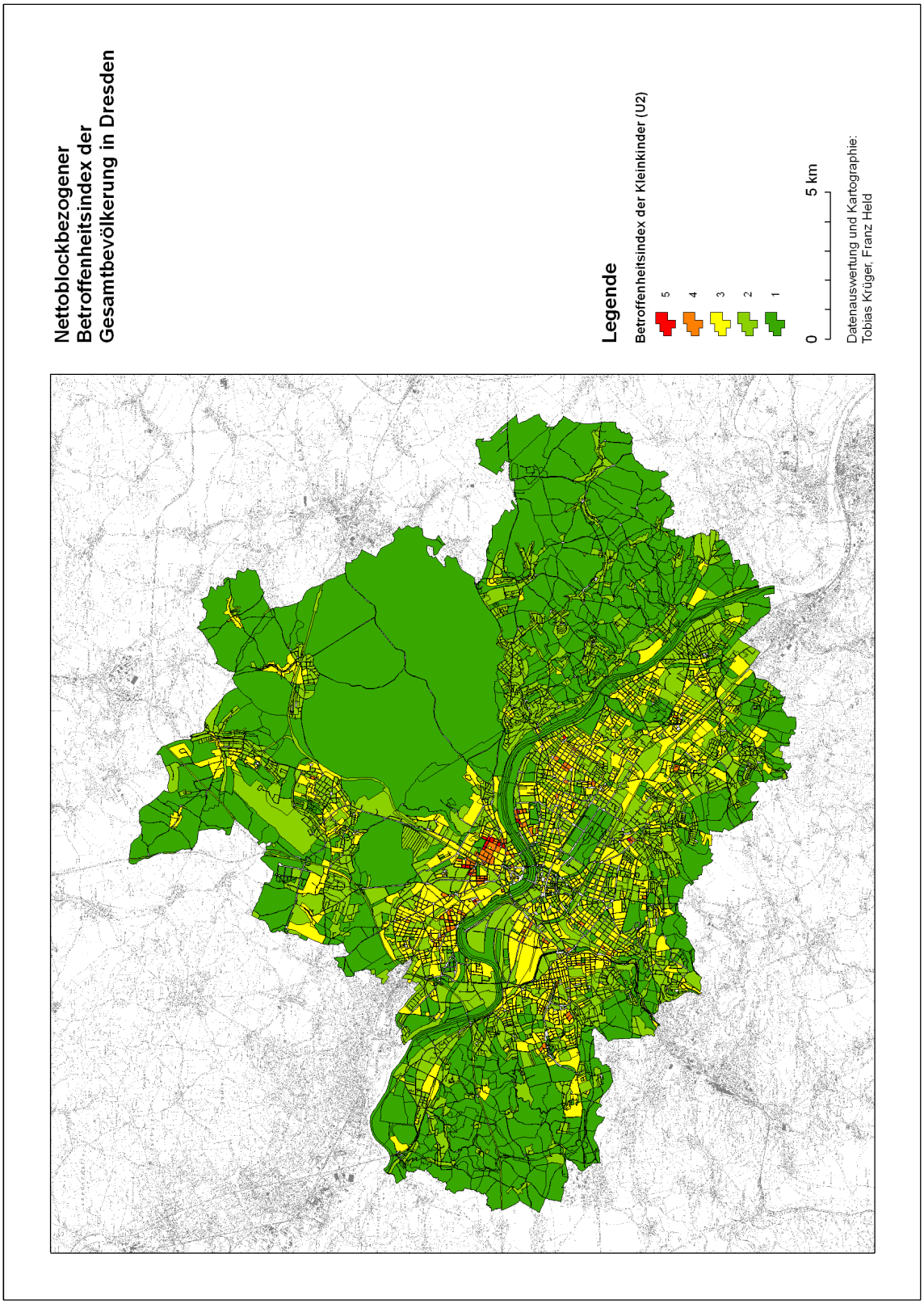


Abbildung 20: Nettoblockbezogener Betroffenheitsindex der Kleinkinder (U2) in Dresden

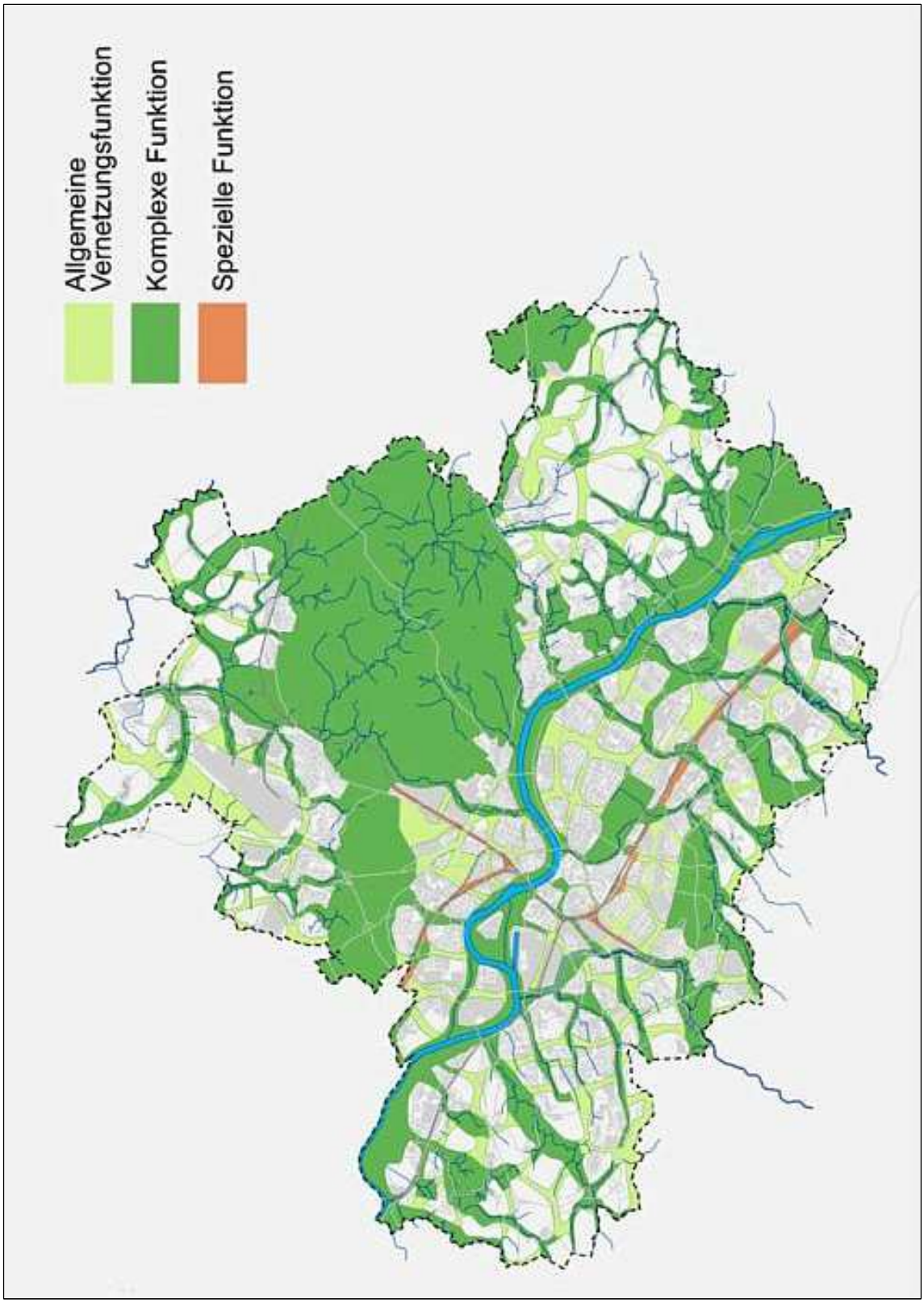


Abbildung 21: Raumstrukturelles Leitbild des Landschaftsplanes Dresden (Entwurf) - "Die kompakte Stadt im ökologischen Netz" (Korndörfer 2008)